چشم‌انداز مدیریت صنعتی
شماره ۲۸ ـ زمستان ۱۳۹۶
ص‌ص ۷۶ – ۴۱

تحلیل تأثیر عوامل مرتبط با سلول و عامل سرعت تقاضای مشتری بر عملکرد سلول ناب اولیه

اشکان عیوق*

چکیده

سلول‌هایی که در نخستین گام تحول ناب از طریق تغییر آرایش سیستم تولید، ایجاد می‌شوند، سلول‌های اولیه نام دارند و عملکرد آن‌ها از این نظر که جزو نخستین اقدامات ناب‌سازی عملیات تولید هستند، حائز اهمیت است. در این پژوهش عوامل مرتبط با انسان که نقش اساسی در تشریح عملکرد این سلول‌ها دارند در قالب عامل فاصله تخصیص پویا و به همراه دیگر عوامل مرتبط با سلول شامل اندازه سلول و نوع وظایف سلول مطالعه شده‌اند. زمان تکت به‌عنوان عامل مرتبط با مشتری مؤثر بر عملکرد سلول در نظر گرفته شده است. ابتدا مدل پژوهش بر مبنای تخصیص پویا و با لحاظ‌کردن اثرپذیری عملکرد اپراتور از نحوه تخصیص فرد طی افق برنامه‌ریزی در قالب ترکیب سه مدل متعادل‌سازی، تعیین توالی و تخصیص توسعه داده شد؛ سپس آزمایش‌ها بر اساس رویکرد طراحی آزمایش‌های تاگوچی اجرا شد و داده‌ها در قالب جواب‌های نزدیک به بهینه برای اهداف عملکردی سلول با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر به‌دست آمد. در گام بعد با انجام تحلیل واریانس یک و چند متغیره، اثر عوامل آزمون شد. نتایج پژوهش حاکی از پیچیدگی تأثیرپذیری عملکرد سلول از عوامل بوده و تعداد تخصیص پویای پیشنهادی به ازای ترکیبات مختلف دیگر عوامل به‌دست آمده است.

کلیدواژه‌ها: عملکرد سلول اولیه ناب؛ اندازه سلول؛ نوع سلول؛ زمان تکت؛ فاصله تخصیص پویا؛ تحلیل واریانس.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۳۰، تاریخ پذیرش مقاله:۱۳۹۶/۰۶/۲۰.

* استادیار، دانشگاه شهید بهشتی (نویسنده مسئول).

E-mail: a_ayough@sbu.ac.ir

۱. مقدمه

مزیت‌های سلول یو ـ شکل در سیستم تولید ناب از نتایج کایزن حرکتی محسوب می‌شود که بر اساس آن سلول‌ها از قابلیت بازمتعادل‌سازی برخوردار هستند [۴، ۱۵، ۶] و بر مبنای هدایت چندفرایندی عمل می‌کنند [۵، ۲۵، ۷]. عملیات استاندارد سلول‌های ناب، طریقه مدیریت کارها در سلول را تعیین می‌کند و ماندن (۱۹۹۳)، آن را «گردش شغلی» نامیده است. از نخستین و مهم‌ترین گام‌ها برای تغییر ساماندهی و آرایش سیستم تولید، با هدف ناب‌سازی فرایندهای عملیاتی، تشکیل و استقرار سلول‌های ناب اولیه[1] است [۴، ۲۳]. این سلول‌ها از طریق تغییر آرایش و استقرار مجدد ماشین‌آلات و مراکز کاری در قالب سلول‌های یو –شکل و آموزش اپراتورها در مورد نحوه کار در چارچوب عملیات استاندارد سلولی شکل می‌گیرند. اپراتورها چند ماشین و یا چند فرایند را در خلال کار در سلول انجام می‌دهند؛ درحالی‌که کار به‌صورت جریان تک‌قطعه‌ای در سراسر سلول در حال تکمیل است [۴، ۶]. هرگونه بهبود بیشتر با ارتقای سطح مهارت اپراتورها و طرح‌ریزی کایزن‌های فرایندی مناسب اجرایی می‌شود [۲۳]. این پژوهش به دنبال ارائه خطوط راهنمایی برای نحوه مدیریت سلول‌های اولیه ناب است. در ادامه پس از مرور اجمالی مبانی نظری موضوع و ارائه مدل مفهومی سنجش عملکرد سلول ناب، روش‌شناسی و گام‌های پژوهش مطرح می‌شود. با ارائه مدل برنامه ریاضی تحقیق در قسمت روش‌شناسی پژوهش گام‌های تحلیلی تحقیق در قسمت تحلیل داده‌ها و یافته ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرد. در انتها نیز پس از جمع‌بندی پیشنهاداتی برای انجام تحقیقات آتی ارائه شده است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

برای بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه سلول‌های ناب، باید مطالعاتی را مدنظر داشت که به عملیات استاندارد سلول ناب یا گردش شغلی که در این مقاله تخصیص پویا عنوان می‌شود، می‌پردازند. در مطالعات اخیر در زمینه تخصیص پویا اثرات تخصیص پویا بر عملکرد انسان کمتر مدل‌سازی و بررسی شده است و در ارتباط با سلول تولید ناب که در آن تخصیص پویا جزو عملیات استاندارد سلول به‌شمار می‌رود، این اثرات مطالعه نشده است [۱۹، ۱۸]. مک‌دونالد و همکاران (۲۰۰۹)، صرفاً بر وجه ارتقای مهارت تأکید داشته‌اند و عزیزی و همکاران (۲۰۱۰)، اثرات یادگیری، فراموشی و خستگی، انگیزش را مدل‌سازی کرده‌اند؛ اما در مطالعه آن‌ها اثرات تخصیص پویا مطالعه نشده است [۱۲، ۳]. به‌علاوه عملیات سلول ناب کمتر در تمامی مدل‌های موجود پوشش داده شده است. چنین پژوهشی از این نظر شایسته توجه است که بنا بر گزارش کانان و جنسن (۲۰۰۴)، در محیط سلولی، پویایی عملکرد فرد موجب تغییرات جدی در

1. Interim Cells

عملکرد سلول می‌شود [۹]. همچنین در تبدیل سیستم‌های تولید سنتی به ناب درنظرگرفتن ابعاد انسانی ضروری است [۱۷]. مک‌دونالد و همکاران (۲۰۰۹)، از نخستین پژوهشگرانی محسوب می‌شوند که مسئله زمان‌بندی تخصیص پویا را در سلول تولید ناب مدل‌سازی کرده‌اند. با این حال مدل آن‌ها تنها به ارتقای مهارت افراد توجه دارد. این مدل معیار خاصی برای تخصیص پویا در بر ندارد و نقش برنامه در پویایی عملکرد فرد نادیده گرفته شده است [۱۲]. ناکاده و نیشیواکی (۲۰۰۸) تخصیص بهینه به سلول را با فرض ایستایی عملکرد افراد به‌دست داده با این حال عملیات استاندارد سلول را مطالعه ننموده اند [۱۶]. شوچاک (۲۰۰۸)، با تأکید بر اصل سطح کار کامل در سلول ناب، مدل تخصیص به سلول را با هدف بیشینه‌سازی سطح کار اپراتورها مطالعه کرده است. در مطالعه او نیز عملکرد فرد ایستا بوده و افراد یکسان فرض شده‌اند. از دیگر محدودیت‌های پژوهش‌های ذکرشده، تک‌مدلی‌بودن سلول و محدودبودن اهداف به کمینه‌سازی تعداد کارکنان و یا هزینه‌های آموزش و موجودی است [۲۴]. این در حالی است که در هرگونه مطالعه در محیط سلولی، به‌کارگیری ساختار مسائل متعادل‌سازی و توالی مدل‌ها الزامی است.

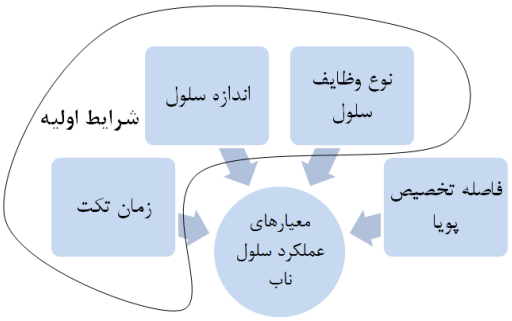
در پژوهش دیگری، احمد (۲۰۱۲)، به مطالعه عملکرد سلول ناب پرداخته است. این پژوهشگر با رویکرد سیستم دینامیک شرایط عدم‌اطمینان ناشی از تغییرات تقاضا و دسترسی به ماشین‌آلات در سلول را بررسی کرده و شاخص کمبود را به‌عنوان معیار عملکرد سلول مورد تجزیه‌وتحلیل قرار داده است [۲]. رهاب و احمد (۲۰۱۴)، با به‌کارگیری پویایی سیستم به ارزیابی ناب‌بودن شرکت تولیدی پرداختند و پویایی‌های مرتبط با جریان تک‌قطعه‌ای را از طریق تأثیرات زمان تکت تحلیل کردند [۲۲]. لو و یانگ (۲۰۱۴)، اجرای تکنیک‌های ناب در سیستم‌ها با سطح خودکارسازی بالا را به‌منظور بررسی تأثیرات تغییرات تقاضا و تغییرپذیری سیستم تولید صورت داده و نتیجه گرفتند که توانش مرکز کاری سرعت‌ساز از طریق حل مسئله بافر کار در جریان ساخت بهبود یافته است [۸]. هیچ‌یک از این پژوهش‌ها مشخصه‌های اصلی سلول ناب را در نظر نگرفته‌اند و واحد تحلیل و بررسی عملکرد در آن‌ها سیستم تولید است. عیوق و همکاران (۱۳۹۳)، برای نخستین بار به مطالعه زمان‌بندی گردش شغلی در سلول ناب پرداختند. این پژوهش زمان‌های پردازش دچار اثرات خستگی در نظر گرفته شده‌اند و به نحوی با تغییر نحوه تخصیص کارها در دوره‌های گردش سعی می‌شود تأثیرات خستگی کمینه شود. این پژوهش اثرات یادگیری و فراموشی را در بر نداشته و سلول را تک‌مدلی در نظر گرفته است [۱].

در سال‌های اخیر پژوهشگران از منظر تبدیل خطوط مونتاژ به سلول‌های ناب که سرو نامیده می‌شوند بهبود عملکرد کلی سیستم‌های تولیدی را موردبررسی قرار داده‌اند. ویو سان و همکاران (۲۰۱۶)، با ارائه چهار مدل به هم مرتبط به دنبال کشف رابطه میان زمان تکمیل بیشینه و تعداد سلول‌ها بوده‌اند [۲۷]. یانگ یو و همکاران (۲۰۱۷)، نیز الگوریتم های دقیق به‌منظور کاهش

تعداد نیروی انسانی و حفظ مدت زمان ساخت در مورد مسائل کوچک رائه داده‌اند [۲۹]. در پژوهشی دیگر ژیانگ لی و همکاران (۲۰۱۷)، با ارائه یک الگوریتم تکاملی مشارکتی دو مسئله تشکیل و تخصیص به سلول‌ها را به‌طور هم‌زمان حل کرده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که مکانیزم هماهنگی استفاده‌شده در این الگوریتم نتایج بهتری از رویکردهای موجود برای کمینه‌سازی زمان توانش کل و همچنین کمینه‌سازی ساعت کل کار اپراتورها به‌دست می‌دهد [۲۸].

عملیات استاندارد سلولی نوعی برنامه تخصیص پویا است که با تغییر اندازه دوره تخصیص پویا (فاصله تخصیص پویا) یا تعداد دفعات تخصیص پویا در یک افق برنامه‌ریزی مشخص اثرات متمایزی به‌دست می‌دهد. بررسی‌های صورت‌گرفته در مبانی نظری موضوع نشان می‌دهد که مطالعات معدود موجود در زمینه تعیین فاصله تخصیص پویا عمدتاً در وظایفی که الزامات ارگونومیکی دارند، انجام شده است؛ بنابراین در این پژوهش اثرات فاصله تخصیص پویا بر اهداف ذکرشده بالا موردمطالعه قرار خواهد گرفت. متغیرهای وابسته عملکرد سلول تولید ناب از اندازه سلول، زمان تکت و نوع سلول بر حسب وظایف آن نیز تأثیر می‌پذیرند. شوچاک (۲۰۰۸) در تحلیل مسئله تخصیص به سلول یو–شکل، خروجی سیپلکس را به تفکیک اندازه سلول تقسیم‌بندی کرده است [۲۴]. هرچند هدف این پژوهشگر بررسی و ارزیابی عملکرد نرم افزار در مسائل با اندازه‌های مختلف بوده است، با این حال نگاه اجمالی به نتایج گزارش‌شده توسط این پژوهش ایده تغییرپذیری اهداف مرتبط با عملکرد سلول ناب بر اساس اندازه سلول را برای تحلیل در این پژوهش القا می نماید. هر چه سلول بزرگ‌تر باشد، محدوده زمان تکت موجه بزرگ‌تر است و به‌تبع، متوسط مربع انحراف از زمان تکت و همچنین تعداد دفعات انحراف از زمان تکت تغییرپذیری بیشتری خواهد داشت؛ به‌علاوه ازآنجاکه در سلول بزرگ‌تر ممکن است به فرد وظایف بیشتری تخصیص یابد، واریانس اثرات عوامل انسانی نیز می‌تواند بیشتر از سلول کوچک باشد. برای زمان تکت کوچک‌تر و سلول کوچک‌تر تخصیص تعداد وظایف کمتر به فرد و تغییرپذیری کمتر متوسط مربع انحراف از زمان تکت و همچنین تغییرپذیری کمتر تعداد دفعات انحراف از زمان تکت انتظار می‌رود؛ بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که اندازه زمان تکت را که اثرات آن در تعداد اپراتورهای تخصیص‌یافته به سلول و درنتیجه رفتار فرد نمود پیدا می‌کند، در تشریح عملیات سلول تأثیرگذار پنداشت. به‌علاوه نقش نوع وظایف سلول در تبیین رفتار شخص و تأثیرپذیری آن از فواصل تخصیص پویا غیرقابل‌انکار است. نوع وظایف سلول در واریانس مقادیر متغیرهای وابسته مؤثر است. دامنه زمانی عملکرد فرد برای وظایف شناختی بیشتر از وظایف متحرک است. در ضمن اثرات فراموشی، هرچه وظایف ماهیت شناختیِ بیشتری داشته باشند، جدی‌تر است. بی‌تردید در سلول با وظایف عمدتاً متحرک فرد کمتر دچار فراموشی می‌شود و یادگیری سریع‌تر است و در عین حال خستگی شدیدتر خواهد بود؛ بنابراین

درنظرگرفتن نوع سلول نیز به‌عنوان عاملی در تحلیل‌های پس از بهینگی ضروری به نظر می‌رسد. شکل ۱، مدل مفهومی توسعه‌داده‌شده بر اساس عوامل زمان تکت، نوع وظایف در سلول و اندازه سلول، به‌منظور انجام تحلیل‌های فرابهینگی را ارائه می‌دهد. از این پس مجموعه شرایطی که توسط عوامل زمان تکت، نوع وظایف در سلول و اندازه سلول توصیف می‌شوند، شرایط اولیه نامیده می‌شود.



شکل ۱. مدل مفهومی توسعه‌داده‌شده بر اساس عوامل زمان تکت، نوع وظایف در سلول و اندازه سلول

در این پژوهش به‌منظور مطالعه عملکرد سلول تولید ناب، عملیات استاندارد سلول در کنار دیگر عوامل مؤثر، موردبررسی قرار خواهد گرفت.

۳. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش در سه گام عمده انجام شده است. در گام نخست، مدل ریاضی از مسئله تخصیص پویای اپراتور به سلول تولید ناب به‌صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی فرموله و تابع هدف آن ترکیب اهداف پیش‌گفته با استفاده از روش ال پی- متریک با فرض $p=1$ در نظر گرفته شد. ساختار مدل ترکیبی از مدل‌های کلاسیک متعادل‌سازی و تعیین توالی است که در مطالعات میلتنبرگ (۲۰۰۲)، کارا و همکاران (۲۰۰۸)، ازکان و همکاران (۲۰۱۰) و لیان و همکاران (۲۰۱۲) به‌کار گرفته شده است [۱۳،۱۰،۲۰،۱۱]. مدل برنامه ریاضی پژوهش در قسمت ۳-۱ مقاله ارائه شده است. در گام دوم، جواب‌های نزدیک به بهینه از طریق طراحی الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر (VNS)[1] ، به‌دست آمد. شکل ۲، سازوکار عمل این الگوریتم را نشان می‌دهد. در گام نهایی پژوهش، تحلیل اثرپذیری عملکرد سلول از عوامل به شرحی که در ادامه می‌آید، صورت گرفته است.

1. Variable Neiborhood Search (VNS)

	شوک	شماره حلقه جستجو	حلقه جستجوی محلی
ساختار همسایگی	۱ تغییر سطح تخصیص اپراتورهای پرمشغله و کم مشغله	۱-۱	تغییر مکان دو مدل
		۱-۲	تغییر مکان دو دوره گردش
		۱-۳	تغییر مکان دو دوره گردش
		۱-۴	تغیر مکان تمامی اپراتورها به اندازه یک واحد به مرکز کاری بعدی/قبلی
		۱-۵	تغییر مکان دو مدل
		۱-۶	تغییر سطح تخصیص اپراتورهای پرمشغله و کم مشغله
	۲ تغیر مکان تمامی اپراتورها به اندازه یک واحد درجهت حرکت عقربه‌های ساعت یا خلاف آن	۲-۱	تغییر مکان دو دوره گردش
		۲-۲	تغییر مکان دو مدل
		۲-۳	تغییر سطح تخصیص اپراتورهای پرمشغله و کم مشغله
	۳ تعویض یک اپراتور با اپراتور تخصیص نیافته به سلول	۳-۱	تغییر سطح تخصیص اپراتورهای پرمشغله و کم مشغله
		۳-۲	تغییر مکان دو مدل
		۳-۳	تغییر مکان دو دوره گردش

شکل ۲. سازوکار عمل الگوریتم جست‌وجوی متغیر برای تخصیص پویای اپراتور در سلول اولیه ناب

در گام سوم برای تحلیل ابتدا باید جامعه موردبررسی و نحوه نمونه‌سازی مشخص شود.

محیط‌های صنعتی را به لحاظ نوع کاربرد موضوع این پژوهش در آن‌ها می‌توان در دو دسته کلی مختلف قرار داد. دسته نخست، سیستم‌های تولید سلولی و دسته دوم کلیه سیستم‌های تولیدی قابل‌تبدیل به سیستم تولید سلولی را شامل می‌شود. جدول ۱، خلاصه مشخصه سلول‌های موردمطالعه توسط پژوهشگران دیگر را به‌دست می‌دهد. داده‌های پژوهش حاضر بر اساس این جدول شبیه سازی شده است. دسته دوم محیط صنعتی که می‌تواند به‌عنوان جامعه تحقیق مدنظر باشد، سیستم‌های تولیدی هستند که از طریق فناوری گروهی، کاهش زمان‌های آماده‌سازی و کاهش اندازه دسته‌های تولید و همچنین به‌کارگیری دیگر اصول عملیاتی سلول‌های ناب به سلول ناب مبدل می‌شوند.

سیستم‌های تولید گسسته، شامل سیستم تولید دسته‌ای، سیستم تولید جریان کارگاهی، سیستم تولید مبتنی بر سرعت اپراتور و مبتنی بر سرعت ماشین (با خطوط کانوایر یا خطوط حمل‌ونقل نیمه‌خودکار) قابلیت تبدیل به سیستم تولید سلولی را دارند و بنابراین در زمره جامعه این پژوهش قرار داده می‌شوند [۵،۲۳]. سیستم تولید که با تغییر چیدمان و به‌کارگیری اصول اولیه به شکل سلولی استقرار یافته و در مرحله تبدیل به سلول تولید ناب قرار دارد، سلول اولیه ناب[1] نامیده می‌شود [۵].

1. Interim Cell

جدول ۱. خلاصه مشخصه سلول‌های موردمطالعه تحقیقات پیشین

محقق	حدود مشخصه ساختاری سلول				
	تعداد ماشین	تعداد اپراتور	زمان پردازش دستی	زمان پردازش خودکار	زمان جابه‌جایی
اوهنو (۱۹۹۹)	۱۰–۲۰	حد پایین	----	----	۱–۲
ماندن (۱۹۹۳)	----	----	۱–۲۰	۵۰–۹۵	۳
سکاین (۱۹۹۱)	----	----	۱۵	۱۵–۳۰	۱–۳
میلتنبرگ (۲۰۰۱)	۳–۲۴	۱–۱۲	----	----	----
شوچاک (۲۰۰۸)	۵–۲۰	حد پایین	۵–۳۰	----	۱–۲
مک دونالد (۲۰۰۵)	۲۵	۱۳	۱۵–۸۲۰		----

داده‌های موردنیاز به‌منظور انجام این گام پژوهش از طریق حل مدل برای مسائل (سلول‌های نمونه) مهیا شد. بر مبنای مدل مفهومی پژوهش عوامل کنترلی آزمایش‌ها عبارت‌اند از: اندازه فاصله تخصیص پویا، نوع سلول و اندازه سلول به‌عنوان عوامل مرتبط با سلول و زمان تکت به‌عنوان عامل مرتبط با سرعت تقاضای مشتری. به این ترتیب برای عوامل یادشده سطوح سه‌گانه مطابق جدول ۲، در نظر گرفته شد.

کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین تعداد تخصیص پویا در افق برنامه‌ریزی بر این اساس در نظر گرفته شده‌اند که هیچ‌یک از اثرات عوامل انسانی بر دیگر اثرات فائق نشود، هزینه‌های کنترل برنامه تخصیص پویا معقول باشد و فرایند خوگرفتن اپراتورها به تخصیص پویا به‌عنوان بخشی از نحوه کارشان آسان‌تر شود. بدیهی است با درنظرگرفتن سطوح سه‌گانه برای عوامل، استعداد کاملاً فاکتوریالی ۸۱ سناریوی آزمایشی قابل‌طرح است که دست‌کم ۹ تا ۱۵ آزمایش (تکرار) در هر سناریو قابل‌اجرا است؛ بنابراین استفاده از طرح‌های نسبتی مقرون‌به‌صرفه به‌نظر می‌رسد؛ بنابراین در این پژوهش، آزمایش‌ها طبق رویکرد طراحی آزمایش‌های تاگوچی سناریوسازی می‌شود که با توجه به تعداد عوامل و سطوح آن‌ها، طرح متعامد L_9 را ارائه می‌دهد. این طرح حداکثر چهار عامل سه‌سطحی را دربرمی‌گیرد [۲۱]. جدول ۲، طرح آزمایش‌های L_9 و جانمایی عوامل موردمطالعه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در این رویکرد از طریق ایجاد مجموعه‌ای از آرایه‌های متعامد تعداد کمتری آزمایش برای دستیابی به نتایج قابل‌قبول انجام می‌شود.

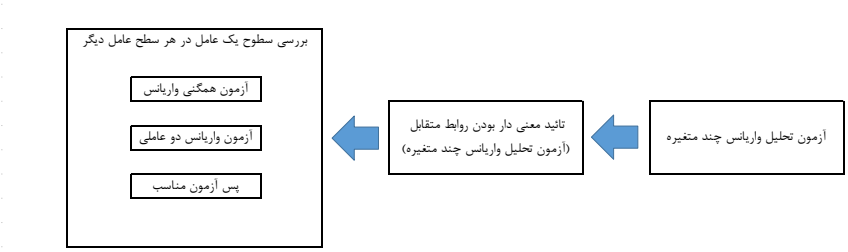
جدول ۲. عوامل و سطوح هر یک

نوع عامل		عوامل مرتبط با سلول			عامل مرتبط با سرعت تقاضای مشتری	
عوامل		اندازه		تعداد گردش	نوع وظیفه	تکت	
		مقدار	برچسب			مقدار	برچسب
سطوح	۱	کوچک	−۱	۱۰	شناختی	کوتاه	−۱
	۲	متوسط	۰	۵	بینابینی	متوسط	۰
	۳	بزرگ	۱	۳	متحرک	بلند	۱

جدول ۳. طرح آزمایش‌های L_9 *و جانمایی عوامل*

آزمایش	اندازه	تکت	تعداد گردش	نوع وظیفه
۱	کوچک	کوتاه	۱۰	شناختی
۲	کوچک	متوسط	۵	بینابینی
۳	کوچک	بلند	۳	متحرک
۴	متوسط	کوتاه	۵	متحرک
۵	متوسط	متوسط	۳	شناختی
۶	متوسط	بلند	۱۰	بینابینی
۷	بزرگ	کوتاه	۳	بینابینی
۸	بزرگ	متوسط	۱۰	متحرک
۹	بزرگ	بلند	۵	شناختی

بر اساس شکل ۳، پس از ایجاد داده‌ها بر اساس جدول‌های ۱ تا ۳ و حل مدل ریاضی توسط الگوریتم جست‌وجوی VNS، داده‌ها در سه مرحله توسط آزمون‌های تحلیل واریانس چندمتغیره و پس‌آزمون‌های مناسب بررسی و تحلیل می‌شوند.



شکل ۳. مراحل انجام آزمون های آماری تحقیق

مدل برنامه ریاضی پژوهش. شمارنده ها، متغیرهای تصمیم و پارامترهای مدل به شرح زیر تعریف شده اند:

اندیس‌ها

i: شمارنده هر اپراتور $\forall i = 1,2, \dots, I$

j: شمارنده هر مرکز کاری $\forall j = 1,2, \dots, J$

r: شمارنده هر دوره تخصیص پویا $\forall r = 1,2, \dots, R$

l: شمارنده هر سیکل کاری $\forall l = 1,2, \dots, \sum_m d_m, (\sum_m d_m) + 1, (\sum_m d_m) + 2, \dots$

m: شمارنده هر مدل $\forall m = 1,2, \dots, MO$

متغیرهای تصمیم

A_i: متغیر تخصیص اپراتور i به سلول

x_{ij}^r: مغیر تخصیص اپراتور i به مرکز کاری j در دوره‌ی تخصیص پویا r

W تعداد اپراتور تخصیص‌یافته به سلول

m_l^r: مدلی که در سیکل l از دوره تخصیص پویا r باید توسط سلول تولید شود

$x_{m,j}^{r,l}$: متغیر متغیر گرفتن مدل m در سیکل l طی دوره تخصیص پویا r روی مرکز کاری j (اگر مدل m در سیکل l طی دوره تخصیص پویا r روی مرکز کاری j باشد، آنگاه $x_{m,j}^{r,l} = 1$؛ در غیر این‌صورت $x_{m,j}^{r,l} = 0$)

$l_{max}^r(i)$: آخرین سیکل کاری در دوره تخصیص پویا r که توسط اپراتور i انجام شده است.

ADL_{ij}^r: متغر تخصیص مجاور سمت چپ مراکز کاری j و $J + 1 - j$

ADR_{ij}^r: متغر تخصیص مجاور سمت راست مراکز کاری j و $J + 1 - j$

$FFL_{i,s}^r$: متغر تعیین اولین مرکز کاری s در جلوی سلول که به اپراتور i در دوره تخصیص پویا r تخصیص یافته است.

$FBL_{i,s}^r$: متغیر تعیین اولین مرکز کاری s در پشت سلول که به اپراتور i در دوره تخصیص پویا r تخصیص یافته است.

$q_{iO,D}^r$: متیر تعیین مسیر جابه‌جایی اپراتور i در دوره تخصیص پویا r از مرکز کاری O به مرکز کاری D

$v_{i,j}^r$: متغیر تعیین اینکه آیا اپراتور i در دوره تخصیص پویا r در حین جابه‌جایی خود در سلول، مرکز کاری j را دور می‌زند یا خیر؟

s_{ij}^k: شماره دوره تخصیص پویای (S) که در آن مرکز کاری j به اپراتور i برای بار kاُم پس از یک یا چند دوره عدم‌تخصیص، تخصیص یافته است.

u_{ij}^{k}: شماره دوره تخصیص پویای (u) که در آن اپراتور i مرکز کاری j را برای بار kاُم، ترک می-کند.

K_{ij}: تعداد دفعاتی که مرکز کاری j به اپراتور i طی دوره‌هایی مشتمل بر یک یا چند دوره تخصیص پویا به‌صورت متوالی تخصیص یافته است.

$t_{i,j}^{r}(m,l)$: زمان پردازش عملیات مرکز کاری j توسط اپراتور i روی مدل m در سیکل کاری l از دوره تخصیص پویا r

$tt_{i,j}^{r}(m,l)$: زمانی که انتظار می‌رود اپراتور i روی مدل m در سیکل کاری l از دوره تخصیص پویا r اگر در مرکز کاری j حضور داشته باشد، صرف عملیات در مرکز کاری j کند.

$t_{i,j}^{r}(m)$: زمان پردازش عملیات مرکز کاری j توسط اپراتور i روی مدل m در انتهای دوره تخصیص پویا r که دچار اثرات فراموشی شده است.

$v_i^r(l)$: سطح انگیزه اپراتور i در ابتدای سیکل کاری l از دوره تخصیص پویا r

v_{0i}^{r}: سطح انگیزه اپراتور i در ابتدای دوره تخصیص پویا r

v_{1i}^{r}: سطح انگیزه اپراتور i در انتهای دوره تخصیص پویا r

$v_i^{initial}$: سطح انگیزه اولیه‌ی اپراتور i

p_i^r: نسبتی از مراکز کاری تخصیص‌یافته به اپراتور i در دوره تخصیص پویا r که در $POR-1$ دوره قبل از آن نیز به او تخصیص یافته است.

n_{ij}^{r}: متغیر تعیین اینکه مرکز کاری j در دوره تخصیص پویا r و $POR-1$ دوره قبل از آن به اپراتور i تخصیص یافته است یا خیر؟

$\bar{c}_i^r$: زمان چرخه متوسط برای اپراتور i در دوره تخصیص پویا r

$\bar{c}_{min}^{r}$: محوای کاری کمینه در خلال دوره تخصیص پویا r

b_i^r: متغیر تعیین اینکه اپراتور i در دوره تخصیص پویا r محتوی کاری کمتر از تکت دارد ($b_i^r = 1$) یا خیر

b^r متغیر تعیین اینکه در دوره تخصیص پویا r محتوی کاریکمینه کمتر از تکت است ($b^r = 1$) یا خیر؟

پارامترها

d_m: تقاضای مدل m در هر کوچک‌ترین مجموعه مدلمدل (MPS)

D_{RI}: طول دوره تخصیص پویا

$t_j^{min}(m)$: زمان کمینه انجام پردازش در مرکز کاری j روی مدل m

$t_j^{max}(m)$: زمان بیشینه انجام پردازش در مرکز کاری j روی مدل m

α_{L_i}: شاخص یادگیری اپراتور i

$e_{B_{ij}}$: ضریب تأثیر خستگی اپراتور i در تأخیر در انجام عملیات مرکز کاری j
α_{F_i}: شاخص فراموشی اپراتور i
α_{B_i}: شاخص خستگی اپراتور i
v^{min}: سطح انگیزه کمینه
v^{max}: سطح انگیزه بیشینه
POR : تعداد دوره‌ها به‌منظور بررسی تکرار تخصیص
$t_{i,j}^{1}(m)$: زمان پردازش اولیه مدل m توسط اپراتور i روی مرکز کاری j
$t_{1w_{s,j}}$: زمان جابه‌جایی اپراتور بین دو مرکز کاری s و j
t_{2w}: زمانی که هر اپراتور برای دورزدن یک مرکز کاری مجاور باید صرف کند.
Takt: زمان چرخه مطابق با تقاضای مشتری

محدودیت‌های مدل در هفت دسته محدودیت‌های کلاسیک مسئله تخصیص و تعیین تعداد اپراتور تخصیص‌یافته به سلول، محدودیت‌های کلاسیک مسئله تعیین توالی مدل‌ها، محدودیت‌های تعیین حوزه (ایستگاه) کاری اپراتورها، محدودیت‌های تعیین توالی کارهای تخصیص‌یافته به اپراتور (مسیر جابجایی اپراتور در سلول)، محدودیت‌های فواصل زمانی تخصیص/عدم‌تخصیص وظایف به هر اپراتور در طی افق برنامه‌ریزی، محدودیت‌های مرتبط با محاسبه توابع مشخصه‌های انسانی و زمان‌های پردازش و محدودیت‌های کلاسیک مسئله متعادل‌سازی سلول، تقسیم‌بندی می‌شوند. روابط ریاضی محدودیت‌های مدل در قالب روابط ۶ تا ۶۰ در ادامه ارائه شده است. مدل ریاضی پژوهش از طریق توسعه مدل مطالعه عیوق و همکاران (۱۳۹۳)، استخراج شده است. به این ترتیب که محدودیت‌های فواصل زمانی تخصیص/عدم-تخصیص وظایف به هر اپراتور در طی افق برنامه‌ریزی، محدودیت‌های مرتبط با محاسبه توابع مشخصه‌های انسانی و زمان‌های پردازش پس از ورود محدودیت‌های کلاسیک مسئله تعیین توالی مدل‌ها، بازنویسی شده‌اند. محدودیت‌های تعیین توالی به شرح روابط ۱۰-۱۳ هستند.
عملکرد سلول ناب اولیه در این پژوهش توسط اهداف زیر سنجیده می‌شود:
تطابق با زمان تکت: به‌دلیل اولیه‌بودن سلول تولید ناب موردمطالعه، هدف این است که تا حد امکان از نقض زمان تکت ممانعت شود. در این راستا هم میزان متوسط انحراف از زمان تکت و هم تعداد متوسط دفعات نقض زمان تکت باید کمینه شود. روابط ۱ و ۲ نحوه محاسبه این هدف در مدل پژوهش را به‌دست می‌دهد.

$$Z_{12} = \frac{1}{RW}\sum_{i}^{I}\sum_{r}^{R}(1-b_i^r)\frac{\bar{c}_i^r - Takt}{Uz_2} \qquad (۱)$$

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

که در آن Uz_2 حدّ بالای میزان انحرافات محتوی کاری هر اپراتور از زمان تکت است و طبق رابطه ۳، محاسبه می‌شود.

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

سطح کار کامل: از مهم‌ترین اصول تولید ناب که در سلول تولید ناب نمود ویژه‌ای می‌یابد، ارجح‌پنداشتن انسان در برابر ماشین است [۶]. بیکاری فرد در سلول تولید ناب ممنوع است؛ حتی اگر به بیکاری ماشین منجر شود؛ بنابراین در این مقاله سطح متوسط محتوی کاری که کمتر از زمان تکت است، کمینه می‌شود. رابطه ۴، نحوه محاسبه این هدف در مدل پژوهش را به‌دست می‌دهد.

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

تعداد اپراتور تخصیص‌یافته به سلول: ازجمله اهداف کلاسیک طراحی خط یا سلول‌های تولید کمینه‌کردن تعداد اپراتورهایی است که قرار است عملیات آن را انجام دهند. به این دسته از مسائل، مسئله متعادل‌سازی نوع یک اطلاق می‌شود [۱۰]. رابطه ۵، نحوه محاسبه این هدف در مدل پژوهش را به‌دست می‌دهد.

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

در مورد رابطه میان اهداف یادشده، بدیهی است که هر چه تعداد اپراتورهای تخصیص‌یافته به سلول بیشتر (کمتر) باشد، سطح کار کامل ممکن است کاهش (افزایش) یابد؛ همچنین هر چه تعداد اپراتورهای تخصیص‌یافته به سلول بیشتر (کمتر) باشد، متوسط میزان عدول از زمان تکت ممکن است کاهش (افزایش) یابد. به‌علاوه هر چه تعداد اپراتورهای تخصیص‌یافته به سلول بیشتر (کمتر) باشد متوسط تعداد دفعات عدول از زمان تکت ممکن است کاهش (افزایش) یابد؛ بنابراین به نظر می‌رسد *اهداف* Z_{12} *و* Z_2 *در یک جهت و اهداف* Z_{11} *و* Z_3 در جهت دیگری در مسیر جریان بهینگی حرکت می‌نمایند. به‌علاوه مدل با درنظرگرفتن چهار هدف بالا دارای جوابی ایده‌آل است که در آن اپراتور با مهارت کامل عملیات سلول را بدون نقض زمان تکت و بدون هیچ‌گونه بیکاری به انجام می‌رساند.

$$\sum_{i=1}^{I} x_{ij}^r = 1 \qquad \forall j\ \forall r \quad (۶)$$

$$M(1-A_i)+\sum_{j=1}^{J} x_{ij}^{r} \geq 1 \qquad \forall i\ ;\ \forall r; \qquad (۷)$$

$$-MA_i+\sum_{j=1}^{J} x_{ij}^{r} \leq 0 \qquad \forall i\ \ \forall r \qquad (۸)$$

$$\sum_{i=1}^{I} A_i \leq w \qquad (۹)$$

$$x_{m,j}^{r,l}=x_{m,j+1}^{r,l+1} \qquad \forall l=1,2,\dots,l_{max}^{r}-1;\ \forall j=1,2,\dots,J-1\ ;\ \forall r \qquad (۱۰)$$

$$x_{m,j}^{r,l}=x_{m,j}^{r,l+\sum_m d_m} \qquad \forall l=1,2,\dots,l_{max}^{r}-\sum_m d_m\ ;\forall j\ \forall r \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{m=1}^{MO} x_{m,J}^{r,l}=1 \qquad \forall l=1,2,\dots,\sum_m d_m\ \ ;\ \forall r \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{l=1}^{\sum_m d_m} x_{m,J}^{r,l}=d_m \qquad \forall m=1,2,\dots,MO\ \ ;\ \forall r \qquad (۱۳)$$

$$ADL_{ij}^{r}+ADR_{ij}^{r}+M_1(1-A_i)+x_{ij}^{r}+x_{i,J+1-j}^{r}\geq 1 \qquad \forall i\ \ \forall r\ \forall j=2,3,\dots,J_1 \qquad (۱۴)$$

$$M_1(ADL_{ij}^{r})+M_2(1-A_i)+\sum_{a=1}^{j-1} x_{ia}^{r}+\sum_{a=J+2-j}^{J} x_{ia}^{r}\geq 1 \qquad \forall i\ \forall r\ \forall j=2,3,\dots,J_1 \qquad (۱۵)$$

$$M_1(ADL_{ij}^{r}+1-A_i)+\sum_{a=1}^{j-1} x_{ia}^{r}+\sum_{a=J+2-j}^{J} x_{ia}^{r}\leq 2M_1 \qquad \forall i\ \forall r\ \forall j=2,3,\dots,J_1 \qquad (۱۶)$$

$$M_1(ADR_{ij}^{r})+M_2(1-A_i)+\sum_{a=j+1}^{J-j} x_{ia}^{r}\geq 1 \qquad \forall i\ \forall r\ \forall j=2,3,\dots,J_1 \qquad (۱۷)$$

$$M_1(ADR_{ij}^{r}+1-A_i)+\sum_{a=j+1}^{J-j} x_{ia}^{r}\leq 2M_1 \qquad \forall i\ \forall r\ \forall j=2,3,\dots,J_1 \qquad (۱۸)$$

$$x_{i_1 j}^{r}+x_{i,J+2-j}^{r}+x_{i_2 j-1}^{r}+x_{i,J+1-j}^{r}\leq 3 \qquad \forall r\forall i_1,i_2=1,2,\dots,I\ ;\ \forall j=2,3,\dots,J_2 \qquad (۱۹)$$

$$M_1(1-\sum_{j=1}^{s-1} x_{ij}^{r})+M_2 x_{is}^{r}+1-FFL_{i,s}^{r}\leq M_1+M_2 \qquad \forall r\forall i\ \forall s=2,3,\dots,J_1 \qquad (۲۰)$$

$$M_1(1-\sum_{j=1}^{s-1} x_{ij}^{r})+M_2 x_{is}^{r}\geq (M_1+M_2)FFL_{i,s}^{r} \qquad \forall r\forall i\forall s=2,3,\dots,J_1 \qquad (۲۱)$$

$$M_1(1-\sum_{j=1}^{s-1} x_{i,J-j+1}^r)+M_2 x_{i,J-s+1}^r+1-FBL_{i,J-s+1}^r \le M_1+M_2 \qquad \forall r\ \forall i\ \forall s=2,3,\dots,J_1 \qquad (۲۲)$$

$$M_1(1-\sum_{j=1}^{s-1} x_{i,J-j+1}^r)+M_2 x_{i,J-s+1}^r \ge (M_1+M_2)FBL_{i,J-s+1}^r \qquad \forall r\ \forall i\ \forall s=2,3,\dots,J_1 \qquad (۲۳)$$

$$M_1(1-(f-1)\sum_{j=J-s}^{J-s-f+2} x_{ij}^r)+M_2 x_{i,J-s+1}^r+M_3 x_{i,J-s-f+1}^r+1-q_{i,J-s+1,J-s-f+1}^r \le M_1+M_2+M_3 \qquad \forall r\ \forall i\ \forall s=2,3,\dots,J-1\ ;\ \forall f=1,2,\dots,J-s \qquad (۲۴)$$

$$M_1(1-(f-1)\sum_{j=J-s}^{J-s-f+2} x_{ij}^r)+M_2 x_{i,J-s+1}^r+M_3 x_{i,J-s-f+1}^r \ge (M_1+M_2+M_3)q_{i,J-s+1,J-s-f+1}^r \qquad \forall r\ \forall i\ \forall s=2,3,\dots,J-1\ ;\ \forall f=1,2,\dots,J-s \qquad (۲۵)$$

$$M_1 FFL_{i,s_a}^r+M_2 FBL_{i,s_b}^r+1-q_{i,s_b,s_a}^r \le M_1+M_2 \qquad \forall r\ \forall i\ \forall s_a=1,2,\dots,J_1\ ;\forall s_b=J_2,\dots,J \qquad (۲۶)$$

$$M_1 FFL_{i,s_a}^r+M_2 FBL_{i,s_b}^r \ge (M_1+M_2)q_{i,s_b,s_a}^r \qquad \forall r\ \forall i\ \forall s_a=1,2,\dots,J_1\ ;\forall s_b=J_2,\dots,J \qquad (۲۷)$$

$$M_1(1-q_{i,a,b}^r)+\sum_{j=a+1}^{b-1} v_{i,j}^r \ge b-a-1 \qquad \forall r\forall i\ \forall a=J_3,J_3+1,\dots,J_4\ ;\forall b=a+2,a+3,\dots,J_5 \qquad (۲۸)$$

$$-M_1 q_{i,a,b}^r+\sum_{j=a+1}^{b-1} v_{i,j}^r \le 0 \qquad \forall r\forall i\ \forall a=J_3,J_3+1,\dots,J_4\ ;\forall b=a+2,a+3,\dots,J_5 \qquad (۲۹)$$

$$M_1[\sum_{r=s}^{u_s} x_{ij}^r-(u_s-s+1)(x_{ij}^{u+1}+x_{ij}^{s-1}+1)]+s_{ij}^k \le s \qquad \forall i\ \forall j\ \forall s=1,2,\dots,R\ ;\forall u_s=s,s+1,\dots,R\ ;\ \forall k=1,2,\dots,k_{ij} \qquad (۳۰)$$

$$-M_1[\sum_{r=s}^{u_s} x_{ij}^r - (u_s - s + 1)(x_{ij}^{u+1} + x_{ij}^{s-1} + 1)] + s_{ij}^k \geq s \quad \forall i\ \forall j\ \forall s = 1,2,\dots,R\ ;\ \forall u_s = s, s+1, \dots, R\ ;\ \forall k = 1,2,\dots,k_{ij} \quad (۳۱)$$

$$M_1[\sum_{r=s}^{u_s} x_{ij}^r - (u_s - s + 1)(x_{ij}^{u+1} + x_{ij}^{s-1} + 1)] + u_{s,ij}^{\ k} \leq u_s \quad \forall i\ \forall j\ \forall s = 1,2,\dots,R\ ;\ \forall u_s = s, s+1, \dots, R\ ;\ \forall k = 1,2,\dots,k_{ij} \quad (۳۲)$$

$$-M_1[\sum_{r=s}^{u_s} x_{ij}^r - (u_s - s + 1)(x_{ij}^{u+1} + x_{ij}^{s-1} + 1)] + u_{s,ij}^{\ k} \geq u_s \quad \forall i\ \forall j\ \forall s = 1,2,\dots,R\ ;\ \forall u_s = s, s+1, \dots, R\ ;\ \forall k = 1,2,\dots,k_{ij} \quad (۳۳)$$

$$-M_1(\sum_{r=1}^{R} x_{ij}^r) + \sum_{r=1}^{s_{ij}^k} x_{ij}^r \leq 0 \quad \forall i\ \forall j\ \forall k = 1,2,\dots,k_{ij} \quad (۳۴)$$

$$\sum_{r=1}^{s_{ij}^k} [\![x_{ij}^{r-1} - x_{ij}^r]\!]^2 = (2k-1)A_i \quad \forall i\ \forall j\ \forall k = 1,2,\dots,k_{ij} \quad (۳۵)$$

$$\sum_{r=1}^{R+1} (x_{ij}^{r-1} - x_{ij}^r)^2 = 2K_{ij} \quad \forall i\ \forall j \quad (۳۶)$$

$$x_{ij}^0 = 0 \quad \forall i\ \forall j \quad (۳۷)$$

$$x_{ij}^{R+1} = 0 \quad \forall i\ \forall j \quad (۳۸)$$

$$t_{i,j}^r(m,l) = (t_{i,j}^{s_{ij}^k - 1}(m))[1 + \sum_{c=1}^{l-1} tt_{i,j}^r(m,c)]^{\alpha_{L_i}} + e_{B_{ij}} \frac{V^{UB} - V_i^r(l)}{V^{UB}} t_j^{min}(m) \quad \forall i\ \forall j\ ;\ \forall k = 1,2,\dots,K_{ij};\ \forall r = s_{ij}^k, \dots, u_{ij}^k \quad (۳۹)$$

$$t_{i,j}^r(m) = t_j^{max} - (t_j^{max}(m) - t_{i,j}^{u_{ij}^k}(m)) e^{-\alpha_{F_i}(r - u_{ij}^k) D_{RI}} \quad \forall i\ \forall j\ \forall m\ \forall k = 1,2,\dots,K_{ij} - 1;\ \forall r = u_{ij}^k + 1, \dots, s_{ij}^{k+1} - 1 \quad (۴۰)$$

$$-M_1 x_{mj}^{r,l} + tt_{i,j}^r(m,l) \leq 0 \quad \forall i\ \forall j\ \forall r \forall m \forall l = 1,2,\dots,l_{max}^r(i) \quad (۴۱)$$

(۴۲)

$$tt_{i,j}^{r}(m,l) \geq t_{i,j}^{r}(m,l) - (1 - x_{mj}^{r,l})t_{j}^{max}(m) \qquad \forall i\ \forall j\ \forall r \forall m \forall l = 1,2,\dots,l_{max}^{r}(i)$$

$$tt_{i,j}^{r}(m,l) \leq t_{i,j}^{r}(m,l)\ x_{mj}^{r,l} \qquad \forall i\ \forall j\ \forall r \forall m \forall l = 1,2,\dots,l_{max}^{r}(i) \quad (۴۳)$$

$$v_i^r(l) = v^{min} + \left(v_{0i}^{r} - v^{min}\right)e^{-\alpha_{B_i}\left(\sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{M}\sum_{C=1}^{l-1} tt_{i,j}^{r}(m,c)\right)} \qquad \forall i \forall r \forall l = 1,2,\dots,l_{max}^{r}(i) \quad (۴۴)$$

$$v_{0i}^{r} = v^{max} - (v^{max} - v_{1i}^{r-1})p_i^r \qquad \forall i \forall r \quad (۴۵)$$

$$v_{1i}^{r} = v_i^r(l_{max}^{r}(i)) \qquad \forall \mathrm{i} \forall \mathrm{r} \quad (۴۶)$$

$$v_{0i}^{1} = v_i^{initial} \qquad \forall i \quad (۴۷)$$

$$p_{ij}^{r} = min\{POR, r\} - \sum_{u=0}^{min\{POR-1,r-1\}} x_{ij}^{r-u} \qquad \forall \mathrm{i}\ \forall j\ \forall \mathrm{r} \quad (۴۸)$$

$$-p_{ij}^{r} + R \geq n_{ij}^{r}R \qquad \forall \mathrm{i}\ \forall j\ \forall \mathrm{r} \quad (۴۹)$$

$$-p_{ij}^{r} + 1 \leq n_{ij}^{r} \qquad \forall \mathrm{i}\ \forall j\ \forall \mathrm{r} \quad (۵۰)$$

$$p_i^r = \frac{\sum_{j=1}^{m} n_{ij}^{r}}{1 - A_i + \sum_{j=1}^{m} x_{ij}^{r}} \qquad \forall i \forall r \quad (۵۱)$$

$$l_{max}^{r}(i)\bar{c}_i^{\,r} = D_{RI}A_i \qquad \forall i \forall r \forall l = 1,2,\dots,l_{max}^{r}(i) \quad (۵۲)$$

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{l=l_{max}^{r}(i)} tt_{i,j}^{r}(m,l) + (l_{max}^{r}(i))\left(\sum_{s=1}^{J}\sum_{j=1}^{J} t_{1w_{s,j}} q_{i,s,j}^{r} + \sum_{j=1}^{J} t_{2w}\, v_{i,j}^{r}\right) \leq D_{RI}\, A_i \qquad \forall i \forall r \quad (۵۳)$$

$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{l=l_{max}^{r}(i)+1} tt_{i,j}^{r}(m,l) + (l_{max}^{r}(i) + 1)\left(\sum_{s=1}^{J}\sum_{j=1}^{J} t_{1w_{s,j}} q_{i,s,j}^{r} + \sum_{j=1}^{J} t_{2w}\, v_{i,j}^{r}\right) \geq D_{RI}\, A_i \qquad \forall i \forall r \quad (۵۴)$$

$$M_1(1 - A_i) + \bar{c}_i^{\,r} \geq \bar{c}_{min}^{\,r} \qquad \forall i \forall r \quad (۵۵)$$

$$\bar{c}_i^r \le Takt + M(1 - b_i^r) \qquad \forall i \forall r \quad (۵۶)$$

$$\bar{c}_i^r \ge Takt - Mb_i^r \qquad \forall i \forall r \quad (۵۷)$$

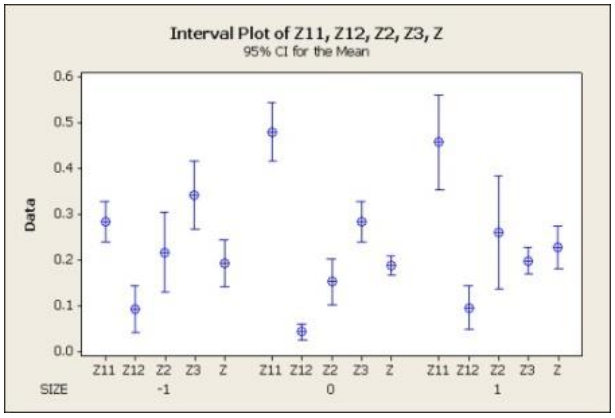
$$\bar{c}_{min}^r \le Takt + M(1 - b^r) \qquad \forall r \quad (۵۸)$$

$$\bar{c}_{min}^r \ge Takt - Mb^r \qquad \forall r \quad (۵۹)$$

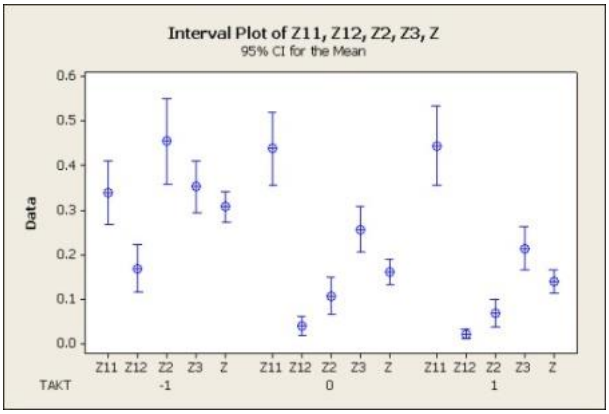
$$\bar{c}_i^r \ge \bar{c}_{min}^r A_i \qquad \forall i \forall r \quad (۶۰)$$

٤. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

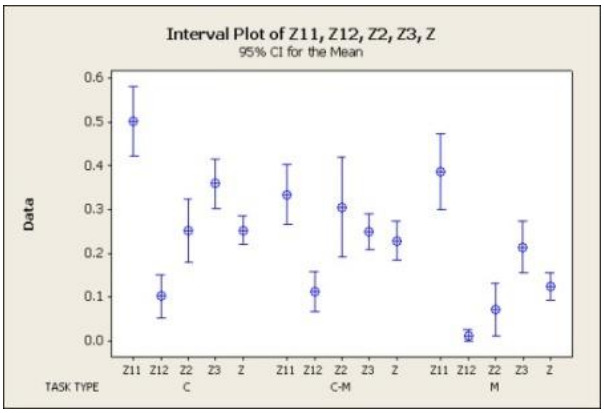
تحلیل مقدماتی را بدون در نظر گرفتن اثرات متقابل عوامل صورت می دهیم. بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده طبق شکل ۴، مشخص است که هر چه سلول بزرگ‌تر باشد، واریانس (درون‌گروهی) مربع انحراف منفی از زمان تکت بیشتر می‌شود. همچنین تعداد دفعات انحراف مثبت از زمان تکت در سلول بزرگ بیشتر از سلول کوچک است و بیشترین واریانس این متغیر وابسته در سلول‌های بزرگ قابل‌مشاهده است. به‌علاوه بیشترین واریانس بین‌گروهی برای متغیرهای Z_{11} و Z_2 وجود دارد. شاید بتوان گفت قسمتی از واریانس توضیح‌داده‌نشده توسط سطوح فواصل تخصیص پویا توسط عامل اندازه در مورد متغیرهای وابسته Z_{11} و Z_2 توضیح داده خواهد شد. در شکل ۵، نشان داده شده است که سه متغیر وابسته‌ی Z_{12} و Z_2 و Z_3 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 Z_{12} در سطوح متوسط و بزرگ زمان تکت بهینه شده است و این بهینگی به‌دلیل اندک‌بودن واریانس پایدار به نظر می‌رسد؛ همچنین واریانس درون‌گروهی متغیرهای وابسته به غیر از متغیر Z_{11} در هنگام کوچک‌بودن زمان تکت بالاتر است. نکته جالب‌توجه اینکه مقادیر مطلوب متغیرهای وابسته، به غیر از متغیر Z_{11}، در سطوح متوسط و بزرگ زمان تکت حاصل شده‌اند.



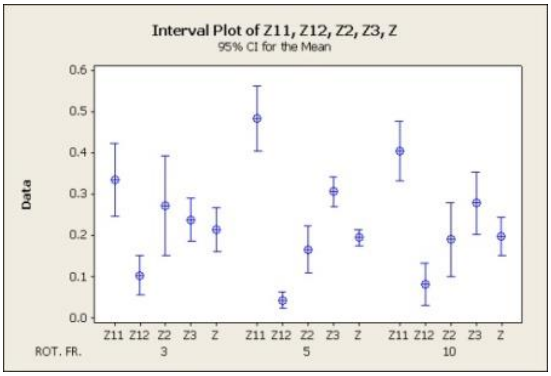
شکل ۴. گروه‌بندی مقادیر پاسخ در سطوح عامل اندازه سلول



شکل ۵. گروه‌بندی مقادیر پاسخ در سطوح عامل اندازه زمان تکت



شکل.۶ گروه‌بندی مقادیر پاسخ در سطوح عامل نوع سلول

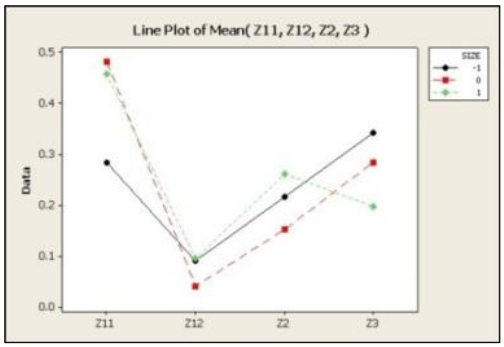


شکل ۷. گروه‌بندی مقادیر پاسخ در سطوح عامل دفعات تخصیص پویا

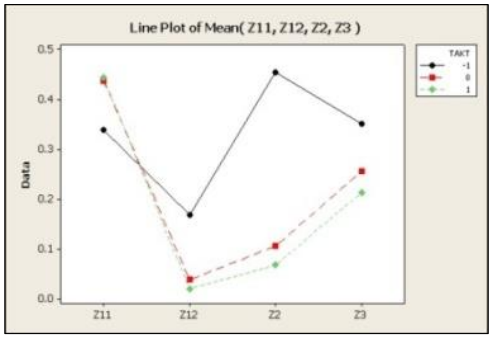
بعید نیست که زمان تکت نیز نقش مؤثری در توضیح واریانس متغیرهای وابسته داشته باشد. شکل ۶، نشان می‌دهد که سه متغیر وابسته Z_{12} و Z_2 و Z_3 در حالتی که وظایف بیشتر جنبه متحرک دارند، مقادیری بهتر با واریانس کمتر به‌دست آورده‌اند. از مقایسه سه شکل موردبحث و شکل ۷، می‌توان استدلال کرد که واریانس‌های بین‌گروهی برای متغیر تعداد (فواصل) تخصیص پویا به‌اندازه دیگر متغیرها نیست. برای بررسی وضعیت متوسط متغیرهای وابسته در هر یک از سطوح عوامل چهارگانه بالا به ترسیم نمودارهای چهارگانه در شکل ۸ تا ۱۱، پرداخته شده است. با توجه به اینکه تفاوت مقدار متوسط اهداف (متغیرهای وابسته) در اشکال ۸ و ۱۱ و به‌خصوص در شکل ۱۱، اندک است با اطمینان نمی‌توان در مورد بهترین سطح عوامل اندازه سلول و تعداد (فاصله) تخصیص پویا اظهارنظر کرد. با این حال تشابه رفتار سطوح این دو عامل جالب است. به‌طور مشابه در شکل ۹، تفاوت مقدار متوسط اهداف (متغیرهای وابسته) در سطوح متوسط و بزرگ زمان تکت بسیار اندک بوده و هرگونه نتیجه‌گیری مستلزم تحلیل‌های بیشتر و دقیق‌تر است. علی‌رغم این موضوع، مشخص است که سطح زمان تکت کوچک، به‌ویژه در متغیرهای وابسته Z_{12} و Z_2، با دیگر سطوح متفاوت است و سلول در این سطح در این متغیرها عملکرد پایین‌تری دارد؛ بنابراین چگونگی تعیین تخصیص پویا اهمیت بیشتری به هنگام کوتاه‌بودن زمان‌های تکت می‌یابد. سلولی که وظایف آن متحرک است، همان‌گونه که در شکل ۱۰، مشخص است در اهداف Z_{12} و Z_2 عملکرد بهتر و نزدیک به بهینه به‌دست می‌دهد. برای بررسی اثرات هم‌زمان چهار متغیر مستقل یادشده، با توجه به اینکه هر یک در سه سطح متمایز طبقه‌بندی می‌شوند باید از طراحی آزمایش‌ها بهره گرفت.

برای تحلیل بیشتر و کسب نتایج دقیق‌تر لازم است اثرات متقابل میان کلیه عوامل تأثیرگذار بر متغیرهای وابسته پژوهش موردتوجه قرار بگیرد؛ چراکه فرض معنادارنبودن اثرات متقابل بیشتر اوقات موردتردید است. با فرض یک سطح ثابت از متغیر فاصله (تعداد) تخصیص پویا، در

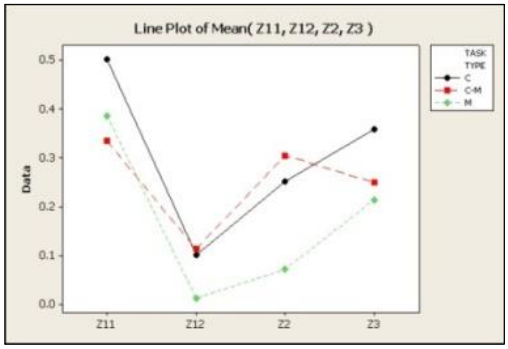
سلول‌های ناب کوچک‌تر، محدوده زمان تکت در مقایسه با سلول‌های بزرگ‌تر بازه کوتاه‌تری بوده و فرد به‌دلیل مواجه با تعداد وظایف کمتر احتمالاً اثرات خستگی و یادگیری بیشتر و اثر فراموشی کمتری خواهد داشت. این در حالی است که در سلول ناب بزرگ‌تر با توجه به اینکه بازه بزرگ‌تر زمان تکت وجود دارد احتمالاً با تخصیص تعداد افراد کمتر، اثرات خستگی و یادگیری کمتر و اثر فراموشی بیشتر خواهد بود.



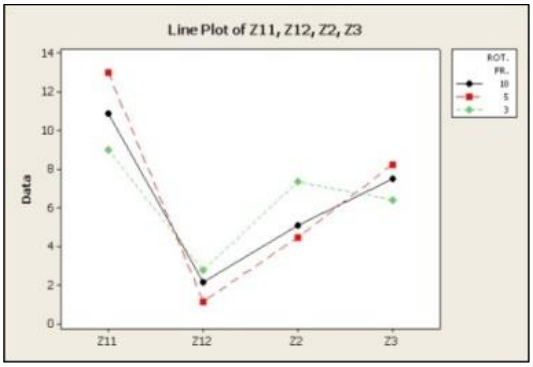
شکل ۸. مقادیر متوسط پاسخ در سطوح مختلف عامل اندازه سلول



شکل ۹. مقادیر متوسط پاسخ در سطوح مختلف عامل زمان تکت



شکل ۱۰. مقادیر متوسط پاسخ در سطوح عامل نوع سلول



شکل ۱۱. مقادیر متوسط پاسخ در سطوح عامل تعداد تخصیص پویا

اثرات خستگی و یادگیری و فراموشی نشان‌دهنده عملکرد فرد است و بنابراین مربع انحرافات از زمان تکت (به‌عنوان متغیرهایی وابسته) را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. استدلال پیش‌گفته علاوه بر فرض یک سطح ثابت از متغیر فاصله (تعداد) تخصیص پویا به فرض یکسان‌بودن وظایف به لحاظ شناختی یا متحرک‌بودن آن‌ها در سلول‌های موردمقایسه نیز وابسته است. در سلولی که وظایف عمدتاً متحرک است، اثرات یادگیری و فراموشی کندتر از اثرات یادشده در سلول متشکل از وظایف عمدتاً شناختی عمل می‌کند و بر پیچیدگی روابط متقابل متغیرهای موردبحث می‌افزاید.

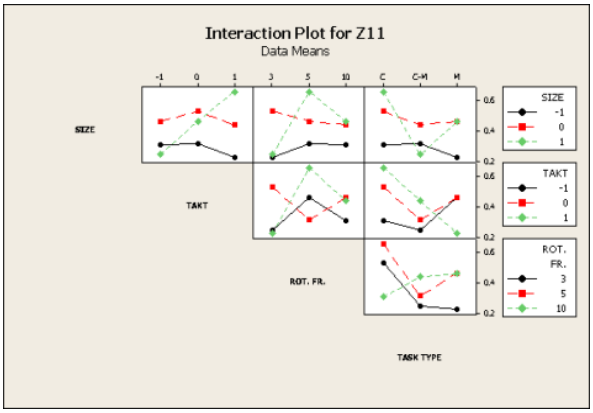
در این پژوهش روابط میان متغیرها (عوامل) که شرایط اولیه را تشکیل می‌دهند، مدنظر نیست؛ بلکه روابط تک‌تک این دسته از عوامل و عامل فاصله یا تعداد تخصیص پویا بررسی می‌شود. به‌منظور تأیید معناداربودن روابط متقابل بالا به لحاظ آماری، آزمون تحلیل واریانس چندمتغیره با ملاحظه اثرات متقابل برای هر زوج از عوامل موردمطالعه در جدول ۴، انجام شده است. با مراجعه به این جدول که بر اساس معیار بزرگترین ریشه رُی تهیه شده معنادار بودن اثرات هر یک از عوامل و اثرات متقابل آن‌ها تأیید می شود. این اثرات بر اساس دیگر معیارهای رایج یعنی که معیارهای پیلای، ویلکس و هتلینگ تائید می گردد به نحوی که بزرگترین سطح معنی دار مشاهده شده برابر با ۰/۰۰۷ است. در مورد عامل فاصله تخصیص پویا، طرحهای سه گانه جدول نشان می دهد که برای توصیف اثرات عامل فاصله تخصیص پویا لازم است دیگر عوامل و اثرات متقابل عامل فاصله ی تخصیص پویا با هر یک از عوامل نوع، اندازه سلول و زمان تکت مدنظر باشد.

شکل‌های ۱۲ تا ۱۵، به‌منظور بررسی اثرات متقابل دوبه‌دوی عوامل با استفاده از نرم‌افزار Minitab 16 ترسیم شده است.

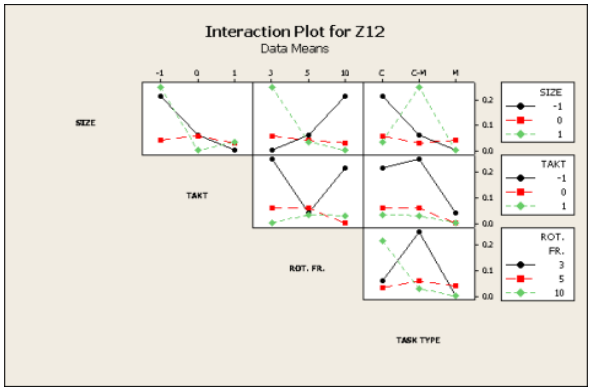
جدول ۴. آزمون تحلیل واریانس چندمتغیره دوطرفه برای عوامل فاصله تخصیص پویا و دیگر عوامل

طرح	اثر بزرگترین ریشه رُی(Roy)		
	مقدار	آماره فیشر	معنی‌داری
مقدار ثابت+ تعداد گردش+ نوع سلول + تعداد گردش*نوع سلول	۰/۰۵۷	۰	۰
مقدار ثابت+ تعداد گردش+ اندازه سلول + تعداد گردش*اندازه سلول	۰/۱۰۳	۱۴/۵۵	۰
مقدار ثابت+ تعداد گردش+ اندازه تکت + تعداد گردش*اندازه تکت	۰/۰۸۸	۱۶/۰۱۹	۰

همان‌گونه که مشاهده می‌شود تمامی روابط متقابل معنادار و نامنظم بوده و تفسیر روابط پیچیده است. از شکل ۱۲، مشخص است که با افزایش تعداد دفعات تخصیص پویا (کاهش فواصل تخصیص پویا) 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.

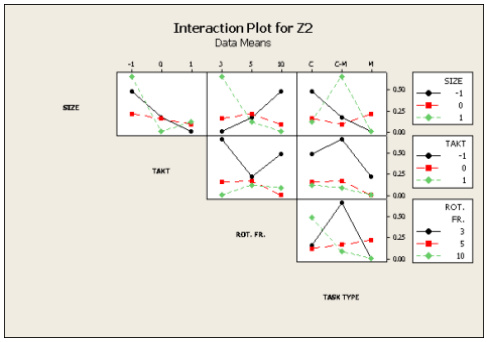


شکل ۱۲. اثر متقابل عوامل در تعیین متوسط متغیر وابسته مربع انحراف منفی از زمان تکت

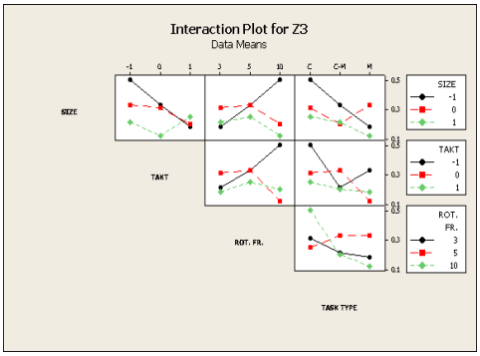


شکل ۱۳. اثر متقابل عوامل در تعیین متوسط متغیر وابسته مربع انحراف مثبت از زمان تکت

با توجه به اینکه بیشینه مقدار متوسط مربع انحراف منفی از زمان تکت یا بدترین سطح کار کامل اپراتور در سطوح بالای اندازه سلول و زمان تکت رخ داده است؛ بنابراین در چنین وضعیتی انتخاب فواصل تخصیص پویا متوسط موجب افت سطح کار کامل اپراتور خواهد شد و بهتر است فواصل تخصیص پویا کوتاه‌تر یا بلندتر انتخاب شده و از تخصیص پویا در فواصل متوسط اجتناب کرد. به‌علاوه، بهترین سطح کار کامل در فواصل تخصیص پویا بلند مشاهده شده است. با توجه به شکل ۱۳، متوسط مربع انحراف مثبت از زمان تکت در سطح تعداد تخصیص پویا متوسط، در سطوح مختلف عوامل اندازه تکت و اندازه سلول باثبات بوده و اندکی از مقدار کمینه که در دو سطح دیگر تعداد تخصیص پویا مشاهده شده، بیشتر است؛ همچنین برای سلول موتوری تغییرپذیری متوسط مربع انحراف مثبت از زمان تکت بسیار پایین مشاهده می‌شود. مشاهدات شکل ۱۴، نتایج مشابه شکل ۱۳، به‌دست می‌دهد. 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. شکل ۱۵، نشان می‌دهد که در سلول‌های کوچک و برای زمان تکت کوتاه با افزایش تعداد دفعات تخصیص پویا، متوسط متغیر تعداد اپراتور افزایش می‌یابد.



شکل ۱۴. اثر متقابل عوامل در تعیین متوسط متغیر تعداد دفعات انحراف مثبت از زمان تکت



شکل ۱۵. اثر متقابل عوامل در تعیین متوسط متغیر تعداد اپراتور

با این حال کمترین تعداد اپراتور در سطح بیشترین تعداد دفعات تخصیص پویا وقتی که زمان تکت متوسط است رخ می‌دهد؛ همچنین در این سطح از تعداد دفعات تخصیص پویا بی‌ثباتی متوسط تعداد اپراتور بالا است. در ادامه با توجه به اینکه اثر فاصله تخصیص پویا در آزمون تحلیل واریانس چندمتغیره در سطح ۵ درصد رد می‌شود، هر گونه استنتاج در مورد هر عامل به‌صورت کلی، معتبر نیست و باید سطوح بهینه فاصله تخصیص پویا در سطوح دیگر عوامل بررسی شود. خلاصه نتایج تحلیل واریانس برای دو عامل فاصله تخصیص پویا و هر یک از عوامل دیگر در جدول‌های ۵، ۸ و ۱۰ ارائه شده و مشاهده می‌شود که هر دو عامل، اثرات معنادار بر تمامی متغیرهای وابسته (پاسخ‌ها) دارند؛ همچنین اثرات متقابل معنادار بوده و درجه تأثیر آن بر پاسخ در مقایسه با خود عوامل در ۷۵ درصد موارد بیشتر است.

سطوح بهینه فاصله تخصیص پویا در سطوح عامل زمان تکت. بر اساس استدلال‌های ذکرشده، ضروری است که اثرات عامل فاصله تخصیص پویا در هر یک از سطوح دیگر عوامل بررسی شود. با توجه به معناداربودن اثرات دو عامل فاصله تخصیص پویا و زمان تکت و اثرات متقابل آن‌ها طبق نتایج جدول ۵، اثرات عامل فاصله تخصیص پویا در هر یک از سطوح عامل زمان تکت بررسی خواهد شد. ابتدا با استفاده از آزمون لوین[1] همگنی واریانس هر متغیر وابسته در هر سطح عامل زمان تکت بررسی می‌شود. ازآنجاکه اثر دیگر عوامل به‌صورت تصادفی فرض شده است؛ بنابراین عامل ایجادکننده واریانس علاوه بر تصادف ممکن است سطوح مختلف عامل فاصله تخصیص پویا باشد. اگر واریانس ایجادشده توسط سطوح فاصله تخصیص پویا با یکدیگر برابر باشد به نتایج آزمون تحلیل واریانس اعتماد بیشتری وجود دارد.

جدول ۵. تحلیل واریانس اثرات زوج عوامل فاصله تخصیص پویا و زمان تکت به همراه اثرات متقابل

هدف	آنالیز واریانس			برابری واریانس‌ها (آزمون لوین)		
	پی-*مقدار* برای			آماره آزمون	پی-مقدار	نتیجه
	رابطه متقابل	تکت	تعداد گردش			
Z_{11}	۰/۰۰۰	۰/۰۳۸	۰/۰۰۶	۵/۱۴	۰/۰۰۰	*
Z_{12}	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	۵/۱۴	۰/۰۰۰	*
Z_2	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۳/۹۰	۰/۰۰۱	*
Z_3	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۵۴	۱/۶۰	۰/۱۴۰	**

* برابری واریانس‌ها رد می‌شود ** برابری واریانس‌ها را نمی‌توان رد کرد

1. Leven Test of Homogeneity of Variances

با انجام آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه برای هر متغیر وابسته در هر سطح عامل زمان تکت، معناداربودن اثر فاصله تخصیص پویا در هر سطح عامل زمان تکت بر متغیر وابسته بررسی شده و در صورت معناداربودن این اثر، بر اساس نتایج آزمون لوین (همگنی واریانس‌ها)، نوع پس‌آزمون تعیین می‌شود. اگر واریانس‌ها همگن باشد از پس‌آزمون توکی[1] (۱۹۵۳)، استفاده می‌شود. این آزمون مقایسه چندگانه را مبتنی بر آماره دامنه استیودنت انجام می‌دهد و آزمونی محافظه‌کار محسوب می‌شود. درصورتی‌که واریانس‌ها همگن نباشد از آزمون تی دو تمهان[2] استفاده می‌شود که به مقایسه زوجی بر مبنای آماره تی می‌پردازد [۱۲]. نتایج آزمون‌ها در جدول ۶ ارائه‌شده و جدول ۷، نتایج آزمون تمهان را در موارد عدم‌همگنی واریانس در جدول ۶ به‌دست می‌دهد.

جدول ۶. نتایج بررسی تفاوت معنادار اثر سطوح فواصل تخصیص پویا بر متغیرهای وابسته در هر سطح زمان تکت

هدف	عامل	سطح	نتایج آزمون‌ها		
			نتیجه آزمون لوین	**نتیجه آزمون تحلیل واریانس**	**نتیجه آزمون** Post-hoc
Z_{11}	زمان تکت	کوتاه	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها در سطح ۵ درصد	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{11} در سطح ۲ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا بلند و متوسط – فاصله تخصیص پویا بلند بهترین (*)
		متوسط	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها در سطح ۵ درصد	معنادارنبودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{11} در سطح ۵ درصد	-------
		بلند	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها در سطح ۵ درصد	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{11} در سطح ۱ درصد	تفاوت معنادار هر سه سطح – فاصله تخصیص پویا بلند بهترین (*)
Z_{12}	زمان تکت	کوتاه	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها در سطح ۵ درصد	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{12} در سطح ۱ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا بلند و کوتاه با متوسط – فاصله تخصیص پویا متوسط بهترین (*)
		متوسط	رد فرض برابری واریانس‌ها	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{12} در سطح ۳ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا بلند و کوتاه – فاصله تخصیص پویا کوتاه بهترین (**)
		بلند	رد فرض برابری واریانس‌ها	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{12} در سطح ۲ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا بلند و متوسط – فاصله تخصیص پویا بلند بهترین

1. Tukey's Post Hoc Test
2. Tamhan's T2

					(**)
Z_2	زمان تکت	کوتاه	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها در سطح ۵ درصد	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_2 در سطح ۱ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا بلند و کوتاه با متوسط – فاصله تخصیص پویا متوسط بهترین (*)
		متوسط	رد فرض برابری واریانس‌ها	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_2 در سطح ۱ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا کوتاه با متوسط و بلند – فاصله تخصیص پویا کوتاه بهترین (**)
		بلند	رد فرض برابری واریانس‌ها	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_2 در سطح ۵ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا بلند با متوسط و کوتاه– فاصله تخصیص پویا بلند بهترین (**)
Z_3	زمان تکت	کوتاه	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها در سطح ۵ درصد	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_3 در سطح ۱ درصد	تفاوت معنادار هر سه سطح – فاصله‌ی تخصیص پویا بلند بهترین (*)
		متوسط	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها در سطح ۵ درصد	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_3 در سطح ۱ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا کوتاه با متوسط و بلند – فاصله تخصیص پویا کوتاه بهترین (*)
		بلند	رد فرض برابری واریانس‌ها در سطح ۷ درصد	معنادارنبودن اثرات تخصیص پویا بر Z_3 در سطح ۱ درصد	-------

(*) آزمون توکی (**) پس‌آزمون تمهان

جدول ۷. پس‌آزمون تمهان برای مقایسه اهداف در سطوح فاصله تخصیص پویا در سطوح زمان تکت

متوسط	**متوسط**	**بلند**	**بلند**	**سطح زمان تکت**	
Z_2	Z_{12}	Z_2	Z_{12}	**: هدف**	
Sig.				تعداد گردش در هر اندازه تکت	تعداد گردش در هر اندازه تکت
۰/۹۹۴	۱	۰/۰۰۸	۰/۰۳۳	۵	۳
۰/۰۰۰	۰/۰۳۰	۰/۰۱۵	۰/۰۶۲	۱۰	
۰/۹۹۴	۱	۰/۰۰۸	۰/۰۳۳	۳	۵
۰/۰۱۴	۰/۰۷۱	۰/۷۶۴	۰/۹۸۸	۱۰	
۰/۰۰۰	۰/۰۳۰	۰/۰۱۵	۰/۰۶۲	۳	۱۰
۰/۰۰۰	۰/۰۳۰	۰/۷۶۴	۰/۹۸۸	۵	

مشخص است که ناهمگنی واریانس‌ها در هر سطح عامل زمان تکت ممکن است وجود نداشته باشد. نتایج تحلیل واریانس نشان می‌دهد که تنها در مورد متغیر وابسته Z_3 و در سطح زمان تکت بلند به قطعیت می‌توان گفت که فاصله تخصیص پویا تأثیر معناداری ندارد. عدم‌تأثیر فاصله تخصیص پویا بر متغیر وابسته Z_{11} در سطح زمان تکت متوسط نیز در سطح معناداربودن ۸ درصد رد می‌شود.

بر اساس سطح بهینه‌ی فاصله‌ی تخصیص پویا در هر سطح عامل زمان تکت به تفکیک هر یک از متغیرهای وابسته می‌توان برداشت کرد برای متغیر وابسته Z_{11} اثرات فراموشی و خستگی تا حدی مجاز به افزایش هستند که اثر یادگیری موجب کم‌کاری اپراتور در ایستگاه کاری نشود. ازآنجاکه وقتی زمان تکت کوتاه است اپراتور کمتر در معرض کم‌کاری قرار خواهد داشت؛ بنابراین فاصله تخصیص پویا بلند احتمالاً می‌تواند تعادلی میان اثرات فراموشی و خستگی و یادگیری ایجاد کند؛ به‌نحوی‌که زمان‌های محتوی کاری اپراتور کمتر از زمان تکت نباشد. وقتی زمان تکت بلند است با اینکه اپراتور بیشتر در معرض کم‌کاری قرار دارد، با این حال انتخاب فاصله تخصیص پویا بلند کماکان می‌تواند اثرات خستگی و فراموشی و یادگیری را به‌منظور نزدیک‌شدن زمان‌های پردازش به حد مجاز (زمان تکت) متعادل کند. مطالعه اثر یادشده نشان می‌دهد که در فاصله تخصیص پویا کوتاه یا متوسط اثرات مثبت و منفی عوامل انسانی بر زمان‌های پردازش امکان بیشتری برای غلبه بر یکدیگر دارند که در این میان غلبه اثرات مثبت (یادگیری) محتمل است. در مورد متغیر وابسته Z_3 وقتی زمان تکت کوتاه است، برای اینکه بتوان تعداد افراد کمتری به سلول تخصیص داد باید فاصله تخصیص پویا به نحوی باشد که تعادل میان اثرات، زمان محتوی کاری را در حد زمان تکت حفظ کند؛ بنابراین فاصله تخصیص پویا بلند برگزیده می‌شود. هر چه زمان تکت بلندتر شود با انتخاب فواصل تخصیص پویا کوتاه‌تر می‌توان با غلبه اثرات یادگیری بر دیگر اثرات تعداد افراد کمتری به سلول تخصیص داد. با این حال وقتی زمان تکت به اندازه کافی بزرگ است به‌طور خودکار تعداد اپراتور کمتری به سلول تخصیص می‌یابد؛ بنابراین اثر فاصله تخصیص پویا در این وضعیت بر متغیر وابسته Z_3 معنادار نخواهد بود. استدلال یادشده نتیجه به‌دست‌آمده از تحلیل واریانس را تأیید می‌کند. در ارتباط با دو متغیر وابسته Z_{12} و Z_2 انتظار می‌رود نتایج یکسانی در هر زمان تکت حاصل شود که چنین نیز هست. وقتی تکت بلند است احتمال عدول محتوی کار ایستگاه‌های کاری از زمان تکت کمتر می‌شود؛ بنابراین اثرات خستگی و فراموشی کم‌اهمیت‌تر است و صرفاً تعادل بین اثرات به‌منظور تعهد به زمان تکت کفایت می‌کند؛ ازاین‌رو فاصله تخصیص پویا بلند انتخاب می‌شود. هر چه زمان تکت کوتاه‌تر می‌شود برای نزدیک‌شدن به محتوی کار ایستگاه کاری به آن باید اثرات یادگیری مؤثرتر از اثرات خستگی و فراموشی عمل کنند. طبق نتایج تحلیل واریانس در

فاصله تخصیص پویا متوسط اثرات یادگیری بیشتر بر آثار فراموشی و خستگی فائق می‌شود تا در فاصله تخصیص پویا کوتاه؛ بنابراین برای زمان تکت کوتاه، فاصله تخصیص پویا متوسط مقادیر بهتری از دو متغیر وابسته Z_{12} و Z_2 به دست می‌دهد.

سطوح بهینه فاصله تخصیص پویا در سطوح عامل اندازه سلول. در این قسمت سطوح بهینه تخصیص پویا در هر یک از سطوح اندازه‌ی سلول تحلیل می‌شود. جدول ۸، نتایج آزمون واریانس دوطرفه و آزمون لوین را نشان می‌دهد. در مورد اهداف Z_{12} و Z_2 به‌دلیل رد فرض برابری واریانس‌ها، نتایج آزمون تحلیل واریانس قابل‌اطمینان نیست. در مورد هدف Z_3 نیز در سطح ۶ درصد اثرات فاصله تخصیص پویا معنادار نیست. نکته جالب در جدول ۹، این است که در سطوح اندازه سلول، عامل فاصله تخصیص پویا در حدود ۳۳ درصد موارد بی‌تأثیر است.

ازآنجاکه در سلول بزرگ‌تر احتمالاً وظایف بیشتری به اپراتور تخصیص داده می‌شود، با غلبه اثر یادگیری بر اثرات خستگی و فراموشی علاوه بر بهبود عملکرد فرد که به کاهش تعداد اپراتور تخصیص‌یافته به سلول می‌انجامد، موارد نقض و میزان تعدی از زمان تکت نیز کاهش می‌یابد؛ بنابراین در سلول بزرگ فاصله تخصیص پویا کوتاه بهتر عمل می‌کند. با این حال در ارتباط با سطح کار کامل تعادل میان اثرات عوامل انسانی نقش مهمی ایفا می‌کند و در این راستا برای تحقق هدف یادشده فاصله تخصیص پویا بلند مناسب‌تر است. در سلول کوچک اهمیت تعادل میان اثرات عوامل انسانی بیشتر می‌شود و بنابراین فاصله تخصیص پویا بلند بهینه است.

جدول ۸. تحلیل واریانس اثرات زوج عوامل فاصله تخصیص پویا و اندازه سلول به همراه اثرات متقابل

هدف	آنالیز واریانس			برابری واریانس‌ها (آزمون لوین)		
	پی-مقدار برای			آماره آزمون	پی-مقدار	نتیجه
	زابطه متقابل	اندازه سلول	تعداد گردش			
Z_{11}	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	۰/۸۸	۰/۵۳۹	**
Z_{12}	۰/۰۰۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۵/۱۴	۰/۰۰۰	*
Z_2	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۳/۹۰	۰/۰۰۰	*
Z_3	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۵۴	۱/۶۰	۰/۱۴۰	**

* برابری واریانس‌ها رد می‌شود ** برابری واریانس‌ها را نمی‌توان رد کرد

جدول ۹. نتایج بررسی تفاوت معنادار اثر سطوح فواصل تخصیص پویا بر متغیرهای وابسته در هر سطح اندازه سلول

هدف	عامل	سطح	نتایج آزمون‌ها		
			نتیجه آزمون لوین	نتیجه آزمون تحلیل واریانس	نتیجه آزمون Post-hoc
Z_{11}	اندازه سلول	کوچک	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها	معنادارنبودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{11}	-----
		متوسط	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها	معنادارنبودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{11}	-----
		بزرگ	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{11} در سطح ۱ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا بلند و متوسط – فاصله تخصیص پویا بلند بهترین
Z_{12}	اندازه سلول	کوچک	رد فرض برابری واریانس‌ها	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{12} در سطح ۱ درصد	تفاوت معنادار سطوح فاصله تخصیص پویا بلند و متوسط با کوتاه – فاصله تخصیص پویا بلند بهترین (*)
		متوسط	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها	معنادارنبودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{12}	-----
		بزرگ	رد فرض برابری واریانس‌ها	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{12}	تفاوت معنادار تمامی سطوح فاصله تخصیص پویا – فاصله تخصیص پویا کوتاه بهترین (*)
Z_2	اندازه سلول	کوچک	رد فرض برابری واریانس‌ها	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_2	تفاوت معنادار تمامی سطوح فاصله تخصیص پویا – فاصله تخصیص پویا بلند بهترین (*)
		متوسط	رد فرض برابری واریانس‌ها در سطح ۲ درصد	معنادارنبودن اثرات تخصیص پویا بر Z_2 در سطح ۹ درصد	-----
		بزرگ	رد فرض برابری واریانس‌ها در سطح ۳ درصد	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_2 در سطح ۱ درصد	تفاوت معنادار تمامی سطوح فاصله تخصیص پویا – فاصله تخصیص پویا کوتاه بهترین (*)
Z_3	اندازه سلول	کوچک	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_3 در سطح ۱ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا کوتاه با متوسط و بلند – فاصله تخصیص پویا بلند بهترین
		متوسط	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_3 در سطح ۲ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا کوتاه با متوسط – فاصله تخصیص پویا کوتاه بهترین
		بزرگ	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_3 در سطح ۱ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا کوتاه با دیگر سطوح – فاصله تخصیص پویا کوتاه بهترین

(*) پس‌آزمون تمهان سایر موارد آزمون توکی

سطوح بهینه فاصله تخصیص پویا در سطوح عامل نوع سلول. از جدول ۱۰، این‌چنین استنتاج می‌شود که برای تمامی چهار متغیر وابسته، اثرات عوامل فاصله تخصیص پویا و نوع سلول و همچنین اثر متقابل این دو عامل معنادار است. بنا بر معناداربودن اثرات متقابل، جدول ۱۱، تغییرپذیری هر یک از متغیرهای وابسته در هر یک از سطوح عامل نوع سلول را بررسی می‌کند. نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه در جدول یادشده نشان می‌دهد در ۱۰۰ درصد موارد، اثر فواصل تخصیص پویا بر متغیرهای وابسته در هر سطح عامل نوع سلول معنادار است. در سلول شناختی به‌دلیل اهمیت بیشتر مهارت افراد و این موضوع که اپراتورها عمدتاً دارای مهارت کافی در تمامی وظایف نیستند، اثر یادگیری اهمیت خاصی دارد؛ بنابراین نتیجه تحلیل مبنی بر انتخاب دوره‌های تخصیص پویا متوسط و کوتاه به‌عنوان سطح مطلوب برای متغیرهای وابسته، از پیش انتظار می‌رفت. در ارتباط با سلول متحرک انتخاب فاصله تخصیص پویا بلند برای متغیر وابسته سطح کار کامل به تعادل اثرات عوامل انسانی اشاره دارد؛ درحالی‌که در سلول شناختی غلبه یادگیری بر دیگر آثار ارجح است.

جدول ۱۰. تحلیل واریانس اثرات زوج عوامل فاصله تخصیص پویا و نوع سلول به همراه اثرات متقابل

هدف	آنالیز واریانس			برابری واریانس‌ها (آزمون لوین)		
	پی–مقدار برای			آماره آزمون	پی–مقدار	نتیجه
	رابطه متقابل	نوع وظیفه	تعداد گردش شغلی			
Z_{11}	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	۰/۸۸	۰/۵۳۹	**
Z_{12}	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	۵/۱۴	۰/۰۰۰	*
Z_2	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۳/۹۰	۰/۰۰۱	*
Z_3	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۵۴	۱/۶۰	۰/۱۴۰	**

* برابری واریانس‌ها رد می‌شود ** برابری واریانس‌ها را نمی‌توان رد کرد

جدول ۱۱. نتایج بررسی تفاوت معنادار اثر سطوح فواصل تخصیص پویا بر متغیرهای وابسته در هر نوع سلول

هدف	عامل	سطح	نتایج آزمون‌ها		
			نتیجه آزمون لوین	نتیجه آزمون تحلیل واریانس	نتیجه آزمون Post-hoc
Z_{11}	نوع سلول	متحرک	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{11} در سطح ۲ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا بلند با کوتاه و متوسط – فاصله تخصیص پویا بلند بهترین
		بینابینی	عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا بلند با کوتاه –

				Z_{11} در سطح ۵ درصد	فاصله تخصیص پویا بلند بهترین
			شناختی	معنادار بودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{11} در سطح ۱ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا کوتاه با متوسط و بلند – فاصله تخصیص پویا کوتاه بهترین
Z_{12}	نوع سلول		متحرک	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{12} در سطح ۳ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا بلند و کوتاه با متوسط – فاصله تخصیص پویا بلند و کوتاه بهترین
		عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها	بینابینی	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{12}	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا بلند با کوتاه و متوسط – فاصله تخصیص پویا کوتاه بهترین
		رد فرض برابری واریانس‌ها در سطح ۲ درصد	شناختی	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_{12}	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا کوتاه با بلند و متوسط – فاصله تخصیص پویا متوسط بهترین (*)
Z_2	نوع سلول		متحرک	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_2	تفاوت معنی‌دار فاصله تخصیص پویا بلند و کوتاه با متوسط– فاصله‌ی تخصیص پویا بلند و کوتاه بهترین
		عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها	بینابینی	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_2	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا بلند با کوتاه و متوسط – فاصله تخصیص پویا کوتاه بهترین
		رد فرض برابری واریانس‌ها در سطح ۹ درصد	شناختی	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_2	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا کوتاه با بلند و متوسط – فاصله تخصیص پویا متوسط بهترین (*)
Z_3	نوع سلول	رد فرض برابری واریانس‌ها در سطح ۴ درصد	متحرک	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_3 در سطح ۱ درصد	
		عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها	بینابینی	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_3 در سطح ۱ درصد	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا متوسط با کوتاه و بلند– فاصله تخصیص پویا کوتاه بهترین
		عدم‌رد فرض برابری واریانس‌ها	شناختی	معناداربودن اثرات تخصیص پویا بر Z_3	تفاوت معنادار فاصله تخصیص پویا کوتاه با بلند و متوسط – فاصله تخصیص پویا متوسط بهترین

(*) پس‌آزمون تمهان سایر موارد آزمون توکی

با توجه به معناداربودن اثرات متقابل دو عامل، تنظیم سطح بهینه عامل تخصیص پویا در هر سطح عامل دیگر طبق جدول ۱۲، استخراج شده است. مشاهده می‌شود به‌طور کل در ۸۳ درصد موارد فاصله تخصیص پویا بلند برای دستیابی به سطوح بهتر هدف Z_{11} مناسب است؛ همچنین در بیش از ۵۷ درصد موارد هدف Z_3 با فاصله تخصیص پویا کوتاه بهتر تأمین می‌شود. اهداف Z_{12} و Z_2، همان‌گونه که انتظار می‌رفت، در سطوح فاصله تخصیص پویا رفتار مشابهی بروز می‌دهند؛ با این حال تعیین بهترین سطح فاصله تخصیص پویا برای این اهداف پیچیده به نظر می‌رسد؛ هرچند سطوح فاصله تخصیص پویا کوتاه و بلند در تحقق این هدف بهتر از سطح فاصله تخصیص پویا متوسط عمل می‌کنند. به‌منظور تعیین شرایط بهترین در مورد هر یک از اهداف به‌طور جداگانه با توجه به نتایج آزمایش‌های صورت‌گرفته می‌توان جدول ۱۳ را پیشنهاد کرد. همان‌گونه که مشخص است هدف سطح کار کامل در سلول هنگامی محقق می‌شود که سرعت تقاضای مشتری بالا بوده، سلول کوچک است و فعالیت‌های سلول ترکیبی از وظایف متحرک و شناختی باشد؛ البته به این شرط که تغییر نوع تخصیص به اپراتورها در فواصل کوتاه انجام شود. برای سلول کوچک وقتی سرعت تقاضای مشتری زیاد است اگر فاصله تغییر تخصیص متوسط برگزیده شود، بهترین سطح انحراف از زمان تکت حاصل خواهد شد و این موضوع به نوع وظایف سلول بستگی ندارد. واضح است، در شرایطی که سلول بزرگ و سرعت تقاضای مشتری کم باشد، امکان تأمین بهتر این هدف بیشتر فراهم می‌شود. در چنین موقعیتی اگر فاصله تغییر تخصیص متوسط در نظر گرفته شود، برای سلول شناختی، بهترین سطح هدف نقض زمان تکت، چه از لحاظ متوسط زمان و چه از لحاظ تعداد متوسط دفعات نقض زمان تکت، به‌دست می‌آید.

جدول ۱۲. تنظیم سطح بهینه عامل تخصیص پویا در هر یک از سطوح عوامل دیگر

عامل	سطح عامل	سطح بهینه فاصله تخصیص پویا			
		Z_{11}	Z_{12}	Z_2	Z_3
زمان تکت	کوتاه	بلند	متوسط	متوسط	بلند
	متوسط	-----	کوتاه	کوتاه	کوتاه
	بلند	بلند	بلند	بلند	-----
اندازه سلول	کوچک	-----	بلند	بلند	بلند
	متوسط	-----	-----	-----	کوتاه
	بزرگ	بلند	کوتاه	کوتاه	کوتاه
نوع سلول	متحرک	بلند	بلند/کوتاه	بلند/کوتاه	-----
	بینابینی	بلند	کوتاه	کوتاه	کوتاه
	شناختی	کوتاه	متوسط	متوسط	متوسط

جدول ۱۳. سطوح عوامل برای دسترسی به بهترین مقدار اهداف

هدف	زمان تکت	اندازه	نوع سلول	فاصله تغییر تخصیص
Z_{11}	کوتاه	کوچک	ترکیبی	کوتاه
Z_{12}	کوتاه	کوچک	متحرک	متوسط
	کوتاه	کوچک	شناختی	متوسط
	بلند	بزرگ	شناختی	متوسط
Z_2	متوسط	کوچک	متحرک	متوسط
	متوسط	کوچک	شناختی	متوسط
	بلند	بزرگ	شناختی	متوسط
Z_3	بلند	بزرگ	ترکیبی	کوتاه یا بلند
	بلند	بزرگ	شناختی	کوتاه یا بلند

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش عملکرد سلول‌های ناب اولیه که جزو نخستین اقدامات ناب‌سازی فرایندهای عملیاتی سیستم‌های تولید هستند، موردمطالعه قرار گرفت. ازآنجاکه این سلول‌ها با تخصیص پویای اپراتورها و در قالب جریان تک‌قطعه‌ای عمل می‌کنند ناگزیر عملیات استاندارد سلول ناب در مدل‌سازی تخصیص اپراتور به سلول‌های جدید مدنظر قرار گرفت؛ همچنین مهم‌ترین عوامل شامل اندازه سلول، اندازه دوره تخصیص پویا و نوع فعالیت‌های سلول تحت‌عنوان عوامل مرتبط با سلول و عامل زمان تکت به‌عنوان عامل تعیین‌کننده سرعت تقاضای مشتری به‌منظور تبیین عملکرد سلول ناب بررسی شد. نتایج پژوهش حاکی از پیچیدگی روابط متقابل عوامل در تبیین عملکرد سلول است؛ بنابراین نمی‌توان قانونی عمومی، مثلاً در مورد سلول‌های کوچک، ارائه داد؛ به‌نحوی‌که با تعیین تخصیص پویای خاصی عملکرد سلول را تضمین شود. با این حال نشان داده شد که اثر تمامی عوامل بر عملکرد سلول (در قالب چهار هدف متمایز) به لحاظ آماری معنادار است و نحوه این اثر در شرایط مختلف متفاوت است. به‌عنوان یک قاعده کلی و مستقل از شرایط اولیه مفروض می‌توان نتیجه گرفت که اندازه دوره تخصیص پویای بلند برای تحقق بهتر سطح کار کامل (هدف Z_{11}) و تخصیص اپراتور کمتر به سلول ناب (هدف Z_3) مناسب است. همچنین در سطح اندازه دوره تخصیص پویای متوسط، عملکرد سلول به لحاظ اهداف متوسط زمان انحراف از زمان تکت (هدف Z_{12}) و تعداد دفعات عدول از زمان تکت (هدف Z_2) پایایی بیشتری در حضور دیگر متغیرهای موردبررسی از خود نشان می‌دهد؛ البته فاصله تخصیص پویا متوسط، ممکن است به عملکرد بهینه سلول در این اهداف منجر نشود؛ ولی از این طریق عملکرد نزدیک به بهینه موردانتظار خواهد بود. نتایج تحلیل حاکی از این است که در ۸۳ درصد موارد شرایط اولیه، فاصله تخصیص پویا بلند برای دستیابی به سطوح بهتر هدف Z_{11} مناسب

است؛ همچنین در بیش از ۵۷ درصد موارد هدف Z_3 با فاصله تخصیص پویا کوتاه بهتر تأمین می‌شود. این پژوهش به شرایط اولیه‌ای دست یافت که می‌تواند هر یک از اهداف را در حد نزدیک به کامل محقق نماید. برای مثال، هدف سطح کار کامل در سلول هنگامی محقق می‌شود که سرعت تقاضای مشتری بالا بوده، سلول کوچک است و فعالیت‌های سلول ترکیبی از وظایف متحرک و شناختی باشد؛ البته به این شرط که تغییر نوع تخصیص به اپراتورها در فواصل کوتاه انجام شود. درمجموع مشخص شد که تعیین مقدار هر یک از متغیرهای وابسته بر اساس متغیرهای مستقل از پیچیدگی برخوردار است.

با توجه به وجود روابط متقابل نامنظم معنادار میان متغیرها، مدل‌های رگرسیونی غیرخطی، معادلات ساختاری و تحلیل مسیر می‌توانند در تبیین دقیق‌تر عملکرد سلول کاربرد مؤثری داشته باشند؛ همچنین مقایسه سیاست‌های تخصیص پویا مدنظر مدیریت و یا پیشنهادی در مبانی نظری موضوع، مانند تعقیب خرگوش، زنجیره‌سازی مهارت و غیره را می‌توان در محیط مهارت ناقص از دیگر زمینه‌های پژوهش‌های آتی دانست؛ به‌علاوه تسهیم وظایف در سلول که در بهبود عملکرد سلول مؤثر است را می‌توان در طراحی مدل ریاضی در نظر گرفت.

منابع

1. Ayough, A., Zandieh, M., Farsijani, H. & Dorri, B. (2013). Job Rotation Scheduling in a New Arranged Lean Cell, a Genetic Algorithm Approach. *Journal of Industrial Management Perspective, 4(1),* 33-59 (in Persian).

2. Ahmed, M. Deif (2012). Dynamic analysis of a lean cell under uncertainty. *International Journal of Production Research, 50,* 1127-1139.

3. 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.

4. Black, J. T., (2007). Design rules for implementing the Toyota Production System. *International Journal of Production Research, 45(16),* 3639-3664.

5. Black, J. T., & Hunter, S. L., (2003). Lean Manufacturing Systems and Cell Design, Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Michigan.

6. Hirano, H. (1987). JIT Factory Revolution. Productivitypress, Portland, OR.

7. Hyer, N., & Wemmerlov, U., (2002). Reorganizing the Factory. Productivity press, Portland, OR.

8. Jiunn-Chenn Lu & Taho Yang (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

9. 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.

10. Kara, Y., Ozcan, U., & Peker, A., (2007). An approach for balancing and sequencing mixed-model JIT U-lines. Int JAdv Manuf Technol DOI 10.1007/s00170-006-0437-2.

11. 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, iFirst.

12. 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.

13. Miltenburg, J. (2002), Balancing and scheduling mixed-model U-shaped production lines. *Int. J Flex Manuf Syst, 14(2),* 119-151.

14. Montgomery, D. C. (2000). Design and Analysis of Experiments. Fifth Edition, John Wiley & Sons, New York, NY.

15. Monden, Y. (1993). Toyota Production System: An Integrated Approach to Just In Time. Norcross, Institute of Industrial Engineers.

16. Nakade, K., & Nishiwaki, R. (2008). Optimal allocation of heterogeneous workers in a U-shaped production line. *Computers & Industrial Engineering, 54,* 432-440.

17. Needy, K. L., Norman, B. A., Bidanda, B., Tharmmaphornphilas, W., Ariyawongrat, P., & Warner, R.C., (2001). Human capital assessment in lean manufacturing. In: Proceedings of 2001 American society for engineering management conference, Huntsville: AL.

18. 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 Edited by Badiru, A.B., and New York: CRC Press 16-1-13 49 (10), 2833-2855.

19. 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.

20. 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.

21. Ranjit, R. (1990). A primer on the Taguchi method. 1st edition. Van Nostard Reinhold, USA.

22. Rehab, M. Ali, Ahmed M. Deif (2014). Dynamic Lean Assessment for Takt Time Implementation. *Procedia CIRP, 17,* 577-581.

23. Rother, M., & Harris, R. (2001). Creating continuous flow. The Lean Enterprise Institute, Inc.

24. Shewchuk, J. P. (2008). Worker allocation in lean U-shaped production lines. *International Journal of Production Research, 46(13),* 3485-3502.

25. Shingo, S. (1997). A Study of the Toyota Production System from an Industrial Engineering Viewpoint. Shingo, S.

26. Taguchi, G., Wu, Y., & Chowdhury, S. (2004). Taguchi's quality engineering handbook. Wiley, Hoboken

27. Wei Sun, Qianqian Li, Chunhui Huo, Yang Yu, & Ke Ma (2016). Formulations, Features of Solution Space, and Algorithms for Line-Pure Seru System Conversion. Mathematical Problems in Engineering, Article ID 9748378, 14 pages. doi:10.1155/2016/9748378

28. Xiang Li, Dongni Li, Xuhui Wu, Hong Zheng & Y. Yin (2017). A cooperative co-evolution approach for a line-seru conversion problem. IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), San Sebastian, pp. 1406-1411. doi: 10.1109/CEC.2017.7969468

29. Yang Yu, Wei Sun,Jiafu Tang,Ikou Kaku & Junwei Wang (2017). Line-seru conversion towards reducing worker(s) without increasing makespan: models, exact and meta-heuristic solutions. *International Journal of Production Research, 55*: 2990-3007.