

بهینه‌سازی قابلیت اطمینان نیروی کار با استفاده از زمانبندی شیفت‌های کاری

محمد اکبری*

تاریخ دریافت: ۹۶/۲/۱۱ - تاریخ پذیرش: ۹۷/۶/۱۲

چکیده

زمانبندی شیفت‌های کار و استراحت یکی از فرایندهای برنامه ریزی تولید است که با ارائه جداول زمانی کاری بهینه می‌تواند زمینه ارتقاء و توسعه سازمان و نیروی کار را فراهم کند. در این پژوهش با در نظر گرفتن مفهوم مهندسی عوامل انسانی سعی شده است تا مدل ریاضی زمانبندی شیفت کاری با هدف کمینه سازی خطاهای انسانی و افزایش قابلیت اطمینان نیروی کار ارائه شود. عوامل انسانی یادگیری، فراموشی، خستگی و استراحت از جمله عوامل مهم در افزایش یا کاهش خطای انسانی است که در مدل سازی حاضر مورد توجه قرار گرفته است. مدل ارائه شده از نوع عدد صحیح غیر خطی است. برای بررسی مدل و مطالعه عوامل انسانی، مثالهای کوچک متعدد با پارامترهای انسانی مختلف در سه سطح وظایف آسان، متوسط و سخت حل گردید. برای حل نرم افزار لینگو مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که با تغییر پارامترهای انسانی برای وظایف مختلف ساختار شیفت کاری و استراحت تغییر می‌یابد. با افزایش سختی وظایف و کاهش سرعت یادگیری، تخصیص زمان‌های استراحت به شروع زمان کاری نزدیک تر می‌شود. با کاهش سختی کار و افزایش سرعت یادگیری شیفت کاری بهینه به سمت شیفت‌های کاری بدون استراحت نزدیک می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که برای بهینه سازی قابلیت اطمینان می‌توان از مدل ارائه شده استفاده کرد و سازمانها و شرکت‌ها می‌توانند با در نظر گرفتن نوع وظایف و پارامترهای انسانی نیروی کارشان زمانبندی بهینه ای تعیین کنند.

واژگان کلیدی: زمانبندی شیفت، عوامل انسانی، خطای انسانی، قابلیت اطمینان نیروی کار

*استادیار گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه پیام نور، تهران (نویسنده مسئول)

مقدمه

افزایش رقابت در قیمت، کیفیت و سایر ابعاد بین محصولات و خدمات شرکت‌ها در بازار منجر شده است که سازمانهای تولیدی و خدماتی بیش از پیش به فکر توسعه سیستمها و فرایندهای تولیدی و خدماتی بهینه و قابل اطمینان باشند. نقص و کارکرد نامناسب محصول یک شرکت می‌تواند موفقیت سازمان در کسب و توسعه سهم بازار را کاهش داده و چشم انداز مطلوب سازمان‌ها را به مخاطره بیندازد. از این رو طراحی سیستم‌ها و فرایندهای تولید و خدماتی با قابلیت اطمینان بالا به یک دغدغه برای سازمانهای پیشرو تبدیل شده است. خطای انسانی یکی از عوامل اساسی در تولید محصولات معیوب است که برای سازمانها و محیط زیست هزینه بر می‌باشد (کرن و رفلینگاس^۱، ۲۰۱۳). با توجه به پژوهش‌های (آکینکی و همکاران^۲، ۲۰۰۶، گیوی، جابر و نیومن^۳، ۲۰۱۵) بیش از ۵۰٪ موارد مرتبط با تعمیر و اصلاح محصولات مرتبط با خطاهای انسانی است. علاوه بر ایجاد هزینه بیشتر، خطاهای انسانی تأثیرات منفی بر سلامت و امنیت دارد بطوری که نزدیک به ۹۰٪ جراحات محیط کاری مرتبط با خطاهای انسانی بیان شده است (ماتیسوس^۴، ۲۰۱۲). بنابراین قابلیت اطمینان نیروی کار یک مسأله چند بعدی است که تأثیرات متعددی بر عملکرد سازمان دارد. در این پژوهش سعی می‌شود که از جمله عوامل تأثیرگذار مهم بر خطاهای انسانی شناسایی و برای افزایش قابلیت اطمینان نیروی کار مدل ریاضی زمانبندی نیروی کار ارائه شود.

مبانی نظری

در این بخش پژوهشهای مرتبط با عوامل انسانی تأثیرگذار بر نرخ خطای انسانی و مدل‌های قابلیت اطمینان نیروی کار مورد بررسی قرار می‌گیرد. تحلیل قابلیت اطمینان انسان^۵ نرخ خطای انسانی را پیش‌بینی کرده و سعی در ارزشیابی تنزل سیستم انسان-ماشین با توجه به کاهش

-
- 1.Kern&Refflinghaus
 - 2.Akinci, Boukamp, Gordon, Huber, Lyons, & Park
 - 3.Givi, Jaber, Neumann
 - 4.Matthews
 - 5.Human Reliability Analysis (HRA)

عملکرد انسان، رویه‌های عملیاتی، فرایندها و سایر ویژگی‌های (انسان و ماشین) تأثیرگذار بر رفتار سیستم است (کاکیابو^۱، ۱۹۹۸). تحلیل قابلیت اطمینان انسان شناسایی، مدل‌سازی و کمی‌سازی احتمال خطای انسانی^۲ را مورد توجه قرار می‌دهد (گریف و ماهادیوان^۳، ۲۰۱۱). در مدل‌های تحلیل قابلیت اطمینان انسان، احتمال خطای انسانی بر مبنای فعالیت‌های کارگر و عوامل شکل دهنده عملکرد^۴ محاسبه می‌شود. عوامل شکل دهنده عملکرد مرتبط با محیط کار یا قابلیت‌های ذهنی و فیزیکی نیروی کار و یا هر دوی این عوامل است (دیپاسکال و همکاران^۵، ۲۰۱۳). مدل‌های تحلیل قابلیت اطمینان انسان به دو دسته اصلی مدل‌های کمی و مدل‌های کیفی تقسیم بندی می‌شود. مدل‌های کمی که جزو مدل‌های نسل اول می‌باشد نیروی کار را به عنوان یک عنصر مکانیکی که تعاملی با محیط کار و اطرافش ندارد می‌بیند. در مقابل مدل‌های نسل دوم (مدل‌های کیفی) به عوامل خطای انسانی و تعامل بین عوامل شکل دهنده عملکرد بسیار بیشتر توجه دارد. برخلاف مدل‌های کمی، مدل‌های کیفی بصورت تجربی اعتباردهی نشده است و بیشتر مدل‌های ارائه شده عملکرد ذهنی را بر مبنای اختصاص احتمالات عددی به عوامل شکل دهنده عملکرد بیان می‌کنند (گیوی، جابر، نیومن، ۲۰۱۵). با توجه به مطالعه انجام شده توسط گیوی و جابر، نقص‌های مدل‌های تحلیل قابلیت انسانی عبارتند از: ۱) داده‌های تجربی برای اعتباردهی به آنها وجود ندارد، ۲) بصورت عینی رفتار انسان را مدنظر قرار نمی‌دهند، ۳) مدل‌های موجود محدود به حوزه‌های کاربردی معدودی می‌شوند (همچون کارخانه‌های انرژی اتمی و سیستم‌های حمل و نقل).

در محیط‌های صنعتی از عوامل مهم تأثیرگذار بر افزایش خطای انسانی نبود رویه‌های عملیاتی شفاف و آموزش است. یادگیری و بهبود مهارت از عوامل انسانی است که با افزایش آن می‌توان نرخ خطای انسانی را کاهش و در نتیجه موجب افزایش قابلیت اطمینان سیستم شد

-
- 1.Cacciabue
 - 2.Human Error Probability (HEP)
 - 3.Griffith, Mahadevan
 - 4.Performance Shaping Factors (PSF)
 - 5.Di Pasquale, Iannone, Miranda, Riemma

(نوروزی و همکاران^۱، ۲۰۱۳). همچنین مطالعات نشان داده است که با استفاده از راه حل‌های ارگونومیک و برنامه‌های آموزشی کارکنان برای کاهش خستگی و بهبود یادگیری کارکنان خطاهای انسانی کاهش یافته است (باب^۲، ۲۰۰۵). دیلون^۳ خطاهای معمول انسان در فرایندهای مهندسی را چند دسته تقسیم بندی کرده است: خطای نگهداری، خطای اپراتور، خطای طراحی، خطای مونتاژ، خطای بازرسی، خطای رسیدگی^۴، خطای بهبود^۵ (دیلون^۶، ۲۰۰۹). قابلیت کارکنان همچون دانش و شایستگی، خستگی نیروی کار، پارامترهای وظیفه همچون حجم کاری و تکراری بودن آن، و محیط کاری در ایجاد خطا در مونتاژ نقش دارند. همچنین مطالعات نشان داده است که افزایش تجربه در انجام وظیفه موجب کاهش نرخ خطای کارگر می‌شود (گیوی، جابر، نیومن، ۲۰۱۵). یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر شرایط ذهنی و فیزیکی کارگر (و نتیجتاً میزان توانایی کارگر در مقابله و سازگاری با کار) درجه بهبود و تجدید قوای بعد از خستگی و استرس کار است. بهبود و تجدید قوای نیروی کار می‌تواند در قالب دوره زمانی که یک فرد نیاز دارد تا به سطح قبل از انجام کار از بعد استرس برسد، تعریف شود (جانسن، کانت و واندن برند^۷، ۲۰۰۲). همچنین در پژوهش جانسن و همکاران بیان شده است که بهبود نیروی کار در قالب استراحت می‌باید در طول فرایند ساعات کاری دیده شود و نه فقط در قالب زمان ناهار، روزهای استراحت، تعطیلی آخر هفته و یا تعطیلات تابستانی. استفاده از زمانهای استراحت حتی کوتاه در طول شیفت کاری می‌تواند مفید باشد. کولاماس^۸ با ارائه مدل برنامه ریزی پویا به بررسی بهبود کیفیت بواسطه طراحی محصول و منحنی یادگیری پرداخت. نتیجه این پژوهش نشان داد که نرخ یادگیری غیر یکنواخت بر ارزش، هزینه و کیفیت محصول تأثیر دارد (کولاماس، ۱۹۹۲). فرانسسینی و گالتو^۹ در مقاله

1. Noroozi, Khakzad, Khan, MacKinnon, Abbassi

2. Bubb

3. Dhillon

4. Handling Error

5. Contributory Error

6. Dhillon

7. Jansen, Kant, Van den Brandt

8. Koulamas

9. Franceschini & Galetto

شان به ارائه روشی برای تخمین اولیه نقص تقریبی در کارخانه تولیدی با استفاده از پیش بینی منحنی یادگیری پرداختند. در این مقاله به این موضوع پرداخته شده است که تغییرپذیری تقریبی در فرایند تولید با توجه به افزایش یادگیری نیروی کار کاهش می‌یابد (فرانسسینی و گالتو، ۲۰۰۲). گروس و گلاک^۱ در مقاله شان با استفاده از داده‌های واقعی به بررسی تأثیر منحنی یادگیری بر طراحی سیستم بسته بندی سفارشات در حوزه تدارکات پرداختند (گروس و گلاک، ۲۰۱۳). یافته‌های این پژوهش با توجه به تأثیر یادگیری بر کاهش خطای انسانی نشان داد که در فرایند برنامه ریزی تدارکات به عنوان مثال در زمانبندی کار، انبار و چیدمان بهتر است که یادگیری انسان لحاظ شود. در ادامه گروس و گلاک به منظور افزایش اثربخشی و کارایی در فرایند تدارکات به مطالعه تأثیر فاکتورهای انسانی پرداخته اند (گروس و همکاران، ۲۰۱۴). در این پژوهش با توجه به کمبود پژوهش نقش عامل انسان در توسعه مدل‌های برنامه ریزی فرایند بسته بندی سفارشات، مدل مفهومی ارائه شده است. در ارائه این چارچوب مفهومی این فرضیه مدنظر قرار گرفته شده است که بکارگیری عامل انسانی در مدل‌های برنامه ریزی موجب بهبود عملکرد سیستم بسته بندی و رفاه کارکنان می‌شود. این چارچوب مفهومی با بررسی پیشینه پژوهش و مستندات ارائه شده است. مطالعات تاکر^۲ با تمرکز بر ریسک اتفاقات در محیط کاری و فرضیه تأثیر مثبت زمان‌های استراحت بر کاهش این ریسک انجام شد. این مطالعات با استفاده از داده‌های واقعی در شرکت خودروسازی انجام گرفت و نتایج نشان داد که با گذشت زمان انجام کار از آخرین استراحت میزان اتفاقات افزایش می‌یابد. در این مطالعه بعد از هر دو ساعت کاری ۱۵ دقیقه استراحت در نظر گرفته شد و نتایج نشان داد که استراحت باعث خنثی سازی ریسک جمعی می‌شود، و ریسک اتفاقات کاری بعد از استراحت به میزان ریسک در شروع کاری نزدیک (کاهش می‌یابد) می‌شود (تاکر، فولکارد، مکدونالد، ۲۰۰۳، فولکارد و تاکر، ۲۰۰۳). تحقیق انجام شده با موضوع بیان قابلیت نیروی انسانی با استفاده از مفهوم مجموعه فازی (اونیساوا^۳، ۱۹۸۸) نشان

1. Groose, Glock

2. Tucker, Folkard, Macdonald

3. Onisawa

داد که زمان مورد برای انجام کار و نرخ خطا از جمله عوامل مهم و تأثیرگذار بر قابلیت اطمینان نیروی کار است. با توجه به پژوهش المراقی و همکاران^۱ پارامترهای تأثیرگذار بر خطا خطا انسانی در جدول ۱ نشان داده شده است. این پارامترهای در دو طبقه پارامترهای مرتبط با یادگیری و پارامترهای مرتبط با خستگی تقسیم بندی شده است (المراقی، نادا، المراقی، ۲۰۰۸).

جدول ۱. طبقه بندی پارامترهای تأثیرگذار بر خطای انسانی

پارامترهای تأثیرگذار بر یادگیری	پارامترهای تأثیرگذار بر خستگی
پیچیدگی و تکرار وظیفه	پیچیدگی و تکرار وظیفه
سطح مهارت	محیط کاری
آموزش	سطح مهارت
اخلال در کار	استرس
فراموشی	طراحی ارگونومیک محیط کاری
وظایف چند مهارتی	سرعت خط تولید
گردش شغلی	شخصیت کارگر
تخصیص مجدد وظیفه	استراتژی مدیریت
طراحی مجدد وظیفه	زمان انجام وظیفه
تیم‌های کاری	تیم‌های کاری

با توجه به پژوهش اسمیت^۲ و استفاده از روش ارزیابی و کاهش خطای انسانی^۳، احتمال رخ دادن خطا توسط کارگری که کاملاً با یک وظیفه آشنا نیست برابر ۵۵٪ و توسط کارگری که کاملاً با وظیفه آشنا است و بصورت تکراری آن را انجام می‌دهد برابر ۰/۰۰۰۴ است (اسمیت، ۲۰۱۱). مدل مورد استفاده اسمیت یادگیری کارکنان را از بعد تأثیرگذاری منفی و مثبت مدنظر قرار می‌دهد. گیونتینی و لابراتوریس^۴ در مقاله شان به ارائه مدل ریاضی قابلیت اطمینان نیروی کار در سیستم انسان-ماشین پرداختند. در این مدل ریاضی پارامترهای یادگیری و خستگی با استفاده از توزیع وایبول مدنظر قرار گرفت. اگرچه پارامتر فراموشی و استراحت در

1.ElMaraghy, Nada, ElMaraghy

2. Smith

3. Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART)

4.Giuntini, Laboratories

این مدل‌سازی مطالعه نشده است و مدل ارائه شده فقط برای تخمین نرخ خطای انسان در یک شیفت کاری بدون استراحت و توقف مناسب است و برای ارائه برنامه زمانبندی شیفت برای کاهش و مدیریت قابلیت اطمینان نیروی کار مناسب نیست (گیونتینی و لاباتوریس، ۲۰۰۰). میزوفسکی^۱ برای تشریح خطای انسانی در فرایندهای تولیدی با در نظر گرفتن پارامترهای یادگیری و خستگی مدل ریاضی احتمالی ارائه کردند. در این پژوهش نیز عوامل استراحت و فراموشی در نظر گرفته نشد و فرضیه ارائه شده بر این ادعا است که در فرایندهای صنعتی دلایل خاصی از خطاها بسیار زیاد مرتبط با تخصیص مقدار زمان ناکافی برای انجام صحیح عملیات کاری می‌باشد (میزوفسکی، ۲۰۱۰). کامپر و پادولا^۲ در پژوهش میدانی به بررسی تأثیر گردش شغلی بر خروجی کار، صدمات، ناراحتی‌های اسکلتی و خستگی پرداخت. یافته‌های این پژوهش نشان داد که گردش شغلی تأثیر مثبتی بر خستگی فیزیکی دارد (کامپر و پادولا، ۲۰۱۴). میکلاس و همکاران^۳ برای محاسبه نرخ خطا از تابع مطلوبیت ارائه شده توسط المراقی استفاده کرد. در این پژوهش تأثیر گردش شغلی بر کیفیت محصول نهایی در محیط تولیدی مبتنی بر نیرو کار مورد مطالعه قرار گرفت. مشخص گردید که توزیع خستگی و غنی سازی محیط کاری بر کاهش خطای انسانی در مونتاژ تأثیر مثبت دارد. همچنین این پژوهش نشان داد که بکارگیری گردش شغلی می‌تواند بطور معنی داری کیفیت محصول را از طریق کاهش بسیار زیاد تعداد خطاهای انسانی در خط مونتاژ ارتقاء دهد اگرچه در این پژوهش نشان داده نشده است که چگونه استراحت و تجدید قوای بعد از خستگی بر نرخ خطا تأثیر دارد (میکلاس، ماکریس و کریسولوریس، ۲۰۱۳). پژوهش گیوی و جابر سعی در ارائه مدل ریاضی قابلیت اطمینان نیروی کار با در نظر گرفتن پارامترهای یادگیری، فراموشی، خستگی و بهبود داشتند (گیوی، جابر و نیومن، ۲۰۱۵). در این مطالعه با استفاده از توابع نمایی برای شبیه سازی تأثیر عوامل انسانی و تحلیل آزمایشی، تأثیر پارامترهای مدل بر نرخ خطا و رفتار مدل مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه مدل ارائه شده آنان تحلیلی بوده و برای برنامه ریزی و ارائه

1.Myszewski

2.Comper, Padula

3.Michalos, Makris, Chryssolouris

جدول زمانی برای مجموعه ای از کارکنان و گردش شغلی بین ایستگاهها نیاز به ارائه مدل تحقیق در عملیات و حل آن هستیم. مطالعه پیشینه پژوهش نشان می دهد که برای زمانبندی، گمارش کارکنان و گردش شغلی آنان و به عبارت دیگر ارائه یک جدول زمانی بهینه با در نظر گرفتن عوامل انسانی و پیشینه سازی قابلیت اطمینان کارکنان نیازمند مدل سازی تحقیق در عملیات هستیم.

روش شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نوع کاربردی و توسعه ای است و در راستای پیشینه پژوهش سعی در توسعه مدل های زمانبندی کارکنان و مهندسی عوامل انسانی دارد. در این پژوهش با توجه به مدل های عوامل انسانی مدل برنامه ریزی ریاضی با هدف پیشینه سازی قابلیت اطمینان کارکنان ارائه می شود. مجموعه محدودیت های مدل ریاضی با بررسی محدودیت های مرتبط با صنعت مدل سازی می شود. پارامترهای مدل ریاضی نیز با توجه به پژوهشهای گذشته در صنایع مختلف در دامنه مورد قبول مورد مطالعه قرار می گیرد. به منظور بررسی کارایی مدل، سناریوهای مختلف برنامه ریزی حل و مورد تحلیل قرار می گیرد. بدین منظور مثالهای متعدد با پارامترهای انسانی مختلف در قالب ۳ دسته مورد مطالعه قرار می گیرد. این سه دسته شامل وظایف آسان با نرخ یادگیری بالا و نرخ خستگی پایین، وظایف متوسط با نرخ یادگیری و خستگی متوسط، و وظایف سخت با نرخ یادگیری پایین و شریب سختی بالا است. برای حل این مسائل از نرم افزار لینگو استفاده می شود. به منظور ارائه مدل ریاضی غیر خطی و گسسته زمانبندی کارکنان پارامترهای و متغیرها و محدودیت در بخش بعدی ارائه می شود.

مدل ریاضی قابلیت اطمینان کارکنان

در این پژوهش به بررسی عوامل انسانی تأثیرگذار و مهم بر بروز خطا در انجام وظیفه و قابلیت اطمینان نیروی کار پرداخته می شود. عوامل انسانی یادگیری، فراموشی، خستگی و استراحت به عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر قابلیت اطمینان با استفاده از توابع ریاضی مدل سازی می شود.

تعیین ساختار شیفت کاری با در نظر گرفتن عوامل انسانی مورد مطالعه می‌تواند در بهینه‌سازی قابلیت اطمینان نیروی کار و نتیجتاً قابلیت اطمینان سیستم نقش مؤثری داشته باشد. با توجه به تجربه محقق در صنعت خودروسازی، بسیاری از ایستگاه‌های تولیدی دارای درجه ایمنی بوده بدین معنی که مونتاژ در این ایستگاهها مرتبط با مقوله ایمنی خودرو و سلامت سرنشینان و کارگران است. به عنوان مثال دستگاه پرس یکی از ایستگاه‌های با درجه خطر بالا برای کارگران می‌باشد و اشتباه و یا کم توجهی در آن می‌تواند خطر مرگ برای کارگران داشته باشد. ایستگاه‌های کاری مرتبط با قطعات ایمنی از قبیل کامپیوتر ماشین، ایربگ، ترمز ضد قفل، کمر بند ایمنی، دیفرانسیل، رادیاتور، جعبه فرمان، پمپ فرمان، مخزن بنزین، بوستر و مخزن گاز از جمله ایستگاه‌های کاری است که توجه و دقت بالاتر کارکنان را می‌طلبد و کم دقتی (ناشی از خستگی، فراموشی و ...) در این ایستگاه‌های کاری می‌تواند ایمنی خودرو را کاهش و نتیجتاً سلامت سرنشینان را با خطر مواجه کند. از این رو پیامدهای بروز خطای انسانی می‌تواند بسیار فاجعه بار از بعد سلامتی برای مشتریان و بروز هزینه‌های اضافی برای شرکت و کاهش میزان اعتماد مشتریان به محصولات آن شرکت شود. از این روی مسأله حاضر در پی ارائه مدل ریاضی زمانبندی شیفت کاری با هدف بهینه‌سازی قابلیت اطمینان می‌باشد. برای ارائه مدل ریاضی زمانبندی شیفت کاری اندیسها، متغیرها، پارامترها و مفروضات بصورت زیر تعریف می‌شود.

اندیسها

i : شاخص نیروی کار ($i=1,2, \dots, n$)

j : شاخص ماشین ($j=1,2, \dots, m$)

t : شاخص دوره کاری ($t=1,2, \dots, T$)

مفروضات

- تقاضای محصول و برنامه ریزی تولید مشخص و ثابت است.
- تغییرات احتمالی در حضور نیروی کار و از کارافتادگی ماشین آلات وجود ندارد.

- افق برنامه ریزی یک هفته کاری و ۶ روز می‌باشد و هر روز کاری ۸ ساعت است.
- مجموعه زمان استراحت در یک روز کاری ۱ ساعت ولی تعداد زمان استراحت متغیر است.
- یک روز کاری به ۲۷ بازه ۲۰ دقیقه ای تقسیم بندی شده است که سه بازه آن استراحت و مابقی آن کار می‌باشد.
- دوره‌های استراحت و کار می‌تواند بصورت گسسته و یا پیوسته باشد (بدین معنی که سه دوره استراحت می‌تواند پشت سر هم و در قابل یک ساعت زمانبندی شود و یا بصورت گسسته و در طول روز کاری پراکنده باشد)
- عوامل انسانی یادگیری، فراموشی، خستگی و استراحت بر میزان تولید و کارایی کارکنان تأثیر گذار است.
- کارکنان چند مهارتی بوده و کارایی مشابه دارند.

متغیرها و پارامترهای مدل ریاضی

متغیرهای تصمیم بصورت زیر می‌باشد.

x_{ijt} : اگر نیروی i در بازه t به ماشین j اختصاص یابد برابر با یک و در غیر اینصورت برابر با صفر است.

s_t : اگر بازه t جزو بازه کاری باشد برابر با یک و در غیر اینصورت برابر با صفر است.

پارامترهای مورد استفاده بصورت زیر می‌باشد.

B_j : تعداد تولیدات مورد نیاز در طول روز کاری توسط ماشین j

l_{ij} : حداقل تجربه کارگر i بر روی ماشین j (واحد اندازه گیری: تعداد تولید در دوره زمانی)

K_{ij} : حداکثر نرخ کارایی کارگر i بر روی ماشین j با شرط یادگیری کامل (واحد اندازه گیری: تعداد تولید بر دوره زمانی)

- L_{ij} : نرخ یادگیری کارگر i بر روز ماشین j (واحد محاسباتی: تعداد دوره زمانی که کارگر i بر روی ماشین j به نرخ تولید $K_{ij}/2$ می‌رسد)
- F_{ij} : نرخ فراموشی کارگر i بر روی ماشین j (واحد محاسباتی: تعداد دوره زمانی که کارگر i بر روی ماشین j به علت دور بودن از تولید به نرخ تولید $K_{ij}/2$ کاهش می‌یابد)
- FG_t : میزان خستگی ایجاد شده در طول دوره کاری t
- F_{max} : حداکثر خستگی نیروی کار
- R_{bt} : میزان خستگی بعد از دوره استراحت زمانی t
- b_t : مدت زمان استراحت دوره زمانی t
- λ : ضریب افزایش خستگی در دوره فعالیت و انجام کار
- μ : ضریب بهبود (کاهش) خستگی در دوره استراحت
- δ_t : مدت زمان شیفت کاری t
- Q_{ijt} : نرخ تولید کارگر i بر روی ماشین j در واحد زمانی t
- P_{ijt} : نرخ تولید کارگر i بر روی ماشین j در طول واحد زمانی $t-1$ تا t
- NFS : مقیاس نرمالیزه شده عامل خستگی
- NLS : مقیاس نرمالیزه شده عامل یادگیری-فراموشی
- α : ضریب تأثیر عامل خستگی در نرخ خطا
- β : ضریب تأثیر عامل یادگیری-فراموشی در نرخ خطا
- u_f : تابع خطای کارگر و متأثر از خستگی
- u_l : تابع خطای کارگر و متأثر از یادگیری-فراموشی
- w_f : ضریب وزنی تأثیر تابع خطای خستگی کارگر در نرخ خطای نهایی
- w_l : ضریب وزنی تأثیر تابع خطای یادگیری-فراموشی کارگر در نرخ خطای نهایی

مدل برنامه‌ریزی ریاضی زمانبندی شیفت کاری

رویکرد مدل سازی ریاضی قابلیت اطمینان نیروی کار در این پژوهش همچون پژوهش گیوی و جابر (۲۰۱۵) است و برای مدل سازی تابع یادگیری-فراموشی از مدل ارائه شده توسط توماس و نمبهارد (توماس و نمبهارد، ۲۰۰۴) استفاده شده است. برای بررسی تأثیر این عوامل بر چگونگی زمانبندی شیفت کاری و ارائه جدول زمانی کار بهینه از مدل تحقیق در عملیات استفاده می‌شود که در پژوهشهای پیشین ارائه نشده است. در این پژوهش همچون پژوهش (گیوی، جابر و نیومن، ۲۰۱۵ سپتامبر) به منظور بررسی اثر خستگی بر کارکرد کارکنان تابع افزایش خستگی را غیر خطی فرض می‌کنیم و از مدل خستگی مورد استفاده این محققین استفاده می‌شود. روابط ریاضی برای مدل خستگی در ادامه بیان شده است.

$$FG_t = 1 - e^{-\lambda\delta t} \quad (۱)$$

$$R_{bt} = FG_t e^{-\mu bt} \quad (۲)$$

$$FG_{t+1} = R_{bt} + (1 - R_{bt})(1 - e^{-\lambda\delta_{t+1}}) \quad (۳)$$

$$NFS = \sum_{t=1}^T \frac{FG_t}{F_{max}} \quad (۴)$$

$$u_f = \alpha \times NFS \quad (۵)$$

معادله شماره ۱ مقدار کل خستگی کارگر در طول شیفت کاری t را محاسبه می‌نماید. چنانچه کارگر بعد از شیفت کاری به شیفت استراحت گمارش یابد مقدار خستگی وی بعد از استراحت (استراحت به میزان bt) با استفاده از فرمول شماره ۲ محاسبه می‌شود. در معادله شماره ۳ میزان خستگی بعد از دوره استراحت به میزان bt محاسبه می‌شود. در این معادله R_{bt} نشان دهنده خستگی تقلیل یافته بعد از استراحت در مدت زمان bt است. در این فرمولها λ و μ به ترتیب نشان دهنده سرعت افزایش خستگی (سختی کار/فعالیت) در دوره فعالیت و سرعت کاهش خستگی در دوره استراحت می‌باشد. معادله شماره ۴ مقیاس نرمالیزه شده خستگی را محاسبه می‌کند. در معادله شماره ۵ نیز تابع مطلوبیت خستگی (میزان تأثیر خستگی بر نرخ

خطا) محاسبه می‌شود. در این معادله α ضریبی بین ۱ و صفر است که نشان دهنده میزان تأثیرگذاری خستگی بر نرخ خطا است.

برای محاسبه عوامل انسانی یادگیری و فراموشی در قابلیت اطمینان نیروی کار از فرمول ارائه شده توسط (توماس و نمبهارد، ۲۰۰۴) استفاده می‌شود. در این پژوهش بیان شده است که با افزایش تکرار در انجام وظیفه سطح یادگیری و در نتیجه کارایی کارکنان افزایش می‌یابد و با دور بودن از کار (گمارش به ایستگاه دیگر و یا شیفت استراحت) فراموشی اتفاق افتاده و بصورت کاهش در میزان یادگیری در فرمول نشان داده شده است. برای مطالعه بیشتر به [۲۵] مراجعه شود.

$$Q_{ijt} = l_{ij} + k_{ij} \left[1 - \exp \left(-\frac{1}{l_{ij}} \sum_{t=1}^T x_{ijt} \right) \right] \times \exp \left[\frac{1}{F_{ij}} \left(\sum_{t=1}^T x_{ijt} - t \right) \right] \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{ijt} = \sum_{t=1}^T \frac{Q_{ij,t-1} + Q_{ijt}}{2} \quad (7)$$

$$NLS = \sum_{i=1}^n \sum_j^m \sum_{t=1}^T l_{ij} / Q_{ijt} \quad (8)$$

$$u_l = \beta \times NLS \quad (9)$$

فرمول شماره ۶ نرخ تولید آنی و فرمول شماره ۷ متوسط تولید در شیفت زمانی t را نشان می‌دهد. در فرمول شماره ۸، NLS مقیاس نرمالیزه شده یادگیری-فراموشی را محاسبه و شماره ۹ میزان تأثیر یادگیری-فراموشی بر نرخ خطا را با ضریب β محاسبه می‌کند. مقدار ضریب β بین صفر و یک است.

با در نظر گرفتن دو عامل یادگیری-فراموشی و خستگی-بهبود تأثیرگذار بر نرخ خطای نیروی کار، تابع ریاضی تأثیرگذاری این عوامل بر نرخ خطای نیروی کار به صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$U(f, l) = w_f \times u_f + w_l \times u_l \quad (9)$$

فرمول شماره ۹ تابع نرخ خطای نیروی کار با توجه به عوامل انسانی مورد مطالعه را نشان می‌دهد که w_f و w_l به ترتیب اوزان میزان تأثیر پارامترهای خستگی و یادگیری-فراموشی

است که مقدار آن توسط مدیر تعیین می‌شود. جمع این دو وزن برابر یک است و وزن‌ها بین صفر و یک می‌باید تعریف شود.

با توجه به تعاریف عوامل انسانی، مدل ریاضی تحقیق در عملیات زمانبندی شیفت کاری به صورت زیر ارائه می‌شود.

$$\min z = U(f, l) \quad (۱۰)$$

Subject to

$$\sum_{t=1}^T s_t = 24 \quad (۱۱)$$

$$x_{ijt} \leq s_t \quad \forall i, j, t \quad (۱۲)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n FG_{jt} P_{ijt} x_{ijt} \geq B_j \quad \forall i, j, t \quad (۱۳)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ijt} \leq 1 \quad \forall i, j, t \quad (۱۴)$$

$$FG_t = 1 - e^{-\lambda \delta_t} \quad \forall t \quad (۱۵)$$

$$R_{bt} = FG_t e^{-\mu bt} \quad \forall t \quad (۱۶)$$

$$FG_{t+1} = R_{bt} + (1 - R_{bt})(1 - e^{-\lambda \delta_{t+1}}) \quad \forall t \quad (۱۷)$$

$$Q_{ijt} = l_{ij} + k_{ij} \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{l_{ij}} \sum_{t=1}^T x_{ijt}\right) \right] \times \exp\left[\frac{1}{F_{ij}} \left(\sum_{t=1}^T x_{ijt} - t\right)\right] \quad \forall i, j, t \quad (۱۸)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{ijt} = \sum_{t=1}^T \frac{Q_{ijt-1} + Q_{ijt}}{2} \quad \forall i, j, t \quad (۱۹)$$

$$NLS = 1/m * n \sum_{i=1}^n \sum_j^m \sum_{t=1}^T l_{ij} / Q_{ijt} \quad (۲۰)$$

$$ul = \beta \times NLS \quad (۲۱)$$

$$NFS = \sum_{t=1}^T FG_t / F_{max} \quad (۲۲)$$

$$uf = \alpha \times NFS \quad (۲۳)$$

$$x_{ijt} \in \{1, 0\} \quad \forall i, j, t \quad (۲۴)$$

$$s_t \in \{1, 0\} \quad \forall t \quad (۲۵)$$

تابع هدف مدل ریاضی که در فرمول شماره ۱۰ ارائه شده است سعی در کمینه سازی خطای انسانی دارد. محدودیت شماره ۱۱ میزان ساعات شیفت‌های کاری را محدود می‌کند. در این

محدودیت هر s کاری ۲۰ دقیقه می‌باشد که می‌تواند استراحت (صفر) و یا شیفت کاری (یک) اعلام شود. بنابراین مجموعه تعداد s های کاری می‌باید ۲۴ و یا به عبارت دیگر ۸ ساعت کاری باشد. محدودیت شماره ۱۲ به منظور عدم گمارش کارگر i به ماشین j در شیفت استراحت می‌باشد. محدودیت شماره ۱۳ برای تأمین تعداد تولیدات مورد نیاز برای ماشین j در یک روز کاری می‌باشد. محدودیت شماره ۱۴ برای عدم گمارش کارگر i به ماشین j در یک روز کاری می‌باشد. معادلات ۱۵ الی ۱۶ برای محاسبه عامل خستگی و معادلات ۱۷ الی ۱۹ برای محاسبه عامل یادگیری-فراموشی است. معادلات ۲۰ و ۲۱ برای نرمالیزه کردن و تعیین تأثیر عامل یادگیری-فراموشی در نرخ خطای نیروی کار و معادلات ۲۲ الی ۲۳ برای نرمالیزه کردن و تعیین تأثیر عامل خستگی در نرخ خطا می‌باشد. ماهیت متغیرهای تصمیم‌گیری نیز در مجموعه‌های ۲۴ و ۲۵ تعریف شده است. مدل ارائه شده از نوع مدل ریاضی غیر خطی گسسته است که سعی در بهینه‌سازی ساختار شیفت کاری با هدف کمینه‌سازی نرخ خطای نیروی کار دارد.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک رویکرد فراابتکاری برای حل بسیاری از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی است. الگوریتم ژنتیک اولین بار توسط هالند^۱ در سال ۱۹۷۵ معرفی شد و در مقایسه با روشهای جستجوی سنتی توانایی فرار از جواب‌های بهینه موضعی^۲ دارد. الگوریتم ژنتیک ابتدا با یک جمعیت از جواب اولیه (کروموزوم اولیه) فرایند بهینه‌یابی را شروع می‌کند و برای بهبود فرایند جستجو از عملگرهای جهش و تقاطع^۳ استفاده می‌کند.

نمایش کروموزوم

برای حل مدل زمانبندی کارکنان، جواب مسأله در قالب یک ماتریس با ابعاد $t \times z$ کدنویسی می‌شود که تعداد سطرها برابر با تعداد دوره‌های زمانی (که در این مسأله برابر با ۲۷ بازه

-
1. Holland
 2. local optimum
 3. crossover and mutation operators

می‌باشد) و تعداد ستون برابر با تعداد ماشین/ایستگاههای کاری می‌باشد. عناصر ماتریس یک عدد i رقمی می‌باشد که متشکل از ۰ و ۱ است. شماره هر رقم نشان دهنده شماره کارگر و صفر و یک بودن آن نشان دهنده عدم گمارش و یا گمارش آن کارگر می‌باشد. نمونه کروموزوم با ۸ دوره زمانی و ۴ ماشین بصورت ماتریس 4×8 در شکل ۱ نشان داده شده است.

	ماشین ۱	ماشین ۲	ماشین ۳	ماشین ۴
بازه کاری ۱	۱۰۰۰	۰۰۱۰	۰۱۰۰	۰۰۰۱
بازه کاری ۲	۱۰۰۰	۰۰۱۰	۰۱۰۰	۰۰۰۱
بازه کاری ۳	۰۰۱۰	۱۰۰۰	۰۱۰۰	۰۰۰۱
بازه کاری ۴	۰۱۰۰	۰۰۱۰	۱۰۰۰	۰۰۰۱
بازه کاری ۵	۰۱۰۰	۰۰۱۰	۱۰۰۰	۰۰۰۱
بازه کاری ۶	۰۰۱۰	۰۱۰۰	۱۰۰۰	۰۰۰۱
بازه کاری ۷	۰۰۱۰	۰۱۰۰	۰۰۰۱	۱۰۰۰
بازه کاری ۸	۰۰۱۰	۰۱۰۰	۰۰۰۱	۱۰۰۰

شکل (۱) نمایش کروموزوم برای مسأله زمانبندی کارکنان و شیفت کاری

عملگرهای ژنتیک

در این مقاله برای تولید نسل‌های جدید در الگوریتم ژنتیک از عملگرهای تقاطع و جهش دو نقطه ای استفاده می‌شود. برای تولید فرزند جدید بواسطه ترکیب والدین، دو والد از طریق استراتژی انتخاب چرخ رولت^۱ از میان جمعیت انتخاب می‌شود. بعد از انتخاب والدین، دو نقطه در طول و عرض کروموزوم (ماتریس جواب) بصورت تصادفی مشخص می‌شود. نهایتاً ژنهای محصور شده بین این نقاط بین دو والد تعویض شده و فرزندان جدید بوجود می‌آید. برای حفظ کروموزوم‌های مطلوب در هر نسل از استراتژی نخبه‌گرایی^۲ استفاده می‌شود. P_r درصدی از جمعیت است که با استفاده از عملگر نخبه‌گرایی به نسل جدید منتقل می‌شود. P_m درصدی از جمعیت است که با استفاده از عملگر جهش در نسل جدید تولید می‌شود. در این

1. roulette wheel selection strategy

2. elitism

مقاله برای استفاده از عملگر جهش، ابتدا بعضی از ژنها برای دو سطر ماتریس بصورت تصادفی انتخاب و سپس ژنهای تصادفی جدید جایگزین آنها می‌شود. $1 - p_m - p_r$ درصدی از جمعیت است که بوسیله عملگر تقاطع بوجود می‌آیند.

برای محاسبه مطلوبیت کروموزوم و انتخاب آن به عنوان بهترین جواب برای مدل ریاضی از تابع مدل ریاضی (کمینه سازی خطاهای نیروی کار) به عنوان تابع برازش الگوریتم ژنتیک استفاده شد. به منظور اجتناب از انتخاب جواب غیر عملی در مجموعه کروموزوم‌های مطلوب، از تابع جریمه استفاده شد.

تنظیم پارامتر

در این مقاله پارامترهای اندازه جمعیت (N)، نرخ تقاطع (P_c)، نرخ جهش (P_m)، و نرخ نخبه‌گرایی (P_r) در سه اندازه مسئله مورد تنظیم قرار گرفت. به منظور جستجوی وسیع تر فضای جواب نرخ جهش بالاتر تنظیم گردید. مجموعه ۱۲ مثال با سه اندازه بزرگی متفاوت تولید و توسط الگوریتم حل شد. بعد از تحلیل نتایج بهترین سطح پارامترها برای الگوریتم ژنتیک در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲. پارامترهای الگوریتم ژنتیک و مقادیر آنها

پارامترها				نوع مسأله
P_r	P_m	P_c	N	
٪۲۰	٪۱۰	٪۷۰	۵۰	اندازه کوچک
٪۲۰	٪۱۰	٪۷۰	۷۰	اندازه متوسط
٪۲۰	٪۱۰	٪۷۰	۱۰۰	اندازه بزرگ

محاسبات عددی و بحث

برای بررسی تأثیر پارامترهای خستگی، یادگیری و فراموشی بر ساختار زمانبندی بهینه شیفت‌های کاری، پارامترهای خستگی و بهبود ناشی از استراحت با توجه به مطالعه گیوی و جابر (۲۰۱۵) در سه سطح پایین، متوسط و زیاد در نظر گرفته شد و مقادیر آن در جدول ۳ نشان داده شده است. برای بدست آوردن مقادیر پارامتر خستگی در نظر گرفته شد که نیروی

کار بعد از ۴ (خستگی زیاد)، ۸ (خستگی متوسط) و ۱۲ (خستگی کم) ساعت کار به خستگی کامل می‌رسد. سپس متناظر با هر یک از سطوح، پارامترهای λ و μ به ترتیب برابر $\{0/35\}$ و $\{0/35\}$ ، $\{0/18\}$ و $\{0/18\}$ و $\{0/88\}$ و $\{0/88\}$ بدست آمد. پارامترهای یادگیری و فراموشی نیز در سه سطح پایین، متوسط و زیاد تنظیم شد و مقادیر آن در جدول ۳ نشان داده شده است. سایر مقادیر مثالهای مورد مطالعه نیز در جدول ۳ ارائه شده است.

به منظور بررسی کارایی مدل ریاضی زمانبندی شیفت‌های کاری مجموعه مثالهای متعدد با پارامترهای مختلف توسط مدل پیشنهادی حل شد. برای حل مدل ریاضی، نرم افزار لینگو مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که مدل ریاضی ارائه شده از نوع NP-Hard است بنابراین این نرم افزار قابلیت حل مسائل بزرگ را ندارد. بنابراین مسائل کوچک با پارامترهای مختلف مورد آزمون قرار گرفت. همچنین برای مسائل بزرگتر الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بررسی کارایی و اثربخشی الگوریتم ژنتیک، نتایج مثالهای مختلف با پارامترهای متفاوت در الگوریتم ژنتیک با نتایج نرم افزار لینگو مورد مقایسه قرار گرفت. برای هر نوع مسأله یک حداکثر زمان پردازش برای روشهای حل در نظر گرفته شد (ممکن است محاسبات ساعتها زمان ببرد). برای حل مسأله الگوریتم ژنتیک چندین بار اجرا و بهترین جواب و نتایج ثبت گردید. به دلیل زمان محاسباتی بالا، مسائل بزرگ ممکن است توسط روش دقیق حل نشود. مقایسات براساس مدت زمان محاسباتی و مقدار تابع هدف مدل ریاضی در جدول ۴ ارائه شد.

جدول ۳. پارامترهای و مقادیر آنها در مثالهای زمانبندی شیفت کاری

$L=3$ (سه دوره ۲۰ دقیقه ای)	سطح	پارامتر یادگیری-فراموشی
$F=3$ (سه دوره ۲۰ دقیقه ای)	پایین	
$L=6$ (۶ دوره ۲۰ دقیقه ای)	سطح	
$F=6$ (سه دوره ۲۰ دقیقه ای)	متوسط	
$L=9$ (۹ دوره ۲۰ دقیقه ای)	سطح بالا	پارامتر خستگی-بهبود
$F=9$ (سه دوره ۲۰ دقیقه ای)	سطح	
(خستگی بعد از ۱۲ ساعت کاری)	سطح	

$\lambda=0/088$ $\mu=0/088$	پایین	
(خستگی بعد از ۸ ساعت کاری) $\lambda=0/18$ $\mu=0/18$	سطح متوسط	
(خستگی بعد از ۴ ساعت کاری) $\lambda=0/35$ $\mu=0/35$	سطح بالا	
$l_{ij}=30$		حداقل تجربه کارگر
$K_{ij}=60$		حداکثر نرخ کارایی کارگر
$B=(500, 1200)$		تعداد تولیدات مورد نیاز برای هر ماشین
$FMAX=0/5$		حداکثر سطح خستگی
$\beta=\{0,05, 0,25, 0,5\}$, $\alpha=\{0,05, 0,25, 0,5\}$		ضریب تأثیر عامل خستگی و یادگیری
$w_j=0/66$ و $w_l=0/34$ $w_j=0/5$ و $w_l=0/5$ $w_j=0/34$ و $w_l=0/66$		ضریب وزنی تأثیر تابع خطای خستگی و یادگیری کارگر

جدول ۴. مقایسه عملکرد الگوریتم ژنتیک و نرم افزار لینگو با توجه به ابعاد زمان محاسباتی و مقدار تابع هدف (واحد زمان: ثانیه)

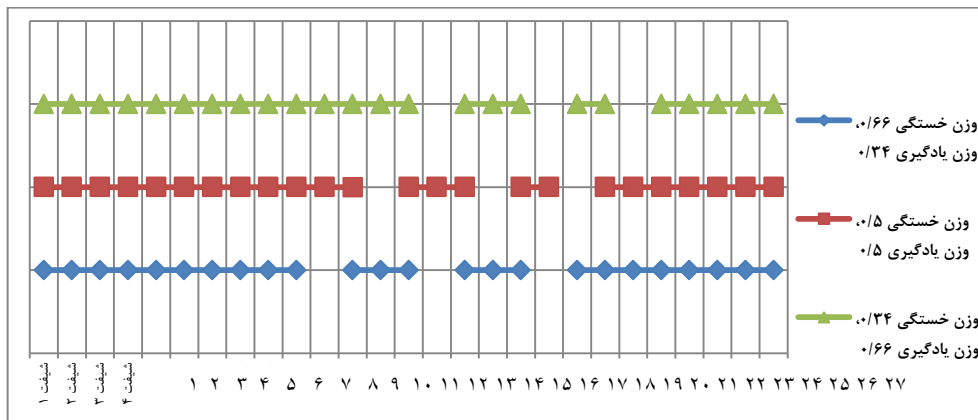
مسئله	اندازه مسئله	پارامترهای انسانی	ضریب وزنی خطای خستگی - یادگیری	مقدار جواب نرم افزار لینگو	مقدار جواب الگوریتم ژنتیک	زمان محاسباتی لینگو	زمان محاسباتی الگوریتم ژنتیک
P1	کوچک	سطح پایین	$w_l=0/34$ $w_j=0/66$	۹/۱	۹/۱	۷	۵
P2	کوچک	سطح پایین	$w_l=0/5$ $w_j=0/5$	۱۱/۴	۱۱/۴	۶	۴
P3	کوچک	سطح متوسط	$w_l=0/5$ $w_j=0/5$	۱۲/۷	۱۲/۷	۶	۵
P4	کوچک	سطح بالا	$w_l=0/5$	۱۳/۸	۱۳/۸	۱۲	۵

				$w_f=0/5$			
۱۶۰	۲۹۰	۲۰/۰	۲۲/۵	$w_l=0/34$ $w_f=0/66$	سطح پایین	متوسط	P5
۱۵۰	۲۸۰	۱۹/۸	۲۰/۶	$w_l=0/5$ $w_f=0/5$	سطح پایین	متوسط	P6
۹۰	۴۵۰	۲۲/۶	۲۴/۲	$w_l=0/5$ $w_f=0/5$	سطح متوسط	متوسط	P7
۱۴۰	۳۶۰	۲۳/۷	۲۶/۰	$w_l=0/5$ $w_f=0/5$	سطح بالا	متوسط	P8
۲۶۵	۱۰۳۵	۲۸/۹	۳۲/۳	$w_l=0/34$ $w_f=0/66$	سطح پایین	بزرگ	P9
۱۸۴	۳۸۵۴	۳۵/۵	بدون جواب	$w_l=0/5$ $w_f=0/5$	سطح پایین	بزرگ	P10
۲۱۰	۴۲۲۱	۴۲/۷	بدون جواب	$w_l=0/5$ $w_f=0/5$	سطح متوسط	بزرگ	P11
۱۷۴	۳۴۲۱	۳۹/۹	۴۰/۸	$w_l=0/5$ $w_f=0/5$	سطح بالا	بزرگ	P12

نتایج مقایسات جدول ۴ نشان می‌دهد که در مسائل کوچک جواب بدست آمده توسط لینگو و الگوریتم ژنتیک برابر است اما زمان محاسباتی الگوریتم ژنتیک کمتر می‌باشد. به عبارت دیگر الگوریتم ژنتیک در حل مسأله زمانبندی و یافتن جواب سریعتر عمل می‌کند. نتایج برای مسائل متوسط نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک در هر دو بعد کیفیت جواب و مدت زمان محاسباتی در مقایسه با نرم افزار لینگو بهتر عمل کرده و در مدت زمان کمتر جواب بهتری کسب کرده است. برای مسائل بزرگ نیز الگوریتم ژنتیک نسبت به نرم افزار لینگو بهتر عمل کرده است و جواب بهتر در مدت زمان کمتری یافته است. همچنین مشاهده شد که برای دو مثال با ابعاد بزرگ نرم افزار لینگو نتوانست جواب اولیه موجه بیابد. این نتایج نشان می‌دهد که با بزرگتر شدن مسأله و افزایش تعداد کارکنان سختی مسأله افزایش یافته و کارایی نرم افزار

لینگو در حل مسأله زمانبندی کاهش می‌یابد. این عدم کارایی را می‌توان در مسائل بزرگ بهتر مشاهده کرد و نرم افزار لینگو برای دو مسأله مطرح شده با گذشت بیش از ۱ ساعت زمان محاسباتی نتوانست جواب اولیه موجه بیابد. البته با توجه به در نظر گرفتن محدودیت حداکثر زمان محاسباتی، نرم افزار لینگو برای مسائل ۱۰ و ۱۱ نتوانسته است جواب موجه اولیه پیدا کند و با افزایش مدت زمان محاسباتی ممکن است جواب اولیه بدست آید. این حداکثر زمان محاسباتی به منظور انجام مقایسه کارایی الگوریتم ژنتیک و نرم افزار لینگو در نظر گرفته شده است.

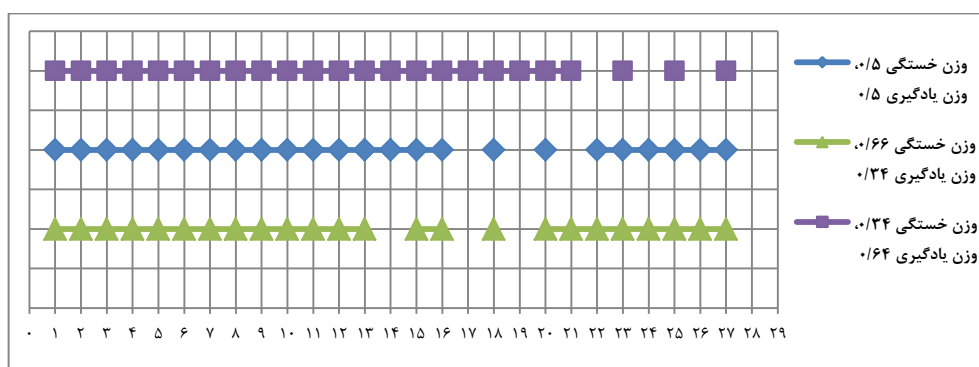
به منظور بررسی تأثیر پارامترهای انسانی بر ساختار زمانبندی شیفت‌های کاری مسائل مطرح شده با متغیر تصمیم‌گیری گمارش کارکنان به شیفت‌های کاری و تعیین دوره‌های استراحت و کار با توجه به پارامترهای ارائه شده توسط نرم افزار لینگو و الگوریتم ژنتیک حل گردید. نتایج حل مسائل در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. بازه دوره‌های کاری و استراحت بصورت ۲۰ دقیقه‌ای در نظر گرفته شد که شامل ۲۴ بازه کاری و ۳ بازه استراحت می‌باشد.



شکل ۲. ساختار شیفت کاری برای شرایط کاری با پارامترهای انسانی سطح بالا

در شرایط کاری با پارامترهای انسانی سطح بالا زمانهای استراحت به شیفت‌های بعد از ۱۱ تخصیص داده شده است. از آنجایی که در این پژوهش مدت زمان هر شیفت ۲۰ دقیقه فرض

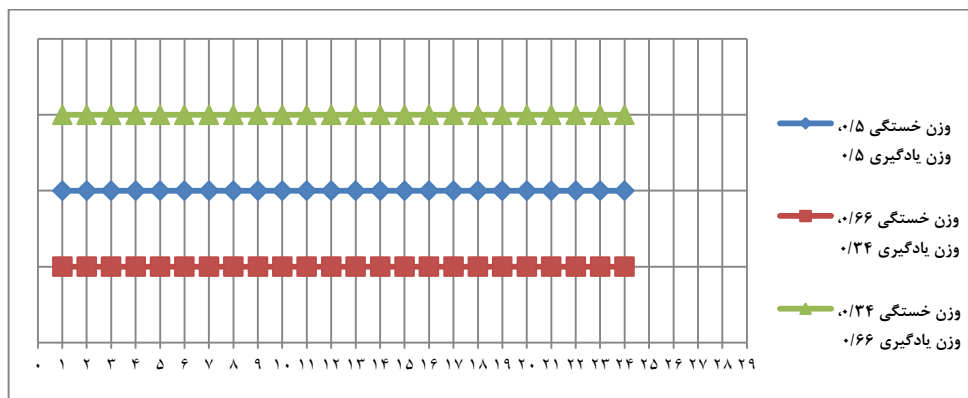
شده است بنابراین اولین استراحت در حالت وزن خستگی $0/34$ و یادگیری $0/66$ ، به شیفت ۱۱ (بعد از ۲۰۰ دقیقه کار)، شیفت ۱۵ (بعد از ۶۰ دقیقه کار مجدد) و سپس شیفت ۱۹ (بعد از ۶۰ دقیقه کار مجدد) تخصیص داده شده است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است با افزایش وزن خستگی شیفت‌های استراحت به انتهای شیفت‌های کاری نزدیک تر می‌شود. به عبارت دیگر با کاهش وزن یادگیری در ایجاد نرخ خطای انسانی مدل ریاضی پیشنهاد می‌کند که در شیفت‌های ابتدایی از تخصیص استراحت اجتناب شود تا نرخ خطای ناشی از کمبود یادگیری کاهش یابد. از این رو در حالت اوزان $0/5$ یادگیری و $0/5$ خستگی شیفت‌های استراحت، شیفت‌های ۱۳، ۱۷ و ۲۰ می‌باشد و برای حالت اوزان خستگی $0/66$ و یادگیری $0/34$ شیفت‌های استراحت، شیفت‌های ۱۵، ۱۹ و ۲۲ می‌باشد.



شکل ۳. ساختار شیفت کاری برای شرایط کاری با پارامترهای انسانی سطح متوسط

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود ساختار شیفت کاری با افزایش وزن عامل خستگی در ایجاد نرخ خطای انسانی به سمت تخصیص زمان‌های استراحت به ابتدای شیفت‌های کاری حرکت می‌کند. همچنین در شرایط سطح متوسط پارامترهای انسانی، زمانهای استراحت بصورت دوره‌های ۲۰ دقیقه‌ای متناوب و در نیمه دوم کاری تخصیص داده شده است. ساختار شیفت‌های کاری در شرایط سطح پایین پارامترهای انسانی به منظور بهینه سازی نرخ خطای انسانی در محیط کاری در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در اوزان مختلف خستگی و یادگیری در ایجاد نرخ خطای شیفت‌های کاری به صورت مستمر و

بدون استراحت برنامه ریزی شده است. از آنجایی که در این حالت خستگی بعد از ۱۲ ساعت کاری بصورت کامل اتفاق می‌افتد و میزان تأثیر خستگی بسیار پایین است بنابراین مدل ریاضی به منظور نگه‌داشتن سطح یادگیری در بالاترین مقدار و کاهش نرخ خطای انسانی دوره‌های استراحت را به انتهای دوره کاری تخصیص داده است.



شکل ۴. ساختار شیفت کاری برای شرایط کاری با پارامترهای انسانی سطح پایین

با مثالهای مختلف و نتایج حل آنها، مشاهده شد که عوامل انسانی در بهینه‌سازی نرخ خطای انسانی در شیفت کاری تأثیرگذار است و با در نظر گرفتن مقادیر مختلف پارامترها، ساختار شیفت کاری و استراحت تغییر می‌یابد. اگرچه در پیشینه پژوهش نیز برای بهبود خستگی و کاهش نرخ خطای کارکنان تخصیص شیفت‌های استراحت در فرایند کار پیشنهاد شده است اما چگونگی تخصیص و زمان بهینه تخصیص شیفت استراحت مورد مدلسازی قرار نگرفته است. با توجه به اینکه بعضی از ایستگاه‌های کاری جزو فرایندهای ایمنی بوده و بروز خطا در این ایستگاه‌ها می‌تواند تأثیرات منفی بیشتری بر فرایند تولید و استفاده کنندگان محصول داشته باشد، از این رو در این پژوهش چگونگی تخصیص بهینه زمانهای استراحت برای کاهش نرخ خطای انسانی مدل سازی و مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به اینکه شرایط کاری و پارامترهای انسانی در کارگاه‌ها و صنایع مختلف متفاوت است، بنابراین هر سازمان می‌باید با توجه به پارامترهای انسانی مختص خود ساختار شیفت‌های کاری و استراحت را با استفاده از مدل پیشنهادی تعیین کنند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش به منظور بهینه سازی نرخ خطای انسانی، مدل ریاضی زمانبندی شیفت‌های کاری و استراحت ارائه شده است. با توجه به پیشینه پژوهش خستگی، استراحت، یادگیری و فراموشی از عوامل بسیار مهم در افزایش و کاهش نرخ خطای انسانی است. این عوامل انسانی به صورت ریاضی با استفاده از توابع نمایی در مدل ریاضی عدد صحیح غیر خطی مدل سازی شد. مدل ارائه شده سعی در کمینه سازی نرخ خطای انسانی با ارائه زمانبندی بهینه شیفت‌های کاری و استراحت دارد. به منظور بررسی و صحت مدل چندین مسأله با پارامترهای مختلف حل گردید. مجموعه مثالهای ارائه با در نظر گرفتن ضرایب مختلف یادگیری-فراموشی و خستگی-استراحت در سه سطح وظایف آسان، متوسط و سخت مورد مطالعه قرار گرفت. برای حل مسائل از نرم افزار لینگو استفاده شد، اگرچه برای مسائل بزرگتر می‌باید از الگوریتم‌های کارآمدتر همچون فراابتکاری استفاده کرد. نتایج و زمانبندی‌های بهینه نشان می‌دهد که با تغییر پارامترهای انسانی و نوع وظیفه ساختار شیفت کاری و استراحت تغییر می‌یابد. برای وظایف سطح پایین که یادگیری سریع و خستگی دیر اتفاق می‌افتد زمانبندی شیفت کاری بهتر است که پیوسته باشد و از ایجاد وقفه در کار جلوگیری کرد. به عبارت دیگر با پیوسته بودن فرایند کاری و نبود استراحت نرخ خطای انسانی کاهش می‌یابد. برای وظایف با یادگیری و خستگی متوسط استراحت‌های ۲۰ دقیقه‌ای و متناوب در نیمه دوم شیفت کاری موجب افزایش قابلیت اطمینان نیروی کار می‌شود. با افزایش وزن عامل خستگی در ایجاد نرخ خطا مشاهده می‌شود که زمانهای استراحت به ابتدای شروع کار نزدیک تر می‌شود. برای وظایف با یادگیری و خستگی بالا، زمانبندی بهینه به سمت شیفت کاری با سه زمان استراحت متناوب نزدیک می‌شود و نسبت به وظایف سطح متوسط زمان‌های استراحت به شروع شیفت کاری نزدیک تر می‌شود. مجموعه متفاوت زمانبندی‌های بهینه کاری نشان می‌دهد که کارفرمایان و سازمانها می‌باید با مشخص کردن نوع وظایف و پارامترهای نیروی انسانی شان می‌باید زمانبندی بهینه مختص به خود را تعیین کنند. نتایج این پژوهش نشان داد

که سازمان‌ها و شرکت‌ها می‌توانند با استفاده از مدل ارائه شده برای کمینه‌سازی خطای انسانی زمانبندی‌های بهینه‌ای را تعیین و برنامه‌ریزی کنند.

محدودیت اصلی این پژوهش نبود اطلاعات واقعی در حوزه عوامل انسانی می‌باشد و نتایج این پژوهش با توجه دامنه تعریف شده پارامترهای انسانی ارائه شده است. از این رو پژوهشگران و مدیران می‌باید در بکارگیری این نتایج در پژوهش‌های آتی و در صنعت ملاحظه و دقت لازم را داشته باشند. به منظور توسعه مدل می‌توان سایر اهداف سازمانی همچون کمینه‌سازی هزینه‌های تولیدی، افزایش سطح رضایت، افزایش انگیزش، کاهش استرس و ... را بصورت مدل چند هدفه و یا تک هدفه ارائه کرد. همچنین در نظر گرفتن و مدل‌سازی سایر عوامل انسانی و ارائه الگوریتم‌های حل کارا برای توسعه زمینه علمی و کاربردی مهندسی عوامل انسانی مفید می‌باشد.

منابع

Akinci, B., Boukamp, F., Gordon, C., Huber, D., Lyons, C., & Park, K. (2006). A formalism for utilization of sensor systems and integrated project models for active construction quality control. *Autom. Constr.*, 15(2), 124-138.

Bubb, H. (2005). Human reliability: a key to improved quality in manufacturing. *Human Factors and Ergonomics Manufacturing and Service Industries*, 15(4), 353-368.

Cacciabue, P.C. (1998). Modeling and simulation of human behavior for safety analysis and control of complex systems. *Saf. Sci.*, 28(2), 97-110.

Comper, M.L.C., Padula, R.S. (2014). *The effectiveness of job rotation to prevent work related musculoskeletal disorders: protocol of a cluster randomized clinical trial*. BMC Musculoskelet. Disord. 15.

Dhillon, B.S. (2009). *Human Reliability, Error, and Human Factors in Engineering Maintenance: with reference to Aviation and Power Generation*, CRC Press, Taylor and Francis Group.

Di Pasquale, V., Iannone, R., Miranda, S., Riemma, S. (2013). An overview of human reliability analysis techniques in manufacturing operations. in: M.M. Schiraldi (Ed.), *Operations Management, In Tech*, (pp. 221-240).

ElMaraghy, W.H., Nada, O.N., ElMaraghy, H.A., (2008). Quality prediction for reconfigurable manufacturing systems via human error modelling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21(5), 584-598.

Folkard, S., Tucker, P. (2003). Shift work, safety, and productivity. *Occupational Medicine*, 53, 95-101.

Franceschini, F., Galetto, M., (2002). Asymptotic defectiveness of manufacturing plants: an estimate based on process learning curves, *Int. J. Prod. Res.* 40(3), 537-545.

Giuntini, R.E., Laboratories, W. (2000). Mathematical characterization of human reliability for multi-task system operations. in *Systems, Man, and Cybernetics, IEEE International Conference on*.

Givi, Z.S., Jaber, M.Y., Neumann, W.P. (2015). Modelling worker reliability with learning and fatigue. *Applied Mathematical Modeling*, 39, 5186–5199.

Givi, Z.S., Jaber, M.Y., Neumann, W.P. (September 2015). Production planning in DRC systems considering worker performance. *Comput. Ind. Eng.*, 87(1), 317–327.

Griffith, C.D., Mahadevan, S. (2011). Inclusion of fatigue effects in human reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(11), 1437–1447.

Grosse, E.H., Glock, C.H. (2013). An experimental investigation of learning effects in order picking systems, *J. Manuf. Technol. Manage.*, 24(6) 850–872.

Grosse, E.H., Glock, C.H., Jaber, M.Y., Neumann, W.P. (2014). Incorporating human factors in order picking planning models: framework and research opportunities. *Int. J. Prod. Res.*, (ahead-of-print), pp. 1–23.

Jansen, N.W.H., Kant, I., Van den Brandt, P.A. (2002). Need for recovery in the working population: description and associations with fatigue and psychological distress. *International Journal of Behavioral Medicine*, 9(4), 322–340.

Kern, C., &Refflinghaus, R. (2013). Cross-disciplinary method for predicting and reducing human error probabilities in manual assembly operations. *Total Qual. Manage. Bus. Excel.* 24(7–8), 847–858.

Koulamas, C. (1992). Quality improvement through product redesign and the learning curve. *Omega*, 20(2), 161–168.

Matthews, T. (2012). Dispelling the myths of behaviour and improving casual analysis. in: SPE Middle East Health, Safety, Security, and Environment Conference and Exhibition 2012 (MEHSSE), Sustaining World Energy through an Integrated HSSE and Business Approach, Abu Dhabi, UAE, 130–137.

Michalos, G., Makris, S., Chryssolouris, G. (2013). The effect of job rotation during assembly on the quality of final product. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6(3), 187–197.

Myszewski, J.M. (2010). Mathematical model of the occurrence of human error in manufacturing processes. *Quality and Reliability Engineering International*, 26(8), 845-851.

Noroozi, A., Khakzad, N., Khan, F., MacKinnon, S., Abbassi, R. (2013). The role of human error in risk analysis: application to pre and post-maintenance procedures of process facilities. *Reliability Engineering & System Safety*, 119, 251-258

Onisawa, T. (1988). A representation of human reliability using fuzzy concepts, *Information Sciences*, 45(2), 153-173.

Smith, D.J. (2011). *Reliability, maintainability and risk: Practical safety-related systems engineering methods*. Access Online via Elsevier

Thomas, B.G., Nembhard, D.A., (2004). *Preference based search approach for scheduling workers with learning and forgetting*, Proc. MSOM Sponsored Session INFORMS Ann. Meeting, Oct. 2004.

Tucker, P., Folkard, S., Macdonald, I. (2003). *Rest breaks and accident risk*. *Lancet*, 361, 680