

مدلسازی ریاضی عوامل انسانی در سیستم با محدودیت دوگانه

محمد اکبری*

استادیار، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

پذیرش: ۱۳۹۶/۱/۲۳

دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۷

چکیده

پژوهش حاضر با هدف به‌کارگیری مهندسی عوامل انسانی در سیستم‌های با محدودیت دوگانه به مطالعه و مدلسازی عوامل انسانی مهم در مسئله زمانبندی کارکنان پرداخته است. در مطالعات گذشته زمانبندی‌های شیف‌کاری بیشتر بر مبنای عوامل محدودکننده ماشین و برنامه‌ریزی تولید انجام می‌گرفت و در بهینه‌سازی سیستم‌های زمانبندی، عوامل انسانی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو در این مقاله به مهندسی عوامل انسانی در برنامه‌ریزی و زمانبندی شیف‌های کاری پرداخته شده است. عوامل انسانی مورد مطالعه عبارت از یادگیری، فراموشی، خستگی، استراحت و تابع هدف مدل ریاضی کمینه‌سازی نسبت تعداد کارکنان به کارایی آنان است. برای بررسی کارایی مدل ریاضی و بررسی تأثیر عوامل انسانی بر کارایی زمانبندی کارکنان، چهار سناریوی زمانبندی با مجموعه پارامترهای انسانی مختلف توسط مدل ریاضی حل و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که پارامترهای انسانی بر کارایی سیستم با محدودیت دوگانه تأثیر داشته و انتخاب سناریوی زمانبندی مناسب می‌تواند تا ۰/۲۰ کارایی کارکنان را افزایش دهد. همچنین با توجه به تأثیر پیچیده پارامترهای انسانی بر عملکرد سیستم، هر سازمان باید با توجه به پارامترهای انسانی مختص مشاغل خود زمانبندی شیف‌های کاری را تعریف کند. با توجه به پارامترهای تعریف شده در این پژوهش، سناریو زمانبندی مبتنی بر یک زمان استراحت نسبت به سناریو زمانبندی با زمان‌های استراحت متعدد کاراتر است. همچنین در

شرایط میانگین مقادیر مختلف پارامتر خستگی، کارایی سناریوهای مورد استفاده کارگاه‌های تولیدی کارایی بهتری نسبت به دو سناریوی دیگر دارد.

واژه‌های کلیدی: زمانبندی کارکنان، سیستم با محدودیت دوگانه، یادگیری، فراموشی، خستگی.

۱- مقدمه

سیستم‌هایی که ظرفیت تولید آنها با توجه به دو عامل ماشین و انسان محدود می‌شود، سیستم‌های با محدودیت دوگانه^۱ می‌باشد. این سیستم‌های تولیدی نسبت به سیستم‌های تک‌محدودیتی/ تک منبعی در زمان برنامه‌ریزی منابع از پیچیدگی بیشتری برخوردار هستند [۱]. در این سیستم‌ها باید همزمان ویژگی‌ها و محدودیت‌های ماشین و انسان را به عنوان عوامل تولید مطالعه و ویژگی‌ها و محدودیت‌های آنان نیز در برنامه‌ریزی منابع مدلسازی شود. انسان برخلاف ماشین از قابلیت‌هایی همچون یادگیری، فراموشی، خستگی، انگیزش، استرس و ... برخوردار است و بر این اساس اندازه‌گیری و مدلسازی این عوامل در برنامه‌ریزی بسیار پیچیده‌تر می‌باشد. وجود چنین مشخصه‌هایی موجب افزایش انعطاف‌پذیری کارکنان و در نتیجه سیستم تولید می‌شود. زمانبندی مؤثر کارکنان یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های تأثیرگذار بر عملکرد سیستم تولید است و تخصیص وظیفه مناسب به کارگر مناسب در زمان مناسب بسیار حیاتی است [۲]. با توجه به ضروری شدن قابلیت انعطاف‌پذیری تولید و ارائه خدمات در مؤسسات و شرکت‌های تولیدی، ارائه مدل‌های سیستم‌های با محدودیت دوگانه با انعطاف‌پذیری بیشتر افزایش پیدا می‌کند. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که تعداد کمی از پژوهش‌ها به مدلسازی مشخصه‌های انسانی در بهینه‌سازی سیستم‌های زمانبندی پرداخته‌اند [۱]. از این رو در این مقاله به بررسی تأثیرات عوامل انسانی یادگیری، فراموشی و خستگی و تجدید نیرو در زمانبندی کارکنان پرداخته می‌شود.

۲- پیشینه پژوهش

سیستم‌های با محدودیت دوگانه، سیستم‌هایی هستند که محدودیت ظرفیت تولید از دو عامل انسان و ماشین ناشی می‌شود. معمولاً سطح نیروی کار^۲ (نسبت اپراتورها به

ماشین‌ها) در این سیستم‌ها کمتر از ۱۰۰ درصد است و کارکنان با دارا بودن چند مهارت و محدودیت‌هایی همچون اندازه بسته‌های تولیدی، زمان بیکاری کارکنان، زمان تحویل، طول صف، و سطح آموزش، در صورت نیاز بین ماشین‌های کاری جابه‌جا می‌شوند [۳]. آموزش بین وظیفه‌ای^۳ این امکان را می‌دهد که با برنامه‌ریزی مناسب حجم کاری را با ترکیب‌های مختلف بین کارکنان به‌طور بهینه تقسیم کرد. مسئله گمارش کارکنان یکی از زیر مسائل مهم و کاربردی سیستم‌های با محدودیت دوگانه می‌باشد که دو مشخصه اصلی آن قاعده «زمان گمارش^۴» و «مکان گمارش^۵» است. قاعده «زمان گمارش» به تصمیم‌گیری در خصوص زمان مناسب جابه‌جایی کارکنان بین ایستگاه‌های کاری و قاعده «مکان گمارش» به تصمیم‌گیری در خصوص ایستگاه کاری مناسب برای نیروی کاری می‌پردازد [۱]. عوامل انسانی و یا ارگونومی به صورت «فهمیدن زیربنایی و نظری رفتار و عملکرد انسان با هدف تبیین سیستم‌های فنی-اجتماعی و به‌کارگیری آن در طراحی سیستم فنی - اجتماعی در زمینه‌های واقعی» تعریف شده است [۴]. بسیاری از مطالعات انجام شده نشان داده است که کارکنان چند وظیفه‌ای با تأثیر گذاشتن بر عملکرد سیستم از طریق عوامل انسانی (یادگیری و فراموشی) مانع از کاهش بهره‌وری می‌شوند [۵؛ ۶]. جابر و همکاران (۲۰۰۰) به بررسی انعطاف‌پذیری نیروی کار و مزایای آن پرداخته‌اند. این محققان با توجه به هزینه‌بر بودن نگهداری سطح بهره‌وری کارکنان با توجه به یادگیری و فراموشی آنان به بررسی فاکتورهای تأثیرگذار بر فراموشی کارکنان در محیط صنعتی پرداختند [۵]. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش مشابهت کاری بین وظایف اهمیت آموزش کاهش پیدا می‌کند، به عبارت دیگر می‌توان به منظور کاهش هزینه‌های آموزش برای داشتن کارکنان چند مهارتی، مشابهت کاری مشاغل کارکنان چند وظیفه‌ای را افزایش داد. خر و همکاران^۶ در پژوهش خود به مدلسازی تأثیرات یادگیری و فراموشی در سیستم‌های با محدودیت دوگانه پرداختند [۶]. این پژوهشگران برای مدلسازی عوامل یادگیری - فراموشی از مدل ریاضی کارلسون و رو^۷ (۱۹۷۶) استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که در شرایط کاری با نرخ بالای فراموشی و ساینده‌ی شغلی^۸، ممکن است که کارگر توان رسیدن به حداکثر کارایی را نداشته باشد و در چنین شرایطی ممکن است ایجاد انعطاف‌پذیری افزایشی برای نیروی کار نشدنی باشد [۶].

خستگی یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار و مهم در زمانبندی کارکنان است که کمتر مورد توجه قرار گرفته شده است. خستگی به صورت عملیاتی کاهش در عملکرد کارکنان در فعالیت‌های فیزیکی و در طول زمان است و چنانچه خستگی فیزیکی یا ذهنی باشد، تأثیر مشابه دارد [۷]. خستگی همگن نبوده و در یک پیوستار از کاملاً فیزیکی تا کاملاً ذهنی حرکت می‌کند. از این رو خستگی برای مشاغل و شرایط مختلف ترکیبات متفاوتی از خستگی فیزیکی و ذهنی می‌باشد [۸]. ناهنجاری‌های اسکلتی بیشترین مشکل سلامتی مرتبط با کار می‌باشد که در مقالات مختلف ناشی از خستگی در شرایط کاری نامناسب ذکر شده است. این شرایط نامناسب نتیجه حجم کاری زیاد، وظایف تکراری متعدد و بار کاری طولانی مدت به‌خصوص در حالت کاری نامناسب و به‌طور خلاصه در نظر نگرفتن عوامل انسانی در زمانبندی و برنامه‌ریزی کارکنان می‌باشد [۹]. اوتمن و همکاران^۹ (۲۰۱۲) برای به‌کارگیری تفاوت‌های کارکنان در زمانبندی نیروی کار مدل جدیدی ارائه کردند. در این پژوهش تأثیر عوامل انسانی مهم همچون شخصیت کارکنان، مهارت، خستگی و بهبود در فرایند زمانبندی نیروی کار مورد مطالعه قرار گرفت [۲]. این مطالعه نشان داد که در نظر گرفتن عوامل انسانی و فنی به‌طور همزمان می‌تواند منجر به کاهش هزینه در سیستم‌های تولیدی و حصول اطمینان از امنیت کارگران شود. مدل ارائه شده در این پژوهش در جهت کمیته‌سازی استخدام، اخراج، هزینه‌های اضافه کاری و آموزش و کمیته‌سازی زمان استراحت و کاهش میانگین سطح خستگی کارکنان می‌باشد. در این پژوهش برای خستگی و بهبود نیروی کار از توابع خطی استفاده شده است که محققان بیان کرده‌اند ممکن است این مفروضات دقت مدل را کاهش دهد و برای پژوهش‌های آینده توسعه مدل‌های غیر خطی پیشنهاد شده است [۲]. الکساندر^{۱۰} نشان داده است که هزینه زمانبندی مجدد سیستم‌ها برای تصحیح برنامه ماشین‌ها و کارکنان بسیار بیشتر از هزینه زمانبندی اولیه برای سیستم با محدودیت دوگانه می‌باشد [۱۰]. بنابراین زمانبندی صحیح در ابتدای برنامه‌ریزی کارکنان و در نظر گرفتن عوامل انسانی مرتبط امری ضروری و باعث کاهش هزینه دوباره کاری می‌شود. کارناهان و همکاران (۲۰۰۱) اولین محققانی بودند که با هدف بهینه‌سازی معیارهای ارگونومیک از روش تحقیق در عملیات در تعیین جدول زمانی گردش شغلی استفاده کردند [۱۱]. کارناهان و همکاران در مقاله خود عوامل انسانی همچون خستگی کارگر را در متعادل‌سازی خط مونتاژ در نظر گرفته‌اند. این محققان برای اندازه‌گیری میزان خستگی نیروی کار از معیار میزان بار

فیزیکی^{۱۱} هر وظیفه و شاخص ظرفیت قوای دست^{۱۲} استفاده کردند. برای حل مدل ارائه شده از سه روش ابتکاری و فراابتکاری همچون الگوریتم ژنتیک استفاده شد. برای توسعه مدل، محققان در نظر گرفتن سایر معیارهای ارگونومیکی همچون لرزش دستگاهها و وضعیت نامناسب ایستگاههای کاری را توصیه کردهاند [۱۱]. دری و همکاران به بررسی تأثیر عوامل انسانی بر زمانبندی شیفت‌های کاری و گردش شغلی پرداخته‌اند [۱۲]. در این پژوهش به منظور کاهش هزینه کارکنان و افزایش گردش شغلی بین کارکنان، عوامل انسانی یادگیری، فراموشی و خستگی در نظر گرفته شد. عامل خستگی در این پژوهش با استفاده از تابع نمایی و تجربی مدلسازی شد. مدل ارائه شده از نوع NP-Complete بوده و برای حل مدل از رویکرد ترکیبی الگوریتم ژنتیک و تکنیک ε- محدودیت استفاده شد. نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که بین دو هدف بیشینه‌سازی گردش شغلی و کمینه‌سازی هزینه‌های نیروی کار رابطه متضاد و بده - بستانی وجود دارد و این رابطه فارغ از اندازه مسئله است. همچنین مشاهده شد که تغییر در پارامتر یادگیری موجب جابه‌جایی مرز پارتو می‌شود. بر این اساس پیشنهاد شده است که مدیران در برنامه‌ریزی و اتخاذ سیاست کاری مناسب برای سازمان و کارکنان و توجه به عوامل انسانی، از مدل و رویکرد بهینه‌سازی ارائه شده استفاده و تصمیم بهینه‌ای را به‌کار گیرند.

ایسلت و ماریانو^{۱۳} برای توسعه زمانبندی کارکنان یک مدل ریاضی برای گمارش فعالیت‌ها به کارکنان ارائه کرده است. تابع هدف مدل آنان کمینه‌سازی تفاوت کاری کارکنان به منظور اجتناب از خستگی^{۱۴}، کمینه‌سازی بی‌عدالتی بین حجم کاری کارکنان و کمینه‌سازی هزینه‌ها است [۱۳]. اکبری و همکاران برای توسعه مدل زمانبندی کارکنان با در نظر گرفتن معیارهای حضور کارکنان، بهره‌وری، ترجیحات کارکنان، سطح ارشدیت و تعداد کارکنان مورد نیاز، مدل ریاضی زمانبندی کارکنان ناهمگن ارائه کردند [۱۴]. آنان در مطالعه خود خستگی کارکنان را به عنوان عامل تأثیرگذار بر عملکرد کارکنان و خروجی تولید در نظر گرفتند. اگرچه این محققان چگونگی تأثیر حجم کاری تخصیص یافته بر بهره‌وری کارکنان را شبیه‌سازی نکردند، ما و همکاران^{۱۵} (۲۰۰۹) در مقاله خود به بررسی زمانبندی انعطاف‌پذیر کارکنان بین ایستگاه‌های کاری با حجم کاری مختلف پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد زمانی که کارگر وظیفه‌ای را انجام می‌دهد، ظرفیت/ توان ماهیچه‌ای کارگر در

طول زمان نسبت به مقدار آستانه^{۱۶} (حداکثر زمان تحمل^{۱۷}) کاهش پیدا می‌کند که این کاهش به دلیل خستگی می‌باشد. همچنین این پژوهش نشان داد که این خستگی می‌تواند از طریق تخصیص زمان استراحت یا از طریق جابه‌جایی کارگر به ایستگاه دیگر (با وظیفه‌ای متفاوت و حجم کاری کمتر) بهبود پیدا کند [۱۵]. یو^{۱۸} با مطالعه عوامل یادگیری و فراموشی نیروی کار در سیستم با محدودیت دوگانه دریافت که در محیط‌های با وظایف با نرخ یادگیری/فراموشی بالا، انعطاف‌پذیری و جابه‌جایی ممکن است منجر به بهبود عملکرد سیستم نشود. در این مقاله نتیجه‌گیری شده است که انعطاف‌پذیری بیشتر نیازمند یادگیری بیشتر است و در نتیجه فراموشی بیشتری را به بار می‌آورد. در این مقاله همچنین نتیجه گرفته شد که برای مدیریت حجم کاری، مقداری معینی از انعطاف‌پذیری مطلوب است [۱۶]. پژوهش‌های [۱۷؛ ۱۸] با مفروضات و شرایط متفاوت به بررسی عوامل یادگیری و فراموشی در زمانبندی کارکنان پرداختند. در این پژوهش‌ها نتیجه گرفته شد زمانی که نرخ یادگیری پایین است، ضرورتی برای افزایش جابه‌جایی کارکنان بین ماشین‌آلات نیست و برای مقابله با نرخ فراموشی بالا جابجایی کارکنان و آموزش پیشرفته ضروری به نظر می‌رسد. همچنین نشان داده شد که محدود کردن توسعه آموزش بین وظیفه‌ای، نیازمندی نیروی کار را افزایش می‌دهد. گیومارس و همکاران^{۱۹} در مقاله خود به بررسی تأثیر عامل یادگیری در زمانبندی سیستم با محدودیت دوگانه پرداختند. این محققان با مطالعه عملکرد ۱۰۰ کارگر در شرایط واقعی صنعت کفش در برزیل به این نتیجه رسیدند که در کارایی دو سناریو شامل جابه‌جایی کارکنان از وظیفه ساده به وظیفه سخت و بالعکس تفاوت معناداری وجود ندارد، به عبارت دیگر ترتیب پیچیدگی وظایف کاری تغییری در نرخ یادگیری و عملکرد کارکنان ایجاد نمی‌کند [۱۹]. به منظور توسعه به‌کارگیری مهندسی عوامل انسانی عوامل کسالت^{۲۰}، یادگیری و فراموشی در مسئله گردش شغلی کارکنان در سیستم‌های تولیدی توسط عزیزی و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. برای مسئله مورد بررسی مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه و با استفاده از مثال‌های عددی کاربرد آن مورد بررسی قرار گرفت. مدل ارائه شده سعی در متعادل کردن تأثیرات مثبت فاصله‌های گردش شغلی بر خستگی/انگیزش کارکنان و هزینه غیرقابل اجتناب تغییرات مهارتی کارکنان دارد [۲۰]. آریانژاد و همکاران در مطالعه خود (۲۰۰۹) برای زمانبندی گردش شغلی ایمن

مبتنی بر مهارت با هدف کاهش صدمات بدنی ناشی از وضعیت کاری، برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح دو هدفه ارائه کردند [۲۱]. کمینه‌سازی صدمات ناشی از سر و صدا و کم‌رزدن توابع هدف مدل ریاضی است و برای بررسی کارایی مدل مثال‌های عددی مختلف حل شد. نتایج این پژوهش نیز کارایی مطلوب مدل این محققان را نشان می‌دهد. جابر و نیومن^{۲۱} [۲۲] نیز برای ارائه مدل زمانبندی کارکنان در سیستم‌های با محدودیت دوگانه، عوامل انسانی همچون سطح مهارت، آموزش، شخصیت، خستگی و بهبود را در نظر گرفتند. با توجه به چهار سناریوی پیشنهادی برنامه‌ریزی، نتایج این پژوهش نشان داد که استراحت کوتاه بعد از هر فعالیت، دوره‌های تولید کوتاه و نرخ بالای بهبود، عملکرد سیستم را افزایش می‌دهد.

پژوهش جابر و همکاران [۲۳] به بررسی عامل خستگی علاوه بر یادگیری و فراموشی بر عملکرد کارکنان در سیستم‌های با محدودیت دوگانه پرداخته است. این پژوهش با استفاده از طراحی آزمایش‌ها نشان داد که در نظر گرفتن یادگیری در فرایند تولید باعث کاهش خستگی و بهبود عملکرد سیستم تولیدی می‌شود. از طرف دیگر خستگی نیروی کار فرایند تولید را افزایش می‌دهد و موجب کاهش نرخ تولید می‌شود. اگرچه این پژوهش به ارائه مدل ریاضی تحقیق در عملیات نپرداخته است و بسیاری از محدودیت‌های مرتبط با واقعیت و مفروضات آن در نظر گرفته نشده است. جابر در ادامه با همکاری گیوی و نیومن^{۲۲} در سال ۲۰۱۵ به مطالعه تأثیر ویژگی‌های انسانی بر برنامه‌ریزی تولید در سیستم با محدودیت دوگانه پرداختند. عوامل انسانی مورد بررسی در این پژوهش عبارت از یادگیری، فراموشی، خستگی و تجدید نیرو ناشی از استراحت نیروی کار است. این پژوهش نشان داد که در سیستم‌های تولیدی که انسان نقش دارد، روش‌های زمانبندی کلاسیک بدون در نظر گرفتن عوامل انسانی کارایی ندارد [۲۴]. این پژوهشگران در ادامه در مقاله [۲۵] با در نظر گرفتن عوامل انسانی یادگیری، فراموشی، خستگی و تجدید نیروی ناشی از استراحت به ارائه مدل ریاضی با هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان نیروی کار پرداختند. برخلاف پژوهش‌های پیشین، مدل ریاضی گیوی و همکاران (۲۰۱۵) قابلیت پیش‌بینی زمان و چگونگی ایجاد خطای انسانی را دارد. برای بررسی تأثیر پارامترهای مدل بر نرخ خطا و رفتار مدل از تحلیل آزمایشی و مثال‌های عددی و تقریبی (برای پارامترهای انسانی) استفاده کردند. توماس و نمبهارد^{۲۳} در مقاله [۲۶] و

در ادامه نمبهارد و اوسوسیلپ^{۲۴} در مقاله [۲۷] برای بهبود کارایی سیستم و مدیریت وظایف با پیچیدگی متغیر، عوامل انسانی یادگیری و فراموشی را در انتخاب و گمارش کارکنان در نظر گرفتند. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که سیاست گمارش کارکنان با توجه به عوامل یادگیری و فراموشی به‌طور معناداری بهره‌وری را بهبود می‌دهد و برای کاهش تأثیرات منفی فراموشی، کاهش گمارش طولانی مدت نیروی کار به یک شغل و کاهش میزان حجم کاری را پیشنهاد می‌کند.

در حوزه زمانبندی کارکنان در فعالیتهای پروژه‌ای کوین و همکاران^{۲۵} به مدلسازی زمانبندی کارکنان چندمهارته و توجه به سطح یادگیری دانش انجام کار پرداختند [۲۸]. این محققان با توجه کمبود پژوهش در حوزه تأثیر زمانبندی کارکنان پروژه و توجه به تأثیر سطح یادگیری آنان در کیفیت انجام کار یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی صفر و یک ارائه کردند. برای بررسی عملکرد مدل ریاضی از مثال‌های تولید شده فرضی استفاده کردند. در این پژوهش با فرض اینکه افزایش یادگیری منجر به افزایش سطح کیفیت کار می‌شود برای منحنی یادگیری و منحنی کیفیت از توابع نمایی استفاده شد. محدودیت اصلی مدل ریاضی ارائه شده آنان یافتن جواب بهینه نهایی است. سبحانی و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی محیط کاری بر وضعیت سلامت و عملکرد نیروی کار پرداختند [۲۹]. این محققان برای کمی‌سازی عوامل سلامتی نیروی کار و تأثیر آن بر عملکرد سیستم مدل زنجیره مارکوف دو مرحله‌ای ارائه کردند. آنها برای توسعه مدل خود سبحانی و همکاران در مقاله بعدی [۳۰] به بررسی مسئله تأثیر عوامل ریسک محیط کاری بر سلامتی کارکنان و در نتیجه سطح بهره‌وری و تعداد تولیدات معیوب پرداختند. این محققان برای به‌کارگیری ابعاد عوامل انسانی در سیستم مونتاژ سری، چارچوب مدلسازی تحلیلی با استفاده از زنجیره مارکوف ارائه کردند. نتایج عددی این پژوهش نشان داد که با قرار گرفتن مشاغل در برابر عوامل ریسک محیط کاری هزینه کل از ۰/۱ درصد تا ۳۲٪ افزایش پیدا می‌کند. این محققان نتیجه گرفتند که به‌کارگیری عوامل انسانی (ارگونومیک) در چه‌ای تازه نه تنها برای ارائه راه‌حل‌های ایمن‌تر شغلی، بلکه برای ارائه روش‌های بهبود عملیات و طراحی سیستم‌های بهینه‌تر برای مدیران باز می‌کند. پژوهش انجام شده توسط فریتزشه و همکاران^{۲۶} (۲۰۱۴) در خصوص تأثیر طراحی ارگونومیک شرایط کاری بر کاهش غیبت و خطای انسانی در شرکت خودروسازی نشان داده است که حجم کاری

بالا با غیبت طولانی کارکنان و افزایش نرخ خطای انسانی رابطه قوی دارد [۳۱]. در این پژوهش نشان داده شده است که افزایش حجم کاری موجب افزایش خستگی و در نتیجه افزایش نرخ خطای کارکنان می‌شود.

با توجه به بررسی پیشینه پژوهش تاکنون پژوهشی عوامل چهارگانه یادگیری، فراموشی، خستگی و بهبود را در زمانبندی کارکنان در نظر نگرفته‌اند و برای مدلسازی، مدل تحقیق در عملیات ارائه نکرده‌اند. همچنین در این پژوهش این عوامل در تعریف ساختار زمانبندی کار-استراحت برای پیشینه‌سازی کارایی کارکنان مورد استفاده قرار می‌گیرد که در ادبیات پژوهش این موضوع مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این پژوهش در ادامه پژوهش‌های قبلی برای زمانبندی کارکنان و بررسی تأثیر عوامل انسانی خستگی، تجدید نیرو، یادگیری و فراموشی بر عملکرد سیستم با محدودیت دوگانه مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه می‌گردد. البته در این پژوهش به منظور بررسی دقیق‌تر و کاربردی‌تر سعی می‌شود پارامترهای انسانی با توجه به تجربیات محقق در کارگاه‌های کوچک مورد تحلیل قرار گیرد.

۳- روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از بعد هدف توسعه‌ای و از بعد جمع‌آوری داده‌ها مطالعه میدانی و کتابخانه‌ای می‌باشد که با توجه به بررسی شرایط، مفروضات و محدودیت‌های محیط کار و مطالعات گذشته مدل مناسب برای زمانبندی کارکنان در سیستم‌های با محدودیت دوگانه ارائه می‌کند. برای مدلسازی عوامل انسانی یادگیری، فراموشی، خستگی و تجدید نیرو از توابع پیوسته ریاضی استفاده می‌گردد. در این پژوهش با توجه به تجربه محقق، شرایط کارگاه‌های تولیدی کوچک مورد توجه قرار گرفته شده است. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای انسانی بر چگونگی زمانبندی شیفت‌های کاری پارامترهای انسانی براساس مطالعات گذشته [۲۵] و تجربه مشابه محقق تعیین می‌شود. از آن جایی که این پارامترها در سازمان‌ها و وظایف مختلف متغیر است، بنابراین مقدار این پارامترها در یک دامنه کم تا زیاد تعریف می‌شود. به منظور بررسی صحت و کارایی مطلوب مدل برنامه‌ریزی ریاضی زمانبندی و مطالعه تأثیر عوامل انسانی بر عملکرد سیستم با محدودیت دوگانه مثال‌های فرضی متعدد با پارامترهای مختلف حل می‌شود. به منظور

بررسی و مقایسه زمانبندی‌های مختلف (پیوسته و گسسته) ۴ سناریو زمانبندی شامل ۲ سناریو مورد استفاده کارگاه‌ها و ۲ سناریو تعریف شده به‌وسیله محقق، توسط مدل ریاضی حل و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این پژوهش منظور از زمانبندی گسسته، زمانبندی شیفت کاری با تعداد استراحت‌های بیشتر از یک زمان استراحت و منظور از زمانبندی پیوسته، زمانبندی با یک زمان استراحت می‌باشد. مجموع زمان‌های استراحت در زمانبندی گسسته با مدت زمان استراحت در زمانبندی پیوسته یکسان در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه کارایی نیروی کار و بررسی تأثیر پارامترها بر کارایی نیروی کار، معادلات غیر خطی در نرم‌افزار اکسل برنامه‌نویسی می‌شود. اگرچه برای مسائل بزرگ تر و متغیرهای بیشتر نیاز است که از نرم افزارهای تحقیق در عملیات یا رویکردهای فراابتکاری استفاده شود.

۴- تعریف مسئله

در این پژوهش به مسأله تأثیر عوامل انسانی همچون خستگی نیروی کار، استراحت و تجدید قوا، یادگیری و فراموشی بر برنامه‌ریزی نیروی کار در سیستم با محدودیت دوگانه پرداخته می‌شود. این عوامل انسانی با توجه به نوع زمانبندی کارکنان موجب افزایش و کاهش عملکرد کارکنان در این‌گونه سیستم‌های تولیدی می‌شود. با توجه به تجربه محقق در کارگاه‌های تولیدی کوچک بسیاری از کارفرمایان فارغ از مطالعه این عوامل به زمانبندی کارکنان می‌پردازند. بسیاری از کارفرمایان ۸ ساعت کاری را به‌صورت پیوسته برنامه‌ریزی می‌کنند و عده‌ای دیگر شیفت کاری را به دو بخش ۴ ساعته صبح و بعد از ظهر با زمان استراحت ۱ ساعته برنامه‌ریزی می‌کنند. از آن جایی که در پیشینه پژوهش کمتر به مدلسازی عوامل انسانی در زمانبندی کارکنان و تعریف شیفت‌های کاری پرداخته شده است و مدلی مناسب برای بررسی تأثیر عوامل انسانی بر زمانبندی کارکنان و دستیابی به زمانبندی بهینه وجود ندارد، بنابراین در این پژوهش به مدلسازی این عوامل پرداخته می‌شود. در این پژوهش قصد داریم با مطالعه و مدلسازی عوامل انسانی مدل ریاضی مناسب برای زمانبندی کارکنان در سیستم با محدودیت دوگانه ارائه کنیم. همچنین به منظور بررسی اعتبار و کارایی مطلوب مدل ریاضی سناریوهای مورد استفاده کارفرمایان با پارامترهای مختلف مورد حل قرار می‌گیرد. از آن جایی که سناریوهای برنامه‌ریزی کارفرمایان به‌نسبت پیوسته با یک زمان

استراحت است، محقق دو سناریوی برنامه‌ریزی با تعداد استراحت‌های بیشتر ولی مجموع زمان استراحت یکسان تعریف کرده و به مقایسه و تحلیل آنان می‌پردازد. برای تعریف مسئله فرض می‌شود که برنامه‌ریزی تولید مشخص و قطعی است و تخصص و مهارت کارکنان مشابه و همگن است. همچنین فرض می‌شود که ضرایب یادگیری - فراموشی و ضرایب خستگی - بهبود برای کارکنان مشابه است و به عبارت دیگر تفاوت‌های فردی ناچیز در نظر گرفته شده است. برای تعریف دقیق‌تر مسئله مورد بررسی، مفروضات و اندیس‌های زیر تعریف می‌شوند.

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/برنامه‌ریزی تولید برای روزهای کاری مشخص و ثابت است.
- حضور کارکنان مشخص و احتمال عدم حضور کارکنان وجود ندارد.
- افق برنامه‌ریزی محدود و برای یک هفته است.
- زمان استراحت بر تجدید قوا و افزایش توان تولیدی نیروی کار تأثیرگذار است.
- خستگی نیروی کار متأثر از حجم تولیدی انجام شده توسط نیروی کار است.
- با افزایش تکرار در تولید، یادگیری کارگر افزایش یافته و با دور بودن از انجام کار فراموشی اتفاق می‌افتد.
- به منظور ساده‌سازی محاسبات تنوع محصول وجود نداشته و عوامل مختل‌کننده فرایند تولید اعم از بیرونی (رکود، نبود مواد اولیه و ...) و درونی (خرابی دستگاه‌ها، اتفاقات و حوادث و ...) تأثیری بر فرایند کاری ندارد.

۵- مدل برنامه‌ریزی ریاضی

برای مدلسازی زمانبندی نیروی کار در سیستم با محدودیت دوگانه، نخست متغیرها و محدودیت‌ها و سپس مدل ریاضی تحقیق در عملیات ارائه می‌شود. متغیرها و پارامترهای مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ متغیرها و پارامترهای مدل برنامه‌ریزی ریاضی

متغیرها و پارامترهای مدل ریاضی زمانبندی کارکنان
B_{jt} : تعداد تولیدات مورد نیاز در دوره کاری t به وسیله ماشین j
X_{ijt} : متغیر تصمیم‌گیری گمارش نیروی کار i به ماشین j در دوره زمانی t
z_j : حداقل تجربه کارگر i بر ماشین j (واحد اندازه‌گیری: تعداد تولید در دوره زمانی)
K_{ijt} : حداکثر نرخ کارایی کارگر i بر ماشین j با شرط یادگیری کامل (واحد اندازه‌گیری: تعداد تولید بر دوره زمانی)
L_{ijt} : نرخ یادگیری کارگر i بر روز ماشین j (واحد محاسباتی: تعداد دوره زمانی که کارگر i بر ماشین j به نرخ تولید $K_{ijt}/2$ می‌رسد)
F_{ijt} : نرخ فراموشی کارگر i روی ماشین j (واحد محاسباتی: تعداد دوره زمانی که کارگر i بر ماشین j به علت دور بودن از تولید به نرخ تولید $K_{ijt}/2$ کاهش پیدا می‌کند)
FG_t : میزان خستگی ایجاد شده در طول دوره کاری t
R_{jt} : میزان خستگی بعد از دوره استراحت زمانی t
bt : 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 روی ماشین j در واحد زمانی t
P_{ijt} : نرخ تولید کارگر i روی ماشین j در طول واحد زمانی $t-1$ تا t

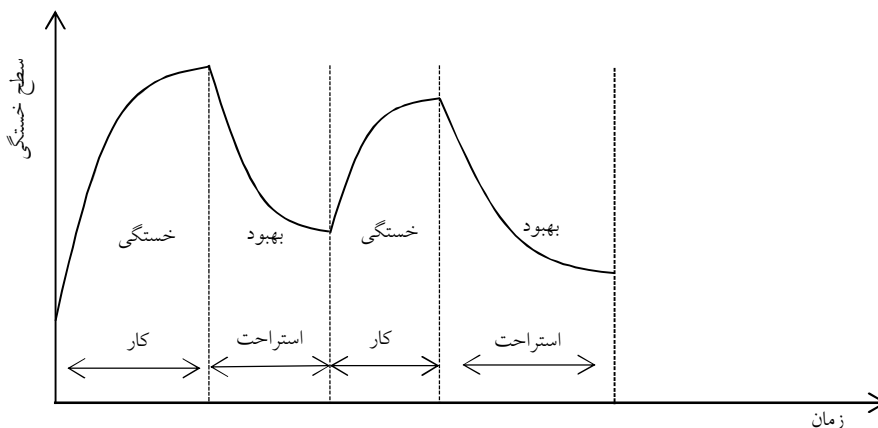
در ادبیات پژوهش بسیاری از محققان بر توسعه مدل‌های تخمین‌زننده حداکثر خستگی (MET) تلاش کرده‌اند. این مدل‌ها نقطه انتهایی حداکثر خستگی را تخمین زده‌اند اما هنوز چگونگی (تابع) افزایش و تجمیع خستگی (افزایش نمایی، خطی و ...) به صورت سؤال باقی مانده است [۲۲]. عده‌ای از محققان باور دارند که افزایش خستگی به صورت نمایی است و عده‌ای دیگر افزایش خستگی را به صورت خطی فرض می‌کنند. در این پژوهش همچون پژوهش گیوی، جابر و نیومن (۲۰۱۵) به منظور بررسی اثر خستگی بر کارکرد کارکنان تابع افزایش خستگی را غیر خطی فرض می‌کنیم [۲۵] و از مدل ارائه خستگی این محققان استفاده می‌شود. روابط ریاضی برای مدل خستگی در ادامه بیان شده است.

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

$$R_{bt} = FG_t e^{-\mu bt} \quad (2)$$

$$FG_{t+1} = R_{bt} + (1 - R_{bt})(1 - e^{-\lambda \delta_{t+1}}) \quad (3)$$

معادله شماره ۱ میزان خستگی تجمعی در طول زمان t را محاسبه می‌کند. میزان خستگی تقلیل یافته بعد از استراحت با استفاده از فرمول شماره ۲ به دست می‌آید. در معادله شماره ۳ میزان خستگی بعد از دوره استراحت به میزان bt محاسبه می‌شود. در این معادله R_{bt} نشان‌دهنده خستگی تقلیل یافته بعد از استراحت در مدت زمان bt است. در این فرمول‌ها λ و μ به ترتیب نشان‌دهنده سرعت افزایش خستگی (سختی کار / فعالیت) در دوره فعالیت و سرعت کاهش خستگی در دوره استراحت می‌باشد. فرایند تأثیرگذاری خستگی و استراحت بر عملکرد نیروی کار در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ رفتار فرایند خستگی و استراحت در طول چرخه کار-استراحت

به منظور شبیه‌سازی عوامل انسانی یادگیری و فراموشی از فرمول ارائه شده توسط (توماس و نمبهارد^{۳۷}) استفاده می‌شود [۲۶]. با توجه به محاسبات انجام شده توسط توماس و نمبهارد و کارایی محاسباتی برای محاسبه تولید کل یک سیستم که نشان‌دهنده مساحت زیر منحنی نرخ یادگیری است، از فرمول‌های زیر استفاده می‌شود. فرمول ۳ نشان‌دهنده تولید آنی در زمان t می‌باشد. با توجه به اینکه کارگر i

روی ماشین زدر بازه زمانی $t-1$ تا t به تولید ادامه می‌دهد، از این رو تولید تجمعی کارگر به صورت زیر (فرمول ۴) محاسبه می‌شود.

$$Q_{ijt} = l_{ij} + k_{ij} \left[1 - \exp \left(-\frac{1}{L_{ij}} \sum_{t=1}^T x_{ijt} \right) \right] \times \exp \left[\frac{1}{F_{ij}} \left(\sum_{t=1}^T x_{ijt} - t \right) \right] \quad (۳)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{ijt} = \sum_{t=1}^T \frac{Q_{ij,t-1} + Q_{ijt}}{2} \quad (۴)$$

مدل ریاضی برنامه‌ریزی کارکنان

$$\min z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^T x_{ijt} / \alpha F G_{jt} P_{ijt} \quad (۵)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^n F G_{jt} P_{ijt} x_{ijt} \geq B_{jt} \quad (۶)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ijt} \leq 1 \quad (۷)$$

$$F G_t = 1 - e^{-\lambda \delta_t} \quad (۸)$$

$$R_{bt} = F G_t e^{-\mu b t} \quad (۹)$$

$$F G_{t+1} = R_{bt} + (1 - R_{bt})(1 - e^{-\lambda \delta_{t+1}}) \quad (۱۰)$$

$$Q_{ijt} = l_{ij} + k_{ij} \left[1 - \exp \left(-\frac{1}{L_{ij}} \sum_{t=1}^T x_{ijt} \right) \right] \times \exp \left[\frac{1}{F_{ij}} \left(\sum_{t=1}^T x_{ijt} - t \right) \right] \quad (۱۱)$$

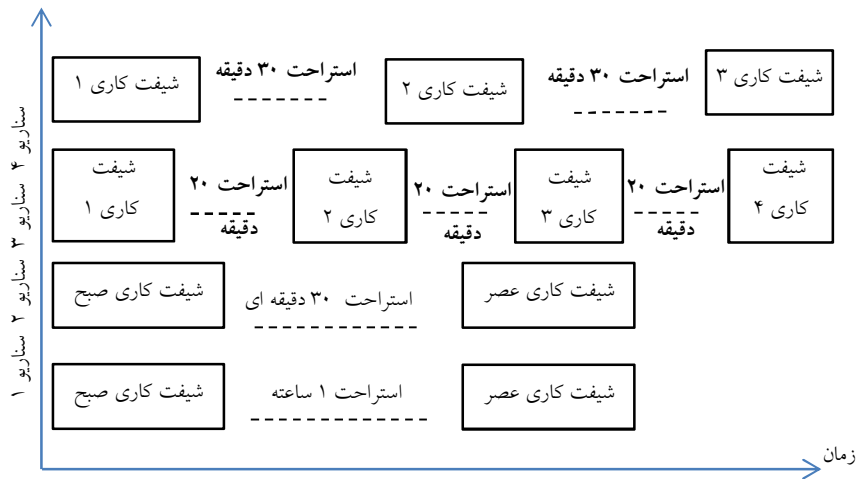
$$\sum_{t=1}^T P_{ijt} = \sum_{t=1}^T \frac{Q_{ij,t-1} + Q_{ijt}}{2} \quad (۱۲)$$

$$x_{ijt} \in \{1,0\} \quad \forall i, j, t \quad (۱۳)$$

مدل ریاضی ارائه شده از نوع برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح می‌باشد که تابع هدف آن در معادله شماره ۵ به صورت کمینه‌سازی تعداد نیروی کار تقسیم بر مقدار کارایی کارکنان بیان شده است. تابع هدف این مدل ریاضی سعی دارد با در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای خستگی، استراحت، یادگیری و فراموشی بر خروجی کارکنان بهترین گمارش کارکنان به ایستگاه‌های کاری را تعیین کند. نامعادله شماره ۶ سعی دارد تا حداقل تولیدات مورد نیاز در هر شیفت کاری و ماشین مورد نظر را تأمین نماید. عدم گمارش نیروی کار به طور همزمان به ۲ ماشین یا بیشتر در محدودیت شماره ۷ بررسی می‌شود. تأثیر پارامترهای خستگی و استراحت بر کارایی کارکنان در معادلات ۸، ۹ و ۱۰ مورد محاسبه قرار می‌گیرد. همچنین تأثیر پارامترهای یادگیری و فراموشی و تأثیر جابه‌جایی کارکنان بین ماشین‌ها بر کارایی کارکنان در معادلات ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شود. ماهیت متغیر تصمیم‌گیری در خصوص گمارش کارکنان به ماشین‌ها در دوره‌های زمانی مختلف در مجموعه شماره ۱۳ تعریف شده است.

۶- بررسی سناریوهای برنامه‌ریزی نیروی کار

در این بخش دو سناریو مورد استفاده کارفرمایان و دو سناریو با تعداد استراحت‌های بیشتر برای کارگاه‌های تولیدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سناریو اول زمانبندی کارکنان به دو بخش ۴ ساعته تقسیم می‌شود، به‌گونه‌ای که بین این دو بخش زمان استراحت و ناهار ۱ ساعته در نظر گرفته می‌شود. در سناریو دوم ۸ ساعت کاری با یک استراحت کوتاه به‌طور پیوسته برنامه‌ریزی می‌شود. این استراحت کوتاه ۳۰ دقیقه است. به منظور مقایسه و بررسی بیشتر دو سناریو برنامه‌ریزی گسسته نیز بررسی می‌شود که در این برنامه‌ریزی در سناریو سوم، سه استراحت به مجموع یک ساعت در نظر گرفته می‌شود. و در سناریو چهارم دو استراحت در فواصل شیفت کاری به مجموع یک ساعت مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. اگرچه سناریو سوم و چهارم کمتر و یا مورد توجه کارفرمایان نیست. سناریوهای برنامه‌ریزی در شکل ۲ نشان داده شده است.



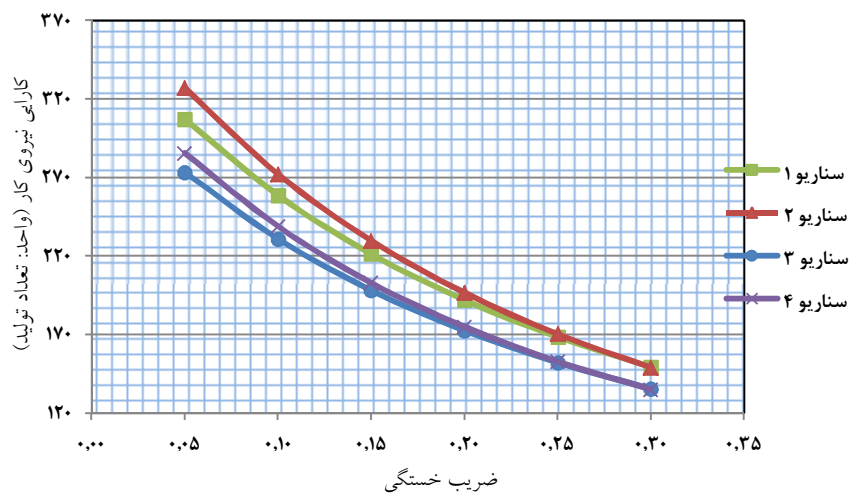
شکل ۲ سناریوهای برنامه‌ریزی کارکنان با توجه به شیفت‌های کاری و استراحت

برای حل مدل و تحلیل نتایج، پارامترهای انسانی مدل برنامه‌ریزی ریاضی زمانبندی کارکنان تعریف شد. جدول ۲ پارامترها و مقادیر آنها را نشان می‌دهد. مقدار این پارامترها براساس تجربه مشابه محقق در کارگاه‌های تولیدی کوچک (پارامترهای یادگیری - فراموشی، نرخ تولید و مدت زمان شیفت کاری) و پژوهش‌های پیشین [۲۵] (پارامترهای خستگی - بهبود) تعریف شده است. در جدول ۲ حداکثر نرخ کارایی ۶۰ واحد تولید در ساعت در نظر گرفته شد. نرخ یادگیری و فراموشی در ۴ دسته از ۵۰ درصد تا ۶ واحد در نظر گرفته شد؛ برای مثال واحد ۲ نشان می‌دهد که ۲ ساعت کار نیاز است تا نرخ کارایی کارگر به سطح مورد نظر برسد. ضریب خستگی و بهبود نیز در ۶ دسته از ۰/۵ تا ۰/۳ در نظر گرفته شده است که این ظرایب در جدول ۱ معرفی شده‌اند. مدت زمان شیفت کاری نیز با توجه به ۴ سناریو به ۳ دسته تقسیم شده است. دو شیفت ۴ ساعته (سناریو ۱ و ۲)، ۴ شیفت دو ساعته (سناریو ۳) و یک شیفت ۴ ساعته و دو شیفت دو ساعته در ستون آخر جدول ۲ ارائه شده است.

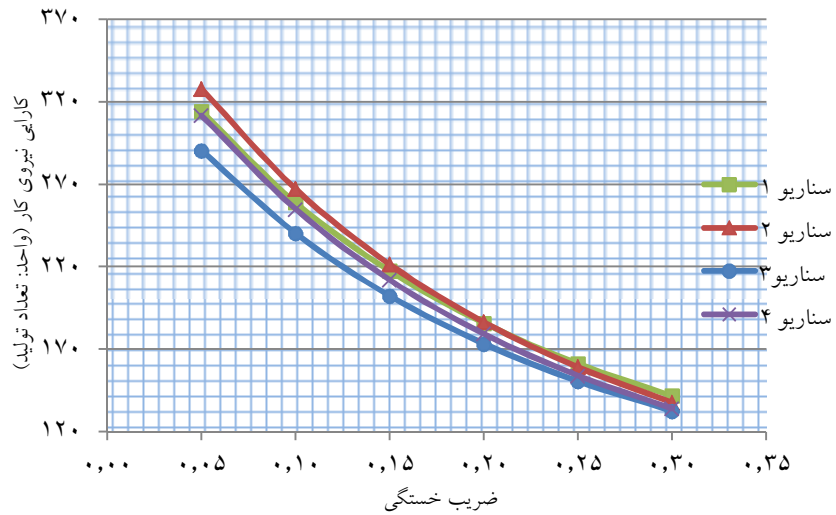
جدول ۲ پارامترهای انسانی مدل برنامه‌ریزی کارکنان و مقادیر آنها

پارامتر	تعداد کارکنان - تعداد ماشین	حداقل تعداد تولید مورد نیاز	K: حداکثر نرخ کارایی کارگر	L: نرخ یادگیری کارگر	F: نرخ فراموشی کارگر	z: ضریب افزایش خستگی	u: ضریب بهبود خستگی	ت: مدت زمان شیفت کاری
مقادیر پارامتر	n=10 m=10	3000 و 1100	60	0.2, 0.5 0.4	0.4, 0.2, 0.5 6	0.05 0.1 0.2 0.25 0.3	0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3	2*4 ساعت، 2*2+4 ساعت، 4*2 ساعت

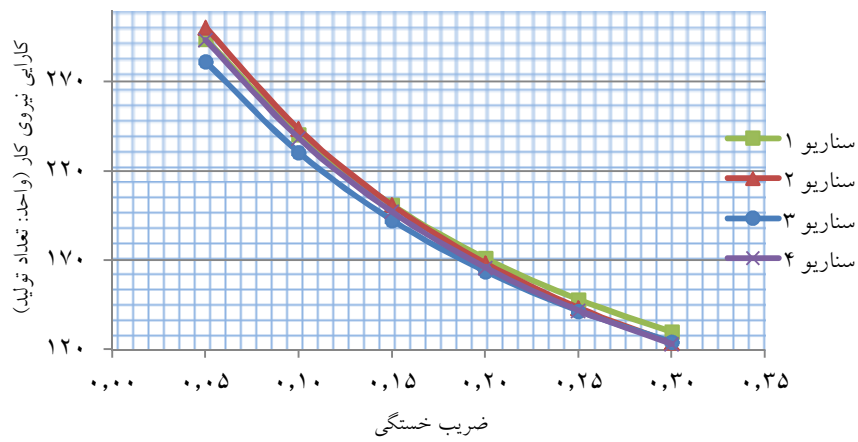
مجموعه مسائل برنامه‌ریزی کارکنان با مجموعه پارامترهای مختلف در چهار سناریو حل شد و نتایج آن در دو بعد کارایی کارکنان و ضرایب خستگی - بهبود (تجدید قوا) در شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است.



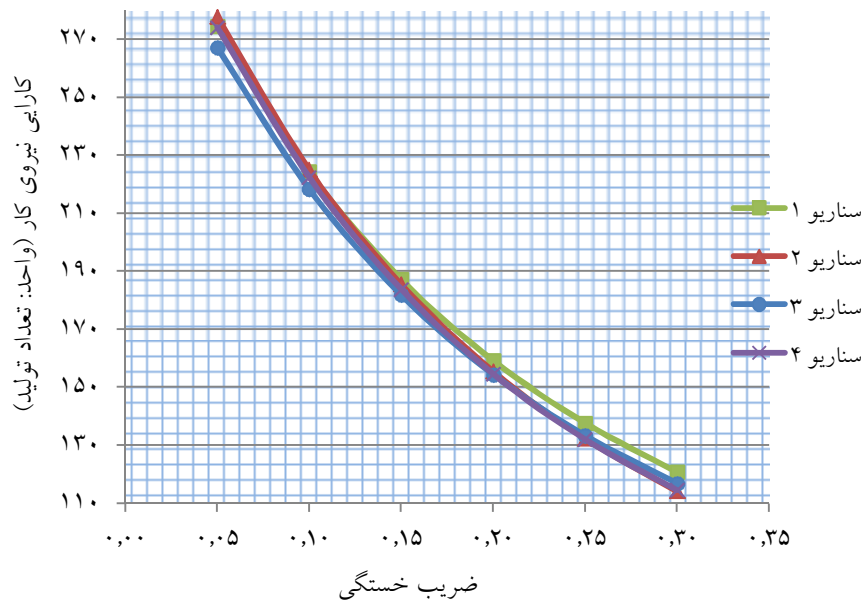
شکل ۳ کارایی کارکنان در شیفت کاری ۸ ساعت با نرخ یادگیری و فراموشی ۰/۵



شکل ۴ کارایی کارکنان در شیفت کاری ۸ ساعت با نرخ یادگیری و فراموشی ۲



شکل ۵ کارایی کارکنان در شیفت کاری ۸ ساعت با نرخ یادگیری و فراموشی ۴



شکل ۶ کارایی کارکنان در شیفت کاری ۸ ساعت با نرخ یادگیری و فراموشی ۶

نتایج حل مسائل نشان داد که با توجه به تغییر ضریب خستگی و بهبود، کارایی سناریوهای زمانبندی کارکنان نیز تغییر پیدا می‌کند؛ به عبارت دیگر با افزایش ضریب خستگی - بهبود، کارایی سناریوهای زمانبندی به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند. در ضرایب متفاوت خستگی-بهبود و نرخ‌های فراموشی - یادگیری سناریوهای زمانبندی نسبت به یکدیگر کارایی متفاوتی دارند و به منظور انتخاب بهترین سناریو باید مقادیر پارامترهای انسانی مورد توجه قرار گیرد. همان طور که در شکل ۳ الی ۶ نیز مشاهده می‌شود، جواب‌های مسائل زمانبندی نشان می‌دهد که در ضرایب خستگی - بهبود به نسبت پایین (کمتر از ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵) سناریو ۲ کارایی بهتری نسبت به سایر زمانبندی‌های کارکنان دارد؛ به عبارت دیگر بهتر است در چنین شرایطی از زمانبندی کاری پیوسته با زمان استراحت کوتاه استفاده کرد. زمانی که سرعت یادگیری-فراموشی سریع‌تر است (مقدار L-F کمتر است) تفاوت کارایی بین سناریو ۲ با سایر سناریوها بیشتر است و با کاهش سرعت یادگیری - فراموشی (افزایش مقدار L-F) این تفاوت کارایی سناریوها کمتر می‌شود. تفاوت کارایی بهترین سناریو نسبت به

بدترین سناریو با توجه به ضرایب متفاوت خستگی - بهبود در جدول ۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در پارامترهای L-F بالا و μ - λ بالا در شکل ۶، کارایی سناریو ۳ و سپس سناریو ۴ بهتر از کارایی سناریو شماره ۲ است؛ به عبارت دیگر زمانبندی گسسته با تعداد استراحت‌های بیشتر و مدت زمان استراحت کوتاه‌تر برای فعالیت‌های کاری سخت‌تر (وظایفی با سرعت یادگیری - فراموشی پایین و نرخ خستگی - بهبود بالاتر) مناسب‌تر است و زمانبندی‌های پیوسته با یک زمان استراحت و مدت زمان استراحت کوتاه برای مشاغل با وظایف آسان‌تر کارا تر است.

در جدول ۳ مشاهده می‌شود که برای نرخ‌های یادگیری - فراموشی ۰/۵ و ۲ با افزایش ضریب خستگی - بهبود نسبت کارایی بهترین سناریوی زمانبندی به کارایی بدترین سناریو کاهش پیدا می‌کند و برای نرخ‌های یادگیری - فراموشی ۴ و ۶ با افزایش ضریب خستگی - بهبود نسبت کارایی بهترین سناریوی زمانبندی به کارایی بدترین سناریو نخست کاهش و سپس افزایش می‌یابد. از این رو نمی‌توان قاعده کلی در خصوص میزان بهبود کارایی برای برنامه‌ریزی زمانبندی کارکنان مشخص کرد. اما این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که ضرایب و پارامترهای انسانی مورد بررسی در این طرح تأثیر مهمی در اقتصادی کردن زمانبندی کارکنان و ارائه برنامه‌ریزی بهینه نیروی کار دارد. مشاهده می‌شود که با توجه به تغییر پارامترهای انسانی میزان کارایی طرح زمانبندی کارکنان تا ۲۰ درصد افزایش پیدا می‌کند.

جدول ۳ نسبت کارایی بهترین سناریوی زمانبندی کارکنان به کارایی بدترین سناریو

ضریب خستگی-بهبود	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳	میانگین
نرخ یادگیری - فراموشی ۰/۵	۱/۱۹۶	۱/۱۷۸	۱/۱۵۹	۱/۱۳۹	۱/۱۱۹	۱/۱۰۵	۱/۱۴۹
نرخ یادگیری - فراموشی ۲	۱/۱۲۷	۱/۱۱۱	۱/۰۹۴	۱/۰۷۶	۱/۰۷۱	۱/۰۶۹	۱/۰۹۱
نرخ یادگیری - فراموشی ۴	۱/۰۶۸	۱/۰۵۷	۱/۰۴۴	۱/۰۴۵	۱/۰۴۵	۱/۰۵۴	۱/۰۵۲
نرخ یادگیری - فراموشی ۶	۱/۰۴۰	۱/۰۳۱	۱/۰۲۹	۱/۰۲۱	۱/۰۴۲	۱/۰۵۸	۱/۰۲۸

نتایج مرتبط با سناریوها نشان می‌دهد که در ضریب خستگی - بهبود ۰/۰۵ کارایی سناریوی زمانبندی ۲ بهتر است و با افزایش این ضریب، کارایی سناریوی ۱

افزایش یافته و در ضریب خستگی - بهبود ۰/۳ سناریو ۱ بهترین طرح زمانبندی است (البته در شرایط نرخ یادگیری-فراموشی ۰/۵ سناریو ۱ و ۲ برابر شده است). به منظور بررسی سناریوها در شرایط متوسط خستگی جدول ۴ وضعیت کارایی این سناریوها را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در نرخ‌های یادگیری - فراموشی ۰/۵ و ۲ سناریو شماره ۲ بهترین سناریو از بعد کارایی است و در نرخ‌های یادگیری - فراموشی ۴ و ۶ سناریو ۱ کارایی بهتری دارد. در این چهار شرایط سناریو ۳ و سپس سناریو ۴ کمترین کارایی را دارد.

جدول ۴ کارایی سناریوهای زمانبندی در شرایط میانگین خستگی

L_F: ۶		L_F: ۴		L_F: ۲		L_F: ۰/۵	
۱۱۰۴	سناریو ۱	۱۱۸۵	سناریو ۱	۱۳۴۵	سناریو ۲	۱۳۰۰	سناریو ۲
۱۰۹۰	سناریو ۲	۱۱۸۱	سناریو ۲	۱۲۹۷	سناریو ۱	۱۲۸۰	سناریو ۱
۱۰۸۲	سناریو ۴	۱۱۶۰	سناریو ۴	۱۲۰۸	سناریو ۴	۱۲۷۲	سناریو ۴
۱۰۷۲	سناریو ۳	۱۱۳۴	سناریو ۳	۱۱۶۳	سناریو ۳	۱۱۹۰	سناریو ۳

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش مسئله زمانبندی کارکنان با توجه به رویکرد مهندسی عوامل انسانی مورد مطالعه قرار گرفت. عوامل انسانی یادگیری، فراموشی، خستگی و تجدید قوای ناشی از استراحت مهم‌ترین عوامل مورد مطالعه و مدلسازی در این پژوهش است. از آن جایی که یادگیری و استراحت موجب بهبود عملکرد کارکنان و از طرف دیگر فراموشی و خستگی موجب کاهش عملکرد کارکنان می‌شود، بنابراین ضروری است که در زمانبندی کارکنان و تهیه ساختار شیفت کاری (که پارامترهای انسانی مذکور را تحت شعاع قرار می‌دهد) عوامل انسانی مورد مدلسازی و تحلیل قرار گیرد. با توجه به پژوهش‌های گیوی و همکاران (۲۰۱۵) و توماس و نمبهارد (۲۰۰۴) در خصوص عوامل انسانی و تأثیرات آنها در زمانبندی کارکنان در این پژوهش برای مدلسازی ریاضی پارامترهای یادگیری - فراموشی و خستگی - بهبود از توابع غیر خطی نمایی استفاده شد. با در نظر گرفتن پارامترهای انسانی مسئله زمانبندی

کارکنان در قالب مسائل با محدودیت دوگانه به صورت مدل ریاضی غیر خطی عدد صحیح با محدودیت‌های مرتبط ارائه شد. مدل ریاضی ارائه شده توسط عزیزی و همکاران (۲۰۱۰) با گردش شغلی کارکنان بین ایستگاه‌های تولیدی به بررسی کاهش خستگی کارکنان و تأثیرات آن بر یادگیری و فراموشی می‌پردازد در حالی که مدل ارائه شده در این پژوهش سعی دارد تا با زمانبندی زمان‌های استراحت و تأثیرات آن بر عوامل انسانی، کارایی کارکنان را افزایش دهد. به منظور بررسی کارایی و اعتبار مدل ریاضی، مسائل متعدد با پارامترهای مختلف در قالب سناریوهای برنامه‌ریزی شیفته کاری حل و مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش پارامترهای انسانی (ضرایب یادگیری - فراموشی و خستگی - بهبود) به عنوان مهم‌ترین داده‌های مورد نیاز برای بررسی و تعیین ساختار شیفته کاری با استفاده از پیشینه پژوهش [۲۴] و تجربیات محقق در کارگاه‌های تولیدی تعریف شد. سناریوهای زمانبندی در این پژوهش عبارت از دو سناریوی زمانبندی مورد استفاده کارفرمایان و دو سناریوی تعریف شده توسط محقق در کارگاه‌های تولیدی کوچک است. مجموعه معادلات غیر خطی در نرم‌افزار اکسل^{۲۸} برنامه‌نویسی و تأثیر سناریوهای زمانبندی بر عملکرد کارکنان مورد تحلیل قرار گرفت. تحلیل جواب‌های مدل نشان داد که تغییر پارامترهای انسانی در کارایی زمانبندی کارکنان تأثیر دارد و انتخاب سناریو زمانبندی مناسب می‌تواند نزدیک به ۰/۲۰ کارایی بهتر برای سیستم‌های با محدودیت دوگانه داشته باشد. نتایج نشان داد که در ضریب خستگی - بهبود ۰/۰۵ کارایی سناریو ۲ بهتر بوده و با افزایش این ضریب به تدریج کارایی سناریو ۲ نسبت به سایر سناریوها کاهش یافته و سناریو ۱ کارتر می‌باشد. سناریو ۳ و ۴ که قابل تعریف برای کارگاه‌ها است و بسیار کمتر مورد استفاده به‌وسیله کارفرمایان است، در بیشتر مواقع کارایی پایین‌تری دارند. اگرچه در شرایط کاری با فعالیت‌های با ضریب خستگی - بهبود بالا و یادگیری - فراموشی پایین سناریو ۳ و ۴ کارایی بهتری نسبت به سناریو ۲ دارد. در شرایط میانگین ضرایب خستگی - بهبود نتایج جواب‌های مسئله نشان داد که سناریوهای ۱ و ۲ کارترین سناریوهای زمانبندی کارکنان در سیستم‌های با محدودیت دوگانه است. بنابراین با توجه به پارامترهای تعریف شده، زمانبندی پیوسته شیفته کاری با تخصیص یک زمان استراحت نسبت به زمانبندی گسسته با بیش از یک زمان استراحت کارایی مطلوب‌تری دارد. اگرچه پیاده‌سازی مدل ارائه

شده در سازمان‌های مختلف با پارامترهای متفاوت می‌تواند نتایج متفاوتی داشته باشد. از این رو سازمان‌ها باید با توجه به پارامترهای کاری و شرایط کاری خودشان راه‌حل مختص خود را (زمانبندی شیفت کاری) از مدل ریاضی دریافت کنند. کارایی متفاوت سناریوها با توجه به مقادیر مختلف پارامترهای انسانی نشان می‌دهد که در شرایط کاری مختلف کافرمایان باید سناریوهای مختلف را ارزیابی و کاراترین آنان را انتخاب کنند که مدل ریاضی ارائه شده در چنین شرایطی بسیار کارآمد می‌باشد.

به منظور مطالعه دقیق‌تر پارامترهای انسانی در سیستم‌های با محدودیت دوگانه پیشنهاد می‌شود که سایر مدل‌های تشریح‌کننده عملکرد نیروی کار نیز مورد بررسی و مدلسازی قرار گیرد. با توجه به اینکه داده‌های مربوط به پارامترهای انسانی در این پژوهش بر اساس تجربیات محقق است، بنابراین یافته‌های این پژوهش نیز محدود به دامنه پارامترهای تعریف شده می‌باشد. از این رو برای کاربردی‌تر کردن مدل‌های با محدودیت دوگانه پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌هایی در خصوص شبیه‌سازی عملکرد انسانی و تعریف دامنه تغییرات پارامترهای انسانی در صنایع مختلف انجام گیرد. در نهایت به منظور ارائه مدل‌های جامع‌تر و کاربردی‌تر بهتر است که سایر عوامل انسانی مهم و تأثیرگذار بر عملکرد نیروی کار همچون استرس، انگیزش و ... مورد بررسی و مدلسازی قرار گیرد.

۸- پی‌نوشت‌ها

1. Dual Resource Constrained (DRC)
2. Staffing level
3. Cross-training
4. When
5. Where
6. Kher et al.
7. Carlson, Rowe
8. Attrition rate
9. Othman et al.
10. Alexander
11. Physical demand
12. Grip strength capacity
13. Eiselt and Marianov
14. Boredom

15. Ma et al.
16. Threshold value
17. Maximum endurance time
18. Yue
19. Guimarães et al.
20. Boredom
21. Jaber and Neumann
22. Givi, Jaber, Neumann
23. Thomas, Nembhard
24. Nembhard, Osothsilp
25. Qin et al.
26. Fritzsche et al.
27. Thomas, Nembhard
28. Excel

۹- منابع

- [1] Xu J., Xu X., Xie S.Q. (2011) "Recent developments in Dual Resource Constrained (DRC) system research"; *European Journal of Operational Research*, 215(2-1): 309-318.
- [2] Othman M., Gouw G. J., Bhuiyan N. (2012) "Workforce scheduling: A new model incorporating human factors"; *Journal of Industrial Engineering and Management*, 5(2): 259-284.
- [3] Treleven M. D. (1989) "A review of the dual resource constrained system research"; *IEE Transactions*, 21(3): 279-287.
- [4] Wilson J.R. (2000) "Fundamentals of ergonomics in theory and practice"; *Applied Ergonomics*, 31(6): 557-567.
- [5] Jaber M. Y., Kher H. V., Davis D. J. (2003) "Countering forgetting through training and deployment"; *International Journal of Production Economics*, 85(1): 33-46.
- [6] Kher H. V., Malhotra M. K., Philipoom P. R., Fry T. D. (1999) "Modeling simultaneous worker learning and forgetting in dual resource constrained systems"; *European Journal of Operational Research*, 115(1): 158-172.

- [7] Guastello S.J. (2006) *Human factors engineering and ergonomics: A systems approach*; Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.
- [8] Niebel B.W. (1958) *Motion and time study: an introduction to methods, time study, and wage payment*, RICHARD D. IRWIN, INC, HOMEWOOD, ILLINOIS.
- [9] Hagberg M., Silverstein B., Wells R., Smith M. J., Hendrick H. W., Carayon P., Pérusse M. (1995) *Work related musculoskeletal disorders (WMSDs): A reference book for prevention*, London: Taylor & Francis.
- [10] Alexander D. C. (1998) "Strategies for cost justifying ergonomic improvements"; *IIE Solutions*, 30(3): 30–35.
- [11] Carnahan B.J., Norman B.A., Redfern M.S. (2001) "Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing"; *IIE Transactions*, 33(10): 875-887.
- [12] Dorri B., Akbari M., Zandieh M. (2013) "Bi-objective shift and job rotation scheduling for multi-skilled workforces with human factor engineering approach"; *Management Researches In Iran*, 17(3): 1-21.
- [13] Eiselt H.A., Marianov V. (2008) "Employee positioning and workload allocation"; *Computers & Operations Research*, 35: 513–524.
- [14] Akbari M., Zandieh M., Dorri B. (2013) "Scheduling part-time and mixed-skilled workers to maximize employee satisfaction"; *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(5-8): 1017-1027.
- [15] Ma L., Chablat D., Bennis F., Zhang W. (2009) "A new simple dynamic muscle fatigue model and its validation"; *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39 (1): 211–220.
- [16] Yue H. (2005) *Worker flexibility in dual resource constrained (DRC) shops*, University Library Groningen [Host].
- [17] Zamiska J. R., Jaber M. Y., Kher H. V. (2007) "Worker deployment in dual resource constrained systems with a task-type factor"; *European Journal of Operational Research*, 177(3): 1507–1519.

- [18] Kim S., Nembhard D. A. (2010) "Cross-trained staffing levels with heterogeneous learning/forgetting"; *IEEE Transactions on Engineering Management*, 57(4): 560–574.
- [19] Guimarães L. M., Anzanello M. J., Renner J. S. (2012) "A learning curve-based method to implement multifunctional work teams in the Brazilian footwear sector"; *Applied Ergonomics*, 43(3): 541–547.
- [20] 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.
- [21] Aryanezhad M., Kheirkhah A., Deljoo V., Mirzapour Al-e-hashem S. (2009) "Designing safe job rotation schedules based upon workers' skills"; *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 41(1–2), 193–199.
- [22] Jaber M. Y., Neumann W. P. (2010) "Modelling worker fatigue and recovery in dual-resource constrained systems"; *Computers and Industrial Engineering*, 59(1): 75–84.
- [23] Jaber M. Y., Givi Z. S., Neumann W. P. (2013) "Incorporating human fatigue and recovery into the learning–forgetting process"; *Applied Mathematical Modelling*, 37(12–13): 7287–7299.
- [24] Givi Z.S., Jaber M.Y., Neumann W.P. (2015) "Production planning in DRC systems considering worker performance"; *Computers & Industrial Engineering*, 87(1): 317–327.
- [25] Givi Z. S., Jaber M. Y., Neumann W.P. (2015) "Modelling worker reliability with learning and fatigue"; *Applied Mathematical Modelling*, 39(17): 5186–5199.
- [26] 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.

- [27] Nembhard D.A., Osothsilp N., (2005) "Learning and forgetting-based worker selection for tasks of varying complexity"; *Journal of the Operational Research Society*, 56(5): 576–587.
- [28] Qin S., Liu S., Kuang H., (2016) "Piecewise linear model for multiskilled workforce scheduling problems considering learning effect and project quality"; *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2016, Article ID 3728934, 11 pages.
- [29] Sobhani A., Wahab M.I.M., Neumann W.P., (2015) "Investigating work-related ill health effects in optimizing the performance of manufacturing systems"; *European Journal of Operational Research*, 241(3): 708–718.
- [30] Sobhani A., Wahab M.I.M., Neumann W.P., (2017) "Incorporating human factors-related performance variation in optimizing a serial system"; *European Journal of Operational Research*, 257 (1): 69–83
- [31] Fritzsche L., Wegge J., Schmauder M., Kliegel M., Schmidt K.H., (2014) "Good ergonomics and team diversity reduce absenteeism and errors in car manufacturing"; *Ergonomics*, 57(2):148-61.