International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2012)

September 2012, Volume 23, Number 2
pp. 199-209

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

A Heuristic Method for Analysis of Assembly Line Based on Simulation and DOE

H Hosseini Nasab, V. Mahdavi Asl & M.S. Fallah Nezhad*

Hassan Hosseini Nasab, *Associate Professor, Yazd University, Iran*
Vahid Mahdavi Asl, *MSc Yazd University, Iran*
Mohammad Saber Fallah Nezhad, *Assistent Prof, Yazd University, Iran*

Keywords

Discrete-event simulation,
Design of experiments,
Analysis of variance,
Assembly line balancing

ABSTRACT

A heuristic method based on simulation and design of experiments for performance improvement of assembly line is presented in this paper. In the proposed method, all effective factors on the performance of an assembly line are specified using the expert's point of view and then a 2k factorial design is used for the selection of the most effective factors. Also a factorial design is applied for assessment of interaction among important factors and comparison of different levels. A simulation method is employed for evaluating the performance of proposed alternatives instead of using real case. A straightforward assembly line analysis is presented and exemplified in this work by extracting and analyzing effective factors of an auto light company. Number of workstations, operators and speed of machines are chosen as the main factors. Next to the identification of different levels using factorial design, the method showed significant improvement on the assembly line of auto light company..

© 2012 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 23, No. 2, All Rights Reserved

* **Corresponding author. Mohammad Saber Fallah Nezhad**
Email: *fallahnezhad@yazduni.ac.ir*

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-05]

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــــریت تولیـــد

شمـــــاره ۲، جلـــد ۲۳، شهریـــــور ۱۳۹۱
صفحـــــه ۲۰۹-۲۰۰

نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید
دانشگاه علم و صنعت ایران

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

یک روش ابتکاری برای تجزیه و تحلیل خط مونتاژ برمبنای شبیه‌سازی و طراحی آزمایش‌ها

حسن حسینی نسب، وحید مهدوی اصل و محمدصابر فلاح نژاد*

کلمات کلیدی

شبیه‌سازی گسسته-پیشامد،
طراحی‌آزمایش‌ها،
حلیل‌واریانس،
بالانس خط مونتاژ

چکیده:

در این مقاله یک روش ابتکاری بر مبنای شبیه‌سازی و طراحی آزمایش‌ها برای بهبود عملکرد خط مونتاژ معرفی‌شده است. روش معرفی شده تمام عوامل تاثیرگذار بر عملکرد خط مونتاژ را با استفاده از نظر افراد خبره و کارشناسان شناسایی نموده سپس یک طرح عاملی 2^k برای غربال نظرات و یافتن موثرترین عوامل اجرا می‌نماید. نهایتا با شناسایی مهمترین عوامل تاثیرگذار و تعیین سطوح ممکن آنها یک طرح عاملی برای مقایسه سطوح مختلف و تاثیر متقابل موثرترین عوامل بر یکدیگر انجام می‌شود. در این روش به جای تغییر سیستم واقعی، طراحی آزمایش‌ها بر روی مدل شبیه-سازی شده سیستم انجام می‌گیرد، تا تاثیر عوامل مشخص گردد. به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی مدل شبیه‌سازی خط مونتاژ کارخانه تولید چراغ اتومبیل طراحی شد و عوامل تاثیرگذار از روش طوفان فکری تعیین گردیدند. عوامل موثر، غربال شده و سه عامل نیروی انسانی، سرعت ماشین آلات و تعداد ایستگاه‌های کاری به عنوان موثرترین عوامل انتخاب شدند. عوامل تعیین سطح گردیده و طرح عاملی برای مقایسه سطوح عوامل اصلی و تاثیر متقابل آنها بر یکدیگر انجام شد. روش پیاده شده باعث بهبود عملکرد خط مونتاژ کارخانه گردید.

۱. مقدمه

روش طراحی آزمایش‌ها کاربرد وسیعی در زمینه‌های مختلف پیدا کرده است. در حقیقت، آزمایش را می‌توان به عنوان بخشی از فرآیند علمی و یکی از روش‌های یادگیری در مورد چگونگی عملکرد فرآیندها یا سیستم‌ها در نظر گرفت. در دنیای مهندسی، طراحی آزمایش‌ها ابزاری مهم جهت بهبود عملکرد یک فرآیند تولید محسوب می‌شود. طراحی آزمایش‌ها، به فرآیند انجام آزمایش با هدف جمع‌آوری داده مناسب و تحلیل آنها از روش‌های آماری جهت کسب نتایج معتبر اشاره دارد[۱].

از طرف دیگر مدل شبیه‌سازی می‌تواند به عنوان یک ابزار قوی برای بررسی طرح‌ها و پیشنهادات جدید و پیش‌بینی تاثیر آنها در سیستم واقعی استفاده شود. در سیستم‌هایی که جمع آوری داده تحت شرایط پیشنهاد شده باعث توقف و تغییرات زیاد در سیستم واقعی می‌شود، از مدل شبیه‌سازی شده سیستم برای جمع آوری داده استفاده می شود.

به عبارت دیگر می‌توان از مدل شبیه‌سازی معتبری که رفتار آن به قدری نزدیک به عملکرد سیستم واقعی باشد استفاده کرد تا به جای تغییر سیستم واقعی، تغییرات بر روی مدل شبیه سازی انجام شود. تعیین اعتبار مدل شبیه‌سازی از مهمترین موارد در طراحی آن است، که مشخص می‌کند آیا مدل شبیه‌سازی معرف سیستم واقعی هست یا خیر؟ از طریق روش‌های آماری می‌توان اعتبار مدل

تاریخ وصول: ۸۹/۹/۱۵
تاریخ تصویب: ۹۰/۴/۵

مهندس وحید مهدوی اصل، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، vahidmahdaviasl65@gmail.com

دکتر حسن حسینی نسب، دانشیار گروه مهندسی صنایع، ، دانشگاه یزد، hhn@yazduni.ac.ir

***نویسنده مسئول مقاله: دکتر محمدصابر فلاح نژاد،** استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، fallahnezhad@yazduni.ac.ir

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-05]

را نشان داد. استفاده از مدل شبیه‌سازی معتبر سبب می‌شود تا مدیران و سایر طراحان که از مدل بهره می‌برند، بتوانند به نتایج حاصل اطمینان کنند[۲].

مدلسازی ریاضی مسئله بالانس خط مونتاژ برای خطوط مونتاژ تک منظوره اولین بار توسط سالوسن ارائه گردیده، و از آن زمان تحقیقات زیادی در این موضوع صورت گرفته است. مرور ادبیات مفصلی در این موضوع توسط بکر و اسچول انجام شده است[۳]. تکنیک‌های مختلفی برای حل مدل‌های بالانس خط مونتاژ توسط افرادی از قبیل ایرل، جین واو، مولن و فرازیر گزارش شده است[۳، ۴]. در زمینه ترکیب شبیه‌سازی و روش‌های تحلیلی در ادبیات مربوط به مسئله خط مونتاژ تحقیقاتی صورت گرفته است. رویکرد استفاده از مدل شبیه‌سازی همراه با مدل تحلیلی سیستم توسط شاندی‌کومار و همکارش دسته‌بندی گردیده است. مولن و همکارش از شبیه‌سازی و تحلیل داده‌ها برای مقایسه جواب‌های بالانس خط مونتاژ استفاده کرده‌اند. شنگ‌جین یک مطالعه موردی که ترکیب روش شبیه سازی و تحلیلی بود، برای طراحی یک خط مونتاژ قطعات الکتریکی که دارای چند مرحله تولید با چند انبار موقت بود انجام داده است[۴]. آرمندس و همکارانش به منظور تعیین شکل خط مونتاژ با کمترین تعداد ایستگاه‌کاری و بالانس حجم کار بین ایستگاه‌های مختلف در کارخانه تولید دوربین‌های عکاسی از ترکیب مدل شبیه‌سازی و یک الگوریتم هیورستیک ترکیبی استفاده کرده‌اند[۳]. کیوو و همکارش از ترکیب شبیه سازی و الگوریتم پرندگان برای طراحی خط مونتاژ استفاده کرده و با آزمون‌های آماری نشان دادند که جواب روش آنها بهتر از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم پرندگان مرسوم است[۵].

در دیگر تحقیقاتی که در زمینه بالانس خط مونتاژ صورت پذیرفته، بیشتر از روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری برای حل این مسئله استفاده شده است.

کیون‌کیم و همکارانش یک مدل ریاضی و الگوریتم ژنتیک را برای بالانس خط مونتاژ به کار برده و با استفاده از آزمایش‌های عددی کارآیی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی را نشان داده‌اند[۶]. هورنگ‌یه و همکارش از یک روش ابتکاری دو طرفه[1] جدید که حاصل ترکیب روش دوطرفه و روش مسیر بحرانی می‌باشد، روشی برای بالانس خط مونتاژ پیشنهاد داده‌اند. آنها از روش مسیر بحرانی که کاربرد زیادی در مدیریت پروژه دارد برای تخصیص کارها و بالانس خط مونتاژ استفاده کرده و سپس یک مثال برای مشخص شدن کارایی روش ابتکاری ارائه کرده‌اند[۷]. آکپینار و همکارش یک الگوریتم ژنتیک برای مسئله بالانس خط مونتاژ با ایستگاه‌های موازی و محدودیت‌های منطقه‌بندی[2] ارائه کرده‌اند. آنها در مدل خود کمینه کردن تعداد ایستگاه‌های کاری و بیشینه کردن همواری حجم کار بین و داخل ایستگاه‌های کاری را مد نظر قرار داده‌اند[۸]. بلوم و همکارش از یک الگوریتم آگاهانه برای مسئله تخصیص کارها به کارگرهای خط مونتاژ و کارگرها به ایستگاه‌های کاری استفاده کرده‌اند. آنها در تحقیق خود هدف کمینه کردن زمان سیکل کاری را در حالت ثابت و مشخص بودن تعداد ایستگاه‌های کاری دنبال کرده‌اند[۹].

ترکیب مدل شبیه‌سازی و طراحی آزمایش‌ها روش پرکاربردی برای حل مسائلی است که تحت تاثیر عوامل مختلف قرار دارند. ترکیب مدل شبیه‌سازی و طراحی آزمایش‌ها در زمینه‌های مختلف از قبیل مهندسی شیمی[3]، تکنولوژی پردازش مواد[4] و مهندسی سازه‌ها[5] کاربرد دارد[۱۰، ۱۱، ۱۲و ۱۳]. دیسوکی و همکارش از ترکیب مدل شبیه‌سازی و طراحی آزمایش‌ها برای کمینه‌کردن هزینه‌های نگهداری ساختمان استفاده کردند[۱۰]. لانگو و همکارش برای بررسی تاثیر میزان تقاضای مشتری، زمان تحویل و تغییرپذیری تقاضای مشتری بر روی انعطاف‌پذیری زنجیره تامین از شبیه‌سازی و طراحی آزمایش‌ها بهره بردند[۱۱]. آخت و همکارانش در زمینه علم مواد، روش شبیه‌سازی و طراحی آزمایش‌ها را برای پی بردن به تاثیر برش عمودی در تغییرات ناخواسته شکل یک نوع کربن خاص به کار بردند[۱۲]. گاناسگرام و همکارانش برای تشخیص عامل‌های موثر بر افت ضریب تخلخل ریجه[6] از شبیه‌سازی بر مبنای طراحی آزمایش‌ها استفاده کردند[۱۳].

مدل‌های شبیه‌سازی برای فرآیندهای تولیدی بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. زیرا در دنیای واقعی هرگونه تغییری در شرایط خط مونتاژ نیازمند هزینه‌های زیاد، زمانبر و باعث توقف خط می‌گردد ولی بعد از مدل کردن سیستم به راحتی و بدون هزینه اضافی مهندس‌ها و کارشناسان می‌توانند تغییرات مد نظر خود را اعمال نمایند. بررسی علمی نظرات و طرح‌ها با استفاده از طراحی آزمایش‌ها و تحلیل واریانس می‌تواند انجام پذیرد. در طراحی آزمایش‌ها عامل‌های تاثیرگذار در سطوح مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند و به همین منظور استفاده از مدل شبیه‌سازی همراه با مدل طراحی آزمایش‌ها برای جلوگیری از تغییر در سیستم واقعی راه حل منطقی و به صرفه‌ای می‌باشد. ولی باید توجه داشت که ساخت و تعیین اعتبار مدل شبیه‌سازی سیستم بایستی توسط افراد متخصص انجام گیرد، که این کار نیز نیازمند زمان و هزینه است[۱و ۲].

[1] *bidirectional heuristic*
[2] *zoning*
[3] *Chemical Engineering*
[4] *Materials Processing Technology*
[5] *Engineering Structures*
[6] *permanent mold casting*

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-05]

در این مقاله یک روش ابتکاری برمبنای شبیه‌سازی و طراحی آزمایش‌ها به منظور کمک به مدیران و طراحان خط مونتاژ برای بهبود عملکرد خط مونتاژ ارئه گردیده است. در بخش ۲ گام‌های روش ابتکاری توضیح داده شده است. در بخش ۳ یک مطالعه موردی آورده شده که شامل: اطلاعات خط مونتاژ کارخانه مورد مطالعه، مدل شبیه‌سازی خط مونتاژ و نحوه تعیین اعتبار آن، طریقه شناسایی و غربال عوامل تاثیرگذار و تجزیه و تحلیل طرح عاملی است. نتایج این تحقیق در بخش ۴ آمده است.

۲. روش ابتکاری

مدیران برای تصمیم‌گیری‌های خود همواره نیازمند ابزارهای کارآمد و قابل اطمینان می‌باشند. در اینجا یک روش نظام‌مند برای کمک به مدیران خط مونتاژ در بهبود عملکرد سیستم تولید معرفی شده است. در کارخانه‌ها عوامل متعددی بر روی بهروری تاثیرگذار می‌باشند، که رسیدگی به تمام آنها نیازمند وقت و هزینه فراوان است. با توجه به قانون پارتو عوامل معدودی دارای بیشترین تاثیر می‌باشند، از این رو در این روش تمرکز بر شناسایی و بهبود بر روی تاثیرگذارترین عوامل است. الگوریتم روش ابتکاری در شکل ۱ آورده شده است.

گام ۱. طراحی مدل شبیه سازی

ابتدا مدل شبیه سازی با پیشامدهای گسسته خط مونتاژ طراحی گردد. خروجی مدل شبیه سازی تعداد محصول نهایی در یک دوره زمانی مشخص در نظر گرفته شود. در صورتی که مدل طراحی شده معتبر باشد باید خروجی مدل شبیه سازی با خروجی خط مونتاژ واقعی در یک دوره زمانی مشخص دارای همپوشانی بالایی باشد. اعتبار مدل شبیه‌سازی می‌تواند با آزمون فرض زیر اندازه‌گیری شود.

x_{iR} = تعداد محصول نهایی تولید شده در خط مونتاژ واقعی در روزکاری[1] i ام.

x_{jM} = تعداد محصول نهایی برای ۸ ساعت اجرا مدل شبیه‌سازی خط مونتاژ در اجرای j ام

n_R = تعداد روزکاری در نظرگرفته شده از خط مونتاژ واقعی($n_R \geq 30$)

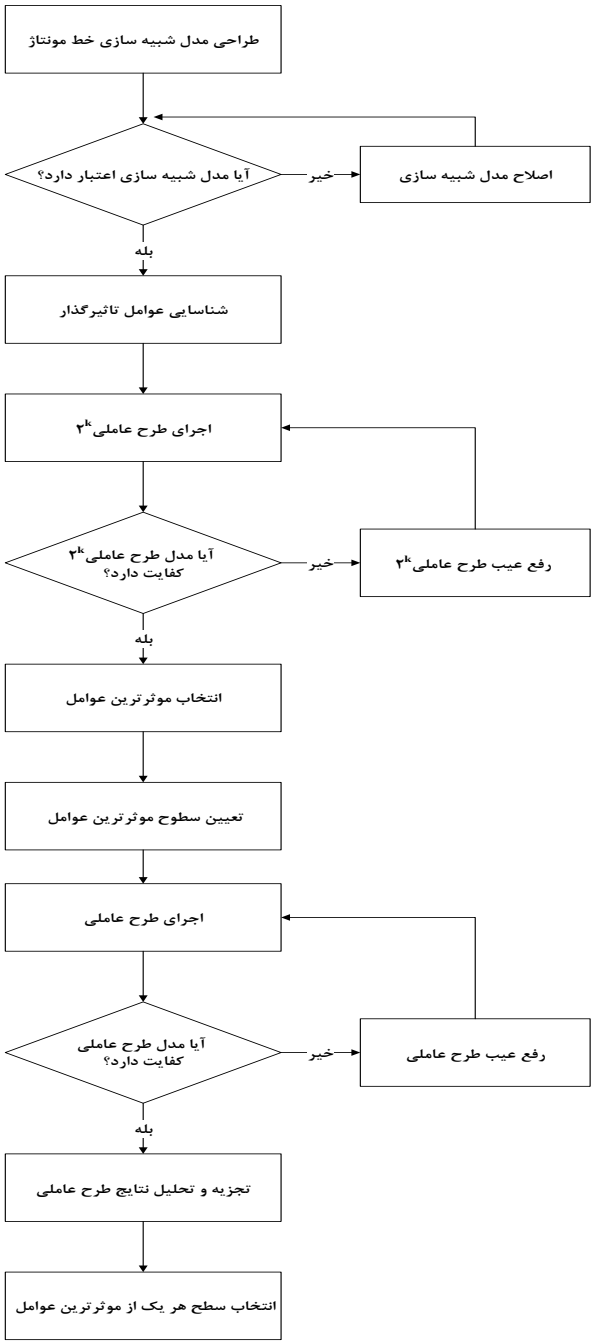
n_M = تعداد اجراهای مدل شبیه‌سازی($n_M \geq 30$)

$\bar{x}_R$ = میانگین تعداد محصول نهایی تولید شده در خط مونتاژ واقعی در n_R روزکاری ($\frac{\sum_{i=1}^{n_R} x_{iR}}{n_R}$)

$\bar{x}_M$ = میانگین تعداد محصول نهایی در مدل شبیه‌سازی خط مونتاژ در n_M اجرا ($\frac{\sum_{j=1}^{n_M} x_{jM}}{n_M}$)

S_R = انحراف معیار تعداد محصول نهایی تولید شده در خط مونتاژ واقعی در n_R روزکاری

S_M = انحراف معیار تعداد محصول نهایی در مدل شبیه‌سازی خط مونتاژ در n_M اجرا



شکل۱. فلوچارت گام‌های روش ابتکاری

[1] در این مقاله هر روز کاری ۸ ساعت در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-05]

فرض صفر $\mu = 0$ را در مقابل فرض یک $\mu \neq 0$ در سطح معنادار $\alpha = 0.05$ آزمون کنید.

با این فرض که متغیر حاصل از اختلاف بین میانگین تعداد محصول نهایی تولید شده در خط مونتاژ واقعی($\bar{x}_R$) و میانگین تعداد محصول نهایی در مدل شبیه‌سازی خط مونتاژ ($\bar{x}_M$) دارای توزیع نرمال باشد، آماره T دارای توزیع t با درجه آزادی ν است[۲و۱۴].

$$T = \frac{(\bar{x}_R - \bar{x}_M)}{\sqrt{(S_R^2/n_R) + (S_M^2/n_M)}} \qquad (۱)$$

$$\nu = \frac{(S_R^2/n_R + S_M^2/n_M)^2}{\left(\frac{(S_R^2/n_R)^2}{n_R+1} + \frac{(S_M^2/n_M)^2}{n_M+1}\right)} - 2 \qquad (۲)$$

اگر دلیلی برای رد فرض صفر وجود نداشت، مدل شبیه سازی معتبر است و به گام ۲ بروید. در غیر این صورت مدل باید اصلاح گردد.

گام ۲. شناسایی عوامل تاثیرگذار

در این مرحله فاکتورهایی که از نظر افراد خبره و کارشناسان خط مونتاژ در بهبود عملکرد خط مونتاژ موثر می‌باشند، شناسایی می گردد. این کار می‌تواند از طریق طوفان فکری، مصاحبه با افراد خبره و یا دیگر روش‌ها صورت پذیرد. شناسایی تمام عوامل تاثیر گذار در عملکرد خط مونتاژ بسیار مهم است. هر چه عوامل بیشتری در این مرحله در نظر گرفته شود، عملکرد روش ابتکاری بهتر خواهد بود.

گام ۳. اجرای طرح عاملی 2^k

دو سطح برای هر یک از عوامل بدست آمده از گام ۲ در نظر گرفته شود. با توجه به محدوده‌ی امکان‌پذیر هر عامل سعی شود تا دو سطح انتخاب شده بیشترین فاصله را داشته باشند. مثلا عامل تعداد نیروی انسانی خط مونتاژ در طرح عاملی 2^k دو سطح حداقل تعداد نیروی انسانی و حداکثر تعداد نیروی انسانی در نظر گرفته شود.

طرح عاملی 2^k را با در نظر گرفتن، تعداد محصول تولید شده در خط مونتاژ به عنوان متغیر پاسخ بر روی مدل شبیه‌سازی بدست آمده از گام ۱ اجرا نمائید. در این مرحله عوامل غربال می‌شوند، تا با توجه به قانون پارتو موثرترین آنها انتخاب گردند. کفایت مدل از طریق تحلیل باقیمانده‌ها ارزیابی شود. در صورت رد کفایت مدل طراحی آزمایش‌ها گام فوق بعد از رفع عیب مدل تکرار می‌شود. در غیر این صورت به گام ۴ بروید.

گام ۴. تعیین سطوح موثرترین عوامل

سطوح ممکن موثرترین عوامل انتخاب شده در گام ۳ توسط افراد خبره و کارشناسان خط مونتاژ مشخص گردد. در این مرحله می‌توان چندین سطح نیز برای یک عامل در نظر گرفت. مبنای انتخاب سطوح برای هر یک از موثرترین عوامل باید قابلیت پیاده کردن آن در خط مونتاژ واقعی باشد. مثلا اگر عامل تعداد ایستگاه‌های کاری به عنوان یکی از موثرترین عوامل انتخاب شد، آنگاه با توجه به شرایط کارخانه، خبرگان و کارشناسان باید تعیین کنند که چند حالت ممکن می‌تواند برای آن در نظر گرفته شود.

گام ۵. اجرای طرح عاملی[1]

مدل طراحی آزمایش‌های عاملی را با در نظر گرفتن تعداد محصول تولید شده به عنوان متغیر پاسخ بر روی مدل شبیه‌سازی بدست آمده از گام ۱ اجرا کنید. طرح‌های عاملی بعنوان موثرترین روش برای بررسی چند عامل در دو یا چند سطح مورد استفاده قرار می‌گیرند.

منظور از یک طرح عاملی این است که در هر اجرای کامل یا تکرار آزمایش، تمام تکرار ترکیب‌های حاصل از سطوح عوامل مورد نظر بررسی می‌شود. کفایت مدل از طریق تحلیل باقیمانده‌ها ارزیابی می‌شود. در صورت رد کفایت مدل طراحی آزمایش‌ها، گام فوق باید بعد از رفع عیب آن تکرار شود. در غیر این صورت به گام ۶ بروید.

گام ۶. تجزیه و تحلیل نتایج طرح عاملی

نتایج حاصل از آنالیز واریانس طرح عاملی گام ۵ تجزیه و تحلیل - گردد. نمودار اثرات اصلی[2] و متقابل عوامل برای کمک به تحلیل نتایج طرح عاملی رسم شود. اثر اصلی هر یک از موثرترین عوامل و اثرمتقابل آنها را با مقایسه متغیر پاسخ نشان دهید. سطح هر یک از عوامل با توجه به سیاست‌های مدیریتی انتخاب گردد.

۳. مطالعه موردی

روش ابتکاری بیان شده در یک کارخانه تولید چراغ اتومبیل به منظور بهبود عملکرد آن اجرا شده است.

---

[1] *Factorial Design*
[2] *Main Effect*

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-05]

۳-۱. خط مونتاژ چراغ اتومبیل

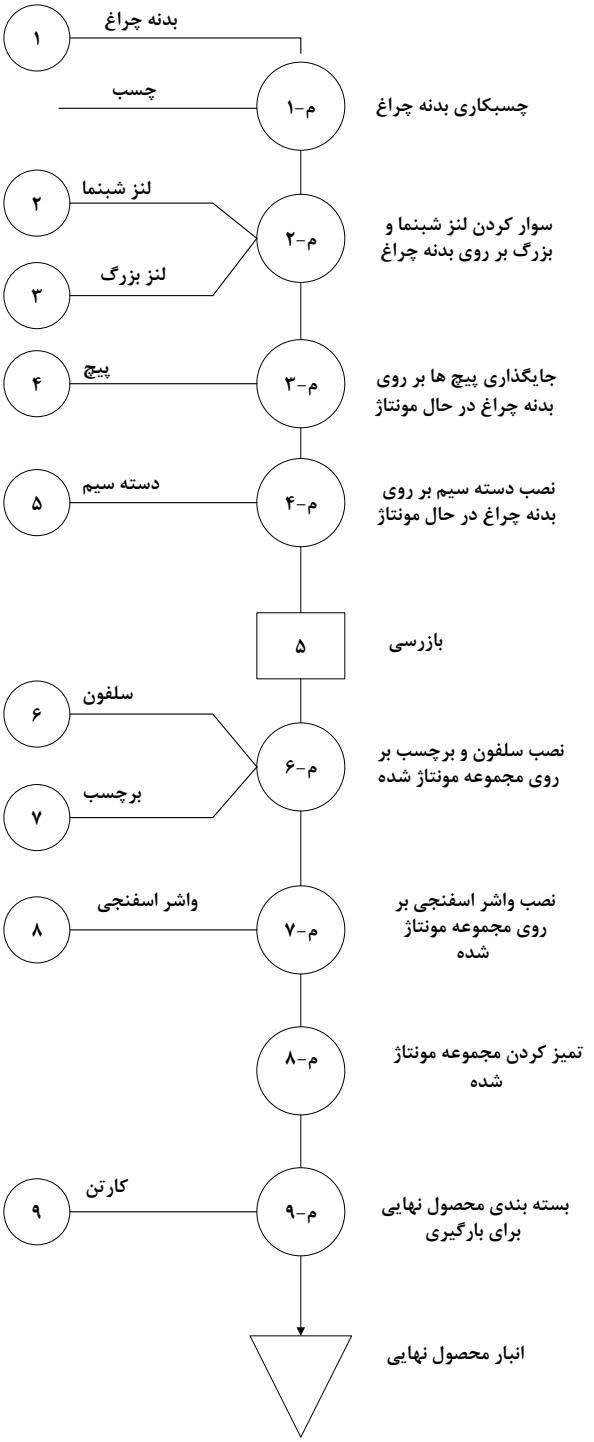
کلیه قطعات از انبار تهیه می‌شوند. قطعات چراغ اتومبیل در بین ایستگاه‌ها جابه‌جا شده و در پایان خط مونتاژ محصول نهایی بسته‌بندی می‌گردد. در این خط مونتاژ تعداد محصول نهایی بسته‌بندی شده به عنوان معیار ارزیابی در نظر گرفته شده است. شکل ۲ نمودار مونتاژ چراغ اتومبیل است که ترتیب و توالی اتصال قطعات را نشان می‌دهد. حمل و نقل‌های موجود در داخل ایستگاه‌های کاری و بازرسی‌های چشمی که توسط اپراتور دستگاه‌ها صورت می‌پذیرد، جزئی از فعالیت اصلی در نظر گرفته شده است.

۳-۲. مدل شبیه سازی خط مونتاژ

قبل از مدلسازی خط مونتاژ کارخانه تولید چراغ اتومبیل مدل مفهومی آن به منظور توافق میان توسعه‌دهندگان مدل شبیه-سازی و استفاده‌کنندگان از آن مبنی بر این که شبیه‌سازی چه کاری را انجام خواهد داد، طراحی گردید. برای مدل کردن سسیستم از نرم افزار Arena 9 استفاده شده، که یک نرم افزار تخصصی برای شبیه سازی است. توزیع احتمال فعالیت‌ها با استفاده از داده‌های گردآوری شده از خط مونتاژ بدست آمد. برای تعیین توزیع احتمال و پارامترهای آن از ابزار Input Analyzer نرم افزار Arena 9 استفاده شده است(شکل۳). مدل شبیه‌سازی خط مونتاژ با توجه به ترتیب انجام عملیات‌ها در نرم افزار Arena9 طراحی شد. چراغ اتومبیل به عنوان نهاد[1] در نظرگرفته شد. در مدلسازی از ماژول‌های Match و Batch به صورت ترکیبی در قسمت‌هایی که نیاز به مونتاژ دو یا چند قطعه بر روی هم بود استفاده شد. نمای کلی از منطق مدل شبیه‌سازی در شکل ۴ آورده شده است.

مدل شبیه سازی مورد بازبینی[2] قرار گرفت و برای اشکال زدایی آن از انیمیشن استفاده شد. انیمیشن تصویری از طریقه‌ی کارکردن مدل شبیه‌سازی می‌دهد. نرم افزار Arena 9 با عبور دادن نهادها به صورت انیمیشن در مدل شبیه سازی منطق حاکم بر مدل را نشان می‌دهد.

با مقایسه طریقه گردش نهادها در مدل شبیه‌سازی با خط مونتاژ واقعی خطاهای منطقی مدل رفع گردید. بعد از بازبینی مدل شبیه سازی اعتبار آن ارزیابی شد. اعتبار سنجی[3] روندی است که مشخص می کند؛ آیا مدل شبیه سازی بوجود آمده بازتاب دهنده سیستم واقعی تحت مطالعه می باشد یا خیر. اعتبار مدل شبیه-سازی خط مونتاژ با روش آماری بیان شده در بخش ۲ بررسی شد. واریانس خروجی‌های سیستم واقعی معمولا بیشتر از مدل شبیه‌سازی است، زیرا در دنیای واقعی عامل‌های اغتشاش[4] ناشناخته و غیر قابل کنترل وجود دارد[۲]. نتایج آزمون فرض برابری میانگین‌ها در جدول ۱ آمده است.



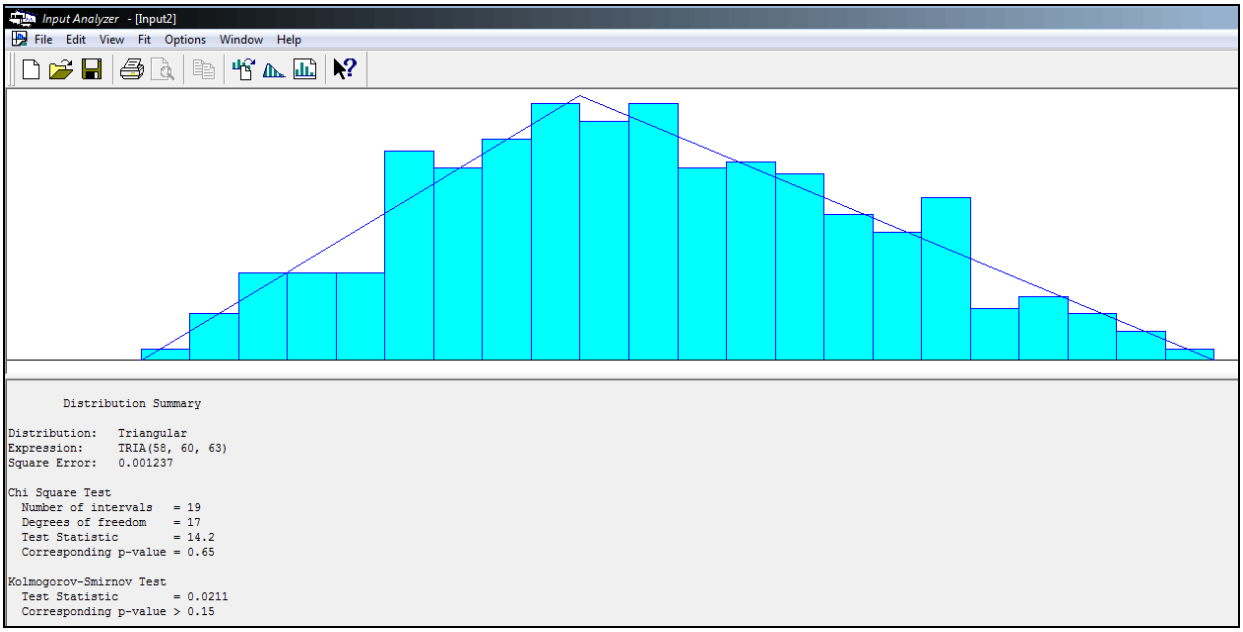
شکل ۲. نمودار مونتاژ چراغ اتومبیل

[1] *Entity*
[2] *Verification*
[3] *Validation*
[4] *Nuisance factors*

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-05]

جدول۱. بررسی تعیین اعتبار مدل شبیه سازی با آزمون فرض برابری میانگین‌ها

میانگین تعداد محصول نهایی		انحراف معیار تعداد محصول نهایی		تعداد تکرار		T	ν	α	p-value
$\bar{x}_R$	$\bar{x}_M$	S_R	S_M	n_R	n_M				
۴۷۳/۸۰	۴۷۵/۴۰	۹/۴۳	۲/۹۹	۱۰۰	۱۰۰	-۱/۶۲	۱۱۸	۰/۰۵	۰/۱۱



شکل۳. تعیین توزیع فعالیت مونتاژ لنز شبنما

طبق اطلاعات ارائه شده در جدول ۱ تفاوت معناداری بین میانگین تعداد محصول نهایی تولید شده در خط مونتاژ واقعی با میانگین تعداد محصول نهایی مدل شبیه سازی خط مونتاژ وجود ندارد. یکی از مهمترین موارد استفاده از شبیه‌سازی، مقایسه طرح‌های مختلف از سیستم و یا بررسی رفتار آن در محدوده شرایط جدید است. در صورتی که مدل‌های جدید با ایجاد اصلاحاتی از قبیل تغییر در مقادیر عددی پارامترها یا تعداد خدمت‌دهنده‌ها بدون تغییر در نوع توزیع آماری باشد، انتقال اعتبار مدل موجه است[۲]. برای هریک از تیمارهای مدل‌های طراحی آزمایش‌ها که در ادامه بیان خواهند شد، یک مدل با تغییر در پارامترهای مدل شبیه‌سازی سیستم ایجاد گردید. در این مطالعه مدل‌های طراحی آزمایش‌ها بر روی مدل‌شبیه‌سازی سیستم اجرا شدند.

۳-۳. شناسایی عوامل تاثیرگذار

برای شناسایی تمام عوامل تاثیرگذار بر عملکرد خط مونتاژ کارخانه طوفان فکری با حضور همه‌ی مدیران و سرپرست‌های خط برگزار شد. طوفان فکری روشی است که برای تولید تعداد زیادی ایده در مورد یک مسئله به کار می‌رود. ۱۲ عامل تاثیرگذار در پایان جلسه انتخاب شدند، که تمام آنها در یک طرح عاملی ۲^k مورد بررسی قرار گرفتند.

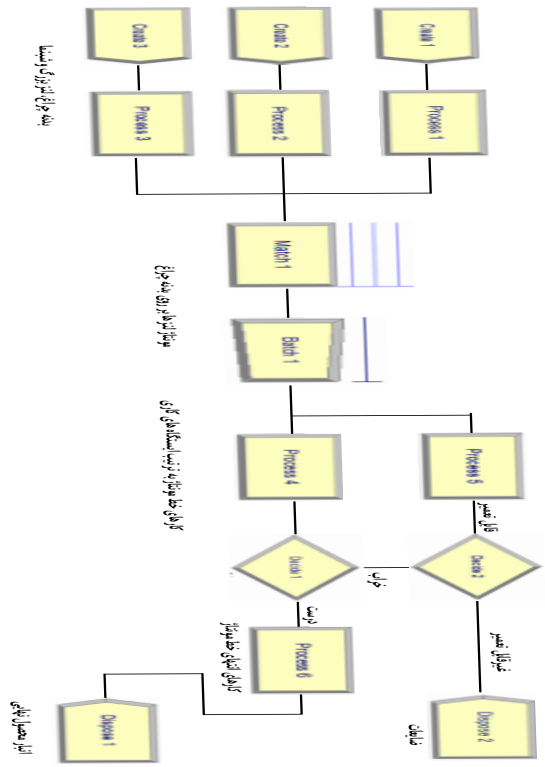
۴-۳. طراحی آزمایش ها

در اغلب آزمایش‌ها مطالعه‌ی دو یا چند عامل مورد نظر است. طرح‌های عاملی بعنوان موثرترین روش برای چنین آزمایش‌هایی محسوب می‌شوند. کارآیی طرح‌های عاملی در مقایسه با طرح‌های یک عاملی به مراتب بیشتر می‌باشد. همچنین اگر اثر متقابل وجود داشته باشد آنگاه استفاده از طرح عاملی با هدف اجتناب از نتیجه‌گیری گمراه‌کننده ضروری است. اثر متقابل یعنی اثر یک عامل بر متغیر پاسخ ثابت نیست بلکه به سطح متغیرهای دیگر بستگی دارد. از طرف دیگر طرح های عاملی امکان برآورد اثرات یک عامل را به ازای سطوح مختلف عامل‌های دیگر فراهم می‌سازد، که باعث اعتبار نتایج آزمایش می‌گردد[۱].

طرح عاملی ۲^k اجرا شد و ۱۲ عامل شناسایی شده در جلسه طوفان فکری غربال گردیدند، تا مهمترین آنها انتخاب شود. سه عامل اصلی زیر به عنوان موثرترین عوامل استخراج گردیدند:

۱. تعداد نیروی انسانی
۲. سرعت ماشین‌آلات
۳. تعداد ایستگاه‌های کاری

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-05]



شکل۴. نمای کلی از منطق مدل شبیه‌سازی

برای اجرای طرح عاملی بر روی عوامل ذکر شده تعداد سطوح ممکن آنها با نظر مدیران و سرپرستان خط مونتاژ انتخاب گردید. عامل نیروی انسانی در ۳ سطح ۱۵، ۲۰ و ۲۳، سرعت ماشین‌آلات در ۲ سطح سرعت استاندارد و حداکثر سرعت و تعداد ایستگاه‌های کاری در ۲ سطح ۵ و ۶ ایستگاه کاری در نظر گرفته شد. برای انتخاب سطوح ممکن هر یک از این عوامل مدیران و سرپرستان خط شرایط کارخانه را در نظر گرفته‌اند.

مثلا در مورد تعداد ایستگاه‌های کاری با توجه به فضای موجود در کارخانه و ماهیت فعالیت‌ها دو سطح ۵ و ۶ ایستگاه کاری انتخاب شد.

با توجه به تعداد سطوح انتخاب شده در طرح عاملی ۱۲ تیمار ایجاد گشت. با فرض ثابت ماندن توزیع فعالیت‌ها، پارامترهای جدید توزیع مشخص شده و تغییرات مورد نیاز بر روی مدل شبیه‌سازی اعمال شد و برای هر تیمار یک مدل شبیه‌سازی بدست آمد. مدل‌های شبیه سازی بدست آمده برای هر تیمار۱۰ بار اجرا گشت و خروجی های آن در جدول طراحی آزمایش‌های عاملی نرم افزار Minitab 14 برای تحلیل وارد شد(جدول۲). در این مدل طراحی آزمایش‌ها تعداد محصول نهایی به عنوان متغییر پاسخ در نظر گرفته شد. ستون اول جدول ۲ ترتیب انجام آزمایش‌ها را از ۱ تا ۱۲۰ نشان می دهد که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. ستون دوم مشخص کننده بلوک‌ها می باشد، چون در مدل شبیه سازی عامل تاثیرگذار شناخته شده و قابل کنترلی که بر روی متغییر پاسخ تاثیرگذار باشد وجود نداشت، تنها یک بلوک در نظر گرفته شده است. ستون سوم جدول شامل اعداد ۱، ۲ و ۳ است که این اعداد به ترتیب سطوح تعداد نیروی انسانی ۱۵، ۲۰ و ۲۳ نفر را نشان می دهند. ستون چهارم جدول معرف سرعت ماشین آلات، یعنی ۱ معادل سرعت استاندارد ماشین آلات و ۲ معادل حداکثر سرعت ماشین آلات می‌باشد. ستون پنجم جدول تعداد ایستگاه های کاری، یعنی ۱ معادل ۵ ایستگاه و ۲ معادل ۶ ایستگاه است. ستون آخر نیز تعداد محصول نهایی تولید شده در هر اجرا یا همان خروجی مدل شبیه سازی را نشان می دهد.

جدول ۲. قسمتی از جدول طرح عاملی با ۳عامل در نرم افزار Minitab 14

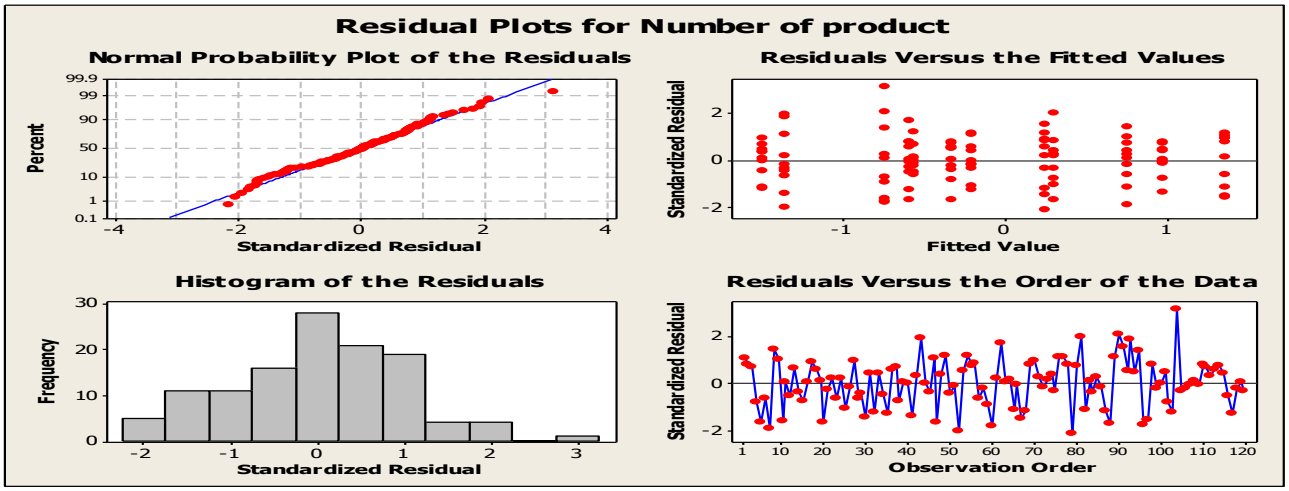
Std Order	Blocks	A(Operators)	B(Machines)	C(Work Stations)	Number of product
73	1	1	1	2	487
77	1	2	1	1	563
29	1	3	1	3	564
101	1	2	1	۳	563
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.

جدول ۲. تحلیل واریانس برای طرح ۳ عاملی

Analysis of Variance for Number of product, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
operators	2	364039	364039	182019	340694.63	0.000
machines	1	42000	42000	42000	78613.91	0.000
work stations	1	138924	138924	138924	260031.20	0.000
operators*machines	2	5427	5427	2713	5078.54	0.000
operators*work stations	2	56614	56614	28307	52983.31	0.000
machines*work stations	1	1548	1548	1548	2897.49	0.000
operators*machines*work stations	2	3544	3544	1772	3317.04	0.000
Error	108	58	58	1	-	-

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-05]



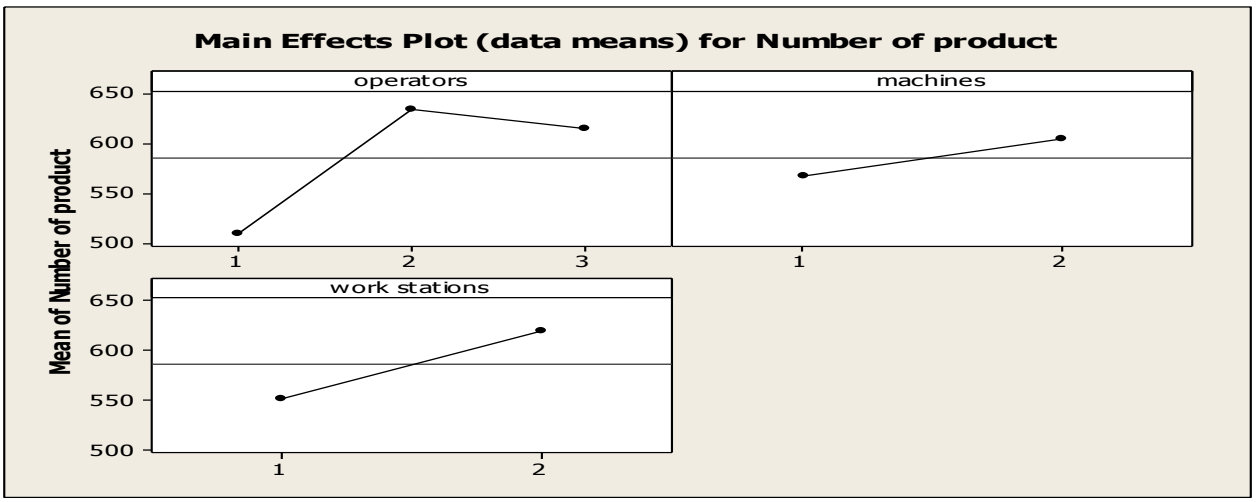
شکل ۵. نمودارهای باقیمانده ها

برای ارزیابی کفایت مدل طراحی آزمایش‌ها از تحلیل باقیمانده‌ها استفاده گردید(شکل ۵). تست کولموگروف-اسمیرنوف در سطح معنادار α=۰/۰۵ نرمال بودن باقی مانده ها را تائید کرد. اولین نمودار در سمت چپ، نرمال بودن باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد. واریانس باقیمانده‌ها نیز دارای تغییرپذیری زیاد نمی باشد. نمودار باقیمانده‌ها بر حسب تعداد نیروی انسانی، سرعت ماشین آلات و تعداد ایستگاه‌کاری نیز رسم گردید، که عدم برابری واریانس‌ها در آنها دیده نشد.

۴-۳. تجزیه و تحلیل نتایج طرح عاملی

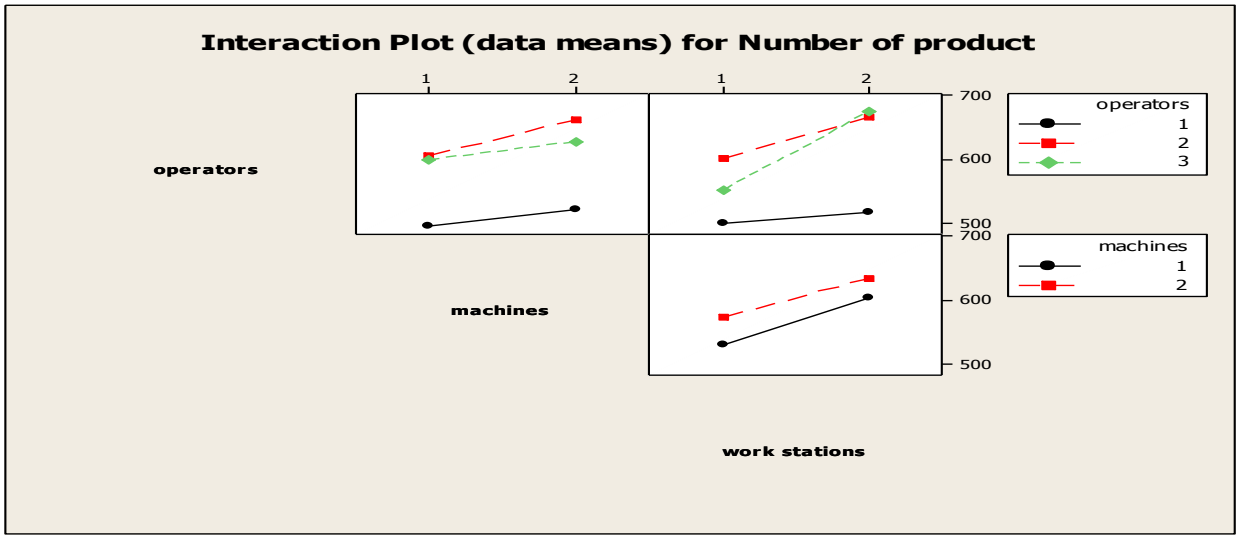
تحلیل واریانس انجام شده بر روی خروجی‌های مدل‌های شبیه-سازی در جدول ۲ آمده است. همانگونه که در جدول تحلیل واریانس مشاهده می‌گردد، هر سه عامل تعداد نیروی انسانی، سرعت ماشین آلات و تعداد ایستگاه‌های کاری به طور معناداری بر روی تعداد محصول نهایی تولید شده تاثیر دارند، همچنین اثرات متقابل این عامل‌ها نیز بر روی متغییر پاسخ تاثیرگذار است. به منظور کمک به تفسیر این آزمایش نمودارهای اثرات اصلی و متقابل برای تمام تیمارها رسم شد.

شکل ۶ نشان می‌دهد که متغیر های تعداد ایستگاه کاری و سرعت ماشین آلات دارای اثر مثبت می باشند. به عبارت دیگر با تغییر سطح تعداد ایستگاه های کاری از ۵ ایستگاه به ۶ ایستگاه و یا سرعت ماشین آلات از استاندارد به حداکثر سرعت میانگین تعداد محصول تولید شده افزایش می‌یابد. در مورد متغیر تعداد نیروی انسانی که دارای سه سطح است با تغییر این عامل از ۱۵ نفر به ۲۰ نفر متوسط تعداد محصول تولید شده افزایش می یابد، ولی در تغییر از ۲۰ به ۲۳ نفر میانگین تعداد محصول تولید شده تقریبا ثابت باقی می ماند.



شکل ۶. نمودارهای اثرات اصلی عوامل

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-05]



شکل ۷. نمودارهای اثرات متقابل عوامل

شکل ۷ اثر متقابل عامل‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. قسمت اول (بالا سمت چپ شکل ۷) اثرمتقابل عامل‌های سرعت ماشین آلات و تعداد اپراتورها مشاهده می‌گردد، در سطح سرعت زیاد ماشین آلات و ۲۰ نیروی انسانی تعداد محصول تولید شده در بالاترین سطح این قسمت قرار دارد. قسمت دوم(بالا سمت راست شکل ۷) ترکیب دو عامل تعداد نیروی انسانی و تعداد ایستگاه-کاری را نشان می‌دهد، در این قسمت ترکیب ۶ ایستگاه کاری با سطوح ۲۰ و ۲۳ نفر نیروی انسانی تقریبا به طور مشترک دارای بالاترین سقف تولید محصول نهایی هستند.

قسمت سوم اثر متقابل تعداد ایستگاه‌های کاری و سرعت ماشین آلات را نشان می‌دهد، از این قسمت برداشت می‌گردد که ترکیب ۶ ایستگاه کاری با سرعت زیاد در این قسمت بالاترین سطح محصول تولید شده را نتیجه می دهد. از آنجایی که کارخانه در نظر دارد در افق برنامه ریزی حداکثر تولید را داشته باشد. با توجه به نتایج آنالیز واریانس، متغیرهای تعداد ایستگاه کاری و سرعت ماشین آلات به ترتیب در سطح ۶ و حداکثر سرعت و متغیر تعداد نیروی انسانی نیز در سطح ۲۰ نفر انتخاب گردید. با توجه به خروجی مدل‌های شبیه‌سازی، با به کار بردن نتایج به دست آمده تولید کارخانه از روزانه ۴۷۶ محصول نهایی به طور متوسط به روزانه ۶۸۰ محصول نهایی به طور متوسط افزایش پیدا خواهد کرد. این افزایش در میزان تولید نشان دهنده کارائی روش معرفی شده است.

۴. نتیجه گیری

در دنیای واقعی عوامل متعددی بر روی عملکرد خط مونتاژ تاثیرگذارند، که رسیدگی به همه‌ی آنها نیازمند زمان و هزینه بسیار است. روش ابتکاری معرفی شده از ترکیب مدل شبیه سازی و طراحی آزمایش‌ها برای تجزیه و تحلیل خط مونتاژ استفاده می‌کند.

این روش تمام عواملی را که احتمالا موجب بهبود در عملکرد سیستم خواهند شد، در نظر می‌گیرد. سپس موثرترین عوامل را انتخاب کرده با تغییر بر روی آنها سبب بهبود در عملکرد خط مونتاژ می‌شود. از مزایا این روش می توان به عدم نیاز به توقف و تغییر در خط مونتاژ را نام برد، همچنین هزینه‌های اجرا این روش در مقابل تغییر در خط مونتاژ واقعی کمتر می‌باشد. نتایج بدست آمده از این روش با توجه به اعتبارسنجی آن از طریق روش‌های آماری قابل اطمینان است. مطالعه موردی صورت گرفته در کارخانه تولید چراغ اتومبیل کارایی این روش را در ایجاد بهبود در عملکرد خط مونتاژ نشان داد. روش بیان‌شده می‌تواند به عنوان یک ابزار بهبود عملکرد قوی در تصمیمات مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[۱] مونتگومری، داگلاس سی.؛ ترجمه نورسنا، رسول؛ «طراحی و تحلیل آزمایش‌ها»، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، جلد ۱، صفحه ۱۲-۱۵، ۲۹۹-۳۱۷ و ۳۷۱-۳۸۵، ۱۳۸۶.

[۲] بنکس، جری؛ کارسن، جان؛ ترجمه محلوجی، هاشم؛ «شبیه‌سازی سیستمهای گسسته-پیشامد»، انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، صفحه ۱۵-۲۳، ۴۴۹-۴۵۰، ۵۱۵-۵۴۴ و ۶۱۳-۶۵۸.

[۳] ایوزیان، مجید.، واقفی، ابوالفضل.، اسماعیلی، حمید.، « مبانی احتمالات و آمار مهندسی»، انتشارات ترمه، جلد ۲، صفحه ۲۸۲-۲۸۳، ۱۳۸۶.

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-05]

[3] Mendes, A.R., Ramos, A.L., Simaria, A.S., "*Combining Heuristic Procedures and Simulation Models for Balancing a PC Camera Assembly Line"*, Computers & Industrial Engineering, No. 49, 2005, pp. 413–431.

[4] Hsieh, S.J., "*Hybrid Analytic and Simulation Models for Assembly Line Design and Production Planning*", Simulation Modelling Practice and Theory, No. 10, 2002, pp. 87–108.

[5] Kuo, R.J., Yang, C.Y., "*Simulation Optimization using Particle Swarm Optimization Algorithm with Application to Assembly Line Design*", Applied Soft Computing, No. 11, 2009, pp. 605–613.

[6] Kim, Y.K., Song, W.S., Kim, J.H., "*A Mathematical Model and a Genetic Algorithm for Two-Sided Assembly Line Balancing*", Computers & Operations Research No. 36, 2007, pp. 853 – 865.

[7] Yeh, D.H., Kao, H.H., "*A New Bidirectional Heuristic for the Assembly Line Balancing Problem. Computers & Industrial Engineering*", No. 57, 2009, pp. 1155–1160.

[8] Akpınar, S., Bayhan, G.M., "*A Hybrid Genetic Algorithm for Mixed Model Assembly Line Balancing Problem with Parallel Workstations and Zoning Constraints*", Engineering Applications of Artificial Intelligence, No. 52, 2010, pp. 754- 763.

[9] Blum, C., Miralles, C., "*On Solving the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem Via Beam Search*", Computers & Operations Research, No. 38, 2010, pp. 328–339.

[10] Dessouky, Y.M., Bayer, A., "*A Simulation and Design of Experiments Modeling Approach to Minimize Bulding Maintenance*", Computers & Industrial Engineering, No. 43, 2002, pp. 423-436.

[11] Longo, F., Mirabelli, G., "*An Advanced Supply Chain Management Tool Based on Modeling and Simulation*", Computers & Industrial Engineering, No. 54, 2007, pp. 570–588.

[12] Acht, C., Lubben, T., Hoffmann, F., Zoch, H.Z., "*Simulation of the Influence of Carbon Profile and Dimensions on Distortion Behaviour of SAE 5120 Discs by using a Design of Experiment*", Computational Materials Science, No. 39, 2007, pp. 527–532.

[13] Gunasegaram, D.R., Farnsworth, D.J., Nguyen, T.T., "*Identification of Critical Factors Affecting Shrinkage Porosity in Permanent Mold Casting using Numerical Simulations Based on Design of Experiments*", journal of materials processing technology, No. 209, 2009, pp. 1209–1219.

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-05]

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-05]