مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال نوزدهم، شماره سوم (پیاپی ۷۴)، پاییز ۰۱، ص ص ۶۲-۴۵
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

کاربرد روش‌های طراحی آزمایش‌ها و تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی در تعیین مدل بهینه پایایی سیستم جریان کارگاهی مونتاژ دو مرحله‌ای

محمدعلی نیکوئی[1*]، مقصود امیری[2]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران، گروه مدیریت بازرگانی، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

رسید مقاله: ۱۵آذر ۱۴۰۰
پذیرش مقاله: ۲۷ اردیبهشت ۱۴۰۱

چکیده

هدف اصلی از اجرای این تحقیق، تعیین تعداد بهینه تجهیزات سیستم تولیدی جریان کارگاهی مونتاژ دومرحله ای است. در سیستم جریان کارگاهی مونتاژ دو مرحله‌ای در ابتدا در ایستگاه نخست، قطعات محصولات تولید می‌شوند و در ایستگاه دوم یک یا چند دستگاه، آنها را به یکدیگر مونتاژ می‌نماید. در برخی از پژوهش‌ها، فرض شده است که تابع احتمال خرابی تجهیزات از توزیع نمایی پیروی می‌کند. این در حالی است که در دنیای واقعی این فرض واقعی به نظر نمی‌رسد. در صورتی که تابع احتمال خرابی تجهیزات از توزیع نمائی پیروی نکند، بهترین رویکرد در تخمین پایایی سیستم‌های تولیدی، استفاده از روش های شبیه‌سازی است. در این تحقیق، در ابتدا عوامل تاثیرگذار بر پایایی سیستم تولیدی مشخص شده‌اند و در ادامه از طریق روش‌های طراحی آزمایش‌ها و رویکرد شبیه‌سازی، تابع پایایی سیستم تخمین زده شده است. عوامل متعددی نظیر پایایی سیستم تولیدی، قیمت کل تجهیزات و مساحت مورد نیاز طرح استقرار را می‌توان به عنوان معیارهای ارزیابی برشمرد. در ادامه و با در نظر گرفتن معیارهای فوق و با استفاده از روش ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی متشکل از روش‌های بهترین-بدترین فازی و تاپسیس، از میان گزینه‌های ممکن، بهترین گزینه موجود انتخاب شده است.

کلمات کلیدی: پلاکت برمن، رویه سطح پاسخ، شبیه‌سازی، پایایی، تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی.

۱ مقدمه

با پیشرفت علم و تکنولوژی در دنیای امروز، سیستم‌های تولیدی و صنعتی شکل پیچیده‌تری گرفته‌اند. در طراحی سیستم‌های تولیدی، عوامل گوناگونی نظیر تقاضای بازار برای محصولات، فضای مورد نیاز برای استقرار تجهیزات و امکانات مالی در نظر گرفته می‌شوند. هدف هر سیستم تولیدی، افزایش سهم بازار و سودآوری است. این در حالی است که مراعات ننمودن موعدهای تحویل به مشتری نیز نقش موثری در کاهش سهم بازار و

* عهده‌دار مکاتبات
آدرس الکترونیکی: m.nikouei@atu.ac.ir

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

رویگردانی مشتری خواهد داشت که عاملی برای افزایش هزینه فرصت‌های از دست رفته است. یکی از موارد موثر در تاخیر تولید و از دست رفتن مشتریان بالقوه، از کارافتادگی تجهیزات تولیدی است. در این خصوص پیاده‌سازی راهکارهایی به منظور افزایش پایایی تجهیزات، راهکاری مناسب است [۲،۱]. مفهوم پایایی یا قابلیت اطمینان به صورت احتمال کارکرد موثر سیستم در یک بازه زمانی مشخص تعریف شده است [۳]. هر سیستم تولیدی به طور معمول از تعدادی از تجهیزات در ایستگاه‌های کاری متفاوت تشکیل شده است که بر حسب نوع محصول و یا فرآیندهای تولید، استقرار یافته‌اند. تنوع چیدمان تجهیزات موجب ایجاد مدل‌های گوناگون توالی عملیات و زمان‌بندی می‌شود. یکی از عوامل موثر در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها، محاسبه نرخ خرابی است. اگر نرخ خرابی اجزا، به صورت ثابت در نظر گرفته شود و از توزیع نمایی پیروی نماید، به‌دلیل ویژگی بدون حافظه بودن توزیع نمایی، از فرآیند مارکف برای مدلسازی استفاده می‌شود. این در حالی است که فرض ساده‌کننده پیروی کردن نرخ خرابی از توزیع نمایی علیرغم کاربرد فراوان، در محیط‌های صنعتی واقعی به نظر نمی‌رسد [۲]. در این شرایط عموما از روش شبیه‌سازی استفاده می‌شود. شبیه‌سازی ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی است که در آن امکان استفاده از تمام توزیع‌های آماری فراهم است و می‌تواند در نوع خود، جانشینی برای مدل‌سازی‌های ریاضی باشد و از آن می‌توان به منظور ارزیابی تعاملات درون سیستم‌ها و مدل‌سازی پایایی، استفاده کرد [۴]. عوامل زیر در تحقیقات پیشین به عنوان عوامل تاثیرگذار بر پایایی، دسترس‌پذیری و ماندگاری سیستم‌های تعمیرپذیر معرفی شده‌اند: تعداد و نوع ماشین‌آلات، عمر مفید تجهیزات و نوع چیدمان آنها، شرایط کارکرد سیستم نظیر تعداد اپراتورها و سطح مهارت آنها، روابط مابین کارکنان خط تولید، غیبت‌های کارکنان در شیفت‌های کاری، شرایط ایمنی و محیطی محل کار، تعداد و نوع سختی کار تخصیص‌یافته به هر تجهیز، اثربخشی اقدامات اصلاحی قبلی در خصوص خرابی‌های قبلی تجهیزات، پیاده‌سازی سیستم‌های تعمیرات و نگهداری پیشین، وجود لوازم یدکی و یا لوازم مصرفی مازاد در سیستم برای استفاده در صورت نیاز و نهایتا وجود ابزارهای اندازه‌گیری دقیق. بدیهی است که در بسیاری از مدل‌سازی‌ها، در نظرگرفتن مفروضات فوق، مدل را پیچیده خواهد ساخت و احتمال دارد که حل آن بسیار سخت شود. به عنوان رویکردهای جانشین، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، الگوریتم‌های شبکه عصبی و روش‌های مختلف شبیه‌سازی توصیه شده است [۵، ۶]. به طور معمول، محصولات تولیدی در سیستم‌های صنعتی، از تعدادی از قطعات تشکیل شده‌اند که در ایستگاه‌های تولیدی ساخته می‌شوند و در ایستگاه‌های مونتاژ به یکدیگر متصل می‌شوند [۷]. تولید این‌گونه از محصولات، می‌تواند در چیدمان جریان کارگاهی مونتاژ دومرحله‌ای[2] انجام شود. سیستم زمان‌بندی تولید جریان کارگاهی مونتاژ دومرحله‌ای به صورت زیر است: تعداد m ماشین برای تولید آیتم‌ها در ایستگاه نخست معروف به ایستگاه تولید وجود دارد. در ایستگاه دوم یا ایستگاه مونتاژ یک یا چند ماشین این قطعات را به یکدیگر مونتاژ می‌نماید. به عنوان یک نمونه، کاربرد این سیستم در صنعت، تولید و مونتاژ رایانه‌ها گزارش شده است. به دلیل وجود m آیتم در هر محصول نهایی، m کار به m ماشین در ایستگاه اول تخصیص می‌یابد. ایستگاه مونتاژ تنها

[2] Two-stage assembly flow shop layout

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

هنگامی قادر به شروع به کار است که کلیه قطعات قبلا تولید شده باشند. هدف مساله، یافتن توالی عملیات بهینه با در نظر گرفتن کمینه‌سازی حداکثر زمان ساخت است [۸] . مروری بر مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که فرض خراب نشدن ماشین‌آلات در افق زمان‌بندی تولید فرض متداولی است. این بدین معنی است که قابلیت اطمینان تجهیزات در سیستم تولیدی، بالا در نظر گرفته شده است. ولی شرایط معمول کاری در سیستم‌های صنعتی، عمدتا چنین نیست و ماشین‌آلات در بازه‌های زمانی بسیار کوتاه‌تر، نیاز به تعمیر پیدا می‌کنند. این‌گونه سیستم‌ها در مدل‌های قابلیت اطمینان به سیستم‌های تعمیرپذیر معروف هستند. منظور از تعمیرپذیری تجهیزات، امکان شروع به کار مجدد سیستم پس از وقوع تعمیرات به دلیل خرابی تجهیزات است. در نظر گرفتن فرض خرابی تجهیزات و نیاز به تعمیرات دستگاه‌ها، مدل زمان‌بندی را به واقعیات روزمره در صنعت نزدیک‌تر می‌سازد [۹]. هدف از پژوهش حاضر، بررسی قابلیت اطمینان در سیستم زمان‌بندی تولید جریان کارگاهی مونتاژ دو مرحله‌ای است. در ادامه، در بخش دو، مروری بر مطالعات انجام شده به تفکیک کاربردهای رویکردهای شبیه‌سازی در تخمین پایایی سیستم‌های تولیدی، کاربردهای طراحی آزمایش‌ها در تخمین پایایی سیستم‌های تولیدی و کاربردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی در تخمین پایایی سیستم‌های تولیدی آورده شده است. در بخش سه، روش اجرای تحقیق ذکر شده است و در بخش چهارم، داده‌های پژوهش تجزیه و تحلیل شده‌اند. در نهایت، نتایج حاصل از اجرای تحقیق، در بخش پنج آورده شده است.

۲ مروری بر پیشینه پژوهش و بیان مساله

پیاده‌سازی و اجرای پژوهش در موضوعات نوین علمی در محیط‌های کاری و صنعتی حاوی دستاوردهای ارزنده‌ای برای صاحبان صنایع است و منجر به ایجاد مزیت‌های رقابتی و افزایش رضایت مشتریان از کیفیت کالاها و رعایت موعدهای تحویل می‌شود. توسعه سیستم جریان کارگاهی مونتاژ دو مرحله‌ای به دلیل کاربرد در صنعت و همچنین قابلیت انعطاف‌پذیری ماشین‌آلات در آن به منظور تولید سفارش‌های مختلف تولیدی از اهمیت برخوردار است [۱۰]. در ایستگاه اول یا ایستگاه تولید این نوع از سیستم تولیدی، تعداد معینی ماشین با توانایی‌های تولیدی متنوع وجود دارند که وظیفه تولید قطعات را عهده‌دار هستند و این قطعات در ایستگاه بعدی به یکدیگر توسط یک یا چند ماشین هم متصل می‌شوند. محیط سیستم تولیدی در این پژوهش، سیستم جریان کارگاهی مونتاژ دومرحله‌ای است و هدف از این تحقیق، تعیین تعداد تجهیزات مناسب در ایستگاه‌های تولید و مونتاژ این سیستم تولیدی با در نظر گرفتن اهداف چندگانه است. در ادامه پژوهش‌های مرتبط با پژوهش حاضر، بنا به ارتباط موضوعات به صورت دسته‌بندی آورده شده است.

۲-۱ کاربردهای رویکردهای شبیه‌سازی در تخمین پایایی سیستم‌های تولیدی

مفهوم پایایی در یک سیستم تولیدی، نشانگر احتمال کارکرد صحیح زیر سیستم‌های آن است. در برخی از پژوهش‌ها، فرض شده است که تابع احتمال خرابی تجهیزات از توزیع نمایی پیروی می‌کند. این در حالی است که در دنیای واقعی این فرض واقعی به نظر نمی‌رسد. در صورتی که تابع احتمال خرابی تجهیزات از توزیع نمایی

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

پیروی نکند، بهترین رویکرد در تخمین پایایی سیستم‌های تولیدی، استفاده از روش‌های شبیه‌سازی است. در ادامه کاربردهای رویکردهای گوناگون شبیه‌سازی در این خصوص آورده شده است. شبیه‌سازی مونت کارلو [۳] نام روشی است که در آن، از طریق نمونه‌سازی آماری، پاسخ‌های تقریبی برای مسایل کمی ارایه می‌شود. از این روش بیشتر به منظور توصیف عدم قطعیت‌های موجود در مدل، استفاده شده است. در خطوط تولید، از بافرها به منظور انباشت قطعات نیمه‌ساخته، استفاده می‌شود. در پژوهشی، ظرفیت بافرها محدود در نظر گرفته شده است و بررسی تاثیر این موضوع بر احتمال وقفه در خطوط تولید مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این موضوع، یک مدل با متغیرهای احتمالی توسعه داده شده است. به منظور تخمین پایایی این سیستم تولیدی از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. مطالعات نشان داد که با تکرار فرآیند شبیه‌سازی مونت کارلو می‌توان تخمین مناسبی از پایایی سیستم به‌دست آورد [۱۱]. در پژوهشی دیگر، تعیین معیارهای موثر برپایایی سیستم *K-out-of-n: G* از طریق روش مونت کارلو مورد مطالعه قرار گرفته است و با یک مثال عملی، کاربردپذیری مساله مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۲]. شبیه‌سازی عامل بنیان[۴] نوعی دیگر از مدل‌سازی محاسباتی است که امکان مدل‌سازی یک سیستم را از پایین‌ترین سطوح اجزای مدل فراهم می‌آورد. در ابتدا اجزای سیستم شناسایی می‌شود و سپس رفتار آنها و نحوه تعاملات آنها باز تعریف می‌شود و نهایتا با راه‌اندازی مدل مشاهده می‌شود که رفتار و تعاملات زیرسیستم‌ها با یکدیگر، چه اتفاقاتی را در سطوح بالاتر سیستم به وجود می‌آورند. برخلاف روش شبیه‌سازی گسسته پیشامد، این رویکرد شبیه‌سازی با جزییات بیشتری سرکار دارد. مفهوم پایایی نشانگر احتمال تداوم کارکرد صحیح یک مجموعه است. این مفهوم قابل توسعه به سیستم‌های انسانی و رایانه‌ای است. در تحقیقی، توسعه مدل عامل بنیان یک سیستم تولیدی با در نظر گرفتن خستگی اپراتورهای تولید و اثر این عامل بر وقفه در کار، مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، تخمین پایایی سیستم از طریق شبیه‌سازی عامل بنیان انجام شده است [۱۳]. شبیه‌سازی گسسته پیشامد یکی دیگر از رویکردهای شبیه‌سازی است. در این روش، عمل یک سیستم به عنوان یک توالی زمانی از حوادث نشان داده می‌شود. هر رویداد در یک لحظه از زمان، نشانگر یک تغییر حالت در سیستم است. این روش شبیه‌سازی مناسب شبیه‌سازی پیشامدهای گسسته است. یکی از کاربردهای شبیه‌سازی گسسته پیشامد در سیستم های تولیدی است و با استفاده از آن می‌توان تاثیر یک تغییر را در کل سیستم مورد ارزیابی قرار داد. رویداد دوباره‌کاری در تولید در بسیاری از سیستم‌های تولیدی اجتناب‌ناپذیر است. در پژوهشی، پایایی یک سیستم تولیدی که در آن دوباره‌کاری وجود دارد بررسی شده است. به منظور برآوردی از پایایی سیستم از شبیه‌سازی گسسته پیشامد استفاده شده است [۱۴]. یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در شبیه‌سازی، نرم افزارED [۵] است که بنا به گواهی پیشینه پژوهش، در مسایل بهینه‌سازی خطوط تولیدی و پایایی دارای کابرد است [۲].

[3] Monte-Carlo Simulation
[4] Agent-based Simulation
[5] Enterprise Dynamics

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

۲- ۲ کاربردهای طراحی آزمایش‌ها در تخمین پایایی سیستم‌های تولیدی

عنوان طراحی آزمایش‌ها به مجموعه‌ای از روش‌هایی اطلاق می‌شود که هدف از آن بهینه‌سازی است. در مدل‌سازی سیستم‌های پایایی متغیرها و عوامل متعددی دخیل هستند که از روش‌های گوناگون طراحی آزمایش‌ها برای غربالگری عامل‌ها یا کالیبره کردن پارامترهای مدل استفاده شده است. ادبیات پژوهش، نشان‌دهنده کاربرد هم‌زمان روش‌های پلاکت برمن و رویه سطح پاسخ که از رویکردهای مرسوم طراحی آزمایش‌ها هستند، به منظور بهینه‌سازی است [۱۵-۱۷]. روش پلاکت برمن یکی از روش‌های طراحی آزمایش است که با توجه به تعداد تکرار کمتر نسبت به سایر روش‌های طراحی آزمایش، برای غربالگری اولیه و تعیین موثر[6] بودن هر یک از عوامل در آزمایش مناسب است. با غربالگری اولیه، تعداد آزمایش‌ها در گام بعدی با روش رویه سطح پاسخ کاهش معناداری پیدا می‌کند، بدون آنکه از صحت مدل کاسته شود [۱۸-۲۰].

۲- ۳ کاربردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره در تخمین پایایی سیستم‌های تولیدی

تصمیم‌گیری چندمعیاره، نام کلی مجموعه روش‌هایی است که به وسیله آن با در نظر گرفتن چندین معیار ارزیابی، از میان گزینه‌های موجود، گزینه برتر از میان گزینه‌های موجود انتخاب می‌شود. کاربردهای تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره در حوزه‌های گوناگون علوم و مهندسی گزارش شده است [۲۱-۲۳] . به عنوان نمونه از میان کاربردهای فراوان در این حوزه به موارد زیر اشاره می‌شود. در پژوهشی، در مدل‌سازی سیستم‌های پایایی و به طور خاص درطراحی سیستم‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، از روش‌های ترکیبی الکتره و دیمتل به منظور رتبه‌بندی مخاطرات سیستم استفاده شده است و با اولویت‌بندی آنها، تعمیرات و نگهداری پیش‌گیرانه با هدف افزایش دسترس‌پذیری و ماندگاری سیستم اجرا شده است [۲۱]. مشابه همین پژوهش، کاربرد روش ANP و الکتره در انتخاب سیاست‌های تعمیر و نگهداری یک سیستم تولیدی گزارش شده است [۲۴] . مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون پژوهشی دقیقا مشابه با تحقیق حاضر در مطالعات پایایی انجام نشده است. این موضوع، نوآوری این تحقیق را نشان می‌دهد. هدف از پژوهش حاضر، انتخاب تعداد بهینه تجهیزات در هر ایستگاه سیستم جریان کارگاهی مونتاژ دو مرحله‌ای، با در نظر گرفتن معیارهای پایایی تجهیزات و سایر عوامل نظیر قیمت تجهیزات و مساحت ورد نیاز تجهیزات در سطح کارگاه است. یکی از نوآوری‌های این پژوهش، تعیین تابع پایایی از طریق تعیین پارامترهای ورودی و خروجی است که در قسمت‌های آتی این نوشتار، شرح داده می‌شود.

۳ روش تحقیق

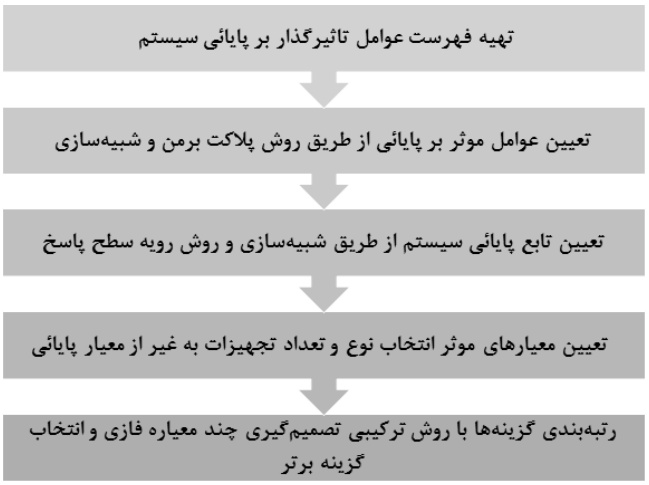
مراحل اجرای این تحقیق در شکل ۱ آورده شده است. در ابتدا مطابق نظر خبرگان، فهرستی از پارامترهای موثر بر پایایی تهیه شد. سپس با استفاده از روش پلاکت برمن که یکی از روش‌های طراحی آزمایشها و مناسب غربالگری است، نسبت به تعیین عوامل موثر اقدام شد. در گام بعدی، با استفاده از روش شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار ED

[6] Significant

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

و روش رویه سطح پاسخ، تابع پایایی سیستم بر اساس پارامترهای منتخب معین شد. در گام آخر، با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی، از میان گزینه‌های موجود تجهیزات، نسبت به تعیین نوع و مقدار بهینه تجهیزات اقدام شده است.



شکل ۱. مراحل تعیین نوع و تعداد تجهیزات سیستم زمان‌بندی

۳-۱ تخمین تابع پایایی سیستم از طریق روش ترکیبی شبیه‌سازی و روش‌های طراحی آزمایش‌ها

مفاهیم پایایی و مطالب تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه ریشه در آمار و نظریات گوناگون آماری دارد. مفاهیم اولیه و لازم برای این رویکرد، به‌صورت گسترده‌ای در فعالیت‌های انجام گرفته در زمینه پایایی شرح داده شده است. بعضی از این مفاهیم پایه‌ای در ادامه آمده است. T یک متغیر تصادفی غیرمنفی است که نمایشگر طول عمر دستگاه است. معمولاً قابلیت اطمینان اجزاء با توزیع احتمالی که متغیر تصادفی T دارد، تعیین می‌شود. توزیع وایبول که با دو پارامتر بیان می‌شود، $T \sim Weib[\theta, \beta]$، یکی از پرکاربردترین توابع احتمال است و برای مشخص کردن زمان خرابی اجزا با شیب شکست غیرثابت، انعطاف خوبی دارد. قابلیت اطمینان مدل وایبول به‌صورت زیر است:

$$t \succ 0 \qquad R(t) = \exp(-\left(t/\theta\right)^{\beta}); \qquad (۱)$$

که به دو پارامتر بستگی دارد که اولی پارامتر شکل، β، و دیگری پارامتر مقیاس، θ، است.

نرخ شکست لحظه‌ای این مدل عبارت است از:

$$Z(t) = (\beta/\theta^{\beta})t^{\beta-1} \qquad (۲)$$

مقدار پارامتر β شکل نمودار را تعیین می‌کند، این پارامتر می‌تواند به‌صورت‌های زیر باشد: وقتی $\beta \prec 1$ است نرخ شکست کاهشی است. وقتی $\beta = 1$ است نرخ شکست ثابت است. و در حالت $\beta \succ 1$ ، نرخ شکست افزایشی است. دستگاه یا سیستمی، قابل تعمیر نامیده می‌شود که هنگامی که شکستی رخ داد، بعد از تعمیر به حالت اولیه‌اش (قبل از شکست) برگردد. زمان سپری‌شده بین خرابی و تعمیر آن تا رسیدن به خوبی حالت اولیه، زمان از کار افتادگی یا زمان تعمیر نامیده می‌شود. متوسط زمان میانگین تا اجرای تعمیر، متوسط زمان تا تعمیر

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

نامیده می‌شود. با توجه به این‌که در این تحقیق، از فرض نمایی بودن تابع‌های نرخ خرابی و نرخ تعمیر استفاده نشده است، استفاده از فرآیند مارکف امکان‌پذیر نیست و شبیه‌سازی یکی از روش‌های مرسوم در این حالت است. در ابتدا، تخمینی از کران بالا و پایین مقادیر نرخ خرابی و نرخ تعمیر تهیه شده است و در ادامه با استفاده از نرم‌افزار مینی تب، آزمایش‌ها مشخص شده است. پس از تعیین پارامترهای موثر، در گام بعدی با روش رویه سطح پاسخ و شبیه‌سازی، تابع پایایی تخمین زده می‌شود.

۳- ۲ رتبه‌بندی گزینه‌ها با روش ترکیبی تصمیم‌گیری چند معیاره فازی

منطق فازی از مهم‌ترین روش‌های تبیین عدم اطمینان است. منطق فازی عبارت از استدلال با مجموعه فازی است که توسط پروفسور لطفی‌زاده ارایه شده است. این منطق، برمبنای تصمیم‌گیری‌های انسانی پایه‌ریزی شده است و به نوعی می‌توان آن را توسعه منطق ارسطویی و منطق بولی دانست. امروزه برمبنای منطق فازی، اعداد فازی، محاسبات فازی و روش‌های آماری فازی ایجاد شده است. نظریه فازی بسیاری از مفاهیم، متغیرها و سیستم‌های نادقیق و مبهم را در قالب ریاضیات نمایش می‌دهد و ساختاری برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم کرده است. در پژوهش حاضر، از آنجا که تعیین اوزان معیارها، دارای عدم اطمینان است و از طرفی بیان برتری معیارها بر یکدیگر در قالب متغیرهای کلامی برای مدیران، بهتر امکان‌پذیر است، از نظریه فازی استفاده شده است. [۲۵]. در ابتدا از روش بهترین- بدترین فازی[۷] برای تعیین اوزان استفاده شده است و در ادامه با استفاده از روش تاپسیس بهترین گزینه از میان گزینه‌های موجود انتخاب شده است.

در مساله تصمیم‌گیری چندمعیاره در حالت فازی، n *معیار* وجود دارد که مقایسات زوجی مابین معیارها در حالت فازی و از طریق متغیرهای کلامی[۸] انجام شده است که متغیرهای کلامی و عدد فازی مثلثی متناظر با آن در جدول ۱ آورده شده است [۲۵]. ارزیابی‌های خبرگان در حالت فازی، از این طریق به اعداد متناظر فازی مثلثی تبدیل می‌شود.

جدول ۱ متغیرهای کلامی به منظور تعیین اوزان [۲۵]

متغیر کلامی	نماد	عدد فازی
یکسان	EI	(۱,۱,۱)
برتری کم	WI	(۲/۳,۱,۳/۲)
برتری نسبی	FI	(۳/۲,۲,۵/۲)
برتری زیاد	VI	(۵/۲,۳,۷/۲)
کاملا برتر	AI	(۷/۲,۴,۹/۲)

در ادامه، ماتریس تصمیم به صورت زیر نمایش داده می‌شود که در آن $\tilde{a}_{ij}$ عدد مثلثی فازی است که میزان رجحان خبره را در خصوص معیار i بر j نشان می‌دهد. اعداد روی قطر ماتریس مقدار EI دارد.

[7] Best-worst method
[8] Linguistic variables

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

$$\tilde{A}=\begin{array}{c} \\ c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccc} c_1 & c_2 & \dots & c_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n1} & \dots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix} \end{array} \qquad (۳)$$

گام‌های پیاده‌سازی روش بهترین-بدترین فازی به صورت زیر است [۲۵]:

۱- تعیین معیارها و یافتن بهترین و بدترین معیار

معیارهای در نظر گرفته شده در مساله به ترتیب به صورت $C_1, C_2, \dots, C_n$ نمایش داده می‌شوند که از میان آنها، بهترین معیار با نماد C_B و بدترین معیاریا کم اهمیت‌ترین معیار با نماد C_W نشان داده شده است.

۲- انجام مقایسات زوجی فازی مابین تمام معیارها و بهترین و برترین معیار

در ابتدا میزان برتری بهترین معیار(C_B) بر سایر معیارها از طریق متغیرهای کلامی مشخص می‌شود و در ادامه از طریق جدول ۱، عدد فازی مثلثی متناظر آن معین می‌شود. اعداد فازی مثلثی مذکور را می‌توان در قالب یک بردار به شکل زیر نشان داد که با $\tilde{A}_B$ نشان داده می‌شود:

$$\tilde{A}_B=(\tilde{a}_{B1},\tilde{a}_{B2},\dots,\tilde{a}_{Bn}) \qquad (۴)$$

به طور مشابه، برتری سایر معیارها بر بدترین معیار (C_W) به صورت زیر مشخص می‌شود که به صورت $\tilde{A}_w$ نشان داده می‌شود:

$$\tilde{A}_w=(\tilde{a}_{w1},\tilde{a}_{w2},\dots,\tilde{a}_{wn}) \qquad (۵)$$

۳- محاسبه اوزان فازی

محاسبه اوزان معیارها در حالت فازی و درحالت ایده‌ال به صورتی باید انجام شود که برای هر معیار، دو رابطه زیر برقرار باشد:

$$\frac{\tilde{W}_B}{\tilde{W}_j}=\tilde{a}_{Bj},\ \frac{\tilde{W}_j}{\tilde{W}_W}=\tilde{a}_{jW} \qquad (۶)$$

مدل ریاضی تعیین اوزان معیارها در (۸) نشان داده شده است که در آن، تابع هدف، کمینه‌سازی ماکزیمم مقادیر $\left|\frac{\tilde{W}_B}{\tilde{W}_j}-\tilde{a}_{Bj}\right|$ و $\left|\frac{\tilde{W}_j}{\tilde{W}_W}-\tilde{a}_{jW}\right|$ است. مقادیر $\tilde{W}_B$، $\tilde{W}_j$، $\tilde{W}_W$، $\tilde{a}_{Bj}$ و $\tilde{a}_{jW}$ اعداد فازی مثلثی هستند که به صورت $\tilde{W}_B=(l_B^w,m_B^w,u_B^w)$، $\tilde{W}_j=(l_j^w,m_j^w,u_j^w)$، $\tilde{W}_W=(l_W^w,m_W^w,u_W^w)$، $\tilde{a}_{Bj}=(l_{Bj},m_{Bj},u_{Bj})$ و $\tilde{a}_{jW}=(l_{jW},m_{jW},u_{jW})$ تعریف شده‌اند. در رابطه (۷) برای هر عدد فازی مثلثی، $\tilde{a}=(l,m,u)$، $R(\tilde{a})$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R(\tilde{a})=\frac{l+۴*m+u}{۶} \qquad (۷)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

که هدف از آن، تبدیل عدد فازی مثلثی به عددی قطعی است.

$$\min \ \max_j \left\{ \left| \frac{\tilde{W}_B}{\tilde{W}_j} - \tilde{a}_{Bj} \right|, \left| \frac{\tilde{W}_j}{\tilde{W}_W} - \tilde{a}_{jW} \right| \right\}$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^{n} R(\tilde{W}_j) = 1 \qquad (8)$$

$$l_j^w \le m_j^w \le u_j^w$$

$$l_j^w \ge 0$$

$$j = 1, 2, ..., n$$

به منظورحل، مدل به صورت‌های زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} &\min \ \tilde{\alpha} \\ &\text{s.t.} \\ &\left| \frac{\tilde{W}_B}{\tilde{W}_j} - \tilde{a}_{Bj} \right| \le \tilde{\alpha} \\ &\left| \frac{\tilde{W}_j}{\tilde{W}_W} - \tilde{a}_{jW} \right| \le \tilde{\alpha} \\ &\sum_{j=1}^{n} R(\tilde{W}_j) = 1 \\ &l_j^w \le m_j^w \le u_j^w \\ &l_j^w \ge 0 \\ &j = 1, 2, ..., n \end{aligned} \qquad (9)$$

$$\begin{aligned} &\min \ \tilde{\alpha}^* \\ &\text{s.t.} \\ &\left| \frac{(l_B^w, m_B^w, u_B^w)}{(l_j^w, m_j^w, u_j^w)} - (l_{Bj}, m_{Bj}, u_{Bj}) \right| \le (a^*, a^*, a^*) \\ &\left| \frac{(l_j^w, m_j^w, u_j^w)}{(l_W^w, m_W^w, u_W^w)} - (l_{jW}, m_{jW}, u_{jW}) \right| \le (a^*, a^*, a^*) \\ &\sum_{j=1}^{n} R(\tilde{W}_j) = 1 \\ &l_j^w \le m_j^w \le u_j^w \\ &l_j^w \ge 0 \\ &j = 1, 2, ..., n \end{aligned} \qquad (10)$$

در مدل (۱۰)، داریم: $\tilde{\alpha}^* = (a^*, a^*, a^*)$. با حل این مدل، اوزان معیارها از طریق روش بهترین-بدترین فازی به‌دست می‌آید [۲۵]. پس از تعیین وزن‌های معیارها، نیاز به روشی برای رتبه‌بندی گزینه‌هاست. روش تاپسیس بدین منظور در این پژوهش استفاده شده است.

مراحل اجرای تاپسیس به شرح زیر است[۲۶]:

گام ۱: تشکیل ماتریس تصمیم X به وسیله m گزینه مورد نظر و n معیار ارزیابی (۱۱) $X = [x_{ij}]$

$$i = 1, .., m; \ j = 1, ..., n$$

گام ۲. تشکیل ماتریس بی‌مقیاس‌شده (R):

$$R = [r_{ij}] \quad i = 1, .., m; \ j = 1, ..., n \qquad r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}}} \qquad (12)$$

گام ۳. محاسبه ماتریس بی‌مقیاس وزن داده شده: (۱۳) $V = [v_{ij}] \quad v_{ij} = w_{ij} \times r_{ij} \quad i = 1, .., m; \ j = 1, ..., n$

گام ۴. تعیین گزینه ایده‌ال مثبت (A^+) و گزینه ایده‌ال منفی (A^-):

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

$$A^+ = \{(\max v_{ij} \mid j \in J^+), (\min v_{ij} \mid j \in J^-) \mid i = 1,...,m\} = \{v_1^+,...,v_n^+\} \quad (14)$$

$$A^- = \{(\min v_{ij} \mid j \in J^+), (\max v_{ij} \mid j \in J^-) \mid i = 1,...,m\} = \{v_1^-,...,v_n^-\} \quad (15)$$

گام ۵. محاسبه میزان فاصله هر گزینه از ایده‌ال مثبت (d_i^+) و ایده‌ال منفی (d_i^-)

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v^+)^2} \quad i = 1,..,m \quad (16)$$

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v^+)^2} \quad i = 1,..,m \quad (17)$$

گام۶. تعیین شاخص CL_i^* هر گزینه و انجام رتبه‌بندی

$$CL_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, i = 1,..,m \quad (18) \; [26]$$

٤ تجزیه وتحلیل داده‌ها

گام‌های ارایه‌شده در روش‌شناسی پژوهش، به طور عملی در یک شرکت قطعه‌ساز که یکی از تامین‌کنندگان شرکت ایران خودرو است، پیاده‌سازی شده است. به عنوان نمونه، یکی از محصولات این شرکت، قسمت زیرین اتاقک خودرو معروف به کفی سینک است، که چیدمان ماشین‌آلات تولید آن، مطابق با سیستم جریان کارگاهی مونتاژ دو مرحله‌ای است. این محصول از قطعات کفی اصلی، زه کناری، زه وسط و زه تقویتی تشکیل شده است، که توسط ماشین‌آلات پرس هیدرولیک سیصد تن دروازه‌ای، پرس ضربه‌ای صد تن و پرس هیدرولیک صد و شصت تن در ایستگاه نخست تولید می‌شوند. در ایستگاه مونتاژ، دستگاه جوش اصطکاکی قطعات را به یکدیگر مونتاژ می‌کند. از دیدگاه مدیران مجموعه، معیارهای پایایی سیستم تولیدی به منظور برآورده‌سازی موعدهای تحویل کارفرما، مجموع سطح اشغال شده توسط تجهیزات در کارگاه و قیمت تجهیزات به عنوان معیارهای اصلی درنظر گرفته شده است.

٤-١ تخمین پایایی سیستم

یکی از توزیع‌های پرکابرد در قابلیت اطمینان، توزیع وایبول است که به دلیل انعطاف‌پذیری زیاد، دارای قابلیت خوبی در مدل‌سازی است [۲۷]. لذا در این تحقیق، فرض شده است که خرابی تجهیزات از توزیع وایبول و زمان تعمیرات تجهیزات از توزیع یکنواخت پیروی می‌کند. توابع چگالی احتمال نرخ خرابی برای ماشین‌های مستقر در ایستگاه‌های تولید و مونتاژ به صورت $W(\lambda,k)$، $W(\lambda',k')$ نشان داده شده می‌شود و توابع چگالی احتمال نرخ تعمیر برای ماشین‌های مستقر در ایستگاه‌های تولید و مونتاژ به صورت $U(a,b)$ و $U(a',b')$ در نظر گرفته شده است. در ابتدا فهرستی از عوامل موثر بر پایایی سیستم تهیه شده است که به ترتیب پارامترهای مرتبط با کران‌های بالا و پایین توابع نرخ خرابی و تعمیر مرتبط با تجهیزات مستقر در ایستگاه‌های تولید و مونتاژ و تعداد تجهیزات مستقر در هر دو ایستگاه تولید و مونتاژ است که اطلاعات آنها در جدول ۲ آورده شده است و با نمادهای A_1 تا A_{10} نشان داده شده است. جدول ۳، نشانگر تعداد طرح‌های غربالگری با روش پلاکت برمن است که توسط نرم‌افزار مینی تب ارایه شده است.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

جدول ۲. طرح غربالگری با روش پلاکت برمن

نماد	عامل	حد بالا	حد پایین
A_1	λ	۱۰۰	۲۰۰
A_2	k	۰/۸	۱/۲۵
A_3	λ'	۱۵۰	۲۵۰
A_4	k'	۰/۷	۱/۳۵
A_5	تعداد تجهیزات ایستگاه تولید	۳	۵
A_6	تعداد تجهیزات ایستگاه مونتاژ	۳	۵
A_7	a	۵۰	۸۰
A_8	b	۱۰۰	۱۴۰
A_9	a'	۷۰	۹۰
A_{10}	b'	۱۲۰	۱۵۰

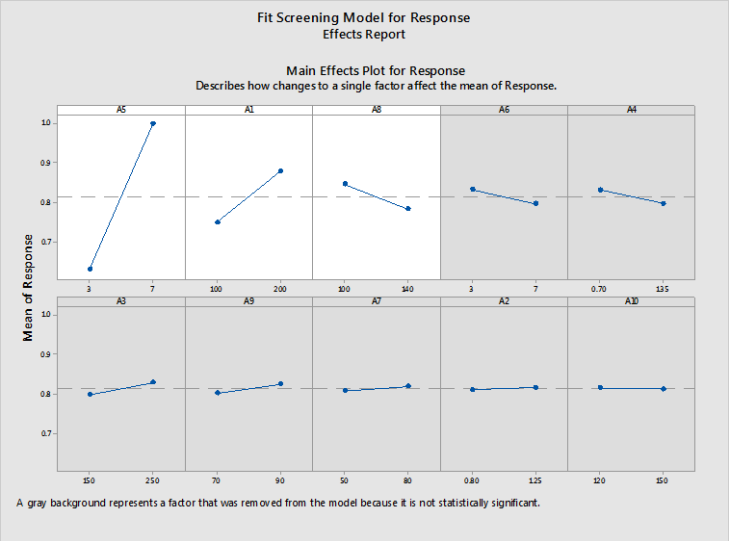
جدول ۳. طرح غربالگری با روش پلاکت برمن

نماد	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}
R_1	۲۰۰	۱/۲۵	۱۵۰	۱/۳۵	۳	۳	۵	۱۴۰	۹۰	۱۵۰
R_2	۲۰۰	۰/۸	۱۵۰	۰/۷	۵	۱۰	۸	۱۰۰	۹۰	۱۵۰
R_3	۱۰۰	۰/۸	۲۵۰	۱/۳۵	۵	۳	۸	۱۴۰	۷۰	۱۵۰
R_4	۲۰۰	۱/۲۵	۱۵۰	۱/۳۵	۵	۳	۸	۱۰۰	۷۰	۱۲۰
R_5	۲۰۰	۱/۲۵	۲۵۰	۰/۷	۵	۱۰	۵	۱۴۰	۷۰	۱۲۰
R_6	۱۰۰	۱/۲۵	۲۵۰	۰/۷	۵	۳	۵	۱۰۰	۹۰	۱۵۰
R_7	۱۰۰	۰/۸	۱۵۰	۰/۷	۳	۳	۵	۱۰۰	۷۰	۱۲۰
R_8	۱۰۰	۱/۲۵	۲۵۰	۱/۳۵	۳	۱۰	۸	۱۰۰	۹۰	۱۲۰
R_9	۱۰۰	۰/۸	۱۵۰	۱/۳۵	۵	۱۰	۵	۱۴۰	۹۰	۱۲۰
R_{10}	۱۰۰	۱/۲۵	۱۵۰	۰/۷	۳	۱۰	۸	۱۴۰	۷۰	۱۵۰
R_{11}	۲۰۰	۰/۸	۲۵۰	۱/۳۵	۳	۱۰	۵	۱۰۰	۷۰	۱۵۰
R_{12}	۲۰۰	۰/۸	۲۵۰	۰/۷	۳	۳	۸	۱۴۰	۹۰	۱۲۰

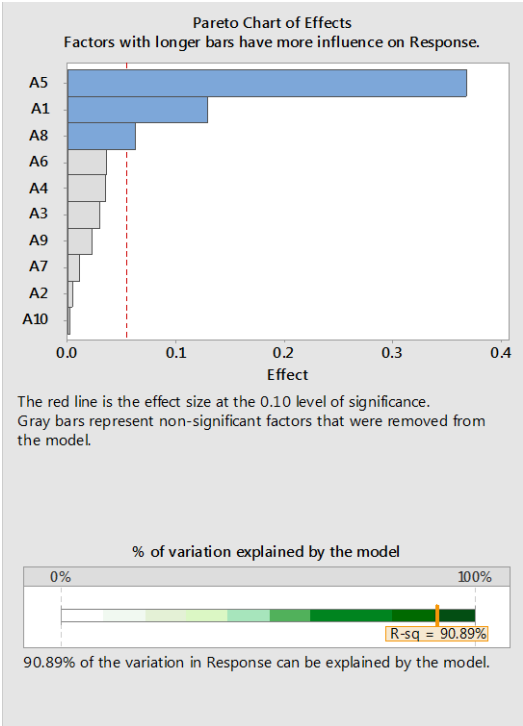
دقت طرح آزمایش بر مبنای روش پلاکت برمان، برای هر طرح آزمایش، مندرج در جدول ۳ و۴، به منظور کاهش اثر تصادفی بودن و رسیدن به ثبات در خروجی، ۵ بار تکرار در سیستم شبیه‌سازی با نرم‌افزار ED انجام شده است و میانگین نتایج حاصل از پنج بار اجرای شبیه‌سازی، به عنوان پایایی سیستم در یک شیفت کاری ثبت شده است. نتایج در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]



شکل ۲. خروجی‌های نرم افزار مینی‌تب در خصوص تعیین پارامترهای موثر بر پایایی سیستم



شکل ۳. خروجی‌های نرم افزار مینی تب در خصوص تعیین پارامترهای موثر بر پایایی سیستم

همان‌طور که شکل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهند، پارامترهای A_1، A_5 و A_8 به عنوان پارامترهای موثربر پایایی سیستم شناخته شده است. مقدار R^2 به‌دست آمده برابر با ۹۱ درصد می‌باشد که مقدار مناسبی است.

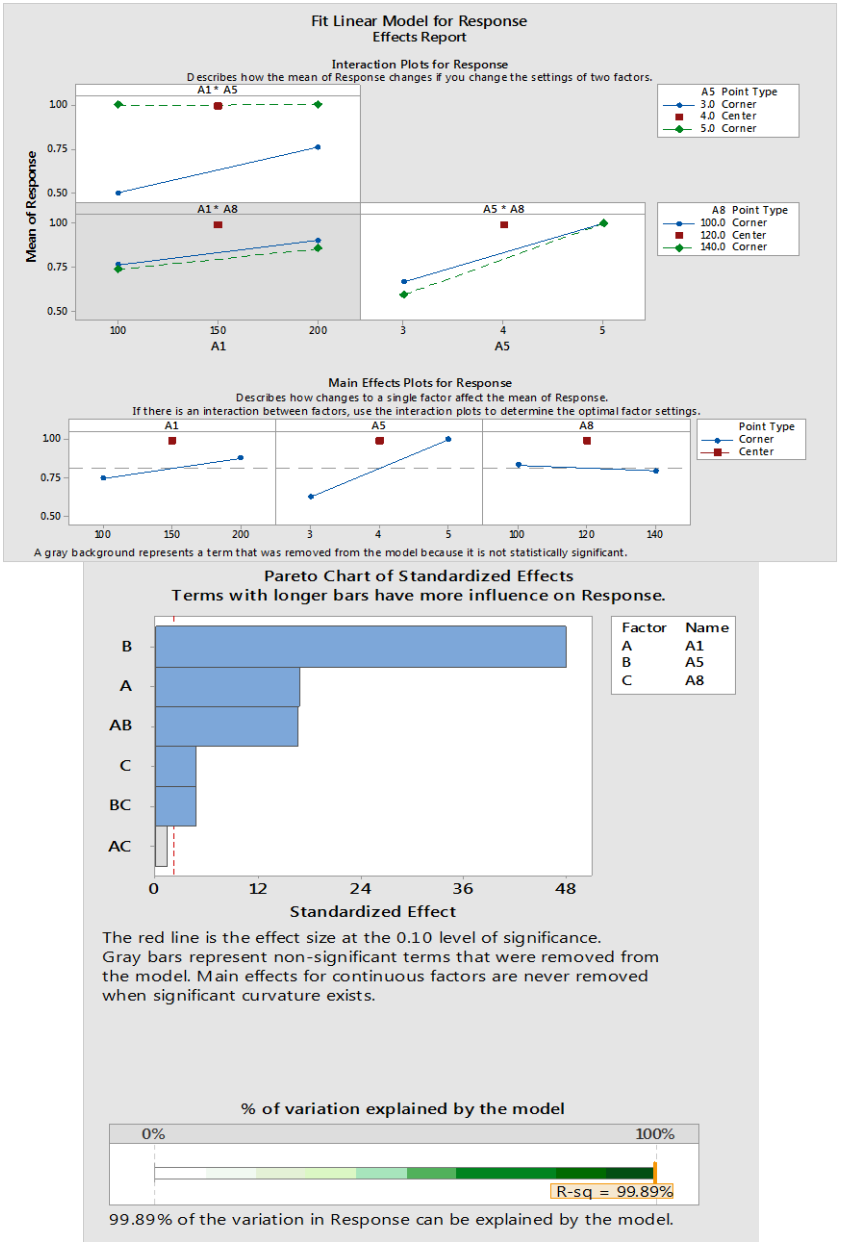
جدول٤. روش طراحی آزمایش به روش رویه سطح پاسخ

نماد	A_1	A_2	A_3	پایایی
Q_1	۱۵۰	۴	۱۲۰	۰/۹۹۳
Q_2	۲۰۰	۵	۱۴۰	۰/۹۹۹
Q_3	۱۰۰	۵	۱۰۰	۰/۹۹۸

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

Q_4	۲۰۰	۳	۱۰۰	۰/۸۰۴
Q_5	۱۰۰	۵	۱۴۰	۰/۹۹۷
Q_6	۱۵۰	۴	۱۲۰	۰/۹۸۹
Q_7	۲۰۰	۵	۱۰۰	۰/۹۹۹
Q_8	۱۵۰	۴	۱۲۰	۰/۹۸۹
Q_9	۱۰۰	۳	۱۰۰	۰/۵۲۴
Q_{10}	۲۰۰	۳	۱۴۰	۰/۷۱۰
Q_{11}	۱۰۰	۳	۱۴۰	۰/۴۷۳



شکل ٤. خروجی‌های نرم افزار در خصوص روش رویه سطح پاسخ

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

شکل ۴ خروجی‌های نرم افزار مینی‌تب در مورد محاسبات رویه سطح پاسخ این تحقیق را نشان می‌دهد. این ضریب، نسبتی از واریانس برحسب متغیر وابسته است که از متغیرهای مستقل قابل پیش‌بینی می‌باشد و مقدار آن از صفر تا یک متغیر است. در صورتی که مقدار ضریب، به صفر نزدیک باشد نشان از برآورد ناصحیح و در صورتی که مقدار به یک نزدیک باشد، نشان می‌دهد که محاسبات و برآوردها به مقدار ایده‌ال نزدیک شده است. در شکل ۴، مقدار R^2 به‌دست آمده برابر با ۹۹ درصد است که نشان می‌دهد ۹۹ درصد از تغییرات در خود سیستم تفسیر می‌شود و تنها یک درصد عامل نویز و یا اغتشاش است.

تابع پایایی محاسبه‌شده از این طریق به شرح زیر است:

$$Reliability\ of\ the\ System = -1/767 + 0/027677A_1 + 0/2299A_5 - 0/00452A_8 - 0/00071A_1 * A_1 - 0/001283A_1 * A_5 + 0/0009 01A_5 * A_8 \quad (19)$$

٤-۲ ارزیابی گزینه‌ها و انتخاب

داده‌های سطح مورد استفاده از کارگاه توسط هر تجهیز به انضمام قیمت آن، در جدول ۵ ارایه شده است. در این راستا، گزینه‌های ممکن برای استقرار تجهیزات بر اساس جداول ۵ و ۲ به صورت زیر است. در تابع پایایی سیستم، تعداد تجهیزات مستقر در ایستگاه تولید به عنوان یکی از عوامل تاثیرگذار بر پایایی شناخته شده است، ولی تعداد تجهیزات ایستگاه مونتاژ به دلایلی نظیر احتمال خرابی کمتر، دارای این تاثیر نیست. لذا در گزینه‌های استقرار، تعداد تجهیزات ایستگاه مونتاژ در کران پایین آن یعنی سه ماشین ثابت نگهداشته شده است. ولی برای ایستگاه تولید، سه حالت وجود سه، چهار و پنج سری از ماشین‌آلات تولیدی به صورت موازی به عنوان گزینه‌های ممکن مدنظر قرار گرفته است. در این راستا، مساحت تجهیزات مستقر و قیمت کل ماشین آلات سیستم تولیدی در جدول ۶ آورده شده است. به عنوان مثال در آخرین ردیف این جدول، منظور از حالت پنج سری ماشین موازی، وجود پنج سری ماشین‌آلات در حالت موازی در ایستگاه تولید و همچنین سه دستگاه مونتاژ در ایستگاه مونتاژ است. مقادیر مندرج در جدول ۶، نشان‌دهنده گزینه‌های ممکن استقرار ماشین‌آلات با توجه به محدودیت مساحت کل کارگاه و سقف اعتبارات قابل پرداخت بابت خرید تجهیزات است که منجر به سه گزینه قابل انتخاب در جدول ۶ شده است.

جدول ۵. اطلاعات تجهیزات سیستم تولیدی

نام تجهیز	مساحت (متر مربع)	قیمت (میلیون ریال)
پرس هیدرولیک سیصد تن	۶	۴۰۰۰
پرس ضربه‌ای صد تن	۶/۲۵	۴۰۰۰
پرس هیدرولیک ۱۶۰ تن	۶	۳۰۰۰
جوش اصطکاکی	۱	۱۵۰۰

جدول ٦. اطلاعات هر طرح استقرار سیستم تولیدی

نماد	تعداد تجهیزات در ایستگاه تولید	مساحت (متر مربع)	قیمت (میلیون ریال)
Alt_1	سه سری ماشین موازی	۵۷/۷۵	۳۷۵۰۰
Alt_2	چهار سری ماشین موازی	۷۶	۴۸۵۰۰
Alt_3	پنج سری ماشین موازی	۹۴/۲۵	۵۹۵۰۰

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

٤-۲-۱ تعیین اوزان معیارها

در پژوهش حاضر، از روش بهترین بدترین فازی به منظور تعیین اوزان استفاده شده است. معیارهای پایایی سیستم، قیمت تجهیزات و مساحت کل مورد استفاده توسط تجهیزات به ترتیب با نمادهای C_1، C_2 و C_3 نشان داده می‌شوند. C_3به عنوان بهترین و با اهمیت‌ترین معیار و C_1 به عنوان کم اهمیت‌ترین معیار شناخته شده است. مقایسات زوجی معیارها در جدول ۷ آورده شده است. مطابق با اعداد مندرج در جدول ۷، مقایسات زوجی مابین معیارهای در نظر گرفته شده در این تحقیق، یعنی تخمینی از پایایی سیستم، مساحت استقرار ماشین‌آلات و قیمت کل تجهیزات انجام شده است.

جدول ۷. مقایسات زوجی مبتنی بر متغیرهای کلامی

معیار	C_1	C_2	C_3
C_B	AI	FI	EI
C_W	EI	FI	AI

بر این اساس مقدار ماتریس $\tilde{A}_B$ و $\tilde{A}_W$ با اعداد فازی مثلثی متناظر به صورت زیر است:

$$\tilde{A}_B = \{(7/2, 4, 9/2), (3/2, 2, 5/2), (1, 1, 1)\}$$
$$\tilde{A}_W = \{(1, 1, 1), (3/2, 2, 5/2), (7/2, 4, 9/2)\}$$

مدل ریاضی، تعیین اوزان معیارها مبتنی بر روش بهترین- بدترین فازی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
&\min \ \tilde{\alpha}^* \\
&s.t. \\
&\left|\frac{(l_2^w, m_2^w, u_2^w)}{(l_1^w, m_1^w, u_1^w)} - (l_{21}, m_{21}, u_{21})\right| \le (a^*, a^*, a^*) \\
&\left|\frac{(l_2^w, m_2^w, u_2^w)}{(l_3^w, m_3^w, u_3^w)} - (l_{23}, m_{23}, u_{23})\right| \le (a^*, a^*, a^*) \\
&\left|\frac{(l_3^w, m_3^w, u_3^w)}{(l_3^w, m_3^w, u_3^w)} - (l_{33}, m_{33}, u_{33})\right| \le (a^*, a^*, a^*) \\
&\left|\frac{(l_1^w, m_1^w, u_1^w)}{(l_1^w, m_1^w, u_1^w)} - (l_{11}, m_{11}, u_{11})\right| \le (a^*, a^*, a^*) \\
&\left|\frac{(l_2^w, m_2^w, u_2^w)}{(l_1^w, m_1^w, u_1^w)} - (l_{21}, m_{21}, u_{21})\right| \le (a^*, a^*, a^*) \\
&\left|\frac{(l_2^w, m_2^w, u_2^w)}{(l_3^w, m_3^w, u_3^w)} - (l_{23}, m_{23}, u_{23})\right| \le (a^*, a^*, a^*) \\
&\sum_{j=1}^{r} R(\tilde{W}_j) = 1 \\
&\forall j : l_j^w \le m_j^w \le u_j^w \\
&\forall j : l_j^w \ge 0 \\
&j = 1, 2, 3
\end{aligned} \qquad (20)$$

```
min  k
s.t.
l2 - 3.5u1 <= ku1;  l2 - 3.5u1 >= -ku1
m2 - 4m1 <= km1;  m2 - 4m1 >= -km1
u2 - 4.5l1 <= kl1;  u2 - 4.5l1 >= -kl1
l2 - 1.5u2 <= ku2;  l2 - 1.5u2 >= -ku2
m2 - 2m2 <= km2;  m2 - 2m2 >= -km2
u2 - 2.5l2 <= kl2;  u2 - 2.5l2 >= -kl2
l2 - 1.5u1 <= ku1;  l2 - 1.5u1 >= -k*u1
m2 - 2m1 <= km1;  m2 - 2m >= -k*m1
u2 - 2.5l2 <= kl2;  u2 - (2.5*l2) >= (-k*l1);
l1 + 4*m1 + u1 + l2 + 4*m2 + u2 + l3 + 4*m3 + u3 = 6;
l1 <= m1;  m1 <= u1;
l2 <= m2;  m2 <= u2;
l3 <= m3;  m3 <= u3;
l1 > 0;  l2 > 0;  l3 > 0;  k >= 0;
```

(21)

مدل (۲۱) توسط نرم افزار لینگو حل شده است و نتایج در قالب اعداد فازی مثلثی به‌دست آمده است:

$$\tilde{W}_1 = (0/137, 0/137, 0/152) \quad \tilde{W}_2 = (0/207, 0/252, 0/478) \quad \tilde{W}_3 = (0/578, 0/578, 0/578) \qquad (22)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

با استفاده از رابطه (۷) اعداد فازی وزن‌ها به اعداد قطعی تبدیل می‌شوند که نتایج در جدول ۸ آورده شده است. همان‌طور که جدول ۸ نشان می‌دهد، بیشترین وزن به معیار پایایی تخصیص‌یافته است. نرخ ناسازگاری محاسبه شده ۰/۰۳۶ است. نزدیک بودن این عدد به صفر، نشان می‌دهد که ناسازگاری در محاسبات انجام شده کم است و مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره سازگاری قابل قبولی دارد. این عدد از تقسیم مقدار تابع هدف مساله، ۰/۲۹۱، بر عدد ۸/۰۴ حاصل شده است که متناظر با ماتریس مربعی سه در سه است. تشریح محاسبه نرخ ناسازگاری در روش بهترین بدترین فازی و تفسیر آن، در مرجع [۲۵] آورده شده است.

جدول۸. اوزان معیارها

معیار	W_1	W_2	W_3
وزن	۰/۱۴۰	۰/۲۸۲	۰/۵۷۸

جدول ۹. ماتریس تصمیم

نماد	C_1	C_2	C_3
Alt_1	۵۷/۷۵	۳۷۵۰۰	۰/۶۸۰
Alt_2	۷۶	۴۸۵۰۰	۰/۸۲۶
Alt_3	۹۴/۲۵	۵۹۵۰۰	۰/۹۷۲

داده‌های مربوط به پایایی سیستم مندرج در ستون چهارم جدول ۹ از رابطه (۱۱) به‌دست آمده است. معیارهای C_1 C_1 و C_2 ازجنس هزینه و معیار C_3 از جنس سود است. جدول ۱۰ رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها بر اساس روش تاپسیس را نشان می‌دهد. بر این اساس، گزینه Alt_3 به عنوان بهترین گزینه شناخته شده است. در این حالت استقرار پنج سری ماشین موازی در ایستگاه تولید و سه دستگاه ماشین مونتاژ در ایستگاه دوم توصیه‌شده است که با توجه به وزن بالای معیار پایایی در این مساله تصمیم‌گیری، جوابی دور از انتظار نیست.

جدول ۱۰. رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس روش تاپسیس

نماد	شاخص تاپسیس	رتبه
Alt_1	۰/۰۰۴	۳
Alt_2	۰/۵۰۰	۲
Alt_3	۰/۹۹۶	۱

۵ نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی پایایی یکی از موضوعات جذابی است که به دلایل مختلفی نظیر کاهش حداکثر زمان تکمیل کارها و تحویل به موقع محصولات به مشتریان و برآورده‌سازی موعدهای تحویل، مورد توجه روز افزون قرار گرفته است. یکی از مدل‌های چیدمان تجهیزات در سیستم‌های زمان‌بندی تولید، سیستم جریان کارگاهی مونتاژ دو مرحله‌ای است که در ایستگاه نخست آن، قطعات محصولات تولید می‌شوند و در ایستگاه دوم یک یا چند دستگاه، قطعات را به یکدیگر مونتاژ می‌نمایند. تعیین تعداد بهینه تجهیزات و بهینه‌سازی پایایی سیستم تولیدی موضوع بررسی پژوهش حاضر است. به‌دلیل عدم فرض پیروی خرابی تجهیزات از توزیع نمایی، امکان استفاده از فرآیند مارکف امکان‌پذیر نیست. در ادبیات تحقیق، در مبحث مدل‌های زمان‌بندی و توالی عملیات، تاکنون

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

پژوهش مشابهی با مفروضات فوق، نظیر پیروی نکردن نرخ خرابی از توزیع نمائی مشاهده نشده است. در تعدادی از پژوهش‌های مشابه، کاربرد روش رویه سطح پاسخ در حل مسایل پایایی گزارش شده است، ولی از روش‌های طراحی آزمایش‌ها به منظور تخمین تابع پایایی، برای اولین بار در این تحقیق استفاده شده است. بدین صورت که از روش پلاکت برمن به منظور غربالگری اولیه و تعیین پارامترهای موثر و از روش رویه سطح پاسخ به منظور تخمین تابع پایایی استفاده شده است. در هر حال، پایایی سیستم تولیدی، تنها یکی از معیارهای مدنظر تصمیم‌گیرندگان برای بهینه‌سازی استقرار تجهیزات است. لذا استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه ضروری به نظر می‌رسد. از این رو در این تحقیق، معیارهای قیمت کل تجهیزات و مساحت درگیر استقرار ماشین‌آلات نیز به عنوان معیارهای اصلی انتخاب در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه، با استفاده از روش ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی متشکل از روش‌های بهترین-بدترین فازی و تاپسیس، از میان گزینه‌های ممکن، بهترین گزینه انتخاب شده است. کاربردپذیری روش ارایه‌شده، با ذکر یک مثال عملی در صنعت تولید خودرو مورد آزمون قرار گرفته است. به منظور مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود که کمینه‌سازی هزینه‌ها در پژوهش‌های آتی مدنظر قرار گیرد. به عنوان نمونه، در نظر گرفتن تعرفه‌های متفاوت هزینه برق مصرفی بر اساس زمان مصرف، به عنوان موضوعی کاربردی پیشنهاد می‌شود.

منابع

[1] Jolai , F., Jooybar, Zare-Shourijeh, A. (2019). A Mathematical Model For Designing Of Production Line Usin g Reliability Optimization Approach Under Uncertainty. 35(1), 39-49.

[2] Motlagh, M., Azimi, P., Amiri, M., Madraki, M. (2019). An efficient simulation optimization methodology to solve a multi-objective problem in unreliable unbalanced production lines. Expert Systems with Applications, 138, 112836.

[3] Yang, M., Zhang, D., Han, X. (2020). New efficient and robust method for structural reliability analysis and its application in reliability-based design optimization. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 366, 113018.

[4] Gao, H., Cui, L., Qiu, Q. (2019). Reliability modeling for degradation-shock dependence systems with multiple species of shocks. Reliability Engineering & System Safety, 185, 133-143.

[5] Rajpal, P., Shishodia, K., Sekhon, G. (2006). An artificial neural network for modeling reliability, availability and maintainability of a repairable system. Reliability Engineering & System Safety. 91(7), 809-819.

[6] Xu, Z., Saleh, J.H. (2021). Machine learning for reliability engineering and safety applications: Review of current status and future opportunities. Reliability Engineering & System Safety, 211, 107530.

[7] Basir ,S.A., Mazdeh, M.M., Namakshenas, M. (2018). Bi-level genetic algorithms for a two-stage assembly flow-shop scheduling problem with batch delivery system. Computers & Industrial Engineering, 126, 217-231.

[8] Wu, C., Chen, J., Lin, W., Lai, K., Liu, S., Yu, P. (2018). A two-stage three-machine assembly flow shop scheduling with learning consideration to minimize the flowtime by six hybrids of particle swarm optimization. Swarm and Evolutionary Computation, 41, 97-110.

[9] Zhang, Z. (2021). Evaluate the reliability of a seru production system with reworking actions. Journal of Industrial and Production Engineering, 2021,1-10.

[10] Akbar, M., Irohara, T. (2018). Scheduling for sustainable manufacturing: A review. Journal of cleaner production, 205, 866-883.

[11] Chang, P.C. (2019). Reliability estimation for a stochastic production system with finite buffer storage by a simulation approach. Annals of Operations Research, 277(1), 119-133.

[12] Lyu, D., Si, S. (2020). Dynamic importance measure for the K-out-of-n: G system under repeated random load. Reliability Engineering & System Safety, 195, 106720.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]

[13] El Mouayni, I., (2020). A simulation-based approach for time allowances assessment during production system design with consideration of worker's fatigue, learning and reliability. Computers & Industrial Engineering, 139, 105650.

[14] Hao, Z., Yeh, W.C., Tan, S.-Y. (2021). One-batch Preempt Deterioration-effect Multi-state Multi-rework Network Reliability Problem and Algorithms. Reliability Engineering & System Safety, 107883.

[15] da Silva, A. F. (2019). Modeling the uncertainty in response surface methodology through optimization and Monte Carlo simulation: An application in stamping process. Materials & Design, 173, 107776.

[16] Aziz, M.M.A., Elgammal, E.W., Ghitas, R.G. (2020). Comparative study on modeling by neural networks and response surface methodology for better prediction and optimization of fermentation parameters: Application on thermo-alkaline lipase production by Nocardiopsis sp. strain NRC/WN5. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 25, 101619.

[17] Sun, W. (2020). Interaction effects and an optimization study of the microparameters of the flat-joint model using the Plackett-Burman design and response surface methodology. Arabian Journal of Geosciences, 13(2), 1-24.

[18] Zaretalab, A., V. Hajipour, Tavana, M. (2020). Redundancy allocation problem with multi-state component systems and reliable supplier selection. Reliability Engineering & System Safety, 193,106629.

[19] Pei, L., (2022). System reliability of a gravity dam-foundation system using Bayesian networks. Reliability Engineering & System Safety, 218, 108178.

[20] Jeang, A. (2019). Optimal availability for determining choice and repair policy of system components. International Journal of Quality & Reliability Management, 1-10.

[21] Ahmed, U., S. Carpitella, Certa, A. (2021).An integrated methodological approach for optimising complex systems subjected to predictive maintenance. Reliability Engineering & System Safety, 216, 108022.

[22] Khajeh, M. (2020). Assessing and Selecting Sustainable Suppliers in Intuitionistic Fuzzy Set with Hybrid Multi-Criteria Best-Worst and VIKOR Approach. Journal of Operational Research and Its Applications, 17(1), 25-48.

[23] Karbalaie Alillou, M., Daneshian, B., Modarres Khiyabani, F., Hosseinzadeh Lotfi F. (2020). A Proposed Combination Method for Ranking Options in Multi-Criteria Decision Making by Data Envelopment Analysis and Common Set of Weights. Journal of Operational Research and Its Applications, 17, 4, 137-164.

[24] Carpitella, S., (2021). A risk evaluation framework for the best maintenance strategy: The case of a marine salt manufacture firm. Reliability Engineering & System Safety, 205, 107265.

[25] Guo, S., Zhao, H. (2017). Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. Knowledge-Based Systems, 121, 23-31.

[26] de Lima Silva, D. F., de Almeida Filho, A.T. (2020). Sorting with TOPSIS through boundary and characteristic profiles. Computers & Industrial Engineering, 141,106328.

[27] Pourkarim Guilani, P., Azimi, P., Sharifi, M., Amiri, M. (2019). Redundancy allocation problem with a mixed strategy for a system with k-out-of-n subsystems and time-dependent failure rates based on Weibull distribution: An optimization via simulation approach. Scientia Iranica, 26(2), 1023-1038.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.45]