

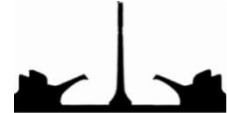
دسترسی در سایت <http://jnrm.srbiau.ac.ir>

سال دهم، شماره چهل و هشتم، خرداد و تیر ۱۴۰۳

شماره شاپا: ۵۸۸۸-۲۵۸۸



پژوهش‌های نوین در ریاضی



دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

طراحی مدلی برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر در خطوط تولید بلوک سیلندر خودرو

مرتضی آذرباد^۱، اکبر عالم‌تبریز^۲، فرهاد حسین‌زاده لطفی^۳، محسن رستمی مال‌خلیفه^۳

^(۱) گروه مهندسی صنایع، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^(۲) گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^(۳) گروه ریاضی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳

چکیده

در عصر اطلاعات و به دلیل پیچیدگی محیطی، بسیاری از سازمان‌ها، شرکت‌ها، نهادها و صنایع با چالش‌های بسیاری برای بهبود وضعیت و ارتقاء عملکرد خود مواجه هستند. بسیاری از واحدهای تولیدی و به خصوص تولیدکنندگان قطعات خودرو به منظور رقابت، با چالش‌های کاهش هزینه، جلوگیری از اتلاف زمان، پاسخگویی شایسته به مشتریان و بهبود کیفیت روبرو می‌باشند. برای پاسخ مناسب به این چالش‌ها بسیاری از تولیدکنندگان از سیستمی تحت عنوان سیستم تولید انعطاف‌پذیر استفاده می‌کنند. این سیستم تولیدی از طریق گروهی از ماشین‌آلات با کارگاه‌های کاری انعطاف‌پذیر و به منظور تولید قطعات متنوع طراحی می‌شوند که هدف آن کاهش زمان سفارش تا تحویل کالا، افزایش محصول نهایی، ارتقاء سطح بهره‌وری ماشین‌آلات، بهبود در توانایی تحویل کالا، کاهش سطح موجودی، کاهش کار در جریان تولید و افزایش کیفیت می‌باشد. در این تحقیق با مطالعه مبانی علمی و صنعتی، شاخص‌های جامعی که بر روی عملکرد سیستم تولید انعطاف‌پذیر تاثیرگذار هستند از طریق نظریه داده‌بنیاد جمع‌آوری شده است و با توجه به فراوانی شاخص‌ها از روش دلفی جهت غربال‌سازی و شناسایی شاخص‌های مؤثر بهره‌برده شده است. در ادامه به منظور ارزیابی عملکرد واحدهای تولیدکننده بلوک سیلندر خودرو تیباً از روش ریاضی تحلیل پوششی داده‌های توسعه‌یافته استفاده و به منظور اولویت‌بندی واحدهای کارا از تکنیک بهترین و بدترین استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد سرمایه‌گذاری مناسب به منظور تامین ماشین‌آلات و تجهیزات پیشرفته و همچنین یکپارچگی بین تجهیزات موجب کارا شدن سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: سیستم تولید انعطاف‌پذیر، تحلیل پوششی داده‌ها، ارزیابی عملکرد، روش دلفی، روش بهترین و بدترین

۱- مقدمه

با توجه به افزایش سطح رقابت جهانی، چالش مشترک هر بنگاه تولیدی مدرن برای بقا در بازار رقابتی امروز این است که باید توانایی تولید محصولات سفارشی با کیفیت بالا و با حجم زیاد و زمان کوتاه را داشته باشد. سیستم تولید انعطاف‌پذیر یک سیستم تولید رایانه‌ای و خودکار است که برای تولید محصولات با حجم متوسط و با بهره‌وری بالا طراحی شده است. این نوع سیستم تولیدی کارایی یک خط تولید انبوه را با انعطاف‌پذیری یک کارگاه کاری ترکیب می‌کند و بهترین ساختار شرکت‌های تولیدی مدرن برای افزایش بهره‌وری و رقابت‌پذیری را فراهم می‌کند. از زمان اجرای موفقیت‌آمیز اولین سیستم تولید انعطاف‌پذیر در دهه ۱۹۶۰، بسیاری از مسائل سیستم تولید انعطاف‌پذیر مورد مطالعه قرار گرفته است [34]. در این دهه نگرانی اصلی واحدهای صنعتی هزینه بود. اما به مرور زمان کیفیت مورد توجه قرار گرفته و با پیچیده‌تر شدن بازار، سرعت تحویل کالا و تأمین نیاز مشتری به اولویت صاحبان صنایع تبدیل گردید و این موضوع منجر به تدوین راهبرد جدیدی گردید که شرکت‌های تولیدکننده را مجبور نموده با محیطی که در آن فعالیت می‌کنند سازگار و در عملکرد خود انعطاف‌پذیرتر گردند تا بتوانند بخش‌های مختلف بازار را راضی کنند. بنابراین نوآوری در سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر تلاش و راهی برای بدست آوردن این مزیت رقابتی گردید [28].

ربات‌ها، ماشین‌های CNC^۲ و سیستم‌های خودکار هدایت‌کننده مواد که توسط رایانه‌های اختصاصی کنترل می‌شوند از اجزای اصلی سیستم تولید انعطاف‌پذیر (FMS^۳) هستند [12]. ربات‌های متحرک و به ویژه سیستم‌های خودکار هدایت‌کننده مواد به طور گسترده در حوزه‌های مختلف مانند جابجایی مواد در ساخت، توزیع و حمل و نقل بکار می‌روند [38]. سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر معمولاً در سیستم‌های تولید خودکار مدرن دیده می‌شوند که انعطاف زیادی در تخصیص ماشین و مسیریابی قطعه دارند. هر ماشین ممکن است توانایی پردازش چندین کار را داشته باشد و هر کار ممکن است توسط ماشین‌های جایگزین پردازش شود [36]. این نوع سیستم‌ها از این رو انعطاف‌پذیر می‌باشند تا بتوانند محصولات مختلف مرکب را به طور مؤثر با محصولات جدید بازار انطباق دهند. بنابراین FMS و معیارهای ارزیابی آن باید تعریف گردد و برای بدست آوردن ارزش بهینه زمان توانایی تولید و بهره‌برداری تجهیزات مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد [20]. در حال حاضر جهت انعطاف‌پذیری بیشتر، مطالعه در مورد توسعه سیستم‌های تولید با قابلیت تغییر تنظیمات و انطباق آن با نیازهای تولید در حال انجام است [15]. ارزیابی عملکرد به عنوان عنصر حیاتی تصمیم‌گیری مدیران در راستای تغییرات سازمانی و تحولات محیطی معرفی شده است. فرآیند ارزیابی عملکرد به جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها بسنده ننموده و از داده‌ها برای توسعه و بهبود سازمان و تحقق رسالت‌ها و اهداف استراتژیک بهره می‌جوید. با توسعه علوم تصمیم‌گیری در مدیریت، همچون تحقیق در عملیات، پایه علمی و ریاضی ارزیابی عملکرد دقیق‌تر شده است و ارزیابی‌ها بیشتر از حالت کیفی به کمی تبدیل شده‌اند. این علوم کاربردی به طور قابل توجهی بر بهبود کیفیت تصمیمات مدیران تأثیر گذاشته است [2]. روش ریاضی که در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته است، روش تحلیل پوششی داده‌ها می‌باشد. تحلیل پوششی داده‌ها تکنیکی ریاضی و مدیریتی برای ارزیابی واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMU^۴) با ورودی‌ها و خروجی‌های متعدد و متنوع است و با در نظر گرفتن وابستگی‌ها و ساختار سیستم‌ها و همچنین بازخورد اثرات متقابل معیارها، به ارزیابی سیستماتیک عملکرد DMUها می‌پردازد [1].

محققین زیادی به مطالعه و ارائه مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها (DEA^۵) برای ارزیابی کارایی‌های کلی و جزئی سیستم‌های دومرحله‌ای پرداخته‌اند. در این پژوهش علاوه بر در نظر گرفتن شاخص‌های مورد مطالعه محققین پیشین، شاخص‌های جامعی از FMS جمع‌آوری و سپس با روش دلفی نسبت به غربال‌سازی این شاخص‌ها اقدام و ۱۵ شاخص مؤثر در FMS شناسایی شده است. با استفاده از نظر خبرگان دانشگاهی و تولیدکنندگان بلوک سیلندر خودرو این شاخص‌های غربال‌سازی شده با خطوط تولید بلوک سیلندر تطابق داده شده و یک مدل DEA با ساختار شبکه دومرحله‌ای بدست آمده است و از فرم پوششی DEA.

1-Computer Numerical Control
2-Flexible Manufacturing System
3-Decision Making Unit
4-Data Envelopment Analysis

جهت ارزیابی عملکرد FMS خطوط تولید استفاده شده است. در تحقیقات گذشته با روش‌هایی همچون اندرسون-پیترسون و کارایی متقاطع به رتبه‌بندی گزینه‌های کارا اقدام گردیده است. اما در این پژوهش برای انتخاب گزینه‌های کارای FMS از روش بهترین‌وبدترین (BWM^۶) بهره برده شده است. شایان گفتن است مطالعه و پژوهش بر روی FMS، محققین حاضر را به تدوین ساختار شبکه‌ای دومرحله‌ای خطوط تولید مورد مطالعاتی رسانده است. یعنی با مشاهدات میدانی و تطابق عوامل تاثیرگذار بر FMS که جامعیت بیشتری نسبت به مطالعات گذشته داشته‌اند به طراحی مدل ریاضی توسعه‌یافته DEA پرداخته شده است. این تطابق معیارها با خطوط تولید موجب به وجود آمدن محدودیت‌هایی در توسعه DEA گردید که باعث کاربردی‌شدن هر چه بیشتر مدل تدوین‌شده در این تحقیق می‌باشد.

در بخش دوم به مبانی نظری FMS و DEA و تحقیقات محققین پیشین در زمینه ارزیابی عملکرد FMS با رویکرد DEA پرداخته شده است. در بخش سوم روش‌شناسی تحقیق صورت گرفته و مدل‌سازی انجام شده است. در بخش چهارم مدل ارائه‌شده در نرم‌افزار GAMS برنامه‌نویسی و با داده‌های جمع‌آوری‌شده اجرا گردید و در بخش پنجم نتیجه‌گیری مباحث مطرح‌شده در بخش‌های قبل و همچنین پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی بیان شده است.

۲. مبانی نظری

۲.۱. سیستم تولید انعطاف‌پذیر

تولید موضوع پیچیده‌ای است و سامانه‌های فعال و غیرفعال، سنت‌های مطلوب و نامطلوب، فرهنگ‌های سنتی و نوین، همگی به طور همزمان در تولید نقش دارند [5]. در قرن بیست و یکم، همگام با بکارگیری فناوری در صنایع و ایجاد تغییر و تحول در سیستم‌های تولیدی، چهره‌ی سازمان‌های صنعتی دگرگون شده است و این امر به ویژه با معرفی اتوماسیون و کاربرد رایانه در صنایع دوچندان شده است [3]. از جمله فناوری‌های جدید در صنعت تولید، FMS می‌باشد که این نوع سیستم دارای تعاریف فراوانی است. FMS می‌تواند هر محصولی را از یک خانواده بزرگ آن محصول به طور تصادفی و به مدت طولانی بدون حضور نیروی انسانی تولید کند. از نظر اندازه FMS می‌تواند دارای ۵ تا ۱۰ دستگاه، ربات و وسایل نقلیه هدایت‌شده‌ی خودکار باشد و در بعضی مواقع تعداد دستگاه‌ها بسیار بیشتر است. این سیستم یک آرایش منظم از ماشین‌آلات، تجهیزات و دیگر عوامل تولیدی است که توسط یک سیستم حمل و نقل منسجم با هم در ارتباط هستند [4].

حوزه سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر در سال‌های اخیر روند توسعه پویایی را مشاهده کرده است. یک جز اساسی در انقلاب صنعتی چهارم، سیستم تولید انعطاف‌پذیر است. سیستم تولید پیشرفته‌ای که ماشین‌ها، ایستگاه‌های کاری و تجهیزات لجستیکی را به هم متصل می‌کند و کل فرآیند تولید را با رایانه هماهنگ می‌کند و در چند گروه و در حالی که تولید غیر قابل پیش‌بینی می‌باشد سازمان یافته است [13].

۲.۲. تحلیل پوششی داده‌ها

تحلیل پوششی داده‌ها ابزار توانمندی است که امروزه به صورت چشمگیری در ارزیابی عملکرد سیستم‌هایی با چند ورودی و چند خروجی کاربرد یافته است. رشد مستمر و کاربرد فراوان DEA در سی سال اخیر، چه در بعد بسط تئوری و چه در قلمرو کاربردی، آنچنان بوده که حتی شگفتی خود صاحب‌نظران را برانگیخته است.

فارل در سال ۱۹۵۷ برای اولین بار جهت تخمین کارایی، روش‌های ناپارامتریک را مطرح نمود. او به جای حدس تابع تولید، مقادیر ورودی‌ها و خروجی‌های واحدها را مشاهده کرد و مرزی را برای این واحدها در نظر گرفت و این مرز را که مرز کارایی^۷ نام دارد، ملاک کارایی قرار داد. روش فارل توسط افرادی چون چارنز، کوپر و رودز بسط داده شد و مدل‌هایی تحت عنوان تحلیل پوششی داده‌ها مطرح گردید که اطلاعات لازم برای آن، ورودی‌ها و خروجی‌های واحد تصمیم‌گیرنده می‌باشد. DEA کارایی یک واحد تصمیم‌گیرنده را نسبت به واحدهای مشابه با ورودی‌ها و خروجی‌های مشابه اندازه می‌گیرد.

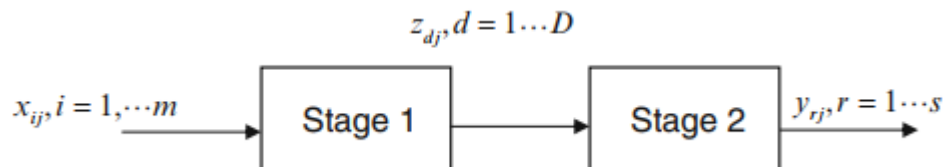
ساده‌ترین و ابتدایی‌ترین مدل DEA، مدل CCR^A است که در سال ۱۹۸۷ به صورت نظریه دکتری رودز و با راهنمایی اساتیدی چون چارلز و کوپر معرفی گردید. پس از آن در سال ۱۹۸۴ بنکر، کوپر و رودز مدل BCC^A را برای بازده به مقیاس متغیر تولید معرفی کردند. مدل استاندارد تحلیل پوششی داده‌ها، با فرض بازده به مقیاس ثابت جهت محاسبه کارایی کل DMU_0 به صورت مدل ۱ می‌باشد.

$$\begin{aligned} \Theta_0 = \text{Max} \quad & \frac{\sum_{r=1}^s u_r Y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i X_{i0}} \\ \text{s.t.} \quad & \frac{\sum_{r=1}^s u_r Y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i X_{ij}} \leq 1, j = 1, \dots, n \\ & v_i \geq 1\varepsilon, i = 1, \dots, m \\ & u_r \geq 1\varepsilon, r = 1, \dots, s \end{aligned} \quad (1)$$

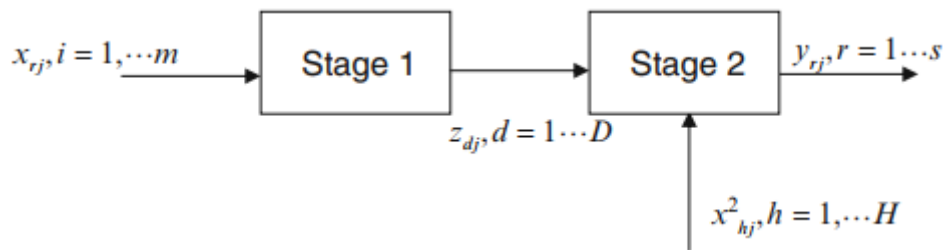
که در آن ε عدد غیر ارشمیدسی کوچک و Θ_0 نمایانگر کارایی کل DMU_0 توسط مدل‌های استاندارد تحلیل پوششی داده‌ها است. اگر $\Theta_0 = 1$ آنگاه DMU_0 کارا و اگر $\Theta_0 < 1$ ، در این صورت DMU_0 ناکارا است.

مدل‌های سنتی DEA مجموعه واحدها را به دو مجموعه مجزا تقسیم می‌کنند: کارا و ناکارا. این مدل‌ها نمی‌توانند اطلاعات بیشتری در مورد واحدهای کارا ارائه کنند [31]. در جهت رفع این مشکل پژوهش‌های زیادی صورت گرفته و به توسعه و ارائه مدل‌های DEA برای ارزیابی کارایی‌های کلی و جزئی سیستم‌های دومرحله‌ای پرداخته شده است. DEA چندین ورودی و خروجی را یکپارچه کرده و هیچ فرض اساسی از یک شکل عملکردی ندارد. به این معنی که DEA فرم تابع عملکردی خود را می‌سازد و از خطای نادرست مشخصات مرزی جلوگیری می‌کند [8].

در طی سال‌های اخیر، برخی از محققین به بررسی واحدهای تصمیم‌گیری با ساختارهای شبکه پرداخته‌اند. در این نوع از ساختارها ورودی‌های مرحله دوم، خروجی‌های مرحله اول هستند. البته در DEAهای شبکه دومرحله‌ای باید به این موضوع دقت داشت که در برخی موارد فرآیند به گونه‌ای است که مرحله دوم شامل ورودی‌های اضافی هست یعنی علاوه بر خروجی‌های مرحله اول، معیارهای دیگری نیز به عنوان ورودی‌های مرحله دوم در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱ و ۲ ساختار شماتیک این دو نوع نشان داده شده است [18]. خاطر نشان می‌سازد محققین زیادی در پژوهش‌ها و مقالات خود به توسعه انواع مدل‌های DEA پرداخته و عملکرد موارد مطالعاتی مختلف مانند عملیات نگهداری هواپیماها، هتل‌ها، ریسک ساختار پل‌ها، آموزش و پرورش، گروه‌های آموزشی و مؤسسات آموزش عالی و غیره را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. از جمله تحقیقات مورد توجه ایشان، ارزیابی عملکرد سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر و ارائه مدل‌های ریاضی DEA برای آن می‌باشد. در بخش پیشینه تحقیق به برخی از پژوهش‌های صورت گرفته اشاره شده است.



شکل ۱: ساختار شبکه‌ای دومرحله‌ای



شکل ۲: ساختار شبکه‌ای دومرحله‌ای با ورودی‌های اضافی به مرحله دوم

۳. پیشینه تحقیق

طی چند دهه گذشته FMS مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است و پژوهش‌های زیادی در این خصوص وجود دارد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مزایای پیاده‌سازی FMS بسیار زیاد می‌باشد. اما بسیاری از شرکت‌ها به دلیل اجرای FMS شکست خورده‌اند و نیاز به عملکرد موثر دارند [7]. جهت جلوگیری از شکست در پیاده‌سازی FMS در خطوط تولید نیاز به بررسی اصولی و علمی عملکرد FMS داریم. با مروری بر مطالعات پیشین در زمینه مدل‌سازی FMS درک بهتری از FMS پیدا می‌کنیم. این مدل‌ها شامل مدل‌های ریاضی، مدل‌های هوش مصنوعی، مدل‌های سلسله مراتبی، مدل‌های تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه، مدل‌های پترنت و مدل‌های شبیه‌سازی می‌باشد [37]. در این تحقیق با توجه به اینکه به ارزیابی عملکرد FMS با مدل‌سازی ریاضی DEA پرداخته شده است به تحقیقات صورت گرفته در این زمینه اشاره می‌شود.

در ۲۰ سال گذشته استفاده از طیف وسیعی از فناوری‌های تولید که در دسترس شرکت‌ها می‌باشد، به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در سال ۱۹۹۴ در یک مقاله، یک مدل تصمیم‌گیری برای مسئله انتخاب فناوری با استفاده از یک روش دومرحله‌ای پیشنهاد شده است. در مرحله ۱، از DEA برای شناسایی فناوری‌هایی استفاده می‌کند که بهترین ترکیبات مشخصات فروشنده را بر روی پارامترهای عملکرد فناوری ارائه می‌دهد. در مرحله ۲، از مدل تصمیم‌گیری چندگانه برای انتخاب فناوری از موارد مشخص شده در مرحله ۱ استفاده می‌کند. این مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های واقعی معیارهای هزینه، سرعت، ظرفیت بار و تکرارپذیری به انتخاب ربات پرداخته است [16].

در مقاله‌ای مشابه، شانگ و سوئیوشی در سال ۱۹۹۵ مدل یکپارچه DEA برای انتخاب یک FMS ارائه کردند. در این تحقیق به مسئله انتخاب مناسب‌ترین FMS برای یک سازمان تولیدی می‌پردازد و یک چارچوب یکپارچه برای تسهیل تصمیم‌گیری در مرحله طراحی و برنامه‌ریزی پیشنهاد شده است. چارچوب پیشنهادی شامل سه ماژول مجزا است: یک فرآیند تحلیلی سلسله مراتبی (AHP^۱)، یک ماژول شبیه‌سازی و یک روش حسابداری. این ماژول‌ها از طریق روش ارزیابی کارایی DEA یکپارچه شده است. ایشان پس از حل یک مدل اصلی DEA، متوجه می‌شوند که اصلاح ساختار DEA ضروری به نظر می‌رسد. با استفاده از روش‌های محدودیت انعطاف‌پذیری وزن و بازده متقابل، این ساختار را اصلاح کرده و با آن کاراترین سیستم FMS را شناسایی نمودند. در این تحقیق از معیارهای سرمایه، اپراتور، فضا، کیفیت، کار در جریان، کارهای به تأخیر افتاده و بازده استفاده کرده‌اند [25]. سارکیس در سال ۱۹۹۷ در مقاله‌ای تحت عنوان «ارزیابی گزینه‌های سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها» تعدادی مدل برای کمک به تصمیم‌گیرندگان در ارزیابی FMS ارائه کرده است. در این مقاله DEA به عنوان تکنیکی برای کمک به ارزیابی FMS با در نظر گرفتن معیارهای هزینه، زمان تولید، کارکنان، کار در جریان، فضای مورد نیاز، انعطاف‌پذیری در مقدار تولید، انعطاف‌پذیری محصول، انعطاف‌پذیری مسیر یابی مدل‌سازی شده است و پیامدهای مدیریتی و تحقیقاتی استفاده از این مدل‌ها نیز ارائه شده است [23].

تالوری و همکاران در سال ۲۰۰۰ یک چارچوب ابتکاری را ارائه داده‌اند که مبتنی بر استفاده ترکیبی از DEA و روش‌های آماری غیرپارامتری برای انتخاب FMS است. این تحقیق با شناسایی گروه‌های همگن سیستم، گزینه‌های مناسب‌تری را برای تصمیم‌گیرنده فراهم می‌کند و کمک‌های گرافیکی برای تفسیر بهتر نتایج ارائه می‌دهد. معیارهای این مقاله همان معیارهای استفاده‌شده در مقاله شانگ و سوئیوشی که شرح داده شد، می‌باشد [30]. در سال ۲۰۰۶ در مقاله‌ای یک روش جامع برای ارزیابی و انتخاب فن‌آوری‌های پیشرفته تولید در روند تصمیم‌گیری ارائه شده بود. در ابتدا یک مدل DEA که می‌تواند داده‌های قطعی، ترتیبی و فازی را در نظر بگیرد، معرفی و سپس از چارچوب توسعه‌یافته برای انتخاب FMS استفاده شد. محقق سرمایه و هزینه عملیاتی، فضای مورد نیاز و کار در جریان را به عنوان متغیرهای ورودی و انعطاف‌پذیری محصول، بهبود کیفیت و کاهش زمان تحویل را به عنوان متغیرهای خروجی در نظر گرفته است. در این پژوهش داده‌های مربوط به انعطاف‌پذیری محصول و بهبود کیفیت به صورت ترتیبی و داده‌های مربوط به کار در فرآیند و کاهش زمان تحویل به صورت اعداد فازی مثلثی بیان شده‌اند. در نهایت چارچوب پیشنهادی از طریق یک برنامه کاربردی اجرا و نتایج مقایسه‌ای ارائه شده است [11]. لیو در سال ۲۰۰۸ نیز در مقاله‌ای تحت عنوان «رویکرد فازی DEA/AR برای انتخاب سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر» به ارزیابی عملکرد گزینه‌های FMS پرداخت و در حالی که داده‌های ورودی و خروجی به صورت قطعی و فازی بودند [19]. رویکرد لیو در سال ۲۰۰۹ توسط جهانشاهلو و همکاران مورد نقد قرار گرفت [14] و البته نقد جهانشاهلو و همکاران در سال ۲۰۱۰ توسط ژو و همکاران دوباره مورد نقد و بازبینی قرار گرفت. در پژوهشی مشابه سینگ در سال ۲۰۱۸ مفهوم منطقه اطمینان (AR^{11}) را در DEA برای محدود کردن نسبت هر دو وزن در مرزهای پایین و بالا مشخص شده بیان می‌کند تا بر نادیده‌گرفتن یا تکیه بیش از حد بر روی هر یک از ورودی‌ها و یا خروجی‌ها هنگام محاسبه بهره‌وری غلبه کند. در این تحقیق رویکرد فازی شهودی DEA/AR برای ارزیابی میزان اطمینان در جایی که داده‌های ورودی و خروجی به عنوان فازی شهودی می‌باشند ارائه شده‌اند [27].

وانگ و چانه در سال ۲۰۱۱ علاوه بر استفاده از معیارهای استفاده‌شده در مقاله شانگ و سوئیوشی از معیارهای هزینه‌های ساخت، تعداد کارکنان، مقدار خروجی ناخالص و کیفیت محصول استفاده کرده و مدل تحلیل پوششی داده‌های فازی با رویکرد ارزش مورد انتظار فازی با ورودی و خروجی‌های فازی جهت انتخاب یک FMS ارائه کردند [35]. در سال ۲۰۱۲ وانگ و لی نیز یک مدل تحلیل پوششی داده‌های فازی بر اساس شاخص مقدار متوسط وزنی (WAV^{12}) از اعداد فازی ارائه کردند و این مدل تحلیل پوششی داده‌های فازی پیشنهادی را برای ارزیابی عملکرد هشت FMS اعمال نمودند. آنها از معیارهای سرمایه و هزینه نگهداری، فضا، کاهش هزینه کار، کاهش کار در جریان، کاهش در هزینه راه‌اندازی، بهبود کیفیت و افزایش پاسخ بازار استفاده کرده‌اند [33].

تلوو در سال ۲۰۱۲ یک مدل DEA عدد صحیح مختلط برای یافتن کاراترین واحد تصمیم‌گیری ارائه کرد. اما ابراهیمی و رحمانی در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که این مدل ممکن است در بعضی موارد غیرقابل اجرا باشد و هنگامی که این مدل عملیاتی می‌شود ممکن است در شناسایی کاراترین DMU شکست بخورد. ایشان یک مدل بهبودیافته BCC برای یافتن کاراترین DMU طراحی کردند که اشکالات را برطرف می‌کند. همچنین الگوریتمی برای یافتن و رتبه‌بندی سایر DMU‌های کارا در صورت وجود بیش از یک DMU کارا با بازده BCC ارائه کردند و قابلیت و سودمندی مدل پیشنهادی خود را با استفاده از یک مجموعه از داده‌های واقعی شامل نوزده طرح تأسیساتی و دوازده FMS نشان دادند [9].

با توجه به اینکه DEA روشی برای اندازه‌گیری نسبی واحدهای تصمیم‌گیری است که محصولات مشابه تولید می‌کنند شوازی-پور در سال ۲۰۱۴ یک رویکرد جداگانه ترکیب‌شده DEA برای تجزیه و تحلیل عملکرد کلی کالاهای ذخیره‌نشده ارائه کرد. این مدل در ده شرکت سازنده خودرو بین‌شهری اجرایی شده است. این رویکرد با مشاهدات فازی توسعه و با یک مثال عددی ارائه و نشان داده شده است. معیارهای مد نظر ایشان در این تحقیق هزینه‌های عملیاتی، تعداد ماشین، گنجایش سوخت،

کل کارمندان، مسافت طی شده توسط خودرو و تعداد مسافران بوده است [26]. محققین زیادی به ابداع مدل‌های مختلفی پرداختن که در این میان سونگا و لیو نیز در سال ۲۰۱۶ مقاله‌ای تحت عنوان «بهبود تجمع متقابل کارایی DEA بر اساس آنتروپی شانون» ارائه کردند و برای نشان دادن اثربخشی روش پیشنهادی، یک مثال عددی را در مورد یک FMS که توسط دو و همکاران ارائه شده بود را دوباره مورد بررسی قرار دادند [29].

یک رویکرد دیگری از DEA در سال ۲۰۱۷ توسط ایگناسیو ایگوئا و همکاران برای ارزیابی کارایی فنی سیستم‌های تولید قابل تنظیم مجدد (RMS^{13}) با محک‌زدن تخصیص زمان مشاهده شده از پیکربندی‌های سیستم‌های متفاوت و ورودی‌های مصرف شده و خروجی‌های تولید شده در هر یک از آنها ارائه شده است. ورودی‌های در نظر گرفته شده که در مازول‌های مختلف RMS مورد استفاده قرار گرفته‌اند، نیروی کار و انرژی مصرفی بوده و خروجی‌ها تعداد واحدهای تولید شده است. نتیجه نشان داد که رویکرد پیشنهادی می‌تواند ناکارآمدی‌های سیستم را شناسایی و طبقه‌بندی کند و در نتیجه به افزایش کارایی کمک می‌کند [10].

کیانفر و همکاران در سال ۲۰۱۸ از روش برنامه‌نویسی چند منظوره برای حل مدل‌های $NDEA^{14}$ استفاده کرده‌اند. ایشان در ابتدا، مدل‌های تولید دو مرحله‌ای و سپس K مرحله‌ای را فرموله کردند. در این پژوهش در مقایسه با DEA معمولی، مزیت مدل‌های NDEA پیشنهادی با در نظر گرفتن فرآیندها و محصولات میانی به منظور محاسبه کارایی کلی سازمان بیان شده است [17]. همچنین واعظ و همکاران در سال ۲۰۲۱ یک شبکه سه مرحله‌ای را مورد بررسی قرار داده‌اند. این شبکه شامل یک پیشگام و دو دنبال‌کننده است. در این پژوهش چهار مدل متنوع از تحلیل پوششی داده‌ها برای اندازه‌گیری کارایی این شبکه سه مرحله‌ای در نظر گرفته شده است و در ادامه یک روش ابتکاری برای تبدیل مدل‌های غیرخطی به مدل‌های خطی پیشنهاد شده است [32].

سازمان‌های تولیدی که نیاز به پیاده‌سازی فن‌آوری‌های پیشرفته تولیدی مانند ربات‌های صنعتی، دستگاه‌های کنترل عددی رایانه‌ای، FMS، سیستم‌های حمل و نقل خودکار برای بدست آوردن قابلیت رقابت و افزایش توانایی‌های راهبردی دارند می‌توانند از مقالاتی مانند مقاله پیکانی و همکاران که رویکردهای برجسته برای دستیابی به عدم قطعیت‌ها در DEA را مورد بررسی قرار داده‌اند استفاده کنند. در مقاله ایشان مجموعه‌ای از مدل‌های DEA مبتنی بر سناریو و عدم قطعیت که شامل ۷۳ مورد مطالعاتی از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۹ می‌باشد بررسی شده است [21]. حسین‌زاده لطفی و همکاران نیز در سال ۲۰۲۰ در مقاله‌هایی تحت عنوان «یک روش پارامتری برای رتبه‌بندی اعداد فازی شهودی و کاربرد آن برای حل مدل‌های تحلیل پوششی داده‌های شبکه فازی شهودی» و «رویکرد تحلیل پوششی داده‌های ریاضی فازی برای مسئله حمل و نقل چندهدفه فازی» مدل‌هایی از تحلیل پوششی داده‌های فازی را مورد بررسی قرار دادند که رویکردهای این مقالات می‌تواند مورد استفاده در صنعت خودروسازی باشد [24] و [6]. مقدس و همکاران نیز در سال ۲۰۲۲ از مدل‌های تحلیل پوششی داده‌های معکوس برای تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترها و ارزیابی ریسک یک سیستم برای تغییرات در ورودی‌ها و خروجی‌ها استفاده کرده‌اند [39]. با توسعه این مدل نیز می‌توان برای ارزیابی ریسک FMS بهره برد. خاطر نشان می‌شود FMS بسیار در پژوهش‌ها از اوایل دهه ۱۹۷۰ مورد توجه بوده است. در طی سه دهه گذشته تعداد بسیاری از محققان با استفاده از تکنیک‌های ریاضی و مدل‌سازی به انتخاب و توجیه فن‌آوری‌های پیشرفته تولید پرداخته‌اند. خوانندگان علاقه‌مند برای درک تاریخچه جامع به طور عمده باید بر روی آثار منتشر شده در پس از سال‌های ۱۹۹۰ توجه داشته باشند.

۴. روش‌شناسی تحقیق و مدل‌سازی

این تحقیق از آنجا که مورد نیاز صنایع تولیدی دنیای خودروسازی می‌باشد یک تحقیق کاربردی توسعه‌ای است و در صورت استقبال صاحبان صنایع و با در نظر گرفتن معیارهای صنعت مد نظر ایشان می‌تواند یک تحقیق عملی نیز باشد. تحقیق حاضر

در نظر دارد به ارزیابی عملکرد FMS شرکت‌های تولیدکننده بلوک سیلندر خودرو تیا با استفاده از مدل‌سازی DEA و رتبه‌بندی این نوع سیستم‌ها با روش BWM بپردازد.

شناسایی کامل ورودی‌ها و خروجی‌های FMS به دلیل اینکه شاخص‌های عملکردی در این سیستم‌ها پیچیده هستند، سخت و همچنین اندازه‌گیری این معیارها نیز دشوار می‌باشد. برای ارزیابی عملکردی هرچه بهتر FMS، توجه به معیارها و شاخص‌های جامع و تأثیرگذار در FMS ضروری می‌باشد. این معیارها از نظر ماهیت کمی و کیفی بوده و داده‌ها به صورت میدانی توصیفی جمع‌آوری شده‌اند. معیارهای عملکردی با استفاده از نظریه داده‌بنیاد و مصاحبه با نخبگان صنعت استخراج گردیده است. تحقیقات انجام‌شده ما را به ۲۴ معیار اولیه رساند. برای غربال‌سازی این معیارها از روش دلفی سه مرحله‌ای استفاده شده است. در مرحله اول با مصاحبه حضوری با ۱۵ خبره علم مهندسی صنایع، مهندسی مکانیک، مهندسی معدن، مهندسی صنایع چوب و کاغذ، کارآفرینی و صنعت تولید، ورودی و خروجی بودن معیارها و میزان اهمیت آنها مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله دوم و پس از حدود ۱۵ روز مجدداً نظرات خبرگان اخذ گردید و تعدادی از این معیارهای کم تأثیرتر حذف گردید که جدول ۱ بیانگر معیارهای اولیه و معیارهای حذف گردیده می‌باشد. این کار دوباره در زمان سوم که تقریباً صرف زمان حدود ۱۵ روز دیگر بود انجام شد و نظرات خبرگان منجر به حصول ۱۵ معیار با اعتبار بیشتر شد. جدول ۲ بیانگر معیارهای نهایی، میانگین میزان اهمیت هر معیار و ورودی و خروجی بودن معیارها مطابق نظر خبرگان می‌باشد.

جدول ۱: معیارهای اولیه شناسایی شده تشکیل‌دهنده FMS

ردیف	معیارهای اولیه شناسایی شده	مراحل دلفی سه مرحله‌ای	ردیف	معیارهای تأثیرگذارتر نسبت به مرحله اول	مراحل دلفی سه مرحله‌ای
۱	میزان سرعت تولید در هر مرحله	۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ ۱۱ ۱۲ ۱۳ ۱۴ ۱۵ ۱۶ ۱۷ ۱۸	۱	میزان سرعت تولید در هر مرحله	۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ ۱۱ ۱۲ ۱۳ ۱۴ ۱۵ ۱۶ ۱۷ ۱۸
۲	میزان خودکار بودن		۲	میزان خودکار بودن	
۳	پیوستگی ایستگاه کاری		۳	مدرن بودن تجهیزات	
۴	سیستم ذخیره مواد و محصولات		۴	نوع قطعات تولیدی	
۵	مدرن بودن تجهیزات		۵	نظارت بر عملکرد سیستم و گزارش‌گیری	
۶	نوع قطعات تولیدی		۶	سرمایه‌گذاری	
۷	نظارت بر عملکرد سیستم و گزارش‌گیری		۷	زمان تولید	
۸	سرمایه‌گذاری		۸	طرح‌ریزی خطوط تولیدی	
۹	زمان تولید		۹	وجود کارگران چندمهارته	
۱۰	طرح‌ریزی خطوط تولید		۱۰	گردش خودکار قطعه‌کار در خط تولید	
۱۱	بارگیری و تخلیه قطعات		۱۱	تولید در دسته‌های کوچکتر	
۱۲	شرایط اقتصادی کسب و کار		۱۲	میزان ارتباط و دخالت انسان	
۱۳	وجود کارگران چندمهارته		۱۳	خودکار بودن بازرسی	
۱۴	گردش خودکار قطعه‌کار در خط تولید		۱۴	سلول ساخت	
۱۵	تولید در دسته‌های کوچکتر		۱۵	فناوری گروهی	
۱۶	میزان ارتباط و دخالت انسان		۱۶	سیستم نرم‌افزار	
۱۷	خودکار بودن بازرسی		۱۷	سیستم سخت‌افزار و عملکرد عمومی	
۱۸	سلول ساخت		۱۸	کیفیت قطعات تولیدشده	
۱۹	فناوری گروهی	۱۹ ۲۰ ۲۱ ۲۲ ۲۳ ۲۴	۱۹	فناوری گروهی	
۲۰	ابزارهای برش و مدیریت ابزار		۲۰	سیستم نرم‌افزار	
۲۱	سیستم نرم‌افزار		۲۱	سیستم سخت‌افزار و عملکرد عمومی	
۲۲	سیستم سخت‌افزار و عملکرد عمومی		۲۲	کیفیت قطعات تولیدشده	
۲۳	کیفیت قطعات تولیدشده		۲۳	فضای مورد نیاز	
۲۴	فضای مورد نیاز		۲۴		

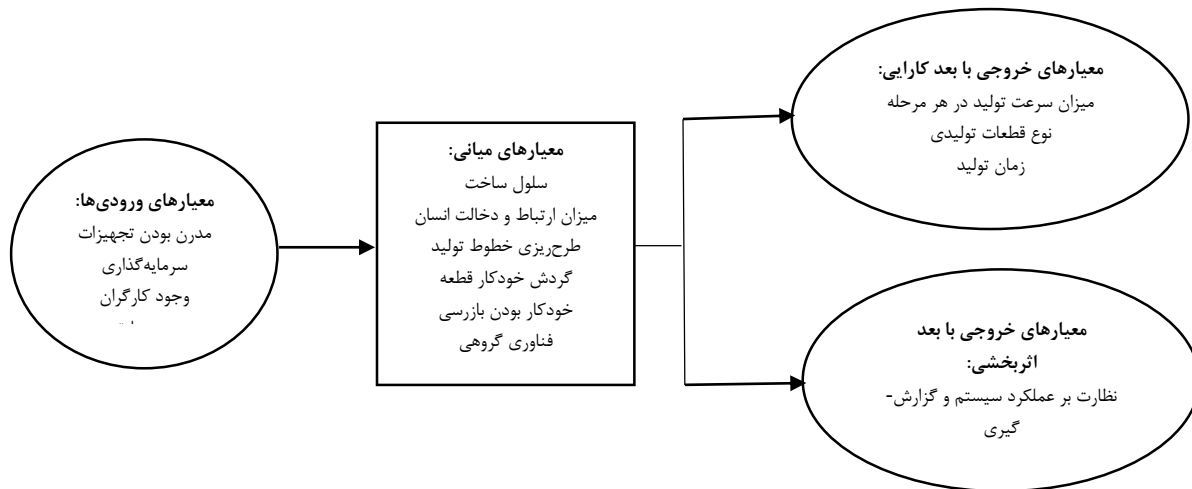
جدول ۲: معیارهای نهایی تشکیل‌دهنده FMS

ردیف	معیار	میانگین میزان اهمیت هر معیار	ورودی/خروجی
۱	میزان سرعت تولید در هر مرحله	۷/۴	خروجی
۲	مدیریت بودن تجهیزات	۷/۶۶۷	ورودی
۳	نوع قطعات تولیدی	۵/۸۶۷	خروجی
۴	نظارت بر عملکرد سیستم و گزارش‌گیری	۷/۶۶۷	خروجی
۵	سرمایه‌گذاری	۷/۲۶۷	ورودی
۶	زمان تولید	۷/۱۳۲	خروجی
۷	طرح‌ریزی خطوط تولیدی	۷/۲۶۷	ورودی
۸	وجود کارگران چندمهارته	۷/۰۶۷	ورودی
۹	گردش خودکار قطعه کار در خط تولید	۷/۶	ورودی
۱۰	تولید در دسته‌های کوچکتر	۶/۸۳۲	خروجی
۱۱	میزان ارتباط و دخالت انسان	۷/۷۳۲	ورودی
۱۲	خودکار بودن بازرسی	۷/۱۳۲	ورودی
۱۳	سلول ساخت	۷/۰۶۷	ورودی
۱۴	فناوری گروهی	۶/۶۶۷	ورودی
۱۵	کیفیت قطعات تولیدشده	۱۰	خروجی

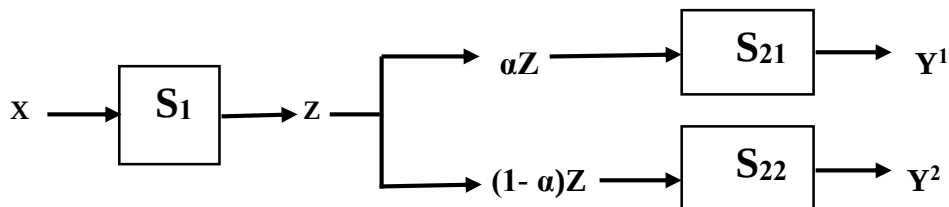
پس از بدست آوردن معیارهای FMS نسبت به تطابق معیارها با FMS خطوط مورد مطالعاتی که ۲۰ خط تولید ساخت بلوک سیلندر خودرو تیباً می‌باشد اقدام گردید. ورودی و خروجی بودن معیارهای نهایی با نظر خواهی از خبرگان دانشگاهی تعیین گردید که ورودی و خروجی بودن هر یک از معیارها در جدول ۲ آورده شد. پس از مشخص شدن ورودی و خروجی بودن معیارها، نسبت به تطابق معیارها در دنیای واقعی و با خطوط تولید ساخت بلوک سیلندر خودرو تیباً اقدام گردید و با مشاهدات میدانی و با نظر خواهی از خبرگان در صنعت و مسئولین ذیربط و آگاه در این خطوط تولید، مشخص شد که یک سری از ورودی‌ها، منجر به تولید خروجی‌هایی می‌شود که خروجی‌های نهایی سیستم نیستند، بلکه این خروجی‌ها، داده‌هایی میانی محسوب شده و به عنوان ورودی‌های مرحله دوم به کار می‌روند و منجر به تولید خروجی‌های نهایی می‌گردند. پس ساختار مناسب جهت ارزیابی عملکرد FMS این خطوط تولید، یک ساختار شبکه‌ای دومرحله‌ای می‌باشد. مرحله اول میزان انجام کار صورت گرفته در خط تولید و مرحله دوم میزان دستیابی به هدف FMS تعریف شده در خط تولید را نشان می‌دهد. در واقع این ساختار را می‌توان به صورت شکل ۳ نشان داد. به طور خلاصه می‌توان گفت با «معیارهای خروجی از بعد کارایی» به دنبال بالاترین کمیت به منظور استفاده بهینه از منابع و با «معیارهای خروجی از بعد اثربخشی» به دنبال بالاترین کیفیت به منظور جلب رضایت مشتری هستیم.

شکل ۴، شکل شماتیک این ساختار می‌باشد که در آن X, Z, Y^1 و Y^2 به ترتیب بیانگر معیارهای ورودی، معیارهای میانی، معیارهای خروجی با بعد کارایی و معیارهای خروجی با بعد اثربخشی می‌باشد و S_1, S_{21} و S_{22} به ترتیب اشاره به فضای بسط‌سازی تولید، کمیت تولید و کیفیت تولید دارد و α سهمی است که در کمیت تولید نقش دارد و $1 - \alpha$ سهمی است که در کیفیت تولید نقش دارد. حال برای محاسبه کارایی FMS خطوط ساخت بلوک سیلندر تیباً، مدل ۱ را با توجه به ساختار دومرحله‌ای FMS این خطوط بازنویسی و مدل ۲ را تدوین می‌کنیم.

$$\begin{aligned} \text{Max } \theta^a &= \text{Max } \frac{u^1 Y_p^1 + u^2 Y_p^2}{v X_p} \\ \text{s.t.} \\ \frac{w Z_j}{v X_j} &\leq 1, j = 1, 2, 3, \dots, n \\ \frac{u^1 Y_p^1}{w(\alpha * Z_p)} &\leq 1, j = 1, 2, 3, \dots, n \\ \frac{u^2 Y_p^2}{w((1-\alpha) * Z_p)} &\leq 1, j = 1, 2, 3, \dots, n \\ (u^1, u^2, v, w) &\geq 1\epsilon \\ 0 &\leq \alpha \leq 1 \end{aligned} \quad (2)$$



شکل ۳: ساختار شبکه‌ای خطوط تولید بلوک سیلندر خودرو تیبیا جهت ارزیابی عملکرد FMS



شکل ۴: ساختار شماتیک شبکه‌ای خطوط تولید مورد مطالعه جهت ارزیابی عملکرد FMS

در مدل ۲، Y^1 معیارهای خروجی از بعد کارایی، Y^2 معیارهای خروجی از بعد اثربخشی، Z_p معیارهای میانی، X_p معیارهای ورودی می باشد و u^1 ، u^2 و w به ترتیب وزن هر یک از این داده‌ها می باشد. هدف ما ماکسیمم کردن بهینگی می باشد و در جهت سهولت در حل، فرم خطی مدل ۲ را به صورت مدل ۳ می نویسیم.

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } u^1 Y_p^1 + u^2 Y_p^2 \\
 & \text{s.t} \\
 & v X_p = 1 \\
 & w Z_j - v X_j \leq 0, j = 1, 2, 3, \dots, n \\
 & u^1 Y_j^1 - w(\alpha * Z_j) \leq 0, j = 1, 2, 3, \dots, n \\
 & u^2 Y_j^2 - w((1-\alpha) * Z_j) \leq 0, j = 1, 2, 3, \dots, n \\
 & u^1, u^2, v, w \geq 1\epsilon \\
 & 0 \leq \alpha \leq 1
 \end{aligned} \quad (3)$$

و با استفاده از تغییر متغیر زیر، مدل را بازنویسی می کنیم.

$$\begin{aligned}
 & W_t \cdot \alpha_t = \bar{w}_t \\
 & 0 \leq \alpha_t \leq 1 \Rightarrow 0 \leq W_t \cdot \alpha_t \leq w_t \Rightarrow 0 \leq \bar{w}_t \leq w_t
 \end{aligned}$$

و مدل ۴ را بدست می آوریم. از آنجا که می خواهیم محدودیت‌ها روی مختصات نقطه الگو قرار گیرد فرم پوششی مدل ۴ را با فرض اینکه وزن‌ها در مدل ۴ نامنفی هستند را نوشته و مدل ۵ را بدست می آوریم.

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } u^1 Y_p^1 + u^2 Y_p^2 \\
 & \text{s.t} \\
 & v X_p = 1 \\
 & w Z_j - v X_j \leq 0, j = 1, 2, 3, \dots, n \\
 & u^1 Y_j^1 - \bar{w} Z_j \leq 0, j = 1, 2, 3, \dots, n \\
 & u^2 Y_j^2 - w Z_j + \bar{w} Z_j \leq 0, j = 1, 2, 3, \dots, n \\
 & \bar{w} - w \leq 0 \\
 & u^1, u^2, v, w \geq 1\epsilon \\
 & \bar{w} \geq 0
 \end{aligned} \quad (4)$$

Min θ

s.t

$$\theta X_p - \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_j \geq 0$$

محدودیت مربوط به معیارهای «ورودی»

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_j - \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 Z_j - \mu_t \geq 0$$

محدودیت مربوط به معیارهای «میانی»

$$-\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 Z_j + \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 Z_j + \mu_t \geq 0 \quad (5)$$

محدودیت مربوط به «تغییر متغیر»

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 Y_j^1 \geq Y_p^1$$

محدودیت مربوط به معیارهای «خروجی از بعد کارایی»

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 Y_j^2 \geq Y_p^2$$

محدودیت مربوط به معیارهای «خروجی از بعد اثربخشی»

$$\lambda^1, \lambda^2, \lambda^3, \mu_t \geq 0$$

حال دو محدودیت مربوط به معیارهای «میانی» و «تغییر متغیر» را ادغام کرده و مدل نهایی ساختار شبکه‌ای دومرحله‌ای خطوط تولید بلوک سیلندر تیباً مطابق مدل ۶ را بیان می‌کنیم و محدودیت‌های تأثیرگذار در FMS را نیز می‌آوریم که شامل ۲۶ محدودیت می‌باشد که ۱۰ محدودیت مربوط به شاخص‌های کمی و ۱۶ محدودیت مربوط به شاخص‌های کیفی هستند که در جدول ۳ به تشریح هر یک از این محدودیت‌ها می‌پردازیم.

با این مدل ریاضی می‌توان به ارزیابی علمی کارایی FMS خطوط تولید بلوک سیلندر پرداخت. θ نمایانگر کارایی کل DMUها توسط مدل تحلیل پوششی داده‌ها است. اگر $\theta = 1$ باشد آنگاه DMUها کارا و اگر $\theta < 1$ باشد، در این صورت DMUها ناکارا می‌باشند. در بخش بعد مدل توسعه‌یافته را با یک مثال کاربردی اجرا نموده و به تجزیه و تحلیل آماری نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد خطوط FMS مورد مطالعاتی می‌پردازیم. در این مدل λ ها سهم هر DMUز در محاسبه کارایی DMUp را نشان می‌دهند. این λ ها در مجموعه مراجع (RS^{۱۵}) هستند که برای بهتر و کارا شدن می‌توان از اعضا این مجموعه مراجع الگوبرداری کرد و به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$RS_p^{s1} = \{DMU_j \mid \lambda_j^{1*} \geq 0 \text{ in model 6}\}$$

مجموعه مرجع مرحله اول DMUp

$$RS_p^{s2} = \{DMU_j \mid \lambda_j^{2*} \geq 0 \text{ in model 6}\}$$

مجموعه مرجع مرحله دوم DMUp

$$RS_p^{s3} = \{DMU_j \mid \lambda_j^{3*} \geq 0 \text{ in model 6}\}$$

مجموعه مرجع مرحله سوم DMUp

Min θ

s.t

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_j \leq \theta X_p \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 Y_j^1 \geq Y_p^1 \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 Y_j^2 \geq Y_p^2 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_j \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^2 Z_j \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_{1j} \geq 1960 \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_{2j} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_{1j} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_{3j} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_{2j} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_{5j} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 X_{6j} \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{1j} \leq 7 \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{1j} \geq 1 \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{2j} \leq 7 \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{2j} \geq 1 \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{3j} \geq 1 \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{4j} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{3j} \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{5j} \geq 1 \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{5j} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{6j} \quad (16) \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{7j} \leq 7 \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{7j} \geq 1 \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{8j} \leq 7 \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{8j} \geq 1 \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{9j} \leq 7 \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 Z_{9j} \geq 1 \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 Y_{2j}^1 \geq 1 \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 Y_{1j}^2 \leq 7 \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 Y_{1j}^2 \geq 1 \quad (25)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 Y_{2j}^2 \geq 1 \quad (26)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 Y_{3j}^2 \leq 7 \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 Y_{3j}^2 \geq 1 \quad (28)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 Y_{4j}^2 \leq 7 \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 Y_{4j}^2 \geq 1 \quad (30)$$

$$\lambda^1, \lambda^2, \lambda^3, \mu_t \geq 0$$

محدودیت‌های شماره ۱ تا ۴ جدول ۳ حالت کلی محدودیت‌های مربوط به معیارهای ورودی، میانی و خروجی می‌باشد و در هر یک از آنها صدق می‌کند ولی محدودیت‌های شماره ۵ تا ۳۰ فقط به محدودیت معیار مختص به خود صدق می‌کند. برای درک بهتر این ساختار هر یک از معیارها تعریف شده است.

معیارهای ورودی:

- «مدرن بودن تجهیزات» اشاره به سه شاخص سال ساخت، سال خرید و سال شروع به کار تجهیزات در خط FMS دارد که به ترتیب با X_{1j} , X_{2j} و X_{3j} نشان داده می‌شود که همگی داده‌های کمی می‌باشند.
- «سرمایه‌گذاری» اشاره به هزینه راه‌اندازی خط FMS دارد که با X_{4j} نشان داده می‌شود و یک داده کمی می‌باشد.
- «وجود کارگران چندمهارته» اشاره به دو شاخص تعداد کل کارگران و تعداد کارگران چندمهارته دارد که به ترتیب با X_{5j} و X_{6j} نشان داده می‌شود و هر دو جز داده‌های کمی می‌باشند.

معیارهای میانی:

- «سلول ساخت» اشاره به توانایی ایجاد کارگاه‌های کوچک در مواقع ضروری در کارخانه اصلی دارد که با Z_{1j} نشان داده می‌شود و یک داده کیفی می‌باشد.
- «میزان ارتباط و دخالت انسان» اشاره به میزان دخالت مستقیم اپراتور در تولید قطعه دارد و با Z_{2j} نشان داده می‌شود و یک داده کیفی می‌باشد.
- «طرح‌ریزی خطوط تولید» اشاره به تنوع و تعداد محصول دارد و به ترتیب با Z_{3j} و Z_{4j} نشان داده می‌شود و هر دو جز داده‌های کمی می‌باشند.
- «گردش خودکار قطعه» اشاره به تعداد دستگاه‌های موجود، تعداد دستگاه‌های اتوماتیک و میزان گردش خودکار قطعه بین تجهیزات دارد که به ترتیب با Z_{5j} , Z_{6j} و Z_{7j} نشان داده می‌شود و Z_{5j} و Z_{6j} جز داده‌های کمی و Z_{7j} جز داده‌های کیفی می‌باشند.
- «خودکار بودن بازرسی» اشاره به بازرسی قطعه بدون دخالت اپراتور دارد و با Z_{8j} نشان داده می‌شود و یک داده کیفی می‌باشد.
- «فناوری گروهی» اشاره به توانایی در ساخت بلوک سیلندرهای خودروهای دیگر با تجهیزات موجود دارد و با Z_{9j} نشان داده می‌شود و یک داده کیفی می‌باشد.

معیارهای خروجی از بعد کارایی:

- «میزان سرعت تولید در هر مرحله» اشاره به میزان زمان ساخت قطعه در خط تولید دارد و با Y_{1j}^1 نشان داده می‌شود و یک داده کمی می‌باشد.

● «نوع قطعات تولیدی» اشاره به این دارد که در حال حاضر با این خط تولید چند نوع قطعه ساخته می‌شود و با Y_{2j}^1 نشان داده می‌شود و یک داده کمی می‌باشد.

● «زمان تولید» اشاره به تعداد تولید در طول شیفت کاری روزانه دارد و با Y_{3j}^1 نشان داده می‌شود و یک داده کمی می‌باشد.

معیارهای خروجی از بعد اثربخشی:

● «نظارت بر عملکرد سیستم و گزارش‌گیری» بیانگر میزان نظارت بر FMS بوده و با Y_{1j}^2 نشان داده می‌شود و یک داده کیفی است.

● «تولید در دسته‌های کوچکتر» اشاره به دو شاخص تعداد کالا در هر بسته‌بندی و میزان انعطاف‌پذیری در تعداد بسته‌بندی دارد و به ترتیب با Y_{2j}^2 و Y_{3j}^2 نشان داده می‌شود و Y_{2j}^2 یک داده کمی و Y_{3j}^2 یک داده کیفی می‌باشد.

● «کیفیت قطعات تولیدشده» اشاره به کیفیت قطعه پس از تولید دارد و با Y_{4j}^2 نشان داده می‌شود و یک داده کیفی می‌باشد. لازم به ذکر است برای جمع‌آوری داده‌های کیفی از مقیاس لیکرت با ۷ درجه آزادی استفاده شده است.

جدول ۳: شرح محدودیت‌های مدل تحقیق

شماره محدودیت	شرح محدودیت	نوع محدودیت
۱	این محدودیت مربوط به معیارهای ورودی می‌باشد.	-
۲	این محدودیت مربوط به معیارهای خروجی از بعد کارایی می‌باشد.	-
۳	این محدودیت مربوط به معیارهای خروجی از بعد اثربخشی می‌باشد.	-
۴	این محدودیت مربوط به معیارهای میانی می‌باشد.	-
۵	این محدودیت اشاره به سال ساخت تجهیزات داشته و از آنجا که بحث FMS در پس از سال ۱۹۶۰ بیان شد این محدودیت را بزرگتر یا برابر ۱۹۶۰ میلادی در نظر گرفتیم.	کمی
۶	این محدودیت اشاره به سال خرید تجهیزات دارد که خریداری تجهیزات همان سال ساخت یا بعد از سال ساخت تجهیزات می‌باشد.	کمی
۷	این محدودیت اشاره به سال شروع به کار تجهیزات دارد که شروع به کار تجهیزات همان سال خرید یا بعد از سال خرید تجهیزات می‌باشد.	کمی
۸	این محدودیت بیانگر تعداد کارگران می‌باشد که تعداد کل کارگران بیشتر یا برابر تعداد کارگران چندمهارته آن شرکت می‌باشد.	کمی
۹	این دو محدودیت اشاره به توانایی ایجاد کارگاه‌های کوچک در کارخانه مادر دارد و این محدودیت‌ها با توجه به مقیاس لیکرت با ۷ درجه آزادی تعریف شده‌اند.	کیفی
۱۰		
۱۱	این دو محدودیت میزان دخالت مستقیم اپراتورها در فرآیند ساخت را نشان می‌دهد و این محدودیت‌ها با توجه به مقیاس لیکرت با ۷ درجه آزادی تعریف شده‌اند.	کیفی
۱۲		
۱۳	این محدودیت به تنوع محصول اشاره دارد که حداقل یک نوع محصول در خطوط تولید مورد مطالعه تولید می‌شود.	کمی
۱۴	این محدودیت بیانگر این است که تعداد محصولات تولیدشده از تعدد تنوع محصولات بزرگتر یا برابر می‌باشد.	کمی
۱۵	این محدودیت به تعداد دستگاه‌های موجود در خط تولید اشاره دارد که حداقل یک دستگاه در خط تولید وجود دارد.	کمی
۱۶	این محدودیت به این موضوع اشاره دارد که تعداد دستگاه‌های اتوماتیک در خط تولید برابر یا کمتر از تعداد دستگاه‌های موجود است.	کمی
۱۷	این دو محدودیت میزان گردش خودکار قطعه‌کار در خط تولید را نشان می‌دهد که این محدودیت‌ها با توجه به مقیاس لیکرت با ۷ درجه آزادی تعریف شده‌اند.	کیفی
۱۸		
۱۹	این دو محدودیت اشاره به میزان بازرسی قطعات بدون دخالت اپراتور دارد که این محدودیت‌ها با توجه به مقیاس لیکرت با ۷ درجه آزادی تعریف شده‌اند.	کیفی
۲۰		
۲۱	این دو محدودیت اشاره به توانایی ساخت بلوک سیلندرهای خودروهای غیر از خودرو تیبیا دارد و این محدودیت‌ها با توجه به مقیاس لیکرت با ۷ درجه آزادی تعریف شده‌اند.	کیفی
۲۲		
۲۳	این محدودیت اشاره به این دارد که در خط تولید فعلی حداقل یک نوع قطعه در حال ساخت می‌باشد.	کمی
۲۴	این دو محدودیت بیانگر میزان نظارت بر عملکرد و گزارش‌گیری از سیستم می‌باشد که این محدودیت‌ها با توجه به مقیاس لیکرت با ۷ درجه آزادی تعریف شده‌اند.	کیفی
۲۵		
۲۶	این محدودیت بیانگر این است که در هر بسته‌بندی آماده‌شده قطعات جهت خروج از کارخانه حداقل یک قطعه ساخته‌شده وجود دارد.	کمی
۲۷	این دو محدودیت بیانگر میزان انعطاف‌پذیری در حجم بسته‌بندی قطعات جهت خروج از کارخانه از لحاظ تعداد قطعات ساخته‌شده می‌باشد. این محدودیت‌ها با توجه به مقیاس لیکرت با ۷ درجه آزادی تعریف شده‌اند.	کیفی
۲۸		
۲۹	این دو محدودیت بیانگر کیفیت قطعات تولیدشده می‌باشد و این محدودیت‌ها با توجه به مقیاس لیکرت با ۷ درجه آزادی تعریف شده‌اند.	کیفی
۳۰		

۴. تحلیل داده‌ها

مدل ۶ در نرم‌افزار GAMS برنامه‌نویسی و با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده اجرا شد. برای جمع‌آوری داده‌های کمی و کیفی با مسئولین ذیربط و آگاه به خطوط تولید مورد مطالعه مصاحبه و هر یک از معیارها برای ایشان شرح داده شد و سپس داده مربوط به هر از معیارها از ایشان اخذ گردید. داده‌های مربوط به معیارهای ورودی که شامل سال ساخت، سال خرید و سال شروع به کار تجهیزات، میزان سرمایه‌گذاری، تعداد کل کارگران و همچنین تعداد کارگران چندمهارته می‌باشد در جدول ۴ آورده شده است. جدول ۵ حاوی داده‌های مربوط به معیارهای میانی شامل سلول ساخت، میزان ارتباط و دخالت انسان، تنوع و تعداد محصولات تولیدشده، تعداد کل دستگاه‌های موجود و دستگاه‌های اتوماتیک، میزان گردش خودکار، میزان خودکار بودن بازرسی و میزان فناوری گروهی می‌باشد. همانطور که قبلاً ذکر گردید معیارهای سلول ساخت، میزان ارتباط و دخالت انسان، میزان گردش خودکار قطعه‌کار بین تجهیزات، خودکار بودن بازرسی و فناوری گروهی، داده‌های کیفی بوده و بنا بر وضعیت موجود در خط تولید به آنها اعداد ۱ تا ۷ اختصاص داده شده است. داده‌های مربوط به معیارهای خروجی با بعد کارایی شامل میزان سرعت تولید در هر مرحله، نوع قطعات تولیدی و زمان تولید می‌باشد که در جدول ۶ آورده شده است. جدول ۷ شامل داده‌های مربوط به معیارهای خروجی با بعد اثربخشی شامل نظارت بر عملکرد سیستم و گزارش‌گیری، تعداد کالا در هر بسته‌بندی، میزان انعطاف‌پذیری در تعداد بسته‌بندی و کیفیت قطعات تولیدشده می‌باشد. از آنجا که معیارهای نظارت بر عملکرد سیستم و گزارش‌گیری، میزان انعطاف‌پذیری در تعداد بسته‌بندی و کیفیت قطعات تولیدشده، داده‌های کیفی می‌باشد، بسته به شرایط موجود تولیدکننده‌ها به این معیارها اعداد ۱ تا ۷ تخصیص داده شده است. با اجرای مدل در نرم‌افزار با داده‌های گردآوری‌شده، میزان عملکرد FMS هر یک از تولیدکننده‌ها بدست می‌آید. میزان عملکرد در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۴: داده‌های معیارهای ورودی

معیارهای ورودی						
داده‌های ورودی						شماره تولیدکننده
وجود کارگران چندمهارته (نفر)		سرمایه‌گذاری (تومان)	مدرن بودن تجهیزات (میلادی)			
تعداد کارگران چندمهارته	تعداد کل کارگران		سال ساخت	سال خرید	سال شروع به کار	
۱۰	۵۲	۱۹۵۳۷۵۰۰۰۰۰۰	۱۹۹۹	۱۹۹۹	۱۹۹۹	۱
۷	۱۱	۱۸۷۱۳۱۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۴	۲۰۰۴	۱۹۹۹	۲
۲۶	۸۶	۲۷۵۰۰۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۵	۲۰۰۵	۲۰۰۴	۳
۱۵	۸۰	۷۱۲۸۱۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۵	۲۰۰۴	۲۰۰۲	۴
۱۸	۵۴	۹۱۲۶۲۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۲	۲۰۰۲	۱۹۹۹	۵
۲۳	۸۴	۱۶۴۹۰۲۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۵	۲۰۰۲	۲۰۰۲	۶
۱۷	۳۸	۱۵۱۲۳۱۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۷
۲۲	۸۶	۱۵۲۸۷۰۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۴	۲۰۰۳	۲۰۰۱	۸
۲۳	۸۰	۱۹۳۷۹۳۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۱	۱۹۹۹	۱۹۹۹	۹
۱۷	۳۶	۱۵۴۳۶۲۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۵	۲۰۰۴	۲۰۰۰	۱۰
۱۰	۶۸	۱۷۶۳۹۲۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۲	۱۹۹۹	۱۹۹۹	۱۱
۲۳	۷۳	۶۴۵۸۴۰۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۲	۲۰۰۱	۲۰۰۱	۱۲
۱۸	۶۴	۲۷۵۲۸۰۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۳	۱۹۹۹	۱۹۹۹	۱۳
۹	۴۸	۳۳۸۲۱۰۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۵	۲۰۰۳	۲۰۰۳	۱۴
۷	۶۵	۸۲۱۸۸۰۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۵	۲۰۰۵	۲۰۰۱	۱۵
۱۸	۱۹	۱۷۰۳۳۷۰۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۳	۱۹۹۹	۱۹۹۹	۱۶
۲۰	۴۸	۵۵۴۷۲۰۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۴	۲۰۰۴	۲۰۰۱	۱۷
۲۱	۲۸	۱۸۶۱۹۵۰۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۱	۱۹۹۹	۱۹۹۹	۱۸
۱۷	۳۴	۱۷۷۸۵۰۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۵	۲۰۰۴	۲۰۰۰	۱۹
۱۰	۸۶	۱۷۵۷۵۰۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۴	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰

جدول ۵: داده‌های معیارهای میانی

معیارهای میانی									
داده‌های میانی									شماره تولید کننده
فناوری گروهی	خودکاربودن بازرسی	گردش خودکار قطعه			طرح‌ریزی خطوط تولید		میزان ارتباط و دخالت انسان	سلول ساخت	
		میزان گردش خودکار	تعداد دستگاه‌های اتوماتیک	تعداد دستگاه‌های موجود	تعداد محصول	تنوع محصول			
۶	۱	۱	۲۰	۲۵	۴۰۰	۱۴	۴	۵	۱
۷	۴	۷	۷۵	۷۵	۸۰۰	۵	۱	۱	۲
۷	۱	۴	۱۲	۴۲	۳۶۰	۹	۶	۷	۳
۷	۴	۱	۳۷	۵۲	۱۰۰	۴	۶	۴	۴
۷	۳	۲	۵۳	۶۰	۱۰۱	۱۳	۴	۲	۵
۷	۳	۴	۳۴	۴۴	۱۲۳	۴	۵	۳	۶
۶	۲	۷	۳۵	۷۴	۳۵۷	۱۱	۵	۱	۷
۷	۱	۶	۴۰	۵۰	۲۴۳	۴	۲	۳	۸
۷	۳	۱	۱۸	۵۴	۱۳۸	۷	۴	۶	۹
۶	۴	۵	۱۴	۴۹	۲۱۱	۷	۳	۲	۱۰
۷	۴	۴	۴۹	۵۴	۷۲۰	۴	۶	۵	۱۱
۶	۱	۷	۱۷	۵۱	۵۶۳	۴	۶	۳	۱۲
۷	۴	۵	۳۵	۶۵	۱۴۶	۷	۵	۵	۱۳
۷	۳	۲	۵۰	۶۱	۷۹۰	۱۰	۴	۳	۱۴
۶	۲	۷	۲۸	۴۵	۴۰۸	۸	۳	۷	۱۵
۶	۳	۳	۴۲	۴۵	۴۴۴	۴	۲	۷	۱۶
۷	۱	۱	۳۵	۶۷	۷۹۸	۴	۲	۳	۱۷
۷	۱	۶	۱۴	۴۴	۶۶۵	۵	۶	۵	۱۸
۶	۴	۴	۱۵	۵۰	۲۱۲	۷	۳	۱	۱۹
۷	۲	۲	۵۱	۷۳	۲۴۷	۸	۶	۲	۲۰

جدول ۶: داده‌های معیارهای خروجی با بعد کارایی

معیارهای خروجی با بعد کارایی			
داده‌های خروجی با بعد کارایی			شماره تولید کننده
زمان تولید (تعداد در ۲۴ ساعت)	نوع قطعات تولیدی	میزان سرعت تولید در هر مرحله (ثانیه)	
۱۷۰	۳	۱۲۰	۱
۹۶۰	۱	۹۰	۲
۶۰۴	۱	۵۹	۳
۷۲۰	۱	۱۲۰	۴
۵۶۳	۳	۱۱۸	۵
۴۷۸	۱	۶۱	۶
۵۵۵	۳	۹۵	۷
۶۳۳	۱	۱۱۷	۸
۸۵۹	۳	۶۶	۹
۱۸۸	۲	۱۱۶	۱۰
۲۴۵	۲	۱۰۰	۱۱
۱۷۸	۱	۶۶	۱۲
۶۵۶	۲	۸۹	۱۳
۱۷۲	۱	۷۹	۱۴
۱۷۰	۲	۱۰۱	۱۵
۵۴۸	۳	۱۱۰	۱۶
۲۷۸	۱	۸۷	۱۷
۴۱۲	۲	۶۳	۱۸
۹۳۱	۲	۹۵	۱۹
۸۳۰	۱	۹۳	۲۰

جدول ۷: داده‌های معیارهای خروجی با بعد اثربخشی

معیارهای خروجی با بعد اثربخشی				
شماره تولیدکننده	داده‌های خروجی با بعد اثربخشی			کیفیت قطعات تولیدشده
	تولید در دسته‌های کوچکتر		نظارت بر عملکرد سیستم و گزارش‌گیری	
	میزان انعطاف‌پذیری در تعداد بسته‌بندی	تعداد کالا در هر بسته‌بندی		
۱	۷	۶۰	۳	۷
۲	۴	۴۸	۷	۳
۳	۵	۱۶	۶	۵
۴	۴	۴۸	۴	۶
۵	۷	۵۷	۳	۶
۶	۷	۳۱	۳	۶
۷	۵	۴۶	۳	۶
۸	۵	۱۶	۷	۷
۹	۷	۴۴	۳	۷
۱۰	۵	۶۰	۳	۶
۱۱	۴	۵۲	۶	۴
۱۲	۷	۵۹	۵	۶
۱۳	۵	۳۰	۷	۴
۱۴	۵	۵۷	۵	۳
۱۵	۴	۳۳	۴	۷
۱۶	۴	۶۰	۷	۴
۱۷	۷	۶۰	۳	۷
۱۸	۴	۴۸	۷	۳
۱۹	۵	۱۶	۶	۵
۲۰	۴	۴۸	۴	۶

جدول ۸: میزان عملکرد تولیدکننده‌ها

شماره تولیدکننده	میزان عملکرد تولیدکننده
۱	۱
۲	۱
۳	۰/۹۷۸۱۵۴
۴	۰/۹۷۹۰۲۱
۵	۰/۹۸۰۵۴۹
۶	۰/۹۷۹۰۲۱
۷	۰/۹۸۰۷۳۶
۸	۰/۹۷۹۵۱
۹	۱
۱۰	۰/۹۸
۱۱	۰/۹۸۰۴۹
۱۲	۰/۹۷۹۵۱۳
۱۳	۰/۹۸۰۴۹
۱۴	۰/۹۷۸۵۳۲
۱۵	۰/۹۷۹۵۱
۱۶	۱
۱۷	۰/۹۷۹۵۱
۱۸	۰/۹۸۰۵۰۲
۱۹	۰/۹۸
۲۰	۰/۹۸

همانطور که از جدول ۸ مشخص است فقط تولیدکننده‌های شماره ۱، ۲، ۹ و ۱۶ کارا هستند و مابقی تولیدکننده‌ها ناکارا هستند. در انتها با روش FMS، BWM هر یک از خطوط تولید کارا بلوک سیلندر تیباً رتبه‌بندی می‌شود تا بهترین FMS مشخص شود. بر اساس روش BWM بهترین (در این تحقیق مهمترین) و بدترین (در این تحقیق کم‌اهمیت‌ترین) معیارها ابتدا توسط تصمیم‌گیرنده مشخص می‌شود. سپس مقایسه‌های زوجی بین هر یک از این دو معیار (بهترین و بدترین) و معیارهای دیگر انجام می‌شود. بعد یک مسئله حداکثر برای تعیین وزن معیارهای مختلف فرموله و حل می‌شود. وزن گزینه‌ها با توجه به معیارهای مختلف با استفاده از همان فرآیند بدست می‌آید. نمرات نهایی گزینه‌ها از طریق جمع‌آوری وزن از مجموعه معیارها و گزینه‌های مختلف حاصل می‌شود که بر اساس آنها بهترین گزینه انتخاب می‌شود [22].

بر اساس جدول ۲، معیار شماره ۱۵ «کیفیت قطعه تولیدشده» با اهمیت‌ترین معیار و معیار شماره ۳ «نوع قطعات تولیدی» کم‌اهمیت‌ترین معیار می‌باشد. در جدول ۹ بردار با اهمیت‌ترین معیار نسبت به سایر معیارها (بردار BO) را تشکیل می‌دهیم. در واقع این جدول میزان ارجحیت کیفیت قطعات تولیدشده نسبت به ۱۴ معیار دیگر نشان می‌دهد. در جدول ۱۰ بردار کم‌اهمیت‌ترین معیار نسبت به سایر معیارها (بردار WO) را تشکیل می‌دهیم. در واقع این جدول میزان ارجحیت ۱۴ معیار را نسبت به معیار نوع قطعات تولیدی نشان می‌دهد. با استفاده از بردارهای BO و WO، وزن بهینه معیارها را بدست آورده و در جدول ۱۱ می‌آوریم. سپس با تأثیر این اوزان در داده‌های نرمال‌شده جداول ۴، ۵، ۶ و ۷، رتبه‌بندی FMS خطوط تولید به شرح جدول ۱۲ خواهد بود. همانطور که در جدول ۱۲ مشخص است FMS خط تولیدکننده شماره ۹ دارای بالاترین رتبه و FMS خط تولیدکننده شماره ۱۶ دارای پایین‌ترین رتبه می‌باشند.

جدول ۹: بردار BO

C15	۱
C14	۸/۵
C13	۷/۳۷۵
C12	۷/۲۵
C11	۵/۷۵
C10	۷/۵
C9	۶/۲۵
C8	۷/۳۷۵
C7	۷
C6	۷/۲۵
C5	۷
C4	۸/۵
C3	۹
C2	۶
C1	۶/۵
بردار BO	C15

جدول ۱۰: بردار WO

C15	۹
C14	۱/۷۵
C13	۲/۵
C12	۲/۷۵
C11	۴
C10	۲
C9	۳/۵
C8	۲/۵
C7	۳
C6	۲/۷۵
C5	۳
C4	۱/۷۵
C3	۱
C2	۲/۷۵
C1	۲/۲۵
بردار WO	C3

جدول ۱۱: وزن معیارها

W15	۰/۳۰۶۸۸۲
W14	۰/۰۴۱۱۳۹
W13	۰/۰۴۸۵۶۷
W12	۰/۰۴۴۴۰۴
W11	۰/۰۶۲۲۹۳
W10	۰/۰۴۷۷۵۸
W9	۰/۰۵۳۰۰۹
W8	۰/۰۴۸۵۶۷
W7	۰/۰۵۱۱۶۹
W6	۰/۰۴۹۳۰۴
W5	۰/۰۵۱۱۶۹
W4	۰/۰۴۱۱۳۹
W3	۰/۰۲۸۳۹۸
W2	۰/۰۵۹۶۹۷
W1	۰/۰۵۵۱۰۵
وزن معیارها	

جدول ۱۲: رتبه‌بندی FMS خطوط تولیدکننده‌های کارا

رتبه	میزان رتبه‌بندی با روش BWM	FMS
۲	۰/۰۷۱۴۴۷۳۵۱	FMS1
۳	۰/۰۶۸۳۳۶۹۵۸	FMS2
۱	۰/۰۷۵۳۵۳۲۶	FMS9
۴	۰/۰۶۶۹۴۵۸	FMS16

از FMS خط تولیدکننده شماره ۹ به عنوان بهترین FMS خطوط تولید این ۲۰ مورد مطالعاتی می‌توان الگوگیری کرد. تجهیزات به کار گرفته‌شده در این خط تولید در سال ۱۹۹۹ ساخته شده است و در همان سال با صرف سرمایه‌گذاری زیادی خریداری و در سال ۲۰۰۱ در شرکت راه‌اندازی شده است که شامل ۵۴ دستگاه می‌باشد که فقط ۱۸ دستگاه اتوماتیک می‌باشند. این یعنی گردش خودکار قطعه کار در دست تولید خیلی کم است. سرعت تولید در هر مرحله تولید ۶۶ ثانیه می‌باشد. در زمان مطالعه این تحقیق، تولیدکننده شماره ۹ سه نوع قطعه و به تعداد ۸۵۹ قطعه در ۲۴ ساعت تولید می‌کند. البته این خط تولید توانایی تولید ۷ نوع قطعه به تعداد حدود ۱۴۰ قطعه در روز را نیز دارا می‌باشد. تعداد کل اپراتورهای این خط تولید ۸۰ نفر می‌باشند که ۲۳ نفر از ایشان دارای چندین مهارت کاری می‌باشند. بلوک سیلندر ساخته‌شده توسط این تولیدکننده در بسته‌های ۴۴ تایی بسته‌بندی شده و تحویل صاحبان صنعت خودروسازی می‌گردد. میزان انعطاف‌پذیری در بسته‌بندی قطعات جهت ارسال به صاحبان صنایع خودرو از لحاظ گنجایش خیلی زیاد می‌باشد. میزان ارتباط و دخالت مستقیم اپراتور در FMS این خط تولید در حد متوسط و میزان خودکار بودن بازرسی نسبتاً کم می‌باشد. انعطاف‌پذیری این FMS در ایجاد کارگاه‌های کوچک در کارخانه در موقع لزوم زیاد و همچنین فناوری گروهی در این خط تولید بسیار بالا می‌باشد. با وجود سرعت و حجم بالای تولید و پایش نسبتاً کم خط تولید، سیلندرهای تولیدشده این FMS از کیفیت خیلی خوبی برخوردار است.

نوع چیدمان تجهیزات کارخانه شماره ۹ بسیار مشابه با نوع «گسترده در سطح کارگاه»^{۱۶} می‌باشد که یکی از انواع طرح‌ریزی FMS می‌باشد. سیستم دارای چیدمانی است که بارگیری و تخلیه معمولاً در ایستگاه‌های پایانی قرار داده شده است. قطعات کاری از ایستگاه‌های کاری ماشین‌های CNC، ماشین‌های اندازه‌گیری و ایستگاه‌های شستشو توسط پالت‌های طراحی‌شده به ایستگاه بعدی منتقل می‌شوند. مدیران ارشد این خط تولید با اتکا به تحقیقات انجام‌شده توسط کارشناسان FMS، تصمیم به سرمایه‌گذاری زیاد جهت خرید تجهیزات با تکنولوژی بالا گرفتند و طبق برآوردهای صورت‌گرفته، میزان تولید، تنوع تولید و قابلیت به‌روزشدن خط تولید در زمان کم متناسب با تقاضای بازار، سرمایه‌گذاری ابتدایی هزینه‌شده را جبران می‌نموده است. همانطور که اطلاعات جمع‌آوری‌شده نیز نشان می‌دهد در عین حال که این خط تولید سه نوع محصول را تولید می‌کند، دارای بلوک‌های سیلندر تولیدشده با کیفیت خوب و حجم تولید بالا نسبت به سایر خطوط تولید می‌باشد. در واقع برقراری ارتباط منطقی و عاقلانه بین سرمایه‌گذاری و صرفه‌جویی در زمان تولید و کیفیت مناسب محصولات تولیدشده، نتایج مثبتی برای این خط تولید دربرداشته است. از عواملی که FMS9 به عنوان کاراترین FMS خطوط تولید مورد مطالعاتی این تحقیق انتخاب شد می‌توان به شرایط مطلوب چهار معیار تنوع محصول، سول ساخت، زمان تولید و کیفیت اشاره نمود. زیرا این چهار معیار نیز از نظر خبرگان دانشگاهی در ارزیابی عملکرد خطوط تولید دارای اهمیت زیادی می‌باشند.

۵. نتیجه‌گیری

یکی از چالش‌های اساسی در مطالعات ارزیابی عملکرد FMS خطوط تولیدکننده قطعات خودرو، انتخاب مدل ارزیابی متناسب با معیارهای مورد نظر تصمیم‌گیرندگان است تا ضمن ارائه تصویری شفاف از عملکرد این واحدهای تصمیم‌گیری، میزان کارایی و اثربخشی اقدامات در دستیابی به اهداف راهبردی تولیدکنندگان، تأمین شود. توجه به انتخاب‌های اصلی ارزیابی به منظور بررسی جنبه‌های مختلف عملکردی و استفاده از یک مدل عملکردی، جامع و قابل اعتماد، ضرورت تعریف و طراحی مدل بهبودیافته با تمرکز بر شاخص‌های جامعی از معیارهای به کاررفته‌شده و همچنین استفاده نشده در تحقیقات پیشین را اجتناب‌ناپذیر می‌کند.

در این پژوهش علاوه بر توجه به معیارهای مطالعه‌شده در ارزیابی FMS در تحقیقات پیشین، معیارها و شاخص‌های عملکردی دیگری نیز شناسایی و به توسعه مدل علمی DEA پرداخته و با تطابق این معیارها با صنعت تولید قطعات خودرو به مدلی بهینه و کاربردی دست یافته شد. این مدل دارای ساختار شبکه دومرحله‌ای و داده‌های کمی و کیفی می‌باشد. با توجه به نظر خبرگان مشخص شد که «کیفیت قطعه تولیدشده» با اهمیت‌ترین معیار و «نوع قطعات تولیدی» کم‌اهمیت‌ترین معیار در جهت ارزیابی FMS خطوط تولید قطعات خودرو می‌باشند. بنابراین با بالا بردن کیفیت قطعات یک خودرو می‌توان رضایت مشتریان نهایی را تأمین و توجیه‌پذیری هر چه بیشتر سرمایه‌گذاری جهت اجرایی نمودن سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر در خطوط تولید را فراهم نمود. کارشناسان متخصص FMS شاغل در خطوط تولید اگر بتوانند با دلایل علمی بر مبنای اصول FMS، مدیران تصمیم‌گیر را متقاعد به صرف هزینه مناسب به منظور پیاده‌سازی سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر در کارخانه نمایند، مسلماً نتایج مثبت آن در آینده و با بروز تغییرات ناگزیر در صنعت خودروسازی و سفارشی‌سازی تولیدات خودروها قابل مشاهده خواهد بود. البته فقط توجه به سرمایه‌گذاری و خرید تجهیزات مدرن به تنهایی گره‌گشا نیست و باید به علم‌طرح‌ریزی خطوط تولید که خود مقوله‌ای تخصصی می‌باشد توجه نمود. به خصوص با توجه به اهمیت بهبود مستمر خطوط تولید در شرکت‌های خودروسازی، رتبه‌بندی این خطوط امری ضروری می‌باشد که این امر با روش ریاضی BWM انجام شد. البته از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به این موضوع اشاره نمود که ارزیابی عملکرد FMS خطوط تولید با مدلی که حاصل تطابق معیارهای موثر در FMS با خطوط تولید بلوک سیلندر خودرو است انجام گرفته است. پس به نظر می‌رسد که هر چه از صنعت ساخت قطعات برای خودرو دورتر شویم امکان ارزیابی منطقی‌تر FMS خطوط تولید با این مدل کم‌رنگ‌تر خواهد شد. از آنجا که این تحقیق به مطالعه معیارهای تأثیرگذار مستقیم و درون‌کارخانه‌ای بر روی FMS پرداخته است، پیشنهاد می‌گردد که در تحقیقات آتی به مطالعه معیارهایی که غیرمستقیم و برون‌کارخانه‌ای در ارزیابی عملکرد FMS مانند شرایط اقتصادی، سیاسی و غیره که می‌توانند تأثیرگذار باشند پرداخته شود. از سویی پیشنهاد می‌گردد به مطالعات طرح‌ریزی واحدهای صنعتی با در نظر گرفتن معیارهای FMS پرداخته شود تا پیامد آسان‌سازی فرآیند تولید و ایجاد جریان مناسب مواد در کارخانه که بحثی بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر است را در بر داشته باشد.

فهرست منابع

- [1] آذرباد، مرتضی. حسین‌زاده لطفی، فرهاد. (۱۳۹۶). شاخص بهره‌وری مالمکوئیست در شبکه و کاربرد آن برای محاسبه پیشرفت و پسرفت پژوهش دانشکده‌ها در یک دانشگاه. *فصلنامه مدیریت بهره‌وری*، ۱۱(۴۲)، ۱۱۵-۱۴۷.
- [2] توکلی گلیپایگانی، مریم. عالم‌تبریز، اکبر. امیری، مقصود. موتمنی علیرضا. (۱۳۹۴). طراحی و تبیین مدل ارزیابی عملکرد با رویکرد تلفیقی تحلیل پوششی داده‌ها، تحلیل عاملی و اوزان مشترک (مطالعه موردی: صنعت بیمه). *فصلنامه چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۵(۱۷)، ۴۵-۷۶.
- [3] جهانشاهلو، غلامرضا. حسین‌زاده لطفی، فرهاد. نیکومرام، هاشم. (۱۳۸۷). تحلیل پوششی داده‌ها و کاربردهای آن. *انتشارات آثار نفیس*.
- [4] مهدوری، کاوه. (۱۳۹۷). سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر. *انتشارات سایکو*.
- [5] میلتن برگ، جان. (۱۳۸۸). مدیریت راهبردی صنعتی. *انتشارات مرکز تحقیق و توسعه علوم انسانی*.
- [6] Bagheri, M., Ebrahimnezhad, A., Razavyan, S., Hosseinzadeh Lotfi, F. & Malekmohammadi, N. (2020). Fuzzy Arithmetic Dea Approach For Fuzzy Multi-Objective Transportation Problem. *Journal Of Operational Research*, <https://Link.Springer.Com/Article/10.1007/S12351-020-00592-4>.
- [7] Bayazit, Ozden. (2004). Use Of Ahp In Decision-Making For Flexible Manufacturing Systems. *Journal Of Manufacturing Technology Management*, 808-819.
- [8] Ebrahimi, Bohlool., Dellnitz, Andreas., Kleine, Andreas. & Tavana, Madjid. (2021). A Novel Method For Solving Data Envelopment Analysis Problems With Weak Ordinal Data Using Robust Measures. *Expert Systems With Applications*, 164 (2021) 113835.
- [9] Ebrahimi, Bohlool & Rahmani, Morteza. (2017). An Improved Approach To Find And Rank Bcc-Efficient Dmus In Data Envelopment Analysis (Dea). *Journal Of Industrial And Systems Engineering*, 25-34.
- [10] Eguía, Ignacio., Villa, Gabriel. & Lozano, Sebastián. (2017, June). Efficiency Assessment Of Reconfigurable Manufacturing Systems. *27th International Conference On Flexible Automation And Intelligent Manufacturing*, Faim2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy [3] Do Tan Si, The Fourier Transform And Principles Of Quantum Mechanics, *Applied Mathematics*, 09(04):347-354, (2018).
- [11] Ertugrul Karsak, E. (2006). Using Data Envelopment Analysis For Evaluating Flexible Manufacturing Systems In The Presence Of Imprecise Data. *Int J Adv Manuf Technol*, 867-874.
- [12] Ertugrul Karsak, E & Kuzgunkaya, Onur. (2002). A Fuzzy Multiple Objective Programming Approach For The Selection Of A Flexible Manufacturing System. *Int. J. Production Economics*, 101-111.
- [13] Florescu, Adriana & Barabas, Sorin Adrian. (2020). Modeling And Simulation Of A Flexible Manufacturing System—A Basic Component Of Industry 4.0. *Applied Sciences*, <https://Www.Mdpi.Com/Journal/Appsci>.
- [14] Jahanshahloo, G. R., Sanei, M., Rostami-Malkhalifeh, M & Saleh, H. (2009). A Comment On "A Fuzzy Dea/Ar Approach To The Selection Of Flexible Manufacturing Systems". *Journal Of Computers & Industrial Engineering*, 1713-1714.

- [15]Kapitanov, A. V. (2017). Manufacturing System Flexibility Control. *International Conference On Industrial Engineering*, 1470-1475.
- [16]Khouja, Moutaz. (1994). The Use Of Data Envelopment Analysis For Technology Selection. *Computer Ind*, 123-132.
- [17]Kianfar, K., Ahadzade Namin, M., Alam Tabriz, A., Najafi, E. & Hosseinzadeh Lotfi, F. (2018). The Ndea-Mop Model In The Presence Of Negative Data Using Fuzzy Method. *Journal Of Scientia Iranica*, 398-409.
- [18]Li, Yongjun., Chen, Yao., Liang, Liang. & Xie, Jianhui. (2012). Dea Models For Extended Two-Stage Network Structures. *International Series In Operations Research & Management Science*, 261-285.
- [19]Liu, Shiang-Tai. (2008). A Fuzzy Dea/Ar Approach To The Selection Of Flexible Manufacturing Systems. *Computers & Industrial Engineering*, 66-76.
- [20]Mahmood, Kashif., Karaulova, Tatjana., Otto, Tauno. & Shevtshenko, Eduard. (2017). Performance Analysis Of A Flexible Manufacturing System (Fms). *The 50th Cirp Conference On Manufacturing Systems, Procedia Cirp* 63 (2017) 424 – 429.
- [21]Peykani, Pejman., Mohammadi, Emran., Farzipoor Saen, Reza., Sadjadi, Seyed Jafar. & Rostamy-Malkhalifeh, Mohsen. (2020). Data Envelopment Analysis And Robust Optimization: A Review. *Journal Of Expert Systems*, Doi: 10.1111/Exsy.12534.
- [22]Rezaei, Jafar. (2015). Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method. *Journal Of Omega*, 49-57.
- [23]Sarki, Joseph & University, Clark. (1997). Evaluating Flexible Manufacturing Systems Alternatives Using Data Envelopment Analysis. *A Journal Devoted To The Problems Of Capital Investment*, 25-47.
- [24]Shakouri, B., Abbasi Shureshjani, R., Daneshian, B & Hosseinzadeh Lotfi, F. (2020). A Parametric Method For Ranking Intuitionistic Fuzzy Numbers And Its Application To Solve Intuitionistic Fuzzy Network Data Envelopment Analysis Models. *Journal Of Hindawi*, <https://doi.org/10.1155/2020/6408613>.
- [25]Shang, Jen & Sueyoshi, Toshiyuki. (1995). A Unified Framework For The Selection Of A Flexible Manufacturing System. *European Journal Of Operational Research*, 297-315.
- [26]Shavazipour, Babooshka. (2014). Measuring Efficiency And Effectiveness For Non-Storable Commodities: A Mixed Separate Data Envelopment Analysis Spproaches With Real And Fuzzy Data. *International Journal Of Data Envelopment Analysis And *Operations Research*, 1-11.
- [27]Singh, Sanjeet. (2018). Intuitionistic Fuzzy Dea/Ar And Its Application To Flexible Manufacturing Systems. *Journal Of Rairo Operations Research*, 241-257.
- [28]Shivanand, H. K., Benal, M. M. & Koti, V. (2006). Flexible Manufacturing System. *New Age International Publishers*.
- [29]Song, Lianlian. & Liu, Fan . (2016). An Improvement In Dea Cross Efficiency Aggregation Based On The Shannon Entropy. *Journal Of International Transactions In Operational Research*, 1-10.

- [30]Talluri, Srinivas., Whiteside, Mary M. & Seipel, Scott J. (2000). A Nonparametric Stochastic Procedure For Fms Evaluation. *European Journal Of Operational Research*, 529–538.
- [31]Toloo, Mehdi & Salahi, Maziar. (2018). A Powerful Discriminative Approach For Selecting The Most Efficient Unit In Dea. *Computers & Industrial Engineering*, 269-277.
- [32]Vaez, E., Najafi, S. E., Hajimolana, S. M., Hosseinzadeh Lotfi, F & Ahadzadeh Namin, M. (2021). Efficiency Evaluation Of A Three-Stage Leader-Follower Model By Data Envelopment Analysis With Double-Frontier View Point. *Journal Of Scientia Iranica*, 492-515.
- [33]Wang, Meiqiang. & Li, Yongjun. (2012). A Fuzzy Dea Model Based On Weighted Average Value Of Fuzzy Numbers. *Journal Of Society Systems Science*, <https://www.researchgate.net/publication/264440693>.
- [34]Wang, Yi-Chi., Chen, Toly., Chiang, Hsiangtsai. & Pan, Hui-Chen. (2016). A Simulation Analysis Of Part Launching And Order Collection Decisions For A Flexible Manufacturing System. *Simulation Modelling Practice And Theory*, 80-91.
- [35]Wang, Ying-Ming. & Chin, Kwai-Sang. (2011). Fuzzy Data Envelopment Analysis: A Fuzzy Expected Value Approach. *Expert Systems With Applications*, 11678-11685.
- [36]Wang, Zhiguo., Pang, Chee Khiang. & Ng, Tsan Sheng. (2019). Robust Scheduling Optimization For Flexible Manufacturing Systems With Replenishment Under Uncertain Machine Failure Disruptions. *Control Engineering Practice*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096706611930111x?via%3dihub>.
- [37]Yadav, Anupma & Jayswal, S. C. (2020). Modelling Of Flexible Manufacturing System: A Review. *International Journal Of Production Research*, <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1387302>.
- [38]Zacharia, Paraskevi T. & Xidias, Elias K. (2020). Agv Routing And Motion Planning In A Flexible Manufacturing System Using A Fuzzy-Based Genetic Algorithm. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, <https://doi.org/10.1007/S00170-020-05755-3>.
- [39]Zohreh, Moghaddas, Babak, Mohamadpour Tosarkani & Samuel, Yousefi. (2022). Resource Reallocation For Improving Sustainable Supply Chain Performance: An Inverse Data Envelopment Analysis. *International Journal Of Production Economics*, Volume 252, October 2022, 108560.
- [11]Ertugrul Karsak, E. (2006). Using Data Envelopment Analysis For Evaluating Flexible Manufacturing Systems In The Presence Of Imprecise Data. *Int J Adv Manuf Technol*, 867–874.
- [12]Ertugrul Karsak, E & Kuzgunkaya, Onur. (2002). A Fuzzy Multiple Objective Programming Approach For The Selection Of A Flexible Manufacturing System. *Int. J. Production Economics*, 101-111.
- [13]Florescu, Adriana & Barabas, Sorin Adrian. (2020). Modeling And Simulation Of A Flexible Manufacturing System—A Basic Component Of Industry 4.0. *Applied Sciences*, <https://www.mdpi.com/journal/applsci>.

- [14]Jahanshahloo, G. R., Sanei, M., Rostami-Malkhalifeh, M & Saleh, H. (2009). A Comment On "A Fuzzy Dea/Ar Approach To The Selection Of Flexible Manufacturing Systems". *Journal Of Computers & Industrial Engineering*, 1713–1714.
- [15]Kapitanov, A. V. (2017). Manufacturing System Flexibility Control. *International Conference On Industrial Engineering*, 1470-1475.
- [16]Khouja, Moutaz. (1994). The Use Of Data Envelopment Analysis For Technology Selection. *Computer Ind*, 123-132.
- [17]Kianfar, K., Ahadzade Namin, M., Alam Tabriz, A., Najafi, E. & Hosseinzadeh Lotfi, F. (2018). The Ndea-Mop Model In The Presence Of Negative Data Using Fuzzy Method. *Journal Of Scientia Iranica*, 398-409.
- [18]Li, Yongjun., Chen, Yao., Liang, Liang. & Xie, Jianhui. (2012). Dea Models For Extended Two-Stage Network Structures. *International Series In Operations Research & Management Science*, 261-285.
- [19]Liu, Shiang-Tai. (2008). A Fuzzy Dea/Ar Approach To The Selection Of Flexible Manufacturing Systems. *Computers & Industrial Engineering*, 66–76.
- [20]Mahmood, Kashif., Karaulova, Tatjana., Otto, Tauno. & Shevtshenko, Eduard. (2017). Performance Analysis Of A Flexible Manufacturing System (Fms). *The 50th Cirp Conference On Manufacturing Systems, Procedia Cirp* 63 (2017) 424 – 429.
- [21]Peykani, Pejman., Mohammadi, Emran., Farzipoor Saen, Reza., Sadjadi, Seyed Jafar. & Rostamy-Malkhalifeh, Mohsen. (2020). Data Envelopment Analysis And Robust Optimization: A Review. *Journal Of Expert Systems*, Doi: 10.1111/Exsy.12534.
- [22]Rezaei, Jafar. (2015). Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method. *Journal Of Omega*, 49–57.
- [23]Sarki, Joseph & University, Clark. (1997). Evaluating Flexible Manufacturing Systems Alternatives Using Data Envelopment Analysis. *A Journal Devoted To The Problems Of Capital Investment*, 25-47.
- [24]Shakouri, B., Abbasi Shureshjani, R., Daneshian, B & Hosseinzadeh Lotfi, F. (2020). A Parametric Method For Ranking Intuitionistic Fuzzy Numbers And Its Application To Solve Intuitionistic Fuzzy Network Data Envelopment Analysis Models. *Journal Of Hindawi*, <https://doi.org/10.1155/2020/6408613>.
- [25]Shang, Jen & Sueyoshi, Toshiyuki. (1995). A Unified Framework For The Selection Of A Flexible Manufacturing System. *European Journal Of Operational Research*, 297-315.
- [26]Shavazipour, Babooshka. (2014). Measuring Efficiency And Effectiveness For Non-Storable Commodities: A Mixed Separate Data Envelopment Analysis Spproaches With Real And Fuzzy Data. *International Journal Of Data Envelopment Analysis And *Operations Research*, 1-11.
- [27]Singh, Sanjeet. (2018). Intuitionistic Fuzzy Dea/Ar And Its Application To Flexible Manufacturing Systems. *Journal Of Rairo Operations Research*, 241-257.
- [28]Shivanand, H. K., Benal, M. M. & Koti, V. (2006). Flexible Manufacturing System. *New Age International Publishers*.

- [29]Song, Lianlian. & Liu, Fan . (2016). An Improvement In Dea Cross Efficiency Aggregation Based On The Shannon Entropy. *Journal Of International Transactions In Operational Research*, 1-10.
- [30]Talluri, Srinivas., Whiteside, Mary M. & Seipel, Scott J. (2000). A Nonparametric Stochastic Procedure For Fms Evaluation. *European Journal Of Operational Research*, 529–538.
- [31]Toloo, Mehdi & Salahi, Maziar. (2018). A Powerful Discriminative Approach For Selecting The Most Efficient Unit In Dea. *Computers & Industrial Engineering*, 269-277.
- [32]Vaez, E., Najafi, S. E., Hajimolana, S. M., Hosseinzadeh Lotfi, F & Ahadzadeh Namin, M. (2021). Efficiency Evaluation Of A Three-Stage Leader-Follower Model By Data Envelopment Analysis With Double-Frontier View Point. *Journal Of Scientia Iranica*, 492-515.
- [33]Wang, Meiqiang. & Li, Yongjun. (2012). A Fuzzy Dea Model Based On Weighted Average Value Of Fuzzy Numbers. *Journal Of Society Systems Science*, <https://www.researchgate.net/publication/264440693>.
- [34]Wang, Yi-Chi., Chen, Toly., Chiang, Hsiangtsai. & Pan, Hui-Chen. (2016). A Simulation Analysis Of Part Launching And Order Collection Decisions For A Flexible Manufacturing System. *Simulation Modelling Practice And Theory*, 80-91.
- [35]Wang, Ying-Ming. & Chin, Kwai-Sang. (2011). Fuzzy Data Envelopment Analysis: A Fuzzy Expected Value Approach. *Expert Systems With Applications*, 11678-11685.
- [36]Wang, Zhiguo., Pang, Chee Khiang. & Ng, Tsan Sheng. (2019). Robust Scheduling Optimization For Flexible Manufacturing Systems With Replenishment Under Uncertain Machine Failure Disruptions. *Control Engineering Practice*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096706611930111x?via%3dhub>.
- [37]Yadav, Anupma & Jayswal, S. C. (2020). Modelling Of Flexible Manufacturing System: A Review. *International Journal Of Production Research*, <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1387302>.
- [38]Zacharia, Paraskevi T. & Xidias, Elias K. (2020). Agv Routing And Motion Planning In A Flexible Manufacturing System Using A Fuzzy-Based Genetic Algorithm. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, <https://doi.org/10.1007/S00170-020-05755-3>.
- [39]Zohreh, Moghaddas, Babak, Mohamadpour Tosarkani & Samuel, Yousefi. (2022). Resource Reallocation For Improving Sustainable Supply Chain Performance: An Inverse Data Envelopment Analysis. *International Journal Of Production Economics*, Volume 252, October 2022, 108560.

