مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال نوزدهم، شماره اول (پیاپی ۷۲)،بهار ۰۱، ص ص ۱۴۳-۱۲۳
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

انتخاب بهترین مواد در ساخت قطعات پلیمری خودرو با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی

مرتضی یوسفی[۱]، نبی اله محمدی[۲*]، هما درودی[۳]

۱- دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

۲- استادیار، گروه مدیریت، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

۳- دانشیار، گروه مدیریت، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

رسید مقاله: ۲۸ دی ۱۳۹۸

پذیرش مقاله: ۶ اسفند ۱۳۹۹

چکیده

انتخاب مواد مساله پیچیده‌ای در طراحی و توسعه محصولات در کاربردهای متنوع مهندسی است. با توجه به مداخله معیارهای متعدد مرتبط با گزینه‌های انتخاب مواد، تولیدکنندگان به پشتیبانی ابزار شفافی جهت اخذ تصمیمات پیچیده نیازمندند که تمام معیارها و اهداف را به‌طور هم‌زمان موردتوجه قرار دهد. تحقیق حاضر سعی دارد با ترکیب تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره الگوریتمی علمی برای شناسایی و غربال‌سازی شاخص‌های تولید پایدار خودرو و ارزیابی و رتبه‌بندی مواد مصرفی ارایه دهد. بدین منظور در مرحله اول پس از مرور سوابق تجربی تحقیق، شاخص‌های اثرگذار بر انتخاب مواد در تولید پایدار مشخص، سپس با بهره‌گیری از روش دلفی فازی و نظرسنجی از ۱۰ خبره سازمانی، ۵ شاخص مشتمل بر ۲۹ زیر شاخص غربال‌سازی گردیدند. در مرحله دوم با تشکیل ماتریس مقایسات زوجی و محاسبه نرخ ناسازگاری و بهره‌گیری از تکنیک تحلیل سلسله مراتبی فازی، وزن هر یک از شاخص‌ها استخراج شد که شاخص فنی و اقتصادی دارای بالاترین درجه اهمیت است. نهایتاً در مرحله بعدی، مواد شناسایی‌شده با تکنیک تاپسیس فازی مورد ارزیابی و رتبه‌بندی قرار گرفتند. به‌منظور بررسی قابلیت مدل ارایه‌شده یک مطالعه موردی انجام گرفت که نتایج نشان داد ترکیب پلی‌پروپیلن و تالک، بهترین ماده پلیمری برای تولید داشبورد خودرو است که تحلیل حساسیت نیز نشان از ثبات در نتایج پژوهش دارد.

کلمات کلیدی: رتبه‌بندی، مواد پلیمری خودرو، تحلیل سلسله مراتبی فازی، تاپسیس فازی.

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: nabi_mohammadi@yahoo.com

۱ مقدمه

یکی از مسایل اصلی و کلیدی در بهینه‌سازی طراحی یک محصول انتخاب موادی است که با نیازهای طراحی مطابقت داشته و بالاترین عملکرد اجرایی و پایین‌ترین هزینه را ضمانت کند [۱]. توانایی انتخاب بهینه گزینه‌های مواد از طیف گسترده‌ای از مواد برای تولیدکنندگان و مهندسان از اهمیت زیادی برخوردار است [۲]. انتخاب ماده مناسب و قابل‌اعتماد یکی از مهم‌ترین و چالش‌برانگیزترین وظایف طراحان و تولیدکنندگان به دلیل ترکیب مداوم ویژگی‌های پیشرفته مختلف است که باعث افزایش پیچیدگی‌ها می‌شود [۳]. طراحان و مهندسان باید مسایل و معیارهای بسیاری در ارتباط با تولید محصولات را حین تخصیص مواد مناسب برای طرح‌های خودشان در نظر بگیرند تا محصولات موفق با هزینه‌ی کم به‌دست آورند که این مسایل شامل خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، الکتریکی، مغناطیسی، هزینه‌ها، قابلیت دسترسی، توانایی تولید دوام و پایداری، تأثیر محیطی، قابلیت بازیافت و مسایل دیگر می‌شود. به‌علاوه ویژگی‌های متافیزیکی و هم ابعاد تعامل کاربر از قبیل ظاهر، ادراک و احساسات نیز باید در طول مرحله‌ی انتخاب ماده در نظر گرفته شوند [۴]. بررسی سوابق تجربی پژوهش تایید کرد که روش‌های مختلف تحلیل تصمیم تاکنون در ارزیابی پایداری صنایع خودروسازی مورد استفاده قرارگرفته است. بااین‌حال تنها تعداد کمی از مقالات بر تولید پایدار متمرکز بوده است. اجرای چندین آلترناتیو و فرآیند تولید، نیاز به توازن بین پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی دارد [۵]. همچنین سازمان‌ها در وضعیت رقابتی متأثر از توسعه تکنولوژی و سرعت فزاینده انتشار تکنولوژی جدید قرار می‌گیرند [۶]. با افزایش مشکلات کمبود منابع و زوال محیط‌زیست، ویژگی‌های زیست‌محیطی نیز به‌طور فزاینده‌ای از اهمیت بسزایی در توسعه صنعتی پایدار برخوردارشده و به‌صورت گسترده موردتوجه قرارگرفته است [۷]. تولیدکنندگان تنها بر جزء اقتصادی تمرکز کرده و سایر اجزا را در نظر نمی‌گیرند، درحالی‌که باید تمامی اجزا به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شود که این موضوع در مورد صنایع مشتری محور با رقابت بالا مثل صنایع خودروسازی، خود را بیشتر نشان می‌دهد [۵]. با توجه به پیشرفت علم مواد و توسعه فرایندهای تولید، انواع مواد مورداستفاده در ساخت محصول و الزاماتی که بایستی در فرآیند انتخاب در نظر گرفته شود در حال افزایش و فراگیرتر شدن بوده و این انتخاب‌های گسترده و نیازهای جامع، مساله انتخاب مواد را پیچیده‌تر می‌کند [۸]. انتخاب صحیح مواد باعث بهبود کیفیت و افزایش چرخه عمر محصول‌شده و انتخاب ضعیف منجر به شکست نابهنگام برخی از معیارهای مهم شامل مشخصات مکانیکی، خصوصیات فیزیکی، ویژگی‌های سایش، خصوصیات ساخت، هزینه مواد، تأثیر مواد بر محیط‌زیست، زیبایی، بازیافت و غیره، که در هنگام انتخاب مواد بایستی در نظر گرفته شوند، می‌گردد [۹]. از طرفی دیگر انتخاب نادرست مواد اغلب منجر به خرابی زودهنگام محصول با کاهش کارایی و تولید محصول ضعیف‌شده و می‌تواند تأثیر منفی بر بهره‌وری، سودآوری و شهرت یک سازمان بگذارد، لذا وظیفه انتخاب مواد و معیارهای بین آن‌ها روند انتخاب مواد را دشوار و وقت‌گیر می‌کند. ازاین‌رو به‌کارگیری رویکردی منظم و کارآمد در انتخاب مواد برای انتخاب بهترین گزینه برای یک محصول کاملاً ضروری است [۷، ۱۰ و ۱۱]. امروزه در بخش خودرو با توجه به رقابتی شدن و همچنین افزایش هزینه‌های مربوط به منابع، الزام قوانین و

مقررات زیست‌محیطی سختگیرانه‌تر، لزوم کاهش وزن وسیله نقلیه و نیاز مشتری برای وسایل نقلیه ایمن و راحت با افزایش روزافزون همراه است [۱۲].

یک مساله تصمیم‌گیری چندمعیاره [1] می‌تواند برای انتخاب مناسب‌ترین مواد برای یک محصول خاص باشد که عموماً شامل گزینه‌ها و معیارهای متناقض مختلفی می‌شود [۱۴-۱۳]. با توجه به پیچیدگی در امر تصمیم، استفاده از خبرگان و متخصصان برای بررسی تمامی جهات یک مساله تصمیم‌گیری موردی اجتناب‌ناپذیر است. یک مدل تصمیم‌گیری مناسب با توجه به ابهام و عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های فردی بایستی بتواند با تخصیص امتیازهای منطقی، رتبه‌بندی مناسبی از گزینه‌های تصمیم ارایه کند. محققین با در نظر گرفتن ماهیت غیرقطعی موقعیت‌های تصمیم، در جهت کنترل عدم قطعیت و کسب نتایجی با اطمینان بیشتر، منطق فازی را در روش‌های تصمیم‌گیری ترکیب کردند [۱۵].

در این پژوهش سعی گردیده چارچوبی مفهومی برای ارزیابی انتخاب مواد در صنعت تولید خودرو ارایه‌شده تا بتواند بین تمامی ابعاد (فنی، اجتماعی، اقتصادی، محیط زیستی و تکنولوژیکی) مرتبط با اجرای گزینه‌های تولید، تعادل برقرار نماید و عمدتاً برخی از این جنبه‌ها در بحث انتخاب مواد به‌صورت جامع در نظر گرفته نمی‌شوند. درسطح عملی، این چارچوب قصد دارد تا با پر کردن شکاف به وجود آمده به تولیدکنندگان صنایع خودروسازی ابزار شفافی ارایه دهد که تصمیمات پیچیده‌ای که در بحث انتخاب مواد گرفته می‌گیرند را پشتیبانی نموده و با شناسایی شاخص‌های جدید به همراه زیر شاخص‌های مرتبط و ارایه یک رویکرد علمی، ریسک انتخاب مواد صحیح و بهینه را در صنعت حساسی مانند صنعت قطعات خودرو بخصوص بخش مواد پلیمری خودرو را کاهش دهند. بر این اساس، رویکرد پیشنهادی این پژوهش شامل سه مرحله است: در مرحله اول با بررسی جامع سوابق تجربی، شاخص‌های مؤثر در ارزیابی تولید پایدار صنعت پلیمری خودرو شناسایی و با کمک خبرگان و بهره‌گیری از تکنیک دلفی فازی غربال‌سازی می‌شوند. در مرحله دوم با کمک تکنیک تحلیل سلسله مراتبی فازی اوزان هر یک از شاخص‌ها استخراج‌شده و در مرحله سوم با بهره‌گیری از روش تاپسیس فازی گزینه‌ها بر اساس شاخص‌های تاییدشده رتبه‌بندی می‌شوند. همچنین جهت اطمینان از ثبات نتایج رویکرد پیشنهادی، سناریوهای مختلف تحلیل حساسیت نیز موردبررسی قرار می‌گیرند. قابل‌ذکر است که موردمطالعه برگزیده در این پژوهش، انتخاب مواد مناسب برای ساخت داشبورد خودرو در شرکت پیشرو پلیمر است.

۲ مبانی نظری و مروری بر پیشینه تحقیق

۲-۱ مبانی نظری تحقیق

در روند جهانی‌شدن، سازمان‌ها میل به کسب مزیت رقابتی پایدار دارند تا بتوانند جایگاه و موقعیت خود را تحکیم بخشند [۱۶]. یکی از بهترین استراتژی‌های دست‌یابی به ساخت‌وساز پایدار انتخاب موادی است که

[1] Multi-criteria decision making (MCDM)

مشکلات و اثرات محیط‌زیستی را کاهش دهد. از طریق اصول پایدار، معیارهای انتخاب مواد شامل عوامل اقتصادی، فنی، اجتماعی و محیطی است [۱۷]. به دلیل موجود بودن مواد مختلفی با خواص فیزیکی و مکانیکی گوناگون، انتخاب بهترین ماده خود یک چالش بزرگ هست [۱۸]. بسیاری از صاحب‌نظران معتقدند که حدوداً ۵۰٪تا ۷۰٪ از هزینه‌های تولید مختص هزینه‌ی مواد و قطعات است [۱۹]. مک آئومی (۲۰۰۳) تخمین زد که ۱۰ درصد کاهش در وزن وسیله نقلیه می‌تواند ۳۷ درصد مصرف سوخت آن را کاهش دهد و می‌تواند چرخه عمر محصول را بهینه نماید. به‌این‌ترتیب انتخاب نوع مواد در فاز طراحی به‌صورت جدی بر پایداری محصول اثر می‌گذارد و دلیل آن تنها کاهش وزن مواد است. علاوه بر این، انتخاب مواد احتمالاً بر بخش‌هایی مانند وابستگی به منابع، قابلیت بازیافت و تجزیه زیستی هم اثر می‌گذارد. درنتیجه تمرکز بر انتخاب مواد، می‌تواند نقطه‌ای ضروری برای بهبود پایداری صنعت خودروسازی باشد. البته متغیرها و فرایندهای دیگری نیز وجود دارد که هرکدام اثر بسیار مهمی بر پایداری کلی گذاشته و در آن نقش دارد. در خودروسازی پایدار انتخاب مواد مناسب یکی از مسایل بسیار ضروری در جهت تولید است [۵]. توجه به عوامل اثرگذار در تولید قطعات پلیمری خودرو منجر به کاهش ضایعات و هزینه‌های تولیدی و درنهایت قیمت تمام‌شده محصول و همچنین تولید قطعات باکیفیت مطلوب، رضایت بیش‌تر مصرف‌کننده و افزایش قدرت رقابت می‌شود [۲۰]. انتخاب ماده بهینه از بین گزینه‌های مختلف بسیار دشوار است به‌خصوص هنگامی‌که باید پارامترهای مختلفی در نظر گرفته شود. در این شرایط بهترین تصمیم، موادی است که بالاترین درجه رضایت را برای خواص مختلف داشته باشند. بدین منظور رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره یک ابزار بسیار قوی برای حل مسایل پیچیده انتخاب مواد در قطعات متفاوت است [۲۱]. کومار و همکاران در بحث انتخاب مواد با اشاره به مداخله معیارهای متعددی مانند تکنیکی، اجتماعی، اقتصادی و محیطی و پیچیدگی آن‌ها، معتقدند طراحی سیستم تصمیم‌گیری چندمعیاره به دلیل انعطاف‌پذیری که تمام معیارها و اهداف را به‌طور هم‌زمان موردتوجه قرار می‌دهد به ابزاری محبوب تبدیل‌شده است [۲۲].

۲-۲ پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر محققان مختلفی با در نظر گرفتن شاخص‌های مختلف و متعددی، تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره را در بحث انتخاب مواد پیشنهاد کردند که در اینجا به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد:

کومار سینگ و همکاران [۳] مواد مختلف کامپوزیتی را بر اساس خصوصیات مکانیکی از قبیل: خمش، استحکام ضربه، سختی، چگالی، استحکام کششی و سایش رتبه‌بندی نمودند. برای این منظور از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی برای محاسبه وزن ویژگی‌های مکانیکی و از روش تاپسیس M برای رتبه‌بندی مواد مختلف ترکیبی استفاده کردند که مواد کامپوزیتی v_4 در بین همه رتبه اول را کسب کرد. سنجای و همکاران [۲۳] با به‌کارگیری روش تاپسیس برای انتخاب بهترین مواد، ۹ لمینت کامپوزیت را با ویژگی‌های دانسیته، استحکام کششی، استحکام خمشی، مقاومت برشی، ضربه‌پذیری و جذب آب موردبررسی قراردادند و دریافتند S1 بهترین لمینت کامپوزیت است. جایاکریشنا و همکاران [۲۴] بیان کردند، بهبود مواد مهندسی برای کاربرد هوا فضایی بر

مسایل اقتصادی و محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد. انتخاب مواد همیشه معیارهای بسیاری را شامل می‌شود. جایگزینی مواد متعارف با کامپوزیت‌های پیشرفته سبب کاهش وزن می‌شود، به‌نوبه خود باعث افزایش بهره‌وری سوخت بدون تأثیر بر عملکرد پرواز می‌شود. آن‌ها روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه (ازجمله: تحلیل سلسله مراتبی، تاپسیس، الکتره و ...) را پیشنهاد کردند. محمودکلائی و همکاران[۱۷] برای انتخاب مواد در ساخت‌وساز پایدار، معیارها را به چهار گروه عوامل اقتصادی، فنی، اجتماعی، فرهنگی و محیطی تقسیم کردند و به کمک روش فرایند تحلیل شبکه‌ای دریافتند که کناره‌های آلومینیومی بهترین و کناره‌های سدری بدترین مواد هستند. گول و همکاران [۲] با به‌کارگیری تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی برای انتخاب مواد دریافتند استایرن مونیک هیدرید و پلی‌پروپیلن به‌عنوان مناسب‌ترین مواد پانل داشبورد خودرو می‌باشند. کومار و سینگال [۲۵] برای انتخاب مواد در نیروگاه‌های کوچک آبی، ۴ نوع مواد با ۵ شاخص را به کمک روش‌های تحلیل سلسله مراتبی، تاپسیس و تاپسیس اصلاح‌شده بررسی کردند و پلاستیک تقویت‌شده با شیشه بهترین ماده جایگزین انتخاب شد. یانگ و همکاران [۲۶] برای انتخاب مواد بلوک بدنه و منیفولد خودرو با ۳ نوع مواد و ۱۶ ملاک را به کمک روش آنتروپی برای تعیین وزن و روش تاپسیس فازی برای رتبه‌بندی موردبررسی قراردادند و چدن خاکستری بالاترین رتبه را به دست آورد. علی احمد و همکاران [۲۷] با به‌کارگیری تحلیل سلسله مراتبی برای انتخاب قطعات کامپوزیتی خودرو ۸ نوع مواد با ۷ معیار (شامل: دانسیته، استحکام کششی، مدول یانگ، سطح سمیت، توانایی تخریب زیستی، هزینه مواد خام و هزینه تجهیزات) موردبررسی قراردادند و ترکیب فیبر طبیعی کنف و پلی‌پروپیلن بالاترین رتبه را کسب کردند. چاودهری و همکاران [۱۸] با بیان این‌که دستگاه قالب‌گیری چرخشی قبل از رسیدن به تصمیم نهایی باید تعداد زیادی از معیارهای انتخاب مواد را در نظر بگیرد، یازده جایگزین بر اساس هفت معیار (شامل: نقطه ذوب، مدول خمشی، مقاومت کششی، سختی لبه D، کریستالی شدن، ثبات گرما، هزینه و ...) توسط روش تجزیه‌وتحلیل ارتباطات خاکستری موردبررسی قراردادند که پلی کربنات و ABS به‌عنوان بهترین مواد انتخاب شدند. بوسال و همکاران [۲۸] برای انتخاب ترکیب مواد مناسب درزمینه متالورژی پودر، ترکیب دو آلیاژ را با چهار معیار استحکام کششی، سختی، درصد تغییر ابعادی و درصد کشیدگی، توسط روش تاپسیس مورد بررسی قراردادند که ۰/۸٪ کربن و ۲٪ مس بهترین ترکیب مواد انتخاب شدند. مرادیان و همکاران [۲۱] برای انتخاب مواد سیستم سوپاپ بوستر ترمز ۴ معیار برای ۱۶ مواد مختلف را با به‌کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره موردبررسی قراردادند و پلی‌اتیلن ترفتالات تقویت‌شده با ۳۵٪ وزنی فیبر شیشه بهترین ماده انتخاب شد. اوز زمان و همکاران [۲۹] در انتخاب مواد و فرآیند تولید برای تولید افزودنی، از تصمیم‌گیری چند معیاره و تکنیک‌های تحلیل سلسله مراتبی و مجموع ساده وزنی برای رتبه‌بندی استفاده کردند. لوگاناتان و مانی [۳۰] نیز برای انتخاب ماده تغییر فاز در خنک‌کننده الکترونیکی ۱۰ ماده جایگزین را با ۸ معیار توسط تصمیم‌گیری چند معیاره (شامل تحلیل سلسله مراتبی فازی، تاپسیس و ...) مورد ارزیابی قراردادند که بر اساس آن RT-۸۰ ماده مناسب برای مدیریت حرارتی در قدرت دستگاه‌های الکترونیکی انتخاب شد. تیان و همکاران [۳۱] برای رتبه‌بندی نهایی مواد دکوراسیون سبز، از تکنیک تحلیل سلسله مراتبی برای تعیین وزن و از روش تاپسیس همبستگی خاکستری برای به دست آوردن رتبه نهایی استفاده کردند و بر

اساس نتایج ماده ۴ بهترین جایگزین انتخاب شد. زیندانی و کومار [۳۲] برای انتخاب بهترین مواد برای نوارهای مهروموم‌شده در توربین‌ها با استفاده از ابزارهای تصمیم‌گیری چند معیاره، پنج نوع مواد با معیارهای مقاومت خزش، مقاومت به اکسیداسیون، ضریب انبساط حرارتی، قدرت کشش، سختی و کرنش محدود انتخاب کردند و دریافتند فولاد ضدزنگ AISI۳۱۶ مناسب‌ترین مواد برای نوارهای ترمینال توربین است. انوجکومار و همکاران [۱۰] برای انتخاب مواد مناسب لوله در صنعت قند پنج فولاد ضدزنگ را با هفت معیار مقاومت، مقاومت کششی نهایی، درصد کشش، سختی، هزینه، میزان خوردگی و میزان سایش بر اساس روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره، ۲۰۴Cu را به‌عنوان بهترین ماده معرفی کردند. بهرامی نسب و جهان [۳۳] از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب مواد برای اجزای فمورال در جراحی زانو استفاده کردند که NiTi متخلخل دارای بالاترین رتبه در میان جایگزین‌ها شد. ساپوآن و همکاران [۳۴] با بهره‌گیری از تکنیک تحلیل سلسله مراتبی برای انتخاب مواد فیبر طبیعی، چگالی، مدول یانگ و استحکام کششی را به‌عنوان معیار و ۲۹ نوع کامپوزیت فیبر طبیعی را به‌عنوان جایگزین انتخاب کردند که ترکیب پلی‌پروپیلن و کناف ۶۰٪ مناسب‌ترین مواد برای پانل داشبورد خودرو انتخاب شدند. منصور و همکاران [۳۵] برای انتخاب مناسب‌ترین مواد اهرم ترمز خودرو ۱۳ نوع مواد اولیه فیبر کربن را در سه شاخص اصلی عملکرد به کمک روش تحلیل سلسله مراتبی مورد تجزیه‌وتحلیل قراردادند و فیبر بافت کناف به‌عنوان بهترین مواد کاندید برای تشکیل ترکیبات پلیمری انتخاب شد.

در پژوهشی دیگر اموون و اوقنن‌یروهو [۳۶] نیز بر اساس بررسی نتایج ۵۵ پژوهش علمی طی دوره زمانی ۱۹۹۴ لغایت ۲۰۱۹ تصریح کردند که معیار هزینه کاربردی‌ترین معیار تصمیم‌گیری برای تجزیه‌وتحلیل انتخاب مواد بوده و معتقدند تکنیک‌های روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای پرداختن به چالش‌های انتخاب مواد در زمینه‌های مختلف کاملاً مناسب است. البته باید توجه داشت که در هر پژوهشی معیارهای ارزیابی انتخاب مواد در هر سازمانی با توجه به محصول و عوامل اثرگذار بر آن متفاوت است و در هرکدام از این پژوهش‌ها برخی از این معیارهای اثرگذار بر انتخاب مواد (اعم از فنی، هزینه، زیست‌محیطی و ...) با به‌کارگیری تکنیک‌های تصمیم گیری چندمعیاره و با استفاده از شاخص‌های اثرگذار در نظر گرفته‌شده است. در این پژوهش قصد داریم تمامی متغیرهای مطرح‌شده را به‌طور هم‌زمان و جامع در بحث انتخاب مواد مورد تحلیل قرار دهیم.

۲-۳ فنون تصمیم‌گیری در انتخاب مواد

۲-۳-۱ روش دلفی فازی[1]

این روش باهدف دستیابی به اجماع گروهی در بین خبرگان استفاده می‌شود. روش دلفی فازی توسط ایشیگاوا و همکارانش از ترکیب دلفی سنتی و تئوری مجموعه‌های فازی به وجود آمد [۳۷]. در دلفی کلاسیک، نظرات خبرگان به‌صورت اعداد قطعی و بر اساس شایستگی‌های ذهنی آنان بیان می‌شود که این موضوع نشان‌دهنده احتمالی بودن و عدم قطعیت است. احتمالی بودن عدم قطعیت، با مجموعه‌های فازی سازگاری دارد؛ بنابراین اخذ نظرات خبرگان در قالب زبان طبیعی و تحلیل آن با استفاده از مجموعه‌های فازی مطلوب‌تر است [۳۸].

[1] Fuzzy Delfi

برای نشان دادن نظر خبرگان از توابع عضویت مختلفی (مثلثی، ذوزنقه و گاوسی) استفاده می‌شود [۳۹]. از مزایای روش دلفی فازی در توجه به نظرات تمامی خبرگان و یکپارچه کردن نظرات آن‌ها برای دستیابی به توافق گروهی است [۴۰]. عدد فازی مثلثی با سه عدد حقیقی به‌صورت M=(l,m,u) استفاده‌شده است. کران بالا (u)، کران پایین (l) و (m) محتمل‌ترین مقدار یک عدد فازی است. تابع عضویت یک عدد فازی مثلثی به‌صورت زیر است:

$$u_M(x)=\begin{cases}\dfrac{x-l}{m-l} & l\le x\le m\\ \dfrac{u-x}{u-m} & m\le x\le u\\ ۰ & otherwise\end{cases} \qquad (۱)$$

مراحل اجرای روش دلفی فازی به شرح زیر است: [۴۱]

گام اول: نظرسنجی از خبرگان با استفاده از متغیر کلامی برای هرکدام از شاخص‌ها.

گام دوم: تبدیل متغیرهای کلامی به اعداد فازی مثلثی به کمک جدول ۱ و محاسبه مجموعه اعداد فازی مثلثی برای هر خبره با استفاده از رابطه (۲).

جدول ۱. اعداد فازی مثلثی متناظر با متغیرهای کلامی

متغیر زبانی	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
عدد فازی مثلثی	(۰,۰,۰/۲۵)	(۰,۰/۲۵,۰/۵)	(۰/۲۵,۰/۵,۰/۷۵)	(۰/۵,۰/۷۵,۱)	(۰/۷۵,۱,۱)

$$\tilde{A}^{(i)}=\left(a_1^{(i)},a_2^{(i)},a_3^{(i)}\right)\qquad i=1,2,3,\ldots,n \qquad (۲)$$

گام سوم: محاسبه میانگین مجموعه‌ها $\tilde{A}_m^{(i)}$ از تمامی مجموعه‌ها $\tilde{A}^{(i)}$ به کمک رابطه (۳) و مقدار اختلاف از میانگین برای هر خبره با استفاده از رابطه (۴).

$$\tilde{A}_m^{(i)}=(a_{m1},a_{m2},a_{m3})=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}a_1^i,\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}a_2^i,\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}a_3^i\right) \qquad (۳)$$

$$(a_{m1}-a_1^{(i)},a_{m2}-a_2^{(i)},a_{m3}-a_3^{(i)})=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}a_1^i-a_1^{(i)},\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}a_2^i-a_2^{(i)},\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}a_3^i-a_3^{(i)}\right) \qquad (۴)$$

پس از انجام مراحل فوق پرسشنامه قبلی اصلاح و بابیان میانگین نظرات و اختلاف‌نظر قبلی هر یک از آن‌ها با میانگین دوباره برای اعضا پانل خبرگان ارسال‌شده تا در صورت نیاز در قضاوت‌های خود بازنگری کنند.

گام چهارم: محاسبه نظرات اصلاح‌شده خبرگان در قالب اعداد فازی مثلثی در مرحله دوم به کمک رابطه (۵) و میانگین نظرات اصلاح‌شده به کمک رابطه (۶).

$$\tilde{B}^{(i)}=\left(b_1^{(i)},b_2^{(i)},b_3^{(i)}\right)\qquad i=1,2,3,\ldots,n \qquad (۵)$$

$$\tilde{B}_m^{(i)} = b_{m1}, b_{m2}, b_{m3} = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} b_1^i, \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} b_2^i, \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} b_3^i \right) \qquad (۶)$$

گام پنجم: دی فازی کردن با استفاده از رابطه (۷).

$$S_j = \frac{u_j + m_j + l_j}{3} \qquad (۷)$$

گام ششم: محاسبه میزان اختلاف‌نظر خبرگان در دو مرحله از طریق رابطه (۸). تکرار مراحل دلفی تا آنجا پیش می‌رود که اختلاف‌نظر خبرگان بین دو مرحله نظرسنجی به کمتر از حد آستانه (۰/۲) برسد، در این صورت فرایند نظرسنجی متوقف می‌شود.

$$S\left(\tilde{B}_m, \tilde{A}_m\right) = \left| \frac{1}{3}\left[\left(b_{m1}, b_{m2}, b_{m3} - a_{m1}, a_{m2}, a_{m3}\right) \right] \right| \qquad (۸)$$

۲-۳-۲ تکنیک تحلیل سلسله مراتبی فازی[1]

تحلیل سلسله مراتبی یک روش تصمیم‌گیری قدرتمند برای تعیین اولویت‌ها در بین معیارهای مختلف است [۴۲]. کاربرد روش فازی به تصمیم‌گیرنده اجازه می‌دهد تا مقادیر کمی و کیفی مدل را ادغام کند [۴۳]. در این روش با به‌کارگیری عبارات کلامی، مفهوم فازی بودن در ماتریس مقایسات زوجی دخالت داده می‌شود؛ بنابراین، با تعمیم این روش‌ها، روش‌هایی ارایه می‌شود که در آن‌ها برای بیان میزان ارجحیت از اعداد فازی استفاده می‌شود (جدول ۲). در این زمینه روش‌هایی توسط ون لارهوون و پدریچ[2] (۱۹۸۳)، باکلی[3] (۱۹۸۵)، چانگ[4] (۱۹۹۲) ارایه‌شده است [۴۴].

جدول ۲. اعداد فازی مثلثی برای مقایسات زوجی

متغیر زبانی	اهمیت برابر	یکسان تا نسبتاً مهم‌تر	نسبتاً مهم‌تر	نسبتاً مهم‌تر تا اهمیت زیاد	اهمیت زیاد	اهمیت زیاد تا بسیار زیاد	اهمیت بسیار زیاد	بسیار زیاد تا کاملاً مهم‌تر	کاملاً مهم‌تر
عدد فازی مثلثی	(۱, ۱, ۱)	(۱, ۲, ۳)	(۲, ۳, ۴)	(۳, ۴, ۵)	(۴, ۵, ۶)	(۵, ۶, ۷)	(۶, ۷, ۸)	(۷, ۸, ۹)	(۸, ۹, ۱۰)

مراحل تحلیل توسعه چانگ به شرح زیر است: [۳۷، ۴۵].

گام ۱: تشکیل جدول مقایسات زوجی توسط خبرگان جهت تعیین درجه ارجحیت عوامل نسبت به یکدیگر به‌صورت زبانی و تبدیل آن به اعداد فازی مثلثی.

گام ۲: استخراج ماتریس تجمیع نظرات خبرگان.

گام ۳: به دست آوردن بسط مرکب فازی برای هر هدف با استفاده از رابطه (۹) (M_{gi}^{j} ها عدد فازی مثلثی هستند).

[1] Fuzzy Analytical Hierarchy process (F.AHP)
[2] Laarhoven & Pedrych
[3] Buckley
[4] Chang

$$s_i = \sum_{j=1}^{m} M_{g_i}^{j} \otimes \left[\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M_{g_i}^{j} \right]^{-1} \quad (۹)$$

اگر $M_{g_i}^{j} = \left(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}\right)$ باشد، آنگاه $\sum_{j=1}^{m} M_{g_i}^{j}$ به‌وسیله عملگر جمع فازی روی تحلیل توسعه m آرمان به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sum_{j=1}^{m} M_{g_i}^{j} == \left(l_{i1}, m_{i1}, u_{i1}\right) \oplus \ldots \oplus \left(l_{im}, m_{im}, u_{im}\right) = \left(\sum_{j=1}^{m} l_{ij}^{m}, \sum_{j=1}^{m} M_{ij}^{m}, \sum_{j=1}^{m} u_{ij}^{m}\right) = \left(l_i', m_i', u_i'\right) \quad (۱۰)$$

همچنین، برای به دست آوردن $\left[\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M_{g_i}^{j} \right]^{-1}$ با اعم عملگر جمع فازی خواهیم داشت:

$$\left(\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M_{g_i}^{j} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^{m} u_i'}, \frac{1}{\sum_{j=1}^{m} m_i'}, \frac{1}{\sum_{j=1}^{m} l_i'} \right) \quad (۱۱)$$

گام ۴: محاسبه درجه ارجحیت S_i بر S_k .

$$V\left(S_i \geq S_k\right) = SUP\left(min\left\{a_{s_i}\left(x\right), a_{s_k}\left(y\right)\right\}\right) \quad (۱۲)$$

که برای اعداد فازی مثلثی معادل با رابطه زیر است:

$$\left(S_i \geq S_k\right) = a_s\left(d\right) = \begin{cases} 1 & if \;\; m_i \geq m_k \\ 0 & if \;\; l_k \geq u_i \\ \dfrac{l_k - u_i}{\left(m_i - u_i\right) - \left(m_k - l_k\right)} & otherwise \end{cases} \quad (۱۳)$$

گام ۵: محاسبه درجه ارجحیت یک عدد فازی محدب S که k بزرگ‌تر از عدد فازی محدب $i = 1,2,\ldots,k$ و S_i باشد به‌صورت تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} &V\left(S \geq S_1, S_2, \ldots, S_k\right) = \left(V\left(\left(S \geq S_1\right), \left(S \geq S_2\right), \ldots, \left(S, S_k\right)\right)\right) = \\ &\min\left(V\left(\left(S \geq S_1\right), \left(S \geq S_2\right), \ldots, \left(S, S_k\right)\right)\right) = minV\left(S \geq S_i\right) \quad i = 1,2,\ldots,k \end{aligned} \quad (۱۴)$$

چنانچه برای هر $k = 1,2,\ldots,n \;, k \neq i$ فرض کنیم که $d'\left(A_i\right) = \min V\left(S_i, S_k\right)$ آنگاه بردار وزن به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$W' = \left(\left(d'(A_1), d'(A_2), \ldots, d'(A_n)\right)\right) \quad (۱۵)$$

گام ۶: نرمالیزه کردن بردار W' و به دست آوردن بردار وزن نرمالیزه شده W.

$$W = \left(d\left(A_1\right), d\left(A_2\right), \ldots, d\left(A_n\right)\right) \quad (۱۶)$$

قابل‌ذکر است جهت استفاده از ماتریس مقایسات زوجی بایستی ناسازگاری ماتریس کمتر از حد مجاز (۰/۱) باشد در غیر این صورت ماتریس مقایسات نیاز به اصلاح یا تکرار دارند [۱۹].

۲-۳-۳ تکنیک تاپسیس فازی[۱]

تاپسیس یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب بهترین گزینه جایگزین بوده و مبتنی بر کوتاه‌ترین فاصله از جواب‌های ایده‌آل مثبت و طولانی‌ترین فاصله از جواب‌های ایده‌آل منفی است [۴۲]. درروش تاپسیس کلاسیک داده‌ها با قطعیت همراه هستند، اما در بسیاری از مواقع تفکرات انسان با عدم قطعیت همراه است که در تصمیم‌گیری تأثیرگذار هستند. در این شرایط از روش‌های تصمیم‌گیری فازی ازجمله روش تاپسیس فازی استفاده می‌شود[۴۶]. در انجام این روش گام‌های زیر بایستی طی شوند: [۴۲، ۴۵، ۴۷، ۴۸، ۴۹]

گام ۱: ساخت ماتریس تصمیم‌گیری بر اساس رابطه (۹). در این ماتریس A_1 ، A_2 ، ...، A_m گزینه‌ها و C_1 ، C_2 ، ...، C_n شاخص‌های موردبررسی می‌باشند. $\tilde{x}_{ij}=(a_{ij},b_{ij},c_{ij})$ بیانگر کمیت گزینهiام در زیرمعیار jام و $\tilde{w}_j=(a_{j1},b_{j2},c_{j3})$ بیانگر وزن هر یک از شاخص‌ها است که تمامی آن‌ها به‌صورت اعداد فازی مثلثی هستند.

$$D=\begin{array}{c} \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_m \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} C_1 & C_2 & C_3 & \cdots & C_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \tilde{x}_{13} & & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \tilde{x}_{23} & & \tilde{x}_{2n} \\ \tilde{x}_{31} & \tilde{x}_{32} & \tilde{x}_{33} & \cdots & \tilde{x}_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \tilde{x}_{m3} & & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \end{array} \quad , \quad \tilde{W}=\tilde{w}_1,\tilde{w}_2,\ldots,\tilde{w}_n \qquad (۱۷)$$

گام ۲: بی‌مقیاس نمودن ماتریس تصمیم‌گیری: ماتریس تصمیم‌گیری فازی را به کمک رابطه (۱۸) به یک ماتریس بدون مقیاس فازی ($\tilde{R}$) تبدیل می‌کنیم. در این رابطه برای به دست آوردن ماتریس $\tilde{R}$ ، اگر شاخص مثبت باشد از رابطه(۱۹) و اگر شاخص منفی باشد رابطه (۲۰) را به‌کار می‌بریم.

$$\tilde{R}=\left|\tilde{r}_{ij}\right|_{m*n} \qquad (۱۸)$$

$$C_j^*=\max C_{ij} \quad \text{و} \quad \tilde{r}_{ij}=\left(\frac{a_{ij}}{C_j^*},\frac{a_{ij}}{C_j^*},\frac{a_{ij}}{C_j^*}\right) \qquad (۱۹)$$

$$a_j^-=\min a_{ij} \quad \text{و} \quad \tilde{r}_{ij}=\left(\frac{a_j^-}{C_{ij}},\frac{a_j^-}{b_{ij}},\frac{a_j^-}{a_{ij}}\right) \qquad (۲۰)$$

گام ۳: ایجاد ماتریس بی‌مقیاس وزین فازی $\tilde{V}$ با مفروض بودن $\tilde{w}_{ij}$ به‌عنوان اوزان شاخص‌ها بر اساس رابطه (۲۱) و (۲۲).

$$\tilde{V}=\left|\tilde{V}_{ij}\right|_{m\times n} \quad i=1,2,\ldots,m \ , \ j=1,2,\ldots,n \qquad (۲۱)$$

$$\tilde{V}_{ij}=\tilde{r}_{ij}.\tilde{w}_j \qquad (۲۲)$$

[3] Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (F.Topsis)

گام ۴: مشخص نمودن ایده‌آل فازی A^+ و ضد ایده‌آل فازی A^- شاخص‌ها بر اساس رابطه (۲۳).

$$A^+ = \left(\tilde{V}_1^*, \tilde{V}_2^*, \ldots, \tilde{V}_n^*\right) \quad و \quad A^- = \left(\tilde{V}_1^-, \tilde{V}_2^-, \ldots, \tilde{V}_n^-\right) \qquad (۲۳)$$

برای هر i و j مقادیر $\tilde{V}_{ij}$، اعداد فازی مثلثی در بازه $\{۰,۱\}$ قرار دارند و مقدار ایده‌آل فازی و ضد ایده‌آل فازی مطابق رابطه (۲۴) هست.

$$\tilde{V}_j^- = (۰,۰,۰) \qquad \tilde{V}_1^* = (۱,۱,۱) \qquad (۲۴)$$

گام ۵: محاسبه مجموع فواصل هر یک از مؤلفه‌ها از ایده‌آل مثبت فازی (رابطه (۲۵)) و ایده‌آل منفی فازی (رابطه (۲۶)).

$$d_i^* = \sum_{j=1}^{n} d(\tilde{V}_{ij}, \tilde{V}_j^*) \qquad i = ۱,۲,,\ldots,m \qquad (۲۵)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^{n} d(\tilde{V}_{ij}, \tilde{V}_j^-) \qquad i = ۱,۲,,\ldots,m \qquad (۲۶)$$

گام ۶: محاسبه شاخص شباهت به گزینه ایده‌آل (CCi) بر اساس رابطه (۲۷).

$$CCi = \frac{d_1^-}{d_1^* + d_1^-} \qquad i = ۱,۲,,\ldots,m \quad (۲۷)$$

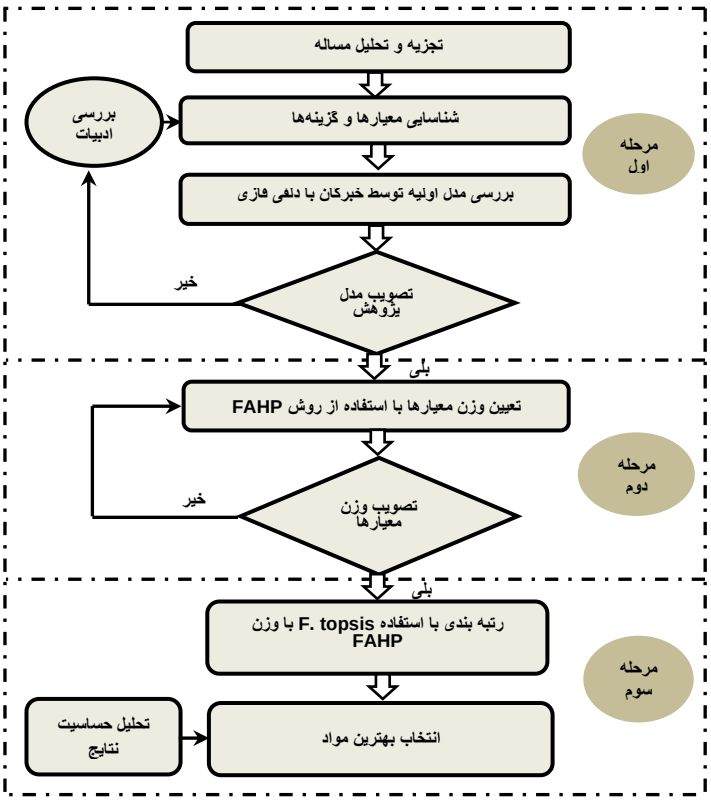
گام ۷: رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس ترتیب نزولی Cci.

۳ روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف از نوع آمیخته (کیفی و کمی) و از نظر نحوه جمع‌آوری داده‌ها توصیفی- پیمایشی است. ازآنجاکه شناسایی شاخص‌ها در طول فرایند تحقیق انجام می‌گیرد در دسته تحقیقات اکتشافی به شمار می‌رود. جامعه آماری این پژوهش با توجه به محدود بودن، ۱۰ نفر خبره سازمانی بوده که به‌صورت هدفمند و قضاوتی انتخاب‌شده و مورد نظرسنجی قرار گرفتند. در این پژوهش به‌منظور جمع‌آوری داده‌ها در سه مرحله از ابزار پرسشنامه استفاده‌شده است که پرسشنامه مرحله نخست برای غربال‌سازی معیارهای تولید پایدار در انتخاب مواد، پرسشنامه مرحله دوم ماتریس مقایسات زوجی مربوط به شاخص‌ها جهت تعیین وزن و پرسشنامه سوم ماتریس تصمیم‌گیری در مورد شاخص‌ها و گزینه‌ها جهت رتبه‌بندی گزینه‌های مواد است.

٤ رویکرد ترکیبی پیشنهادی

رویکرد پیشنهادی در این پژوهش شامل سه مرحله است (شکل ۱). در مرحله اول پس از تجزیه‌وتحلیل مساله تحقیق و مطالعات کتابخانه‌ای معیارهای انتخاب مواد در تولید پایدار شناسایی و با نظرسنجی از خبرگان و استفاده از تکنیک دلفی فازی غربال‌سازی و تایید می‌شوند. در مرحله دوم با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و نظرات خبرگان انتصابی، ماتریس مقایسات زوجی تشکیل و نرخ ناسازگاری آن‌ها محاسبه و شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها وزن‌دهی می‌شوند. در مرحله سوم گزینه‌های مواد بر اساس شاخص‌های تاییدشده به کمک روش تاپسیس فازی رتبه‌بندی شده و سپس ثبات نتایج به کمک تجزیه‌وتحلیل حساسیت موردبررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱. رویکرد پیشنهادی پژوهش

۵ مطالعه موردی

برای بررسی و تشریح الگوریتم پیشنهادی شرکت پیشرو پلیمر که در زمینه تولید قطعات پلیمری داخلی خودرو فعالیت می‌کند انتخاب و در جهت انتخاب بهترین مواد پلیمری بر اساس تمامی شاخص‌های اثرگذار موردبررسی قرار گرفت. برای این منظور گام‌های الگوریتم پیشنهادی در ادامه پیاده‌سازی می‌گردد:

مرحله اول: شناسایی و غربال شاخص‌ها و گزینه‌ها با روش دلفی فازی: در این پژوهش جهت شناسایی و غربال شاخص و زیرشاخص‌های اثرگذار در انتخاب مواد پلیمری خودرو بر اساس تولید پایدار، پرسش‌نامه‌ای بر اساس طیف پنج گزینه‌ای لیکرت طراحی و از خبرگان نظرسنجی گردیده و به کمک روش دلفی فازی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. در نظرسنجی مرحله نخست، پرسشنامه برای اعضای گروه خبره ارسال و میزان موافقت آن‌ها با هرکدام از معیارها و سپس زیر معیارها اخذ شد. میانگین نظرات خبرگان در مرحله اول (S۱) نشان‌دهنده شدت موافقت خبرگان با هرکدام از معیارهای پژوهش است. در مرحله بعد مجدداً پرسشنامه اصلاحی تهیه گردیده و همراه با نقطه‌نظر قبلی هر فرد و میزان اختلاف آن‌ها با دیدگاه سایر خبرگان، مجدداً برای اعضای گروه خبره ارسال گردید و از آن‌ها خواسته شد تا در مورد شاخص‌ها تجدیدنظر کنند. بر اساس میانگین نظرات خبرگان در مرحله دوم (S۲)، شدت موافقت خبرگان با هرکدام از شاخص و زیر شاخص‌ها سنجیده شد که این مقدار بایستی بالاتر از ۰/۷۰ باشد. با توجه به دیدگاه‌های ارایه‌شده در مرحله اول و دوم، درصورتی‌که اختلاف

بین میانگین نظرات خبرگان، در دو مرحله (|S۱- S۲|) کمتر از حد آستانه ۰/۲ باشد، فرایند نظرسنجی متوقف می‌شود.

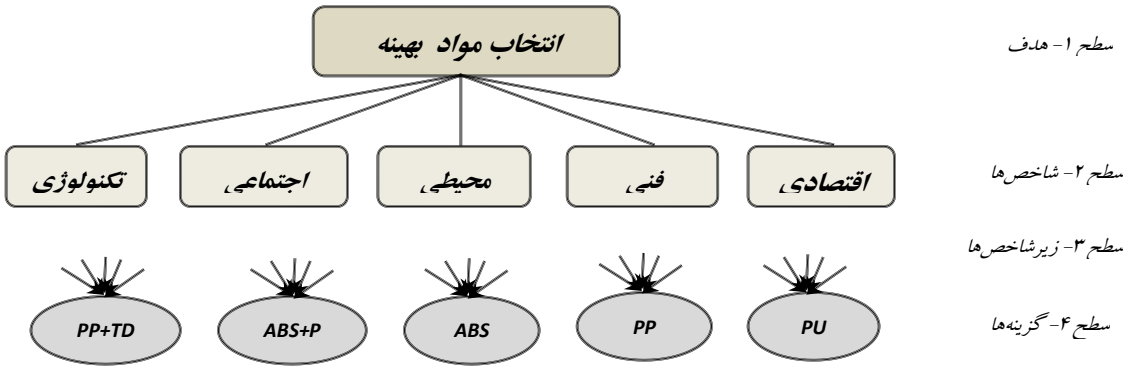
جدول ۳. نتایج نظرسنجی دور اول و دوم به همراه میانگین دیدگاه‌های خبرگان برای تعیین شاخص‌های اصلی

اختصار	شاخص	L	M	U	S1	L	M	U	S2	|S1- S2|	نتیجه
C۱	اقتصادی	۰/۶۷	۰/۹۲	۱/۰۰	۰/۸۶	۰/۷۰	۰/۹۵	۱/۰۰	۰/۸۸	۰/۰۲	پذیرش
C۲	فنی	۰/۷۲	۰/۹۷	۱/۰۰	۰/۸۹	۰/۷۳	۰/۹۸	۱/۰۰	۰/۹۱	۰/۰۲	پذیرش
C۳	زیست‌محیطی	۰/۵۷	۰/۸۲	۰/۹۷	۰/۷۸	۰/۶۵	۰/۹۰	۰/۹۸	۰/۸۴	۰/۰۶	پذیرش
C۴	اجتماعی	۰/۵۲	۰/۷۷	۰/۹۳	۰/۷۴	۰/۶۰	۰/۸۵	۰/۹۷	۰/۸۱	۰/۰۷	پذیرش
C۵	تکنولوژی	–	–	–	–	۰/۴۷	۰/۷۲	۰/۹۲	۰/۷۰	–	پذیرش

جدول ٤. میانگین نظرات خبرگان درباره زیر شاخص‌های پژوهش در دو مرحله

شاخص	زیر شاخص	S۱	S۲	|S۱- S۲|	شاخص	زیر شاخص	S۱	S۲	|S۱- S۲|
اقتصادی	هزینه مواد	۰/۸۳	۰/۸۸	۰/۰۵	زیست‌محیطی	سطح سمیت	۰/۶۸	۰/۷۵	۰/۰۷
	هزینه انرژی در طول عملیات	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۰۵		بازیافت و استفاده مجدد	۰/۷۶	۰/۸۰	۰/۰۴
	هزینه تجهیزات	۰/۸۲	۰/۸۶	۰/۰۴		تجزیه‌پذیری زیستی	۰/۶۴	۰/۷۱	۰/۰۷
	هزینه خدمات و نگهداری	۰/۷۴	۰/۸۰	۰/۰۶		اثرات زیست‌محیطی	۰/۷۴	۰/۷۶	۰/۰۲
	ارزش بازاری	۰/۸۲	۰/۹۱	۰/۰۹		میزان مصرف منابع	۰/۶۸	۰/۷۸	۱
	هزینه حمل‌ونقل	۰/۶۴	۰/۷۲	۰/۰۸	اجتماعی	زیبایی	۰/۷۳	۰/۷۵	۰/۰۲
	هزینه ضایعات	۰/۶۱	۰/۷۰	۰/۰۹		سلامت و ایمنی	۰/۷۷	۰/۸۲	۰/۰۵
فنی	وزن محصول	۰/۸۳	۰/۸۷	۰/۰۴		دسترسی به نیروی کار	۰/۶۴	۰/۷۴	۰/۱۰
	حد دما	۰/۸۰	۰/۸۳	۰/۰۳		شهرت	۰/۵۹	۰/۶۶	۰/۰۷
	هدایت حرارتی	۰/۷۷	۰/۸۷	۰/۱۰		دانش طراحی	۰/۷۳	۰/۷۷	۰/۰۴
	استحکام کششی	۰/۸۰	۰/۸۳	۰/۰۳		استفاده از مواد محلی	۰/۵۵	۰/۷۱	۰/۱۶
	کشیدگی	۰/۶۰	۰/۶۶	۰/۰۶	تکنولوژی	سطح موردنیاز	۰/۶۹	۰/۷۴	۰/۰۵
	چقرمگی(ضربه‌پذیری)	۰/۷۳	۰/۷۶	۰/۰۳		امکانات فعلی	۰/۷۶	۰/۸۰	۰/۰۴
	مقاومت به عوامل شیمیایی	۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۰۲		قابلیت انعطاف	۰/۶۷	۰/۷۱	۰/۰۴
	مدول یانگ	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۰۵		توسعه فن‌آوری	۰/۶۶	۰/۷۰	/۰۴
	جریان مذاب	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۰۷		سادگی عملیات	۰/۶۱	۰/۷۲	۱

پس از دو مرحله نظرسنجی، خبرگان تمامی شاخص‌ها را تایید نمودند (جدول ۳). همچنین در مورد زیرشاخص‌ها نیز خبرگان از ۳۲ زیر شاخص ارایه‌شده، ۲۹ مورد را تایید کردند (جدول ۴). سپس سلسله‌مراتب تصمیم این تحقیق شامل هدف در سطح اول، شاخص‌ها در سطح دوم ، زیرشاخص‌ها در سطح سوم (جدول ۵) و گزینه‌های مواد در سطح چهارم تشکیل می‌گردد که در شکل ۲ قابل‌مشاهده است.



شکل ۲. سلسله‌مراتب تصمیم در انتخاب مواد پلیمری خودرو

جدول۵. شاخص و زیر شاخص‌های سلسله‌مراتب تصمیم در انتخاب مواد پلیمری خودرو (سطح ۲ و ۳)

شاخص	اقتصادی (C۱)	فنی (C۲)	زیست‌محیطی (C۳)	اجتماعی (C۴)	تکنولوژی (C۵)
زیر شاخص	هزینه مواد (Cs۱) هزینه انرژی در طول عملیات (Cs۲) هزینه تجهیزات (Cs۳) هزینه خدمات و نگهداری (Cs۴) هزینه حمل‌ونقل (Cs۵) هزینه ضایعات (Cs۶) ارزش بازاری (Cs۷)	دانسیته (Cs۸) حد دما (Cs۱) هدایت حرارتی (Cs۱۰) استحکام کششی (Cs۱۱) چقرمگی (ضربه-پذیری) (Cs۱۲) مقاومت به عوامل شیمیایی (Cs۱۳) مدول یانگ (Cs۱۴)	سطح سمیت (Cs۱۵) بازیافت و استفاده مجدد (Cs۱۶) تجزیه‌پذیری زیستی (Cs۱۷) اثرات زیست‌محیطی (Cs۱۸) میزان مصرف منابع (Cs۱۹)	زیبایی (۲۰ Cs) سلامت و ایمنی (Cs۲۱) دسترسی به نیروی کار (Cs۲۲) دانش طراحی (Cs۲۳) استفاده از مواد محلی (Cs۲۴)	سطح موردنیاز (Cs۲۵) امکانات فعلی (Cs۲۶) قابلیت انعطاف (Cs۲۷) توسعه فن‌آوری (Cs۲۸) سادگی عملیات (Cs۲۹)
منابع حمایت‌کننده	[۲,۱۷, ۲۰, ۲۷, ۳۱, ۳۵,۴۶, ۵۰ ،۵۱]	[۲,۱۷, ۲۷, ۳۴, ۳۵, ۵۲]	[۲, ۵, ۱۷, ۲۷, ۳۱, ۳۵, ۵۲]	[۵,۱۷, ۳۱, ۵۳]	[۵۱, ۵۲, ۵۳, ۵۴, ۵۵, ۵۶, ۵۷, ۵۸]

مرحله دوم: تعیین وزن شاخص و زیر شاخص‌ها با تحلیل سلسله مراتبی فازی: در این بخش عوامل مزیت رقابتی اثرگذار در انتخاب مواد پلیمری خودرو، با استفاده از تحلیل توسعه‌ای چانگ و به کمک واژه‌های زبان‌شناسی و اعداد فازی مثلثی توسط خبرگان مورد مقایسات زوجی قرارگرفته و وزن‌دهی شدند. برای جمع‌آوری داده‌های موردنیاز پرسشنامه‌ای شامل ۶ مقایسه زوجی (یک مقایسه زوجی برای شاخص‌های اصلی و ۵ مقایسه زوجی برای زیر شاخص‌ها) طراحی‌شده و توسط خبرگان تکمیل‌شده و با انجام محاسبات نرخ ناسازگاری، اوزان شاخص‌های اصلی و فرعی را محاسبه کرده و با ضرب آن‌ها در یکدیگر اوزان نهایی به دست آمد (جدول ۶).

جدول ٦. اوزان بهنجار شاخص‌های اصلی و فرعی و اوزان نهایی آن‌ها

شاخص	C۱			C۲				C۳				C۴				C۵	
وزن	۰/۳۲۰			۰/۳۹۴				۰/۱۶۰				۰/۰۸۵				۰/۰۴۲	
زیر شاخص	Cs۱	Cs۲	Cs۳	Cs4۴	Cs۵	Cs۶	Cs۷	Cs۸	Cs۹	Cs۱۰	Cs۱۱	Cs۱۲	Cs۱۳	Cs۱۴	Cs۱۵		
وزن نسبی	۰/۲۵۹	۰/۰۴۲	۰/۲۲۸	۰/۰۷۳	۰/۰۱۸	۰/۰۱۶	۰/۳۶۴	۰/۱۹۹	۰/۱۳۲	۰/۱۳۳	۰/۱۶۶	۰/۱۳۶	۰/۰۸۵	۰/۱۴۹	۰/۱۷۶		
وزن نهایی	۰/۰۸۳	۰/۰۱۳	۰/۰۷۳	۰/۰۲۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۱۱۶	۰/۰۷۸	۰/۰۵۲	۰/۰۵۲	۰/۰۶۵	۰/۰۵۴	۰/۰۳۳	۰/۰۵۹	۰/۰۲۸		
زیر شاخص	Cs۱۶	Cs۱۷	Cs۱۸	Cs۱۹	Cs۲۰	Cs۲۱	Cs۲۲	Cs۲۳	Cs۲۴	Cs۲۵	Cs۲۶	Cs27۲۷	Cs۲۸	Cs29۲۹			
وزن نسبی	۰/۲۶۹	۰/۱۲۴	۰/۲۳۰	۰/۲۰۱	۰/۱۷۶	۰/۲۵۵	۰/۲۱۳	۰/۲۳۶	۰/۱۲۱	۰/۲۱۳	۰/۲۶۰	۰/۱۹۳	۰/۱۷۴	۰/۱۵۹			
وزن نهایی	۰/۰۴۳	۰/۰۲۰	۰/۰۳۷	۰/۰۳۲	۰/۰۱۵	۰/۰۲۲	۰/۰۱۸	۰/۰۲۰	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹	۰/۰۱۱	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷			

مرحله سوم: رتبه‌بندی گزینه‌ها به کمک روش تاپسیس فازی: در این بخش ابتدا ماتریس تصمیم‌گیری در مورد شاخص‌ها و گزینه‌ها به کمک واژه‌های زبان‌شناسی و با نظرسنجی از خبرگان جمع‌آوری و سپس این واژه‌ها را به اعداد فازی مثلثی تبدیل کرده و با ادغام نظرات خبرگان، ماتریس تصمیم ادغام‌شده فازی را تشکیل می‌دهیم. همچنین اوزان نهایی به‌دست‌آمده از طریق تکنیک تحلیل سلسله مراتبی فازی از جدول ۶ استخراج می‌شود. با بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم ادغام‌شده فازی (با رابطه (۱۸)، (۱۹) و (۲۰))، ماتریس بی‌مقیاس وزین فازی (با رابطه (۲۱) و (۲۲)) و جواب ایده‌آل و ضدایده‌آل (با رابطه (۲۳)) را به دست می‌آوریم (جدول ۷).

جدول ۷. جواب ایده‌آل و ضدایده‌آل

	L	m	U	L	m	U	L	m	U	L	m	U	L	m	U	L	m	U
زیر شاخص	Cs۱			Cs۲			Cs۳			Cs۴			Cs۵					
A^+	۰/۰۱۹	۰/۰۳۳	۰/۰۸۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۱۳	۰/۰۴۰	۰/۰۵۲	۰/۰۷۳	۰/۰۱۰	۰/۰۱۴	۰/۰۲۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶			
A^-	۰/۰۰۹	۰/۰۱۰	۰/۰۱۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۷۳	۰/۰۴۳	۰/۰۵۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۹	۰/۰۱۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲			
زیر شاخص	Cs۶			Cs۷			Cs۸			Cs۹			Cs۱۰					
A^+	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۸۵	۰/۱۰۵	۰/۱۱۶	۰/۰۲۱	۰/۰۳۴	۰/۰۷۸	۰/۰۳۵	۰/۰۴۶	۰/۰۵۲	۰/۰۳۲	۰/۰۴۴	۰/۰۵۲			
A^-	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۵۴	۰/۰۷۸	۰/۰۹۹	۰/۰۱۷	۰/۰۲۵	۰/۰۴۶	۰/۰۲۱	۰/۰۳۰	۰/۰۳۸	۰/۰۲۲	۰/۰۳۴	۰/۰۴۴			
زیر شاخص	Cs۱۱			Cs۱۲			Cs۱۳			Cs۱۴			Cs۱۵					
A^+	۰/۰۴۳	۰/۰۵۶	۰/۰۶۵	۰/۰۳۰	۰/۰۴۳	۰/۰۵۴	۰/۰۲۲	۰/۰۲۸	۰/۰۳۳	۰/۰۴۱	۰/۰۵۲	۰/۰۵۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۲۸			
A^-	۰/۰۲۳	۰/۰۳۷	۰/۰۵۰	۰/۰۲۰	۰/۰۳۳	۰/۰۴۵	۰/۰۱۶	۰/۰۲۳	۰/۰۳۰	۰/۰۳۴	۰/۰۴۶	۰/۰۵۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲			
زیر شاخص	Cs۱۶			Cs۱۷			Cs۱۸			Cs۱۹			Cs۲۰					
A^+	۰/۰۳۰	۰/۰۳۸	۰/۰۴۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۷	۰/۰۲۰	۰/۰۰۹	۰/۰۱۵	۰/۰۳۷	۰/۰۱۷	۰/۰۲۲	۰/۰۳۲	۰/۰۰۹	۰/۰۱۲	۰/۰۱۵			
A^-	۰/۰۱۲	۰/۰۳۰	۰/۰۳۸	۰/۰۱۱	۰/۰۱۶	۰/۰۱۹	۰/۰۰۷	۰/۰۱۱	۰/۰۲۴	۰/۰۱۵	۰/۰۱۹	۰/۰۲۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳			
زیر شاخص	Cs۲۱			Cs۲۲			Cs۲۳			Cs۲۴			Cs۲۵					
A^+	۰/۰۱۷	۰/۰۲۰	۰/۰۲۲	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳	۰/۰۱۸	۰/۰۱۳	۰/۰۱۷	۰/۰۲۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	۰/۰۱۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۹			
A^-	۰/۰۱۱	۰/۰۱۵	۰/۰۲۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰۹	۰/۰۱۴	۰/۰۰۸	۰/۰۱۲	۰/۰۱۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶			
زیر شاخص	Cs۲۶			Cs۲۷			Cs۲۸			Cs۲۹								
A^+	۰/۰۰۶	۰/۰۰۹	۰/۰۱۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷						
A^-	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸	۰/۰۱۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶						

سپس مجموع فواصل هر یک از مؤلفه‌ها از جواب ایده‌آل و ضد ایده‌آل (با رابطه (۲۵) و (۲۶)) و شاخص شباهت به گزینه ایده‌آل (Cci) را بر اساس رابطه (۲۷) محاسبه کرده و گزینه‌ها را بر اساس ترتیب نزولی Cci رتبه‌بندی می‌کنیم (جدول ۸).

جدول ۸. فاصله مؤلفه‌ها از جواب ایده‌آل و ضد ایده‌آل و شاخص شباهت به گزینه ایده‌آل

گزینه‌ها	پلی‌پروپیلن و تالک (A۱)	اکریلونیتریل بوتادین و پلی کربنات (A۲)	اکریلونیتریل بوتادین (A۳)	پلی‌پروپیلن (A۴)	پلی یورتان (A۵)
d_i^*	۰/۰۸۴	۰/۱۷۶	۰/۱۶۸	۰/۱۰۰	۰/۱۲۲
d_i^-	۰/۱۵۷	۰/۰۶۶	۰/۰۷۴	۰/۱۴۲	۰/۱۲۰
Cci	۰/۶۵۰	۰/۲۷۲	۰/۳۰۶	۰/۵۸۵	۴
رتبه	۱	۵	۴	۲	۳

٦ تحلیل حساسیت

با توجه به این‌که وزن معیارهای تولید پایدار خودرو نقش مهمی در رتبه‌بندی گزینه‌ها در فرآیند تصمیم‌گیری با تکنیک تاپسیس فازی ایفا می‌کند، به‌منظور تحلیل حساسیت رتبه‌بندی بر اساس تغییرات ۲۰٪ در وزن معیارهای اصلی برای قضاوت و تأیید نتایج صورت گرفت و در ادامه اوزان نهایی زیر شاخص‌ها اصلاح‌شده و مواد بر اساس شرایط جدید رتبه‌بندی شدند (جدول ۹). همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در تمامی موارد گزینه ترکیب (PP+TD) به‌عنوان بهترین گزینه، PP رتبه دوم، PU رتبه سوم، ABS رتبه چهارم و ترکیب (ABS+PC) رتبه پنجم انتخاب شدند که مؤید ثبات نتایج است.

جدول ۹. سناریوهای آزمون تحلیل حساسیت

	شاخص اقتصادی افزایش ۲۰٪		شاخص فنی افزایش ۲۰٪		شاخص زیست‌محیطی افزایش ۲۰٪		شاخص اجتماعی افزایش ۲۰٪		شاخص تکنولوژی افزایش ۲۰٪	
رتبه	مواد	Cci	مواد	Cci	مواد	Cci	مواد	Cci	مواد	Cci
۱	PP+TD	۰/۶۵۷	PP+TD	۰/۶۳۸	PP+TD	۰/۶۵۲	PP+TD	۰/۶۴۸	PP+TD	۰/۶۴۲
۵	ABS+PC	۰/۲۵۹	ABS+PC	۰/۲۸۳	ABS+PC	۰/۲۶۷	ABS+PC	۰/۲۶۴	ABS+PC	۰/۲۶۹
۴	ABS	۰/۳۰۸	ABS	۰/۳۰۹	ABS	۰/۳۰۳	ABS	۰/۳۰۷	ABS	۰/۳۰۵
۲	PP	۰/۵۷۸	PP	۰/۵۹۲	PP	۰/۵۹۲	PP	۰/۵۹۳	PP	۰/۵۸۷
۳	PU	۰/۴۷۸	PU	۰/۵۰۲	PU	۰/۵۰۲	PU	۰/۴۹۴	PU	۰/۴۹۵

۷ بحث

یکی از استراتژی‌های مطلوب برای دستیابی به ساخت‌وساز پایدار، انتخاب مواد است که مستلزم در نظر گرفتن جنبه‌های متعددی به‌طور هم‌زمان است. تصمیم‌گیرندگان در انتخاب مواد صحیح و یا جایگزینی ماده موجود با ماده دیگری که عملکرد بهتری دارد، معمولاً روش‌های آزمون‌وخطا را به‌کار می‌برند که به اتلاف زمان و افزایش هزینه‌ها منجر می‌شود. علی‌رغم اهمیت راهبردی مباحث مربوط به انتخاب مواد در شرکت‌ها و در نظر نگرفتن جامع و هم‌زمان عوامل مختلفی همچون زیست‌محیطی (شامل: بازیافت، تجزیه‌پذیری، سطح سمیت و ...)، فنی (شامل: وزن، استحکام کششی، هدایت حرارتی و ...)، اقتصادی (شامل: هزینه مواد، هزینه انرژی، هزینه حمل‌ونقل و ...)، اجتماعی (شامل: سلامت و ایمنی، زیبایی، دانش طراحی و ...) و تکنولوژی (شامل: امکانات فعلی، سادگی عملیات، انعطاف‌پذیری و ...) ضرورت بازنگری در الگوی انتخاب مواد، تمرکز بر به‌کارگیری روش مناسب و

تمهید سیاست‌های لازم برای بهینه کردن این روند در برنامه‌ریزی تولید صنایع کشور را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. ازلحاظ مشابهت پژوهش نیز می‌توان تصریح نمود که هرچند محققان مختلف با رویکردهای متفاوتی در مباحث مربوط به انتخاب مواد در صنایع مختلف به‌خصوص صنعت خودرو، همانند مطالعات انجام‌گرفته توسط چاترجی و همکاران [۱۱]، گول و همکاران [۲]، استویچوا و همکاران [۵]، علی احمد و همکاران [۲۷] ، ساپوآن و همکاران[۳۴] و .... سعی در معرفی شاخص‌هایی در جهت انتخاب مواد و رتبه‌بندی آن‌ها به کمک تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره اقدام نمودند که با برخی از تکنیک‌های مورداستفاده در این تحقیق هم‌راستا بوده است، ولی ازلحاظ شاخص‌های اثرگذار به‌صورت جامع در بحث انتخاب مواد به‌کار گرفته‌شده و استفاده از نوع تکنیک جهت غربالگری دارای تفاوت اساسی می‌باشد. آنچه مسلم است، ضعف وجود یک مدل با شاخص‌های جامع و کامل در پژوهش‌های پیشین صنعت خودرو سبب شد تا در این تحقیق سعی شود برای پر کردن شکاف به وجود آمده، با شناسایی شاخص‌های جدیدتر و جامع‌تر به همراه زیر شاخص‌های آن‌ها بر اساس نظرات خبرگان سازمانی و ارایه یک رویکرد علمی مبتنی بر تصمیم‌گیری چند معیاره، ریسک انتخاب مواد صحیح و بهینه را در صنعت حساسی مانند صنعت خودرو، بخصوص بخش مواد پلیمری به‌کار گرفته‌شده در خودرو را کاهش دهیم.

۸ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تحقیق حاضر باهدف انتخاب بهترین مواد در ساخت قطعات پلیمری خودرو انجام‌گرفته است. برای این منظور یک رویکرد ترکیبی تصمیم‌گیری در محیط عدم اطمینان و فازی در جهت انتخاب مواد صحیح و بهینه با به‌کارگیری شاخص‌های اثرگذار به‌صورت جامع ارایه گردید. در این راستا در مرحله اول ضمن بررسی جامع پیشینه تحقیق و نظرسنجی از خبرگان سازمانی، پنج شاخص مهم اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی، تکنولوژی و اجتماعی که مشتمل بر ۲۹ زیر شاخص می‌باشد، در ارزیابی مواد پلیمری خودرو با استفاده از تکنیک دلفی فازی شناسایی و غربال‌سازی شدند. در مرحله دوم با تشکیل جدول مقایسات زوجی و محاسبه نرخ ناسازگاری، شاخص‌ها و زیرشاخص‌های تاییدشده با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی وزن‌دهی شدند که بر اساس نتایج به‌دست‌آمده وزن شاخص فنی (۰/۳۹۴)، شاخص اقتصادی (۰/۳۲)، شاخص زیست‌محیطی (۰/۱۶)، شاخص اجتماعی (۰/۰۸۵)، شاخص تکنولوژی (۰/۰۴۲) به دست آمد. همچنین بر اساس وزن نهایی محاسبه‌شده برای زیر شاخص‌ها، زیر شاخص ارزش بازاری محصول تولیدشده برای شاخص فنی، زیر شاخص دانسیته برای شاخص اقتصادی، زیر شاخص قابلیت بازیافت و استفاده مجدد مواد برای شاخص زیست‌محیطی، زیرشاخص سلامت و ایمنی برای شاخص اجتماعی و زیر شاخص امکانات فعلی برای شاخص تکنولوژی دارای بالاترین درجه اهمیت شدند. در مرحله سوم پنج گزینه مواد شناسایی‌شده برای ساخت قطعات پلیمری داشبورد خودرو بر اساس اوزان به‌دست‌آمده با استفاده از تکنیک تاپسیس فازی مورد رتبه‌بندی قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن بود که از بین مواد مختلف پلیمری، ترکیب پلی‌پروپیلن و تالک (با مقدار ۰/۶۵) به‌عنوان بهترین ماده پلیمری انتخاب شد. نهایتاً جهت حصول اطمینان از انتخاب مناسب‌ترین مواد، سناریوهای مختلف تحلیل حساسیت در سطح ۲۰٪ انجام گرفت که نتایج به‌دست‌آمده بیانگر ثبات اطمینان در نتایج بوده و صحت نتایج به‌دست‌آمده را تایید نمود.

همچنین در راستای تحقیق انجام‌گرفته موارد زیر جهت تحقیقات آتی مورد پیشنهاد است:

- جهت کسب اطمینان بالاتر در انتخاب مواد بهینه، معیارهای بیشتری در تولید پایدار قطعات پلیمری خودرو شناسایی و غربال‌سازی شده و با روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره (اعم از قطعی، فازی و خاکستری) رتبه‌بندی و نتایج این روش‌ها با یکدیگر مقایسه گردد.
- برای تعیین اوزان شاخص‌ها می‌توان از روش‌های دیگری مانند آنتروپی، BWM، SWARA و یا ترکیبی از این روش‌ها برای وزن دهی به عوامل استفاده نمود.
- جهت انجام تحلیل حساسیت نتایج می‌توان از روش‌هایی دیگری نظیر DEA، سناریونویسی، شبکه عصبی، رگرسیون خطی و ... استفاده نمود.
- با توجه به این‌که ازجمله محدودیت‌های تحقیق حاضر نادیده‌گرفتن روابط درونی معیارها با یکدیگر است، می‌توان با روش تحلیل شبکه‌ای فازی وزن هریک از شاخص‌ها را سنجیده و با رویکرد دیمتل، روابط درونی متغیرها را تایید کرد.
- به دلیل این‌که این پژوهش در زمان انجام با محدودیت مکانی روبه‌رو بوده، پیشنهاد می‌گردد جهت کسب اطمینان بالاتر به‌صورت هم‌زمان از خبرگان چند شرکت که دارای محصولات و فرایند تولیدی مشابه هستند در غربال‌سازی و وزن‌دهی شاخص‌ها استفاده گردد.

منابع

[1] Mehmood, Z., Haneef, I., & Udrea, F. (2018). Material selection for Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) using Ashby's approach. Materials & Design, 157, 412-430.

[2] Gul, M., Celik, E., Gumus, A. T., & Guneri, A. F. (2018). A fuzzy logic based PROMETHEE method for material selection problems. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 7(1), 68-79.

[3] Singh, A. K., Avikal, S., Kumar, K. N., Kumar, M., & Thakura, P. (2020). A fuzzy-AHP and M–TOPSIS based approach for selection of composite materials used in structural applications. Materials Today: Proceedings.

[4] Al-Oqla, F. M., & Sapuan, S. M. (2017). Materials selection for natural fiber composites. Woodhead Publishing.

[5] Stoycheva, S., Marchese, D., Paul, C., Padoan, S., Juhmani, A. S., & Linkov, I. (2018). Multi-criteria decision analysis framework for sustainable manufacturing in automotive industry. Journal of Cleaner Production, 187, 257-272.

[6] ArbabShirani, B., Ahmadi, A., & Shahriari, M. (2013). Provide a framework for determining the competitive status of organizational resources based on criteria for gaining competitive advantage. Business Reviews, No. 58, Special Issue.

[7] Zhang, H., Wu, Y., Wang, K., Peng, Y., Wang, D., Yao, S., & Wang, J. (2020). Materials selection of 3D-printed continuous carbon fiber reinforced composites considering multiple criteria. Materials & Design, 196, 109140.

[8] Zhang, Q., Hu, J., Feng, J., & Liu, A. (2020). A novel multiple criteria decision making method for material selection based on GGPFWA operator. Materials & Design, 195, 109038.

[9] Patnaik, P. K., Swain, P. T. R., Mishra, S. K., Purohit, A., & Biswas, S. (2020). Composite material selection for structural applications based on AHP-MOORA approach. Materials Today: Proceedings, 33, 5659-5663.

[10] Anojkumar, L., Ilangkumaran, M., & Sasirekha, V. (2014). Comparative analysis of MCDM methods for pipe material selection in sugar industry. Expert Systems with Applications, 41(6), 2964-2980.

[11] Chatterjee, P., Mandal, N., Dhar, S., Chatterjee, S., & Chakraborty, S. (2020). A novel decision-making approach for light weight environment friendly material selection. Materials Today: Proceedings, 22, 1460-1469.
[12] Kaspar, J., Choudry, S. A., & Vielhaber, M. (2020). Systemic Assessment and Selection of Material and Joining Technology Exemplarily Applied on the Automotive Bodywork. Procedia CIRP, 91, 201-206.
[13] Stoffels, P., Kaspar, J., Bähre, D., & Vielhaber, M. (2018). Integrated product and production engineering approach–a tool-based method for a holistic sustainable design, process and material selection. Procedia Manufacturing, 21, 790-797.
[14] Xue, Y. X., You, J. X., Lai, X. D., & Liu, H. C. (2016). An interval-valued intuitionistic fuzzy MABAC approach for material selection with incomplete weight information. Applied Soft Computing, 38, 703-713.
[15] Khajeh, M., Amiri, M., Ulfat, L., & Zandieh., M. (2020). Evaluation and selection of sustainable suppliers in intuitive fuzzy environment with a multi-criteria approach of the best worst and Vikor. Journal of Operations Research in its Applications (Applied Mathematics) - Lahijan Azad University, 17 (1), 25-48.
[16] EbrahimpourAzbari, M., Akbari, M., Abdollahi, A., & Movahedmanesh, V. (2018). Providing a Framework for Evaluating the Performance of Managers Using Fuzzy TOPSIS and Fuzzy Data Envelopment Analysis. Journal of Operations Research in its Applications (Applied Mathematics) - Lahijan Azad University, 14 (4), 89-107.
[17] Mahmoudkelaye, S., Azari, K. T., Pourvaziri, M., & Asadian, E. (2018). Sustainable material selection for building enclosure through ANP method. Case Studies in Construction Materials, 9, e00200.
[18] Chaudhary, B., Ramkumar, P. L., & Abhishek, K. (2018). Material Selection for Rotational Moulding Process Using Grey Relational Analysis Approach. Materials Today: Proceedings, 5(9), 19224-19229.
[19] Amiri, M., Hadinejhad, F., & Malekkhoyan, S. (2018). Evaluation and Prioritization of Suppliers with a Combined Entropy Approach, Modified Hierarchical and Primitive Analysis Process (Case Study: YouTube). Journal of Operations Research in its Applications (Applied Mathematics) - Lahijan Azad University, 14 (4), 1-20.
[20] Hamedi, M., & Tajik, Y. (۲۰۱۱). Experimental study and optimization of the quality of parts in rotational form. Journal of Computational Applied Mechanics, 44(1), 15-27.
[21] Moradian, M., Modanloo, V., & Aghaiee, S. (2018). Comparative analysis of multi criteria decision making techniques for material selection of brake booster valve body. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition).
[22] Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 69, 596-609.
[23] Sanjay, M. R., Jawaid, M., Naidu, N. V. R., & Yogesha, B. (2019). TOPSIS method for selection of best composite laminate. In Modelling of Damage Processes in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites (pp. 199-209). Woodhead Publishing.
[24] Jayakrishna, K., Kar, V. R., Sultan, M. T., & Rajesh, M. (2018). Materials selection for aerospace components. In Sustainable Composites for Aerospace Applications (pp. 1-18). Woodhead Publishing.
[25] Kumar, R., & Singal, S. K. (2015). Penstock material selection in small hydropower plants using MADM methods. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52, 240-255.
[26] Yang, S. S., Nasr, N., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2017). Designing automotive products for remanufacturing from material selection perspective. Journal of Cleaner Production, 153, 570-579.
[27] Ali, B. A., Sapuan, S. M., Zainudin, E. S., & Othman, M. (2015). Implementation of the expert decision system for environmental assessment in composite materials selection for automotive components. Journal of Cleaner Production, 107, 557-567.
[28] Bhosale, S. B., Bhowmik, S., & Ray, A. (2018). Multi Criteria Decision Making For Selection Of Material Composition For Powder Metallurgy Process. Materials Today: Proceedings, 5(2), 4615-4620.
[29] uz Zaman, U. K., Rivette, M., Siadat, A., & Mousavi, S. M. (2018). Integrated product-process design: Material and manufacturing process selection for additive manufacturing using multi-criteria decision making. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 51, 169-180.

[30] Loganathan, A., & Mani, I. (2018). A fuzzy based hybrid multi criteria decision making methodology for phase change material selection in electronics cooling system. Ain Shams Engineering Journal, 9(4), 2943-2950.
[31] Tian, G., Zhang, H., Feng, Y., Wang, D., Peng, Y., & Jia, H. (2018). Green decoration materials selection under interior environment characteristics: A grey-correlation based hybrid MCDM method. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 682-692.
[32] Zindani, D., & Kumar, K. (2018). Material Selection for Turbine Seal Strips using PROMETHEE-GAIA Method. Materials Today: Proceedings, 5(9), 17533-17539.
[33] Bahraminasab, M., & Jahan, A. (2011). Material selection for femoral component of total knee replacement using comprehensive VIKOR. Materials & Design, 32(8-9), 4471-4477.
[34] Sapuan, S. M., Kho, J. Y., Zainudin, E. S., Leman, Z., Ali, B. A., & Hambali, A. (2011). Materials selection for natural fiber reinforced polymer composites using analytical hierarchy process.
[35] Mansor, M. R., Sapuan, S. M., Zainudin, E. S., Nuraini, A. A., & Hambali, A. (2013). Hybrid natural and glass fibers reinforced polymer composites material selection using Analytical Hierarchy Process for automotive brake lever design. Materials & Design, 51, 484-492.
[36] Emovon, I., & Oghenenyerovwho, O. S. (2020). Application of MCDM method in material selection for optimal design: A review. Results in Materials, 7, 100115.
[37] Samadimiarkalai, H., Samadimiarkalai, H., & Bastami, M. (2017). Application of fuzzy Delphi method and fuzzy group hierarchy process in identifying and ranking the indicators affecting the development of organizational entrepreneurship. Journal of Innovation and Value Creation, 6(11), 61-74.
[38] Azar, A., & Faraji, H. (2016). Fuzzy management science. Tehran, Mehraban Book Institute.
[39] Kardaras, D. K., Karakostas, B., & Mamakou, X. J. (2013). Content presentation personalisation and media adaptation in tourism web sites using Fuzzy Delphi Method and Fuzzy Cognitive Maps. Expert Systems with Applications, 40(6), 2331-2342.
[40] Kuo, Y. F., & Chen, P. C. (2008). Constructing performance appraisal indicators for mobility of the service industries using Fuzzy Delphi Method. Expert Systems with Applications, 35(4), 1930-1939.
[41] Latifi, S., Raheli, H., Yadavar, H., Saadi, H., & Shahrestani, S. A., (2018). Identifying and explaining the implementation stages of conservation agriculture development in Iran with fuzzy Delphi approach. Journal of Iranian Biosystem Engineering, 49(1), 107-120.
[42] Torfi, F., Farahani, R. Z., & Rezapour, S. (2010). Fuzzy AHP to determine the relative weights of evaluation criteria and Fuzzy TOPSIS to rank the alternatives. Applied Soft Computing, 10(2), 520-528.
[43] Perçin, S. (2008). Use of fuzzy AHP for evaluating the benefits of information-sharing decisions in a supply chain. Journal of Enterprise Information Management, 21(3), 263-284.
[44] Dağdeviren, M., & Yüksel, İ. (2008). Developing a fuzzy analytic hierarchy process (AHP) model for behavior-based safety management. Information sciences, 178(6), 1717-1733.
[45] Ardakani, M.S., Ketabi, S.,h & Mohammadshafiei, M. (2013). Employee Ranking and Supervision Selection with a Combined Approach to Fuzzy Hierarchical Analysis Process and Fuzzy TOPSIS (Case Study, Ghadir Iranian Steel Plant). Journal of Production and Operations Management, 4(2), 1-22.
[46] Mokhtari, M., Tayybi, S.K., & Sadeghi, J. (2016). Prioritization of investment in the service sector by fuzzy TOPSIS decision-making method, case study: AT organization. Journal of Economic Research (Sustainable Growth and Development), 16 (1), 121-140.
[47] Sun, C. C. (2010). A performance evaluation model by integrating fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods. Expert systems with applications, 37(12), 7745-7754.
[48] Wang, T. C., & Lee, H. D. (2009). Developing a fuzzy TOPSIS approach based on subjective weights and objective weights. Expert systems with applications, 36(5), 8980-8985.
[49] Farhangi, A.A, Lotfi, M., & Karbasian, B. (2013). Measuring Customer Satisfaction Using Group Decision Making and Ftopsis Technique (Case Study of Pars Parand Hayan Company). Industrial Management Quarterly, 8(26), 1-10.
[50] Mohammadpourzarandi, M.I., Minoei, M., & Bighdeli, S. (2010). Designing a model for identifying and calculating quality costs in the automotive industry. Journal of Financial Studies, 7, 73-95.
[51] Ansari, M., & Zare, A. (1386). Determining the effective factors on technology selection and transfer: (Iran-Khodro body production line). Journal of Executive Management, 1(33), 37-56.
[52] Lashkarizadeh, M., & eshaghi, M. (2017). Investigating the effect of nanotechnology on the environment. Environmental Science and Technology, 19(1), 49-61.

[53] Lee, A. H., Kang, H. Y., Hsu, C. F., & Hung, H. C. (2009). A green supplier selection model for high-tech industry. Expert systems with applications, 36(4), 7917-7927.
[54] Feaizpour, M. A & Rezaei Nojini, A. (2012). Level of technology and possibility of exit of new enterprises in Iran's manufacturing industries using Cox risk model. Quarterly Journal of Economic Research, 12(3), 107-132.
[55] Aghaei, M., & Basiro, S.O. (2015). Ranking of technological capability in the member countries of the Organization for Economic Cooperation and Development with a multi-criteria decision-making approach. Quarterly Journal of Information Technology Management Studies, 3(11), 97-122.
[56] Rahmani, Kamaluddin and Alizadeh, Hossein. (2008). Assessing the level and capability of technology in the country's industries based on the ESCAP model and providing technology development strategies. Management Sciences, 1(3), 205-237.
[57] Elahi, S., Ghanbari, M.H & Shayan, A. (2012). Determining the effective factors in the acceptance of mobile banking technology by customers. Quarterly Journal of Business Research, 63, 27-49.
[58] Kannan, D., Govindan, K., & Rajendran, S. (2015). Fuzzy Axiomatic Design approach based green supplier selection: a case study from Singapore. Journal of Cleaner Production, 96, 194-208.