

ارائه یک رویکرد هیبریدی فازی در مسئله انتخاب مواد با بکارگیری تکنیک WASPAS-F

مرتضی یوسفی^۱، نبی اله محمدی^{۲*}، هما درودی^۳

^۱دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران
^۲استادیار، گروه مدیریت، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران (عهده‌دار مکاتبات)

^۳دانشیار، گروه مدیریت، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران
تاریخ دریافت: فروردین ۱۴۰۰، اصلاحیه: خرداد ۱۴۰۰، پذیرش: تیر ۱۴۰۰

چکیده

در کسب و کارهای امروزه به دلیل پیچیدگی و دخیل بودن عوامل متعدد، یکی از چالش‌های بزرگ که تولیدکنندگان با آن مواجه هستند، فرایند انتخاب مواد بهینه برای تولید محصول می‌باشد. از آنجایی که انتخاب مواد، اثر بسیار مهمی بر پایداری محصول نهایی می‌گذارد، بنابراین بکارگیری رویکردی موثر و کارا، با شناسایی و اعمال شاخص‌های اثرگذار به صورت جامع می‌تواند منجر به افزایش رضایت تولید کننده و مشتری گردد. در این راستا در این پژوهش رویکردی جامع ارائه گردید که با بکارگیری ابزارهای قدرتمندی همچون دلفی فازی، تحلیل سلسله مراتبی فازی و واسپاس فازی و با نظرسنجی از خبرگان و استفاده از پرسشنامه، اقدام به انتخاب مواد بهینه از میان گزینه‌های جایگزین می‌نماید. همچنین جهت بررسی قابلیت رویکرد پیشنهادی یک مطالعه واقعی جهت انتخاب مواد پلیمری داشبورد خودرو صورت گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده ترکیب پلی‌پروپیلن و تالک بر اساس شاخص‌های پایدار و زیرشاخص‌های مرتبط با آنها به عنوان بهترین گزینه انتخاب گردید. سپس تحلیل حساسیت بر اساس مقادیر مختلف λ جهت اطمینان از نتایج به دست آمده صورت گرفته و نتایج روش واسپاس فازی با نتایج روش تاپسیس فازی مورد مقایسه قرار گرفته و همبستگی نتایج نیز تایید گردید.

واژه‌های اصلی: رویکرد هیبریدی، انتخاب مواد، تکنیک FAHP، تکنیک WASPAS-F

۱- مقدمه

عوامل تولید و منابع کمیاب^۱ و رسیدن به اثربخشی است [۹]. از طرفی با توجه به اینکه اجرای چندین آلترناتیو و فرآیند تولید، نیاز به توازن بین پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی دارد اما تاکیدات سیستم ارزیابی انتخاب مواد در حال حاضر عمدتاً بر خصوصیات اقتصادی تمرکز دارد، درحالی‌که باید تمامی اجزا به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شود که این موضوع در مورد صنایع مشتری محور با رقابت بالا مثل صنایع خودروسازی، خود را بیشتر نشان می‌دهد [۴۰ و ۴۵]. از طرفی سازمان‌ها در وضعیت رقابتی متأثر از توسعه تکنولوژی و سرعت فزاینده انتشار تکنولوژی جدید قرار می‌گیرند [۲]. همچنین با افزایش مشکلات کمبود منابع و زوال محیط زیست، ویژگی‌های زیست محیطی نیز به‌طور فزاینده‌ای در توسعه صنعتی پایدار دارای اهمیت شده و به صورت گسترده مورد توجه قرار گرفته است [۴۵]. انتخاب صحیح مواد باعث بهبود کیفیت و افزایش چرخه عمر محصول شده و انتخاب ضعیف منجر به شکست نابهنگام برخی از معیارهای مهم شامل مشخصات مکانیکی، خصوصیات فیزیکی، ویژگی‌های سایش، خصوصیات ساخت، هزینه مواد، تأثیر مواد

انتخاب مواد مناسب برای کاربردهای مختلف مهندسی یکی از چالش‌هایی است که تمامی مهندسان با آن روبرو هستند [۲۰]. با توجه به پیشرفت علم مواد و توسعه فرایندهای تولید، انواع مواد مورد استفاده در ساخت محصول و الزاماتی که بایستی در فرآیند انتخاب در نظر گرفته شوند در حال افزایش و فراگیرتر شدن بوده و این انتخاب‌های گسترده و نیازهای جامع، مسئله انتخاب مواد را پیچیده‌تر می‌کند [۴۶]. انتخاب ماده مناسب و قابل اعتماد یکی از مهم‌ترین و چالش برانگیزترین وظایف طراحان و تولیدکنندگان به دلیل ترکیب مداوم ویژگی‌های پیشرفته مختلف است که باعث افزایش پیچیدگی‌ها می‌شود [۳۹]. انتخاب مواد بهینه از ماده جایگزین یکی از موضوعات بسیار مهم در تولید محصول بوده و نتایج آن به‌طور مستقیم بر عملکرد و هزینه محصول تأثیر می‌گذارد. برای یک محصول خاص، مواد بهینه منجر به تولید محصول با بهترین عملکرد و کمترین هزینه می‌گردد [۴۶]. یکی از مهم‌ترین اهداف سازمان‌ها استفاده بهینه از

* nabi_mohammadi@yahoo.com

امروزه با توجه به مسئله کمیاب بودن منابع یکی از مهم‌ترین اهداف سازمان، استفاده بهینه از عوامل تولید و رسیدن به اثربخشی است [۹]. در بخش خودرو با توجه به رقابتی شدن و افزایش هزینه‌های مربوط به منابع، قوانین و مقررات زیست محیطی سخت‌گیرانه‌تر، گرایش به سمت سبک وزن بودن سیستم و نیاز مشتری برای وسایل نقلیه ایمن و راحت سبب شده تا انواع فزاینده‌ای از مواد فردی و ترکیبی ظاهر شود [۲۶]. استفاده از مواد مدرن در ساخت خودرو منجر به کاهش وزن شده که صرفه‌جویی در مصرف سوخت بدون تاثیر منفی بر عملکرد خودرو را موجب می‌گردد. مواد کامپوزیتی به دلیل دارا بودن خواص داخلی مانند مقاومت در برابر خوردگی، سختی بیشتر و نسبت مقاومت به وزن بالا، انعطاف‌پذیری در محکم کردن و افزایش خواص مواد، پخت با خواص مطلوب برای طیف وسیعی از کاربردهای صنایع هوا فضا و خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد. مواد کامپوزیتی سبک و مقاوم با خواصی جذاب بیش از مواد معمولی بیشتر محققان را برای کاربردهای ممکن کامپوزیت‌ها در حوزه‌های مختلف مجذوب ساخته است [۱۶]. از جمله موادی که در ساخت قطعات پلیمری خودرو استفاده می‌شوند می‌توان به پلی‌پروپیلن^۵ (PP)، اکریلونیتریل بوتادین استایرن^۶ (ABS)، پلی یورتان^۷ (PU) و یا ترکیبات این مواد با مواد دیگر اشاره نمود. پلی‌پروپیلن پلیمری گرمانرم و نیمه بلوری است که به دلیل فرایند پذیری آسان، در دسترس بودن و قیمت کم آن به‌طور گسترده در بسیاری از کاربردهای صنعتی استفاده می‌شود. اختلاط PP با یک الاستومر گرمانرم و تهیه مخلوط آن‌ها می‌تواند روش مفیدی برای بهبود مقاومت به ضربه و کارایی پلی‌پروپیلن باشد، اما هم‌زمان استحکام و سفتی آن کاهش می‌یابد [۷]. ترکیب پلی‌پروپیلن با پرکننده‌های غیر آلی مانند تالک منجر به کاهش وزن قطعات خودرو و در نتیجه کاهش مصرف سوخت می‌گردد. ABS نیز یک پلیمر ترموپلاستیک رایج است که در ساخت قطعات خودرو استفاده می‌شود. از مزایای آن می‌توان به مقاومت در برابر ضربه، ظاهر خوب و قدرت متوسط، مقاومت خوب در برابر اسیدها و بازها و ارزش اقتصادی بالا اشاره نمود. برخی نیز از معایب آن شامل محدودیت مقاومت در برابر هوا، گرما و رطوبت، مقاومت متوسط در برابر مواد شیمیایی، هزینه نسبتاً بالا و قابلیت اشتعال با دود زیاد نام برد [۲۱]. همچنین پلی یورتان نیز یک ماده پلیمری است که به دلیل دسترسی آسان، سازگاری با محیط، مقاومت در برابر واکنش شیمیایی در اتومبیل‌سازی کاربرد فراوانی دارد [۴۱]. پلی یورتان‌ها می‌تواند طیف وسیعی از خصوصیات مکانیکی و فیزیکی، حرارت‌دهی گرمانرم، پایداری یا

بر محیط زیست، زیبایی، بازیافت و غیره، که در هنگام انتخاب مواد بایستی در نظر گرفته شوند می‌گردد [۳۶]. انتخاب نادرست مواد اغلب منجر به خرابی زود هنگام محصول با کاهش کارایی و تولید محصول ضعیف شده و می‌تواند تأثیر منفی بر بهره‌وری، سودآوری و شهرت یک سازمان بگذارد. وظیفه انتخاب مواد و معیارهای بین آن‌ها می‌تواند روند انتخاب مواد را دشوار و وقت‌گیر کند. از این رو به کارگیری رویکردی منظم و کارآمد در انتخاب مواد برای انتخاب بهترین گزینه برای یک محصول کاملاً ضروری است [۱۴ و ۱۷].

با توجه به اینکه در انتخاب ماده بهینه از بین گزینه‌های مختلف بایستی پارامترهای مختلفی در نظر گرفته شود، بهترین تصمیم انتخاب موادی است که بالاترین درجه رضایت را برای خواص مختلف داشته باشند. بدین منظور رویکرد MCDM^۲ یک ابزار بسیار قوی برای حل مسائل پیچیده انتخاب مواد در قطعات متفاوت است [۳۵]. از طرفی با توجه به مهم بودن شناخت انسان و عدم اطمینان از ویژگی‌های مادی، معیار اطلاعات مواد جایگزین معمولاً مبهم و نامشخص است. بنابراین روش‌های MCDM با مجموعه فازی برای حل مسئله انتخاب مواد مختلف مناسب‌تر است [۴۶]. همچنین با توجه به پیچیدگی در امر تصمیم، استفاده از خبرگان و متخصصان برای بررسی تمامی جهات یک مسئله تصمیم‌گیری موردی اجتناب‌ناپذیر است [۶].

در این پژوهش سعی نمودیم تا با پر کردن شکاف به وجود آمده در بحث انتخاب مواد به تولیدکنندگان صنایع خودروسازی ابزار شفافی ارائه دهیم که آن‌ها را در تصمیمات پیچیده‌ای که می‌گیرند، پشتیبانی نموده و با شناسایی شاخص‌های جدید به همراه زیر شاخص‌های مرتبط و ارائه یک رویکرد علمی در محیط فازی، ریسک انتخاب مواد صحیح و بهینه، در صنعت حساسی مانند صنعت قطعات خودرو بخصوص بخش مواد پلیمری کاهش یابد. بر این اساس، رویکرد پیشنهادی این پژوهش شامل سه بخش است: در فاز 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 فاز دوم با انجام مقایسات زوجی به کمک خبرگان و محاسبه نرخ ناسازگاری، با به کارگیری تکنیک FAHP^۳ اوزان هر یک از شاخص‌ها استخراج شده و در فاز سوم با بهره‌گیری از روش WASPAS-F^۴ گزینه‌ها بر اساس شاخص‌های تأیید شده رتبه‌بندی می‌شوند. همچنین جهت اطمینان از ثبات نتایج رویکرد پیشنهادی، سناریوهای مختلف تحلیل حساسیت نیز مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲- مبانی نظری و پیشینه تحقیق

5 Polypropylene
5 Acrylonitrile butadiene styrene
6 Polyurethane

2 Multiple Criteria Decision Making.
3 Fuzzy Analytical Hierarchy process.
4 Weighted Aggregated SumProduct Assessment.

قابل تجزیه بودن، آب‌گریز یا آب‌دوست بودن را بسته به ترکیب و روش سنتز اعمال شده داشته باشند [۲۲].

همچنین در خصوص معیارها نیز می‌توان گفت که از طریق اصول پایدار، معیارهای انتخاب مواد شامل عوامل اقتصادی، فنی، اجتماعی و محیطی است [۳۲]. در بحث انتخاب مواد کومار و همکاران [۲۷] به مداخله معیارهای متعددی مانند فنی، اجتماعی، اقتصادی و محیطی اشاره نموده و معتقدند سیستم تصمیم‌گیری بایستی تمام معیارها و اهداف را به‌طور هم‌زمان مورد توجه قرار می‌دهد. 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 [۴]. مک آتومی (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. به این ترتیب انتخاب نوع مواد در فاز طراحی به صورت 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. در نتیجه 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 مسائل بسیار ضروری در جهت تولید است [۴۰]. توجه به عوامل اثرگذار در تولید قطعات پلیمری خودرو منجر به کاهش ضایعات و هزینه‌های تولیدی و در نهایت قیمت تمام شده محصول و همچنین تولید قطعات با کیفیت مطلوب، رضایت بیشتر مصرف‌کننده و افزایش قدرت رقابت می‌شود [۵].

کارانده و چاکابورتی [۲۴] بیان می‌کنند طراحان باید ضمن انتخاب مناسب‌ترین مواد از بین مجموعه‌های روزافزون با ویژگی‌ها، کاربردها، مزایا و محدودیت‌های خاص خود بایستی درک درستی از نیازهای عملکردی هر یک از اجزا و دانش دقیق معیارهای در نظر گرفته‌شده برای یک طراحی مهندسی خاص داشته باشند. عدم انتخاب مواد ممکن است غالباً منجر به درگیر شدن هزینه‌های زیادی شود و در نهایت منجر به خرابی اجزای زودرس محصول شود. انتخاب مواد مناسب برای اجزای مختلف یکی از چالش برانگیزترین وظایف در طراحی و توسعه محصولات برای کاربردهای مختلف مهندسی است. بنابراین طراحان نیاز به شناسایی و انتخاب مواد مناسب با ویژگی‌های خاص دارند تا بتوانند با حداقل مشارکت هزینه و کاربرد خاص، خروجی موردنظر را به دست آورند.

بر اساس مطالعات مربوط به تحقیقات قبلی می‌توان به پژوهشی امون و اوکن‌پروهو [۱۹] بر روی ۵۵ مقاله علمی از ۱۹۹۴-۲۰۱۹ در زمینه تجزیه و تحلیل مشکلات انتخاب مواد اشاره نمود. آن‌ها بیان نمودند تکنیک MCDM یک ابزار بسیار مفید در تصمیم‌گیری انتخاب مواد است. بر اساس نتایج پژوهش آن‌ها، روش ترکیبی متشکل از حداقل دو روش MCDM کاربردی‌ترین روش برای انتخاب مواد در تمام مناطق کاربردی است.

تجزیه و تحلیل ELECTRE، MAUT، VIKOR، AHP و TOPSIS برخی از ابزارهای محبوب MCDM در انتخاب مواد بوده و معیار هزینه کاربردی‌ترین معیار تصمیم‌گیری برای تجزیه و تحلیل در مسئله انتخاب مواد است. همچنین در سال‌های اخیر محققان مختلفی با در نظر گرفتن شاخص‌های مختلف و متعددی، تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) را در بحث انتخاب مواد پیشنهاد کردند که به برخی از آن‌ها در جدول ۱ اشاره می‌کنیم.

مطلب قابل ذکر اینکه بر اساس مطالعات تجربی صورت گرفته موردی از کاربرد WASPAS-F برای حل مسائل مربوط به انتخاب مواد مشاهده نگردیده است. اما در برخی از زمینه‌های دیگر، تعدادی از محققین از این روش در مسائل تصمیم‌گیری استفاده نمودند. از جمله می‌توان به تورسکیس [۴۴] در خصوص انتخاب سایت ساخت و ساز مرکز خرید، آگراوال [۱۲] در خصوص ارزیابی راه‌حل‌های غلبه بر مدیریت زنجیره تأمین بشردوستانه، میشر و رانی [۳۴] در خصوص سیاست مدیریت کنترل سیل مخزن اشاره نمود.

جدول (۱): تحقیقات انجام گرفته در مسئله انتخاب مواد با رویکرد MCDM

موضوع مطالعه	نویسندگان	سال	شاخصها	تکنیک پیشنهادی
باتری‌های لیتیوم-ایون	Loganathan et all	۲۰۲۰	قابلیت اطمینان، قیمت، ایمنی، قدرت خاص تراکم و انرژی خاص.	WSM
مواد مهندسی	Goswami & Behera [20]	۲۰۲۰	حد خستگی خمش، سختی هسته، هزینه، سختی سطح، مقاومت کششی نهایی و محدودیت خستگی سطح.	Antropi, ARAS
مواد سبک‌وزن در خودرو	Chatterjee et all [17]	2020	تراکم، مدول الاستیسیته، مقاومت تسلیم، مقاومت کششی، بخش بازیافت، مقاومت در برابر خوردگی، عملکرد حرارتی، مقاومت در برابر سایش، سلامتی، ضربه‌پذیری، فرم دهی، اتصال و نقاشی.	Antropi, MAIRCA
قاب کامپوزیتی جلویی قطار	Zhang et all	2020	اثرات زیست‌محیطی (شامل حفاظت از محیط‌زیست، استخراج ماده اولیه، پتانسیل بازیافت و استفاده مجدد)، اقتصادی (شامل هزینه نگهداری و هزینه دفع)، اجتماعی (شامل سطح سبک‌وزن، بازده تولید)، فیزیکی (شامل مقاومت کششی، مدول الاستیسیته، طول کشش، جذب انرژی).	Fuzzy G-VIKOR
کامپوزیت پلیمر	Patnaik et all	۲۰۲۰	خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و سایش مواد ترکیبی (مانند چگالی، سختی، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، مقاومت در برابر ضربه و میزان سایش خاص).	AHP-MOORA
مواد کامپوزیتی	Singh et all	2020	خمش، استحکام ضربه، سختی، چگالی، استحکام کششی و سایش.	FAHP, M-topsis
لمینت کامپوزیت	Sanjay et all	2019	دانشیه، استحکام کششی، استحکام خمشی، مقاومت برشی، ضربه‌پذیری و جذب آب.	TOPSIS
خودروسازی پایدار	Stoycheva et all	2018	اجتماعی (کیفیت کار، کمیت کار، تاثیر جامعه، سیاسی، سلامت و ایمنی)، اقتصادی (سرمایه‌گذاری مورد نیاز، سودآوری، هزینه برای کاربر نهایی) و محیط زیستی (استفاده از آب، مواد اولیه، انرژی).	AHP, MAVT
پانل خودرو	Gul et all	2018	سطح سمیت، هزینه، استحکام کششی، هدایت حرارتی، وزن، کشیدگی، قابلیت بازیافت، حد دما.	MCDM
مینفولد خودرو	Yang et all	2017	دوام، قابلیت بازیافت، ترمیم‌پذیری/ قابلیت ارتقاء، بهداشت ایمنی و محیط.	Entropy, FTOPSIS
خودرو	Ali et all	2015	دانشیه، استحکام کششی، مدول یانگ، سطح سمیت، توانایی تخریب زیستی، هزینه مواد خام و هزینه تجهیزات.	AHP
متالورژی پودر	Bhosale et all	2018	استحکام کششی، سختی، درصد تغییر ابعادی و درصد کشیدگی.	topsis
دکوراسیون سبز	Tian et all	2018	فنی، اقتصادی، محیط زیستی، اجتماعی.	AHP, GC-TOPSIS
فیبر طبیعی	Sapuan et all	2011	چگالی، مدول یانگ و استحکام کششی.	AHP

۳- روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف از نوع آمیخته (کیفی و کمی) و از نظر نحوه جمع‌آوری داده‌ها توصیفی-پیمایشی است. از آنجا که 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 به صورت هدفمند و قضاوتی انتخاب شده و مورد نظرسنجی قرار گرفتند. در این پژوهش برای جمع‌آوری داده‌ها از ابزار پرسشنامه استفاده شده است. رویکرد پیشنهادی در این پژوهش شامل سه بخش می‌باشد. در فاز اول پس از تجزیه و تحلیل مسئله تحقیق و مطالعات کتابخانه‌ای معیارهای

انتخاب مواد در تولید پایدار شناسایی و با نظرسنجی از خبرگان و استفاده از تکنیک دلفی فازی غربال‌سازی و سپس سلسله مراتب تصمیم تشکیل می‌گردد. در فاز دوم با بهره‌گیری از تکنیک FAHP و نظرات خبرگان انتصابی، ماتریس مقایسات زوجی تشکیل و نرخ ناسازگاری آن‌ها محاسبه، و شاخص‌ها و زیرشاخص‌های مرتبط وزن‌دهی می‌شوند. در فاز سوم گزینه‌های مسئله بر اساس شاخص‌های تأیید شده با استفاده از تکنیک WasPAS-F مورد رتبه‌بندی قرار می‌گیرند. همچنین جهت بررسی از قابلیت اطمینان نتایج به‌دست‌آمده، تجزیه و تحلیل حساسیت بر اساس مقادیر مختلف λ صورت گرفته و نتایج روش پیشنهادی با روش FTopsis مقایسه شده و نهایتاً همبستگی نتایج با روش همبستگی پیرسون بررسی می‌گردد.

جدول (۲): روابط موجود در تکنیک **FDelfi** [۱۸]

$$u_M(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m} & m \leq x \leq u \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$\bar{A}^{(i)} = (a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, a_3^{(i)}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$\bar{A}_m^{(i)} = a_{m1}, a_{m2}, a_{m3} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_1^i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_2^i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_3^i \right) \quad (3)$$

$$(a_{m1} - a_1^{(i)}, a_{m2} - a_2^{(i)}, a_{m3} - a_3^{(i)}) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_1^i - a_1^{(i)}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_2^i - a_2^{(i)}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_3^i - a_3^{(i)} \right) \quad (4)$$

$$\bar{B}^{(i)} = (b_1^{(i)}, b_2^{(i)}, b_3^{(i)}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

$$\bar{B}_m^{(i)} = b_{m1}, b_{m2}, b_{m3} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_1^i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_2^i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_3^i \right) \quad (6)$$

$$S_j = \frac{u_j + m_j + l_j}{3} \quad (7)$$

$$S(\bar{B}_m, \bar{A}_m) = \frac{1}{3} [(b_{m1}, b_{m2}, b_{m3} - a_{m1}, a_{m2}, a_{m3})] \quad (8)$$

تکنیک تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP). یکی از برجسته‌ترین رویکردهای MCDM روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی است که برای تعیین وزن نسبی و کل عوامل و همچنین مقادیر هر گزینه بر اساس وزن‌ها استفاده می‌گردد [۴۳]. اما هنگامی که پیچیدگی‌های مسئله و همین‌طور نیاز به نتایج دقیق افزایش پیدا می‌کند، برای حل مشکلات تصمیم‌گیری‌های پیچیده یک روش به‌روز شده موردنیاز است [۳۹]. رتبه‌بندی AHP به دلیل عدم نشان دادن ابهام در تفکرات انسانی نمی‌تواند دقیق باشد. از این‌رو نظریه مجموعه‌های فازی برای مقابله با اصطلاحات زبانی برای مقابله با مشکلات تصمیم‌گیری در AHP ترکیب شد [۳۱]. روش FAHP از اعداد فازی برای بیان میزان ارجحیت عناصر استفاده می‌کند و با عبارات کلامی، مفهوم فازی بودن را در تعیین ماتریس مقایسات زوجی دخالت می‌دهد. در این زمینه، روش‌هایی توسط ون لاروون و پدریچ، باکلی و چانگ ارائه شده است [۳]. چانگ یک روش بسیار آسان و پرکاربرد را برای بسط فرایند تحلیل سلسله مراتبی به فضای فازی بر اساس نظرسنجی از خبرگان با اعداد مثلثی فازی ارائه کرد [۸]. مراحل آنالیز توسعه چانگ به شرح زیر است [۳ و ۱۰]:

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.

در اینجا به تشریح تکنیک‌های تصمیم‌گیری مورد کاربرد در این پژوهش می‌پردازیم:

روش دلفی فازی (FDelfi): 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 [۱۰]. در دلفی کلاسیک، نظرات خبرگان به صورت 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 [۱]. از مزایای روش دلفی فازی در توجه به نظرات تمامی خبرگان و یکپارچه کردن نظرات آن‌ها برای دستیابی به توافق گروهی است [۲۸]. برای نشان دادن نظر خبرگان از توابع عضویت مختلفی (مثلثی، دوزنقه و گاوسی) استفاده می‌شود [۲۵]. روابط موجود در این روش در جدول ۲ مشاهده می‌گردد.

در این روش عدد فازی مثلثی با سه عدد حقیقی به صورت $M=(l,m,u)$ استفاده شده است. تابع عضویت یک عدد فازی مثلثی، به صورت رابطه ۱ است. متغیرهای کلامی را به اعداد فازی مثلثی تبدیل و مجموعه اعداد فازی مثلثی برای هر خبره با رابطه ۲ محاسبه می‌گردد. در مرحله بعد میانگین مجموعه‌ها $\bar{A}_m^{(i)}$ از تمامی مجموعه‌ها $\bar{A}^{(i)}$ را به کمک رابطه ۳ و مقدار اختلاف از میانگین برای هر خبره را با استفاده از رابطه ۴ محاسبه کرده و پس از انجام مراحل فوق پرسشنامه قبلی را اصلاح و بایان میانگین نظرات و اختلاف‌نظر قبلی هر یک از آن‌ها با میانگین، دوباره برای اعضا پانل خبرگان ارسال می‌گردد تا در صورت نیاز، خبرگان در قضاوت‌های خود بازنگری می‌کنند. نظرات اصلاح شده خبرگان در قالب اعداد فازی مثلثی در مرحله دوم به کمک رابطه ۵ و میانگین نظرات اصلاح شده را به کمک رابطه ۶ محاسبه کرده و مقادیر به دست آمده را با استفاده از رابطه ۷ دی فازی می‌نماییم. سپس میزان اختلاف‌نظر خبرگان در دو مرحله، از طریق رابطه ۸ محاسبه می‌گردد. 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.

قابل ذکر است جهت استفاده از ماتریس مقایسات زوجی بایستی ناسازگاری ماتریس کمتر از حد مجاز (0/1) باشد در غیر این صورت ماتریس مقایسات نیاز به اصلاح یا تکرار دارند [۱۹].

تکنیک واسپاس فازی (WASPAS-F): تکنیک واسپاس (مجموع ارزیابی وزنی محصول) یکی از قوی ترین تکنیک های MCDM است. واسپاس WSM (مدل مجموع وزنی) و WPM (مدل ضرب وزنی) را برای توسعه تصمیم گیری جمع کرده و عملکرد صحیح تری نسبت به سایر تکنیک های MCDM ارائه می دهد. این روش گزینه ها را با استفاده از سه معیار بهینه سازی، ارزیابی می کند. ابتدا گزینه ها را از نظر مجموع وزنی با WSM ارزیابی کرده، سپس گزینه ها را از نظر ضرب معیارهای نمایی با استفاده از WPM ارزیابی می کند و نهایتاً تجمع وزنی روش افزودنی و ضرب را مورد ارزیابی قرار می دهد که نشان دهنده یک وضعیت واقع بینانه تر است. روش WASPAS این امکان را ایجاد می کند، که گزینه ها با درجه بالایی از اطمینان ارزیابی و رتبه بندی شوند. در سال ۲۰۱۵ تورسکیس و همکاران با توسعه روش واسپاس در محیط های فازی (WASPAS-F) را ارائه دادند. این روش برای بسیاری از مسائل تصمیم گیری تحت شرایط مختلف استفاده می گردد. در رویکرد واسپاس فازی، گزینه ها بر اساس معیارهای بهینه ترکیبی از WSM و WPS به دست می آیند [۱۲]. روابط موجود در این روش واسپاس فازی در فاز سوم مشاهده می گردد.

گام های حل مسئله در روش WASPAS-F بر اساس مراحل زیر است [۴۴]:

گام ۱: تشکیل ماتریس تصمیم گیری فازی با استفاده از اعداد مثلثی (\hat{X}_{ij}) با استفاده از جدول ۵.

که در آن $n =$ تعداد معیارهای ارزیابی (عوامل)، $m =$ تعداد گزینه ها و $\tilde{x}_{ij} =$ مقدار فازی نشان دهنده ارزش عملکرد گزینه i از نظر معیار j است.

$$\hat{X}_{ij} = \begin{matrix} A_1 & \begin{bmatrix} \hat{x}_{11} & \hat{x}_{12} & \hat{x}_{13} & \dots & \hat{x}_{1n} \\ \hat{x}_{21} & \hat{x}_{22} & \hat{x}_{23} & \dots & \hat{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \hat{x}_{m1} & \hat{x}_{m2} & \hat{x}_{m3} & \dots & \hat{x}_{mn} \end{bmatrix} \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \quad (17)$$

گام ۲: نرمال سازی ماتریس تصمیم گیری فازی با استفاده از روابط ۱۸ و ۱۹.

$$\tilde{\tilde{x}}_{ij} = \frac{\tilde{x}_{ij}}{\max_i \tilde{x}_{ij}} \quad \text{if } \max_i \tilde{x}_{ij} \text{ is preferable} \quad (18)$$

$$i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}$$

$$\tilde{\tilde{x}}_{ij} = \frac{\min_i \tilde{x}_{ij}}{\tilde{x}_{ij}} \quad \text{if } \min_i \tilde{x}_{ij} \text{ is preferable} \quad (19)$$

گام ۳: محاسبه ماتریس تصمیم گیری نرمال وزن دار برای WSM با رابطه ۲۰ و برای WPM با رابطه ۲۱.

$$\tilde{\tilde{x}}_{ij} = \tilde{\tilde{x}}_{ij} \tilde{w}_j \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n} \quad (20)$$

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

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (9)$$

اگر $M_{gi}^j = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ باشد، آنگاه $\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ به وسیله عملگر جمع فازی روی آنالیز توسعه m آرمان به صورت زیر تعریف می شود:

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (l_{i1}, m_{i1}, u_{i1}) \oplus \dots \oplus (l_{im}, m_{im}, u_{im})$$

$$= \left(\sum_{j=1}^m l_{ij}^m, \sum_{j=1}^m m_{ij}^m, \sum_{j=1}^m u_{ij}^m \right) (\hat{l}_i, \hat{m}_i, \hat{u}_i) \quad (10)$$

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

$$\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right)^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^m \hat{u}_i}, \frac{1}{\sum_{j=1}^m \hat{m}_i}, \frac{1}{\sum_{j=1}^m \hat{l}_i} \right) \quad (11)$$

گام ۴: محاسبه درجه ارجحیت S_i بر S_k .

$$V(S_i \geq S_k) = \text{SUP}(\min\{a_{s_i}(x), a_{s_k}(y)\}) \quad (12)$$

که برای اعداد فازی مثلثی معادل با رابطه زیر است:

$$V(S_i \geq S_k) = a_s(d)$$

$$= \begin{cases} 1 & \text{if } m_i \geq m_k \\ 0 & \text{if } l_k \geq u_i \\ \frac{l_k - u_i}{(m_i - u_i) - (m_k - l_k)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

گام ۵: محاسبه درجه ارجحیت یک عدد فازی محدب S که k بزرگتر از عدد فازی محدب S_i و $i = 1, 2, \dots, k$ باشد به صورت تعریف می شود:

$$V(S \geq S_1, S_2, \dots, S_k)$$

$$= (V((S \geq S_1), (S \geq S_2), \dots, (S \geq S_k)))$$

$$= \min(V((S \geq S_1), (S \geq S_2), \dots, (S \geq S_k)))$$

$$= \min V(S \geq S_i) \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (14)$$

چنانچه برای هر $k = 1, 2, \dots, n$ $k \neq i$ فرض کنیم که $d(A_i) = \min V(S_i, S_k)$ به صورت زیر درمی آید:

$$\tilde{W} = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n)) \quad (15)$$

گام ۶: نرمالیزه کردن بردار \tilde{W} و به دست آوردن وزن نرمالیزه شده W .

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n)) \quad (16)$$

فاز II) تعیین اوزان نسبی و نهایی شاخص‌ها با تکنیک FAHP در این مرحله عوامل اثرگذار در انتخاب مواد پلیمری خودرو (شاخص‌ها و زیر شاخص‌های مرتبط) مورد مقایسات زوجی قرار گرفته و اوزان (W_j) هریک از آن‌ها تعیین گردید. برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز پرسشنامه‌ای شامل ۶ مقایسه زوجی (یک مقایسه زوجی برای شاخص‌های اصلی و ۵ مقایسه زوجی برای زیر شاخص‌ها) طراحی شده و توسط خبرگان تکمیل و اوزان شاخص‌های اصلی و فرعی محاسبه و با ضرب این مقادیر در یکدیگر اوزان نهایی زیر شاخص‌ها تعیین گردید (جدول ۴). در ضمن جهت تأیید جداول مقایسات زوجی، نرخ ناسازگاری نیز محاسبه گردید.

فاز III) رتبه‌بندی گزینه‌ها با تکنیک WASPAS-F: در این مرحله گزینه‌های مسئله بر اساس شاخص‌های تأیید شده و اوزان به دست آمده برای آن‌ها مورد رتبه‌بندی قرار گرفته‌اند. بر این منظور در ابتدا ماتریس تصمیم را تشکیل داده و با استفاده از روابط ۱۸ و ۱۹ اقدام به نرمال‌سازی ماتریس تصمیم می‌نماییم. سپس ماتریس تصمیم‌گیری نرمال وزن‌دار برای WSM (Q) با رابطه ۲۰ و برای WPM (P) با رابطه ۲۱ محاسبه می‌کنیم. در ادامه مقادیر عملکرد بهینه برای هر گزینه WSM را با رابطه ۲۲ و برای WPM را با رابطه ۲۳ محاسبه کرده و به کمک روابط ۲۴ و ۲۵ مقادیر Q و P را دیفازی می‌نماییم. در انتها نیز مقدار یکپارچه عملکرد مطلوب (با مقدار بهینه λ) برای گزینه جایگزین را با رابطه ۲۶ به دست می‌آوریم (جدول ۵).

$$\tilde{\tilde{x}}_{ij} = \tilde{\tilde{x}}_{ij}^{\tilde{w}_j} \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n} \quad (21)$$

گام ۴: محاسبه مقادیر عملکرد بهینه برای هر گزینه WSM با رابطه ۲۲ برای هر گزینه WPM با رابطه ۲۳.

$$\tilde{Q}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{\tilde{x}}_{ij}, \quad i = \overline{1, m} \quad (22)$$

$$\tilde{P}_i = \prod_{j=1}^n \tilde{\tilde{x}}_{ij}, \quad i = \overline{1, m} \quad (23)$$

گام پنجم: دی‌فازی کردن مقادیر Q_i و P_i با استفاده از رابطه ۲۴ و ۲۵.

$$Q_i = \frac{1}{3}(Q_{i\alpha}, Q_{i\beta}, Q_{i\gamma}) \quad (24)$$

$$P_i = \frac{1}{3}(P_{i\alpha}, P_{i\beta}, P_{i\gamma}) \quad (25)$$

گام ششم: محاسبه مقدار یکپارچه عملکرد مطلوب برای یک گزینه با رابطه ۲۶. در بخش ادغام روش مجموع وزنی WSM و WPM با همدیگر ادغام می‌گردند.

$$K_i = \lambda \sum_{j=1}^m Q_i + (1 - \lambda) \sum_{j=1}^m P_i \quad (26)$$

$$\lambda = 0, \dots, 1, \quad 0 \leq K_i \leq 1$$

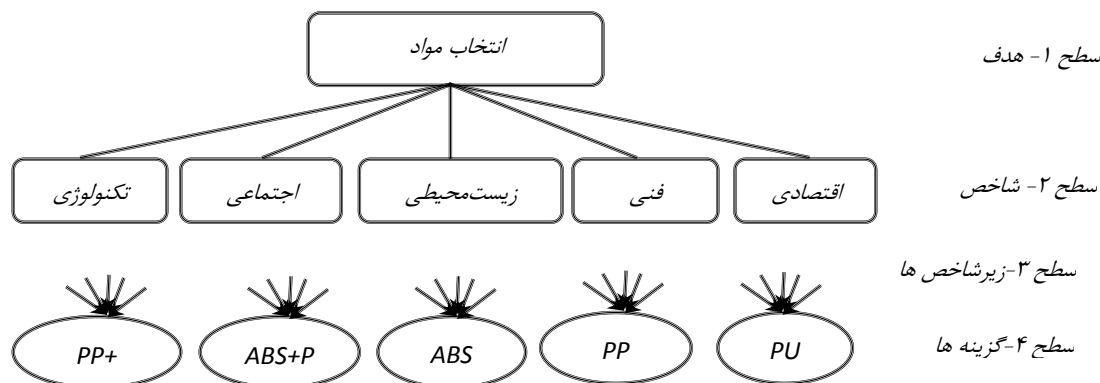
بر اساس مقادیر مختلف λ شاخص Q_i مقادیر مختلف اختیار می‌کند. اگر $\lambda = 0$ شود مدل واسپاس تبدیل به مدل WPM می‌شود. و اگر $\lambda = 1$ شود مدل واسپاس به مدل WSM تبدیل می‌شود. برای مسائل تصمیم‌گیری مقدار بهینه λ با رابطه ۲۷ محاسبه می‌شود.

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^m P_i}{\sum_{i=1}^m P_i + \sum_{i=1}^m Q_i} \quad (27)$$

۴- مطالعه موردی

در این مطالعه جهت تشریح رویکرد پیشنهادی یک مورد واقعی در زمینه تولید قطعات پلیمری داخلی خودرو مورد بررسی قرار گرفته و سه مرحله رویکرد پیشنهادی برای این مورد اجرا گردید.

فاز I) تشکیل سلسله‌مراتب تصمیم: در مرحله اول پس از بررسی‌های انجام‌گرفته پنج ماده پلیمری به‌عنوان گزینه شناسایی شدند که این مواد عبارت‌اند از: ترکیب پلی‌پروپیلن و تالک (M_1)، ترکیب اکریلونیتریل بوتادین و پلی‌کربنات (M_2)، اکریلونیتریل بوتادین (M_3)، پلی‌پروپیلن (M_4) و پلی‌یورتان (M_5). همچنین پس از مطالعات تجربی تحقیق، با نظرسنجی از خبرگان و به‌کارگیری تکنیک دلفی فازی پنج شاخص اثرگذار مشتمل بر ۲۹ زیر شاخص مرتبط در زمینه انتخاب مواد، غربال‌سازی شدند. پس از شناسایی گزینه‌ها و عوامل اثرگذار بر آن‌ها، ماتریس سلسله‌مراتبی تصمیم به‌صورت شکل (۱) تشکیل می‌گردد.



شکل (۱): سطوح ۱ تا ۴

جدول (۳): سطح ۲ و ۳ سلسله مراتب تصمیم

شاخص	اقتصادی (C1)	فنی (C2)	زیست محیطی (C3)	اجتماعی (C4)	تکنولوژی (C5)
زیر شاخص	هزینه مواد (Cs1)، هزینه انرژی در طول عملیات (Cs2)، هزینه تجهیزات (Cs3)، هزینه خدمات و نگهداری (Cs4)، هزینه حمل و نقل (Cs5)، هزینه ضایعات (Cs6)، ارزش بازاری (Cs7)	دانسیته (Cs8)، حد دما (Cs1)، هدایت حرارتی (Cs10)، استحکام کششی (Cs11)، چقرمگی (ضربه پذیری) (Cs12)، مقاومت به عوامل شیمیایی (Cs13)، مدول یانگ (Cs14)	سطح سمیت (Cs15)، بازیافت و استفاده مجدد (Cs16)، تجزیه پذیری زیستی (Cs17)، اثرات زیست محیطی (Cs18)، میزان مصرف منابع (Cs19)	زیبایی (Cs20)، سلامت و ایمنی (Cs21)، دسترسی به نیروی کار (Cs22)، دانش طراحی (Cs23)، استفاده از مواد محلی (Cs24)	سطح مورد نیاز (Cs25)، امکانات فعلی (Cs26)، قابلیت انعطاف (Cs27)، توسعه فن آوری (Cs28)، سادگی عملیات (Cs29)

جدول (۴): اوزان بهنجار شاخص های اصلی و فرعی و اوزان نهایی آنها

شاخص	C1	C2	C3	C4	C5
وزن	0.320	0.394	0.160	0.085	0.042
زیر شاخص	Cs1	Cs2	Cs3	Cs4	Cs5
وزن نسبی	0/259	0/042	0/228	0/073	0/018
وزن نهایی	0/083	0/013	0/073	0/023	0/006
زیر شاخص	Cs11	Cs12	Cs13	Cs14	Cs15
وزن نسبی	0/166	0/136	0/085	0/149	0/176
وزن نهایی	0/065	0/054	0/033	0/059	0/028
زیر شاخص	Cs21	Cs22	Cs23	Cs24	Cs25
وزن نسبی	0/255	0/213	0/236	0/121	0/213
وزن نهایی	0/022	0/018	0/020	0/010	0/009
زیر شاخص	Cs26	Cs27	Cs28	Cs29	
وزن نسبی	0/260	0/193	0/174	0/159	
وزن نهایی	0/011	0/008	0/007	0/007	

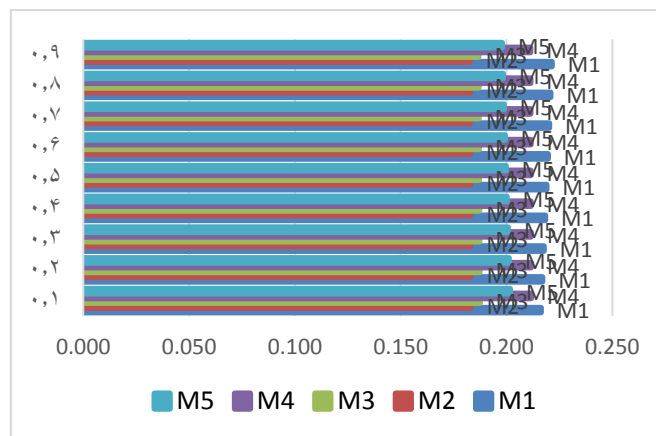
جدول (۵): رتبه‌بندی گزینه‌ها با Waspas-F بر اساس مقدار بهینه λ

رتبه	نرمال K	K	p قطعی	Q قطعی	p			Q			گزینه
۱	0/219	0/752	0/701	0/809	0/891	0/622	0/590	0/907	0/662	0/859	M1
۵	0/183	0/629	0/595	0/666	0/750	0/544	0/482	0/792	0/608	0/597	M2
۴	0/187	0/643	0/610	0/681	0/778	0/561	0/490	0/811	0/609	0/622	M3
۲	0/211	0/727	0/688	0/770	0/882	0/615	0/568	0/898	0/656	0/757	M4
۳	0/200	0/687	0/657	0/720	0/820	0/604	0/548	0/845	0/647	0/667	M5
	= 0/471										
	بهینه λ		3/251	3/646							SUM

تحلیل حساسیت: با توجه به اینکه وزن مقدار λ نقش مهمی در رتبه‌بندی گزینه‌ها در فرآیند تصمیم‌گیری با تکنیک Waspas-F ایفا می‌کند، به منظور تحلیل حساسیت رتبه‌بندی بر اساس تغییرات در دامنه $\lambda = 0.1, 0.2, 0.3, \dots, 0.9$ برای قضاوت و تأیید نتایج صورت گرفت که نتایج آن در جدول ۶ و شکل ۲ مشاهده می‌گردد.

جدول (۶): تحلیل حساسیت بر اساس مقادیر مختلف λ

گزینه‌ها	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹
M1	۰/۲۱۶	۰/۲۱۷	۰/۲۱۸	۰/۲۱۸	۰/۲۱۹	۰/۲۲۰	۰/۲۲۰	۰/۲۲۱	۰/۲۲۱
M2	۰/۱۸۳	۰/۱۸۳	۰/۱۸۳	۰/۱۸۳	۰/۱۸۳	۰/۱۸۳	۰/۱۸۳	۰/۱۸۳	۰/۱۸۳
M3	۰/۱۸۷	۰/۱۸۷	۰/۱۸۷	۰/۱۸۷	۰/۱۸۷	۰/۱۸۷	۰/۱۸۷	۰/۱۸۷	۰/۱۸۷
M4	۰/۲۱۲	۰/۲۱۲	۰/۲۱۲	۰/۲۱۱	۰/۲۱۱	۰/۲۱۱	۰/۲۱۱	۰/۲۱۱	۰/۲۱۱
M5	۰/۲۰۲	۰/۲۰۱	۰/۲۰۱	۰/۲۰۰	۰/۲۰۰	۰/۱۹۹	۰/۱۹۹	۰/۱۹۸	۰/۱۹۸



شکل (۲): تغییرات گزینه‌ها به ازای مقادیر مختلف λ

آزمون ضریب همبستگی پیرسون مورد بررسی قرار گرفته تا میزان شباهت نتایج بدست آمده مشخص گردد (جدول ۷).

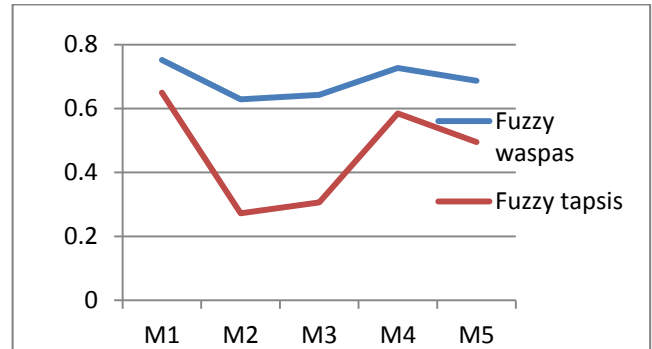
همچنین در مطالعه موردی در نظر گرفته شده خروجی تکنیک Waspas-F با خروجی تکنیک FTOPSIS مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۳). سپس نتایج خروجی حاصل از این تکنیک‌ها با استفاده از

تائید شده با استفاده از تکنیک FAHP، مورد مقایسات زوجی قرار گرفته و اوزان نسبی و نهایی آن‌ها محاسبه شده و در فاز سوم گزینه‌های تعیین شده بر اساس اوزان به دست آمده، با استفاده از تکنیک Waspas-F مورد رتبه‌بندی قرار گرفته و نهایتاً تحلیل حساسیت جهت اطمینان از نتایج به دست آمده صورت می‌گیرد.

به منظور بررسی رویکرد پیشنهادی یک مطالعه واقعی در زمینه انتخاب مواد در ساخت قطعات پلیمری داشبورد خودرو انجام گردید. بر اساس نتایج به دست آمده، ۵ شاخص به همراه ۲۹ زیر شاخص مرتبط، مورد تائید خبرگان سازمانی قرار گرفت. سپس شاخص‌ها وزن‌دهی شدند که شاخص فنی (۰/۳۹۴) و شاخص اقتصادی (۰/۳۲۰) دارای بالاترین میزان اهمیت بوده‌اند. با ضرب مقادیر شاخص‌ها در اوزان به دست آمده برای زیر شاخص‌های مرتبط، اوزان نهایی هر یک از زیر شاخص‌ها نیز به دست آمد که زیر شاخص ارزش بازاری محصول تولید شده برای شاخص فنی، زیر شاخص دانسیته برای شاخص اقتصادی، زیر شاخص قابلیت بازیافت و استفاده مجدد مواد برای شاخص زیست محیطی، زیر شاخص سلامت و ایمنی برای شاخص اجتماعی و زیر شاخص امکانات فعلی برای شاخص تکنولوژی دارای بالاترین درجه اهمیت را به دست آورده‌اند. بر اساس رتبه‌بندی گزینه‌های مواد با Waspas-F، در سطح بهینه λ (۰/۴۷۱) از بین مواد مختلف پلیمری، ترکیب پلی‌پروپیلن و تالک (M_1) و پلی‌پروپیلن (M_2) به عنوان بهترین گزینه مواد در ساخت قطعات پلیمری داشبورد خودرو انتخاب شدند. همچنین جهت حصول اطمینان از انتخاب مناسب‌ترین مواد، هم سناریوهای مختلف در سطح مقادیر مختلف λ انجام گرفت و هم نتایج روش پیشنهادی با روش FTOPSIS مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج تحلیل حساسیت انجام شده در هر دو روش Waspas-F و FTOPSIS بیانگر ثبات در نتایج پژوهش بوده و در تمام موارد (M_1) به عنوان برترین گزینه انتخاب گردید. همچنین بررسی همبستگی این دو روش با ضریب همبستگی پیرسون (با مقدار ۰/۹۹۲) حاکی از همبستگی نتایج داشته و شباهت زیادی بین خروجی این روش‌ها مشاهده گردید.

تحقیق حاضر با پژوهش‌های چاترجی و همکاران، گول و همکاران، استویچوا و همکاران، علی احمد و همکاران، ساپوان و همکاران و ... که سعی در معرفی شاخص‌هایی در جهت انتخاب مواد و رتبه‌بندی آن‌ها به کمک تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره اقدام کردند هم‌راستا بوده، ولی از لحاظ به‌کارگیری الگوریتم علمی جدید برای مسئله انتخاب مواد شامل تکنیک غربال‌سازی شاخص‌ها، تکنیک رتبه‌بندی Waspas-F، تحلیل حساسیت جهت بررسی ثبات نتایج و همچنین در نظر گرفتن عوامل اثرگذار به صورت جامع دارای تفاوت اساسی است.

در انتهای مقاله حاضر مواردی جهت تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد: استفاده از روش‌هایی مانند Entropy، BWM، SWARA و یا ترکیبی از این روش‌ها برای تعیین اوزان عوامل اثرگذار. استفاده از



شکل (۳): مقایسه خروجی روش واسپاس فازی و فازی

جدول (۷): نتایج آزمون ضریب همبستگی پیرسون.

		Waspas-F	FTopsis
Waspas-F	Pearson Correlation	۱	0/992**
	Sig. (2-tailed)		۰/۰۰۱
	Material	5	5
FTopsis	Pearson Correlation	0/992**	1
	Sig. (2-tailed)	۰/۰۰۱	
	Material	5	5

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

۵- نتیجه‌گیری

یکی از استراتژی‌های مطلوب برای دستیابی به ساخت و ساز پایدار، انتخاب مواد است که مستلزم در نظر گرفتن جنبه‌های متعددی به طور هم‌زمان است. تصمیم‌گیرندگان در انتخاب مواد صحیح و یا جایگزینی ماده موجود با ماده دیگری که عملکرد بهتری دارد، معمولاً روش‌های آزمون و خطا را بکار 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 زیست محیطی (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.

در این پژوهش به منظور حل مسئله انتخاب مواد یک رویکرد ترکیبی تصمیم‌گیری در محیط عدم اطمینان و فازی با به‌کارگیری شاخص‌های اثرگذار به صورت جامع ارائه گردید. در این راستا در فاز اول با بررسی جامع پیشینه تحقیق و نظرسنجی از خبرگان سازمانی، شاخص‌های اثرگذار با تکنیک FDelfi غربال‌سازی و تائید شده و سلسله مراتب تصمیم‌گیری شکل می‌گیرد. در فاز دوم شاخص‌های

- [۹] صادقی زیدانلو، مصطفی. سیداصفهان، سیدحسین. (۱۳۹۹). ارزیابی مدل تعالی به منظور توسعه و توانمندی منابع انسانی (مورد مطالعه: نیروگاه تولید پراکنده شمس آباد). مجله چشم‌انداز مدیریت صنعتی. سال دهم، شماره ۳۹، صص ۵۳-۶۹.
- [۱۰] صمدی میارکلائی، حسین. صمدی میارکلائی، حمزه. بسطامی، مسعود. (۱۳۹۶). به‌کارگیری روش دلفی فازی و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتب گروهی فازی در شناسایی و رتبه‌بندی شاخص‌های مؤثر بر توسعه کارآفرینی سازمانی. نوآوری و ایجاد ارزش. دوره ۶، شماره ۱۱، صص ۶۱-۷۴.
- [۱۱] لطیفی، سمیه. راحلی، حسین. یادآور، حسین. سعدی، حشمت‌اله. و شهرستانی، سیدعلی. (۱۳۹۷). شناسایی و تبیین مراحل اجرایی توسعه کشاورزی حفاظتی در ایران با رویکرد دلفی فازی. مهندسی بیوسیستم ایران. شماره ۱، ۱۰۷-۱۲۰.
- [12] Agarwal, S., Kant, R., Shankar, R. (2020). **Evaluating Solutions to Overcome Humanitarian Supply Chain Management Barriers: A Hybrid Fuzzy SWARA-Fuzzy WASPAS Approach**. International Journal of Disaster Risk Reduction, 51, 101838.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Burande, S.W., Bhope, D.V. (2020). **Review on Material Selection, Tailoring of Material Properties and Ageing of Composites with Special Reference to Applicability in Automotive Suspension**. Materials Today: Proceedings.
- [17] 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.
- [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] Emovon, I., Ogheniyerovwho, O. S. (2020). **Application of MCDM Method in Material Selection for Optimal Design: A Review**. Results in Materials, 7, 100115.
- [20] Goswami, S.S., Behera, D.K. (2020). **Implementation of ENTROPY-ARAS Decision Making Methodology in the Selection of Best Engineering Materials**. Materials Today: Proceedings.
- [21] 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.
- [22] Janik, H., Marzec, M. (2015). **A Review: Fabrication of Porous Polyurethane Scaffolds**. Materials Science and Engineering: C, 48, 586-591.
- [23] 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.
- [24] Karande, P., Chakraborty, S. (2012). **Application of Multi-objective Optimization on the Basis of Ratio Analysis**
- روش‌هایی نظیر DEA، سناریونویسی، شبکه عصبی، رگرسیون خطی و ... جهت تحلیل حساسیت نتایج رتبه‌بندی گزینه‌های انتخاب مواد با روش‌های مختلف MCDM (اعم از قطعی، فازی و خاکستری) و مقایسه نتایج آن‌ها با یکدیگر. به‌کارگیری روشی جهت در نظر گرفتن روابط درونی معیارها با یکدیگر (مانند استفاده از روش DANP). مطالعه بر روی چند شرکت با محصول و فرایند تولید مشابه با استفاده از رویکرد پیشنهادی پژوهش جهت غربال‌سازی صحیح‌تر شاخص‌ها و انتخاب درست مواد.
- منابع و ماخذ:**
- [۱] آذر، عادل. فرجی، حجت. (۱۳۹۵). علم مدیریت فازی. تهران، موسسه کتاب مهربان.
- [۲] ارباب شیرانی، بهروز. احمدی، آناهیتا. شهریاری، محسن. (۱۳۹۲). ارائه چارچوب تعیین وضعیت رقابتی منابع سازمان بر اساس معیارهای کسب مزیت رقابتی. بررسی‌های بازرگانی، شماره ۵۸، ویژه‌نامه.
- [۳] اردکانی، محمد شاکر. کتابی، سعیده. محمد شفیع، مجید. (۱۳۹۲). رتبه‌بندی کارمندان و انتخاب سرپرستان با رویکرد ترکیبی فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی و تاپسیس فازی (مطالعه موردی، کارخانه فولاد غدیر ایرانیان). مدیریت تولید و عملیات. دوره چهارم، پیاپی ۷، شماره ۲، صص ۱-۲۲.
- [۴] امیری، مقصود. هادی‌نژاد، فرهاد. ملک خویان، شیوا. (۱۳۹۶). ارزیابی و اولویت‌بندی تأمین‌کنندگان با رویکرد ترکیبی آنتروپی، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و پرامیتی اصلاح شده (مطالعه موردی: شرکت یوتاب)، مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال چهاردهم، شماره چهارم (پیاپی ۵۵)، زمستان ۹۶، صص ۲۰-۱.
- [۵] حامدی، محسن. تاجیک، یاسر. (۱۳۸۹). مطالعه تجربی و بهینه‌سازی کیفیت قطعات در قالب چرخشی. مجله مکانیک کاربردی محاسباتی. دوره ۴۴، شماره ۱، صص ۱۵-۲۷.
- [۶] خواجه، مصطفی. امیری، مقصود. الفت، لعیا. زندیه، مصطفی. (۱۳۹۹). ارزیابی و انتخاب تأمین‌کنندگان پایدار در محیط فازی شهودی با رویکرد ترکیبی چندمعیاره بهترین بدترین و ویکور. مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن. سال هفدهم، شماره اول (پیاپی ۶۴)، بهار ۹۹، صص ۴۸-۲۵.
- [۷] رنجبر، مصطفی. ثابت زاده، مریم. عارف آذر، احمد. بخشنده، غلامرضا. رنجبر، اعظم. (۱۳۹۲). اثر نانو خاک رس بر خواص جریان و گرمایی آمیخته پلی پروپیلن-کوپلیمر (استیرن-اتیلن-بوتیلن-استیرن) پیوندخورده با مالئیک انیدرید. مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال بیست و ششم، شماره ۵، صص ۴۱۲-۴۰۳.
- [۸] صادقی دروازه، سعید. شول، عباس. رسولی، ندا. (۱۳۹۷). یک رویکرد ترکیبی در ارزیابی عوامل دخیل در رقابت‌پذیری زنجیره تأمین صنعت لاستیک. مجله چشم‌انداز مدیریت صنعتی. سال هشتم، شماره ۳۲، صص ۱۸۵-۲۱۲.

- Environment Characteristics: A Grey-correlation based Hybrid MCDM Method.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 682-692.
- [43] 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.
- [44] Turskis, Z., Zavadskas, E. K., Antucheviciene, J., Kosareva, N. (2015). **A Hybrid Model based on Fuzzy AHP and Fuzzy WASPAS for Construction Site Selection.** *International Journal of Computers communications & control*, 10(6), 113-128.
- [45] 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.
- [46] Zhang, Q., Hu, J., Feng, J., Liu, A. (2020). **A Novel Multiple Criteria Mecision Making Method for Material Selection Based on GGPFWA Operator.** *Materials & Design*, 195, 109038.
- [47] 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.
- (MOORA) Method for Materials Selection. *Materials & Design*, 37, 317-324.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Loganathan, M. K., Mishra, B., Tan, C. M., Kongsvik, T., Rai, R. N. (2020). **Multi-Criteria Decision Making (MCDM) for the Selection of Li-Ion Batteries Used in Electric Vehicles (EVs).** *Materials Today: Proceedings*.
- [31] Madhu, P., Dhanalakshmi, C. S., Mathew, M. (2020). **Multi-Criteria Decision-Making in the Selection of a Suitable Biomass Material for Maximum Bio-Oil Yield During Pyrolysis.** *Fuel*, 277, 118109.
- [32] 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.
- [33] Mehmood, Z., Haneef, I., Udrea, F. (2018). **Material Selection for Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) Using Ashby's Approach.** *Materials & Design*, 157, 412-430.
- [34] Mishra, A.R., Rani, P. (2018). **Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy WASPAS Method: Application in Reservoir Flood Control Management Policy.** *Group Decision and Negotiation*, 27(6), 1047-1078.
- [35] Moradian, M., Modanloo, V., Aghaiee, S. (2019). **Comparative Analysis of Multi Criteria Decision Making Techniques for Material Selection of Brake Booster Valve Body.** *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(5), 526-534.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.** *Indian Journal of Engineering & Material Sciences*. Vol 18, pp 225-267.
- [39] 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*.
- [40] 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.
- [41] Thiyagu, C., Manjubala, I., Narendrakumar, U. (2020). **Thermal and Morphological Study of Graphene based Polyurethane Composites.** *Materials Today: Proceedings*.
- [42] Tian, G., Zhang, H., Feng, Y., Wang, D., Peng, Y., Jia, H. (2018). **Green Decoration Materials Selection under Interior**