مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال ۱۴۰۲/ دوره ۱۳/ شماره ۳/ صفحه ۴۵-۵۳

نشریه مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

DOI: 10.22044/JSFM.2023.13057.3735

کاربرد روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب مواد سبک وزن در ساخت وسایل نقلیه ریلی

وحید مدانلو*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

مقاله مستقل ، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸

چکیده

انتخاب جنس مناسب در ساخت وسایل نقلیه ریلی سبک وزن با توجه به مواد مهندسی موجود امری پیچیده و حائز اهمیت است. در این مقاله با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه، جنس مناسب برای ساخت واگن‌های قطار انتخاب شده است. شش ماده مهندسی شامل، فولاد DP600، فولاد TRIP700، فولاد TWIP، آلومینیوم 6005-T6، آلومینیوم 6082-T6 و آلومینیوم متخلخل با سلول بسته به عنوان گزینه‌های مهندسی در نظر گرفته شدند؛ همچنین چگالی، استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی، نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نهایی، مدول یانگ، هزینه و مقاومت به خوردگی به عنوان معیارهای انتخاب مواد در نظر گرفته شدند. برای انتخاب بهترین ماده با توجه به معیارهای مذکور، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره MOORA استفاده شد. با وزن‌دهی معیارها و انجام تحلیل، مشخص شد که فولاد TWIP و آلومینیوم 6082-T6 به عنوان بهترین گزینه‌ها و همچنین فوم آلومینیوم و فولاد DP600 به عنوان بدترین گزینه‌ها انتخاب شدند. فولاد TWIP که دارای بیشترین استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی در بین تمام گزینه‌ها است، در مجموع و با در نظر گرفتن همزمان همه معیارها به عنوان بهترین ماده انتخاب شد. به علاوه آلومینیوم 6082-T6 با توجه به نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نهایی بالا (۰/۸۸) و نیز چگالی کمتر و مقاومت به خوردگی بیشتر نسبت به مواد فولادی به عنوان دومین گزینه مناسب انتخاب شد.

کلمات کلیدی: ماده سبک وزن؛ سازه‌های ریلی؛ تصمیم‌گیری چندمعیاره؛ بهترین انتخاب.

Application of multi-criteria decision making method for selection of lightweight material in manufacturing of railway vehicles

Vahid Modanloo*

Assist. Prof., Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

Abstract

Selection of the proper material in manufacturing lightweight railway vehicles is a complex and essential challenge considering the available engineering materials. In this paper, the appropriate material has been selected for manufacturing railway wagons using a multi-criteria decision-making technique. Six engineering materials including DP600 steel, TRIP700 steel, TWIP steel, 6005-T6 aluminium, 60826-T6 aluminium and porous aluminium with closed cells were considered as engineering alternatives. Also, density, yield strength, ultimate tensile strength, the ratio of yield strength to maximum tensile strength, Young's modulus, cost and corrosion resistance were considered as selection criteria. To select the best material according to the mentioned criteria, the MOORA multi-criteria decision-making method was applied. By weighting the criteria and performing the analysis, it was found that the TWIP steel and 6082-T6 aluminium were chosen as the best candidates and aluminium foam and DP600 steel were selected as the worst candidates. Due to its maximum yield strength and ultimate tensile strength compared to other candidates, TWIP steel was chosen as the best material considering all criteria. Furthermore, the 6082-T6 material was chosen as the second-best material due to the high ratio of yield strength to ultimate tensile strength (0.88) and lower density and higher corrosion resistance than steel materials.

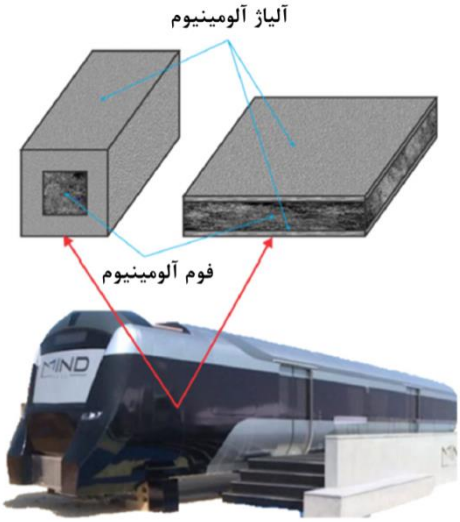
Keywords: Lightweight Material; Railway Structure; Multi-criteria Decision Making; Best Selection.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۳۴۴۱۵۲۲۰۵۲

آدرس پست الکترونیک: v.modanloo@sirjantech.ac.ir

۱- مقدمه

صنعت حمل و نقل ریلی یکی از مهم‌ترین عوامل رشد و توسعه کشورها به شمار می‌آید [۱]. حمل و نقل ریلی جزء مهمترین ترانزیت‌های حمل کالا در جهان محسوب می‌گردد و هر ساله حجم بسیار بالایی از کالاهای صادراتی به وسیله حمل و نقل ریلی در جهان جابه‌جا می‌شود [۲]. حمل و نقل ریلی دارای مزیت‌های قابل توجهی از لحاظ میزان مصرف سوخت، کاهش میزان آلودگی هوا، سهولت جابه‌جایی کالا، میزان جابه‌جایی کالا، سوانح و تلفات کم، صرفه‌جویی در هزینه‌ها است [۳]. میزان مصرف سوخت حمل و نقل ریلی در حمل بار یک‌هفتم حمل و نقل جاده‌ای است [۴]؛ همچنین مصرف پایین انرژی در حمل و نقل ریلی، میزان آلودگی این مدل حمل و نقل را برای محیط زیست نیز کاهش داده است [۵]. فرسودگی واگن‌ها و عدم استفاده از سازه‌های سبک وزن در طراحی و ساخت آنها در سال‌های اخیر از جمله عوامل مهم در عدم توسعه این صنعت است [۶]. طی سالیان اخیر، مواد سبک وزن به طور گسترده در صنایع هوافضا و حمل و نقل به ویژه حمل و نقل ریلی توسعه یافته‌اند. مواد سبک وزن رایج در این صنایع شامل آلیاژهای آلومینیوم، منیزیم، تیتانیوم، فولادهای استحکام بالا و کامپوزیت‌های تقویت شده می‌باشند [۷]. انتخاب جنس مناسب برای ساخت بدنه واگن‌ها با توجه معیارهای مورد نظر بسیار مهم و پیچیده است [۸]. بدنه این واگن‌ها باید ضمن استحکام بالا، دارای وزن کم و مقاومت به خوردگی قابل قبولی نیز باشند؛ همچنین هزینه قابل توجیه برای انتخاب ماده مناسب نیز از پارامترهای کلیدی در مسائل طراحی مهندسی است [۹]. فولادهای AHSS[1] از دیرباز به دلیل خواص فوق العاده آنها نظیر مقاومت مکانیکی عالی و شکل‌پذیری خوب، در ساخت سازه‌های سبک وزن در صنایع راه آهن و خودرو استفاده شده‌اند [۱۰]. تاکنون تحقیقات بسیاری برای افزایش استحکام و کاهش وزن و قیمت فولادهای AHSS مورد استفاده در صنعت حمل و نقل انجام شده است که از مهمترین آنها می‌توان به فولادهای DP600[2]، TRIP700[3] و TWIP[4] اشاره نمود [۱۱]؛ همچنین فولادهای مذکور نسبت به آلیاژهای آلومینیوم، دارای قابلیت جذب انرژی[5] و امنیت در برابر ضربه خوبی هستند [۱۱]. آلیاژهای آلومینیوم نیز به دلیل خواص بینظیری همچون وزن کم و مقاومت به خوردگی بالا به طور گسترده در صنعت حمل و نقل استفاده می‌شوند که آلیاژهای سری 6000 مهمترین نوع آن هستند [۱۲]. فوم‌های متخلخل آلومینیومی طی سالیان اخیر به عنوان یک ماده جدید در طراحی سازه‌های مهندسی به منظور کاهش چشمگیر وزن سازه مطرح شده‌اند [۱۳]. این مواد به دلیل برخورداری از خواص بینظیری مانند جذب صدا، انرژی و ضربه، محافظ الکترومغناطیسی و عایق حرارت در صنایع هوافضا، خودروسازی و حمل و نقل ریلی بسیار پرکاربرد می‌باشند [۱۴]. شکل ۱ کاربرد نمونه‌ای از آلومینیوم متخلخل (فوم آلومینیوم) را نشان می‌دهد که به صورت ساندویچ پنل در سازه‌های ریلی استفاده می‌شود. این فوم‌ها طی سال‌های اخیر به صورت تجاری به منظور جذب انرژی حاصل از برخورد در نقاط حساس و آسیب‌پذیر واگن‌های ریلی استفاده شده‌اند [۱۴].



شکل ۱- کاربرد آلومینیوم متخلخل به صورت ساندویچ پنل در واگن قطار [۱۴]

همزمان با توسعه روزافزون صنعت حمل و نقل ریلی و نیز هزینه‌های قابل توجه طراحی و ساخت واگن‌ها، مهندسان و طراحان این حوزه بر آن شده‌اند که با ارائه روش‌های

[1] Advanced high strength steels
[2] Dual-phase
[3] Transformation-induced plasticity
[4] Twinning-induced plasticity
[5] Energy damping

هوشمندانه، بهترین ماده را برای ساخت این قطعات انتخاب کنند. از آنجا که معیارهای متفاوتی در انتخاب ماده مورد نظر از بین گزینه‌های زیاد در دسترس باید در نظر گرفته شوند، روش تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه به عنوان یک ابزار مفید و موثر مطرح می‌شود [۱۵]. این روش برای انتخاب بهترین گزینه از میان گزینه‌های موجود، به هر کدام از معیارهای انتخاب وزن مشخصی را اختصاص می‌دهد. در ادامه با توجه به وزن معیارها به هر گزینه یک رتبه اختصاص داده می‌شود. در نهایت گزینه‌ای که بالاترین رتبه را داشته باشد، به عنوان بهترین انتخاب در نظر گرفته می‌شود [۱۶]. تاکنون پژوهشگران از روش‌های تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه زیادی برای مسائل مهندسی استفاده کرده‌اند. برخی از مهمترین این روش‌ها عبارتند از TOPSIS، VIKOR، PROMETHEE، ELECTRE، WASPAS و MOORA که در انتخاب بهترین جنس ماده و انتخاب بهترین شرایط آزمایش به طور گسترده استفاده می‌شوند [۲۴-۱۷]. مرادیان و همکاران [۲۵] با استفاده از روش‌های VIKOR، TOPSIS و MOORA به انتخاب جنس مناسب برای ساخت بدنه بوستر ترمز خودرو پرداختند. تعداد ۱۶ ماده پلیمری به عنوان گزینه-ها و تعداد ۴ ویژگی مواد شامل تنش کششی، دمای انحراف، چگالی و هزینه به عنوان معیارها در نظر گرفته شدند. نتایج آنها نشان داد که PET تقویت شده با ۳۵٪ الیاف شیشه به عنوان بهترین گزینه است؛ همچنین ضریب همبستگی اسپیرمن بین روش‌های VIKOR و TOPSIS به میزان ۰/۹۴۷۱ به دست آمد. آخوندی و مدانلو [۲۶] با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره به انتخاب شرایط بهینه در ساخت افزایشی کامپوزیت‌های ABS/Cu پرداختند. تعداد ۹ آزمایش طراحی شده با استفاده از آرایه متعامد L9 تاگوچی به عنوان گزینه‌ها در نظر گرفته شدند. قطر نازل، ارتفاع لایه، زاویه لایه و دمای نازل به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند؛ همچنین چگالی، استحکام کششی و زمان ساخت به عنوان معیارهای انتخاب فرض شدند. آنها برای وزن‌دهی از یک روش ترکیبی متشکل از روش‌های سلسله مراتبی و آنتروپی استفاده کردند. برای رتبه‌دهی به گزینه‌ها نیز از روش‌های TOPSIS و MOORA استفاده شد. نتایج آنها نشان داد که آزمایش شماره ۹ که در آن قطر نازل ۱/۵ میلی‌متر، ارتفاع لایه ۰/۳ میلی‌متر، زاویه لایه ۰/۹۰ درجه و دمای نازل ۲۳۰ درجه سانتیگراد هست به عنوان بهترین گزینه می‌باشد. خورشیدی و همکاران [۲۷] با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره به انتخاب بهترین موقعیت مکانی برای احداث نیروگاه خورشیدی در کشور ترکیه پرداختند. آنها در تحقیق خود از یک روش ترکیبی متشکل از روش فازی اصلاح شده DEMATEL و روش فازی MOORA استفاده نمودند. چهار ویژگی جغرافیایی، فنی، اقتصادی و رفاه اجتماعی به عنوان معیار در نظر گرفته شدند. همچنین ۵ منطقه وان، کارامان، آنتالیا، کُنیا و مرسین به عنوان گزینه‌ها در نظر گرفته شدند. نتایج هر دو روش نشان داد که آنتالیا به عنوان بهترین انتخاب و کارامان به عنوان بدترین انتخاب است. مدانلو و همکاران [۲۸] به انتخاب شرایط بهینه آزمایش در فرآیند هیدروفرمینگ ورق پرداختند. در ۹ آزمایش طراحی شده به عنوان گزینه‌ها، نسبت کشش حدی، فشار بیشینه سیال و فشارپیش‌بشکه‌ای به عنوان متغیرهای ورودی فرض شدند؛ همچنین ضخامت نهایی قطعه‌کار، نیروی شکل‌دهی و تنش شعاعی به عنوان معیارها در نظر گرفته شدند. آنها برای انتخاب بهترین گزینه از روش‌های TOPSIS و MOORA استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که آزمایش شماره ۳ (نسبت کشش حدی ۱/۸۱، فشار بیشینه سیال ۳۷ مگاپاسکال و فشارپیش‌بشکه‌ای ۱۵ مگاپاسکال) منجر به بهترین جواب خواهد شد. همانطور که مشاهده می‌شود، روش‌های تصمیم-گیری چندمعیاره کاربرد فراوانی در مسائل مختلف جهت انتخاب بهترین گزینه (جنس ماده، موقعیت مکانی، شرایط آزمایش و ...) دارد.

این تحقیق به انتخاب بهترین جنس ماده برای ساخت بدنه واگن صنایع ریلی می‌پردازد. شش ماده پرکاربرد مهندسی شامل سه نوع فولاد AHSS، دو نوع آلیاژ آلومینیوم سری 6000 و همچنین آلومینیوم متخلخل به عنوان گزینه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه به هفت معیار چگالی (ρ) بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، استحکام تسلیم (σ_y) بر حسب مگاپاسکال، استحکام کششی نهایی (σ_u) بر حسب مگاپاسکال، نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نهایی (α) بدون بعد، مدول یانگ (E) بر حسب گیگاپاسکال، هزینه (C) بر حسب دلار بر کیلوگرم و مقاومت به خوردگی (R) به صورت نسبی (۱: ضعیف، ۲: متوسط، ۳: خوب) وزن مشخصی داده شده - است. نهایتاً با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره

MOORA، بهترین گزینه برای انتخاب بهترین جنس ماده برای ساخت بدنه واگن قطار انتخاب خواهد شد. در پایان نیز نتیجه به دست آمده با نتایج موجود گزارش شده قبلی مقایسه خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

جدول ۱ خواص مواد مهندسی مورد نظر برای ساخت واگن قطار در صنعت حمل و نقل ریلی با استفاده از تحلیل تصمیم-گیری چندمعیاره را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خواص مواد مهندسی موردنظر [۱۴]

Al-foam	6082-T6	6005-T6	TWIP	TRIP-700	DP-600	
۱۰۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۸۰۵۰	۸۰۵۰	۸۰۵۰	ρ (kg/m^3)
۲۰	۲۵۰	۲۴۰	۷۵۰	۵۲۰	۴۱۰	σ_y (MPa)
۳۰	۳۱۰	۲۶۰	۱۰۰۰	۸۰۰	۷۰۰	σ_u (MPa)
۰/۶۶	۰/۸۸	۰/۹	۰/۷۵	۰/۵	۰/۵۸	α
۱۲	۷۰	۶۹	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	E (GPa)
۴۶	۱/۹	۱/۹	۱/۵	۰/۵۵	۰/۵۵	C ($/kg)
۳	۳	۳	۱	۱	۱	R

همانطور که قابل مشاهده است، آلومینیوم متخلخل در حالی کمترین میزان چگالی را دارد که استحکام آن از همه گزینه‌ها کمتر است؛ همچنین این ماده از طرفی، دارای مقاومت به خوردگی عالی ولی گرانتر از بقیه گزینه‌های مواد است. چنین شرایطی برای سایر گزینه‌ها نیز برقرار است. به عنوان مثال، فولاد TWIP اگرچه دارای بیشترین استحکام در بین گزینه‌ها است، ولی مقاومت به خوردگی نسبتاً پایینی نسبت به آلومینیوم دارد؛ همچنین گرانترین گزینه در بین گزینه‌های فولادی است. اگر هر معیار به صورت جداگانه در نظر گرفته شود، هر گزینه نیز رتبه متفاوتی خواهد داشت، در حالیکه تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره به انتخاب بهترین گزینه با در نظر گرفتن همزمان همه معیارها خواهد پرداخت. از این رو جذابیت و اهمیت مساله انتخاب بهترین جنس ماده برای ساخت بدنه واگن قطار دوچندان خواهد شد؛ همچنین ترکیب شیمیایی مواد مذکور در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است. لازم به ذکر است، مطابق با مرجع [۱۴]، فوم آلومینیوم در نظر گرفته شده دارای ساختار متخلخل سلول بسته با نسبت سطح به حجم بزرگ در حدود ۱۰۲ تا ۱۰۴ مترمربع به مترمکعب است.

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی گزینه‌های فولادی (درصد وزنی) [۱۴]

DP600	TRIP700	TWIP	
۰/۱۵	۰/۲۴	۰/۶	C
۰/۸	۲/۰	۰/۶	Si
۲/۵	۲/۲	۲۵/۰	Mn
۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۳	P
۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۵	S
۰/۰۱	۰/۰۱۵	۲/۵	Al
۰/۲	۰/۲	۰/۲	Cu
۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	-	B
۰/۱۵	۰/۲	۰/۲	Ti+Nb
-	۰/۶	۲/۵	Cr+Mo

جدول ۳- ترکیبات شیمیایی آلومینیوم 6082-T6 و 6005-T6 (درصد وزنی) [۱۴]

6082-T6	6005-T6	
۹۵/۲-۹۸/۳	۹۷/۵-۹۹	Al
≤۰/۲۵	≤۰/۱	Cr
≤۰/۱	≤۰/۱	Cu
≤۰/۵	≤۰/۳۵	Fe
۰/۶-۱/۲	۰/۴-۰/۶	Mg
۰/۴-۱	≤۰/۱	Mn
۰/۷-۱/۳	۰/۶-۰/۹	Si
≤۰/۱	≤۰/۱	Ti
≤۰/۲	≤۰/۱	Zn

گام بعدی تخصیص وزن به هریک از معیارها می‌باشد. دو نوع روش برای وزن‌دهی به معیارها در تحلیل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره وجود دارد: روش objective و روش subjective. در روش اول وزن‌دهی بر اساس مقادیر واقعی و موجود معیارها برای تمام گزینه‌ها انجام می‌شود مانند روش آنتروپی شانون. نقطه ضعف این روش این است که تجربه شخص کارشناس و

تصمیم گیرنده را در نظر نمی‌گیرد. در روش دوم، مقادیر وزن‌ها بر اساس تجربه و نظر شخص تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شوند. در این تحقیق هر دو روش مذکور بررسی خواهند شد. در روش آنتروپی، وزن معیارها به ترتیب بعد از تشکیل ماتریس تصمیم، نرمالایز (بی‌بعد) کردن ماتریس تصمیم و محاسبه آنتروپی محاسبه می‌شود. منظور از ماتریس تصمیم همان جدول ۱ است که در آن ۶ گزینه و ۷ معیار وجود دارد. در مرحله بعد با استفاده از معادله ۱، هر عضو ماتریس تصمیم بی‌بعد خواهد شد. در مرحله بعد، آنتروپی هر معیار (e_j) و درجه واگرایی آن (d_j) به ترتیب با استفاده از روابط ۲ و ۳ به ترتیب محاسبه می‌شوند. در نهایت، وزن آنتروپی هر معیار (E_j) با استفاده از رابطه ۴ بدست خواهد آمد [۲۹]. نکته قابل ذکر این است که در روابط فوق پارامتر i و j به ترتیب بیانگر تعداد گزینه‌ها (۶ گزینه) و تعداد معیارها (۷ معیار) می‌باشند.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \qquad \begin{matrix} \text{i=1, 2, …, m;} \quad \text{j=1, 2,} \\ \text{…, n} \end{matrix} \qquad (۱)$$

$$e_j = -\frac{1}{ln\, m}\sum_{i=1}^{m} n_{ij}\, ln\left(n_{ij}\right) \qquad (۲)$$

$$d_j = \left|1 - e_j\right| \qquad (۳)$$

$$E_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j} \qquad (۴)$$

پس از مشخص نمودن وزن هر معیار، نوبت به رتبه‌دهی گزینه‌ها می‌رسد. در این تحقیق، برای انتخاب بهترین گزینه از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره MOORA استفاده شده است. در این روش، در ابتدا هر عضو ماتریس تصمیم بی‌بعد می‌شود که عیناً از رابطه ۱ (مرحله اول روش آنتروپی شانون) استفاده می‌شود. در مرحله دوم، ارزیابی مرکب برای هر معیار با استفاده از معادله ۵ انجام می‌شود. در این رابطه، g تعداد معیارهایی هستند که باید بیشینه شوند؛ یعنی استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی، نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نهایی، مدول یانگ و مقاومت به خوردگی (به عبارت دیگر مقادیر بیشتر آنها مطلوب‌تر است). همچنین (n-g) تعداد معیارهایی هستند که باید کمینه شوند: هزینه و چگالی که در واقع مقادیر کمتر آنها مطلوب‌تر است. در نهایت، هر گزینه‌ای که بیشترین مقدار y_i^* را به خود اختصاص دهد، به عنوان بهترین گزینه در نظر گرفته خواهد شد [۳۰].

$$y_i^* = \sum_{j=1}^{g} E_j r_{ij} - \sum_{j=g+1}^{n} E r_{ij} \qquad (۵)$$

۳- نتایج و بحث

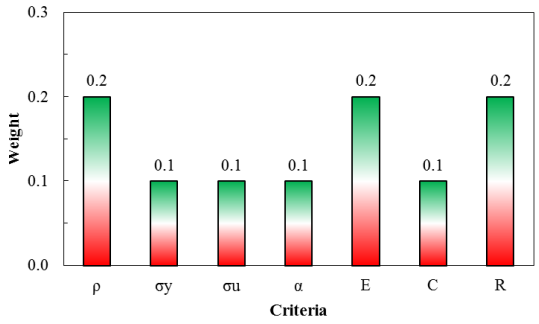
در این مقاله، تعداد ۶ ماده به عنوان گزینه‌ها و تعداد ۷ ویژگی به عنوان معیارها برای انتخاب جنس مناسب برای ساخت واگن‌های قطار در نظر گرفته شده‌اند. جدول ۴ وزن معیارها حاصل از روش آنتروپی را نشان می‌دهد.

جدول ۴- وزن معیارها حاصل از روش آنتروپی

معیار	وزن
ρ	۰/۰۰۱
σ_y	۰/۰۳۸
σ_u	۰/۰۵۸
α	۰/۱۷۳
E	۰/۰۳۱
C	۰/۶۳۷
R	۰/۰۶۳

همانطور که از جدول ۴ استنباط می‌شود، بین وزن‌های به دست آمده اختلاف زیادی مشاهده می‌شود. به عنوان مثال، معیار هزینه با مقدار ۰/۶۳۷ دارای بیشترین وزن و نیز معیار چگالی با مقدار ۰/۰۰۱ دارای کمترین وزن است. نتایج حاصل شده از روش آنتروپی با واقعیت مطابقت ندارد که همانطور که قبلاً ذکر شد، از معایب این روش است. به عبارت دیگر، سایر معیارها نیز علاوه بر هزینه در انتخاب بهترین ماده تاثیرگذار می‌باشند. از این رو مطابق با مرجع [۱۴]، از روش subjective برای وزن‌دهی به معیارها استفاده شده که بر اساس تجربه و نظر فرد (افراد) تصمیم‌گیرنده و کارشناس است. به عبارت دیگر، به دلیل اهمیت بالای وزن‌دهی معیارها، نظرات تصمیم-گیرنده باید منطقی و بر اساس واقعیت‌های موجود باشد؛ زیرا قضاوت نادرست از سوی کارشناس و تخصیص وزن غیرمنطقی منجر به انتخاب گزینه نادرست خواهد شد. شکل ۲ وزن‌های

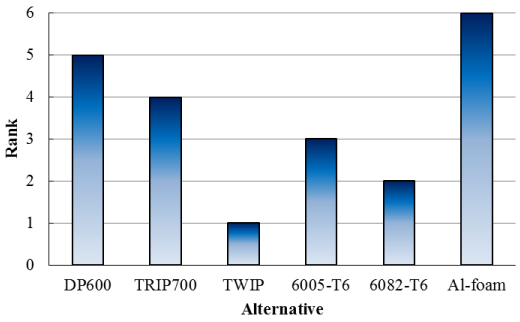
در نظر گرفته شده برای معیارها را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، معیارهای چگالی، مدول یانگ و مقاومت به خوردگی مقاومت به خوردگی دارای وزن ۰/۲ می‌باشند؛ همچنین معیارهای استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی، نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نهایی و هزینه دارای وزن ۰/۱ می‌باشند. بیان این نکته ضروری است که مجموع همه وزن‌ها باید برابر با یک باشد. در توجیه تخصیص وزن‌ها می‌توان گفت که چگالی کمتر به معنی کاهش وزن وسیله نقلیه و در نتیجه کاهش سوخت و نهایتاً آلودگی کمتر محیط زیست است؛ همچنین، مدول یانگ (الاستیک) توانایی یک ماده برای مقاومت در برابر تغییرات طول تحت کشش یا فشار را توصیف می‌کند که مقدار آن باید حتی‌الامکان بالا باشد. از سوی دیگر، بدنه بیرونی واگن قطار در معرض جو محیط اطراف قرار دارد، بنابراین موادی که مقاومت در برابر خوردگی بالاتری دارند گزینه‌های بهتری برای این جنبه طراحی خواهند بود. مقاومت به خوردگی بیانگر مقاومت ماده در برابر آسیب-های ناشی از اکسیداسیون یا سایر واکنش‌های شیمیایی است. یکی دیگر از معیارهای مهمی که باید در طول فرآیند انتخاب ماده مورد توجه قرار گیرد، هزینه تمام شده بوده که باید تا حد امکان کم باشد؛ اما در طراحی و ساخت بدنه واگن قطار در صنایع ریلی، انتخاب ماده مناسب با خواص کافی که امنیت و سلامت انسان‌ها را تضمین کند اهمیت بیشتری دارد. کیفیت بهتر و عمر طولانی‌تر همیشه جزء معیارهای مورد نظر است که با افزودن آلیاژ برای افزایش استحکام ارائه می‌شود. از آنجا که استحکام یکی از پارامترهای کلیدی در سازه‌های ریلی است، استحکام بالاتر به طور خودکار توانایی تحمل بار بیشتری را در شرایط کاری مختلف ارائه می‌دهد. استحکام نهایی مقاومت ماده در برابر شکست تحت تنش را بیان می‌کند. مقادیر مقاومت کششی باید تا حد امکان بالا باشد. استحکام تسلیم نقطه تنشی است که در آن تغییرشکل پلاستیک ایجاد می‌شود. نتایج رتبه‌دهی گزینه‌ها که با استفاده از روش MOORA به دست آمده در جدول ۵ و برای نمایش گرافیکی و درک بهتر در شکل ۳ نیز نشان داده شده است.



شکل ۲- وزن معیارها حاصل از روش subjective

جدول ۵- رتبه‌دهی گزینه‌ها با استفاده از روش MOORA

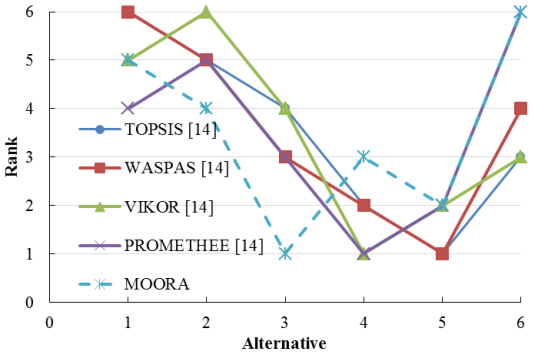
شماره	گزینه	مقدار y_i^*	رتبه
۱	DP600	۰/۱۵۲۷	۵
۲	TRIP700	۰/۱۶۵۲	۴
۳	TWIP	۰/۲۱۲۱	۱
۴	6005-T6	۰/۱۹۶۸	۳
۵	6082-T6	۰/۲۰۰۵	۲
۶	Al-foam	۰/۰۴۳۵	۶



شکل ۳- نمایش رتبه‌دهی گزینه‌ها با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره MOORA

همانطور که مشاهده می‌شود، فولاد TWIP دارای بهترین رتبه و در نتیجه بهترین انتخاب برای جنس بدنه واگن قطار در صنایع حمل و نقل ریلی است. از طرف دیگر فوم آلومینیوم به عنوان بدترین گزینه انتخاب شد. با توجه به جدول ۱، مشخص می‌شود که فولاد TWIP دارای بیشترین استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی در بین تمام گزینه‌های در نظر گرفته شده می‌باشد. از طرف دیگر، فوم آلومینیوم دارای کمترین استحکام تسلیم، استحکام کششی و مدول یانگ و

همچنین بیشترین قیمت در بین تمام گزینه‌ها است. ماده دیگری که می‌تواند به عنوان گزینه موردنظر برای ساخت بدنه واگن قطار انتخاب شود، آلومینیوم 6082-T6 است؛ چرا که در تحلیل رتبه دوم را به خود اختصاص داده است. این ماده دارای خواص مقاومت به خوردگی بالاتر و چگالی کمتری نسبت به گزینه‌های فولادی است؛ همچنین دارای بیشترین استحکام تسلیم، استحکام کششی و مدول یانگ در بین گزینه‌های آلومینیومی است. شکل ۴ مقایسه نتایج روش تصمیم‌گیری چندمعیاره MOORA که در این مقاله استفاده شده را با نتایج مرجع [۱۴] نشان می‌دهد. در مرجع [۱۴]، شارما و همکاران از چهار روش تصمیم‌گیری TOPSIS، WASPAS، VIKOR و PROMETHEE برای انتخاب بهترین ماده استفاده کردند. همانطور که مشخص است، در همه روش‌ها، دو گزینه آلومینیوم 6082-T6 و آلومینیوم 6005-T6 جزء بهترین انتخاب‌ها می‌باشند درحالیکه در این مقاله فولاد TWIP به عنوان بهترین گزینه انتخاب شد؛ همچنین آلیاژ آلومینیوم 6082-T6 به عنوان دومین گزینه مناسب انتخاب شد که منطبق بر روش‌های VIKOR و PROMETHEE است.



شکل ۴- مقایسه نتایج روش MOORA با روش‌های استفاده شده در مرجع [۱۴]

در پایان نیز از روش همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن برای مقایسه روش‌ها استفاده شد. این ضریب بین روش MOORA با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS، WASPAS، VIKOR و PROMETHEE به ترتیب به میزان ۰/۳۷۱۴، ۰/۶۵۷۱، ۰/۲۵۷۱ و ۰/۷۱۴۳ به دست آمد. همانطور که قابل مشاهده است، بیشترین همبستگی بین روش‌های MOORA و PROMETHEE حاصل شده است. در تحقیق مرادیان و همکاران [۲۵]، ضریب همبستگی اسپیرمن بین روش‌های MOORA و TOPSIS به میزان ۰/۹۹۴۱ و بین روش‌های MOORA و VIKOR به میزان ۰/۹۴۷۱ به دست آمد. این ضریب در تحقیق کاراند و چاکرابورتی [۳۱]، بین روش‌های MOORA و TOPSIS به میزان ۰/۸۳۰۳ و بین روش‌های MOORA و VIKOR به میزان ۰/۹۴۷۱ به دست آمد؛ همچنین در تحقیق آخوندی و مدانلو [۲۶]، ضریب همبستگی اسپیرمن بین روش‌های MOORA و TOPSIS به میزان ۰/۹۵ به دست آمد. به علاوه در تحقیق سبایوس و همکاران [۳۲]، ضریب همبستگی اسپیرمن بین روش‌های MOORA و VIKOR به میزان ۰/۴۴ و بین روش‌های MOORA و TOPSIS به میزان ۰/۸۷ به دست آمد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه برای انتخاب جنس مناسب در ساخت بدنه واگن قطار در صنایع حمل و نقل ریلی استفاده شد. ۶ ماده شامل فولاد DP600، فولاد TRIP700، فولاد TWIP، آلومینیوم 6005-T6، آلومینیوم 6082-T6 و آلومینیوم متخلخل با سلول بسته به عنوان گزینه‌ها و همچنین خواص آنها شامل چگالی، استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی، نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نهایی، مدول یانگ، هزینه و مقاومت به خوردگی به عنوان معیارهای انتخاب بهترین ماده در نظر گرفته شدند. در ابتدا وزن‌دهی گزینه‌ها با استفاده از روش آنتروپی شانون صورت گرفت که به دلیل ناسازگاری وزن‌های به دست آمده با واقعیت مساله، از روش وزن‌دهی subjective استفاده شد. در ادامه با استفاده از روش MOORA و همچنین مشخص نمودن معیارهایی که باید بیشینه و کمینه شوند، بهترین گزینه برای انتخاب جنس بدنه واگن قطار به دست آمد. نتایج نشان داد که دو گزینه فولاد TWIP و آلیاژ آلومینیوم 6082-T6 به ترتیب بهترین انتخاب‌ها می‌باشند. از طرف دیگر فوم آلومینیوم و فولاد DP600 به عنوان بدترین گزینه‌ها انتخاب شدند؛ همچنین مشخص شد که نتایج به دست آمده در این تحقیق با سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مطابقت قابل قبولی دارد.

مراجع

[1] Fakhari M, Salehi M (2021) Health Condition Monitoring of railway wheels through vibration analysis using the moving RMS. J. Solid Fluid Mech. 11(4):85-92.

[2] Ezoji R, Talaee MR (2019) Aerodynamic analysis and modeling of effect of nose shape parameters on overturn of high speed train under crosswind. J. Solid Fluid Mech. 9(3):155-176.

[3] Sarafrazi V, Talaee M (2016) Analysis and modeling of aerodynamic pressure wave due to high-speed trains passage. J. Solid Fluid Mech. 6(3):65-78.

[4] Sun Y, Anwar M, Hassan NM, Spiryagin M, Cole C (2021) A review of hydrogen technologies and engineering solutions for railway vehicle design and operations. Rail Eng Sci 29:212-232.

[5] Raza SA, Shah N, Sharif A (2019) Time frequency relationship between energy consumption, economic growth and environmental degradation in the United States: Evidence from transportation sector. Energy 173:706-720.

[6] Zhang D, Tang YY, Peng QY (2023) A novel approach for decreasing driving energy consumption during coasting and cruise for the railway vehicle. Energy 263:125615.

[7] Jagadeesh P, Puttegowda M, Oladijo OP, Lai CW, Gorbatyuk S, Matykiewicz D, Rangappa SM, Siengchin S (2022) A comprehensive review on polymer composites in railway applications. Poly Comp 43(3):1238-1251.

[8] Ulianov C, Önder A, Peng Q (2018) Analysis and selection of materials for the design of lightweight railway vehicles. IOP Confe Series: Mat Sci Eng 292(1): 012072.

[9] Im JM, Shin KB (2019) Technology of Light Weight Railway Vehicle using Composite Materials. Int J Rail 12(2):23-27.

[10] Sivamaran V, Azaruddin S (2021) A Short Review on Applications of Aluminium Composites: Automotive, Aerospace and aircraft, Rail transport, and Marine transport industry. J Prod Ind Eng 2(2):36-42.

[11] Sivamaran V, Azaruddin S (2021) A Short Review on Applications of Aluminium Composites: Automotive, Aerospace and aircraft, Rail transport, and Marine transport industry. J Pro Ind Eng 2(2):36-42.

[12] Shi T, Wang C, Mi G, Yan F (2019) A study of microstructure and mechanical properties of aluminum alloy using laser cleaning. J Manuf Proc :42:60-66.

[13] Parveez B, Jamal NA, Maleque A, Yusof F, Jamadon NH, Adzila S (2021) Review on advances in porous Al composites and the possible way forward. J Mat Res Tech 14:2017-2038.

[14] Sharma V, Zivic F, Adamovic D, Ljusic P, Kotorcevic N, Slavkovic V, Grujovic N (2022) Multi-Criteria Decision Making Methods for Selection of Lightweight Material for Railway Vehicles. Mater 16(1):368.

[15] Lohakare P, Bewoor A, Kumar R, Said NM, Sharifpur M (2022) Benchmark using multi criteria decision making (MCDM) technique to optimally select piston material. Eng Ana Bound Elem 142:52-60.

[16] Emovon I, Oghenenyerovwho OS (2020) Application of MCDM method in material selection for optimal design: A review. Res Mat 7:100115.

[17] Patnaik PK, Swain PT, Mishra SK, Purohit A, Biswas S (2020) Composite material selection for structural applications based on AHP-MOORA approach. Mat Tod: Proc 33:5659-5663.

[18] Dev S, Aherwar A, Patnaik A (2020) Material selection for automotive piston component using entropy-VIKOR method. Silicon 12:155-169.

[19] Zeng YP, Lin CL, Dai HM, Lin YC, Hung JC (2021) Multi-performance optimization in electrical discharge machining of Al2O3 ceramics using Taguchi base AHP weighted TOPSIS method. Proc 9(9):1647.

[20] Wu HW, Li EQ, Sun YY, Dong BT (2021) Research on the operation safety evaluation of urban rail stations based on the improved TOPSIS method and entropy weight method. J Rail Trans Plan Manag 20:100262.

[21] Tuş A, Aytaç Adalı E (2019) The new combination with CRITIC and WASPAS methods for the time and attendance software selection problem. Opsearch 56:528-538.

[22] Sarwar M, Akram M, Liu P (2021) An integrated rough ELECTRE II approach for risk evaluation and effects analysis in automatic manufacturing process. Artif Intell Rev 54(6):4449-4481.

[23] Gul M, Celik E, Gumus AT, Guneri AF (2018) A fuzzy logic based PROMETHEE method for material selection problems. Beni-Suef Univ J Bas App Sci 7(1):68-79.

[24] Sasanka CT, Ravindra K (2015) Implementation of VIKOR method for selection of magnesium alloy to suit automotive applications. International J Adv Sci Tech 83(5):49-58.

[25] Moradian M, Modanloo V, Aghaiee S (2019) Comparative analysis of multi criteria decision making techniques for material selection of brake booster valve body. J Traff Transp Eng (English Edition) 6(5):526-534.

[26] Akhoundi B, Modanloo V (2023) A multi-criteria decision-making analysis on the extrusion-based additive manufacturing of ABS/Cu composites. Int J Inter Des Manuf (IJIDeM) 3:1-9.

[27] Khorshidi M, Erkayman B, Albayrak Ö, Kılıç R, Demir Hİ (2022) Solar power plant location selection using integrated fuzzy DEMATEL and fuzzy MOORA method. Int J Amb Energy 43(1):7400-7409.

[28] Modanloo V, Doniavi A, Hasanzadeh R (2016) Application of multi criteria decision making methods to select sheet hydroforming process parameters. Dec Sci Let 5(3):349-360.

[29] Modanloo V, Alimirzaloo V, Elyasi M (2019) Multi-objective optimization of the stamping of titanium bipolar plates for fuel cell. ADMT J 12(4):1-8.

[30] Emovon I, Okpako OS, Edjokpa E (2021) Application of fuzzy MOORA method in the design and fabrication of an automated hammering machine. Wor J Eng 18(1):37-49.

[31] Karande P, Chakraborty S (2012) Application of multi-objective optimization on the basis of ratio analysis (MOORA) method for materials selection. Mater & Des 37:317-324.

[32] Ceballos B, Lamata MT, Pelta DA (2016) A comparative analysis of multi-criteria decision-making methods. Prog Artif Intell 5:315-322.