Journal of Structural and Construction Engineering, 8(Special Issue 2), 2021, pp. 418-439

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Application of Multi-Index Decision Making Methods to Ranking Reactive powder concrete mixing designs

Abbas Moslehi[1]* , Mohammad Ali Dashti Rahmatabadi[2] , Mohammad Hossein Arman[3]

1- PhD Student of Engineering and Construction Management, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran
2 -Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran
3 -Assistant Professor, Department of Management, Najaf Abad Branch, Islamic Azad University, Najaf Abad, Iran

ABSTRACT

Reactive powder concrete (RPC) is a special type of concrete with extremely high strength. Due to the variety of methods and materials, many mixing schemes have been proposed by researchers, which require the use of decision making techniques to evaluate and select the most appropriate one. In this study, different multi-criteria decision making techniques were used to evaluate and rank RPC mixing schemes; different techniques led to different priorities. Experts first identified the most effective indicators on RPC mixing schemes and selected the most important ones, based on which a set of research mixing schemes was reviewed and a set of them was selected as the final options for evaluation and ranking. Thirteen mixing schemes with 9 effective indicators were evaluated and ranked. Options were evaluated by numerical taxonomy technique and the weight of the indices was obtained by Shannon entropy method. With decision matrix and weighting indices, RPC mixing schemes were ranked separately by three techniques SAW, TOPSIS and VIKOR. Finally, using the Copeland technique, the results of the different techniques were combined and a final ranking was obtained. The results of this study showed that the RPC13 mixing scheme was identified as the highest and RPC5 the lowest. Comparison of the final Copeland rankings with SAW, TOPSIS and VIKOR techniques showed that the ranking results were 100%, 85% and 70% respectively with SAW, VIKOR and TOPSIS. Therefore, the SAW method was identified as the most appropriate method for ranking RPC mixing schemes. Changes in ranking results by changing the ranking method, the results of the approach presented in this study are more reliable by combining the rankings obtained from different methods.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 04 February 2020
Revise Date: 06 June 2020
Accept Date: 29 June 2020

Keywords:
Reactive Powder Concrete
Mixing Design Ranking
Multi-character Decision Making
Numerical Taxonomy
SAW
TOPSIS
VIKOR
Copeland

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.218625.2071

*Corresponding author: Mohammad Ali Dashti Rahmatabadi2
Email address: dashti@iauyazd.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

رتبه‌بندی طرح‌های اختلاط بتن پودری واکنشی با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره با تاکید بر سه روش SAW، TOPSIS و VIKOR

عباس مصلحی[۱]، محمّد علی دشتی رحمت‌آبادی[۲*]، حسین آرمان[۳]

۱- گروه عمران، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۲- گروه عمران، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۳- گروه مدیریت، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

چکیده

بتن پودری واکنشی (واکنش‌پذیر) نوع خاصی از بتن است که استحکام و دوام آن با از بین بردن مصالح درشت دانه و استفاده از مواد افزودنی، بهبود یافته است و به دلیل تنوع در مصالح و روش ساخت آن، نسبت اجزای تشکیل دهنده یا به عبارتی طرح‌های اختلاط متفاوتی برای تولید این نوع بتن ارائه شده است و تصمیم‌گیری در مورد انتخاب مناسب‌ترین طرح اختلاط بتن پودری واکنشی مشکل خواهد بود. در این تحقیق سعی بر آن است که از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به منظور ، رتبه‌بندی و انتخاب مناسب‌ترین طرح‌های اختلاط بتن پودری واکنشی استفاده شود. شاخص‌های مؤثر در طرح اختلاط بتن، شامل: سیمان، آب، پودر سیلیس، ماسه سیلیسی، پودر میکروسیلیس، فوق روان کننده، مقاومت فشاری، درصد جذب آب و وزن واحد حجم است که با استفاده از پیشینه پژوهش تعیین و مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. ابتدا وزن شاخص‌ها با روش آنتروپی شانون مشخص، و ماتریس تصمیم تشکیل شد، سپس طرح‌های اختلاط بتن پودری واکنشی با سه تکنیک ساو، تاپسیس و ویکور بصورت مجزا رتبه‌بندی شدند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد به کارگیری تکنیک‌های گوناگون تصمیم‌گیری، منجر به رتبه‌بندی متفاوتی برای گزینه‌ها می‌شود. بنابر این جهت حصول رتبه‌بندی نهایی، روش کُپلند به عنوان بهترین روش پیشنهاد شده است و استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای رتبه‌بندی طرح‌های اختلاط بتن پودری واکنشی، روشی مناسب و قابل قبول است. رتبه‌بندی نهایی کُپلند با تکنیک‌های ساو، تاپسیس و ویکور مقایسه و معلوم گردید که نتایج رتبه‌بندی روش‌های ساو، تاپسیس و ویکور به ترتیب ۱۰۰، ۸۵ و ۷۰ درصد با روش کُپلند مطابقت دارد. همچنین روش ساو به دلیل مطابقت ۱۰۰ درصدی با روش کُپلند، مناسب‌ترین روش برای رتبه‌بندی طرح‌های اختلاط بتن واکنشی شناخته شد.

کلمات کلیدی: بتن پودری واکنشی، رتبه‌بندی طرح اختلاط، تصمیم‌گیری چند معیاره، ساو، تاپسیس، ویکور، کُپلند.

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۳۹۸/۱۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۳/۱۷	۱۳۹۹/۰۴/۰۹	۱۳۹۹/۰۴/۰۹	۱۴۰۰/۰۶/۳۱	doi: 10.22065/jsce.2020.218625.2071

https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.218625.2071

*نویسنده مسئول: محمّد علی دشتی رحمت‌آبادی

پست الکترونیکی: dashti@iauyazd.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه بسیاری از ساختمان‌های کوچک و بزرگ، پل‌ها، سدها، تونل‌ها، کانال‌ها، مخازن و تانک‌ها، دیوارهای حائل، لوله‌ها و روسازی‌ها از بتن ساخته می‌شود. موفقیت قابل توجه بتن نسبت به سایر مصالح ساختمانی و به خصوص فولاد در کاربرد فراگیر آن را می‌توان مرهون مقاومت فشاری قابل قبول، وجود بیشتر اجزاء تشکیل دهنده آن به عنوان مصالح محلی و ارزان قیمت، سهولت ساخت هر نوع مقطع سازه‌ای و شکل معماری، مقاومت بسیار خوب در مقابل آتش و رطوبت، برخورداری از صلبیت بالا، محافظت و نگهداری کمتر و عمر بهره‌دهی بسیار طولانی، دانست [۱]. با توجه به نیاز روز افزون صنعت ساختمان به مصالح با مشخصات عالی و مطلوب، کاربرد و استفاده از بتن‌های نوین امری ضروری است. ساخت این مواد و مصالح با استفاده از ارزان‌ترین و در دسترس‌ترین مواد، یکی از عوامل مهم در کاربرد تکنولوژی بتن می‌باشد [۲].

بتن پودری واکنشی[۱] (RPC) نوعی از بتن با مقاومت فوق‌العاده زیاد است که از شکل‌پذیری و خاصیت جذب انرژی بسیار خوب، تخلخل بسیار کم، نفوذپذیری ناچیز و مقاومت سایشی بسیار خوب برخوردار است. ایدهٔ تولید RPC نخستین بار در اوایل دههٔ ۱۹۹۰ در فرانسه شکل گرفت و برای اولین بار، در سال ۱۹۹۷ در ساخت یک پل عابر پیاده با دهانهٔ ۶۰ متر در شربروک[۲] کانادا به صورت عملی به کار گرفته شد. مواد به کار رفته در تولید RPC دانه‌های کوارتز ریز با دانه‌بندی خوب و در محدودهٔ ۰/۴-۰/۱۵ میلی‌متر، سیمان پرتلند بدون C_3A و یا C_3A بسیار کم (مثلاً سیمان نوع ۲ یا ۵)، پودر میکروسیلیس[۳] مرغوب و فوق روان کننده[۴] با کیفیت بسیار خوب است که با نسبت آب به سیمان بسیار کم (۰/۲ – ۰/۱۸) ساخته می‌شوند. عمل‌آوری RPC ممکن است در دمای معمولی، و یا تحت فشار و با بخار ^{o}C ۱۶۰ انجام گیرد [۱].

طرح مخلوط بتن، فرآیند تعیین نسبت‌ها و مقادیر اجزای بتن است، به نحوی که بتن تولید شده از استحکام و دوام قابل قبولی برخوردار باشد. تعیین مقادیر نهایی اجزای تشکیل دهنده‌ی بتن معمولی، بر اساس جداول، نمودارها و روابط ارائه شده توسط آیین‌نامه‌های معتبر به همراه آزمون و اصلاح انجام می‌شود؛ به طوری که با تغییر دادن یکی از اجزای آن از نظر کیفیت و کمیت، خواص بتن به صورت متضاد تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۳]. برای ساخت بتن معمولی، باید مسیر مشخصی را جهت طرح اختلاط بتن طی کنیم؛ این مسیر شامل انتخاب درست مصالح و مخلوط کردن آنها و سپس قالب‌گیری و متراکم کردن و در نهایت عمل‌آوری مربوطه طبق استاندارد می‌باشد، ولی روند طرح اختلاط RPC، کمی پیچیده‌تر از بتن معمولی بوده و شرایط خاص برای طرح و ساخت آن وجود دارد [۴]. تاکنون طرح‌های اختلاط RPC متنوعی با استفاده از مصالح بومی در کشور ایران توسط محققین ارائه شده است [۲،۵،۶،۷،۸]، که استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره[۵] (MCDM) برای اولویت‌بندی و انتخاب مناسب‌ترین آنها بسیار ضروری است.

از تکنیک‌های MCDM مانند: ساو[۶] (مجموع ساده وزنی)، تاپسیس[۷] (اولویت‌بندی براساس شباهت به جواب ایده‌آل) و ویکور[۸] (راه حل توافقی و بهینه سازی چند معیاره) در علوم مختلف به صورت مجزا یا همزمان استفاده شده است. پژوهش کنونی بنا دارد با استفاده از تکنیک‌های MCDM، شامل: SAW، TOPSIS و VIKOR، طرح‌های اختلاط RPC را رتبه‌بندی نماید. بدیهی است که به کارگیری روش‌های گوناگون تصمیم‌گیری، به رتبه‌بندی متفاوتی از گزینه‌ها منجر می‌شود. بنابراین جهت حصول رتبه‌بندی نهایی، از روش کُپلند[۹] (روش ادغام نتایج) استفاده خواهد شد.

Reactive Powder Concrete
[2] Sherbrooke
[3] Silica fume
[4] Superplasticizer
[5] Multi Criteria Decision Making (MCDM)
[6] Simple Additive Weighted (SAW)
[7] Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)
[8] Vlse Kriterijumsk Optimizacija Kompromisno Resenje (VIKOR)
[9] Copeland

۲- پیشینه تحقیق

بررسی ادبیات موضوع در مبحث طرح اختلاط بتن پودری واکنشی (RPC) و تصمیم‌گیری با تکنیک‌های چند معیاره، نشان می‌دهد که تحقیقات زیادی توسط پژوهشگران در داخل و خارج از کشور در این زمینه انجام شده است، که مهم‌ترین آنها به شرح زیر است:.

حیدری و توکلی (۱۳۹۴) در بررسی بر روی RPC اصلاح شده، معلوم کردند که RPC، نوعی بتن با مقاومت بالا و تخلخل کم و دارای خواصی همچون مقاومت فشاری، کششی و خمشی بالا، نفوذپذیری کم و مقاومت در برابر حملات مضر است. مصالحی که برای ساخت RPC استفاده می‌شوند شامل سیمان پرتلند، پودر کوارتز، میکروسیلیس، فوق‌روان‌کننده و الیاف فولادی (اختیاری است) می‌باشد. [۹]. معراجی و همکاران (۱۳۹۲ و ۱۳۹۵)، در تحقیقات آزمایشگاهی، به بررسی اثر نوع و مقدار الیاف بر خواص RPC پرداختند و مشخص کردند که استفاده از الیاف در ساخت RPC، باعث بهبود ظرفیت جذب انرژی بتن خواهد شد. بدیهی است این افزایش ظرفیت بستگی به نوع و درصد الیاف به کار رفته در بتن دارد [۱۰،۱۱].

طوفانی میلانی و همکاران (۱۳۹۴) در دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران در دانشگاه تبریز، با استفاده از ماسه سیلیسی موجود در مناطق کویری ایران طرح‌های اختلاط RPC متعددی را معرفی کردند که بتن ساخته شده با این نوع ماسه، از مقاومت مطلوبی برخوردار بود. آنها در این مقاله به ارایه ۶ طرح اختلاط بتن معمولی و ۱۷ طرح اختلاط RPC که ۱۳ طرح آن بدون استفاده از پودر سنگ آهک بود پرداختند [۲]. رستمی نیکو و مستوفی نژاد (۱۳۹۰) در پایان‌نامه کارشناسی ارشد و معراجی و همکاران (۱۳۹۲) در مجله تحقیقات بتن، در تحقیقاتی جداگانه معلوم کردند که با استفاده از مصالح موجود در ایران و به کار بردن الیاف و با عمل‌آوری گرمایی می‌توان به مقاومت‌های فشاری و خمشی بسیار بالایی در این نوع بتن دست یافت [۴،۶].

خالو و همکاران (۱۳۹۱)، در مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر مقدار دوده سیلیسی روی عملکرد RPC را بررسی کردند و اعلام نمودند که استفاده از نوع و مقدار دوده سیلیسی در طرح اختلاط RPC ، روی عملکرد بتن تأثیر می‌گذارد و باعث افزایش استحکام و دوام خواهد شد [۱۲]. دی آمبیکا و همکاران (۲۰۲۰) در طرح‌های اختلاط RPC ، سنگ‌دانه‌های درشت که ضعیف‌ترین ناحیه‌ی اتصال بتن می‌باشند را حذف کرده و برای افزایش استحکام و دوام بتن از مواد افزودنی معدنی از جمله خاکستر بادی و سرباره کوره‌های آهنگدازی به همراه الیاف فولادی استفاده نمودند و نشان دادن که استفاده از مواد افزودنی معدنی باعث افزایش استحکام و دوام RPC خواهد شد [۱۳]. احمد صلاح‌الدین و همکاران (۲۰۲۰) در تعدادی از طرح‌های اختلاط RPC ، تأثیر سنگدانه‌های بازیافتی بر عملکرد بتن در شرایط عمل‌آوری مختلف را بررسی کردند و خواص مختلفی از جمله مقاومت‌های فشاری، خمشی، کششی، جذب آب، مقاومت الکتریکی، مقاومت به سولفات و مقاومت در برابر محیط دریایی مورد آزمایش قرار گرفت و معلوم کردند که خصوصیات مکانیکی RPC تهیه شده با سنگدانه‌های بازیافتی افزایش یافته، در حالی که دوام مقدار کمی کاهش می‌یابد، اما در حد قابل قبول است [۱۴]. چن و لین‌هوا (۲۰۲۰)، استفاده از پودر سنگ آهگ را در طرح اختلاط RPC آزمایش کردند و نتیجه گرفتند که پودر سنگ آهک باعث افزایش مقاومت اولیه می‌شود و با کاهش حجم منافذ بزرگ به تراکم میکروساختار بتن کمک می‌کند [۱۵].

موسوی‌فرد و رئیسی (۱۳۹۸)، در ارزیابی تأثیر پارامترهای کلیدی طرح اختلاط RPC بر مقاومت فشاری، مشخص کردند که بتن پودری واکنشی، حساسیت زیادی به نوع و مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت آن دارد؛ بنابراین برای دستیابی به مشخصات فیزیکی و مکانیکی مطلوب، لازم است در انتخاب مصالح و انتخاب نسبت‌های مخلوط دقت نمود. بررسی این پژوهشگران بر روی RPC نشان می‌دهد که بتن‌های ساخته شده توسط محققین دارای مقاومت فشاری در محدوده‌ی ۱۰۰-۸۰۰ مگاپاسکال، مقاومت خمشی در محدوده‌ی ۳۰-۶۰ مگاپاسکال، مقاومت کششی در محدوده‌ی ۶-۸ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته در محدوده‌ی ۴۰-۷۰ گیگاپاسکال، وزن واحد حجم در محدوده‌ی ۳۰۰۰-۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشند. همچنین در مخلوط‌های بتنی ساخته شده، نسبت آب به مواد سیمانی در محدوده‌ی ۰/۲۴-۰/۱۵، میزان سیمان در محدوده‌ی ۱۴۰۰-۹۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ماسه‌ی کوارتزی در محدودهی ۱۴۰۰-۱۰۰۰

کیلوگرم بر مترمکعب، مقدار نسبت میکروسیلیس به سیمان در محدوده‌ی ۰/۳۵-۰/۱۵ ، الیاف فولادی در محدوده‌ی ۲۵۰-۱۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت وزنی الیاف به مواد سیمانی در محدوده‌ی ۰/۳-۰/۱۵ قرار دارد [۱۶].

تاو و همکاران (۲۰۱۰)، شرایط بهینه برای تولید RPC را مورد بررسی قرار دادند و مخلوط‌های بتنی RPC با نسبت آب به مواد سیمانی مختلف و با سه نوع ماسه سیلیسی و اندازه‌های مختلف ساختند و عمل‌آوری در دماهای متفاوت و در سنین مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاطی است که نسبت آب به مواد سیمانی در آن ۰/۲ است [۱۷].

مستوفی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۴)، در تحقیقی، طرح اختلاط و شرایط عمل‌آوری بهینه در بتن RPC را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاطی بود که نسبت آب به مواد سیمانی در آن برابر ۰/۱۴، نسبت میکروسیلیس به سیمان برابر ۰/۳ و نسبت فوق‌روان‌کننده به سیمان برابر ۰/۰۳ بود و عمل‌آوری حرارتی انجام شده بود [۱۸]. خرم رشید و همکاران (۲۰۲۰)، برای انتخاب یک طرح بهینه مخلوط بتن، ۸ طرح مخلوط بتن را به عنوان گزینه‌ها با ۴ شاخص، شامل: استفاده از مصالح طبیعی، اقتصادی بودن طرح، استحکام و تأثیرات زیست محیطی، را بررسی و با استفاده از سه تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره‌ی TOPSIS، ELECTRE و AHP اولویت‌بندی را انجام دادند. نتایج به دست آمده، اثر بخشی تکنیک‌های تصمیم‌گیری (MCDM) در صنعت ساخت و ساز برای انتخاب مناسب‌ترین طرح مخلوط بتن را ثابت کرد [۱۹].

فام و همکاران (۲۰۱۷)، تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) را به عنوان ابزاری مفید در دست مدیران پروژه برای غلبه بر مشکلات تصمیم‌گیری در پروژه‌های مهندسی عمران معرفی کردند و نتیجه گرفتند که تکنیک‌های MCDM برای انواع مختلف و گسترده‌ای از داده‌ها در پروژه‌های مهندسی عمران قابل استفاده است [۲۰]. رضاییان و حسینی (۱۳۹۴)، برای انتخاب سیستم ساختمانی بهینه، از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره با تاکید بر سه روش TOPSIS، SAW و AHP استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره با توجه به خصوصیات ویژه آنها، می‌توانند در بررسی موضوعات مربوط به انتخاب سیستم بهینه، کاربرد مطلوبی داشته باشند. روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره از این نظر مفید هستند که زمینه را برای تبدیل مسائل پیچیده به مسائل ساده‌تر فراهم می‌آورند که در چارچوب آن، برنامه‌ریز بتواند ارزیابی گزینه‌ها را با کمک معیارها و زیر معیارها انجام دهد. با توجه به این که در مسائل مربوط به انتخاب سیستم ساختمانی بهینه، تعداد معیارها زیاد می‌باشد و احتیاج به اتخاذ تصمیم بر اساس چند معیار است، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌تواند کمک شایانی در انتخاب بهترین راه حل ممکن کند [۲۱].

نعمتی و کاظمی (۱۳۹۳)، پژوهشی برای رتبه بندی شرکت‌های بیمه انجام دادند. آنها ابتدا از روش آنتروپی شانون وزن هر شاخص (معیار) را تعیین و با استفاده از سه روش تصمیم‌گیری چند شاخصه‌ی SAW، TOPSIS، VIKOR اقدام به رتبه‌بندی کردند، سپس نتایج حاصل از اجرای روش‌های مختلف را با استفاده از روش کُپلند (Copeland) ترکیب کردند [۲۲]. همچنین تحقیق بسیار زیادی در زمینه‌ی کاربرد تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در سایر علوم جهت ارزیابی، الویت‌بندی (رتبه‌بندی) و بهینه‌سازی گزینه‌ها انجام گرفته است [۲۶، ۲۵، ۲۴، ۲۳].

۳- روش پژوهش

در اکثر پژوهش‌های انجام شده‌ی مربوط به رتبه‌بندی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه، فقط از یک روش تصمیم‌گیری چند شاخصه برای رتبه‌بندی استفاده شده است. در این گونه موارد برای افزایش قابلیت اطمینان به نتایج و پوشش کاستی‌های هر یک از روش‌ها، می‌توان از چندین روش استفاده کرد. سپس، با استفاده از روش‌های ترکیبی که کاراترین آن‌ها کُپلند است، نتایج حاصل از روش‌های مختلف را با هم ترکیب کرد. در این پژوهش، برای رفع کاستی روش‌های مختلف و رسیدن به نتایج مطمئن‌تر، با استفاده از سه روش SAW، TOPSIS و VIKOR که از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است و با توجه به وزن محاسبه شده برای هر شاخص و مقادیر شاخص‌ها، طرح‌های اختلاط RPC رتبه‌بندی می‌شوند. سپس، با استفاده از روش کُپلند نتایج حاصل از روش‌های مختلف با هم ترکیب خواهند شد.

این پژوهش از نوع مطالعه تطبیقی- تحلیلی بوده و انجام مدل‌سازی پژوهش عملیاتی با تکنیک‌های MCDM می‌باشد. با توجه به بررسی پیشینه پژوهش و بررسی مقالات مشابه، از مجموعه طرح‌های اختلاط RPC ارایه شده توسط طوفانی میلانی و همکاران برای ارزیابی و رتبه‌بندی استفاد شده است [۲]. این مجموعه دارای ۱۳ طرح اختلاط RPC به عنوان گزینه‌ها با ۹ شاخص مؤثر بر ارزیابی و رتبه‌بندی طرح اختلاط بتن با جنس ایده‌آل‌های مثبت و منفی (مثبت، یعنی هر چه بیشتر بهتر و منفی، یعنی هر چه کمتر بهتر) مشخص و ماتریس تصمیم تشکیل شد. مراحل انجام پژوهش در گام‌های زیر ارایه شده است. تمامی محاسبات توسط نرم افزار اکسل انجام شده است.

۴- گام‌های انجام پژوهش:

گام ۱ : بررسی شاخص‌های (معیارهای) طرح اختلاط RPC و تعیین جنس ایده‌آل‌های شاخص‌ها

جدول ۱ طرح اختلاط بتن RPC ارائه شده توسط طوفانی میلانی و همکاران جهت ارزیابی و رتبه‌بندی را نشان می‌دهد:

جدول۱ : طرح اختلاط پیشنهادی طوفانی میلانی و همکاران [۲].

اجزاء بتن / طرح اختلاط	مقادیر اجزاء طرح اختلاط بتن (kg/m^3)						نتایج حاصل از انجام آزمایش		
	سیمان	ماسه سیلیسی	پودر سیلیس	ژل میکروسیلیس	فوق روان کننده	آب	مقاومت فشاری (MPa)	جذب آب (٪)	وزن واحد حجم بتن (kg/m^3)
(RPC1)	۸۱۰	۹۶۱	۱۸۲	۱۶۷	۴۰	۲۰۰	۱۳۲	۱/۰۴	۲۳۶۰
(RPC2)	۸۹۷	۷۹۷	۲۰۵	۱۸۸	۴۶	۲۰۶	۱۴۳	۰/۹۸	۲۳۳۹
(RPC3)	۶۷۳	۱۱۲۵	۱۴۴	۱۹۲	۴۰	۱۷۳	۱۳۰	۰/۹۹	۲۳۴۷
(RPC4)	۷۳۰	۱۰۷۰	۱۷۵	۱۷۵	۳۹	۱۷۰	۱۳۴	۰/۹۵	۲۳۵۹
(RPC5)	۹۱۹	۸۷۰	۷۷	۲۲۱	۳۸	۲۰۴	۱۳۹	۱/۱۰	۲۳۲۹
(RPC6)	۷۱۴	۱۲۰۳	۸۶	۱۳۲	۳۹	۱۸۶	۱۲۱	۱/۰۳	۲۳۶۰
(RPC7)	۶۲۹	۱۰۸۵	۲۶۱	۱۵۱	۳۶	۱۹۸	۱۲۵	۰/۷۹	۲۳۶۰
(RPC8)	۸۳۰	۱۰۸۰	۱۰۰	۱۵۰	۴۲	۱۸۰	۱۳۲	۰/۷۵	۲۳۸۲
(RPC9)	۷۵۰	۱۰۵۱	۱۱۹	۲۱۵	۴۱	۱۷۰	۱۳۱	۰/۹۳	۲۳۴۶
(RPC10)	۱۰۲۱	۶۶۲	۱۲۲	۲۵۳	۴۸	۲۰۴	۱۳۶	۱/۰۸	۲۳۱۰
(RPC11)	۸۴۰	۹۲۴	۱۷۸	۲۰۲	۴۲	۱۸۰	۱۴۱	۰/۸۲	۲۳۶۶
(RPC12)	۸۹۸	۸۹۵	۱۱۰	۱۸۸	۴۴	۲۰۷	۱۳۸	۰/۹۷	۲۳۴۲
(RPC13)	۸۹۰	۷۰۰	۲۹۶	۱۸۷	۴۶	۲۰۳	۱۴۴	۱/۰۱	۲۳۲۲

مهم‌ترین مرحله در طرح مسئله، تعیین شاخص‌های تصمیم‌گیری و جنس (وزن) ایده‌آل‌های شاخص‌های (معیارهای) مؤثر انتخاب، ارزیابی و رتبه‌بندی طرح‌های اختلاط RPC است که در ادامه به بررسی شاخص‌ها و تعیین جنس (وزن) ایده‌آل‌های مثبت (یعنی هر چه بیشتر بهتر) و ایده‌آل‌های منفی (یعنی هر چه کمتر بهتر) خواهیم پرداخت:

۱-۱- شاخص سیمان: سیمان اصطلاحاً به ماده‌ای اطلاق می‌شود که با انجام واکنش شیمیایی با آب (واکنش هیدراسیون)، نقش چسباندن مصالح سنگی به یکدیگر و تولید جسم سخت بتن را ایفا می‌کند. مواد اولیهٔ سیمان عمدتاً از خاک رس و آهک تشکیل شده است [۱]. سیمان نقش بسیار مهمی در طرح اختلاط RPC و همچنین مقاومت بتن بعد از خشک شدن دارد، بنابر این شاخص با ایده‌آل مثبت در ماتریس تصمیم گیری در نظر گرفته می‌شود.

۱-۲- شاخص ماسه سیلیسی: یکی از ویژگی‌های RPC، حذف کردن مصالح سنگی درشت دانه، برای رسیدن به ساختاری همگن‌تر است [۴]، بنابر این قسمت اعظم ترکیب RPC از ماسه ریز دانه تشکیل شده است که جایگزین مصالح دانه‌ای بتن معمولی شده است. ماسه سیلیسی می‌تواند در افزایش مقاومت RPC نقش بسزایی ایفا کند [۷]. این شاخص با ایده‌آل مثبت در نظر گرفته می‌شود.

۱-۳- شاخص پودر سیلیس: پودر سیلیس نقش پر کنندگی فضای بین ماسه سیلیسی را بر عهده دارد که علاوه بر باعث کاهش جذب آب و افزایش دوام، باعث و افزایش مقاومت فشاری بتن RPC خواهد شد [۲]. این شاخص نیز با ایده‌آل مثبت خواهد بود.

۱-۴- شاخص میکروسیلیس یا دوده سیلیسی: ذرات بسیار ریز و غیر کریستالی سیلیسی هستند که محصول جانبی کوره‌های دوار الکتریکی بوده و از عنصر پایه‌ی سیلیسیم یا آلیاژهای حاوی سیلیسیم تولید می‌شود. میکروسیلیس به عنوان یک ماده‌ی افزودنی سیمانی طبقه بندی می‌شود. با خاصیت سیمانی و پوزولانی، ترکیبات جدیدی از C-S-H (کلسیم سیلیکات هیدرات، نتیجه واکنش بین فازهای سیلیکات سیمان پرتلند و آب است) تولید کرده و بافت مستحکم‌تری فراهم کرده که منجر به مقاومت بالاتر می‌شود. به دلیل نرمی زیاد، تمام حفره‌های میکروسکوپی خمیر سیمان را پر کرده و بتن کاملاً توپری فراهم کرده که منجر به دوام بالاتر می‌شود [۲۷]. تأثیر شاخص ژل میکروسیلیس با ایده‌آل مثبت است.

۱-۵- شاخص فوق روان کننده: این مواد بر روی ذرات سیمان می‌نشینند و با باردار کردن ذرات سیمان، ایجاد نیروی دافعه بین ذرات می‌کنند بنابراین ذرات همدیگر را دفع کرده و بتن روان می‌شود. فوق روان کننده‌ها برای سه منظور در بتن به کار می‌روند:

الف) در بتن با نسبت آب به سیمان برابر با بتن شاهد، باعث افزایش روانی بتن شده و بتن را بدون کاهش مقاومت، کار پذیر می‌کنند.

ب) در بتن با نسبت آب به سیمان کمتر نسبت به بتن شاهد، روانی کافی را به بتن می‌دهند و باعث افزایش مقاومت بتن می‌شوند.

پ) در بتن با عیار سیمان کمتر، می‌توانند به وسیله کاهش نسبت آب به سیمان و تأمین روانی باعث صرفه جویی در مصرف سیمان شوند. شاخص فوق روان کننده با ایده‌آل مثبت در نظر گرفته می‌شود.

۱-۶- شاخص آب: آبرامز[1] در سال ۱۹۱۸ دریافت که رابطهٔ معکوسی بین نسبت آب به سیمان (آب به مواد سیمانی) و مقاومت بتن وجود دارد. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، برای نسبت‌های آب به سیمان کم‌تر از ۰/۳، با کاهش اندک در نسبت آب به سیمان، افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری بتن حاصل می‌شود. تولید بتن‌های با مقاومت خیلی بالا اصولاً با رعایت نسبت آب به مواد سیمانی حدود ۰/۲۵ انجام می‌گیرد [۱]. در ماتریس تصمیم شاخص آب با ایده‌آل منفی است.

۱-۷- شاخص مقاومت فشار: مقاومت فشاری بتن نه تنها به عنوان مهم‌ترین خصوصیت مکانیکی بتن، بلکه به عنوان یکی از مهم‌ترین خواص رفتاری بتن شناخته می‌شود. عوامل مؤثر بر مقاومت فشاری بتن، عبارتند از: نوع نمونه، اندازهٔ نمونه، سرعت بارگذاری، نوع سیمان، نسبت آب به سیمان (نسبت آب به مواد سیمانی)، مواد سیمانی تکمیلی، خصوصیات سنگدانه، شرایط مراقبت از بتن (زمان، رطوبت، دما) [۱]. این شاخص با ایده‌آل مثبت در نظر گرفته خواهد شد.

۱-۸- شاخص جذب آب: بهبود فوق‌العاده RPC در برابر همه انواع مهاجم‌های محیطی نظیر کلرایدها، سولفات‌ها و یا سیکل‌های یخبندان و ذوب شدن ناشی از نفوذ ناپذیر بودن و در نتیجه جذب آب کمتر آن است.

دو علت اصلی باعث ایجاد این ویژگی (نفوذ ناپذیری و جذب آب کم) در RPC شده است: ترکیب مواد از دانه‌های بسیار ریز (پودر سیلیس) که دانه‌های ریزتر فواصل دانه‌های درشت (ماسه سیلیسی) را پر می‌نماید و در نهایت یک منحنی پیوسته از اندازه دانه‌ها حاصل می‌شود؛ ناحیه اتصال خمیر سیمان به سنگدانه‌ها که در RPC نسبت به بتن معمولی خیلی متراکم و نفوذ ناپذیرتر است که ناشی از انجام هیدراتاسیون کامل‌تر در اطراف سنگدانه‌ها است [۸]. این شاخص با ایده‌آل منفی وارد ماتریس تصمیم می‌شود.

۱-۹- شاخص جرم مخصوص: بتن هر چقدر متراکم‌تر باشد و فضای خالی از مصالح پر شود، دارای جرم مخصوص بیشتر و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری و جذب آب کمتر وافزایش دوام (طول عمر بیشتر) را به دنبال دارد [۲۸]. این شاخص نیز با ایده‌آل مثبت است. در جدول ۲ وزن (جنس) مؤثر بر انتخاب طرح اختلاط RPC تعیین شده است.

جدول۲ : وزن معیارهای موثر بر انتخاب طرح اختلاط RPC

شاخص‌ها	سیمان	ماسه سیلیسی	پودر سیلیس	ژل میکروسیلیس	فوق روان کننده	آب	مقاومت فشاری	جذب آب	وزن مخصوص بتن
وزن	+	+	+	+	+	-	+	-	+

لازم بذکر است که از بین شاخص‌های فوق دو شاخص آب و جذب آب منفی (یعنی هرچه کمتر بهتر) و سایر شاخص‌ها مثبت (یعنی هرچه بیشتر بهتر) هستند.

گام ۲: تشکیل ماتریس تصمیم D

ماتریس تصمیم ماتریسی است که سطر و ستون آن به ترتیب دربردارنده گزینه‌ها و معیارها (شاخص‌ها) می‌باشند به گونه‌ای که درایه r_{ij} بیانگر مقدار معیار j برای گزینه i است. برای رتبه‌بندی، تکنیک‌های مختلفی وجود دارد. در دهه‌های اخیر توجه به تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) برای تصمیم‌گیری‌های پیچیده معطوف شده است. تکنیک‌های تصمیم‌گیری به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند:

الف) تکنیک‌های چند هدف[1] (MODM): غالباً به منظور طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ب) تکنیک‌های چند شاخصه[2] (MADM): غالباً به منظور ارزیابی گزینه‌ها و انتخاب گزینه یا گزینه‌های برتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۹،۳۰]. هر مسئله تصمیم‌گیری چند شاخصه را می‌توان در قالب ماتریس تصمیم‌گیری بصورت جدول ۳ خلاصه کرد:

جدول۳ : ماتریس تصمیم D

شاخص / گزینه	X_1	X_2	. . .	X_n
A_1	r_{11}	r_{12}	. . .	r_{1n}
A_2	r_{21}	r_{22}	. . .	r_{2n}
.	.	.	. . .	.
.	.	.	. . .	.
A_m	r_{m1}	r_{m2}	. . .	r_{mn}

A_1، A_2 ، . . . A_m در ماتریس تصمیم گیری بترتیب تشکیل دهنده m گزینه از قبل معلوم، و X_1، X_2 ، . . . X_n نشان دهنده n شاخص برای سنجش مطلوبیت هر گزینه و عناصر r_{ij} بیان‌گر مقادیر خاص از شاخص j ام برای گزینه i ام است.

در این تحقیق از تکنیک‌های چند شاخصه (MADM) برای رتبه‌بندی استفاده شده است. تشکیل ماتریس تصمیم گیری D ، اجزاء طرح اختلاط RPC و نتایج حاصل از انجام آزمایش بتن بر روی هر یک از طرح‌های اختلاط را به عنوان شاخص j در نظر گرفته و با $X_1,X_2,X_3,\ldots,X_9$ و هر یک از طرح‌های اختلاط RPC را به عنوان گزینه i در نظر گرفته و با $A_1,A_2,A_3,\ldots A_{13}$ نمایش می‌دهیم.

از آنجا که در این تحقیق ۱۳ طرح اختلاط و ۹ شاخص (معیار) وجود دارد، لذا ماتریس تصمیم یک ماتریس ۹×۱۳ می‌باشد. به منظور تشکیل ماتریس تصمیم، برای هر طرح اختلاط کدهای بدست آمده از شواهد استخراج گردید. ماتریس تصمیم D و جنس شاخص‌ها در جدول ۴ آورده شده است. در این جدول اعداد نشان داده شده همان عناصر ماتریس (r_{ij}) تصمیم‌گیری هستند.

جدول۴ : ماتریس تصمیم D

شاخص j / گزینه i	مقادیر اجزاء طرح اختلاط بتن (kg/m^3)						نتایج حاصل از انجام آزمایش		
	X_1 (سیمان)	X_2 (ماسه سیلیسی)	X_3 (پودر سیلیس)	X_4 (ژل میکروسیلیس)	X_5 (فوق روان کننده)	X_6 (آب)	X_7 (مقاومت فشاری)	X_8 (جذب آب)	X_9 (وزن مخصوص بتن)
جنس شاخص‌ها	+	+	+	+	+	−	+	−	+
A_1 (RPC1)	۸۱۰	۹۶۱	۱۸۲	۱۶۷	۴۰	۲۰۰	۱۳۲	۱/۰۴	۲۳۶۰
A_2 (RPC2)	۸۹۷	۷۹۷	۲۰۵	۱۸۸	۴۶	۲۰۶	۱۴۳	۰/۹۸	۲۳۳۹
A_3 (RPC3)	۶۷۳	۱۱۲۵	۱۴۴	۱۹۲	۴۰	۱۷۳	۱۳۰	۰/۹۹	۲۳۴۷
A_4 (RPC4)	۷۳۰	۱۰۷۰	۱۷۵	۱۷۵	۳۹	۱۷۰	۱۳۴	۰/۹۵	۲۳۵۹
A_5 (RPC5)	۹۱۹	۸۷۰	۷۷	۲۲۱	۳۸	۲۰۴	۱۳۹	۱/۱۰	۲۳۲۹
A_6 (RPC6)	۷۱۴	۱۲۰۳	۸۶	۱۳۲	۳۹	۱۸۶	۱۲۱	۱/۰۳	۲۳۶۰
A_7 (RPC7)	۶۲۹	۱۰۸۵	۲۶۱	۱۵۱	۳۶	۱۹۸	۱۲۵	۰/۷۹	۲۳۶۰
A_8 (RPC8)	۸۳۰	۱۰۸۰	۱۰۰	۱۵۰	۴۲	۱۸۰	۱۳۲	۰/۷۵	۲۳۸۲
A_9 (RPC9)	۷۵۰	۱۰۵۱	۱۱۹	۲۱۵	۴۱	۱۷۰	۱۳۱	۰/۹۳	۲۳۴۶
A_{10} (RPC10)	۱۰۲۱	۶۶۲	۱۲۲	۲۵۳	۴۸	۲۰۴	۱۳۶	۱/۰۸	۲۳۱۰
A_{11} (RPC11)	۸۴۰	۹۲۴	۱۷۸	۲۰۲	۴۲	۱۸۰	۱۴۱	۰/۸۲	۲۳۶۶
A_{12} (RPC12)	۸۹۸	۸۹۵	۱۱۰	۱۸۸	۴۴	۲۰۷	۱۳۸	۰/۹۷	۲۳۴۲
A_{13} (RPC13)	۸۹۰	۷۰۰	۲۹۶	۱۸۷	۴۶	۲۰۳	۱۴۴	۱/۰۱	۲۳۲۲

گام ۳: تعیین وزن (ضریب اهمیت) شاخص‌ها

یکی از مهم‌ترین قسمت‌های حل مسائل اولویت بندی، وزن دهی شاخص‌ها می‌باشد. وزن شاخص، معیاری از اهمیت و ارجحیت شاخص در محدوده مورد بررسی می‌باشد. از آن جا که ماتریس تصمیم دارای شاخص‌های مختلفی است، دانستن وزن هر یک از این شاخص‌ها در تصمیم گیری ضروری است. وزن هر شاخص، اهمیت نسبی آن را نسبت به شاخص‌های دیگر بیان می‌کند. انتخاب آگاهانه و صحیح وزن‌ها کمک بزرگی در جهت رسیدن به هدف مورد نظر می‌نماید. وزن دهی شاخص‌ها با روش‌های مختلفی انجام می‌شود که در این تحقیق از وزن دهی آنتروپی شانون[1] برای رتبه‌بندی هر سه روش SAW، TOPSIS و VIKOR استفاده خواهد شد.

در تئوری اطلاعات برای سنجش عدم قطعیت موجود در یک فرایند تصادفی یا میزان دشواری حدس زدن نتیجه از تابعی ریاضی استفاده می‌کنیم که آنتروپی شانون نامیده می‌شود. این روش در سال ۱۹۷۴ توسط شانون ارائه شد آنتروپی بیان کننده مقدار عدم اطمینان در یک توزیع احتمال پیوسته است. ایده اصلی این روش آن است که هر چه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد آن شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است. روش آنتروپی شانون یکی از روش‌های محاسبه‌ی وزن شاخص‌ها در تکنیک‌های MADM می‌باشد. معمولاً به هر یک از شاخص‌ها یک وزن نسبت داده می‌شود. به طوری که مجموع وزن شاخص‌ها برابر ۱ باشد. مراحل روش آنتروپی شانون شامل به شرح زیر است:

[1] Shannon entropy

مرحله ۱) ابتدا ماتریس تصمیم را تشکیل می‌دهیم (جدول ۳).

مرحله ۲) با استفاده از نُرم ساعتی، ماتریس تصمیم را نرمال می‌کنیم و هر درایه نرمال شده را p_{ij} می‌نامیم. نرمال شدن به این صورت می‌باشد که درایه هر ستون را بر مجموع ستون تقسیم می‌کنیم:

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} r_{ij}} \qquad (۱)$$

مرحله ۳) محاسبه آنتروپی هر شاخص: آنتروپی E_j به صورت زیر محاسبه می گردد و k به عنوان مقدار ثابت مقدار E_j را بین ۰ و ۱ نگه می‌دارد.

$$E_j = -k\sum_{i=1}^{m} P_{ij} \times \mathrm{Ln}P_{ij} \qquad \text{که:} \quad k = \frac{1}{\mathrm{Ln}(m)} \quad \text{و} \quad i = 1, 2, \ldots, m \qquad (۲)$$

که در آن m تعداد گزینه‌ها است.

مرحله ۴) در ادامه مقدار d_j (درجه انحراف) محاسبه می‌شود که بیان می‌کند شاخص مربوطه (d_j) چه میزان اطلاعات مفید برای تصمیم‌گیری در اختیار تصمیم گیرنده قرار می‌دهد.

هر چه مقادیر اندازه گیری شده شاخصی به هم نزدیک باشند نشان دهنده آنست که گزینه‌های رقیب از نظر آن شاخص تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. لذا نقش آن شاخص در تصمیم گیری باید به همان اندازه کاهش یابد.

$$dj = 1 - Ej \qquad (۳)$$

مرحله ۵) سپس مقدار وزن W_j از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Wj = dj / \sum dj \qquad (۴)$$

نتایج مراحل ۳ الی ۵ وزن دهی شاخص‌ها (معیارها) با روش آنتروپی شانون در جدول ۵ آورده شده است:

جدول۵ : نتایج مراحل سوم الی پنجم وزن دهی شاخص‌ها (معیارها) با روش آنتروپی شانون

نتایج مرحله ۳) محاسبه آنتروپی هر شاخص با استفاده از رابطه (۷):									
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9
E_j	۰/۹۹۶۶	۰/۹۹۴۳	۰/۹۶۹۳	۰/۹۹۴۶	۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۸۹	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۷۷	۰/۹۹۹۹
نتایج مرحله ۴) محاسبه مقدار d_j (درجه انحراف) با استفاده از رابطه (۸):									
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
d_j	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۵۷	۰/۰۳۰۷	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۰۱
نتایج مرحله ۵) محاسبه مقدار وزن W_j با استفاده از رابطه (۹):									
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9
W_j	۰/۰۶۷۱	۰/۱۱۲۴	۰/۶۰۵۵	۰/۱۰۶۵	۰/۰۲۹۰	۰/۰۲۱۷	۰/۰۰۹۹	۰/۰۴۵۴	۰/۰۰۲۰

گام ۴: رتبه بندی با مدل مجموع ساده وزنی (SAW):

مدل مجموع ساده وزنی، یکی از ساده‌ترین تاکنیک‌های MADM می‌باشد. با محاسبه اوزان شاخص‌ها، می‌توان از این روش استفاده کرد [۳۱،۳۲]. مراحل استفاده از این مدل به شرح زیر است:

مرحلهٔ ۱) تشکیل ماتریس تصمیم گیری (ماتریس تصمیم D).

مرحلهٔ ۲) به روش نُرم خطی، ماتریس تصمیم گیری D را نرمال سازی کرده و به ماتریس N_D تبدیل می‌کنیم، بدین صورت که:

* **اگر شاخص مثبت (+) باشد:** در هر ستون، هر عدد شاخص، تقسیم بر بزرگترین عدد شاخص ستون.

$$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{Max(a_j)} \quad (۵)$$

* **اگر شاخص منفی (-) باشد:** در هر ستون، کوچکترین عدد شاخص ستون، تقسیم بر هر عدد شاخص.

$$n_{ij} = \frac{Min(a_j)}{a_{ij}} \quad (۶)$$

مرحلهٔ ۳) تعیین وزن (ضریب اهمیت) شاخص‌ها (W_j) به روش آنتروپی شانون.

مرحلهٔ ۴) تشکیل جدول تصمیم نرمالایز شده موزون:

با ضرب کردن اعداد هر ستون از ماتریس نرمال شده (N_D) در وزن (ضریب اهمیت) شاخص (W_j) همان ستون، جدول تصمیم نرمالایز شده موزون استخراج خواهد شد.

مرحلهٔ ۵) رتبه بندی (میزان مطلوبیت گزینه‌ها):

میزان مطلوبیت گزینه‌ها (A^*) از رابطه زیر به دست می‌آید، گزینه‌ای که بیشترین مطلوبیت را داشته باشد، مناسب‌تر است:

$$A^* = \left\{ A_i \mid Max \sum_{j=1}^{n} n_{ij} w_j \right\} \quad (۷)$$

نتایج حاصل از رتبه‌بندی با روش SAW در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است:

جدول۶ : میزان مطلوبیت گزینه‌ها (A^*)

گزینه‌ها	میزان مطلوبیت گزینه‌ها (A^*)	رتبه هر گزینه
RPC1	۰/۶۷۲۴	۵
RPC2	۰/۷۲۴۶	۳
RPC3	۰/۶۱۵۹	۷
RPC4	۰/۶۷۲۳	۶
RPC5	۰/۴۷۶۱	۱۳
RPC6	۰/۴۷۸۰	۱۲
RPC7	۰/۸۳۴۶	۲
RPC8	۰/۵۲۵۹	۱۱
RPC9	۰/۵۷۵۹	۸
RPC10	۰/۵۷۵۴	۹
RPC11	۰/۶۹۰۲	۴
RPC12	۰/۵۳۸۲	۱۰
RPC13	۰/۹۰۰۱	۱

جدول۷ : رتبه بندی گزینه‌ها با روش SAW

رتبه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
گزینه	RPC13	RPC7	RPC2	RPC11	RPC1	RPC4	RPC3	RPC9	RPC10	RPC12	RPC8	RPC6	RPC5

گام ۵: رتبه بندی با تکنیک TOPSIS

تکنیک TOPSIS، یکی از معروف‌ترین و بهترین تکنیک‌های توسعه یافته برای حل مسائل MADM می‌باشد که در سال ۱۹۸۱ توسط هوانگ و یون[1] ارائه گردید. در تکنیک TOPSIS، چند گزینه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و بین آنها اولویت‌بندی می‌شود. در این تکنیک، تصمیم‌گیری براساس شاخص‌های موجود انجام می‌شود و گزینه‌ایی که کمترین فاصله را از راه حل ایده آل داشته باشد ، انتخاب می‌گردد. در این تکنیک فرض بر این است که مطلوبیت هر شاخص بطور یکنواخت افزایشی و یا کاهشی می‌باشد. تکنیک TOPSIS در مواقعی کاربرد دارد که گزینه‌ها از قبل تعیین شده باشند و هدف آن، انتخاب یکی از گزینه‌های موجود از طریق مقایسه آن‌ها در حضور شاخص‌های متعدد تاثیر گذار بر ارجحیت گزینه‌ها می‌باشد [۲۱]. مراحل رتبه‌بندی با تکنیک TOPSIS [۳۱،۳۲]:

مرحلهٔ ۱) تشکیل ماتریس تصمیم گیری (ماتریس تصمیم D).

مرحلهٔ ۲) نرمالیزه یا بی مقیاس کردن ماتریس تصمیم (N_D): این فرایند سعی می‌کند مقیاس‌های موجود در ماتریس تصمیم را بدون مقیاس نماید. با توجه به روابط ریاضی حاکم بر تکنیک TOPSIS برای این روش از نُرم اقلیدسی استفاده خواهد شد:

$$n_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} r_{ij}^2}} \qquad (۸)$$

مرحلهٔ ۳) تعیین وزن (ضریب اهمیت) شاخص‌ها (W_j) با استفاده از روش آنتروپی شانون.

مرحلهٔ ۴) ماتریس بی مقیاس وزنی با توجه به فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$V = N_D \times W_j \quad \Longrightarrow \quad v_{ij} = n_{ij} \times w_{ij} \qquad (۹)$$

مرحلهٔ ۵) تعیین جواب‌های ایده‌آل‌های مثبت و منفی:

دو گزینه ایده‌آل مثبت A^+ و ایده‌آل منفی A^- را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

ایده‌آل مثبت:
$$V_j^+ = A^+ = \left\{(MaxV_{ij} \,|\, j \in J), (MinV_{ij} \,|\, j \in J) | i = 1,2,...,m\right\} \qquad (۱۰)$$

ایده‌آل منفی:
$$V_j^- = A^- = \left\{(MinV_{ij} \,|\, j \in J), (MaxV_{ij} \,|\, j \in J) | i = 1,2,...,m\right\} \qquad (۱۱)$$

مرحلهٔ ۶) در این مرحله فاصله بین هر گزینه را از ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی بدست می‌آوریم:

– فاصله گزینه i ام از ایده‌آل مثبت برابر است با:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad \text{و} \quad i = 1,2,3,\ldots,m \qquad (۱۲)$$

– فاصله گزینه i ام از ایده‌آل منفی برابر است با:

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad \text{و} \quad i = 1,2,3,\ldots,m \qquad (۱۳)$$

مرحلهٔ ۷) محاسبه نزدیکی نسبی گزینه‌ها به راه حل ایده‌آل (شاخص نزدیکی نسبی) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$cl_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad \text{و} \quad 0 < cl_i^+ < 1 \quad \text{و} \quad i = 1,2,3,\ldots,m \qquad (۱۴)$$

مرحلهٔ ۸) در این مرحله گزینه ها را بایستی رتبه بندی کرد. هر اندازه که شاخص نزدیکی نسبی بزرگتر باشد مفهوم این است که گزینه i ام به ایده‌آل مثبت سوق پیدا می‌کند.به عبارت دیگر: هر گزینه‌ای که cl^+ آن بزرگتر باشد بهتر است [۱۷].

نتایج حاصل از رتبه‌بندی با روش TOPSIS در جداول ۸ الی ۱۱ ارائه شده است:

جدول۸ : جواب‌های ایده‌آل

شاخص‌ها	X_1 (سیمان)	X_2 (ماسه سیلیسی)	X_3 (پودر سیلیس)	X_4 (ژل میکروسیلیس)	X_5 فوق روان کننده)	X_6 (آب)	X_7 (مقاومت فشاری)	X_8 (جذب آب)	X_9 (جرم مخصوص بتن)
جواب ایده‌آل مثبت $(A^+ = V_j^+)$	۰/۰۲۳۱	۰/۰۳۸۷	۰/۲۹۱۴	۰/۰۳۹۶	۰/۰۰۹۴	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۰۶
جواب ایده‌آل منفی $(A^- = V_j^-)$	۰/۰۱۴۲	۰/۰۲۱۳	۰/۰۷۵۸	۰/۰۲۰۶	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۲۵	۰/۰۱۴۴	۰/۰۰۰۵

جدول۹ : فاصله گزینه‌ها و نرمالایز بین هر گزینه‌ها از ایده‌آل مثبت (d_i^+) و ایده‌آل منفی (d_i^-)

جواب‌های ایده‌آل / گزینه‌ها	ایده‌آل مثبت		ایده‌آل منفی	
	فاصله گزینه‌ها از جواب ایده‌آل مثبت (d_i^+)	مقدار نرمالایز شده فاصله گزینه‌ها از ایده‌آل مثبت	فاصله گزینه‌ها از جواب ایده‌آل منفی (d_i^-)	مقدار نرمالایز شده فاصله گزینه‌ها از ایده‌آل منفی
A1 (RPC1)	۰/۱۱۳۵	۰/۰۶۳۱	۰/۱۰۴۰	۰/۰۹۵۶
A2 (RPC2)	۰/۰۹۱۲	۰/۰۵۰۷	۰/۱۲۶۵	۰/۱۱۶۳
A3 (RPC3)	۰/۱۵۰۲	۰/۰۸۳۵	۰/۰۶۸۳	۰/۰۶۲۸
A4 (RPC4)	۰/۱۲۰۰	۰/۰۶۶۷	۰/۰۹۷۶	۰/۰۸۹۸
A5 (RPC5)	۰/۲۱۶۰	۰/۱۲۰۱	۰/۰۱۶۸	۰/۰۱۵۴
A6 (RPC6)	۰/۲۰۷۷	۰/۱۱۵۵	۰/۰۱۹۷	۰/۰۱۸۱
A7 (RPC7)	۰/۰۳۹۳	۰/۰۲۱۸	۰/۱۸۱۷	۰/۱۶۷۰
A8 (RPC8)	۰/۱۹۳۷	۰/۱۰۷۷	۰/۰۲۷۳	۰/۰۲۵۱
A9 (RPC9)	۰/۱۷۴۵	۰/۰۹۷۰	۰/۰۴۵۳	۰/۰۴۱۶
A10 (RPC10)	۰/۱۷۲۲	۰/۰۹۵۸	۰/۰۴۹۰	۰/۰۴۵۱
A11 (RPC11)	۰/۱۱۶۹	۰/۰۶۵۰	۰/۱۰۰۶	۰/۰۹۲۵
A12 (RPC12)	۰/۱۸۳۷	۰/۱۰۲۱	۰/۰۳۵۱	۰/۰۳۲۲
A13 (RPC13)	۰/۰۱۹۷	۰/۰۱۱۰	۰/۲۱۵۸	۰/۱۹۸۴

جدول۱۰ : نزدیکی نسبی گزینه‌ها به راه حل ایده‌آل (شاخص نزدیکی نسبی)، cl_i^+

رتبه هر گزینه	شاخص نزدیکی نسبی (۰ < cl_i^+<۱)	گزینه‌ها
۴	۰/۴۷۸۳	(RPC1)
۳	۰/۵۸۱۲	(RPC2)
۷	۰/۳۱۲۶	(RPC3)
۶	۰/۴۴۸۶	(RPC4)
۱۳	۰/۰۷۲۱	(RPC5)
۱۲	۰/۰۸۶۵	(RPC6)
۲	۰/۸۲۲۳	(RPC7)
۱۱	۰/۱۲۳۵	(RPC8)
۹	۰/۲۰۶۰	(RPC9)
۸	۰/۲۲۱۶	(RPC10)
۵	۰/۴۶۲۵	(RPC11)
۱۰	۰/۱۶۰۴	(RPC12)
۱	۰/۹۱۶۲	(RPC13)

جدول۱۱ : رتبه بندی گزینه‌ها با تکنیک TOPSIS

رتبه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
گزینه	RPC13	RPC7	RPC2	RPC1	RPC11	RPC4	RPC3	RPC10	RPC9	RPC12	RPC8	RPC6	RPC5

گام ۶: رتبه‌بندی با تکنیک ویکور (VIKOR) :

روش VIKOR یکی از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب بهترین گزینه است. این مدل توسط اپریکویک به سال ۱۹۸۴ ارائه شد. تکنیک ویکور از طریق ارزیابی گزینه‌ها بر اساس معیارها، گزینه‌ها را رتبه‌بندی (اولویت‌بندی) می‌کند. در این مدل همواره چند گزینه مختلف وجود دارد که این گزینه‌ها بر اساس چند معیار به صورت مستقل ارزیابی می‌شوند و در نهایت گزینه‌ها بر اساس ارزش، رتبه‌بندی می‌گردند. هدف اصلی روش ویکور، نزدیکی بیشتر به جواب ایده‌آل هر شاخص است. روش ویکور قادر است تصمیم گیرندگان را برای دستیابی به یک تصمیم نهایی یاری دهد. مراحل انجام تکنیک ویکور به شرح زیر است:

مرحلهٔ ۱) تشکیل ماتریس تصمیم

نخستین گام تکنیک ویکور تشکیل ماتریس تصمیم است. ماتریس تصمیم گیری یک ماتریس برای ارزیابی تعدادی گزینه براساس تعدادی معیار است. یعنی ماتریسی که در آن هر گزینه براساس تعدادی معیار امتیازدهی شده است. ماتریس تصمیم با X و هر درایه آن با x_{ij} نشان داده می‌شود. این ماتریس در زیر آورده شده است:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

مرحله ۲) تشکیل ماتریس تصمیم نرمال

نرمال سازی یا بی مقیاس سازی دومین گام در حل تمامی تکنیک‌های تصمیم گیری چند معیاره مبتنی بر ماتریس تصمیم است. در روش‌های MCDM بهتر است از واژه بی‌مقیاس سازی استفاده شود. در تکنیک VIKOR نرمال سازی به روش خطی و به صورت ماتریس زیر است:

$$N=\begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1n} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ n_{m1} & n_{m2} & \dots & n_{mn} \end{bmatrix}$$

نرمال کردن خطی

یک روش ساده برای نرمال کردن اعداد توسط ساعتی مطرح شده که به محاسبه بردار ویژه نیز معروف شده است. در این روش کافی است هر عدد در یک مجموعه بر مجموع عناصر آن مجموعه تقسیم شود. در این صورت جمع کل عناصر پس از نرمال‌سازی یک خواهد بود. مرحله‌ی نرمال‌سازی به این علّت انجام می‌گیرد که شاخص‌های انتخاب شده به شاخص‌های مجرّد و خالی از مقیاس تبدیل شود تا امکان جمع کردن متغیرهای مختلف با همدیگر فراهم گردد.

$$n_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{1}^{m} x_{ij}} \qquad (۱۵)$$

$$n_{ij}=\frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} X_{ij}^{2}}} \qquad (۱۶)$$

که در آن X_{ij} مقادیر هر معیار برای هر گزینه است.

مرحله ۳) وزن‌دار کردن ماتریس نرمال:

جهت وزن‌دار کردن، مقادیر ماتریس نرمال هر یک از گزینه‌ها، بر وزن معیارها ضرب می‌گردد.

مرحله ۴) تعیین نقطه ایده آل مثبت و منفی

تعیین مقادیر بالاترین و پایین‌ترین ارزش ماتریس نرمال وزنی، بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین عدد هر ستون تعیین می‌گردد. در اینجا منظور از بزرگ‌ترین عدد، یعنی عددی که بیش‌ترین ارزش مثبت را داراست و کوچک‌ترین یعنی بیش‌ترین ارزش منفی.

پس اگر معیار ما از نوع منفی باشد، بزرگ‌ترین عدد برعکس می‌شود یعنی می‌شود کم‌ترین مقدار و کوچک‌ترین می‌شود بیش‌ترین مقدار و بالعکس. بنابر این برای هر معیار، بهترین و بدترینِ هریک را در میان همه گزینه‌ها تعیین کرده و به ترتیب f^{+} و f^{-} می‌نامیم. اگر معیار از نوع سودمندی باشد خواهیم داشت:

$$f_i^{+} = \text{Max}_{f_{ij}} \qquad (۱۷)$$

$$f_i^{-} = \text{Min}_{f_{ij}} \qquad (۱۸)$$

مرحله ۵) تعیین شاخص مطلوبیت (S) و شاخص نارضایتی (R) :

$$S_j=\sum_{i=1}^{n} w_i \cdot \frac{f_i^{*}-f_{ij}}{f_i^{*}-f_i^{-}} \qquad (۱۹)$$

$$R_j = \max\left[w_i \cdot \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right] \quad (۲۰)$$

که در آن f^* : بزرگ‌ترین عدد ماتریس نرمال وزنی برای هر ستون و f_{ij} : عدد گزینه‌ی مورد نظر برای هر معیار در ماتریس نرمال وزنی و f^- : کوچک‌ترین عدد ماتریس نرمال وزنی برای هر ستون است که به طور معمول برای هر گزینه به ازاء هر معیار یک شاخص مطلوبیت به دست می‌آید که مجموع آن‌ها، شاخص نهایی S_j گزینه را مشخص می‌کند.

بزرگ‌ترین S_j هر گزینه به ازای هر معیار، شاخص نارضایتی (R) آن گزینه است.

مرحله ۶) محاسبه‌ی مقدار Q و رتبه بندی نهایی گزینه‌ها:

$$Q_i = v\left[\frac{S_i - S^*}{S^- - S^*}\right] + (1-v)\left[\frac{R_i - R^*}{R^- - R^*}\right] \quad (۲۱)$$

که در آن v عدد ثابت ۰/۵، S_j مجموع مقدار S برای هر گزینه، S_j مجموع مقدار S برای هر گزینه، S^- بزرگ‌ترین عدد شاخص S برای هر گزینه، S^* کوچک‌ترین عدد شاخص S برای هر گزینه، R_j مجموع مقدار R برای هر گزینه، R^- بزرگ‌ترین عدد شاخص R برای هر گزینه و R^* کوچک‌ترین عدد شاخص R برای هر گزینه است.

$$S^- = \max S_i \,,\; S^* = \min S_i \quad (۲۲)$$

$$R^- = \max R_i \,,\; R^* = \min R_i \quad (۲۳)$$

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq \frac{1}{m-1} \quad (۲۴)$$

مرحله ۷) تعیین سودمندی و تأسف

اپریکویک دو مفهومی اساسی سودمندی (S) و تأسف (R) را در محاسبات ویکور مطرح کرده است. مقدار سودمندی (S) بیانگر فاصله نسبی گزینه i ام از نقطه ایده‌آل و مقدار تأسف (R) بیانگر حداکثر ناراحتی گزینه i ام از دوری از نقطه ایده‌آل می‌باشد. برای این منظور از رابطه ۱۹ و رابطه ۲۰ استفاده می‌شود.

مرحله ۸) محاسبه شاخص ویکور

گام بعدی محاسبه شاخص ویکور (Q) برای هرگزینه براساس رابطه ۲۱ است.

دو شرط نهایی تصمیم گیری با تکنیک ویکور

در گام پایانی از آموزش تکنیک ویکور، گزینه‌ها براساس مقادیر Q, R, S در سه گروه از کوچک به بزرگ مرتب می‌شوند. بهترین گزینه آن است که کوچکترین Q را داشته باشد به شرط آنکه دو شرط زیر برقرار باشد:

شرط ۱): اگر گزینه A_1 و A_2 در میان m گزینه رتبه اول و دوم را داشته باشند، باید رابطه ۲۴ برقرار باشد.

شرط ۲): گزینه A_1 باید حداقل در یکی از گروه‌های R و S به عنوان رتبه برتر شناخته شود.

اگر شرط نخست برقرار نباشد هر دو گزینه بهترین گزینه خواهند بود.

اگر شرط دوم برقرار نباشد گزینه A_1 و A_2 هر دو به عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شوند.

نتایج حاصل از رتبه‌بندی با روش VIKOR در جداول ۱۲ الی ۱۴ ارائه شده است:

جدول۱۲ : شاخص مطلوبیت (S) و شاخص نارضایتی (R)

گزینه	RPC_1	RPC_2	RPC_3	RPC_4	RPC_5	RPC_6	RPC_7	RPC_8	RPC_9	RPC_{10}	RPC_{11}	RPC_{12}	RPC_{13}
S_i	۰/۴۴۲	۰/۵۲۸	۰/۳۹۱	۰/۴۶۶	۰/۱۸۶	۰/۱۸۲	۰/۶۶۲	۰/۲۸۳	۰/۳۵۲	۰/۳۳۸	۰/۵۰۸	۰/۲۸۰	۰/۷۵۵
$S^- = \max S_i = ۰/۷۵۵$							$S^* = \min S_i = ۰/۱۸۲$						
R_i	۰/۲۹۰	۰/۳۵۴	۰/۱۸۵	۰/۲۷۱	۰/۰۷۸	۰/۱۱۲	۰/۵۰۹	۰/۰۸۷	۰/۱۱۶	۰/۱۲۴	۰/۲۷۹	۰/۰۹۱	۰/۶۰۶
$R^- = \max R_i = ۰/۶۰۶$							$R^* = \min R_i = ۰/۰۷۸$						

جدول۱۳ : مقدار Q_i و رتبه‌بندی گزینه‌ها

گزینه‌ها	شاخص ویکور (Q_i) (V=0.5)	رتبه هر گزینه
(RPC1)	۰/۵۷۲۱	۶
(RPC2)	۰/۴۳۶۸	۳
(RPC3)	۰/۷۱۶۶	۷
(RPC4)	۰/۵۶۹۳	۵
(RPC5)	۰/۹۹۶۴	۱۳
(RPC6)	۰/۹۶۷۷	۱۲
(RPC7)	۰/۱۷۳۲	۲
(RPC8)	۰/۹۰۳۵	۱۱
(RPC9)	۰/۸۱۵۸	۸
(RPC10)	۰/۸۲۰۰	۹
(RPC11)	۰/۵۲۴۷	۴
(RPC12)	۰/۹۰۲۵	۱۰
(RPC13)	۰/۰۰۰۰	۱

جدول۱۴ : رتبه‌بندی گزینه‌ها با تکنیک VIKOR

رتبه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
گزینه	RPC13	RPC7	RPC2	RPC11	RPC4	RPC1	RPC3	RPC9	RPC10	RPC12	RPC8	RPC6	RPC5

گام ۷: ترکیب (ادغام) نتایج با روش کُپلند (Copeland) :

وقتی در یک مساله تصمیم‌گیری، از چند روش تصمیم‌گیری چند شاخصه (MCDM) برای رتبه‌بندی استفاده شود، نتایج یکسانی حاصل نخواهد شد. همانطور که در جدول ۱۵ مشاهده می‌شود، نتایج رتبه‌بندی با سه روش SAW، TOPSIS و VIKOR در برخی از گزینه‌ها یکسان نیستند. در واقع در چنین مواقعی که نتایج روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند شاخصه یکسان نیست سوالی که مطرح می‌شود این است که کدام روش در رتبه‌بندی گزینه‌ها واقعی است؟ برای حل این مشکل و تعیین رتبه‌بندی نهایی می‌توان از روش‌های مختلفی، مانند: روش میانگین رتبه‌ها، روش بُردا (Borda) و روش کُپلند (Copeland) استفاده کرد [۳۳،۳۴].

جدول۱۵ : رتبه‌بندی طرح‌های اختلاط بتن پودری واکنشی (RPC)
بدست آمده از تکنیک‌های SAW، TOPSIS و VIKOR

	SAW	TOPSIS	VIKOR
RPC1	۵	۴	۶
RPC2	۳	۳	۳
RPC3	۷	۷	۷
RPC4	۶	۶	۵
RPC5	۱۳	۱۳	۱۳
RPC6	۱۲	۱۲	۱۲
RPC7	۲	۲	۲
RPC8	۱۱	۱۱	۱۱
RPC9	۸	۹	۸
RPC10	۹	۸	۹
RPC11	۴	۵	۴
RPC12	۱۰	۱۰	۱۰
RPC13	۱	۱	۱

الف) روش میانگین‌گیری

این روش به میانگین رتبه‌ها معروف است در این روش رتبه گزینه‌ها را بر اساس هر روش تصمیم‌گیری چند شاخصه محاسبه می‌کنیم سپس برای هر گزینه، میانگین حسابی رتبه‌های بدست آمده با استفاده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری تعیین می‌شود و بر این اساس، گزینه‌ها اولویت‌بندی می‌شوند بدیهی است که گزینه‌های با میانگین رتبه کمتر در اولویت خواهند بود.

ب) روش بُردا (Borda)

در این روش برای تصمیم‌گیری، ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها ایجاد می‌شود. در صورتی که بر اساس روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند شاخصه، تعداد ارجحیت گزینه‌ای بر گزینه دیگر بیش از تعداد مغلوب شدن آن گزینه بر گزینه دیگری باشد، در ماتریس مقایسه زوجی عدد ۱ گذاشته می‌شود و در صورتی‌که رای اکثریت وجود نداشت و یا آراء با هم مساوی باشند، در ماتریس مقایسه زوجی عدد صفر گذاشته می‌شود. عدد ۱ به منزله آن است که سطر بر ستون ارجحیت دارد و عدد صفر به منزله آن است که ستون بر سطر ارجحیت دارد. پس از بررسی گزینه‌ها، ماتریس مقایسه زوجی شکل خواهد گرفت و مجموع عناصر هر سطر تعداد مسلط شدن هر گزینه را نشان می‌دهد و گزینه ها بر اساس تعداد مسلط شدن اولویت‌بندی می‌شوند.

ج) روش کُپلند (Copeland)

این روش اصلاح شده روش بُردا است با این تفاوت که در اولویت‌بندی، علاوه بر تعداد مسلط شدن (مجموع عناصر هر سطر)، تعداد مغلوب شدن (مجموع عناصر هر ستون) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور گزینه‌ها بر اساس تفاضل مقادیر تعداد مسلط شدن و تعداد مغلوب شدن اولویت‌بندی می‌شوند. به عبارتی دیگر، در این روش تعداد بردها و باخت‌ها برای هر گزینه مشخص می‌شود. منظور از بردها تعداد دفعاتی است که یک گزینه نسبت به سایر گزینه‌ها در اکثر روش‌ها رتبه‌ی بهتری دارد و منظور از باخت برای هر گزینه تعداد دفعاتی است که گزینه‌ی مورد نظر در مقایسه با سایر گزینه‌ها در روش‌های مختلف رتبه‌ی کمتر یا مساوی با سایر گزینه‌ها دارد. برای اجرای این تکنیک ماتریسی فاقد قطر $m \times m$ شکل می‌گیرد. اگر تعداد بردها در تکنیک‌ها بیشتر باشد، با M کدگذاری می‌شود و در آن سطر i به ستون j ارجحیت داردو اگر ستون j به سطر i ارجحیت داشته یا تعداد بردها مساوی باشد، با X کدگذاری می‌شود. پس از مقایسهٔ زوجی گزینه‌ها با توجه به رتبهٔ آن‌ها در روش های مختلف و تکمیل ماتریس مذکور با کدهای M (برد) و X (باخت)، تعداد بردها و باخت‌ها برای هر گزینه شمارش می‌شود و در نهایت مجموع بردها و باخت‌های هر گزینه مبنای رتبه‌بندی قرارمی‌گیرد. هرچه تعداد بردها

منهای باخت‌ها بیشتر باشد، رتبه بالاتر خواهد بود [۲۲]. در این تحقیق از روش کُپلند که کارآمدترین روش برای ترکیب (ادغام) است استفاده شده است. ماتریس حاصل از ادغام سه روش SAW، TOPSIS و VIKOR با استفاده از روش کُپلند جهت رتبه‌بندی نهایی در جدول ۱۶ آورده شده است:

جدول۱۶ : محاسبات مربوط به روش کُپلند

	RPC1	RPC2	RPC3	RPC4	RPC5	RPC6	RPC7	RPC8	RPC9	RPC10	RPC11	RPC12	RPC13	تعداد مسلط شدن
RPC1	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۸
RPC2	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱۰
RPC3	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۶
RPC4	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۷
RPC5	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
RPC6	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
RPC7	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱۱
RPC8	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲
RPC9	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۵
RPC10	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۴
RPC11	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۹
RPC12	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۳
RPC13	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱۲
تعداد مغلوب شدن	۴	۲	۶	۵	۱۲	۱۱	۱	۱۰	۷	۸	۳	۹	۰	۷۸

۵- استخراج رتبه نهایی طرح‌های اختلاط RPC و تفسیر نتایج

گزینه‌ها براساس تفاضل تعداد مسلط شدن‌ها (بردها) و تعداد مغلوب شدن‌ها (باخت‌ها) از جدول ۱۶ استخراج و در جدول ۱۷ بصورت صعودی رتبه‌بندی می‌شوند. درنتیجه با ترکیب نتایج حاصل از روش‌های مختلف، رتبه‌بندی نهایی انجام و نتایج آن در جدول ۱۸ آورده شده است. با توجه به این جدول، ۳ طرح RPC13، RPC7 و RPC2 به ترتیب مهم‌ترین طرح‌های اختلاط RPC شناخته شدند.

جدول۱۷ : رتبه بندی نهایی طرحهای اختلاط RPC بدست آمده از روش کپلند

گزینه‌ها	RPC1	RPC2	RPC3	RPC4	RPC5	RPC6	RPC7	RPC8	RPC9	RPC10	RPC11	RPC12	RPC13
تعداد مسلط شدن‌ها منهای تعداد مغلوب شدن‌ها	۴	۸	۰	۲	-۱۲	-۱۰	۱۰	-۸	-۲	-۴	۶	-۶	۱۲
رتبه نهایی	۵	۳	۷	۶	۱۳	۱۲	۲	۱۱	۸	۹	۴	۱۰	۱

جدول۱۸ : رتبه بندی نهایی گزینه‌ها طرح‌های اختلاط RPC با تکنیک Copeland

رتبه نهایی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
گزینه	RPC13	RPC7	RPC2	RPC1	RPC11	RPC4	RPC3	RPC10	RPC9	RPC12	RPC8	RPC6	RPC5

در جدول ۱۹، نتایج نهایی و مقایسه‌ی رتبه‌بندی طرح‌های اختلاط RPC بدست آمده از تکنیک‌های SAW ، TOPSIS ، VIKOR و ترکیب آن‌ها برای تعیین رتبه‌بندی نهایی با تکنیک Copeland آورده شده است:

جدول۱۹ : مقایسه رتبه‌بندی طرح‌های اختلاط RPC
با تکنیک‌های SAW ، TOPSIS ، VIKOR و COPELAND

	SAW	TOPSIS	VIKOR	COPELAND
RPC1	۵	۴	۶	۵
RPC2	۳	۳	۳	۳
RPC3	۷	۷	۷	۷
RPC4	۶	۶	۵	۶
RPC5	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳
RPC6	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
RPC7	۲	۲	۲	۲
RPC8	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱
RPC9	۸	۹	۸	۸
RPC10	۹	۸	۹	۹
RPC11	۴	۵	۴	۴
RPC12	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
RPC13	۱	۱	۱	۱

۶- بحث و نتیجه گیری

۱- نتایج رتبه‌بندی گزینه‌های طرح‌های اختلاط RPC با سه روش SAW، TOPSIS و VIKOR متفاوت است و برای مسائل عملی، استفاده از نتایج یک روش قابل استناد نیست. بنابر این برای رسیدن به نتیجه مطلوب و قابل اطمینان، پیشنهاد می‌شود رتبه‌بندی حداقل با سه تکنیک تصمیم‌گیری چند شاخصه انجام و نتایج حاصله با استفاده از تکنیک‌های ترکیبی از جمله تکنیک Copeland، ادغام تا رتبه‌بندی نهایی حاصل شود. این روش به طور عموم برای اکثر مسائل عملی و به طور خاص برای رتبه‌بندی طرح‌های اختلاط RPC، کاربردی و نتایج حاصل از آن با اطمینان بالایی قابل استفاده و استناد است.

۲- استفاده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب طرح اختلاط RPC، منجر به نتایج نسبتاً مشابهی شد. بر این اساس، رتبه‌های بدست آمده برای ۸ گزینه‌ی طرح اختلاط بتن پودری واکنشی با تکنیک‌های ساو، تاپسیس، ویکور و کُپلند مشابه بوده و رتبه‌های کسب شده برای ۵ گزینه‌ی دیگر، با اختلاف یک رتبه بالاتر یا پایین‌تر نزدیک به هم هستند و این نشان می‌دهد که استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای رتبه‌بندی طرح‌های اختلاط بتن پودری واکنشی، روشی مناسب و قابل قبول است.

۳- با مقایسه‌ی رتبه‌بندی نهایی کُپلند با تکنیک‌های ساو، تاپسیس و ویکور معلوم گردید که نتایج رتبه‌بندی روش‌های ساو، تاپسیس و ویکور به ترتیب ۱۰۰، ۸۵ و ۷۰ درصد با روش کُپلند مطابقت دارد. بنابراین در صورت عدم استفاده از سایر روش‌ها، روش ساو به دلیل مطابقت ۱۰۰ درصدی با روش کُپلند، مناسب‌ترین روش برای رتبه‌بندی طرح‌های اختلاط بتن واکنشی شناخته شد.

۴- نتایج رتبه‌بندی حاصل از هر سه روش SAW، TOPSIS و VIKOR، نشان می‌دهد که طرح‌های اختلاط RPC13، RPC7 و RPC2 در هر سه روش به ترتیب در رتبه‌های اول و دوم و سوم قرار گرفتند که صحت سنجی آن با روش Copeland تایید شد.

۵- پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی برای بهینه کردن طرح اختلاط RPC، با روش‌هایی مانند تاگوچی از سه گزینه‌ی با رتبه ۱ الی ۳ استفاده شود.

مراجع

[1] Mostofi Nejad, Davood. (2018). *Reinforced Concrete Structures*, (in Persian). Second Edition. Isfahan: Arkan Danesh Publications, 38(1), 28-30.

[2] Tofani Milani, Aydin. And Afshin, Hassan. And Naseri, Hamid. (2015). *Production of Reactive Powder Concrete Using Silica Sand in Iranian Desert Areas*, (in Persian). In: 10th International Congress of Civil Engineering. Tabriz, Tabriz University.

[3] Road, Housing and Urban Development Research Center. (2018). *National Method of Concrete Mix Design*, (in Persian). Third Edition. Tehran: under the supervision of the Committee for the Preparation and Expert Committee of the, Publication No. 797.

[4] Rostami Nikoo, Mojtaba. and Mostofi Nejad, Davood. (2011). *Investigation of Reactive Powder Concrete Technology (RPC) and the Effect of Microsilica and Nanosilica on It*, (in Persian). M.Sc. and Professor at Department of acaivil Engineering Isfahan University of Technology (IUT).

[5] Karimi, Majid. and Dashti Rahmatabadi, Mohammad Ali. (2017). *Characteristics of Reactive Powdered Concrete Made from Native Iranian Wind Desert Processing*, (in Persian). In: First National Conference on Applied Research in Science and Engineering. Mashhad: Institute of Higher Education. Lahore.

[6] Meraji, Leila. And Afshin, Hassan.and Abedi, Karim. (2013), *Investigating the Possibility of Production of Reactive Powder Concrete with Available Materials in Iran*, (in Persian). Concrete Research. Fifth Year, no. 2, 7-18.

[7] Chakhrlu, Javid. and Shervani, Bahman. (2016). *Using Limestone Powder as a Substitute for Part of Silica Sand in Reactive Powder Concrete*, (in Persian). In: 9th National Iranian Concrete Conference. Tehran: Road, Housing and Urban Development Research Center.

[8] Morvati, Javad. and Akrami, Ibrahim. (2009). *UHPC Ultra-Powerful Concrete Examining Properties and Experimental Production with Native Materials*, (in Persian). In: First National Concrete Conference. Tehran: National Documentation and Library of Iran Conference Center.

[9] Heydari, Ali. and Tavakoli, David. (2015). *Production of high-strength concrete based on modified reaction powder*, (in persian). Scientific Journal of Experimental Research in Civil Engineering. Volume 2. Number 2. pp. 111-120.

[10] Meraji, Leila. And Afshin, Hassan. And Abedi, Karim. (2016). *Investigating the effect of fiber type on the properties of reactive powder concrete*, (in persian). Experimental Journal of Civil and Environmental Engineering. Volume 46. No. 4. pp. 85-96.

[11] Meraji, Leila. And Afshin, Hassan. And Abedi, Karim. (2013). *The effect of different fibers on the properties of reactive powder concrete*, (in Persian). 5th Annual National Concrete Conference of Iran, Tehran.

[12] Khaloo, Alireza. and God bless Zanjani, Mohammad Mehdi. and Azizi, Khalil. (2012). *Laboratory study of the effect of silica fume on reactive powder concrete (RPC) performance*, (in Persian). Concrete research. Fifth year. No. 1. pp. 78-69.

[13] D. Ambika. and V. Nandhini. and V. Santha Rubini. and G. Poovizhi. and S. Dhinu Priya. (2020). *An exploration on the durability properties of reactive powder concrete*. Publication: Materials Today, Proceedin. Publisher: Elsevier. Date: Available online 16 March 2020. Show more: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.170Get rights and content.

[14] Hammad, Salahuddin. and Liaqat, Ali, Qureshi. and Adnan, Nawaz. and Syed, Safdar, Razad. (2020). *Effect of recycled fine aggregates on performance of Reactive Powder Concrete*. Construction and Building Materials. Volume 243, 20 May 2020, 118223.

[15] Chen, zhiLi. and Linhua, Jiang. (2020). *Utilization of limestone powder as an activator for early-age strength improvement of slag concrete*. Construction and Building Materials. Volume 253, 30 August 2020, 119257.

[16] Mousavi Fard, Seyed Jalal. and Raisi, Mohammad. (2019*). Influence evaluation of key mix design parameters of reactive powder concrete on compressive strength*, (in Persian). Amir Kabir Civil Engineering Magazine. DOI: 10.22060 / CEEJ.2019.16047.6114.

[17] C.M. Tam. and V.W. Tam. and K.M. Ng. (2010). *Optimal conditions for producing reactive powder concrete*. Magazine of Concrete Research, 62(10). 701-716.

[18] D. Mostofinejad. and M.R. Nikoo. and S.A. Hosseini. (2016) *Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC)*, (in Persian). Construction and Building Materials, 123. 754-767.

[19] Khuram, Rashid. and Sara, Farooq. and Alina, Mahmood. and Sahar, Iftikhar. and Aftab, Ahmad. (2020). *Moving towards resource conservation by automated prioritization of concrete mix design*. Construction and Building Materials. Volume 236, 10 March 2020, 117586.

[20] Fam F. Abdel-malak. and Usama H. Issa. and Yehia H. Miky. and Emad A. Osman. (2017). *Applying decision-making techniques to Civil Engineering Projects*. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences 6. 326–331.

[21] Rezaian, Alireza. and Hosseini, Seyed Amir Hossein. (2015). *Selecting the Optimal Building System Using Multiple Criteria Decision Making Emphasising on Three Methods of TOPSIS, SAW, AHP*, (in Persian). Journal of Structural and Construction Engineering. second year. No. 2. pp. 27-16.

[22] Nemati, Mohammad. and Kazemi, Alyeh. (1393). *Insurance companies are ranked using multi-criteria decision making methods*, (in Persian). Financial Research. Volume 16. Number 1. pp. 180-163.
[23] Ahmad, Pourahmad. And Shahbazpour, Ahmad. And Khaliji, Mohammad Ali. (2015). *Utilizing multi-criteria decision-making models in evaluating the tourism capabilities of Semnan province*, (in Persian). Geographical studies of arid regions. No. 21. 66-50.
[24] Noojavan, Mehdi. and Mohammadi, Ali Asghar. and Salehi, Ismail. (2011). *Application of multi-criteria decision making methods in urban and regional planning with emphasis on TOPSIS and SAW methods*, (in Persian). Urban Management. No. 28. 296-285.
[25] Mohammadi Zanjirani, Dariush. and Salimfard, Khodakaram. and Yousefi Dehbidi, Shahla. (2014). *Study of performance of the most common multi-criteria decision-making techniques with optimization approach*, (in Persian). Journal of Operations Research in its applications. Eleventh year. The first issue (40 consecutive). Pp. 84-65.
[26] Nazmafar, Hussein. and Ali Bakhshi, Amina. (2018). *Comparison of performance of multi-criteria decision making models in order to determine the level of development*, (in Persian). Scientific-Research Quarterly, Geography (Regional Planning). Eighth year. No. 2. pp. 166-147.
[27] Akbari, Mahmoud. and Khademi, Faezeh al-Sadat. and Khademi, Seyed Soroush. (2014). *Investigation of the Effect of Microsphere Silica on the Compressive Strength of Concrete*, (in Persian). In: Eighth National Congress of Civil Engineering. Babol: Faculty of Civil Engineering.
[28] Azizpour, Mohsen .and Sajedi, Seyed Fatollah. (2016). *Investigation of the relationship between specific gravity with compressive strength and chloride penetration in high strength concrete containing microsilica and ash*, (in Persian). In: Fourth International Congress on Civil, Architecture and Urban Development. Tehran: Permanent Secretariat of the Conference, Shahid Beheshti University.
[29] Ghazi Nouri, Seyyed Sepehr. and Tabatabaeian, Seyyed Habibollah. (2002). *Sensitivity Analysis of Multi-Index Decision Making Problems with the Type of Technique Used: A Case Study*, (in Persian). Management Knowledge. Tehran: Journal of Tehran University School of Management, Vol. 15, No. 56, 141-129.
[30] Pour Ahmad, Ahmad. And Shahbazpour, Ahmad. And Khaliji, Mohammad Ali. (2015). *Using Multi Criteria Decision Making Models in Evaluating Tourism Capacity of Case Study of Semnan Province*, (in Persian). Geographical Studies of Arid Regions. Volume 6, Issue 21, 66-50.
[31] Tavakoli, Najmeh. And Sharifi, Mohammad. And Akram, Asadollah. (2016) *Performance Evaluation of the Most Common Multi-Index Decision Making Techniques for Ranking Effective Parameters in Agile Cooperative Distribution Chain Agencies in Fars Province*, (in Persian). Iranian Journal of Biosystems Vol. 48, Number 3, 308-299.
[32] Hwang C.L. and Yoon K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. New York: Springer-Verlag.
[33] Hatami, Farzad. and Behroush, Mohammad. and Nakhaei Aghmouni, Maral. (2013). *Application of Multi criteria Decision Making Models in Project Management*, (in Persian). In: 7th National Congress of Civil Engineering. Zahedan: Sistan and Baluchestan University.
[34] Noori, Mohammad. and Sharifi, Mohammad Bagher. (2010). *Investigation of Multi Criteria Decision Making Methods and their Application in Water Resources Management*, (in Persian). Fifth National Congress of Civil Engineering. Mashhad: Ferdowsi University of Mashhad.