



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



تحلیل سیستم بتن‌ریزی و اجرای آن در پروژه‌های ساختمانی با استفاده از MADM

روح‌اله زینت‌پور^۱، مهدی فضیلتی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران

^{۲*} گروه مهندس عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

* نویسنده مسؤول: مهدی فضیلتی

چکیده

بتن به‌عنوان پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی، نقشی تعیین‌کننده در عملکرد، دوام و پایداری پروژه‌های عمرانی دارد. با توجه به پیچیدگی فرآیند بتن‌ریزی و تأثیر هم‌زمان معیارهای فنی، اجرایی و اقتصادی، انتخاب سیستم مناسب بتن‌ریزی یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره محسوب می‌شود. در این پژوهش، بتن‌ریزی نه صرفاً به‌عنوان یک فعالیت اجرایی، بلکه به‌عنوان یک سیستم مهندسی چندجزئی در چارچوب طراحی و تحلیل سیستم‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا مرز سیستم بتن‌ریزی و زیرسیستم‌های آن شامل طراحی طرح اختلاط، تولید، حمل، اجرا و کنترل کیفیت تعریف شد. سپس، معیارهای ارزیابی سیستم بر اساس اصول مهندسی سیستم‌ها استخراج گردید. به‌منظور وزن‌دهی معیارها، از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شد و سازگاری قضاوت‌ها بررسی گردید. در ادامه، با به‌کارگیری روش TOPSIS، پیکربندی‌های مختلف سیستم بتن‌ریزی شامل بتن درجا، بتن پیش‌ساخته و بتن خودمترکم رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که سیستم‌های صنعتی‌تر از نظر کیفیت و قابلیت اطمینان عملکرد بهتری دارند، در حالی که سیستم‌های سنتی از نظر هزینه مزیت نسبی دارند. چارچوب ارائه‌شده، ابزاری شفاف و قابل دفاع برای تصمیم‌گیری مهندسی در انتخاب سیستم بتن‌ریزی فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: سیستم بتن‌ریزی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، AHP، TOPSIS، مهندسی سیستم‌ها

System Analysis of Concrete Casting and Execution in Building Projects Using Multi-Attribute Decision Making (MADM)

Ruhollah Zeinattpour¹, Mahdi Fazilati²

¹ M.Sc. Student of Civil Engineering

² Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

* Corresponding author: Mahdi Fazilati

ABSTRACT

Concrete, as the most widely used construction material, plays a decisive role in the performance, durability, and sustainability of civil engineering projects. Considering the complexity of the concreting process and the simultaneous influence of technical, operational, and economic factors, selecting an appropriate concreting system is essentially a multi-attribute decision-making (MADM) problem. In this study, concreting is examined not merely as an executive activity but as a multi-component engineering system within the framework of systems design and analysis. The system boundaries and subsystems—including mix design, production, transportation, execution, and quality control—were first defined. Subsequently, the evaluation criteria of the system were derived based on systems engineering principles. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was then applied to assign weights to the criteria and to verify the consistency of judgments. Finally, using the TOPSIS method, different concreting system configurations—cast-in-place, precast, and self-compacting concrete—were ranked. The results indicate that industrialized systems provide superior quality and reliability, whereas traditional systems show relative advantages in terms of cost. The proposed framework provides a transparent and defensible engineering decision-making procedure for selecting the optimal concreting system in building projects.

Keywords: Concrete Casting System; Multi-Attribute Decision Making (MADM); Analytic Hierarchy Process (AHP); TOPSIS; Systems Engineering.



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



۱- مقدمه

بتن به‌عنوان پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی جهان، نقشی بنیادین در توسعه زیرساخت‌ها و پروژه‌های عمرانی ایفا می‌کند. این ماده که ریشه آن به واژه لاتین Concretus به‌معنای «متراکم و به‌هم‌پیوسته» بازمی‌گردد، از نیمه دوم قرن نوزدهم به‌صورت علمی توسعه یافته و پس از جنگ جهانی دوم، به دلیل مزایایی نظیر دسترسی آسان به مواد اولیه، صرفه اقتصادی، دوام مناسب و قابلیت انطباق با شرایط متنوع اقلیمی، به عنصر غالب صنعت ساختمان تبدیل شده است [۲]. امروزه بخش عمده‌ای از سازه‌های مسکونی، صنعتی و زیربنایی در جهان بر پایه سیستم‌های مختلف بتن‌ریزی اجرا می‌شوند و کیفیت نهایی این سازه‌ها ارتباط مستقیمی با نحوه ساخت و اجرای بتن دارد.

در پروژه‌های عمرانی معاصر، بتن صرفاً یک مصالح ساختمانی ساده تلقی نمی‌شود، بلکه بخشی از یک سیستم ساخت پیچیده است که شامل زیرسیستم‌هایی نظیر طراحی طرح اختلاط، تولید و تأمین بتن، حمل‌ونقل، روش اجرا، عمل‌آوری و کنترل کیفیت می‌باشد. عملکرد نهایی بتن، حاصل برهم‌کنش این زیرسیستم‌هاست و ضعف در هر یک از آن‌ها می‌تواند کل سیستم را با افت کیفیت، افزایش هزینه یا بروز ریسک‌های اجرایی مواجه سازد. از این منظر، نگاه سیستمی به بتن‌ریزی کاملاً منطبق بر اصول مهندسی سیستم‌هاست؛ چراکه در این رویکرد، خروجی سیستم نه نتیجه عملکرد یک جزء منفرد، بلکه حاصل اثرات متقابل و هماهنگ اجزای مختلف سیستم است [۳].

یکی از چالش‌های اساسی در پروژه‌های ساختمانی، انتخاب سیستم مناسب ساخت و اجرای بتن است. گزینه‌هایی نظیر بتن درجا، بتن پیش‌ساخته و بتن خودمتراکم، هر یک دارای مزایا و محدودیت‌های فنی، اجرایی و اقتصادی خاص خود هستند. انتخاب نادرست این سیستم‌ها می‌تواند تبعات بلندمدت برای ذی‌نفعان پروژه به‌همراه داشته باشد؛ از جمله افزایش هزینه‌های چرخه عمر، کاهش دوام سازه، افزایش ریسک خطای اجرایی و تأخیر در زمان بهره‌برداری. این مسئله به‌ویژه در پروژه‌های شهری متراکم، پروژه‌های صنعتی با الزامات کیفی بالا و پروژه‌های مسکونی با محدودیت بودجه، اهمیت دوچندان می‌یابد [۹].

فرآیند انتخاب سیستم بتن‌ریزی، به‌دلیل درگیر بودن هم‌زمان معیارهای متعددی نظیر کیفیت، دوام، هزینه، زمان اجرا، ایمنی و ریسک خطای انسانی، ماهیتی چندمعیاره و بعضاً متعارض دارد. در بسیاری از پروژه‌ها، این انتخاب بر اساس تجربه شخصی یا تصمیم‌گیری شهودی انجام می‌شود که می‌تواند منجر به انتخابی غیربهینه گردد. از این‌رو، مسئله انتخاب سیستم بتن‌ریزی را می‌توان به‌عنوان یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره ($MADM^1$) در نظر گرفت که نیازمند استفاده از ابزارهای تحلیلی ساختارمند است [۵].

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به‌ویژه در چارچوب طراحی سیستم‌ها، امکان وزن‌دهی به معیارها بر اساس اهداف پروژه و ارزیابی هم‌زمان گزینه‌های مختلف را فراهم می‌کنند. استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای تعیین اهمیت نسبی معیارها و روش TOPSIS برای رتبه‌بندی گزینه‌ها، از جمله رویکردهای متداول و معتبر در تحلیل مسائل مهندسی پیچیده محسوب می‌شوند [۶]. این روش‌ها به تصمیم‌گیرنده کمک می‌کنند تا به‌جای اتکا به قضاوت‌های ذهنی، بر پایه تحلیل منطقی و شفاف، سیستم بهینه بتن‌ریزی را انتخاب نمایند.

بنابراین، با توجه به نقش حیاتی بتن در عملکرد نهایی سازه‌ها، پیچیدگی سیستم بتن‌ریزی و ماهیت چندمعیاره تصمیم‌گیری در این حوزه، انجام پژوهشی که با رویکرد مهندسی سیستم‌ها به تحلیل ساخت و اجرای بتن پرداخته و از روش‌های MADM برای انتخاب پیکربندی بهینه سیستم استفاده کند، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. این تحقیق تلاش دارد با ارائه یک چارچوب سیستم‌محور، به بهبود کیفیت تصمیم‌گیری در پروژه‌های ساختمانی و ارتقای عملکرد فنی و اقتصادی سیستم‌های بتن‌ریزی کمک نماید.

۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین

تصمیم‌گیری چندمعیاره (MADM) به‌عنوان یکی از رویکردهای مهم در مسائل مهندسی، زمانی مطرح می‌شود که انتخاب یک گزینه بهینه مستلزم در نظر گرفتن چندین معیار هم‌زمان و گاه متعارض باشد. هوانگ و یون [۵] MADM را چارچوبی برای انتخاب بهترین آльтرناتیو از میان گزینه‌های محدود بر اساس مجموعه‌ای از معیارها معرفی کردند. در ادامه، ساعتی [۶] با ارائه فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، امکان وزن‌دهی سیستماتیک معیارها بر پایه قضاوت خبرگان را فراهم نمود و نشان داد که تصمیم‌گیری مهندسی بدون تعیین اهمیت نسبی معیارها، فاقد پشتوانه علمی کافی است.

در حوزه مهندسی عمران، پژوهش‌های متعددی از MADM در انتخاب مصالح، روش‌های اجرایی و سیستم‌های ساخت استفاده کرده‌اند. شانیان و ساوادوگو [۸] نشان دادند که انتخاب مصالح مهندسی با استفاده از MADM نسبت به روش‌های سنتی، منجر به تصمیم‌های

¹ Multiple Attribute Decision Making



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



پایداری می‌شود. دی‌بریتو و اتسیریا [۴] نیز کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را در مقایسه انواع بتن و مصالح بازیافتی بررسی کردند. با این حال، بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که اغلب مطالعات، بتن را صرفاً به‌عنوان یک ماده یا فناوری منفرد تحلیل کرده‌اند و کمتر به آن به‌عنوان یک سیستم مهندسی چندجزئی توجه شده است.

از سوی دیگر، بلانچارد و فابریکی [۳] تأکید می‌کنند که هر فرآیند پیچیده‌ای که از اجزای متعامل تشکیل شده باشد، باید در قالب یک سیستم تحلیل شود؛ زیرا عملکرد کل سیستم تابعی از تعامل اجزای آن است، نه عملکرد مجزای هر جزء. با وجود این، تلفیق صریح رویکرد مهندسی سیستم‌ها با MADM در تحلیل سیستم بتن‌ریزی در پژوهش‌های پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

بر این اساس، خلاصه‌ای پژوهش حاضر، نبود یک چارچوب سیستم‌محور برای تحلیل و انتخاب سیستم بتن‌ریزی با استفاده از MADM است. مقاله حاضر با تمرکز بر این خلاصه، بتن‌ریزی را به‌عنوان یک سیستم مهندسی چندمعیاره تعریف کرده و فرآیند انتخاب پیکربندی بهینه آن را به‌صورت مدل‌سازی شده و ریاضی بررسی می‌کند.

۳- مطالب اصلی پژوهش

۳-۱- نگاه مسئله‌محور به انتخاب سیستم بتن‌ریزی

انتخاب سیستم ساختمانی بهینه همواره یکی از دغدغه‌های اصلی کارفرمایان و مدیران پروژه بوده است؛ چرا که انتخاب نامناسب می‌تواند آثار منفی خود را تا سال‌ها در قالب افزایش هزینه، کاهش دوام و افت کیفیت سازه نشان دهد. در پروژه‌های عمرانی، بتن به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزای سازه‌ای، نقشی تعیین‌کننده در عملکرد نهایی پروژه ایفا می‌کند. نوع بتن و روش اجرای آن به‌طور مستقیم بر هزینه، زمان، کیفیت و دوام سازه اثرگذار است. از آنجا که این معیارها اغلب با یکدیگر در تعارض هستند، انتخاب سیستم مناسب بتن‌ریزی ذاتاً یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره محسوب می‌شود. بنابراین، اتکا به تصمیم‌گیری شهودی یا تجربه صرف، نمی‌تواند پاسخگوی پیچیدگی این مسئله باشد و استفاده از ابزارهای تحلیلی نظیر MADM ضرورت می‌یابد.

۳-۲- تعریف تصمیم‌گیری MADM و جایگاه آن در بتن‌ریزی

تکنیک‌های تصمیم‌گیری MADM به‌دنبال آن هستند که نشان دهند چگونه می‌توان با استفاده از اطلاعات معیارها، بهترین آльтرناتیو را از دیدگاه تصمیم‌گیرنده انتخاب کرد. به‌طور کلی، دو رویکرد اصلی در MADM وجود دارد:

- مدل‌های غیرجبرانی (غیرتعاملی): ضعف یک گزینه در یک معیار قابل جبران نیست
 - مدل‌های جبرانی (تعاملی): ضعف در یک معیار می‌تواند با عملکرد بهتر در معیارهای دیگر جبران شود
- با توجه به ماهیت طراحی سیستم بتن‌ریزی که در آن معیارهایی مانند کیفیت، زمان و هزینه به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته می‌شوند، استفاده از مدل‌های جبرانی مناسب‌تر است. در پروژه‌های ساختمانی، بتن صرفاً یک ماده نیست، بلکه بخشی از سیستم ساخت محسوب می‌شود. در هر مرحله از طراحی و اجرای بتن، مهندس با گزینه‌های مختلف و معیارهای متعددی مواجه است. در چنین شرایطی، MADM ابزار مناسبی برای انتخاب گزینه بهینه سیستم بتن‌ریزی است.

۳-۳- طراحی سیستم بتن‌ریزی با رویکرد مهندسی سیستم‌ها

در مرحله طراحی سیستم، مهندس با چند گزینه اجرایی روبه‌رو است که هر یک پیکربندی متفاوتی از اجزای سیستم را ارائه می‌دهند. هدف طراحی سیستم، انتخاب پیکربندی‌ای است که بهترین عملکرد کلی سیستم را با توجه به محدودیت‌های پروژه فراهم کند. این انتخاب مستلزم ارزیابی هم‌زمان معیارهای مختلف بوده و بدون یک چارچوب تحلیلی مناسب امکان‌پذیر نیست. در رویکرد مهندسی سیستم‌ها، بتن‌ریزی به‌عنوان یک سیستم مهندسی در نظر گرفته می‌شود که از اجزای متعددی تشکیل شده است و عملکرد هر جزء بر عملکرد کل سیستم تأثیر می‌گذارد.

۳-۴- تعریف سیستم بتن‌ریزی و مرز سیستم

در این پژوهش، سیستم بتن‌ریزی شامل زیرسیستم‌های زیر در نظر گرفته شده است:

- طراحی طرح اختلاط بتن
- سیستم تولید و تأمین بتن
- سیستم حمل و انتقال



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



(d) سیستم اجرا و قالب‌بندی

(e) سیستم کنترل کیفیت و نظارت

مرز سیستم از مرحله طراحی طرح اختلاط تا پایان اجرای بتن و کنترل کیفیت تعریف شده است. عوامل خارج از این مرز، مانند طراحی سازه و بهره‌برداری، به‌عنوان ورودی‌های محیطی سیستم تلقی می‌شوند. ضعف در هر یک از زیرسیستم‌ها می‌تواند عملکرد کل سیستم بتن‌ریزی را تحت تأثیر قرار دهد.

۳-۵- گزینه‌های سیستم (آلترناتیوها)

بر اساس تحلیل سیستم، سه پیکربندی اصلی سیستم بتن‌ریزی به‌عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری در نظر گرفته شدند:

- سیستم بتن درجا
- سیستم بتن پیش‌ساخته
- سیستم بتن خودمتراکم (SCC)

هر یک از این سیستم‌ها ترکیب متفاوتی از اجزای سیستم را ارائه می‌دهند و سطوح متفاوتی از وابستگی به نیروی انسانی، کنترل کیفیت، زمان اجرا و هزینه را دارند.

۳-۶- معیارهای ارزیابی سیستم بتن‌ریزی^۱

در چارچوب رویکرد مهندسی سیستم‌ها، هر سیستم اجرایی باید بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای عملکردی، اجرایی و اقتصادی ارزیابی شود. این معیارها بیانگر نحوه دستیابی سیستم به اهداف کلان پروژه هستند و به‌صورت مستقیم در تصمیم‌گیری MADM مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱. معیارهای عملکردی

این معیارها کیفیت و قابلیت اعتماد سیستم را از دید بلندمدت و پایداری عملکرد نشان می‌دهند.

الف) دوام بتن

دوام نشان‌دهنده توانایی بتن در مقاومت در برابر عوامل محیطی، فرسایش و تغییرات دما در طول چرخه عمر سازه است. در سیستم اجرای بتن، دوام تابعی از طراحی طرح اختلاط، کیفیت عمل‌آوری، و هماهنگی تجهیزات و نیروی انسانی است. افزایش دوام بیانگر پایداری بیشتر و کاهش نیاز به تعمیرات در آینده است. مطابق ACI Committee 318 [۱]، دوام شاخص کلیدی کیفیت بتن ساختمانی محسوب می‌شود و در انتخاب سیستم‌های صنعتی‌تر (مانند بتن پیش‌ساخته و خودمتراکم) نقش تعیین‌کننده دارد.

ب) قابلیت اطمینان سیستم

قابلیت اطمینان بیانگر احتمال عملکرد صحیح سیستم بتن‌ریزی در شرایط برنامه‌ریزی‌شده بدون خطا است. در چارچوب مهندسی سیستم‌ها [۳]، قابلیت اطمینان تابعی از ثبات فرآیند، دقت کنترل کیفیت و هماهنگی بین زیرسیستم‌ها است. در مدل MADM، این معیار اغلب وزن بالایی دارد، زیرا نشان‌دهنده کیفیت باثبات و تکرارپذیری در پروژه‌های مختلف است.

۲. معیارهای اجرایی

این معیارها به جنبه‌های اجرای پروژه و کارایی فرآیند بتن‌ریزی مربوط می‌شوند.

الف) زمان چرخه اجرا

زمان چرخه اجرا بیانگر طول مدت انجام کامل فرآیند بتن‌ریزی از مرحله آماده‌سازی تا پایان عمل‌آوری اولیه است. کاهش زمان چرخه اجرا از دید بهره‌وری و تمرکز بر زمان‌بندی پروژه اهمیت دارد؛ با این حال، کاهش بیش از حد ممکن است به افت کیفیت منجر شود. در تصمیم‌گیری چندمعیاره [۵]، این معیار معمولاً وزن متوسط یا متوسط به بالا دارد، چون نیازمند تعادل بین سرعت و کیفیت است.

ب) ریسک خطای اجرایی

^۱ System Evaluation Criteria



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



ریسک خطا نشان‌دهنده احتمال بروز انحراف در حین فرآیند اجرا (مانند جدایی مصالح، نقص در ویبراسیون یا خطا در قالب‌بندی) است. در سیستم‌های صنعتی تر نظیر بتن خودمتراکم، این ریسک در مقایسه با روش‌های سنتی کاهش می‌یابد زیرا وابستگی به عملیات دستی کمتر است. در نگاه سیستمی، این معیار بازتاب مستقیم قابلیت هماهنگی اجزای سیستم و اثر تعامل نیروی انسانی و تجهیزات است.

۳. معیار اقتصادی

هزینه کل چرخه عمر سیستم

هزینه چرخه عمر شامل مجموع هزینه‌های تهیه مصالح، اجرا، نگهداری و ترمیم احتمالی در طول عمر سازه است. سیستم‌های سنتی معمولاً در هزینه اولیه مقرون به صرفه ترند ولی در بلندمدت هزینه نگهداری بیشتری دارند، در حالی که سیستم‌های صنعتی تر علی‌رغم هزینه اولیه بالاتر، هزینه چرخه عمر پایین‌تری دارند. در MADM، این معیار بیانگر دید اقتصادی پروژه است و از طریق وزن‌دهی با روش AHP [۶] در کنار معیارهای کیفی و اجرایی لحاظ می‌شود تا تعادل میان کیفیت-زمان-هزینه برقرار گردد.

۳-۷- ضرورت استفاده از MADM و وزن‌دهی معیارها (AHP - سیستم‌محور)

در چارچوب طراحی سیستم‌ها، فرض یکسان بودن اهمیت معیارهای تصمیم‌گیری غیرواقعی است. به‌عنوان مثال، در بسیاری از پروژه‌های عمرانی، کیفیت و قابلیت اطمینان نسبت به هزینه اولویت بالاتری دارند، در حالی که در برخی پروژه‌های کم‌هزینه، معیار اقتصادی نقش پررنگ‌تری ایفا می‌کند. بنابراین، تعیین وزن نسبی معیارها یک گام اساسی در تحلیل سیستم بت‌ریزی است. در این پژوهش، برای تعیین اهمیت نسبی معیارها از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شده است. این روش امکان وزن‌دهی معیارها را بر اساس قضاوت خبرگان و در چارچوبی ریاضی فراهم می‌کند.

۳-۸- مدل‌سازی ریاضی وزن‌دهی معیارها با AHP

تشکیل ماتریس مقایسه زوجی

ابتدا ماتریس مقایسه زوجی معیارها به‌صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این رابطه:

A: ماتریس مقایسه زوجی معیارها

a_{ij} : میزان اهمیت نسبی معیار i نسبت به معیار j

n : تعداد معیارهای تصمیم‌گیری

عناصر قطر اصلی ماتریس برابر با ۱ هستند

ماتریس خاصیت تقارنی معکوس دارد، به‌طوری‌که $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$

استخراج بردار وزن معیارها

بردار وزن معیارها از حل معادله مقدار ویژه زیر به‌دست می‌آید:

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (2)$$

در این رابطه:

$w = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$: بردار وزن معیارها

w_i : وزن معیار i

$\lambda_{\max}$: بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه زوجی

A: ماتریس مقایسه زوجی معیارها



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



که در آن w بردار وزن معیارها است. وزن‌ها به گونه‌ای نرمال‌سازی می‌شوند که:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (3)$$

در این رابطه:

- w_i : وزن نهایی و نرمال‌شده معیار i
- n : تعداد معیارها

بررسی سازگاری قضاوت‌ها

شاخص سازگاری (CI) و نسبت سازگاری (CR) به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

در این رابطه:

CI : شاخص ناسازگاری

$\lambda_{\max}$: بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه زوجی

n : تعداد معیارها

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

در این رابطه:

CR : نسبت ناسازگاری

CI : شاخص ناسازگاری

RI : شاخص تصادفی، وابسته به تعداد معیارها و استخراج‌شده از جدول استاندارد AHP

در صورتی که $CR < 0.1$ باشد، قضاوت‌های انجام‌شده دارای سازگاری قابل قبول هستند.

مجموعه معادلات ارائه‌شده در روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای این منظور به کار می‌روند که اهمیت نسبی معیارهای تصمیم‌گیری به صورت کمی و قابل مقایسه تعیین شود. از آنجا که در مسائل مهندسی، معیارها معمولاً ماهیت‌های متفاوت و بعضاً متعارض دارند (مانند هزینه، کیفیت، زمان و دوام)، این معادلات امکان تبدیل قضاوت‌های کیفی تصمیم‌گیرنده به وزن‌های عددی را فراهم می‌کنند.

۳-۹- رتبه‌بندی سیستم‌ها با روش TOPSIS

پس از وزن‌دهی معیارها، از روش TOPSIS برای رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده می‌شود. فاصله هر گزینه از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (6)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (7)$$

ضریب نزدیکی گزینه i به راه‌حل ایده‌آل:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (8)$$

در این روابط:



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



- i : شاخص گزینه،
 $i = 1, 2, \dots, m$ که در این پژوهش شامل سیستم بتن درجا، بتن پیش‌ساخته و بتن خودمتراکم است.
- j : شاخص معیار،
 $j = 1, 2, \dots, n$
- n : تعداد معیارهای تصمیم‌گیری.

پارامترهای فاصله

- S_i^+ : فاصله اقلیدسی گزینه i از راه‌حل ایده‌آل مثبت؛
هرچه مقدار آن کمتر باشد، گزینه به بهترین وضعیت ممکن نزدیک‌تر است.
- S_i^- : فاصله اقلیدسی گزینه i از راه‌حل ایده‌آل منفی؛
هرچه مقدار آن بیشتر باشد، گزینه از بدترین وضعیت ممکن دورتر است.

عناصر ماتریس تصمیم وزن‌دار

- v_{ij} : مقدار نرمال‌شده و وزن‌دار عملکرد گزینه i نسبت به معیار j ، که از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$v_{ij} = w_j r_{ij}$$

که در آن:

- w_j : وزن معیار j استخراج‌شده از روش AHP
- r_{ij} : مقدار نرمال‌شده ماتریس تصمیم

راه‌حل‌های ایده‌آل

- v_j^+ : مقدار راه‌حل ایده‌آل مثبت برای معیار j ، که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v_j^+ = \begin{cases} \max_i (v_{ij}) & \text{برای معیارهای سود (Benefit)} \\ \min_i (v_{ij}) & \text{برای معیارهای هزینه (Cost)} \end{cases}$$

- v_j^- : مقدار راه‌حل ایده‌آل منفی برای معیار j ، که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v_j^- = \begin{cases} \min_i (v_{ij}) & \text{برای معیارهای سود (Benefit)} \\ \max_i (v_{ij}) & \text{برای معیارهای هزینه (Cost)} \end{cases}$$

ضریب نزدیکی

- C_i : ضریب نزدیکی گزینه i به راه‌حل ایده‌آل؛ مقداری بدون بعد در بازه:
 $0 \leq C_i \leq 1$
- هرچه مقدار C_i بزرگ‌تر باشد، گزینه i مطلوب‌تر بوده و رتبه بالاتری کسب می‌کند.



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



۴- نتیجه و جمع‌بندی

در این پژوهش، سیستم بتن‌ریزی به‌عنوان یک سیستم مهندسی چندمعیاره و چندجزئی مورد تحلیل قرار گرفت و نشان داده شد که طراحی و انتخاب پیکربندی بهینه آن بدون استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، منجر به تصمیم‌های ناقص و بعضاً غیربهینه خواهد شد. با تلفیق رویکرد مهندسی سیستم‌ها و روش‌های MADM، چارچوبی ساختارمند برای تعریف مرز سیستم، استخراج معیارهای ارزیابی، وزن‌دهی معیارها با استفاده از AHP و رتبه‌بندی گزینه‌ها با روش TOPSIS ارائه گردید. نتایج تحلیل حاکی از آن است که اهمیت معیارها در پروژه‌های مختلف یکسان نیست و انتخاب سیستم بهینه تابع اهداف و محدودیت‌های سیستم پروژه است. سیستم‌های صنعتی‌تر مانند بتن خودمتراکم و بتن پیش‌ساخته در پروژه‌هایی با اولویت کیفیت و زمان، عملکرد برتری دارند، در حالی که در پروژه‌های با محدودیت بودجه، سیستم بتن درجا می‌تواند گزینه مناسب‌تری باشد. چارچوب ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان ابزاری علمی و قابل تعمیم در تصمیم‌گیری‌های مهندسی مرتبط با سیستم‌های اجرایی بتن مورد استفاده قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بدین‌وسیله از دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد به‌دلیل فراهم‌سازی بستر علمی و آموزشی لازم جهت انجام این پژوهش صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

منابع

- [1] ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019.
- [2] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th ed., Harlow, United Kingdom: Pearson Education Limited, 2011.
- [3] B. S. Blanchard and W. J. Fabrycky, *Systems Engineering and Analysis*, 5th ed., Upper Saddle River, NJ: Pearson (Prentice Hall), 2011.
- [4] J. de Brito and M. Etxeberria, *Recycled Aggregate Concrete: Production, Properties and Applications*, Cham, Switzerland: Springer, 2019.
- [5] C. L. Hwang and K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Berlin, Germany: Springer, 1981.
- [6] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, New York, NY: McGraw-Hill, 1980.
- [7] E. Triantaphyllou, *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, Dordrecht, Netherlands: Springer, 2000.
- [8] A. Shanian and O. Savadogo, "A material selection model based on the concept of multiple attribute decision making," *Materials & Design*, Vol. 27, No. 4, pp. 329–337, 2006.
- [9] M. Yu, F. Zhu, X. Yang, L. Wang, and X. Sun, "Integrating Sustainability into Construction Engineering Projects: Perspective of Sustainable Project Planning," *Sustainability*, Vol. 10, No. 3, pp. 784–802, 2018.