Journal of Structural and Construction Engineering, 12(07), 2025, pp. 217-240

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Qualitative evaluation of the effectiveness of lean construction with a building information modeling technology approach

Soroush Askari Khozankalaee[1], Eghbal Shakeri[2]*

1- M.sc, Department of Civil Engineering and Environment, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2- Associated Professor, Department of Civil Engineering and Environment, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

The construction industry constitutes a significant portion of the national economy, with many other industries and jobs directly or indirectly dependent on it. Despite advancements in technology, machinery, and project management standards, this industry continues to face low productivity and efficiency due to numerous non-value-adding activities and widespread waste during project execution. This situation leads to time and cost overruns beyond the initial plans, which not only reduce the contractor's profit but also jeopardize the investment of the client and other stakeholders, exposing projects to the risk of failure and the inability to meet predefined objectives. Therefore, eliminating waste—recognized as a key contributor to time and cost increases in construction projects—is both crucial and necessary.This study investigates the impact of Building Information Modeling (BIM) technology and its capabilities on enhancing Lean Construction effectiveness with the aim of eliminating or minimizing waste in construction projects. The research was conducted using a structured interview approach based on a decision matrix, followed by analysis of the results through multi-criteria decision-making methods. The findings indicate that BIM technology significantly enhances Lean Construction effectiveness from various perspectives. The study reveals that the 3D BIM model has been able to eliminate or reduce many of the risks that lead to waste, whereas more advanced models—such as 4D and 5D BIM—despite their higher cost and complexity, have shown less impact on mitigating waste-related risks. Furthermore, utilizing BIM capabilities can play a pivotal role in reducing waste and improving the performance of construction projects by minimizing or eliminating risks arising from uncertainty, information inconsistency, and deficiencies in design and planning.

ARTICLE INFO

Receive Date: 5 March 2025
Revise Date: 06 June 2025
Accept Date: 12 July 2025

Keywords:
Lean Construction,
Building Information Modeling,
Multi-Criteria Decision Making,
Waste,
Effectiveness

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.494949.3620

*Corresponding author: Eghbal Shakeri.
Email address: eshakeri@aut.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

ارزیابی کیفی اثربخشی ساخت و ساز ناب با رویکرد فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت

سروش عسکری خوزنکلائی [۱]، اقبال شاکری [۲*]

۱- کارشناس ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲- دانشیار، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

صنعت احداث بخش بزرگی از اقتصاد کشور را تشکیل داده است و بسیاری از صنایع و مشاغل به آن وابستگی مستقیم و غیرمستقیم دارند. این صنعت علی‌رغم پیشرفت فناوری‌ها و ماشین‌آلات و استانداردها در مدیریت پروژه، به دلیل وجود فعالیت‌های فاقد ارزش افزوده و اتلافات فراوان در روند اجرای پروژه‌ها با عدم بهره‌وری و سطح کارآمدی پایین روبروست این موضوع باعث افزایش زمان و هزینه مازاد بر برنامه‌ریزی اولیه خواهد شد که علاوه بر کاهش سود پیمانکار باعث به خطر افتادن سرمایه‌ی کارفرما و سایر ذینفعان، پروژه‌ها را با ریسک شکست و عدم دستیابی به اهداف تعیین شده می‌نماید. در نتیجه حذف اتلافات به عنوان عامل اصلی افزایش زمان و هزینه پروژه‌های عمرانی امری مهم و ضروری است. این پژوهش به بررسی تأثیر فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت و قابلیت‌های آن در اثربخشی ساخت و ساز ناب با هدف حذف یا به حداقل رساندن اتلافات پروژه‌های ساخت می‌پردازد. این پژوهش با رویکرد مصاحبه ساختاریافته بر اساس ماتریس تصمیم و سپس تحلیل نتایج با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام گردید. نتایج بدست آمده نشان از تأثیر فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت بر افزایش اثربخشی ساخت و ساز ناب از جنبه‌های مختلف دارد. این پژوهش نشان می‌دهد که مدل سه‌بعدی BIM توانسته است بسیاری از ریسک‌های منشأ اتلافات را حذف یا کاهش دهد، در حالی‌که مدل‌های پیشرفته‌تر مانند مدل‌های چهار و پنج‌بعدی با وجود هزینه و پیچیدگی بیشتر، تأثیر کمتری بر حذف ریسک‌های منشأ وقوع اتلافات دارند. همچنین به‌کارگیری قابلیت‌های فناوری BIM می‌تواند با کاهش یا حذف ریسک‌های ناشی از عدم قطعیت، ناهماهنگی اطلاعات و ضعف در طراحی و برنامه‌ریزی، نقش مؤثری در کاهش اتلافات و بهبود عملکرد پروژه‌های عمرانی ایفا نماید.

کلمات کلیدی: ساخت و ساز ناب، مدل‌سازی اطلاعات ساخت، تصمیم‌گیری چندمعیاره، اتلاف، اثربخشی

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:	10.22065/jsce.2025.494949.3620
۱۴۰۳/۱۲/۱۶	۱۴۰۴/۰۳/۱۶	۱۴۰۴/۰۴/۲۱	۱۴۰۴/۰۴/۲۱	۱۴۰۴/۰۷/۳۰		10.22065/jsce.2025.494949.3620

*نویسنده مسئول: اقبال شاکری
پست الکترونیکی: eshakeri@aut.ac.ir

۱- مقدمه

ساخت و ساز ناب رویکردی مدیریتی جهت افزایش بهره‌وری، ارزش‌آفرینی مستمر از طریق حذف اتلافات موجود در روند اجرای پروژه‌های صنعت ساخت است. اتلافات یکی از عوامل مهم افزایش زمان و هزینه پروژه‌های عمرانی می‌باشند. با توجه به بودجه‌ی کلان عمرانی، مسئله‌ی بهره‌وری این صنعت بسیار مهم می‌باشد. با توجه به موارد فوق، شناسایی و ریشه‌یابی علل وقوع اتلافات در پروژه‌ها به منظور حذف یا به حداقل رساندن آن‌ها امری ضروری می‌باشد. در طول زمان ابزارهای مختلفی با رویکرد حذف اتلافات و دستیابی به ساخت و ساز ناب[1] معرفی و توسعه یافتند؛ اما توانایی حذف یک‌سری از علل و مصادیق وقوع اتلاف را ندارند. مدل‌سازی اطلاعات ساخت[2] به عنوان یک سیستم اطلاعاتی دائمی، دقیق و پویا دارای ظرفیت‌هایی است که از ساخت و ساز ناب پشتیبانی می‌نماید. اتلاف ناشی از عدم تعامل فعالیت‌های طراحی و ساخت، به‌واسطه‌ی BIM بهبود می‌یابد. BIM می‌تواند به صورت خودکار و دقیق اطلاعات مصالح و مواد را تولید کرده و با قیمت‌گذاری‌های مربوطه، هزینه‌های کل پروژه را به صورت دقیق تعیین نماید. علاوه بر آن با دادن اطلاعات هندسی و غیرهندسی دقیق و قابل اتکا، هزینه‌ها را کاهش دهد.

در این پژوهش ابتدا ریسک‌های منشأ وقوع اتلافات از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و مرور پیشینه پژوهش در این حوزه شناسایی و ریشه‌یابی می‌شوند. سپس ابزارهای توسعه داده شده جهت پیاده‌سازی ساخت و ساز ناب معرفی شده و با بررسی نقاط ضعف و قوت هر یک، خلاء پژوهشی موجود شناسایی می‌گردد. قابلیت‌های فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت به عنوان ابزاری ناب برای پاسخ به خلاءهای موجود بررسی می‌شود. در نهایت میزان اثربخشی فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت در حذف اتلافات و دستیابی به ساخت و ساز ناب به کمک روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بررسی می‌گردد.

۲- پیشینه پژوهش

۲-۱ ساخت و ساز ناب

برتاگنولی[3] در سال ۲۰۱۸ [۱] در کتاب خود تحت عنوان مدیریت ناب، ساخت و ساز ناب را رویکردی با ارزش‌ها، اصول، روش و ابزارهایی با هدف حذف یا کاهش اتلافات و تمرکز بر نیازهای اصلی مشتری معرفی می‌نماید. ماراکا[4] و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۲] هدف ساخت و ساز ناب را بهبود صنعت ساخت با به حداکثر رساندن ارزش و حذف اتلافات تا حد ممکن بیان نمودند. در این پژوهش اتلافات عامل اصلی عدم بهره‌وری در فرآیند اجرای پروژه‌ها معرفی شده و جریان کاری بهینه در پروژه‌های ساخت را جریان کاری عاری از اتلاف که شامل فعالیت‌های ارزش آفرین می‌باشد تعریف می‌نماید. کومار[5] در سال ۲۰۲۲ [۳] ساخت و ساز ناب را رویکردی جهت طراحی یک سیستم تعریف می‌کند که بوسیله‌ی حداقل نمودن اتلافات، حداکثر ارزش رو تولید میکند. با توجه به تعاریف ارائه شده از ساخت و ساز ناب در پژوهش‌های گذشته، می‌توان ساخت و ساز ناب را یک رویکرد مدیریتی به منظور ارزش‌آفرینی مستمر، افزایش بهره‌وری و بهینه‌سازی زمان و هزینه پروژه‌های صنعت ساخت از طریق شناسایی و حذف (یا کاهش) اتلافات موجود در روند احداث پروژه دانست. بنابراین شناسائی ریسک‌های منشأ وقوع آن در پروژه‌های عمرانی ضروریست.

اهنو[6] در سال ۱۹۹۸ [۴]، اتلافات را مازاد بر حداقل منابع (شامل نیروی انسانی، تجهیزات و مواد و مصالح) مورد نیاز جهت انجام هر فعالیت می‌داند. وی همچنین اتلافات را به هفت دسته کلی (خرابی، تولید بیش از حد، زمان انتظار، فرآیندهای مازاد، انبار کردن بیش از حد، حمل و نقل غیرضروری مصالح و نیروی انسانی) تقسیم نمود. موسسه ساخت و ساز ناب[7] در سال ۲۰۱۳ اتلافات را فعالیت‌هایی معرفی

[1] Lean Construction
[2] Building Information Modeling (BIM)
[3] Bertagnolli
[4] Maraqa
[5] Kumar
[6] Ohno
[7] Lean Construction Institute (LCI)

می‌نماید که منابع را هدر می‌دهند و به ایجاد ارزش برای پروژه کمک نمی‌کنند. ساکس[8] در کتاب خود در سال ۲۰۱۷ [۵] اتلافات در ساخت و ساز ناب را به تمامی فعالیت‌ها و فرآیندهایی نسبت می‌دهد که به ارزش نهایی پروژه اضافه نمی‌کنند و موجب افزایش هزینه و زمان پروژه می‌شوند. همچنین بر لزوم حذف اتلافات به منظور دستیابی به حداکثر بهره‌وری و صرفه‌جویی در مصرف منابع تاکید می‌نماید. بنابراین اتلافات در ساخت و ساز ناب به هرگونه فعالیت غیرضروری که باعث افزایش زمان و هزینه پروژه می‌شود، اطلاق می‌گردد.

با توجه به تعاریف ارائه شده می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که اتلاف استفاده‌ی غیربهینه از منابع بوده که تنها منجر به افزایش زمان و هزینه پروژه شده و نقشی در پیشرفت فیزیکی پروژه ندارد. از آن جهت که شناسایی عوامل ایجاد اتلافات به منظور حذف آن‌ها و دستیابی به ساخت و ساز ناب جزء اهداف اصلی این پژوهش است، با بررسی پژوهش‌های گذشته ریسک‌های منشأ وقوع اتلافات و نحوه جلوگیری از وقوع این ریسک‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: ریسک‌های منشأ وقوع اتلافات و الزامات کنترلی

ردیف	ریسک	اتلاف مربوطه	الزامات کنترل ریسک	منبع
۱	خطا در طراحی و نقشه‌ها	خرابی یا نقص کیفیت	نقشه‌ها و جزئیات کامل اجرایی یکپارچه‌سازی دیسیپلین‌ها	[۶-۱۱]
۲	تطویل زمان تهیه نقشه‌های اجرایی	زمان انتظار	ارتباطات قوی	[۸, ۹]
۳	ساخت‌پذیر نبودن طراحی	خرابی یا نقص کیفیت زمان انتظار فرایندهای مازاد یا اشتباه	تبادل بازخوردها یکپارچه‌سازی دیسیپلین‌ها	[۶-۸]
۴	عدم انطباق برنامه با ظرفیت‌های کاری گروه‌های کاری مرتبط	زمان انتظار فرایندهای مازاد یا اشتباه	زمان‌بندی واقع‌بینانه ارتباطات قوی	[۹, ۱۰]
۵	خطا در برآوردها	زمان انتظار انبار کردن بیش از حد	نقشه‌ها و جزئیات کامل اجرایی برآورد دقیق احجام و مصالح	[۱۲, ۱۳]
۶	عدم برنامه‌ریزی دقیق و تداخل لجستیک گروه‌های کاری	زمان انتظار فرایندهای مازاد یا اشتباه جابه‌جایی غیرضروری (نیروی انسانی)	زمان‌بندی واقع‌بینانه کنترل مداوم فعالیت‌های اجرایی	[۱۴]
۷	جانمایی غلط سایت	فرایندهای مازاد یا اشتباه حمل و نقل غیرضروری (مصالح و ماشین‌آلات) جابه‌جایی غیرضروری (نیروی انسانی)	تبادل بازخوردها ارتباطات قوی	[۶, ۱۱, ۱۵]
۸	عدم تحویل به‌موقع مصالح و تجهیزات	زمان انتظار	مدیریت موجودی مصالح	[۱۶, ۱۷]
۹	روش‌های ناکارآمد تأمین مواد و مصالح و تجهیزات	زمان انتظار	بهینه‌سازی فرایندها شفافیت	[۶, ۱۰, ۱۳]
۱۰	انتظار برای تأمین نیروی انسانی و مصالح و ماشین‌آلات مورد نیاز	زمان انتظار	زمان‌بندی واقع‌بینانه برآورد دقیق احجام و مصالح	[۶, ۹]
۱۱	توقف کار ناشی از خرابی تجهیزات	زمان انتظار	ارتباطات قوی	[۱۱, ۱۸]
۱۲	اختلاف بین گروه اجرایی بر سر روش اجرائی	زمان انتظار	نقشه‌ها و جزئیات کامل اجرایی ارتباطات قوی	[۶, ۱۷]
۱۳	خطا و نواقص اجرایی	خرابی یا نقص کیفیت	وجود استانداردهای کیفیت بازرسی و کنترل کیفیت	[۹, ۱۰, ۱۴]
۱۴	عدم هماهنگی گروه‌ها	خرابی یا نقص کیفیت زمان انتظار جابه‌جایی غیرضروری (نیروی انسان)	ارتباطات قوی تبادل بازخوردها	[۲۱-۱۹]

[8] Sacks

ردیف	ریسک	اتلاف مربوطه	الزامات کنترل ریسک	منبع
۱۵	عدم انطباق تحویل شدنی‌ها با مشخصات موردنیاز	خرابی یا نقص کیفیت	نقشه‌ها و جزئیات کامل اجرایی وجود استانداردهای کیفیت بازرسی و کنترل کیفیت	[۹, ۱۳]
۱۶	حوادث ایمنی	زمان انتظار	کنترل مداوم فعالیت‌های اجرایی	[۱۱, ۱۸]
۱۷	سرقت یا خرابکاری	خرابی یا نقص کیفیت	شفافیت کنترل مداوم فعالیت‌های اجرایی	[۹, ۱۴]
۱۸	نداشتن تجربه و تخصص نیروی انسانی	خرابی یا نقص کیفیت فرایندهای مازاد یا اشتباه پتانسیل‌های فردی بلااستفاده	بهینه‌سازی فرایندها	[۱۳, ۱۹, ۲۲]
۱۹	عدم تعریف (شفافیت) رویه‌های کاری	فرایندهای مازاد یا اشتباه	بهینه‌سازی فرایندها شفافیت	[۶, ۱۷]
۲۰	شکست در حفاظت از کار تکمیل شده و لزوم دوباره‌کاری	خرابی یا نقص کیفیت	بازرسی و کنترل کیفیت	[۱۴, ۱۸]
۲۱	ضعف دستگاه نظارت (تعداد و کیفیت نفرات)	خرابی یا نقص کیفیت	بهینه‌سازی فرایندها وجود استانداردهای کیفیت	[۶, ۱۴, ۱۷, ۲۳]
۲۲	ناکارآمدی نظام مدیریت تضمین کیفیت	خرابی یا نقص کیفیت	وجود استانداردهای کیفیت	[۸, ۲۴]
۲۳	فقدان رویه تصمیم‌گیری در نظام مدیریت پروژه	فرایندهای مازاد یا اشتباه	شفافیت ارتباطات قوی بهینه‌سازی فرایندها تبادل بازخوردها	[۱۹, ۲۳, ۲۵]
۲۴	تعارض منافع ارکان پروژه	فرایندهای مازاد یا اشتباه	بهینه‌سازی فرایندها شفافیت ارتباطات قوی	[۱۳, ۱۴]
۲۵	تغییر در ثبات رویه‌های ارکان پروژه ناشی از تغییرات مدیریتی	فرایندهای مازاد یا اشتباه	ارتباطات قوی بهینه‌سازی فرایندها	[۲۵]
۲۶	سیاست‌های غلط ارجاع کار به پیمانکاران	خرابی یا نقص کیفیت زمان انتظار	شفافیت بهینه‌سازی فرایندها	

با توجه به شناسایی ۲۶ ریسک منشأ وقوع اتلافات در جدول ۱، به منظور دستیابی به ساخت و ساز ناب نیاز است تا ابزارهای حذف یا کاهش این ریسک‌ها شناسایی گردند. به این منظور در ادامه‌ی روند پژوهش ابزارهای حذف ریسک‌های منشأ وقوع اتلاف بررسی می‌گردند.

۲-۲ ابزارهای ساخت و ساز ناب

پژوهش‌هایی جهت ارائه ابزارهایی جهت کاهش یا حذف اتلافات از طریق برآورده نمودن الزامات کنترلی جهت جلوگیری از وقوع علل ایجاد اتلافات انجام گردیدند. برخی از این ابزارها مختص ساخت و ساز ناب معرفی شده و برخی دیگر از سایر صنایع و با مفهومی کاملاً مستقل اما در راستای تأمین الزامات کنترلی ذکر شده در جدول ۱ مورد استفاده قرار می‌گیرند. هرکدام از ابزارهای حذف اتلاف قادرند بخشی از الزامات دستیابی به ساخت و ساز ناب را که در جدول ۱ ارائه گردید تأمین نمایند. به منظور بررسی خلاء در زمینه ابزارهای حذف اتلافات، میزان توانایی هر کدام از ابزارهای ارائه شده در پژوهش‌های پیشین بررسی و در جدول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲ : بررسی تعامل ابزارهای حذف اتلافات و معیارهای ساخت و ساز ناب

معیارهای ساخت و ساز ناب / ابزارها	شفافیت	ارتباطات قوی	بهینه‌سازی فرایندها	برآورد دقیق احجام و مصالح	مدیریت موجودی مصالح	نقشه‌ها و جزئیات کامل اجرایی	یکپارچه‌سازی دیسیپلین‌ها	زمان‌بندی واقع‌بینانه	کنترل مداوم فعالیت‌های اجرایی	وجود استانداردهای کیفیت	بازرسی و کنترل کیفیت	تبادل بازخوردها	منبع
سیستم برنامه‌ریز نهایی[9]	●	●						●	●			●	[۲۶-۲۸]
روش 5S	●				●								[۱۵]
نقشه جریان ارزش[10]		●	●									●	[۲۹]
تحویل به موقع[11]					●			●		●			[۳۰]
کارت‌های کانبان[12]	●	●										●	[۲۷, ۲۸]

علی‌رغم قابلیت‌های ارائه شده توسط هریک از ابزارهای معرفی شده در جدول، همچنان بخشی از معیارهای ساخت و ساز ناب باقی می‌مانند که توسط هیچ یک از ابزارها رفع نمی‌گردند. این عوامل به شرح زیر اند:

- برآورد دقیق احجام و مصالح
- یکپارچه‌سازی دیسیپلین‌ها
- نقشه‌ها و جزئیات کامل اجرایی
- بازرسی و کنترل کیفیت

یکی از عمده دلایل عدم توانایی ابزارهای ساخت و ساز ناب در حذف این اتلافات، نبود سیستم اطلاعاتی است که با ذخیره‌سازی اطلاعات مناسب زمینه‌ساز هماهنگی و یکپارچگی ذینفعان کلیدی پروژه و تسهیل ارتباط و گردش اطلاعات میان گروه‌های کاری باشد. در نتیجه وجود چنین پایگاه اطلاعاتی که قابلیت جمع‌آوری، طبقه‌بندی و به‌اشتراک‌گذاری اطلاعات میان عوامل اصلی درگیر در پروژه باشد، می‌تواند به بهبود مدیریت پروژه‌ها کمک نموده و استفاده از آن در صنعت احداث را توجیه نماید. وجود یک ابزار که بتواند این عوامل را رفع نماید، به عنوان یک خلاء در بخش اتلافات ساخت و ساز ناب شناسایی گردید.

۳-۲ مدل‌سازی اطلاعات ساخت

مدل‌سازی اطلاعات ساخت (BIM) به عنوان یک سیستم اطلاعاتی دائمی، دقیق و پویا دارای ظرفیت‌هایی است که از ساخت و ساز ناب پشتیبانی می‌نماید. اتلاف ناشی از عدم تعامل فعالیت‌های طراحی و ساخت، به واسطه‌ی این مدل بهبود می‌یابد. همچنین مدل می‌تواند به صورت خودکار و دقیق اطلاعات مصالح و مواد را تولید کرده و با قیمت‌گذاری‌های مربوطه، هزینه‌های کل پروژه را تعیین نماید. علاوه بر آن با دادن اطلاعات هندسی و غیرهندسی دقیق و قابل اتکا، گروه‌های مختلف را در انجام فعالیت‌ها یاری نماید [۳۱]. در نتیجه این فناوری به عنوان ابزاری جهت پاسخ به خلاء شناسایی شده معرفی شد. در ادامه به بررسی قابلیت‌های این فناوری و نحوه تعامل آن با ساخت و ساز ناب پرداخته می‌شود.

ایستمن[13] در کتاب خود در سال ۲۰۱۸ [۳۱] اینطور نتیجه‌گیری می‌نمایند که بکارگیری ابزارهای ناب نیازمند هماهنگی بین افراد مختلف نظیر پیمانکاران و تامین‌کنندگان به منظور تامین به موقع مصالح لازم برای شروع کار می‌باشد. از طرفی مدل‌سازی اطلاعات ساخت به کمک اطلاعات دقیق، زمینه ساز برنامه ریزی صحیح پیمانکاران و فراهم کننده امکان تامین به هنگام نیروی انسانی، تجهیزات و مواد و مصالح می باشد. الدیپ[14] و فاراگ[15] در یک مطالعه‌ی موردی در سال ۲۰۲۱ [۳۲] به بررسی تاثیرات استفاده از BIM به عنوان یک ابزار

[9] Last Planner System (LPS)
[10] Value Stream Map
[11] Just in time delivery
[12] Kanban Cards
[13] Eastman
[14] Eldeep
[15] Farag

مدیریت ناب در فرآیندهای ساخت و ساز پرداختند. ساخت و ساز ناب به دنبال کاهش و حذف اتلافات در پروژه و BIM به دنبال بهبود همکاری بین اعضای تیم پروژه است. نتایج پژوهش نشان داد استفاده از فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت به منظور پیاده‌سازی اصول ساخت و ساز ناب در این پروژه ساختمانی می‌توانسته باعث جلوگیری از حدود یازده درصد افزایش قیمت کل قرارداد و افزایش بیست و پنج درصدی در زمان اولیه قرارداد شود. تمرکز این پژوهش بر روی فاز ساخت پروژه بوده و عوامل ایجاد اتلاف در فاز طراحی را بررسی نمی‌نماید. همچنین صرفا از قابلیت‌های مدل سه بعدی فناوری مدلسازی اطلاعات ساخت استفاده شده است.

پژوهش ماراکا در سال ۲۰۲۱ [۲] که ۱۸ پروژه ساخت و ساز مسکونی را مورد بررسی و تحلیل قرار داد، نشان داد که با اعمال روش‌های ناب بدون استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساخت، می‌توان بهبود جریان کار را مشاهده کرد، اما تأثیر آن به اندازه زمانی که این دو با هم ترکیب می‌شوند، نخواهد بود. استفاده از BIM و روش‌های ساخت و ساز ناب به طور همزمان تأثیر قابل توجه و بسیار مفیدی بر روی پروژه دارد. با توجه به مطالب فوق، قابلیت‌های فناوری مدلسازی اطلاعات ساخت براساس ابعاد مختلف به منظور بکارگیری تا پایان فاز ساخت و تحویل پروژه (صرف نظر از مزایای آن در مرحله بهره‌برداری که خارج از محدوده این پژوهش می‌باشد) مدل به شرح جدول ۳ می‌باشد:

جدول ۳ : قابلیت‌های فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت

بعد مدل	قابلیت	مزیت	منبع
3D	برآورد دقیق احجام (متره)	افزایش دقت تأمین مصالح	[۳۳, ۳۴]
	استخراج دیتیل‌های اجرایی	افزایش دقت اجرا	[۳۳, ۳۵, ۳۶]
	مدیریت اسناد و ویرایش‌ها	افزایش شفافیت و مسئولیت‌پذیری	[۳۷, ۳۸]
	به‌روزرسانی خودکار تغییرات در مدل‌ها و نقشه‌ها	حذف زمان به‌روزرسانی نقشه‌ها	[۳۴, ۳۹]
	طراحی یکپارچه دیسیپلین‌ها	افزایش ساخت‌پذیری نقشه‌ها	[۳۳, ۳۴, ۳۸, ۳۹, ۴۰]
	کنترل بصری نیازهای کارفرما	کاهش دستورات تغییر	[۳۴, ۳۹]
	جانمایی بهینه سایت	کاهش جابه‌جایی غیرضروری	
	بازبینی بصری ایمنی کارگاه و محل کار	کاهش حوادث کار	[۴۱]
	امکان اختصاص مشخصات غیرهندسی (کیفی) به المان‌ها	جلوگیری از خطا در تأمین متریال و تجهیزات	[۴۰]
	تحلیل سیستم‌های مکانیکال و الکتریکال	جلوگیری از خطا در تأمین متریال و تجهیزات	[۴۰]
4D	برآورد دقیق زمان ساخت	تسهیل تدوین برنامه زمان‌بندی	[۳۴-۴۰, ۳۶]
	تحلیل بصری برنامه زمان‌بندی	اطمینان از اجراپذیری برنامه زمان‌بندی	[۳۵, ۳۶, ۴۰, ۴۱]
	مرور عملیات اجرایی قبل از شروع کار	جلوگیری از تداخل بین گروه‌های کاری	[۳۶, ۴۰, ۴۱]
5D	برآور دقیق هزینه ساخت	مدیریت بهتر جریان نقدینگی	[۳۴, ۳۸]
	پایش دستورات تغییر مدنظر کارفرما	تقویت توانایی مدیریت ادعا	[۳۴]
	تحلیل هزینه‌های مختلف در طول عمر پروژه	ارزیابی اقتصادی گزینه‌های مختلف طراحی و متریال	[۳۴]

به منظور تسهیل امکان ارزیابی قابلیت‌های فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت در هر بعد، قابلیت‌هایی که هم‌راستا با یکدیگر بودند ادغام شده و در جدول ۴ ارائه می‌گردد.

جدول ۴ : قابلیت‌های منتخب فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت

بعد	قابلیت منتخب

بعد	قابلیت منتخب
3D	طراحی یکپارچه دیسیپلین‌ها، تهیه دیتیل‌های دقیق اجرایی، برآورد دقیق احجام کنترل بصری نیازها و پایش دستورات تغییر مدنظر کارفرما، به‌روزرسانی خودکار تغییرات در مدل‌ها و نقشه‌ها جانمایی بهینه سایت امکان اختصاص مشخصات غیرهندسی (کیفی) به المان‌ها، تحلیل سیستم‌های مکانیکال و الکتریکال
4D	برآورد دقیق زمان ساخت، تحلیل برنامه زمان‌بندی
5D	برآورد دقیق هزینه ساخت، تحلیل هزینه‌های مختلف در طول عمر پروژه

باتوجه به نتایج بدست آمده حاصل از مرور پژوهش‌های گذشته مشخص گردید فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت قابلیت‌هایی دارد که می‌تواند به منظور حذف بخشی از اتلافات که توسط سایر ابزارهای ناب قابل حذف نیستند مؤثر باشد؛ اما میزان این اثرگذاری مشخص نیست. بنابراین، این پژوهش پس از شناسایی این خلاء به دنبال ارزیابی نحوه و میزان افزایش اثربخشی ساخت و ساز ناب در نتیجه‌ی بکارگیری فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت است.

۳- روش شناسی پژوهش

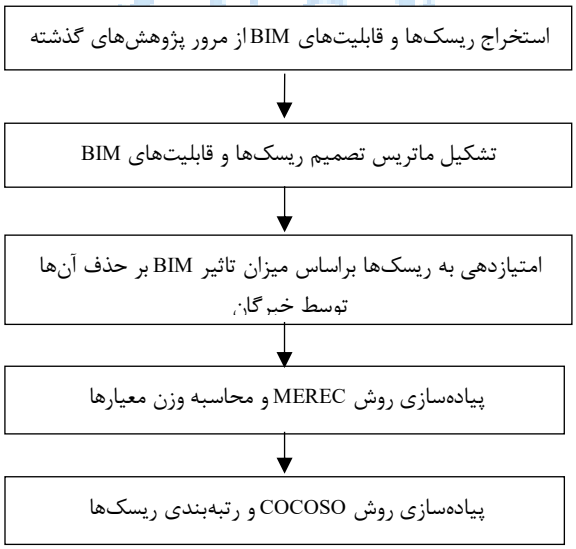
به منظور امکان دقیق‌تر ارزیابی ریسک‌ها براساس قابلیت‌های BIM، از ماتریس تصمیم بجای طراحی پرسشنامه استفاده گردید. استفاده از ماتریس تصمیم جهت تصمیم‌گیری و ارزیابی گزینه‌ها بر اساس معیارها استفاده می‌شود، در حالی که پرسشنامه برای جمع‌آوری داده‌ها از افراد استفاده می‌شود. ماتریس تصمیم شامل یک جدول است که در آن گزینه‌ها (ریسک‌ها) در ردیف‌ها و معیارها (قابلیت‌ها) در ستون‌ها قرار می‌گیرند. به هر گزینه در هر معیار یک نمره داده می‌شود. معمولاً برای تصمیم‌گیری در مسائل پیچیده که نیاز به ارزیابی چند معیاره دارند. معیارها می‌توانند وزن‌دهی شوند تا اهمیت نسبی آنها در تصمیم‌گیری منعکس شود. در این پژوهش از روش مصاحبه ساختاریافته با رویکرد ماتریس تصمیم بر اساس طیف ۱ تا ۵ (۱: خیلی کم تا ۵: خیلی زیاد) جهت ارزیابی اثربخشی فناوری مدلسازی اطلاعات ساخت بر حذف یا کاهش ریسک‌های منشأ وقوع اتلافات استفاده گردید. براساس پژوهش کرسول[16] در سال ۱۹۹۸[۴۲]، با توجه به کیفیت، دقت و قطعیت مصاحبه نسبت به پرسشنامه، تعداد ۲۰ الی ۳۰ مصاحبه کیفی کافی می‌باشد. همچنین براساس تحقیقات مورس[17] در سال ۱۹۹۴ [۴۳]، تعداد ۳۰ الی ۵۰ مصاحبه برای نتیجه‌گیری ایده‌آل می‌باشد. این پژوهش در بازه زمانی زمستان ۱۴۰۲ تا پاییز ۱۴۰۳ انجام شده است. داده‌های کیفی از طریق نظرکاوی خبرگان با رویکرد مصاحبه ساختاریافته با ۳۲ نفر از مدیران و کارشناسان ارشد در جایگاه‌های شغلی مدیرعامل، معاون فنی و اجرایی، مدیر پروژه، رئیس کارگاه و مسئول اجرایی، در شرکت‌های پیمانکار، مشاور و کارفرما جمع‌آوری گردیده است. عمده خبرگان در شرکت‌های پیمانکاری دارای رتبه یک در رشته‌های ابنیه و تأسیسات و شرکت‌های مهندسی مشاور و یک شرکت کارفرمائی پروژه‌های عمرانی فعالیت داشته‌اند. پروژه‌های فعال این شرکت‌ها در شهرهای تهران، بابلسر، شیراز، قزوین و همدان مستقر بوده‌اند و زمینه مصاحبه و تحلیل داده‌ها را فراهم کرده‌اند. باتوجه به کمبود افراد خبره در زمینه ساخت و ساز ناب تعداد افراد مصاحبه‌شونده در این پژوهش کافی می‌باشد.مشخصات افراد خبره مصاحبه‌شونده در این پژوهش به شرح جدول ۵ می‌باشد

[16] Creswell
[17] Morse

جدول ۵ : مشخصات خبرگان

مشخصات نمونه	جزئیات	فراوانی	درصد فراوانی
سابقه کاری	کمتر از ۱۰ سال	۰	۰
	۱۰ تا ۲۰ سال	۱۸	۵۶٪
	۲۰ تا ۳۰ سال	۹	۲۸٪
	بیشتر از ۳۰ سال	۵	۱۶٪
جایگاه شغلی	مدیرعامل	۳	۹٪
	معاون فنی و اجرایی	۵	۱۶٪
	مدیر پروژه	۷	۲۲٪
	رئیس کارگاه	۸	۲۵٪
	مسئول اجرایی	۹	۲۸٪

شکل ۱ فرایند اجرای پژوهش را در پنج مرحله نشان می‌دهد. در مرحله نخست، استخراج ریسک‌های منشأ وقوع اتلافات و قابلیت‌های فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت با مرور نظام‌مند پژوهش‌های پیشین صورت گرفته است. سپس، ماتریسی جهت شناسایی و تحلیل تعامل بین ریسک‌ها و قابلیت‌های BIM تشکیل شده است. در گام بعد، به هر ریسک بر اساس میزان تأثیر BIM بر حذف آن، امتیازی توسط خبرگان اختصاص یافته است. در ادامه، از روش MEREC برای محاسبه وزن قابلیت‌های فناوری BIM بر مبنای میزان تأثیر آن‌ها در حذف یا کاهش ریسک‌های منشأ اتلاف استفاده شده است. این روش یک رویکرد کاملاً عینی در وزن‌دهی معیارها محسوب می‌شود و بدون دخالت قضاوت ذهنی تصمیم‌گیرنده، صرفاً بر اساس تأثیر حذف هر معیار بر عملکرد گزینه‌ها اقدام به تعیین وزن می‌نماید. این ویژگی، در تحلیل ریسک که عمدتاً مبتنی بر داده‌های واقعی و قابل محاسبه است، موجب افزایش اعتبار و دقت نتایج می‌شود. در ادامه، به‌منظور رتبه‌بندی ریسک‌ها از منظر توانایی فناوری BIM در کاهش یا حذف آن‌ها، از روش COCOSO استفاده شده است. این روش با بهره‌گیری از ترکیب چند منطق تصمیم‌گیری از جمله جمع وزنی، توان وزنی، و استراتژی مصالحه‌ای، امکان ارزیابی چندجانبه و مکمل گزینه‌ها را فراهم می‌سازد. در مسائل مرتبط با تحلیل ریسک که گزینه‌ها ممکن است در برخی معیارها قوی و در برخی دیگر ضعیف باشند، این ویژگی منجر به تصمیم‌گیری دقیق‌تر و متعادل‌تری می‌شود. همچنین، توانایی روش COCOSO در تحلیل داده‌های نرمال‌شده و وزن‌دار، موجب هماهنگی کامل با خروجی روش MEREC شده و یک زنجیره منطقی و یکپارچه در فرآیند تحلیل را تشکیل می‌دهد.



شکل ۱: فرایند اجرای پژوهش

۳-۱- رتبه‌بندی قابلیت‌های BIM بر اساس میزان توانایی در حذف ریسک‌های منشأ اتلافات

وزن معیارها در مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره[18] عناصر اساسی هستند که می‌توانند به طور قابل‌توجهی بر نتایج تأثیر بگذارند. روش‌های وزن‌دهی می‌تواند عینی، ذهنی و یکپارچه باشد. این مطالعه روش جدیدی به نام MEREC (متد مبتنی بر اثرات حذف معیارها) را برای تعیین وزن معیارها استفاده می‌نماید. این روش توسط کشاورز قرابایی و همکاران (۲۰۲۱)[۴۴] ارائه شد. مراحل روش مرک به صورت زیر می‌باشد:

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم

یک ماتریس تصمیم در این مرحله ساخته می‌شود که امتیاز هر گزینه را در مورد هر معیار نشان می‌دهد. عناصر این ماتریس با x_{ij} نشان داده می‌شوند و این عناصر باید بزرگ‌تر از صفر باشند.($x_{ij}>0$) فرض کنید n گزینه و m معیار وجود دارد. ماتریس تصمیم بر اساس رابطه ۳-۱ می‌باشد. ماتریس تصمیم پایه‌ی اولیه برای شروع فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در آن امتیاز هر گزینه نسبت به هر معیار درج می‌شود. این ماتریس به‌صورت ساختارمند اطلاعات گزینه‌ها را در برابر معیارها سازمان‌دهی می‌کند و امکان تحلیل‌های دقیق‌تر در مراحل بعدی را فراهم می‌سازد.

$$\mathbf{X}=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12}\cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22}\cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (۱-۳)$$

گام دوم: نرمال‌سازی ماتریس تصمیم

در این مرحله از نرمال‌سازی خطی برای بی بعد کردن عناصر ماتریس تصمیم استفاده می‌شود. نرمال‌سازی، تعادل و هم‌ترازی میان معیارها ایجاد کرده و از تأثیر نامتناسب معیارهایی با دامنه بزرگ‌تر جلوگیری می‌کند. همچنین، نتایج نهایی را معتبرتر و قابل‌اعتمادتر می‌سازد. عناصر ماتریس نرمال شده با n_{ij} نشان داده می‌شوند. اگر B مجموعه معیارهای سودمند را نشان دهد و H نشان‌دهنده مجموعه‌ای از معیارهای غیرسودمند، می‌توان از معادله ۳-۲ جهت نرمال‌سازی استفاده نمود:

$$\bar{x}_{ij}=\frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} \quad (۲-۳)$$

گام سوم: محاسبه عملکرد کلی گزینه‌ها (S_i)

در این بخش یک اندازه‌گیری لگاریتمی با وزن معیارهای برابر برای به‌دست‌آوردن عملکرد کلی گزینه‌ها در این مرحله اعمال می‌شود . این مقدار به‌عنوان مرجع اولیه برای سنجش اثر حذف هر معیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. با محاسبه Si، می‌توان عملکرد کلی هر گزینه را بدون سوگیری و وزن‌دهی خاصی مشاهده کرد و زمینه را برای سنجش اهمیت هر معیار فراهم نمود. با توجه به مقادیر نرمال به‌دست‌آمده از مرحله قبل، می‌توانیم اطمینان حاصل کنیم که مقادیر کوچک‌تر n_{ij} مقادیر بیشتری از عملکرد (S_i) را به همراه دارد. برای محاسبه از رابطه ۳-۳ استفاده می‌شود:

$$S_i=ln\left(1+\left(\frac{1}{m}\sum_j\left|ln(n_{ij}^x)\right|\right)\right) \quad (۳-۳)$$

[18] Multi Criteria Decision Making (MCDM)

گام چهارم: محاسبه عملکرد گزینه‌ها با حذف اثرات معیارها (S')

در این مرحله با حذف هر یک از معیارها، عملکرد گزینه‌ها محاسبه می‌شود. در این مرحله از معیار لگاریتمی مشابه مرحله قبل استفاده می‌کنیم .تفاوت بین این مرحله و مرحله قبل این است که عملکرد گزینه‌ها بر اساس حذف هر معیار به طور جداگانه محاسبه می‌شود؛ بنابراین، ما مجموعه‌ای از عملکردهای مرتبط با m معیارها را داریم. این تحلیل حساسیت کمک می‌کند تا میزان اهمیت هر معیار را از طریق تغییرات عملکرد گزینه‌ها پس از حذف آن معیار اندازه‌گیری کنیم. معیارهایی که حذف آن‌ها باعث تغییر زیاد در عملکرد می‌شود، مهم‌تر هستند. برای محاسبات این مرحله از رابطه ۳-۴ استفاده می‌شود:

$$S'_i = ln\left(1 + \left(\frac{1}{m}\sum_{k,k\neq j} |ln(n_{ik}^x)|\right)\right) \quad (۴-۳)$$

گام پنجم: محاسبه مجموع انحرافات مطلق (E)

در این مرحله، اثر حذف معیار j را بر اساس مقادیر به‌دست‌آمده از مرحله ۳ و مرحله ۴ محاسبه می شود. E_j اثر حذف معیار j را نشان دهد. مقدار E برای هر معیار نشان‌دهنده اهمیت آن در کل ساختار تصمیم‌گیری است. این مرحله معیاری عددی برای سنجش تأثیر هر معیار فراهم می‌سازد. با استفاده از فرمول ۳-۵ می توانیم مقادیر E_j را محاسبه کنیم:

$$E_j = \sum_i |S'_i - S_i| \quad (۵-۳)$$

گام ششم: محاسبه اوزان نهایی (W)

در این مرحله اوزان نهایی معیارها تعیین می‌شود. با استفاده از مقدار Ej، وزن نهایی هر معیار به‌گونه‌ای محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده سهم واقعی آن معیار در تصمیم‌گیری باشد. این روش عینی و مبتنی بر داده است و دخالت ذهنی را حذف می‌کند. در ادامه، w_j مخفف وزن معیار j است .برای محاسبه w از رابطه ۳-۶ استفاده می شود

$$w_j = \frac{E_j}{\Sigma_k E_k} \quad (۶-۳)$$

۳-۲- رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس میزان تأثیرپذیری اتلافات از BIM

به منظور رتبه‌بندی ریسک‌ها از روش [19]کوکوسو که از تکنیک‌های جدید تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌باشد که توسط یزدانی و همکاران (۲۰۱۸)[۴۵] ارائه شد استفاده گردید. در این روش یک راه حل ترکیبی سازشی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها ارائه می‌شود. گام‌های این روش در ادامه آورده شده است.

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم

در این گام با استفاده از n معیار به ارزیابی m گزینه پرداخته می‌شود؛ بنابراین به هر گزینه بر اساس هر معیار امتیازی داده می‌شود. این امتیازات می‌تواند بر اساس مقادیر کمی و واقعی باشد یا اینکه کیفی و نظری باشد. درهرصورت باید یک ماتریس تصمیم m*n در تشکیل شود

گام دوم: نرمال‌سازی ماتریس تصمیم

[19] combined compromise solution

در این گام بر اساس رابطه ۳-۷ به نرمال‌سازی ماتریس تصمیم پرداخته می‌شود.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - minx_{ij}}{maxx_{ij} - minx_{ij}} \quad (۳-۷)$$

گام سوم: محاسبه ضرب وزنی (S) و توان وزنی (P)

در این گام به محاسبه ضرب وزنی (S) و توان وزنی (P) پرداخته می‌شود در واقع مقدار S برابر با جمع مقادیر ضرب وزن معیارها در ماتریس نرمال برای هر گزینه است و مقدار P برابر با جمع مقادیر ماتریس نرمال به توان وزن معیارها است. ترکیب دو دیدگاه ضرب وزنی و توان وزنی، ارزیابی کامل‌تری از عملکرد گزینه‌ها ارائه می‌دهد و از محدودیت‌های هر روش‌های می‌کاهد.

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} (W_j r_{ij}) \quad (۳-۸)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} (r_{ij})^{W_j} \quad (۳-۹)$$

گام چهارم: ارزیابی گزینه‌ها بر اساس سه استراتژی

در این گام بر اساس روابط ۳-۱۰، ۳-۱۱ و ۳-۱۲ ارزیابی گزینه‌ها بر اساس سه استراتژی صورت می‌گیرد. رابطه ۳-۱۰ در واقع میانگین حسابی مقادیر P و S را بیان می کند. در رابطه ۳-۱۱جمع بهترین گزینه‌ها در مقادیر S و P صورت می‌گیرد. رابطه ۳-۱۲ در واقع مصالحه‌ای بین S و P می‌باشد در این رابطه λ توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود اما در حالت ۰/۵ انعطاف پذیری زیادی دارد. این تنوع در استراتژی‌های ارزیابی، دقت و پایداری تصمیم‌گیری را افزایش می‌دهد و امکان تحلیل از زوایای مختلف را فراهم می‌کند.

$$K_{ia} = \frac{P_i + S_i}{\sum_{i=1}^{m} (P_i + S_i)} \quad (۳-۱۰)$$

$$K_{ib} = \frac{S_i}{minS_i} + \frac{P_i}{minP_i} \quad (۳-۱۱)$$

$$K_{ic} = \frac{\lambda S_i + (1-\lambda) P_i}{\lambda maxS_i + (1-\lambda) maxP_i} \quad (۳-۱۲)$$

گام پنجم: تعیین امتیاز نهایی گزینه‌ها

برای ارائه یک رتبه‌بندی نهایی و یکنواخت، مقادیر سه معیار ارزیابی (Kia، Kib و Kic) به‌صورت ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این گام بر اساس رابطه ۳-۱۳ امتیاز نهایی هر گزینه محاسبه و بر اساس آن رتبه‌بندی گزینه‌ها صورت می‌گیرد. ترکیب میانگین هندسی و میانگین حسابی در محاسبه نهایی امتیاز باعث می‌شود نتایج متوازن‌تر، پایدارتر و قابل‌اعتمادتر باشند. این مرحله نتیجه نهایی تحلیل COCOSO را به‌دست می‌دهد.

$$k_i = (k_{ia} k_{ib} k_{ic})^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3}(k_{ia} + k_{ib} + k_{ic}) \quad (۳-۱۳)$$

۴- نتایج

۴-۱- رتبه‌بندی قابلیت‌های BIM بر اساس میزان توانایی در حذف ریسک‌های منشأ اتلافات

در این بخش با استفاده از روش MEREC وزن‌دهی به ۶ قابلیت فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت که از فصل۲ شناسایی شده‌اند، صورت می‌گیرد. این ۶ قابلیت بشرح زیر نامگذاری شده اند.

۱. طراحی یکپارچه دیسیپلین‌ها، تهیه جزئیات دقیق اجرایی، برآورد دقیق احجام (C1)
۲. کنترل بصری نیازها و پایش دستورات تغییر مدنظر کارفرما، به‌روزرسانی خودکار تغییرات در مدل‌ها و نقشه‌ها (C2)
۳. جانمایی بهینه سایت (C3)
٤. امکان اختصاص مشخصات غیرهندسی (کیفی) به المان‌ها، تحلیل سیستم‌های مکانیکال و الکتریکال جهت تعیین ظرفیت‌های موردنیاز (C4)
٥. برآورد دقیق زمان ساخت، تحلیل بصری برنامه زمان‌بندی (C5)
٦. برآورد دقیق هزینه ساخت، تحلیل هزینه‌های مختلف در طول عمر پروژه (C6)

ماتریس تصمیم بر اساس ۲۶ ریسک و ۶ قابلیت اصلی فناوری BIM توسط ۳۲ خبره بر اساس طیف ۱ تا ۵ که تکمیل سپس با روش میانگین حسابی ادغام می‌شود که در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶: ماتریس تصمیم MEREC

ردیف	اتلافات	C1	C2	C3	C4	C5	C6
۱	نداشتن تجربه و تخصص نیروی انسانی	۳/۳۴۵	۲/۷۲۴	۲/۳۱۰	۲/۴۴۸	۳/۱۷۲	۳/۵۱۷
۲	خطا و نواقص اجرایی	۴/۳۷۹	۳/۰۰۰	۲/۵۵۲	۳/۵۸۶	۳/۴۴۸	۱/۶۵۵
۳	سیاست‌های غلط ارجاع کار به پیمانکاران	۱/۴۴۸	۲/۲۴۱	۱/۴۱۴	۲/۰۶۹	۱/۴۴۸	۲/۵۵۲
۴	شکست در حفاظت از کار تکمیل شده و لزوم دوباره‌کاری	۲/۱۷۲	۲/۸۶۲	۱/۶۵۵	۲/۰۳۴	۲/۴۸۳	۲/۰۰۰
۵	فقدان رویه تصمیم‌گیری در نظام مدیریت پروژه	۲/۵۸۶	۲/۶۵۵	۱/۲۰۷	۱/۷۲۴	۲/۸۲۸	۲/۳۷۹
۶	عدم انطباق تحویل شدنی‌ها با مشخصات موردنیاز	۴/۳۱۰	۳/۸۹۷	۱/۷۲۴	۳/۷۹۳	۳/۰۳۴	۱/۹۶۶
۷	روش‌های ناکارآمد تأمین مواد و مصالح و تجهیزات	۳/۵۵۲	۲/۵۵۲	۲/۴۴۸	۳/۱۳۸	۱/۷۹۳	۲/۵۸۶
۸	جانمایی غلط سایت	۲/۸۲۸	۲/۰۶۹	۴/۹۶۶	۱/۷۲۴	۲/۱۳۸	۱/۸۹۷
۹	فقدان (ناکارآمدی) نظام مدیریت تضمین کیفیت	۳/۱۷۲	۳/۲۰۷	۲/۰۶۹	۳/۱۷۲	۲/۳۱۰	۱/۸۲۸
۱۰	عدم هماهنگی گروه‌ها	۲/۵۵۲	۲/۶۹۰	۲/۱۰۳	۱/۸۶۲	۳/۴۴۸	۱/۲۷۶
۱۱	عدم انطباق برنامه با ظرفیت‌های کاری گروه‌های کاری مرتبط	۲/۸۲۸	۲/۷۲۴	۱/۴۴۸	۱/۸۹۷	۳/۷۵۹	۱/۹۳۱
۱۲	اختلاف بین گروه اجرایی بر سر روش اجرائی	۳/۶۵۵	۲/۵۵۲	۱/۶۵۵	۲/۸۲۸	۳/۳۱۰	۱/۹۳۱
۱۳	تغییر در ثبات رویه‌های ارکان پروژه ناشی از تغییرات مدیریتی	۲/۰۳۴	۱/۹۶۶	۱/۰۶۹	۲/۳۱۰	۱/۷۵۹	۲/۲۴۱
۱۴	عدم تعریف (شفافیت) رویه‌های کاری	۲/۸۹۷	۲/۷۲۴	۱/۳۷۹	۲/۱۰۳	۳/۵۸۶	۲/۰۰۰
۱۵	عدم برنامه‌ریزی دقیق و تداخل لجستیک گروه‌های کاری	۳/۱۳۸	۳/۲۴۱	۲/۳۷۹	۳/۲۷۶	۴/۲۷۶	۱/۶۵۵

ردیف	اتلافات	C1	C2	C3	C4	C5	C6
۱۶	خطا در برآوردها	۴/۶۲۱	۳/۱۰۳	۱/۷۵۹	۳/۱۰۳	۲/۷۲۴	۲/۸۶۲
۱۷	عدم تحویل به‌موقع مصالح و تجهیزات	۳/۲۷۶	۳/۰۶۹	۲/۵۱۷	۳/۲۴۱	۳/۴۸۳	۳/۲۰۷
۱۸	حوادث ایمنی	۱/۵۵۲	۲/۰۶۹	۳/۰۶۹	۱/۷۲۴	۲/۲۰۷	۱/۹۳۱
۱۹	توقف کار ناشی از خرابی تجهیزات	۱/۶۵۵	۱/۴۸۳	۱/۴۱۴	۱/۹۶۶	۱/۹۶۶	۱/۴۸۳
۲۰	انتظار برای تأمین نیروی انسانی و مصالح و ماشین‌آلات موردنیاز	۲/۲۰۷	۲/۹۶۶	۲/۹۳۱	۲/۸۲۸	۲/۸۹۷	۱/۸۹۷
۲۱	سرقت یا خرابکاری	۱/۳۴۵	۱/۷۲۴	۲/۷۹۳	۱/۵۵۲	۱/۷۵۹	۱/۴۸۳
۲۲	تطویل زمان تهیه نقشه‌های اجرایی	۴/۲۰۷	۳/۳۱۰	۱/۴۸۳	۳/۵۵۲	۲/۴۴۸	۱/۲۷۶
۲۳	ساخت‌پذیر نبودن طراحی	۴/۱۳۸	۳/۵۵۲	۲/۷۵۹	۳/۷۹۳	۲/۹۶۶	۲/۳۴۵
۲۴	خطا در طراحی و نقشه‌ها	۴/۴۴۸	۳/۸۶۲	۲/۰۰۰	۳/۸۶۲	۲/۱۷۲	۱/۴۱۴
۲۵	تعارض منافع ارکان پروژه	۱/۶۵۵	۲/۸۹۷	۱/۳۱۰	۱/۵۱۷	۱/۸۹۷	۱/۹۶۶
۲۶	ضعف دستگاه نظارت (تعداد و کیفیت نفرات)	۳/۰۰۰	۲/۸۲۸	۱/۴۸۳	۲/۶۲۱	۱/۷۵۹	۱/۶۲۱

در این بخش نرمال‌سازی هر ۶ معیار ماهیت مثبت دارند. ماتریس نرمال در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷ : ماتریس نرمال MEREC

ردیف	اتلافات	C1	C2	C3	C4	C5	C6
۱	نداشتن تجربه و تخصص نیروی انسانی	۰/۴۰۲	۰/۵۴۴	۰/۴۶۳	۰/۶۲۰	۰/۴۵۷	۰/۳۶۳
۲	خطا و نواقص اجرایی	۰/۳۰۷	۰/۴۹۴	۰/۴۱۹	۰/۴۲۳	۰/۴۲۰	۰/۷۷۱
۳	سیاست‌های غلط ارجاع کار به پیمانکاران	۰/۹۲۹	۰/۶۶۲	۰/۷۵۶	۰/۷۳۳	۱/۰۰۰	۰/۵۰۰
۴	شکست در حفاظت از کار تکمیل شده و لزوم دوباره‌کاری	۰/۶۱۹	۰/۵۱۸	۰/۶۴۶	۰/۷۴۶	۰/۵۸۳	۰/۶۳۸
۵	فقدان رویه تصمیم‌گیری در نظام مدیریت پروژه	۰/۵۲۰	۰/۵۵۸	۰/۸۸۶	۰/۸۸۰	۰/۵۱۲	۰/۵۳۶
۶	عدم انطباق تحویل شدنی‌ها با مشخصات موردنیاز	۰/۳۱۲	۰/۳۸۱	۰/۶۲۰	۰/۴۰۰	۰/۴۷۷	۰/۶۴۹
۷	روش‌های ناکارآمد تأمین مواد و مصالح و تجهیزات	۰/۳۷۹	۰/۵۸۱	۰/۴۳۷	۰/۴۸۴	۰/۸۰۸	۰/۴۹۳
۸	جانمایی غلط سایت	۰/۴۷۶	۰/۷۱۷	۰/۲۱۵	۰/۸۸۰	۰/۶۷۷	۰/۶۷۳
۹	فقدان (ناکارآمدی) نظام مدیریت تضمین کیفیت	۰/۴۲۴	۰/۴۶۲	۰/۵۱۷	۰/۴۷۸	۰/۶۲۷	۰/۶۹۸
۱۰	عدم هماهنگی گروه‌ها	۰/۵۲۷	۰/۵۵۱	۰/۵۰۸	۰/۸۱۵	۰/۴۲۰	۱/۰۰۰

ردیف	اتلافات	C1	C2	C3	C4	C5	C6
۱۱	عدم انطباق برنامه با ظرفیت‌های کاری گروه‌های کاری مرتبط	۰/۴۷۶	۰/۵۴۴	۰/۷۳۸	۰/۸۰۰	۰/۳۸۵	۰/۶۶۱
۱۲	اختلاف بین گروه اجرایی بر سر روش اجرائی	۰/۳۶۸	۰/۵۸۱	۰/۶۴۶	۰/۵۳۷	۰/۴۳۸	۰/۶۶۱
۱۳	تغییر در ثبات رویه‌های ارکان پروژه ناشی از تغییرات مدیریتی	۰/۶۶۱	۰/۷۵۴	۱/۰۰۰	۰/۶۵۷	۰/۸۲۴	۰/۵۶۹
۱۴	عدم تعریف (شفافیت) رویه‌های کاری	۰/۴۶۴	۰/۵۴۴	۰/۷۷۵	۰/۷۲۱	۰/۴۰۴	۰/۶۳۸
۱۵	عدم برنامه‌ریزی دقیق و تداخل لجستیک گروه‌های کاری	۰/۴۲۹	۰/۴۵۷	۰/۴۴۹	۰/۴۶۳	۰/۳۳۹	۰/۷۷۱
۱۶	خطا در برآوردها	۰/۲۹۱	۰/۴۷۸	۰/۶۰۸	۰/۴۸۹	۰/۵۳۲	۰/۴۴۶
۱۷	عدم تحویل به موقع مصالح و تجهیزات	۰/۴۱۱	۰/۴۸۳	۰/۴۲۵	۰/۴۶۸	۰/۴۱۶	۰/۳۹۸
۱۸	حوادث ایمنی	۰/۸۶۷	۰/۷۱۷	۰/۳۴۸	۰/۸۸۰	۰/۶۵۶	۰/۶۶۱
۱۹	توقف کار ناشی از خرابی تجهیزات	۰/۸۱۳	۱/۰۰۰	۰/۷۵۶	۰/۷۷۲	۰/۷۳۷	۰/۸۶۰
۲۰	انتظار برای تأمین نیروی انسانی و مصالح و ماشین‌آلات موردنیاز	۰/۶۰۹	۰/۵۰۰	۰/۳۶۵	۰/۵۳۷	۰/۵۰۰	۰/۶۷۳
۲۱	سرقت یا خرابکاری	۱/۰۰۰	۰/۸۶۰	۰/۳۸۳	۰/۹۷۸	۰/۸۲۴	۰/۸۶۰
۲۲	تطویل زمان تهیه نقشه‌های اجرایی	۰/۳۲۰	۰/۴۴۸	۰/۷۲۱	۰/۴۲۷	۰/۵۹۲	۱/۰۰۰
۲۳	ساخت‌پذیر نبودن طراحی	۰/۳۲۵	۰/۴۱۷	۰/۳۸۸	۰/۴۰۰	۰/۴۸۸	۰/۵۴۴
۲۴	خطا در طراحی و نقشه‌ها	۰/۳۰۲	۰/۳۸۴	۰/۵۳۴	۰/۳۹۳	۰/۶۶۷	۰/۹۰۲
۲۵	تعارض منافع ارکان پروژه	۰/۸۱۳	۰/۵۱۲	۰/۸۱۶	۱/۰۰۰	۰/۷۶۴	۰/۶۴۹
۲۶	ضعف دستگاه نظارت (تعداد و کیفیت نفرات)	۰/۴۴۸	۰/۵۲۴	۰/۷۲۱	۰/۵۷۹	۰/۸۲۴	۰/۷۸۷

سپس عملکرد کلی گزینه‌ها (Si) محاسبه می‌شود. نتیجه نهایی در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸ : عملکرد کلی گزینه‌ها

ردیف	اتلافات	S
۱	نداشتن تجربه و تخصص نیروی انسانی	۰/۴۵۲
۲	خطا و نواقص اجرایی	۰/۴۶۶
۳	سیاست‌های غلط ارجاع کار به پیمانکاران	۰/۲۰۰
۴	شکست در حفاظت از کار تکمیل شده و لزوم دوباره‌کاری	۰/۳۰۵
۵	فقدان رویه تصمیم‌گیری در نظام مدیریت پروژه	۰/۲۹۸

ردیف	اتلافات	S
۶	عدم انطباق تحویل شدنی‌ها با مشخصات موردنیاز	۰/۴۶۲
۷	روش‌های ناکارآمد تأمین مواد و مصالح و تجهیزات	۰/۴۰۵
۸	جانمایی غلط سایت	۰/۳۶۵
۹	فقدان (ناکارآمدی) نظام مدیریت تضمین کیفیت	۰/۳۹۳
۱۰	عدم هماهنگی گروه‌ها	۰/۳۱۷
۱۱	عدم انطباق برنامه با ظرفیت‌های کاری گروه‌های کاری مرتبط	۰/۳۴۱
۱۲	اختلاف بین گروه اجرایی بر سر روش اجرائی	۰/۳۹۲
۱۳	تغییر در ثبات رویه‌های ارکان پروژه ناشی از تغییرات مدیریتی	۰/۲۱۰
۱۴	عدم تعریف (شفافیت) رویه‌های کاری	۰/۳۴۷
۱۵	عدم برنامه‌ریزی دقیق و تداخل لجستیک گروه‌های کاری	۰/۴۵۰
۱۶	خطا در برآوردها	۰/۴۵۶
۱۷	عدم تحویل به‌موقع مصالح و تجهیزات	۰/۴۸۸
۱۸	حوادث ایمنی	۰/۲۷۱
۱۹	توقف کار ناشی از خرابی تجهیزات	۰/۱۴۰
۲۰	انتظار برای تأمین نیروی انسانی و مصالح و ماشین‌آلات موردنیاز	۰/۳۹۸
۲۱	سرقت یا خرابکاری	۰/۱۷۰
۲۲	تطویل زمان تهیه نقشه‌های اجرایی	۰/۳۷۶
۲۳	ساخت‌پذیر نبودن طراحی	۰/۵۰۰
۲۴	خطا در طراحی و نقشه‌ها	۰/۴۲۴
۲۵	تعارض منافع ارکان پروژه	۰/۲۰۱
۲۶	ضعف دستگاه نظارت (تعداد و کیفیت نفرات)	۰/۲۹۶

سپس عملکرد گزینه‌ها با حذف اثرات معیارها (S'_j) محاسبه می‌شود که در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹ : عملکرد گزینه‌ها با حذف اثرات معیارها (S'_{ij})

ردیف	اتلافات	C1	C2	C3	C4	C5	C6

ردیف	اتلافات	C1	C2	C3	C4	C5	C6
۱	نداشتن تجربه و تخصص نیروی انسانی	۰/۳۷۶	۰/۴۰۲	۰/۳۸۸	۰/۴۱۳	۰/۳۸۷	۰/۳۶۷
۲	خطا و نواقص اجرایی	۰/۳۶۸	۰/۴۰۹	۰/۳۹۵	۰/۳۹۶	۰/۳۹۵	۰/۴۴۵
۳	سیاست‌های غلط ارجاع کار به پیمانکاران	۰/۱۹۲	۰/۱۵۷	۰/۱۷۱	۰/۱۶۸	۰/۲۰۰	۰/۱۲۶
۴	شکست در حفاظت از کار تکمیل شده و لزوم دوباره‌کاری	۰/۲۶۰	۰/۲۴۳	۰/۲۶۴	۰/۲۷۸	۰/۲۵۴	۰/۲۶۳
۵	فقدان رویه تصمیم‌گیری در نظام مدیریت پروژه	۰/۲۳۵	۰/۲۴۲	۰/۲۷۸	۰/۲۸۶	۰/۲۳۴	۰/۲۳۹
۶	عدم انطباق تحویل شدنی‌ها با مشخصات موردنیاز	۰/۳۶۶	۰/۳۸۳	۰/۴۲۴	۰/۳۸۷	۰/۴۰۲	۰/۴۲۷
۷	روش‌های ناکارآمد تأمین مواد و مصالح و تجهیزات	۰/۳۲۰	۰/۳۵۸	۰/۳۳۳	۰/۳۴۲	۰/۳۸۷	۰/۳۴۴
۸	جانمایی غلط سایت	۰/۲۹۸	۰/۳۳۶	۰/۲۲۲	۰/۳۵۴	۰/۳۳۱	۰/۳۳۰
۹	فقدان (ناکارآمدی) نظام مدیریت تضمین کیفیت	۰/۳۱۸	۰/۳۲۶	۰/۳۳۶	۰/۳۲۹	۰/۳۵۳	۰/۳۶۲
۱۰	عدم هماهنگی گروه‌ها	۰/۲۵۷	۰/۲۶۱	۰/۲۵۴	۰/۲۹۸	۰/۲۳۵	۰/۳۱۷
۱۱	عدم انطباق برنامه با ظرفیت‌های کاری گروه‌های کاری مرتبط	۰/۲۷۲	۰/۲۸۵	۰/۳۱۳	۰/۳۲۱	۰/۲۵۲	۰/۳۰۳
۱۲	اختلاف بین گروه اجرایی بر سر روش اجرائی	۰/۳۰۴	۰/۳۴۵	۰/۳۵۵	۰/۳۳۸	۰/۳۲۰	۰/۳۵۷
۱۳	تغییر در ثبات رویه‌های ارکان پروژه ناشی از تغییرات مدیریتی	۰/۱۶۸	۰/۱۸۱	۰/۲۱۰	۰/۱۶۷	۰/۱۹۱	۰/۱۵۲
۱۴	عدم تعریف (شفافیت) رویه‌های کاری	۰/۲۷۶	۰/۲۹۱	۰/۳۲۴	۰/۳۱۷	۰/۲۶۳	۰/۳۰۶
۱۵	عدم برنامه‌ریزی دقیق و تداخل لجستیک گروه‌های کاری	۰/۳۸۰	۰/۳۸۵	۰/۳۸۴	۰/۳۸۶	۰/۳۵۹	۰/۴۲۹
۱۶	خطا در برآوردها	۰/۳۵۳	۰/۳۹۶	۰/۴۱۶	۰/۳۹۸	۰/۴۰۵	۰/۳۹۰
۱۷	عدم تحویل به‌موقع مصالح و تجهیزات	۰/۴۱۷	۰/۴۳۱	۰/۴۲۰	۰/۴۲۸	۰/۴۱۸	۰/۴۱۵
۱۸	حوادث ایمنی	۰/۲۵۸	۰/۲۳۹	۰/۱۶۵	۰/۲۵۹	۰/۲۳۰	۰/۲۳۱
۱۹	توقف کار ناشی از خرابی تجهیزات	۰/۱۱۷	۰/۱۴۰	۰/۱۰۹	۰/۱۱۱	۰/۱۰۶	۰/۱۲۳
۲۰	انتظار برای تأمین نیروی انسانی و مصالح و ماشین‌آلات موردنیاز	۰/۳۵۵	۰/۳۳۸	۰/۳۰۹	۰/۳۴۴	۰/۳۳۸	۰/۳۶۴
۲۱	سرقت یا خرابکاری	۰/۱۷۰	۰/۱۵۴	۰/۰۶۳	۰/۱۶۷	۰/۱۴۹	۰/۱۵۴
۲۲	تطویل زمان تهیه نقشه‌های اجرایی	۰/۲۷۲	۰/۳۰۴	۰/۳۴۷	۰/۳۰۰	۰/۳۲۹	۰/۳۷۶
۲۳	ساخت‌پذیر نبودن طراحی	۰/۴۱۱	۰/۴۳۱	۰/۴۲۵	۰/۴۲۸	۰/۴۴۴	۰/۴۵۳
۲۴	خطا در طراحی و نقشه‌ها	۰/۳۲۱	۰/۳۴۲	۰/۳۷۱	۰/۳۴۴	۰/۳۹۰	۰/۴۱۵
۲۵	تعارض منافع ارکان پروژه	۰/۱۸۰	۰/۱۳۰	۰/۱۸۰	۰/۲۰۱	۰/۱۷۳	۰/۱۵۶

ردیف	اتلافات	C1	C2	C3	C4	C5	C6
۲۶	ضعف دستگاه نظارت (تعداد و کیفیت نفرات)	۰/۲۱۸	۰/۲۳۴	۰/۲۶۵	۰/۲۴۴	۰/۲۷۸	۰/۲۷۳

سپس مجموع انحرافات مطلق (E) هر معیار محاسبه و اوزان نهایی در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰ : مجموع انحرافات مطلق (E) و وزن قابلیت‌های BIM

شاخص	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Ej	۱/۶۵۷	۱/۳۷۷	۱/۳۹۱	۱/۱۱۷	۱/۲۹۸	۱/۰۰۴
Wj	۰/۲۱۱	۰/۱۷۶	۰/۱۷۷	۰/۱۴۲	۰/۱۶۵	۰/۱۲۸

بر اساس نتایج بدست آمده مدل سه‌بعدی تا حد بسیاری ریسک‌های منشأ وقوع اتلافات موردبحث را حذف کرده و کاهش می‌دهد. این امر نشان می‌دهد به‌منظور استفاده از مزایای فناوری BIM در حذف اتلافات در وهله اول نیازی به استفاده از مدل‌های چهاربعدی و پنج‌بعدی که پیش‌نیازهای پیاده‌سازی و هزینه بیشتری دارند نمی‌باشد. همچنین مدل پنج‌بعدی (هزینه‌محور) کمترین تأثیر را بر حذف ریسک‌های اساسی شناسایی شده دارد. به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر اثربخشی فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت در حذف اتلافات نیاز است تا به کمک روش کوکوسو اقدام به رتبه‌بندی اتلافات موردنظر بر اساس امکان کاهش یا حذف به کمک فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت نماییم.

۲-۴- رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس میزان تأثیرپذیری اتلافات از BIM

در این بخش با استفاده از روش کوکوسو به رتبه‌بندی ۲۶ ریسک اساسی بر اساس میزان توانایی فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت در حذف یا کاهش آن‌ها پرداخته می‌شود. ماتریس تصمیم این روش همان ماتریس تصمیم روش MEREC است که در جدول ۶ ارائه شد. سپس مقادیر ضرب وزنی (S) و توان وزنی (P) محاسبه می‌شود که نتایج در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۱ : ماتریس نرمال کوکوسو

ردیف	اتلافات	C1	C2	C3	C4	C5	C6	S	P
۱	نداشتن تجربه و تخصص نیروی انسانی	۰/۶۱۱	۰/۵۱۴	۰/۳۱۹	۰/۳۹۷	۰/۶۱۰	۱/۰۰۰	۰/۵۶۱	۵/۴۰۵
۲	خطا و نواقص اجرایی	۰/۹۲۶	۰/۶۲۹	۰/۳۸۱	۰/۸۸۲	۰/۷۰۷	۰/۱۶۹	۰/۶۳۸	۵/۴۷۱
۳	سیاست‌های غلط ارجاع کار به پیمانکاران	۰/۰۳۲	۰/۳۱۴	۰/۰۸۸	۰/۲۳۵	۰/۰۰۰	۰/۵۶۹	۰/۱۸۴	۳/۶۹۳
۴	شکست در حفاظت از کار تکمیل شده و لزوم دوباره‌کاری	۰/۲۵۳	۰/۵۷۱	۰/۱۵۰	۰/۲۲۱	۰/۳۶۶	۰/۳۲۳	۰/۳۱۴	۴/۸۸۷
۵	فقدان رویه تصمیم‌گیری در نظام مدیریت پروژه	۰/۳۷۹	۰/۴۸۶	۰/۰۳۵	۰/۰۸۸	۰/۴۸۸	۰/۴۹۲	۰/۳۲۸	۴/۷۵۸
۶	عدم انطباق تحویل شدنی‌ها با مشخصات موردنیاز	۰/۹۰۵	۱/۰۰۰	۰/۱۶۸	۰/۹۷۱	۰/۵۶۱	۰/۳۰۸	۰/۶۶۷	۵/۴۷۳
۷	روش‌های ناکارآمد تأمین مواد و مصالح و تجهیزات	۰/۶۷۴	۰/۴۴۳	۰/۳۵۴	۰/۶۹۱	۰/۱۲۲	۰/۵۸۵	۰/۴۷۶	۵/۲۰۷
۸	جانمایی غلط سایت	۰/۴۵۳	۰/۲۴۳	۱/۰۰۰	۰/۰۸۸	۰/۲۴۴	۰/۲۷۷	۰/۴۰۴	۴/۹۷۴

ردیف	اتلافات	C1	C2	C3	C4	C5	C6	S	P
۹	فقدان (ناکارآمدی) نظام مدیریت تضمین کیفیت	۰/۵۵۸	۰/۷۱۴	۰/۲۵۷	۰/۷۰۶	۰/۳۰۵	۰/۲۴۶	۰/۴۷۱	۵/۲۲۱
۱۰	عدم هماهنگی گروه‌ها	۰/۳۶۸	۰/۵۰۰	۰/۲۶۵	۰/۱۴۷	۰/۷۰۷	۰/۰۰۰	۰/۳۵۱	۴/۱۹۱
۱۱	عدم انطباق برنامه با ظرفیت‌های کاری گروه‌های کاری مرتبط	۰/۴۵۳	۰/۵۱۴	۰/۰۹۷	۰/۱۶۲	۰/۸۱۷	۰/۲۹۲	۰/۳۹۹	۴/۹۹۰
۱۲	اختلاف بین گروه اجرایی بر سر روش اجرائی	۰/۷۰۵	۰/۴۴۳	۰/۱۵۰	۰/۵۵۹	۰/۶۵۹	۰/۲۹۲	۰/۴۷۹	۵/۲۱۸
۱۳	تغییر در ثبات رویه‌های ارکان پروژه ناشی از تغییرات مدیریتی	۰/۲۱۱	۰/۲۰۰	۰/۰۰۰	۰/۳۳۸	۰/۱۱۰	۰/۴۳۱	۰/۲۰۱	۳/۹۲۲
۱۴	عدم تعریف (شفافیت) رویه‌های کاری	۰/۴۷۴	۰/۵۱۴	۰/۰۸۰	۰/۲۵۰	۰/۷۵۶	۰/۳۲۳	۰/۴۰۷	۵/۰۲۳
۱۵	عدم برنامه‌ریزی دقیق و تداخل لجستیک گروه‌های کاری	۰/۵۴۷	۰/۷۲۹	۰/۳۳۶	۰/۷۵۰	۱/۰۰۰	۰/۱۶۹	۰/۵۹۷	۵/۴۰۷
۱۶	خطا در برآوردها	۱/۰۰۰	۰/۶۷۱	۰/۱۷۷	۰/۶۷۶	۰/۴۵۱	۰/۷۰۸	۰/۶۲۲	۵/۴۴۷
۱۷	عدم تحویل به‌موقع مصالح و تجهیزات	۰/۵۸۹	۰/۶۵۷	۰/۳۷۲	۰/۷۳۵	۰/۷۲۰	۰/۸۶۲	۰/۶۴۰	۵/۵۴۸
۱۸	حوادث ایمنی	۰/۰۶۳	۰/۲۴۳	۰/۵۱۳	۰/۰۸۸	۰/۲۶۸	۰/۲۹۲	۰/۲۴۱	۴/۵۹۳
۱۹	توقف کار ناشی از خرابی تجهیزات	۰/۰۹۵	۰/۰۰۰	۰/۰۸۸	۰/۱۹۱	۰/۱۸۳	۰/۰۹۲	۰/۱۰۵	۳/۵۴۱
۲۰	انتظار برای تأمین نیروی انسانی و مصالح و ماشین‌آلات موردنیاز	۰/۲۶۳	۰/۶۱۴	۰/۴۷۸	۰/۵۵۹	۰/۵۱۲	۰/۲۷۷	۰/۴۴۸	۵/۲۱۴
۲۱	سرقت یا خرابکاری	۰/۰۰۰	۰/۱۰۰	۰/۴۴۲	۰/۰۱۵	۰/۱۱۰	۰/۰۹۲	۰/۱۲۸	۳/۵۱۲
۲۲	تطویل زمان تهیه نقشه‌های اجرایی	۰/۸۷۴	۰/۷۵۷	۰/۱۰۶	۰/۸۶۸	۰/۳۵۴	۰/۰۰۰	۰/۵۱۸	۴/۴۱۸
۲۳	ساخت‌پذیر نبودن طراحی	۰/۸۵۳	۰/۸۵۷	۰/۴۳۴	۰/۹۷۱	۰/۵۳۷	۰/۴۷۷	۰/۶۹۶	۵/۶۱۰
۲۴	خطا در طراحی و نقشه‌ها	۰/۹۴۷	۰/۹۸۶	۰/۲۳۹	۱/۰۰۰	۰/۲۵۶	۰/۰۶۲	۰/۶۰۸	۵/۲۶۰
۲۵	تعارض منافع ارکان پروژه	۰/۰۹۵	۰/۵۸۶	۰/۰۶۲	۰/۰۰۰	۰/۱۵۹	۰/۳۰۸	۰/۱۹۹	۳/۷۲۶
۲۶	ضعف دستگاه نظارت (تعداد و کیفیت نفرات)	۰/۵۰۵	۰/۵۵۷	۰/۱۰۶	۰/۴۷۱	۰/۱۱۰	۰/۱۵۴	۰/۳۲۸	۴/۸۱۹

در این گام نمره ارزیابی گزینه‌ها بر اساس ۳ استراتژی (k_a, k_b, k_c) مشخص می‌شود و در نهایت امتیاز نهایی هر ریسک محاسبه و بر اساس آن رتبه‌بندی صورت می‌گیرد که نتایج در جدول ۱۲ ارائه شده است.

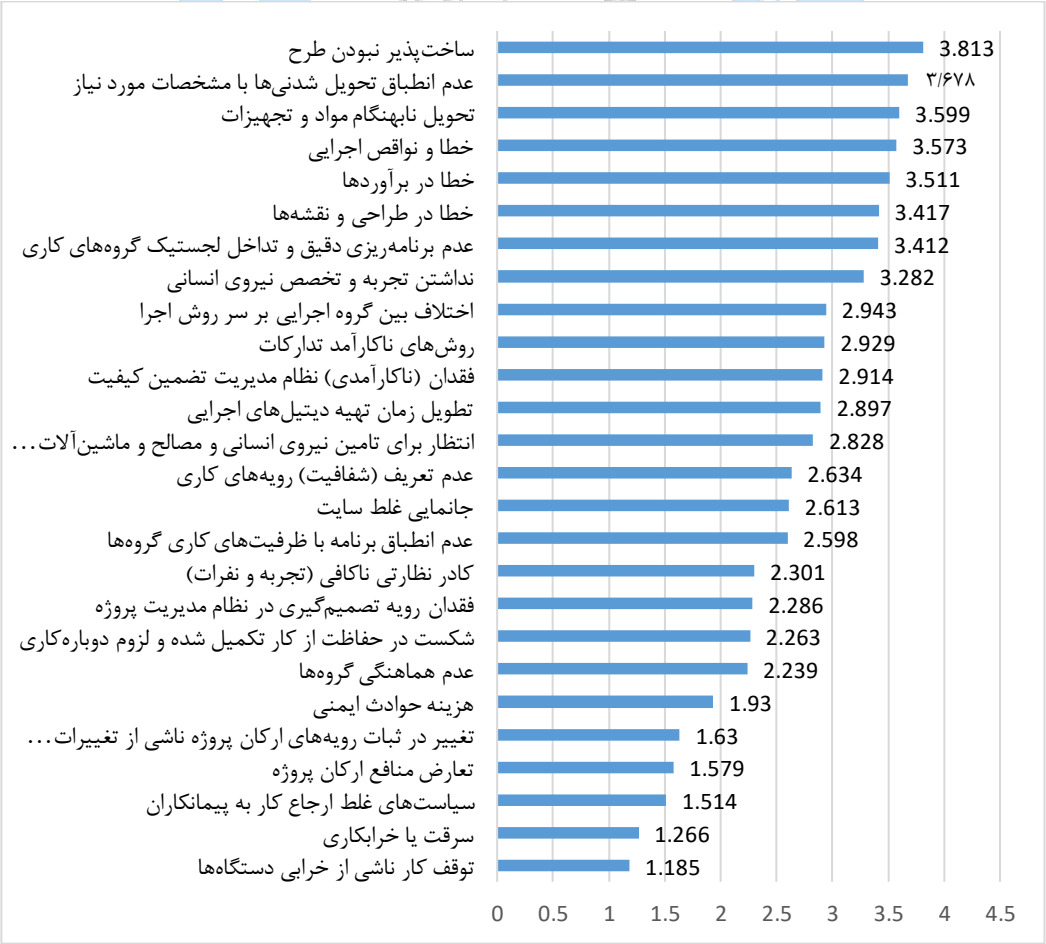
جدول ۱۲: امتیاز و رتبه نهایی ریسک‌ها

ردیف	اتلافات	K_a	K_b	K_c	K	رتبه
۱	نداشتن تجربه و تخصص نیروی انسانی	۰/۰۴۴	۶/۸۸۳	۰/۹۴۶	۳/۲۸۲	۸
۲	خطا و نواقص اجرایی	۰/۰۴۵	۷/۶۳۲	۰/۹۶۹	۳/۵۷۳	۴
۳	سیاست‌های غلط ارجاع کار به پیمانکاران	۰/۰۲۸	۲/۸۰۳	۰/۶۱۵	۱/۵۱۴	۲۴
۴	شکست در حفاظت از کار تکمیل شده و لزوم دوباره‌کاری	۰/۰۳۸	۴/۳۷۹	۰/۸۲۵	۲/۲۶۳	۱۹
۵	فقدان رویه تصمیم‌گیری در نظام مدیریت پروژه	۰/۰۳۷	۴/۴۷۷	۰/۸۰۷	۲/۲۸۶	۱۸
۶	عدم انطباق تحویل شدنی‌ها با مشخصات موردنیاز	۰/۰۴۵	۷/۹۱۰	۰/۹۷۴	۳/۶۷۸	۲
۷	روش‌های ناکارآمد تأمین مواد و مصالح و تجهیزات	۰/۰۴۲	۶/۰۱۸	۰/۹۰۱	۲/۹۲۹	۱۰
۸	جانمایی غلط سایت	۰/۰۳۹	۵/۲۶۳	۰/۸۵۳	۲/۶۱۳	۱۵
۹	فقدان (ناکارآمدی) نظام مدیریت تضمین کیفیت	۰/۰۴۲	۵/۹۷۴	۰/۹۰۳	۲/۹۱۴	۱۱
۱۰	عدم هماهنگی گروه‌ها	۰/۰۳۳	۴/۵۳۳	۰/۷۲۰	۲/۲۳۹	۲۰
۱۱	عدم انطباق برنامه با ظرفیت‌های کاری گروه‌های کاری مرتبط	۰/۰۳۹	۵/۲۱۹	۰/۸۵۵	۲/۵۹۸	۱۶
۱۲	اختلاف بین گروه اجرایی بر سر روش اجرائی	۰/۰۴۲	۶/۰۵۱	۰/۹۰۴	۲/۹۴۳	۹
۱۳	تغییر در ثبات رویه‌های ارکان پروژه ناشی از تغییرات مدیریتی	۰/۰۳۰	۳/۰۳۱	۰/۶۵۴	۱/۶۳۰	۲۲
۱۴	عدم تعریف (شفافیت) رویه‌های کاری	۰/۰۴۰	۵/۳۰۲	۰/۸۶۱	۲/۶۳۴	۱۴
۱۵	عدم برنامه‌ریزی دقیق و تداخل لجستیک گروه‌های کاری	۰/۰۴۴	۷/۲۲۵	۰/۹۵۲	۳/۴۱۲	۷
۱۶	خطا در برآوردها	۰/۰۴۴	۷/۴۷۵	۰/۹۶۳	۳/۵۱۱	۵
۱۷	عدم تحویل به‌موقع مصالح و تجهیزات	۰/۰۴۵	۷/۶۷۳	۰/۹۸۱	۳/۵۹۹	۳
۱۸	حوادث ایمنی	۰/۰۳۵	۳/۶۰۶	۰/۷۶۷	۱/۹۳۰	۲۱
۱۹	توقف کار ناشی از خرابی تجهیزات	۰/۰۲۷	۲/۰۰۸	۰/۵۷۸	۱/۱۸۵	۲۶
۲۰	انتظار برای تأمین نیروی انسانی و مصالح و ماشین‌آلات موردنیاز	۰/۰۴۱	۵/۷۵۰	۰/۸۹۸	۲/۸۲۸	۱۳
۲۱	سرقت یا خرابکاری	۰/۰۲۷	۲/۲۲۰	۰/۵۷۷	۱/۲۶۶	۲۵
۲۲	تطویل زمان تهیه نقشه‌های اجرایی	۰/۰۳۶	۶/۱۹۴	۰/۷۸۳	۲/۸۹۷	۱۲
۲۳	ساخت‌پذیر نبودن طراحی	۰/۰۴۶	۸/۲۲۱	۱/۰۰۰	۳/۸۱۳	۱

ردیف	اتلافات	K_a	K_b	K_c	K	رتبه
۲۴	خطا در طراحی و نقشه‌ها	۰/۰۴۳	۷/۲۸۹	۰/۹۳۱	۳/۴۱۷	۶
۲۵	تعارض منافع ارکان پروژه	۰/۰۲۹	۲/۹۶۰	۰/۶۲۳	۱/۵۷۹	۲۳
۲۶	ضعف دستگاه نظارت (تعداد و کیفیت نفرات)	۰/۰۳۸	۴/۴۹۸	۰/۸۱۶	۲/۳۰۱	۱۷

با توجه به رتبه‌بندی انجام شده بر اساس وزن قابلیت‌های فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت ترتیب میزان اثربخشی این فناوری در حذف یا به حداقل رساندن ریسک‌های منشأ وقوع اتلافات به شرح شکل ۲ می‌باشند. مطابق نتایج بدست آمده ریسک‌هایی مانند سرقت، خرابکاری یا خرابی ماشین‌آلات کمترین میزان تأثیر را از این فناوری می‌پذیرند و همچنین مواردی همچون ساخت‌پذیری طرح‌ها، مشخصات موردنیاز تجهیزات و المان‌ها و تأمین مصالح موردنیاز با توجه به برآورد دقیق احجام بیشترین میزان کاهش یا حذف را به سبب بکارگیری این فناوری دارند. به‌طورکلی فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت بیشترین تأثیر را در جلوگیری از وقوع ریسک‌هایی که منشایی از عدم قطعیت، صحت و دقت در اطلاعات دارد.

مطابق شکل ۲ مشخص می‌گردد اتلافات ساخت‌پذیر نبودن طراحی و خطا و نواقص اجرایی می‌توانند توسط مدل‌سازی اطلاعات ساخت حذف شوند. همان‌طور که انتظار می‌رفت فناوری BIM بیشتر بر روی اتلافاتی با منشأ اطلاعات موثر است. البته به دلیل قابلیت‌های نظیر طراحی پارامتریک دقیق و سه‌بعدی می‌تواند ضعف منابع انسانی ناشی از کمبود تجربه (که کلیدی‌ترین ریسک شناسایی شده است) را پوشش دهد.



شکل ۲ : امتیاز و رتبه نهایی ریسک‌ها بر اساس میزان تأثیر BIM بر آن‌ها

۵- بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش باهدف ارزیابی اثربخشی ساخت و ساز ناب با رویکرد فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت به‌منظور درک نحوه و میزان تعامل میان این دو مفهوم انجام گردید. با توجه به یافته‌های پژوهش و نتایج به دست آمده از تحلیل داده‌های حاصل از نظرکاوی خبرگان با رویکرد مصاحبه ساختاریافته با سی و دو فرد خبره و تحلیل داده‌ها با رویکرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌توان نتیجه گرفت:

۱. قابلیت‌های فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت در کاهش ریسک‌های منشأ وقوع اتلافات نقش بسزایی داشته و با توجه به اینکه در پژوهش‌های مختلف حذف اتلاف به عنوان هدف اصلی ساخت و ساز ناب مطرح می‌گردد، می‌توان نتیجه گرفت استفاده از این فناوری در افزایش اثربخشی ساخت و ساز ناب موثر است.

۲. قابلیت‌های مدل سه‌بعدی BIM نسبت به ابعاد چهارم و پنجم توانایی بالاتری در حذف ریسک‌های منشأ وقوع اتلافات داشته و به همین جهت در الویت بالاتری به منظور پیاده‌سازی در سطح پروژه و سازمان قرار دارند.

۳. عمده اثر قابلیت‌های BIM بر ریسک‌هایی با منشأ نقص یا کمبود اطلاعات است و می‌تواند به خوبی خلاء ابزارهای مورد استفاده در ساخت و ساز ناب را پوشش دهد و کمک شایانی در دستیابی به ساخت و ساز ناب نماید.

به منظور مطالعات آتی در این زمینه پیشنهاد می‌گردد تعامل بین دو مفهوم ساخت و ساز ناب و فناوری مدل‌سازی اطلاعات ساخت در یک پروژه اجرائی مورد بررسی قرار گیرد تا میزان تأثیر این تعامل بر بهینه‌سازی زمان و هزینه پروژه‌ها با توجه به حداقل رساندن اتلافات ساخت و ساز مشخص گردد.

مراجع

1. Bertagnolli, F. (2018), *Lean Management*. Springer Wiesbaden.
2. Maraqa, M. Sacks, R. and Spatari, S. (2021). Quantitative assessment of the impacts of BIM and lean on process and operations flow in construction projects. *Engineering, Construction and Architectural Management.*
3. Kumar, V. and Jain, A. (2022). Efficient Construction by Implementation of Lean Management Principles. *International journal of Scientific Research in Civil Engineering*, 3(2).
4. Ohno, T. (2019). *Toyota production system: beyond large-scale production*. Productivity press.
5. Sacks, R. Korb, S. and Barak, R. (2017). *Building lean, building BIM: improving construction the Tidhar way*. Routledge.
6. Nagapan, S., I.A. Rahman, and A. Asmi. (2011). A review of construction waste cause factors. In: *Asian Conference on Real Estate: Sustainable Growth Managing Challenges (ACRE)*.
7. Adewuyi, T. and Odesola, I. (2015). Factors affecting material waste on construction sites in Nigeria. *Journal of Engineering and Technology (JET)*, **6**(1), p. 82-99.
8. Won, J. and Cheng, C. (2017). Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization. *Automation in Construction*,. 79, p. 3-18.
9. Al-Aomar, R. (2012). Analysis of lean construction practices at Abu Dhabi construction industry. *Lean Construction Journal*, p. 105-121.
10. Moaveni, S. and Shariatmadar, H. (2021). Ranking the Rework Causes in Iran's Construction Projects and Investigating the Effect of Lean Construction Techniques. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53(1), p. 127-148.
11. Abbasian-Hosseini, A., A. Nikakhtar, K. Wong, and A. Zavichi, *Implementing Lean Construction Theory into Construction Processes' Waste Management*. (2012). In: *International Conference on Sustainable Design and Construction (ICSDC)*. 414-420.
12. Oladiran, O.J. (2009). Causes and minimization techniques of materials waste in Nigerian construction process. In: *Fifth International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-V)*.

13. Al-Hajj, A. and Hamani, K. (2011). Material Waste in the UAE Construction Industry: Main Causes and Minimization Practices. *Architectural Engineering and Design Management*, 7, p. 221-235.
14. Abhiram, P., Asadi, S. and Prasad, A. (2016). Implementation of Lean methodology in Indian construction. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7, p. 641-649.
15. Bajjou, M.S., Chafi, A. and En-Nadi, A. (2017). The potential effectiveness of lean construction tools in promoting safety on construction sites. *International Journal of Engineering Research in Africa,* 33: p. 179-193.
16. Lu, W. and Yuan, H. (2010). Exploring critical success factors for waste management in construction projects of China. *Resources, conservation and recycling*, 55(2): p. 201-208.
17. Khaleel, T. and A. Al-Zubaidy, (2018). Major factors contributing to the construction waste generation in building projects of Iraq. In: *The 3rd International Conference on Buildings, Construction and Environmental Engineering.*
18. Senaratne, S. and Wijesiri, D. (2008). Lean Construction as a Strategic Option: Testing its Suitability and Acceptability in Sri Lanka. *Lean Construction Journal*.
19. Menegaki, M. and Damigos, D. (2018) A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. Current opinion in green and sustainable chemistry. 13, p. 8-15.
20. Formoso, C., Soibelman, L. (2002). Material waste in building industry: main causes and prevention. *Journal of construction engineering and management,* 128(4), p. 316-325.
21. Wang, J. and W. Lu, (2010). Critical success factors for on-site sorting of construction waste: a China study. *Resources, conservation and recycling*, 54(11), p. 931-936.
22. Saez, González, A. and Porras-Amores, C. (2013). Best practice measures assessment for construction and demolition waste management in building constructions. Resources, Conservation and Recycling, 75, p. 52-62.
23. Wang, J., Li Z., and Tam, W. (2014) Critical factors in effective construction waste minimization at the design stage: a Shenzhen case study, China. *Resources, Conservation and Recycling*, 82, p. 1-7.
24. Gangolells, M., Casals, M. (2014). Analysis of the implementation of effective waste management practices in construction projects and sites. *Resources, Conservation and Recycling*, 93.
25. Abbasianjahromi, H. , Pournaghi keykele, M. and Ravanshadnia, M. (2022). Using scientific research techniques to investigate future contexts integrating the three concepts of sustainable development, lean construction and building information modelling. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(11), p. 45-60.
26. Issa, U. (2013). Implementation of lean construction techniques for minimizing the risks effect on project construction time. *Alexandria Engineering Journal*. 52, p. 697–704.
27. Ballard, G. and Tommelein, I. (2016). Current process benchmark for the last planner system. *Lean Construction Journal*, 89, p. 57-89.
28. Galiano-Garrigos, A., Montoya, M. (2020). *BIM and Lean construction interactions: A state-of-the-art review*.
29. Zimina, D., Ballard, G. and Pasquire, C. (2012). Target value design: using collaboration and a lean approach to reduce construction cost. *Construction Management and Economics*, 30, p. 383-398.
30. Arbulu, R. and G. Ballard. (2004). Lean Supply Systems in Construction. In: *12th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*.
31. Eastman, C. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons.
32. Eldeep, A., Farag, M. and El-hafez. (2021). Using BIM as a lean management tool in construction processes – A case study. *Ain Shams Engineering Journal,* 13.
33. Mollasalehi, S. (2017). How BIM-lean integration enhances the information management process in the construction design. In: *25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction.*
34. Sacks, R., Koskela, L. (2010). Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*. 136.
35. Bhatla, A. and Leite, F. (2012). Integration framework of bim with the last planner systemtm. In: *20th Annual Conference of the International Group for Lean Construction.*

36. Toledo, M., Olivares, K. (2016). Exploration of a lean-BIM planning framework: A last planner system and BIM-based case study. In: *24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*.
37. Koseoglu, O., Sakin, M. (2018). Exploring the BIM and lean synergies in the Istanbul Grand Airport construction project. Engineering, *Construction and Architectural Management*, 25.
38. Samadi, P. , Azizi, M. and sobhiyah, M. H. (2024). Investigating the impact of using Building Information Modeling on reducing barriers to Off Site Manufacturing in construction projects. J*ournal of Structural and Construction Engineering*, 11(7), 79-98.
39. Eldeep, A., Farag, M. (2022). Using BIM as a lean management tool in construction processes – A case study. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(2).
40. Al Hattab, M. and Hamzeh, F. (2018). Simulating the dynamics of social agents and information flows in BIM-based design. *Automation in Construction*, 92.
41. Babalola, O., Olanipekun, A. (2019). Assessment of the role of lean construction practices in environmental sustainability. *Journal of Physics: Conference Series*.
42. Creswell, J. (1998). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five traditions*. London: sage publications.
43. Morse, J. (1994). *Designing funded qualitative research*. Sage Publications. p. 220–235.
44. Keshavarz-Ghorabaee, M. (2021). Determination of Objective Weights Using a New Method Based on the Removal Effects of Criteria (MEREC). *Symmetry*, 13.
45. Yazdani, M., Zaraté, P. (2018). Combined Compromise Solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems. *Management Decision*, 57.