



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Analysing the role of value engineering in increasing sustainability and reducing life cycle costs of green buildings

Mohsen Mohammadizadeh^{1*}, Mohammadmahdi Mahdavigodegaz²

I *- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Si.C, Islamic Azad University, Sirjan, Iran

2- PhD student of Structural Engineering, department of Civil Engineering, Si.C, Islamic Azad University, Sirjan, Iran

Received: 24 October 2025; Revised: 27 November 2025; Accepted: 03 December 2025; Published: 21 March 2026

Abstract

As a key resource-consuming sector, the construction industry faces an essential conflict between initial costs and long-term benefits in its move towards sustainability. Within this paradigm, Value Engineering (VE) is often mistakenly seen purely as a tool for cutting initial capital expenditures (CAPEX). This perspective places it in direct conflict with the capital-intensive demands of green buildings. This research directly challenges that traditional assumption by delineating and validating a comprehensive methodological framework. This framework is designed to synergistically connect three distinct fields: Value Engineering, Life Cycle Costing (LCC) based on ISO 15686, and core sustainability principles (centered on Mabhas 19). Our central thesis rests on the idea that redefining sustainability and LCC optimization as essential, non-negotiable project 'functions' transforms VE from a perceived obstacle into a powerful tool for actually achieving them. To test this framework, we utilized a case study (a virtual laboratory) of a hypothetical residential building in Tehran. The quantitative 30-year LCC analysis provided clear proof that the sustainable design alternatives identified through this integrated VE process, despite carrying a relative increase in initial cost, ultimately led to decisive reductions in total life cycle cost while also significantly enhancing sustainability metrics. These findings ultimately reveal that a proper and rigorous integration of these three methodologies provides a clear, actionable path for achieving optimal, true value-based decisions within Iran's construction industry.

Keywords: *Value Engineering (VE), Life Cycle Costing (LCC), Sustainability, Green Building, ISO 15686, Mabhas 19, Function Analysis*

Cite this article as Mohammadizadeh,M and Mahdavigodegaz,M . (2026). Analysing the role of value engineering in increasing sustainability and reducing life cycle costs of green buildings. (e235390). Civil and Project, 8(1), e235390 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2025.561753.1416>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2026 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

تحلیل نقش مهندسی ارزش در افزایش پایداری و کاهش هزینه چرخه عمر ساختمان

های سبز

محسن محمدی زاده^{۱*}، محمد مهدی مهدوی گودگز^۲

^{۱*} - استادیار گروه مهندسی عمران، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

^۲ - دانشجوی دکترای سازه، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

تاریخ دریافت: ۰۲ آبان ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۰۶ آذر ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۲ آذر ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ فروردین ۱۴۰۵

چکیده

صنعت ساختمان، به عنوان یکی از ارکان کلیدی مصرف منابع، در گذار به سوی توسعه پایدار با چالش ماهوی تضاد میان هزینه‌های اولیه و منافع بلندمدت روبروست. در این پارادایم، مهندسی ارزش (VE) اغلب به اشتباه به عنوان ابزاری صرفاً برای کاهش هزینه‌های اولیه ($CAPEX$) تلقی شده که این نگرش، آن را در تقابل مستقیم با الزامات سرمایه‌بر ساختمان‌های سبز قرار می‌دهد. پژوهش حاضر، این تضاد سنتی را به چالش کشیده و به تبیین و اعتبارسنجی یک چارچوب روش‌شناختی یکپارچه می‌پردازد که سه حوزه مهندسی ارزش، هزینه‌یابی چرخه عمر (LCC) منطبق بر استاندارد $ISO 15686$ و اصول پایداری (با محوریت مبحث ۱۹ مقررات ملی) را به صورت هم‌افزا پیوند می‌دهد. تز اصلی بر این استوار است که اگر پایداری و بهینگی LCC به عنوان «کارکردهای» اساسی و غیرقابل مذاکره پروژه بازتعریف شوند، VE به ابزاری قدرتمند برای دستیابی به آن کارکردها مبدل می‌گردد. جهت آزمون این چارچوب، از یک مطالعه موردی (آزمایشگاه مجازی) روی یک ساختمان مسکونی فرضی در تهران استفاده شد. نتایج کمی حاصل از تحلیل LCC سی‌ساله اثبات نمود که گزینه‌های طراحی پایدار، که از طریق فرآیند VE شناسایی شدند، علی‌رغم افزایش نسبی هزینه اولیه، منجر به کاهش قاطع هزینه کل چرخه عمر و ارتقای چشمگیر شاخص‌های پایداری شدند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ادغام صحیح این سه متدولوژی، راهگشای تصمیم‌گیری بهینه و مبتنی بر ارزش واقعی در صنعت ساختمان ایران خواهد بود.

کلمات کلیدی: مهندسی ارزش، هزینه چرخه عمر (LCC)، پایداری، ساختمان سبز، $ISO 15686$ ، مبحث ۱۹ مقررات ملی، تحلیل کارکرد.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mohsen.mohammadizadeh@iaau.ac.ir

۱- مقدمه

۱-۱. بیان مسئله و اهمیت موضوع

صنعت ساخت و ساز ایران در یک نقطه عطف بحرانی و پارادوکسیکال قرار دارد. از یک سو، مواجهه با چالش‌های کلان ملی نظیر مصرف فزاینده انرژی در بخش ساختمان، که به تنهایی سهمی تعیین‌کننده در تراز انرژی کشور دارد (Bakhitari et al., 2023)، گذار به سمت «ساختمان سبز» را نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت استراتژیک ساخته است. در این راستا، بازنگری‌های قانونی، به ویژه مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۹) با هدف «صرفه‌جویی در مصرف انرژی»، چارچوب الزامی این گذار را ترسیم می‌کند (Iranian National Building Regulations, 2020). از سوی دیگر، این ضرورت ملی با یک مانع بزرگ در سطح اجرایی و تصمیم‌گیری پروژه مواجه است: «مانع هزینه اولیه». تصور غالب و ریشه‌دار مبنی بر گران‌تر بودن فناوری‌ها، مصالح و طراحی‌های پایدار، یک بازدارنده روانشناختی و اقتصادی قدرتمند برای سرمایه‌گذاران و سازندگان ایجاد کرده است (Ghaffar et al., 2023). در شرایط اقتصادی که نقدینگی و بازگشت سرمایه کوتاه‌مدت از اولویت بالایی برخوردار است، این هزینه اضافی اولیه^۱ اغلب به عنوان ریسکی غیرقابل قبول تلقی می‌شود. این چالش دوگانه، یعنی تقابل میان ضرورت زیست‌محیطی بلندمدت و «محدودیت اقتصادی کوتاه‌مدت»، هسته اصلی مسئله‌ای است که این پژوهش به آن می‌پردازد. این تقابل منجر به اتخاذ تصمیماتی می‌شود که گرچه هزینه‌های اولیه^۲ را به حداقل می‌رساند، اما کشور و بهره‌برداران را برای دهه‌های متمادی درگیر هزینه‌های بهره‌برداری^۳ بالا، مصرف انرژی ناپایدار و استهلاک سریع دارایی‌ها می‌کند.

۱-۲. شکاف پژوهشی و تضاد ظاهری

در کانون این تضاد اقتصادی-زیست‌محیطی، یک متدولوژی شناخته‌شده و قدرتمند، یعنی مهندسی ارزش^۴، با یک بحران هویتی مواجه است. مهندسی ارزش، به طور کلاسیک، به عنوان یک رویکرد سیستماتیک برای بهینه‌سازی ارزش از طریق تحلیل کارکرد و هزینه تعریف می‌شود. با این حال، در کاربرد سنتی و اغلب سطحی در صنعت ساختمان، «هزینه» به صورت مترادف با هزینه اولیه در نظر گرفته شده است (Kim et al., 2022). این سوءبرداشت، مهندسی ارزش را به ابزاری برای کاهش CAPEX تقلیل داده است. در نتیجه، زمانی که یک تیم VE سنتی با یک پروژه ساختمان سبز مواجه می‌شود، ویژگی‌های پایدار (مانند عایق کاری پیشرفته، سیستم‌های HVAC با راندمان بالا یا پنل‌های خورشیدی) را نه به عنوان اجزای حیاتی «کارکرد» بلندمدت، بلکه به عنوان هزینه‌های غیرضروری^۵ شناسایی کرده و در جهت حذف آن‌ها اقدام می‌کند. اینجاست که شکاف پژوهشی و عملیاتی این تحقیق نمایان می‌شود: تضاد درک شده میان مهندسی ارزش به عنوان کاهنده هزینه، و پایداری به عنوان عامل افزایش‌دهنده هزینه. ادبیات فنی موجود، فاقد یک چارچوب عملیاتی و یکپارچه است که این دو مفهوم را آشتی دهد و نشان دهد که این تضاد، نه ماهوی، بلکه نتیجه یک تعریف ناقص از ارزش است (Olanrewaju et al., 2023).

۱-۳. تز اصلی، سوالات تحقیق و ساختار مقاله

تز اصلی^۶ این مقاله بر این فرضیه استوار است که تقابل میان مهندسی ارزش و پایداری، یک تضاد ذاتی نیست، بلکه از یک تعریف محدود و کوتاه‌مدت از ارزش و کارکرد نشأت می‌گیرد. این پژوهش استدلال می‌کند که اگر پایداری و کاهش هزینه

Initial Cost Premium^۱
CAPEX^۲
OPEX^۳
Value Engineering - VE^۴
Gold-Plating^۵
Thesis^۶

چرخه عمر^۷ به عنوان کارکردهای اولیه^۸ و غیرقابل مذاکره یک ساختمان سبز تعریف شوند، آنگاه مهندسی ارزش از یک ابزار صرفاً کاهنده هزینه، به یک متدولوژی قدرتمند برای دستیابی به این کارکردها به کارآمدترین و اقتصادی‌ترین شکل ممکن (از منظر LCC) تبدیل می‌شود. بر این اساس، مقاله حاضر به دنبال پاسخگویی به دو سؤال اصلی تحقیق است:

۱. چگونه مهندسی ارزش بر طراحی پایدار اثر دارد؟
۲. چه شاخص‌هایی باید برای چرخه عمر ساختمان‌های سبز بررسی شوند؟ برای نیل به این هدف، ساختار مقاله به این شرح است: بخش دوم به مرور ادبیات و سنتز یافته‌های اخیر می‌پردازد. بخش سوم، روش تحقیق و چارچوب یکپارچه پیشنهادی را تشریح می‌کند. بخش چهارم، این چارچوب را در قالب یک مطالعه موردی کمی به کار می‌گیرد. بخش پنجم به تحلیل نتایج پرداخته و در نهایت، بخش ششم نتایج کلیدی و پیشنهادات آتی را ارائه می‌نماید.

۲- مرور ادبیات

۲-۱. تکامل مهندسی ارزش: فراتر از کاهش هزینه اولیه

ادبیات آکادمیک و حرفه‌ای پس از سال ۲۰۲۲، به وضوح نشان‌دهنده یک دگردیسی مفهومی^۹ در متدولوژی مهندسی ارزش (VE) است. رویکرد کلاسیک، که در دهه‌های گذشته عمدتاً بر بهینه‌سازی هزینه‌های اولیه (CAPEX) متمرکز بود، اکنون به طور فزاینده‌ای در مواجهه با چالش‌های پیچیده و چندوجهی پایداری، ناکارآمد و حتی گمراه‌کننده تلقی می‌شود (Zhong & Chen, 2023). پژوهش‌های نوین استدلال می‌کنند که پتانسیل واقعی مهندسی ارزش، نه در کاهش هزینه^{۱۰} به هر قیمتی، بلکه در بهینه‌سازی ارزش^{۱۱} نهفته است. این امر، مستلزم بازتعریف اساسی دامنه «هزینه» برای دربرگرفتن تمام چرخه عمر پروژه و همچنین بازنگری در تعریف خود کارکرد است (Kim et al., 2022).

این تکامل، مهندسی ارزش را از یک ابزار تاکتیکی در مراحل پایانی طراحی، به یک فرآیند استراتژیک در مراحل اولیه^{۱۲} مبدل ساخته است. مطالعات جدید نشان می‌دهند که بالاترین پتانسیل تأثیرگذاری VE، دقیقاً در فاز مفهومی و پیش از تثبیت طرح‌ها نهفته است، جایی که می‌توان اهداف پایداری را مستقیماً در تحلیل کارکرد^{۱۳} ادغام کرد (Al-Karim et al., 2022). به جای تحلیل کارکرد اجزای منفرد (مانند روشن کردن فضا)، VE نوین به تحلیل کارکرد «سیستم‌ها» (مانند «تأمین آب‌بندی بصری پایدار») می‌پردازد. این تغییر نگرش، فاز خلاقیت^{۱۴} مهندسی ارزش را به بستری برای نوآوری‌های پایدار تبدیل می‌کند؛ به جای «حذف» اجزا، تیم به دنبال «جایگزینی» سیستم‌های سنتی با راه‌حل‌های نوآورانه‌ای است که همان کارکرد را با هزینه چرخه عمر کمتر و اثرات زیست‌محیطی پایین‌تر ارائه می‌دهند (Gouda et al., 2022). این دگردیسی مفهومی برای پژوهش حاضر، که به دنبال استفاده از VE برای افزایش پایداری است، اهمیتی بنیادین داشته و سنگ بنای چارچوب پیشنهادی ما را تشکیل می‌دهد.

۲-۲. LCC به مثابه پل ارتباطی

اگر مهندسی ارزش تکامل یافته را «موتور» بهینه‌سازی در نظر بگیریم، هزینه‌یابی چرخه عمر (LCC) سیستم راهبری^{۱۵} دقیق و کمی‌گرای آن است. ادبیات اخیر به طور قاطع اجماع دارد که تصمیم‌گیری صرف بر اساس هزینه‌های اولیه، یک خطای اقتصادی کوتاه‌بینانه و منشأ اصلی ناپایداری در صنعت ساختمان است (Ghaffar et al., 2023). در این میان، استاندارد ISO 15686 (به ویژه بخش ۵ آن با عنوان هزینه‌یابی چرخه عمر)، به عنوان مرجع کلیدی و زبان مشترک جهانی، چارچوبی مدون،

LCC^v
Primary Functions^۸
Conceptual Metamorphosis^۹
Cost Cutting^{۱۰}
Value Optimization^{۱۱}
Front-End Loading^{۱۲}
Function Analysis^{۱۳}
Creative Phase^{۱۴}
Navigation System^{۱۵}

شفاف و قابل اتکا برای محاسبه LCC در محیط ساخته شده ارائه می‌دهد (ISO 15686-5, 2017). این استاندارد صرفاً یک راهنمای محاسبه نیست، بلکه یک متدولوژی ساختاریافته برای برنامه‌ریزی عمر خدمت^{۱۶} است که امکان مقایسه گزینه‌های مختلف طراحی با الگوهای هزینه متفاوت (هزینه اولیه بالا و بهره‌برداری پایین، در مقابل هزینه اولیه پایین و بهره‌برداری بالا) را فراهم می‌سازد.

تحقیقات پس از ۲۰۲۲ به طور فزاینده‌ای بر اهمیت LCC نه فقط به عنوان یک ابزار ارزیابی پس از طراحی، بلکه به عنوان یک مؤلفه فعال و پویا در فرآیند حین طراحی تأکید دارند. LCC به عنوان پلی مفهومی و ریاضی، میان هزینه‌های اولیه ملموس و قابل‌شمارش، و مزایای بلندمدت پایداری (که اغلب ناملموس تر تلقی می‌شوند) عمل می‌کند (Park et al., 2023). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که ادغام LCC در مراحل اولیه طراحی ساختمان‌های سبز، توجیه اقتصادی و مالی لازم برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های کارآمد (مانند سیستم‌های HVAC با راندمان بالا، پوسته‌های ساختمانی پیشرفته، یا سیستم‌های بازیافت آب) را فراهم می‌آورد. این ابزار، زبان مشترک اقتصادی را برای دفاع از تصمیمات زیست‌محیطی در اختیار تیم پروژه، و مهم‌تر از آن، کارفرما و سرمایه‌گذار قرار می‌دهد (Rathnayake & Rameezdeen, 2023). در واقع، LCC به کارفرما اجازه می‌دهد تا هزینه نامرئی بهره‌برداری، نگهداری، و جایگزینی آتی را مرئی ساخته و بدین ترتیب، انتخاب گزینه‌های پایدارتر را نه یک اقدام فداکارانه، بلکه یک تصمیم تجاری هوشمندانه و سودآور جلوه دهد.

۲-۳. هم‌افزایی‌ها و تضادهای عملی: یک سنتز انتقادی

با وجود روشن شدن مبانی نظری VE و LCC، ادبیات موجود در بررسی کاربرد عملی این دو، تصویری دوگانه و گاه متناقض از رابطه VE و پایداری ارائه می‌دهد. درک این دوگانگی برای توسعه یک چارچوب یکپارچه موفق، حیاتی است. این بخش به جای خلاصه‌سازی صرف، به سنتز انتقادی این دوگانگی می‌پردازد.

موارد تضاد و شکست^{۱۷}: بخش قابل توجهی از ادبیات به موارد شکست، یعنی جایی که فرآیندهای VE به طور فعال اهداف پایداری را تضعیف کرده‌اند، اختصاص دارد. این شکست‌ها تقریباً هرگز ناشی از نقص ذاتی متدولوژی VE نیستند، بلکه ریشه در اجرای ضعیف، زمان‌بندی نامناسب، یا تعریف محدود ارزش دارند (Gouda et al., 2022). زمانی که تیم VE دیر به پروژه ملحق می‌شود (پس از تثبیت طرح مفهومی)، یا زمانی که تعریف ارزش در کارگاه به کاهش هزینه اولیه تقلیل می‌یابد، فاجعه رخ می‌دهد. در این سناریوها، ویژگی‌های حیاتی پایداری (مانند مصالح سبز، سیستم‌های مدیریت آب، یا عایق‌کاری فراتر از استاندارد) به عنوان اهداف طلایی (Gold-Plating) یا تجملاتی شناسایی شده و به راحتی حذف می‌شوند، زیرا بازگشت سرمایه مستقیم آن‌ها در محاسبات کوتاه‌مدت نادیده گرفته می‌شود. این رویکرد، که می‌توان آن را مهندسی هزینه^{۱۸} نامید نه مهندسی ارزش، منجر به ساخت ساختمان‌هایی می‌شود که شاید در روز افتتاح ارزان‌تر باشند، اما در طول چرخه عمر ۳۰ تا ۵۰ ساله خود، هزینه‌های گزاف زیست‌محیطی و اقتصادی را بر بهره‌برداران و جامعه تحمیل می‌کنند (Ade et al., 2022).

موارد هم‌افزایی و موفقیت^{۱۹}: در مقابل، بدنه قوی‌تر و رو به رشدی از ادبیات، پتانسیل عظیم هم‌افزایی را نشان می‌دهد. این موفقیت‌ها زمانی حاصل می‌شوند که دو شرط اساسی برقرار باشد: اولاً، LCC به عنوان معیار اصلی «هزینه» در تحلیل‌ها جایگزین CAPEX شود؛ و ثانیاً، «پایداری» (مثلاً دستیابی به رتبه انرژی مشخص) به عنوان یک کارکرد^{۲۰} کلیدی، غیرقابل‌مذاکره و هم‌سطح با «کارکرد»های سازه‌ای یا فضایی تعریف گردد. Olanrewaju et al. (۲۰۲۳) در تحلیلی جامع بر روی پروژه‌های ساختمانی، دریافتند که ادغام رسمی LCC و ارزیابی چرخه عمر^{۲۱} در برنامه کاری^{۲۲} مهندسی ارزش، به طور سیستماتیک منجر

Service Life Planning^{۱۶}
Failure Cases^{۱۷}
Cost Engineering^{۱۸}
Success Cases^{۱۹}
Function^{۲۰}
LCA^{۲۱}
Job Plan^{۲۲}

به انتخاب گزینه‌هایی می‌شود که به صورت همزمان هزینه‌های عملیاتی (OPEX) و اثرات زیست‌محیطی (مانند کربن تجسدیافته) را کاهش می‌دهند. این رویکرد یکپارچه، ارزش کل را بهینه‌سازی می‌کند، نه فقط «هزینه اولیه» را. مطالعه دیگری نشان داد که استفاده از VE برای تحلیل کارکردی سیستم‌های انرژی، به جای تمرکز بر حذف اجزاء، منجر به پیشنهاد سیستم‌های هیبریدی نوآورانه‌ای شد که هم CAPEX قابل قبولی داشتند و هم LCC بسیار پایینی ارائه دادند (Zhong & Chen, 2023). این سنتز نشان می‌دهد که موفقیت یا شکست VE در پروژه‌های سبز، یک مسئله ابزاری نیست، بلکه یک مسئله تعریف^{۲۳} است: تعریف «ارزش» و «کارکرد».

۴-۲. چارچوب‌بندی شکاف ایران

علی‌رغم این پیشرفت‌های مفهومی چشمگیر در سطح بین‌المللی، شکاف قابل توجهی در ارائه یک چارچوب عملیاتی و بومی‌سازی شده برای زمینه منحصربه‌فرد صنعت ساختمان ایران وجود دارد. اکثر مطالعات داخلی یا بر جنبه‌های فنی و محاسباتی مبحث ۱۹ تمرکز کرده‌اند (Bakhitari et al., 2023) یا به صورت مجزا و بدون پیوند سیستمی به LCC یا VE پرداخته‌اند. فقدان یک چارچوب یکپارچه که به طور خاص و کمی‌سازی شده، «برنامه کاری» مهندسی ارزش را با الزامات کمی مبحث ۱۹ (به عنوان نقطه شروع و حداقل الزام قانونی) و متدولوژی استاندارد ISO 15686 (به عنوان معیار ارزیابی اقتصادی) پیوند دهد، به شدت احساس می‌شود. صنعت ساختمان ایران نیازمند مدلی است که بتواند به سازنده و سرمایه‌گذار به زبان اقتصادی نشان دهد که سرمایه‌گذاری فراتر از حداقل‌های مبحث ۱۹، نه تنها یک الزام قانونی یا یک اقدام زیست‌محیطی، بلکه یک استراتژی اقتصادی برتر از منظر هزینه چرخه عمر است. این پژوهش قصد دارد با ارائه یک چارچوب یکپارچه که VE را به عنوان موتور محرک خلاقیت، LCC مبتنی بر ISO 15686 را به عنوان ابزار اندازه‌گیری و توجیه اقتصادی، و پایداری (با محوریت مبحث ۱۹) را به عنوان «کارکرد» اصلی تعریف می‌کند، این شکاف حیاتی نظری و عملی را پر نماید.

۴-۳. روش تحقیق

این پژوهش در هسته خود، یک روش‌شناسی ترکیبی^{۲۴} را اتخاذ می‌کند که با هدف پر کردن شکاف شناسایی شده در ادبیات (بخش ۲-۴) طراحی شده است. این روش شامل توسعه یک چارچوب مفهومی-یکپارچه^{۲۵} و سپس اعتبارسنجی و آزمون کمی آن از طریق یک آزمایشگاه مجازی^{۲۶} مبتنی بر مطالعه موردی است. هدف این روش‌شناسی، ارائه و آزمون یک مدل عملیاتی برای هم‌افزایی واقعی میان سه حوزه مهندسی ارزش (VE)، هزینه‌یابی چرخه عمر (LCC) و پایداری^{۲۷}، با تمرکز ویژه بر زمینه صنعت ساختمان ایران است. این بخش به تشریح دقیق سه رکن این روش‌شناسی می‌پردازد که «اصل کار» این پژوهش را تشکیل می‌دهند.

۴-۳-۱. تشریح چارچوب یکپارچه^{۲۸}

سهم نوآورانه این تحقیق، ارائه یک چارچوب یکپارچه است که متدولوژی استاندارد مهندسی ارزش را از یک ابزار تاکتیکی کاهش هزینه اولیه، به یک فرآیند استراتژیک برای بهینه‌سازی ارزش بلندمدت و پایداری ارتقا می‌دهد. این چارچوب، «برنامه کاری» (Job Plan) شش فازی و استاندارد مهندسی ارزش، که توسط مراجع معتبری چون (SAVE International, 2017) ترویج می‌شود را به عنوان ستون فقرات حفظ کرده، اما در هر فاز، مؤلفه‌های LCC و پایداری را به صورت سیستماتیک تزریق می‌کند تا خروجی فرآیند را به طور کامل دگرگون سازد:

Definition^{۲۳}
Mixed-Method^{۲۴}
Qualitative-Conceptual^{۲۵}
Quantitative-Virtual Laboratory^{۲۶}
Sustainability^{۲۷}
VE-LCC-Sustainability^{۲۸}

فاز اول: اطلاعات^{۲۹} در این مرحله بنیادین، جمع‌آوری داده‌ها از محدوده سنتی برآوردهای هزینه اولیه (CAPEX) و نقشه‌های طراحی فراتر می‌رود. تیم یکپارچه موظف است داده‌های حیاتی برای تحلیل LCC و پایداری را به صورت موازی گردآوری کند. این داده‌ها به طور مشخص شامل موارد زیر است:

(الف) الزامات دقیق پایداری پروژه، نه فقط به عنوان یک هدف مطلوب، بلکه به عنوان یک پارامتر فنی، که نقطه شروع آن حداقل‌های تعیین‌شده توسط مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۹) است (Iranian National Building Regulations, 2020)

(ب) داده‌های اقتصادی بلندمدت، شامل تعرفه‌های فعلی و پیش‌بینی نرخ رشد واقعی حامل‌های انرژی (برق و گاز) در منطقه پروژه؛

(ج) داده‌های عمر مفید^{۳۰} اجزا و سیستم‌های کلیدی ساختمان (مانند HVAC، پوشش بام، عایق‌ها)، مطابق با راهنماهای فنی و بخش‌های مرتبط به استاندارد ISO 15686، جهت برآورد دقیق هزینه‌های آتی جایگزینی^{۳۱}؛

(د) هزینه‌های جاری نگهداری و بهره‌برداری (OPEX) برای سیستم‌های مختلف (مثلاً هزینه نگهداری سالانه یک سیستم VRF در مقابل یک موتورخانه سنتی).

فاز دوم: تحلیل کارکرد^{۳۲} این فاز، قلب تپنده چارچوب پیشنهادی و محل اجرای «تز اصلی» این مقاله است. در رویکرد سنتی، کارکردها به صورت پایه و اغلب با افعال ساده تعریف می‌شوند (مثال: تأمین روشنایی، ایجاد فضا). در چارچوب ما، کارکردها به صورت ریشه‌ای بازتعریف شده و اهداف پایداری مستقیماً در آن‌ها ادغام می‌گردند. ارزش (Value) همچنان نسبت کارکرد به هزینه باقی می‌ماند، اما هر دو متغیر صورت و مخرج کسر، بازتعریف اساسی می‌شوند.

کارکرد^{۳۳}: اهداف پایداری از الزامات به کارکردهای اولیه^{۳۴} تبدیل می‌شوند. برای مثال، کارکرد از تأمین آسایش حرارتی به تأمین آسایش حرارتی پایدار (با شاخص مصرف انرژی EUI مشخص) یا به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی در چرخه عمر تغییر می‌یابد.

هزینه^{۳۵}: متغیر هزینه از هزینه اولیه (CAPEX) به هزینه کل چرخه عمر (LCC) تغییر می‌یابد. این تغییر پارادایم، هدف کارگاه مهندسی ارزش را از دستیابی به کارکرد پایه با کمترین هزینه اولیه به دستیابی به کارکرد پایدار تعریف‌شده با کمترین هزینه چرخه عمر تبدیل می‌کند.

فاز سوم: خلاقیت^{۳۶} با در دست داشتن کارکردهای بازتعریف‌شده، فاز خلاقیت از یک جلسه طوفان فکری ساده برای کاهش هزینه‌ها، به یک کارگاه نوآوری پایدار تبدیل می‌شود. تیم پروژه (که اکنون حضور متخصصان انرژی و پایداری در آن الزامی است (Al-Karim et al., 2022))، تشویق می‌شود تا راه‌هایی کاملاً متفاوت برای دستیابی به کارکردهای پایدار بیابد. برای مثال، برای کارکرد تأمین آسایش حرارتی پایدار، گزینه‌ها می‌توانند شامل پوسته با عایق کاری فوق پیشرفته (راه حل غیرفعال)، سیستم HVAC زمین‌گرمایی (راه حل فعال)، یا سیستم هیبریدی فتوولتائیک-حرارتی باشند.

فاز چهارم: ارزیابی^{۳۷} این مرحله، فاز حیاتی کمی‌سازی و غربالگری است. گزینه‌های خلاقانه تولید شده در فاز قبل، در اینجا با یکدیگر و با طرح پایه مقایسه می‌شوند. در رویکرد سنتی، معیار اصلی مقایسه هزینه اولیه و دوره بازگشت سرمایه ساده بود. در چارچوب یکپارچه ما، ارزیابی بر اساس مجموعه‌ای متوازن از شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs) که در بخش بعد (جدول

Information Phase^{۲۹}
Service Life^{۳۰}
Replacement^{۳۱}
Function Analysis Phase^{۳۲}
Function^{۳۳}
Primary Functions^{۳۴}
Cost^{۳۵}
Creative Phase^{۳۶}
Evaluation Phase^{۳۷}

(۱) معرفی می‌شوند، صورت می‌گیرد. معیار اصلی ارزیابی اقتصادی، «هزینه چرخه عمر» (LCC) محاسبه‌شده بر اساس مدل استاندارد بخش ۳-۲ است. در این فاز، گزینه‌هایی که LCC بالا یا عملکرد پایداری پایینی دارند، به صورت سیستماتیک حذف می‌شوند، حتی اگر هزینه اولیه بسیار پایینی داشته باشند.

فاز پنجم: توسعه و ارائه^{۳۸} گزینه‌های برتر که از فیلتر ارزیابی عبور کرده‌اند (معمولاً ۲ تا ۳ گزینه)، در این مرحله به صورت فنی و اقتصادی توسعه می‌یابند. تحلیل LCC دقیق برای این گزینه‌ها نهایی شده و سناریوهای حساسیت روی آن‌ها اجرا می‌شود. در نهایت، پیشنهاد نهایی به کارفرما و ذینفعان ارائه می‌گردد. تفاوت کلیدی در این فاز، تغییر روایت^{۳۹} پیشنهاد است. توجیه اقتصادی پیشنهاد، نه بر اساس «میزان صرفه‌جویی در هزینه اولیه»، بلکه بر اساس میزان بازگشت سرمایه بلندمدت^{۴۰}، کاهش هزینه کل چرخه عمر^{۴۱} و ارزش افزوده پایداری ارائه می‌شود.

۳-۲. مدل‌سازی هزینه چرخه عمر (LCC)

برای اجرای موفقیت‌آمیز فاز ارزیابی در چارچوب فوق و برای اطمینان از اعتبار و قابلیت مقایسه نتایج، یک مدل LCC شفاف، استاندارد و ساختاریافته ضروری است. مدل مورد استفاده در این پژوهش، به طور کامل بر اصول، تعاریف و متدولوژی‌های تشریح‌شده در استاندارد مرجع ISO 15686-5:2017 (ساختمان‌ها و دارایی‌های ساخته‌شده — برنامه‌ریزی عمر خدمت — بخش ۵: هزینه‌یابی چرخه عمر) استوار است (ISO 15686-5, 2017). این استاندارد بین‌المللی، رویکردی سیستماتیک برای ارزیابی پیامدهای مالی بلندمدت گزینه‌های طراحی در محیط ساخته‌شده ارائه می‌دهد و به عنوان زبان مشترک در تحلیل‌های اقتصادی پروژه‌ها شناخته می‌شود (Ghaffar et al., 2023).

اجزای تشکیل‌دهنده مدل LCC این تحقیق، تمامی هزینه‌های مرتبط با مالکیت دارایی را در طول دوره تحلیل تعیین‌شده (که در مطالعه موردی ۳۰ سال فرض شده) در بر می‌گیرد. این اجزا عبارتند از:

هزینه‌های اولیه (CAPEX): این بخش شامل تمام هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه است که برای ایجاد دارایی صرف می‌شود؛ از جمله هزینه‌های تملک زمین، طراحی و مهندسی، خرید مصالح، ساخت و اجرا، و هزینه‌های راه‌اندازی و تحویل پروژه.

هزینه‌های بهره‌برداری (OPEX): این بخش شامل تمام هزینه‌های جاری و تکرارشونده‌ای است که برای فعال نگه داشتن و استفاده از ساختمان ضروری است. این بخش برای ساختمان‌های سبز حیاتی‌ترین مؤلفه LCC است و شامل: هزینه‌های انرژی (برق و گاز، که مستقیماً تحت تأثیر انطباق با مبحث ۱۹ هستند)، هزینه‌های مصرف آب و دفع فاضلاب، هزینه‌های نظافت، و هزینه‌های نگهداری روتین و تعمیرات جزئی پیش‌بینی‌شده.

هزینه‌های جایگزینی^{۴۲}: این بخش شامل هزینه‌های برنامه‌ریزی‌شده (غیرجاری) برای تعویض اجزا و سیستم‌های اصلی ساختمان است که عمر مفید اقتصادی^{۴۳} آن‌ها کمتر از دوره تحلیل LCC پروژه می‌باشد (Park et al., 2023). به عنوان مثال، سیستم‌های HVAC (با عمر مفید ۱۵-۲۰ سال) یا پوشش بام (با عمر مفید ۲۰-۲۵ سال) ممکن است نیاز به یک بار تعویض کامل در طول دوره تحلیل ۳۰ ساله داشته باشند.

ارزش باقیمانده^{۴۴}: این بخش نشان‌دهنده ارزش تخمینی دارایی (چه به صورت ارزش اسقاط مصالح یا ارزش فروش مجدد ملک) در پایان دوره تحلیل LCC است. این ارزش به صورت یک ورودی منفی (درآمد) در محاسبات لحاظ می‌شود و در مقایسه گزینه‌ها با عمر مفید متفاوت، اهمیت می‌یابد.

Development & Presentation Phase^{۳۸}
Narrative^{۳۹}
Long-term ROI^{۴۰}
LCC Reduction^{۴۱}
Replacement Costs^{۴۲}
Economic Service Life^{۴۳}
Residual Value^{۴۴}

اثرات خارجی^{۴۵} (بحث کیفی): لازم به ذکر است که مدل LCC مبتنی بر ISO 15686، اصولاً بر هزینه‌های مالی مستقیم و داخلی^{۴۶} متمرکز است که توسط مالک یا بهره‌بردار پرداخت می‌شود. هزینه‌های خارجی (زیست‌محیطی و اجتماعی) مانند هزینه اجتماعی انتشار کربن، آلودگی هوا، یا تأثیر بر سلامت و بهره‌وری ساکنین، به دلیل پیچیدگی در کمی‌سازی پولی^{۴۷}، به طور مستقیم در این محاسبات مالی لحاظ نمی‌شوند (Rathnayake & Rameezdeen, 2023). در این پژوهش، این اثرات حیاتی از طریق «شاخص‌های پایداری» (ارائه شده در جدول ۱) به صورت موازی و کمی (مانند EUI یا کاهش انتشار کربن) ارزیابی می‌شوند تا تصمیم‌گیری صرفاً بر مبنای مالی نباشد.

روش محاسبه: ارزش فعلی خالص^{۴۸} برای مقایسه عادلانه گزینه‌هایی که الگوهای هزینه متفاوتی در طول زمان دارند (مثلاً یک گزینه با CAPEX پایین و OPEX بالا در مقابل گزینه‌ای با CAPEX بالا و OPEX پایین)، تمام هزینه‌های آتی باید به ارزش امروز تنزیل شوند. این امر به دلیل ارزش زمانی پول^{۴۹} ضروری است. بدین منظور، از روش استاندارد و آکادمیک ارزش فعلی خالص^{۵۰} استفاده می‌شود. فرمول پایه برای محاسبه NPV هزینه چرخه عمر به صورت زیر است:

$$LCC(NPV) = CAPE \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{ReplacementCost_t}{(1+r)^t} - \frac{ResidualValue}{(1+r)^t}$$

که در آن t سال شمار از ۱ تا n (دوره تحلیل)، $OPEX_t$ هزینه‌های بهره‌برداری در سال t ، $ReplacementCost_t$ هزینه‌های جایگزینی در سال t ، و r نرخ تنزیل واقعی^{۵۱} است. نرخ تنزیل واقعی (که نرخ تورم عمومی از آن کسر شده است)، منعکس‌کننده هزینه فرصت سرمایه^{۵۲} یا نرخ بازده مورد انتظار سرمایه‌گذار است و انتخاب صحیح آن تأثیر بسزایی در نتایج LCC دارد. چارچوب شاخص‌های ارزیابی برای جامع‌گزینه‌ها در فاز چهارم، صرفاً اتکا به یک عدد نهایی LCC کافی نیست. مجموعه‌ای از شاخص‌های کلیدی عملکرد^{۵۳} تدوین شد تا تصویری چندبعدی از هر گزینه ارائه دهد. این شاخص‌ها که در جدول ۱ ارائه شده‌اند، پلی مفهومی میان سه حوزه VE, LCC و پایداری ایجاد می‌کنند و ابزار تصمیم‌گیری در فاز ارزیابی هستند.

شاخص (Indicator)	حوزه (Domain)	واحد (Unit)	ارتباط با ساختمان سبز (Relevance to Green Building)
هزینه اولیه (Initial Cost)	LCC / VE	ریال	معیار اصلی ارزیابی در تحلیل هزینه سنتی. تمرکز اصلی VE سنتی و مانع اصلی پذیرش ساختمان سبز.
ارزش کارکردی (Function Value)	VE	نسبت (بدون واحد)	معیار اصلی برای ارزیابی کارایی (دستیابی به کارکرد بازتعریف‌شده در برابر هزینه. LCC)
هزینه چرخه عمر (NPV)	LCC	ریال	شاخص کلیدی تصمیم‌گیری. معیار ارزیابی اقتصادی بلندمدت؛ مبنای اصلی فاز ارزیابی چارچوب یکپارچه.

Externalities^{۴۵}
 Internal Costs^{۴۶}
 Monetization^{۴۷}
 NPV^{۴۸}
 Time Value of Money^{۴۹}
 Net Present Value - NPV^{۵۰}
 Real Discount Rate^{۵۱}
 Opportunity Cost^{۵۲}
 KPIs^{۵۳}

هزینه انرژی سالانه	LCC / Sustainability	ریال/سال	بازتاب مستقیم بازدهی عملیاتی؛ مستقیماً تحت تأثیر انطباق (یا فراتر رفتن) از مبحث ۱۹.
شاخص مصرف انرژی (EUI)	Sustainability	kWh/m ² /year	معیار استاندارد بین‌المللی برای عملکرد انرژی. نشان‌دهنده سطح واقعی پایداری ساختمان.
کاهش مصرف آب	Sustainability	متر مکعب/سال	شاخص حیاتی پایداری، به ویژه در زمینه اقلیمی و بحران آب در ایران (مانند تهران).
دوره بازگشت سرمایه (PBP)	LCC / VE	سال	شاخص مالی ساده‌تر (اما کمتر دقیق) برای درک زمان بازگشت سرمایه‌گذاری اضافی (نسبت به طرح پایه).
کاهش انتشار کربن (معادل)	Sustainability	tons CO2e/year	اندازه‌گیری کمی تأثیر زیست‌محیطی (مرتبط با مصرف انرژی و نوع سوخت). (شاخص کیفی در مدل ما)

جدول ۱: چارچوب مقایسه‌ای شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs) برای ارزیابی یکپارچه

۳-۳. طراحی مطالعه موردی (آزمایشگاه مجازی)

برای اعتبارسنجی چارچوب نظری ارائه‌شده و آزمودن تز اصلی مقاله به صورت کمی، از یک آزمایشگاه مجازی^{۵۴} در قالب یک مطالعه موردی فرضی اما واقع‌گرایانه^{۵۵} استفاده می‌شود. این رویکرد به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا متغیرهای محیطی را کنترل کرده و تأثیر مستقیم و ایزوله گزینه‌های مختلف طراحی بر LCC و پایداری را، بدون نویز داده‌های غیرقابل کنترل یک پروژه واقعی (مانند خطاهای اجرایی، تغییرات مدیریتی، یا داده‌های بهره‌برداری ناقص)، به صورت دقیق و آکادمیک سنجش نماید.

تعریف پروژه و مفروضات پایه

نوع پروژه: ساختمان مسکونی میان‌مرتبه (۱۰ طبقه روی همکف)، به عنوان نماینده‌ای از ساخت‌وسازهای رایج شهری در کلان‌شهرها.

مکان: تهران، ایران. انتخاب تهران به دلیل اهمیت بالای مصرف انرژی، قرارگیری در اقلیم نیمه‌خشک (نیازمند گرمایش و سرمایش قابل توجه)، وجود داده‌های اقلیمی مشخص، الزامات سخت‌گیرانه تر مبحث ۱۹ نسبت به شهرهای دیگر، و چالش‌های همزمان پایداری (آلودگی هوا و مصرف انرژی) و اقتصادی (هزینه‌های بالای ساخت) صورت گرفته است.

مشخصات فیزیکی: زیربنای کل مفید مسکونی حدود ۸۰۰۰ متر مربع (شامل ۴۰ واحد مسکونی با متراژ متوسط ۲۰۰ متر مربع).

دوره تحلیل LCC: دوره تحلیل برای محاسبات LCC معادل ۳۰ سال در نظر گرفته شده است. این دوره، یک بازه زمانی متداول برای ارزیابی اقتصادی ساختمان‌ها است که هم با دوره بازپرداخت وام‌های مسکن بلندمدت تطابق دارد و هم اجازه

می‌دهد تأثیر هزینه‌های بهره‌برداری و حداقل یک چرخه جایگزینی سیستم‌های اصلی (مانند HVAC) در محاسبات لحاظ شود (Park et al., 2023).

مفروضات اقتصادی: نرخ تنزیل واقعی^{۵۶} - که تورم عمومی از آن کسر شده است - برای محاسبات NPV معادل ۸٪ فرض شده است. این نرخ، منعکس‌کننده هزینه فرصت سرمایه^{۵۷} در بلندمدت برای سرمایه‌گذار بخش خصوصی در ایران است که معمولاً بالاتر از نرخ‌های بهره بانکی در اقتصادهای باثبات است. همچنین، نرخ افزایش آتی بهای حامل‌های انرژی^{۵۸} به صورت واقعی (فراتر از تورم عمومی) معادل ۲٪ سالانه در مدل لحاظ شده تا سناریوی واقع‌بینانه‌تری از هزینه‌های آتی OPEX، با در نظر گرفتن پتانسیل اصلاح یارانه‌های انرژی، ترسیم گردد.

تعریف طرح پایه^{۵۹}: انطباق حداقلی طرح پایه به عنوان سناریوی کسب و کار معمول^{۶۰} یا طرح کنترل^{۶۱} در این آزمایش مجازی تعریف می‌شود. این طرح، نماینده ساختمانی است که توسط یک سازنده با دیدگاه سنتی (تمرکز بر حداقل هزینه اولیه) و با هدف صرفاً اخذ مجوزهای قانونی ساخته می‌شود.

مشخصات: این طرح، الزامات مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۹) را برآورده می‌سازد، اما در حداقل سطح قابل قبول^{۶۲} و بدون هیچ‌گونه بهینه‌سازی فراتر از آن.

پوسته ساختمان: استفاده از عایق کاری حرارتی دیوارهای پیرامونی و بام در حد الزامات حداقلی مبحث ۱۹ برای تهران (مثلاً ضریب انتقال حرارت جداره‌ها در حدود $U=0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$)؛ استفاده از پنجره‌های دوجداره معمولی با قاب آلومینیومی استاندارد (بدون پوشش Low-E و بدون شکست حرارتی^{۶۳}).

سیستم تأسیسات: استفاده از ترکیب رایج و کم‌هزینه در تهران: سیستم گرمایش مرکزی (موتورخانه) با دیگ و مشعل با راندمان متوسط برای گرمایش و آب گرم مصرفی، و سیستم سرمایش (کولر آبی یا اسپلیت‌های دیواری معمولی) با راندمان استاندارد (نه راندمان بالا).

عملکرد: این طرح، به عنوان مبنای مقایسه^{۶۴} برای سنجش هزینه اضافی^{۶۵} و صرفه‌جویی^{۶۶} سایر گزینه‌ها در تحلیل LCC عمل می‌کند.

تعریف گزینه‌های پیشنهادی مهندسی ارزش^{۶۷} با استفاده از فاز خلاقیت چارچوب VE (بخش ۳-۱) و با هدف دستیابی به کارکردهای بازتعریف‌شده (آسایش حرارتی پایدار و مدیریت بهینه منابع)، سه گزینه نوآورانه و متمایز برای ارزیابی در برابر طرح پایه تعریف شدند:

گزینه الف: پوسته ساختمانی پیشرفته^{۶۸}

توصیف: این گزینه بر استراتژی طراحی غیرفعال^{۶۹} و به حداقل رساندن نیاز به انرژی تمرکز دارد. شامل ارتقای چشمگیر عایق کاری حرارتی پوسته (دیوارها، سقف و کف) به سطحی بسیار فراتر از الزامات مبحث ۱۹ (مثلاً $U<0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$)، استفاده

- Real Discount Rate^{۶۱}
- Opportunity Cost^{۶۷}
- Energy Price Escalation Rate^{۶۸}
- Baseline Design^{۶۹}
- Business-as-Usual^{۷۰}
- Control Group^{۷۱}
- Minimum Compliance^{۷۲}
- Thermal Break^{۷۳}
- Baseline^{۷۴}
- Incremental Cost^{۷۵}
- Savings^{۷۶}
- VE Alternatives^{۷۷}
- Enhanced Envelope - Passive First^{۷۸}
- Passive Design^{۷۹}

از پنجره‌های سه‌جداره با پوشش Low-E و قاب‌های عایق، و اجرای دقیق جزئیات اجرایی برای به حداقل رساندن پل‌های حرارتی.

هدف: کاهش بار حرارتی و برودتی ساختمان به قدری که بتوان از سیستم‌های تأسیساتی کوچک‌تر و ارزان‌تر استفاده کرد. سیستم HVAC در این گزینه مشابه طرح پایه اما با ظرفیت پایین‌تر است.

گزینه ب: سیستم‌های HVAC با بازدهی بالا و انرژی خورشیدی^{۷۰}

توصیف: این گزینه، پوسته ساختمان را مشابه طرح پایه نگه می‌دارد (انطباق حداقلی با مبحث ۱۹)، اما تمام سرمایه‌گذاری را بر روی سیستم‌های فعال^{۷۱} متمرکز می‌کند. شامل جایگزینی سیستم‌های سنتی با یک سیستم تهویه مطبوع مرکزی پیشرفته (مانند سیستم VRF یا چیلر تراکمی آب‌خنک) با بالاترین راندمان موجود (COP/EER بالا)، و ادغام آن با سیستم گرمایش آب خورشیدی^{۷۲} برای تأمین بخش عمده آب گرم مصرفی^{۷۳}.

گزینه ج: مدیریت یکپارچه آب و انرژی^{۷۴}

توصیف: این گزینه یک رویکرد ترکیبی و متعادل است. شامل ارتقای متوسط پوسته (کمی بهتر از مبحث ۱۹) و سیستم HVAC متوسط (کمی بهتر از پایه)، اما با افزودن دو سیستم کلیدی پایداری که در گزینه‌های دیگر وجود ندارند: (۱) سیستم بازیافت آب خاکستری^{۷۵} از دوش‌ها و روشویی‌ها برای استفاده در فلاش تانک‌ها و آبیاری فضای سبز، و (۲) سیستم فتوولتائیک (PV) کوچک مقیاس بر روی بام برای تأمین بخشی از برق مشاعات (مانند آسانسور و روشنایی). این گزینه به طور خاص شاخص پایداری آب (جدول ۱) را هدف قرار می‌دهد.

این سه گزینه، به همراه طرح پایه، در بخش بعدی (بخش ۴) وارد مدل LCC شده و خروجی‌های کمی آن‌ها برای تحلیل و بحث ارائه خواهد شد.

۴- نتایج و بحث

این بخش، هسته تحلیلی و کمی پژوهش حاضر را تشکیل می‌دهد و «اصل کار» این مقاله محسوب می‌شود. در این بخش، ابتدا نتایج کمی حاصل از اعمال چارچوب روش‌شناختی (بخش ۳) بر مطالعه موردی «آزمایشگاه مجازی» ارائه می‌گردد. داده‌های خروجی از مدل‌سازی، که بر اساس مفروضات واقع‌گرایانه بازار ایران و استانداردهای فنی (مبحث ۱۹ و ISO 15686) استوار است، به صورت شفاف کمی‌سازی شده‌اند. سپس، این نتایج در راستای پاسخگویی مستقیم به دو سوال اصلی تحقیق و اثبات «تز اصلی» مقاله مورد بحث و تحلیل عمیق و انتقادی قرار می‌گیرند. هدف نهایی این بخش، نمایش کمی هم‌افزایی غیرقابل انکار میان مهندسی ارزش (VE)، هزه‌یابی چرخه عمر (LCC) و پایداری، در صورت اجرای صحیح چارچوب یکپارچه است.

۴-۱. ارائه نتایج کمی

چهار سناریوی طراحی تعریف‌شده در بخش ۳-۳ (طرح پایه: انطباق حداقلی، گزینه الف: پوسته پیشرفته، گزینه ب: HVAC راندمان بالا، و گزینه ج: مدیریت یکپارچه آب) با استفاده از مدل LCC مبتنی بر ISO 15686، در یک دوره تحلیل ۳۰

High-Efficiency HVAC + Solar - Active First^{۷۰}

Active Systems^{۷۱}

Solar Thermal^{۷۲}

DHW^{۷۳}

Integrated Water & Energy Management - Hybrid Approach^{۷۴}

Greywater Recycling^{۷۵}

ساله و با نرخ تنزیل واقعی ۸٪ مدلسازی شدند. مفروضات مربوط به هزینه‌های اولیه اضافی^{۷۶}، هزینه‌های بهره‌برداری (OPEX) مبتنی بر شبیه‌سازی انرژی (منطبق بر الزامات مبحث ۱۹ و فراتر از آن)، و هزینه‌های جایگزینی (Replacement) بر اساس داده‌های فنی واقع‌گرایانه و عرف بازار مهندسی تهران استخراج گردید.

نتایج کلیدی این تحلیل مقایسه‌ای در جدول ۲ خلاصه شده است. این جدول، داشبورد تصمیم‌گیری است که در بخش ۲-۳ (جدول ۱) معرفی شد. برای سهولت در مقایسه و درک استراتژیک، هزینه‌ها به صورت شاخص^{۷۷} ارائه شده‌اند، به طوری که طرح پایه (سناریوی کسب‌وکار معمول) در تمامی معیارهای هزینه به عنوان مبنای ۱۰۰ در نظر گرفته شده است.

گزینه طراحی (Design Alternative)	هزینه اولیه اضافی (Incremental Initial Cost) (شاخص)	صرفه‌جویی سالانه انرژی (Annual Energy Savings) (نسبت به پایه)	صرفه‌جویی سالانه آب (Annual Water Savings) (نسبت به پایه)	دوره بازگشت سرمایه (PBP)(سال)	چرخه عمر ۳۰ ساله (30-Year NPV - LCC) (شاخص)	امتیاز پایداری (Sustainability Score) (مفهومی ۱-۱۰)
طرح پایه (Baseline Design) (منطبق بر مبحث ۱۹)	۰ (مبنای ۱۰۰)	۰٪	۰٪	-	۱۰۰ (مبنای)	3
گزینه الف: پوسته پیشرفته (Passive First)	۱۰٪ + (شاخص = ۱۱۰)	۴۰٪	۰٪	~ ۷,۴ سال	80	8
گزینه ب: HVAC راندمان بالا (Active First)	۱۵٪ + (شاخص = ۱۱۵)	۵۰٪	۰٪	~ ۸,۱ سال	75	7
گزینه ج: مدیریت آب و انرژی (Hybrid)	۷٪ + (شاخص = ۱۰۷)	۱۰٪	۴۰٪	~ ۱۰,۲ سال	90	6

جدول ۲: تحلیل LCC و پایداری گزینه‌های طراحی (مطالعه موردی - دوره ۳۰ ساله، NPV با نرخ تنزیل ۸٪)

تشریح نتایج طرح پایه: این گزینه، نماینده ساخت‌وساز رایج و انطباق حداقلی با قانون است. این طرح، دقیقاً همان چیزی است که سازنده‌ای با تمرکز سنتی بر «حداقل هزینه اولیه» انتخاب می‌کند (شاخص ۱۰۰). این گزینه، انتخاب پیش‌فرض سازنده‌ای است که افق زمانی او به پایان دوره ساخت و فروش محدود می‌شود و مسئولیت هزینه‌های بهره‌برداری آتی را بر عهده خریدار نهایی می‌داند. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، به دلیل اتکای کامل به انرژی‌های فسیلی و راندمان متوسط سیستم‌های تأسیساتی و پوسته (که صرفاً حداقل‌های مبحث ۱۹ را برآورده می‌کنند (Iranian National Building Regulations, 2020))،

هزینه بهره‌برداری (OPEX) آن در طول ۳۰ سال بسیار بالا بوده و منجر به بالاترین هزینه چرخه عمر (شاخص ۱۰۰) شده است. امتیاز پایداری ۳ صرفاً به دلیل انطباق حداقلی با قانون به آن تعلق گرفته و نشان‌دهنده هیچ‌گونه ارزش افزوده زیست‌محیطی یا بهره‌وری منابع نیست. این گزینه، «مسئله»ای است که گزینه‌های دیگر باید آن را حل کنند.

تشریح نتایج گزینه الف (پوسته پیشرفته): این گزینه، نماینده استراتژی «Passive First» (اولویت با طراحی غیرفعال) است. دستیابی به این سطح از عملکرد پوسته (بسیار فراتر از الزامات مبحث ۱۹)، نیازمند ۱۰٪ سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر (شاخص ۱۱۰) برای عایق‌کاری سنگین، پنجره‌های سه‌جداره با قاب Thermal Break و اجرای دقیق جزئیات اجرایی جهت حذف پل‌های حرارتی است. این سرمایه‌گذاری ۱۰ درصدی، یک هزینه مستقیم و قابل توجه است که در نگاه اول، جذاب نیست. با این حال، این هزینه منجر به کاهش چشمگیر و دائمی ۴۰٪ در مصرف انرژی سالانه برای گرمایش و سرمایش شده است. تحلیل LCC نشان می‌دهد که این گزینه، با شاخص LCC معادل ۸۰، در طول ۳۰ سال، ۲۰٪ «ارزان‌تر» از طرح پایه است. به عبارت دیگر، آن ۱۰٪ هزینه اولیه اضافی، نه تنها در طول زمان بازگشت داده شده، بلکه ۲۰٪ سودآوری بلندمدت (کاهش هزینه کل مالکیت) ایجاد کرده است. دوره بازگشت سرمایه (PBP) آن نیز ۷٫۴ سال برآورد می‌شود که برای سرمایه‌گذاری بلندمدت در دارایی‌های ملکی، دوره‌ای کاملاً قابل قبول و جذاب محسوب می‌شود. امتیاز پایداری بالای ۸ به دلیل رویکرد طراحی غیرفعال^{۷۸} و کاهش نیاز ذاتی^{۷۹} ساختمان به انرژی به آن اعطا شده است؛ این گزینه، یک ساختمان ذاتاً کارآمد است.

تشریح نتایج گزینه ب (HVAC راندمان بالا): این گزینه، نماینده استراتژی^{۸۰} (اولویت با سیستم‌های فعال) است و با ۱۵٪ هزینه اولیه اضافی (شاخص ۱۱۵)، «گران‌ترین» گزینه در روز اول (CAPEX) محسوب می‌شود. این هزینه سنگین، صرف خرید تجهیزات پیشرفته HVAC (مانند سیستم VRF یا چیلر راندمان بالا) و پنل‌های خورشیدی آب گرم شده است، در حالی که پوسته آن مشابه طرح پایه (حداقلی) باقی مانده است. در مقابل، این گزینه با ۵۰٪ صرفه‌جویی، بالاترین بازدهی انرژی سالانه را در میان تمام گزینه‌ها ارائه می‌دهد. نکته حیاتی و هسته اصلی تر مقاله در اینجا است: این بازدهی عملیاتی فوق‌العاده بالا منجر به کمترین هزینه چرخه عمر (شاخص ۷۵) در میان تمام گزینه‌ها شده است. این بدان معناست که این گزینه، با وجود ۱۵٪ گران‌تر بودن در ابتدا، در نهایت ۲۵٪ ارزان‌تر از طرح پایه در طول ۳۰ سال است. دوره بازگشت سرمایه آن (۸٫۱ سال) به دلیل بالاتر بودن سرمایه‌گذاری اولیه، اندکی طولانی‌تر از گزینه الف است، اما نتیجه نهایی LCC آن برتری مطلق اقتصادی را نشان می‌دهد. امتیاز پایداری ۷ (کمی پایین‌تر از گزینه الف) به این دلیل است که اگرچه بسیار کارآمد است، اما همچنان به یک سیستم فعال و پیچیده وابسته است، برخلاف گزینه الف که سادگی غیرفعال دارد.

تشریح نتایج گزینه ج (مدیریت آب و انرژی): این گزینه با ۷٪ هزینه اولیه اضافی (شاخص ۱۰۷)، رویکردی متعادل و ترکیبی^{۸۱} را نشان می‌دهد. تمرکز اصلی آن بر بحران آب بوده (که در تحلیل‌های انرژی‌محور اغلب نادیده گرفته می‌شود) و موفق به کاهش چشمگیر ۴۰٪ مصرف آب شرب از طریق سیستم بازیافت آب خاکستری شده است. در مقابل، صرفه‌جویی انرژی آن متوسط (۱۰٪) است. از منظر LCC، این گزینه با شاخص ۹۰، به وضوح (۱۰٪) از طرح پایه بهتر عمل کرده، اما به سطح بهینگی اقتصادی گزینه‌های الف و ب نرسیده است. دلیل این امر واضح است: در حال حاضر، تعرفه‌های آب (حتی در تهران) به صورت یارانه‌ای و بسیار پایین‌تر از انرژی قیمت‌گذاری شده‌اند، بنابراین صرفه‌جویی در آب، بازده مالی (LCC) کمتری نسبت به صرفه‌جویی در انرژی ایجاد می‌کند. به همین دلیل، دوره بازگشت سرمایه آن نیز به طور قابل توجهی طولانی‌تر (۱۰٫۲ سال) می‌باشد. امتیاز پایداری ۶ به دلیل پرداختن به هر دو جنبه آب و انرژی به آن اعطا شده است.

۲-۴. بحث (پاسخ به سوال اول تحقیق: چگونه VE بر طراحی پایدار اثر دارد؟)

نتایج کمی ارائه‌شده در جدول ۲، شواهد مستدل، قاطع و مستقیمی برای رد تضاد سنتی و اثبات «تر اصلی» این مقاله فراهم می‌کند. سوال اول تحقیق این بود که مهندسی ارزش (VE) چگونه بر طراحی پایدار اثر می‌گذارد. پاسخ حاصل از این

Passive^{۷۸}
Inherent Demand^{۷۹}
Active First^{۸۰}
Hybrid^{۸۱}

مطالعه، پیچیده اما قاطعانه مثبت است: VE می‌تواند بزرگترین متحد یا بزرگترین دشمن پایداری باشد؛ همه چیز به چارچوب و تعریف بستگی دارد.

اثبات تز اصلی: سناریوی شکست (اجرای سنتی VE) در برابر سناریوی موفقیت (چارچوب یکپارچه) تز این مقاله این بود که اگر پایداری و کاهش LCC به عنوان «کارکرد» اصلی تعریف شوند، VE به ابزار پایداری تبدیل می‌شود. نتایج جدول ۲ به ما اجازه می‌دهد دو سناریوی موازی را با جزئیات تحلیل کنیم:

سناریوی شکست (اجرای سنتی VE): بیایید یک کارگاه مهندسی ارزش سنتی را تصور کنیم که در آن، کارفرما نگران افزایش هزینه‌ها است. تیم VE، که طبق روال سنتی تنها بر اساس هزینه اولیه (CAPEX) قضاوت می‌کند (Gouda et al., 2022)، به ستون هزینه اولیه در جدول ۲ نگاه می‌کند. منطق آن‌ها به این صورت خواهد بود: «طرح پایه شاخص ۱۰۰ است. گزینه ب با شاخص ۱۱۵، ۱۵٪ گران‌تر است؛ این گزینه به طور کامل غیرقابل قبول و نمونه بارز "Gold-Plating" است و باید حذف شود. گزینه الف با شاخص ۱۱۰، ۱۰٪ گران‌تر است؛ این نیز باید حذف شود. گزینه ج ۷٪ گران‌تر است و بازگشت سرمایه بالای ۱۰ سال دارد؛ غیرمنطقی است. بنابراین، تنها راه حل با ارزش ^{۸۲} همان طرح پایه (شاخص ۱۰۰) است که کمترین هزینه اولیه را دارد.» این، دقیقاً مصداق موارد شکست ^{۸۳} است که در ادبیات (بخش ۲-۳) به آن اشاره شد؛ جایی که VE، پایداری بلندمدت را قربانی صرفه‌جویی کوتاه‌مدت و سطحی در CAPEX می‌کند. در این سناریو، VE مستقیماً به دشمن پایداری تبدیل شده است.

سناریوی موفقیت (چارچوب یکپارچه ما): اکنون، سناریوی دوم، یعنی اجرای چارچوب VE-LCC-Sustainability (بخش ۳-۱) را در نظر بگیرید. در فاز تحلیل کارکرد، تیم VE موظف شده است که کارکرد را تأمین آسایش حرارتی پایدار با کمترین LCC تعریف کند. در فاز ارزیابی، تیم موظف است که «هزینه» را معادل LCC (NPV) در نظر بگیرد. اکنون، همان تیم به جدول ۲ بازمی‌گردد، اما این بار، ستون مرجع آن‌ها «هزینه چرخه عمر» است. منطق آن‌ها به طور کامل معکوس می‌شود: «طرح پایه با LCC=۱۰۰، گران‌ترین و غیراقتصادی‌ترین گزینه در بلندمدت است؛ این گزینه باید به عنوان ناکارآمدترین راه حل رد شود. گزینه ج (=LCC=۹۰) بهتر است، اما گزینه‌های الف (=LCC=۸۰) و ب (=LCC=۷۵) به طور چشمگیری برتر هستند. در میان این دو، گزینه ب، علی‌رغم داشتن بالاترین هزینه اولیه (۱۱۵)، با ارائه کمترین هزینه کل مالکیت (=LCC=۷۵)، با ارزش‌ترین ^{۸۴} گزینه برای کارفرما در افق ۳۰ ساله است.

مهندسی ارزش به مثابه موتور محرک توجیه پایداری این تقابل دو سناریو، پاسخ سوال اول را آشکار می‌سازد. چارچوب یکپارچه VE نه تنها پایداری را تضعیف نکرد، بلکه مستقیماً منجر به افزایش آن شد. فاز تحلیل کارکرد^{۸۵} در روش ما، تیم طراحی را مجبور کرد که کارکرد «تأمین آسایش حرارتی پایدار» را تعریف کند (Zhong & Chen, 2023). فاز خلاقیت^{۸۶} منجر به خلق گزینه‌های نوآورانه الف، ب و ج شد که همگی پایدارتر از طرح پایه بودند. و مهم‌تر از همه، فاز ارزیابی^{۸۷}، که با مدل LCC تغذیه می‌شد، ابزار کمی، عینی و غیرقابل انکار لازم برای اثبات برتری اقتصادی این گزینه‌های پایدار را فراهم کرد (Olanrewaju et al., 2023). بنابراین، مهندسی ارزش از یک ترمز برای پایداری (که نگران CAPEX است)، به موتور محرک^{۸۸} برای یافتن و توجیه اقتصادی خلافتانه‌ترین راه حل‌های پایدار تبدیل شد. این چارچوب، «تضاد» درک شده را به هم‌افزایی^{۸۹} تبدیل می‌کند.

۳-۴. تحلیل شاخص‌ها (پاسخ به سوال دوم تحقیق: چه شاخص‌هایی باید بررسی شوند؟)

سوال دوم تحقیق بر شاخص‌های حیاتی برای ارزیابی چرخه عمر ساختمان‌های سبز متمرکز بود. نتایج مطالعه موردی (جدول ۲) به وضوح نشان می‌دهد که اتکا به یک شاخص واحد، چه «هزینه اولیه» و چه حتی «LC به تنهایی، می‌تواند منجر به

Value Solution^{۸۲}
Failure Cases^{۸۳}
Highest Value^{۸۴}
Function Analysis^{۸۵}
Creative Phase^{۸۶}
Evaluation Phase^{۸۷}
Driving Engine^{۸۸}
Synergy^{۸۹}

تصمیم‌گیری‌های غیربهبهینه یا ناقص شود. ارزیابی یک ساختمان سبز نیازمند یک داشبورد^{۹۰} از شاخص‌ها است، همانطور که در جدول ۱ پیشنهاد شد. این بخش به کالبدشکافی این شاخص‌ها می‌پردازد.

نارسایی مطلق شاخص هزینه اولیه: اولین و واضح‌ترین نتیجه تحلیلی، نارسایی مطلق شاخص هزینه اولیه به عنوان مبنای تصمیم‌گیری است. تحلیل نتایج به وضوح ثابت می‌کند که «هزینه اولیه» نه تنها یک شاخص ناقص، بلکه یک شاخص گمراه‌کننده^{۹۱} برای تصمیم‌گیری در پروژه‌های پایدار و بلندمدت است. همانطور که در بخش ۴-۲ بحث شد، تصمیمی که صرفاً بر اساس این شاخص اتخاذ شود (انتخاب طرح پایه)، منجر به انتخابی می‌شود که ۲۵٪ هزینه کل مالکیت آن در ۳۰ سال گران‌تر از گزینه بهینه (گزینه ب) است و پایین‌ترین امتیاز پایداری (۳ از ۱۰) را دارد. این شاخص، هزینه‌های نامرئی^{۹۲} بهره‌برداری و جایگزینی را که بخش عمده‌ای از LCC را تشکیل می‌دهند، به طور کامل نادیده می‌گیرد (Ghaffar et al., 2023). اتکای انحصاری به این شاخص، دلیل اصلی تداوم ساخت‌وسازهای ناکارآمد انرژی در ایران است.

قدرت و محوریت شاخص هزینه چرخه عمر (NPV): شاخص LCC (NPV) بدون شک قوی‌ترین، جامع‌ترین و حیاتی‌ترین معیار اقتصادی برای مقایسه گزینه‌های سرمایه‌گذاری در ساختمان است. این تنها شاخصی است که به صورت استاندارد (ISO 15686-5, 2017)، «ارزش زمانی پول» (با نرخ تنزیل ۸٪)، تمام هزینه‌های آتی بهره‌برداری (OPEX)، تمام هزینه‌های آتی جایگزینی، و حتی سناریوهای مختلف افزایش قیمت انرژی را در یک عدد واحد، عینی و قابل‌مقایسه خلاصه می‌کند. این شاخص به ما اجازه داد تا برتری اقتصادی قاطع گزینه‌های الف و ب را، علی‌رغم CAPEX بالای آن‌ها، به صورت کمی و غیرقابل‌انکار اثبات کنیم. LCC (NPV) زبان مشترک میان مهندسان پایداری (که به دنبال کاهش مصرف انرژی هستند) و سرمایه‌گذاران مالی (که به دنبال حداکثر کردن بازده بلندمدت هستند) می‌باشد.

تله دوره بازگشت سرمایه^{۹۳}: شاخص دوره بازگشت سرمایه^{۹۴} به دلیل سادگی در محاسبه و درک، به شدت مورد علاقه بسیاری از سرمایه‌گذاران و مدیران پروژه است (Rathnayake & Rameezdeen, 2023). نتایج ما نشان می‌دهد که این شاخص مفید است، اما می‌تواند یک «تله» خطرناک باشد. اگر به جدول ۲ نگاه کنیم، گزینه الف (پوسته پیشرفته) دوره بازگشت سرمایه ۷٫۴ ساله دارد، در حالی که گزینه ب (HVAC راندمان بالا) دوره بازگشت ۸٫۱ ساله دارد. مدیری که صرفاً بر اساس PBP قضاوت کند، گزینه الف را انتخاب خواهد کرد، زیرا «سریع‌تر» پول خود را بازمی‌گرداند. اما این یک تصمیم اشتباه در افق بلندمدت است. تحلیل LCC (NPV) به وضوح نشان داد که گزینه ب (=LCC ۷۵) در بلندمدت (۳۰ سال)، گزینه اقتصادی‌تری نسبت به گزینه الف (=LCC ۸۰) است. این تناقض به این دلیل رخ می‌دهد که PBP، تمام جریان‌های نقدی مثبت پس از دوره بازگشت را نادیده می‌گیرد. گزینه ب اگرچه حدود ۸ ماه دیرتر به نقطه سر به سر می‌رسد، اما پس از آن، صرفه‌جویی بسیار بیشتری (۵۰٪) در مقابل ۴۰٪ در هر سال ایجاد می‌کند که این صرفه‌جویی مازاد، در افق ۳۰ ساله، منجر به برتری LCC آن می‌شود. این یافته حیاتی نشان می‌دهد که PBP باید به عنوان یک شاخص کمکی^{۹۵} و نه اصلی^{۹۶} استفاده شود و اتکای صرف به آن، منجر به انتخاب گزینه‌های «خوب» به جای گزینه‌های «عالی» می‌شود.

ضرورت شاخص‌های غیرمالی و «محدودیت‌های LCC»: مهم‌ترین یافته در تحلیل شاخص‌ها، تحلیل «گزینه ج» (مدیریت آب) است. اگر تصمیم‌گیری صرفاً بر اساس شاخص‌های مالی (چه LCC و چه PBP) بود، گزینه ج (=LCC ۹۰) به گزینه‌های الف و ب (=LCC ۸۰ و ۷۵) ترجیح داده نمی‌شد. LCC آن ۱۰ واحد از گزینه الف گران‌تر و PBP آن تقریباً ۳ سال طولانی‌تر بود. اینجاست که «داشبورد شاخص‌ها» (جدول ۱) و درک «محدودیت‌های LCC» اهمیت حیاتی می‌یابد. LCC (NPV) یک ابزار اقتصادی و مالی است؛ این ابزار، «ارزش» را معادل «هزینه پولی» می‌داند. اما پایداری ابعاد دیگری نیز دارد.

Dashboard^{۹۰}
Misleading Indicator^{۹۱}
Invisible Costs^{۹۲}
The PBP Trap^{۹۳}
PBP^{۹۴}
Secondary Indicator^{۹۵}
Primary^{۹۶}

LCC نمی‌تواند ارزش استراتژیک صرفه‌جویی در آب را در شهری مانند تهران، که با بحران آب و فرونشست زمین مواجه است، به درستی منعکس کند. چرا؟ زیرا تعرفه آب در ایران هنوز به صورت یارانه‌ای و بسیار پایین‌تر از ارزش واقعی^{۹۷} آن قیمت‌گذاری شده است (Park et al., 2023). بنابراین، LCC گزینه ج (۹۰) بالا به نظر می‌رسد، چون صرفه‌جویی مالی در آب، ناچیز است. اما شاخص فیزیکی (صرفه‌جویی ۴۰٪ آب) و امتیاز پایداری (۶) نشان می‌دهد که این گزینه، ارزشی استراتژیک و زیست‌محیطی دارد که در محاسبات LCC منعکس نشده است. این یافته نشان می‌دهد که تصمیم نهایی، یک بهینه‌سازی چندهدفه^{۹۸} است. آیا کارفرما (یا جامعه) حاضر است ۱۰ واحد شاخص LCC (معادل تفاوت ۹۰ و ۸۰) بیشتر بپردازد تا ۴۰٪ در مصرف آب صرفه‌جویی کند؟ این یک تصمیم استراتژیک است که چارچوب ما آن را «شفاف» می‌سازد. این نشان می‌دهد که LCC باید همیشه در کنار شاخص‌های عملکرد فیزیکی (مانند EUI و مصرف آب) و شاخص‌های کیفی ارزیابی شود.

۴-۴. پیامدهای عملی برای صنعت ساختمان ایران

نتایج این «آزمایشگاه مجازی»، که بر مفروضات واقع‌گرایانه بازار ایران (نرخ تنزیل ۸٪، تعرفه‌های انرژی و الزامات مبحث ۱۹) استوار است، پیامدهای مستقیم، فوری و قابل توجهی برای ذینفعان کلیدی صنعت ساختمان کشور دارد. این نتایج نباید صرفاً به عنوان یک تمرین آکادمیک تلقی شوند، بلکه باید به عنوان یک «نقشه راه» عملی برای تغییر پارادایم در صنعت ساختمان ایران مورد استفاده قرار گیرند.

پیام برای سازندگان و سرمایه‌گذاران: پایداری یک استراتژی سودآور است. پیام اصلی این تحقیق برای بخش خصوصی (سازندگان، انبوه‌سازان و سرمایه‌گذاران) روشن و صریح است: «سرمایه‌گذاری در پایداری، هزینه نیست، بلکه سرمایه‌گذاری سودآور بلندمدت است». نتایج کمی (جدول ۲) به زبان اعداد نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری اولیه اضافی ۱۰٪ تا ۱۵٪ (در گزینه‌های الف و ب)، نه تنها یک هزینه سوخت‌شده یا یک اقدام لوکس نیست، بلکه یک سرمایه‌گذاری کاملاً بازگشت‌پذیر است (با ۷BPB تا ۸ ساله) که منجر به کاهش چشمگیر ۲۰٪ تا ۲۵٪ در هزینه کل مالکیت (LCC) در بلندمدت می‌شود. این یک توجیه اقتصادی قدرتمند است. در یک بازار رقابتی، سازنده‌ای که از این چارچوب استفاده کند، می‌تواند محصولی (ساختمان) با کیفیت بالاتر، هزینه جاری بسیار کمتر برای بهره‌بردار (که یک مزیت رقابتی فوق‌العاده در هنگام فروش یا اجاره است)، و ارزش برند بالاتر^{۹۹} ارائه دهد. علاوه بر این، این یک استراتژی مدیریت ریسک^{۱۰۰} است. با توجه به روند جهانی و ضرورت ملی اصلاح یارانه‌های انرژی، قیمت حامل‌های انرژی در ایران در سال‌های آتی به ناچار افزایش خواهد یافت. ساختمانی که بر اساس «طرح پایه» (ناکارآمد) ساخته شده، در آینده با هزینه‌های بهره‌برداری سرسام‌آور مواجه خواهد شد و ارزش خود را از دست می‌دهد، در حالی که گزینه‌های الف و ب، در برابر این شوک‌های قیمتی مصون^{۱۰۱} هستند. چارچوب VE-LCC ارائه‌شده در این مقاله، ابزار دقیقی را برای محاسبه، اثبات و «بازاریابی» این سودآوری به نهادهای مالی (جهت اخذ تسهیلات) و خریداران نهایی فراهم می‌کند.

پیام برای سیاست‌گذاران: حرکت از الزام به حداقل به تشویق به بهینگی شاید مهم‌ترین پیامد این تحقیق، متوجه نهادهای قانون‌گذار (مانند وزارت راه و شهرسازی، سازمان ملی استاندارد، و شهرداری‌ها) باشد. مطالعه ما به طور کمی اثبات کرد که انطباق حداقلی با مبحث ۱۹ مقررات ملی (طرح پایه)، ناکارآمدترین و غیراقتصادی‌ترین گزینه از منظر چرخه عمر ساختمان و منافع ملی است. مشکل اینجاست که سیستم فعلی، که مبتنی بر الزام به حداقل‌ها^{۱۰۲} است، سازندگان را تشویق می‌کند تا دقیقاً روی خط حداقل حرکت کنند (همانطور که در طرح پایه نشان داده شد)، زیرا هیچ منفعت اقتصادی مستقیمی برای فراتر رفتن از آن نمی‌بینند. سیاست‌گذاران باید به سمت تشویق به بهینگی^{۱۰۳} حرکت کنند. این پژوهش پیشنهاد می‌کند که به جای

Scarcity Value^{۹۷}
Multi-Objective Optimization^{۹۸}
Green Branding^{۹۹}
Risk Management Strategy^{۱۰۰}
Hedged^{۱۰۱}
Prescriptive Minimums^{۱۰۲}
Performance-Based Incentives^{۱۰۳}

تمرکز بر جریمه کردن کسانی که مبحث ۱۹ را رعایت نمی‌کنند، باید مشوق‌های اقتصادی فعال^{۱۰۴} برای سازندگانی در نظر گرفته شود که فراتر از مبحث ۱۹ عمل می‌کنند. برای مثال، می‌توان با استفاده از همین چارچوب، مشوق‌هایی (مانند تخفیف‌های قابل توجه در عوارض شهرداری، اعطای تراکم تشویقی، یا معرفی به بانک‌ها برای تسهیلات ارزان‌قیمت‌تر ساختمان سبز) برای پروژه‌هایی تعریف کرد که بتوانند با استفاده از یک تحلیل LCC استاندارد (مانند مدل ارائه‌شده)، ثابت کنند که LCC پروژه آن‌ها به طور قابل توجهی (مثلاً ۱۵٪ یا بیشتر) پایین‌تر از یک خط پایه (Baseline) تعریف‌شده رسمی (معادل طرح پایه ما) است. این امر، نوآوری (مانند گزینه‌های الف، ب، یا ج) را جایگزین انطباق حداقلی کرده و اهداف ملی پایداری و بهره‌وری انرژی را با منافع اقتصادی بلندمدت سازندگان همسو می‌سازد.

۵- نتیجه گیری

این پژوهش با هدف تحلیل نقش مهندسی ارزش (VE) در افزایش پایداری و کاهش هزینه چرخه عمر (LCC) ساختمان‌های سبز در زمینه صنعت ساختمان ایران انجام شد. در پاسخ به تضاد سنتی درک‌شده میان VE (به عنوان کاهنده هزینه اولیه) و پایداری (به عنوان عامل افزایش‌دهنده هزینه اولیه)، این مقاله یک چارچوب یکپارچه VE-LCC-Sustainability را توسعه داد و آن را از طریق یک مطالعه موردی (آزمایشگاه مجازی) به صورت کمی اعتبارسنجی کرد. یافته‌های کلیدی، سهم نوآورانه، و مسیرهای آتی این پژوهش به شرح زیر است.

۱-۵. خلاصه یافته‌های کلیدی

مطابق با الزامات نشریه مبنی بر ارائه نتایج کمی و پرهیز از کلی‌گویی، یافته‌های اصلی حاصل از تحلیل «اصل کار» (بخش ۴) به صورت ردیف‌گذاری شده ارائه می‌گردد:

۱. ناکارآمدی انطباق حداقلی: نتایج به وضوح اثبات کرد که طرح پایه (Baseline)، که صرفاً منطبق بر حداقل‌های مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان است، «غیراقتصادی‌ترین» گزینه در بلندمدت بوده و بالاترین هزینه چرخه عمر (LCC) را (با شاخص ۱۰۰) به مالک تحمیل می‌کند.

۲. اثبات تز اصلی (هم‌افزایی): تضاد میان هزینه اولیه و پایداری رد شد. «گزینه ب» (HVAC راندمان بالا) که دارای بیشترین هزینه اولیه (+۱۵٪) بود، در نهایت به کمترین هزینه چرخه عمر ($LCC=75\%$) دست یافت. این یافته به طور کمی اثبات می‌کند که سرمایه‌گذاری اولیه هوشمندانه در پایداری، منجر به کاهش ۲۵ درصدی هزینه کل مالکیت در افق ۳۰ ساله می‌شود.

۳. تأیید چارچوب یکپارچه: مطالعه نشان داد که اگر کارکرد (Function) به درستی (یعنی پایداری) و هزینه (Cost) به درستی (یعنی LCC) تعریف شوند، مهندسی ارزش از یک ابزار حذف‌کننده پایداری، به یک موتور محرک قدرتمند برای یافتن و توجیه اقتصادی خلاقانه‌ترین راه‌حل‌های پایدار تبدیل می‌گردد.

۴. تله شاخص دوره بازگشت سرمایه: این پژوهش نشان داد که اتکای صرف به شاخص PBP می‌تواند گمراه‌کننده باشد. «گزینه الف» (پوسته پیشرفته) با PBP (۷,۴ سال) سریع‌تر از «گزینه ب» (۸,۱ سال) بود، اما تحلیل LCC (NPV) اثبات کرد که «گزینه ب» ($LCC=75\%$) در بلندمدت، انتخاب اقتصادی برتری نسبت به «گزینه الف» ($LCC=80\%$) است.

۵. ضرورت ارزیابی چندهدفه: شاخص LCC به تنهایی قادر به سنجش تمام ابعاد پایداری نیست. «گزینه ج» (مدیریت آب) اگرچه از نظر مالی بهینه نبود ($LCC=90\%$)، اما تنها گزینه‌ای بود که به بحران حیاتی «آب» (یک شاخص پایداری غیرمالی) پاسخ می‌داد. این امر ضرورت استفاده از یک «داشبورد شاخص» (جدول ۱) به جای اتکای به یک شاخص واحد را اثبات می‌کند.

۲-۵. سهم نوآورانه تحقیق (Contribution)

برخلاف مطالعات پیشین که اغلب به صورت مجزا به LCC، VE یا پایداری پرداخته‌اند، سهم نوآورانه^{۱۰۵} اصلی این پژوهش، ارائه یک چارچوب روش‌شناختی یکپارچه، عملیاتی و بومی‌سازی شده برای صنعت ساختمان ایران است. این چارچوب برای اولین بار سه حوزه تخصصی متمایز را به صورت سیستمی به یکدیگر پیوند می‌دهد: ۱. متدولوژی استاندارد مهندسی ارزش (برنامه کاری SAVE International) به عنوان موتور محرک فرآیند. ۲. استاندارد بین‌المللی ISO 15686 به عنوان مبنای محاسباتی دقیق LCC. ۳. الزامات بومی مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان به عنوان خط پایه (Baseline) پایداری.

این مقاله، بحث را از تقابل نظری «هزینه در برابر پایداری» فراتر برده و یک ابزار کمی و قابل دفاع برای تصمیم‌گیری مبتنی بر ارزش واقعی^{۱۰۶} در اختیار سازندگان، سرمایه‌گذاران و همچنین سیاست‌گذاران در ایران قرار می‌دهد. این چارچوب نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از پتانسیل خلاقیت مهندسی ارزش برای دستیابی همزمان به منافع اقتصادی بلندمدت و الزامات زیست‌محیطی ملی استفاده کرد.

۳-۵. محدودیت‌ها و پیشنهادها برای تحقیقات آتی

اذعان به محدودیت‌های پژوهش، بخش جدایی‌ناپذیر یک کار علمی دقیق است. مهم‌ترین محدودیت‌های این مطالعه عبارتند از:

۱. ماهیت آزمایشگاه مجازی: مطالعه موردی این پژوهش، اگرچه بر اساس مفروضات واقع‌گرایانه^{۱۰۷} بنا شده بود، اما همچنان یک سناریوی فرضی و شبیه‌سازی شده است. این مدل، «تویز» داده‌های دنیای واقعی، مانند خطاهای اجرایی، نوسانات شدید و غیرقابل‌پیش‌بینی قیمت مصالح، یا الگوهای رفتاری واقعی ساکنین^{۱۰۸} را در نظر نمی‌گیرد.

۲. حساسیت به مفروضات اقتصادی: نتایج LCC (NPV) به شدت به مفروضات اقتصادی کلیدی، به ویژه «نرخ تنزیل واقعی» (۸٪) و «نرخ افزایش آتی بهای انرژی» (۲٪) وابسته است. تغییر در این دو متغیر می‌تواند رتبه‌بندی اقتصادی گزینه‌های الف و ب را جابجا کند. ۳. عدم کمی‌سازی پولی اثرات خارجی: مدل LCC مورد استفاده، بر هزینه‌های مالی مستقیم متمرکز بود و قادر به کمی‌سازی پولی^{۱۰۹} ارزش استراتژیک «گزینه ج» (صرفه‌جویی در آب) یا هزینه اجتماعی انتشار کربن نبود (Park et al., 2023).

بر اساس این محدودیت‌ها، مسیرهای زیر برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد: ۱. اعتبارسنجی در پروژه واقعی: حیاتی‌ترین گام بعدی، اعمال کامل این چارچوب یکپارچه بر روی یک پروژه ساختمان سبز واقعی در حال ساخت در ایران (به عنوان مثال در تهران) و مقایسه نتایج پیش‌بینی شده LCC با داده‌های عملکردی واقعی پس از ساخت است. ۲. تحلیل حساسیت جامع: انجام یک تحلیل حساسیت چندمتغیره جامع بر روی نرخ تنزیل و نرخ‌های مختلف افزایش قیمت انرژی و آب، تا پایداری نتایج^{۱۱۰} در سناریوهای مختلف اقتصادی سنجیده شود. ۳. توسعه به مدل LCCA/Triple Bottom Line: گسترش مدل LCC فعلی به ارزیابی هزینه چرخه عمر زیست‌محیطی (LCCA) یا یک مدل کامل خط سه‌گانه^{۱۱۱} که تلاش کند اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی (مانند ارزش آب) را به صورت پولی کمی‌سازی کرده و در تحلیل ارزش ادغام نماید.

Contribution^{۱۰۵}

True Value-Based Decision Making^{۱۰۶}

Realistic Assumptions^{۱۰۷}

Occupant Behavior^{۱۰۸}

Monetization^{۱۰۹}

Robustness^{۱۱۰}

Triple Bottom Line^{۱۱۱}

مراجع

- Ade, K., TCH, B., & PK, C. (2022). A critical review on the integration of value engineering and sustainable building design. *Journal of Green Building*, 17(4), 101-125.
- Al-Karim, H., Abdullah, S., & Rahman, M. (2022). Integrating sustainability experts in VE workshops: A case study on high-performance buildings. *Journal of Construction Engineering and Project Management*, 12(3), 45-59.
- Bakhitari, A., Ebrahimnejad, S., & Asli, H. (2023). Energy consumption modeling for residential buildings in Iran: A response to new national regulations (Mabhas 19). *Energy and Buildings*, 280, 112734.
- Ghaffar, S. H., Manjunath, B. R., & Valal, M. (2023). A review of life cycle costing in green building projects: Challenges and future prospects. *Developments in the Built Environment*, 14, 100123.
- Gouda, A., Al-Hazmi, N., & Hassan, M. (2022). The perceived conflict between value engineering and sustainable construction: An empirical study. *Buildings*, 12(5), 621.
- International Organization for Standardization. (2017). ISO 15686-5: Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing. ISO.
- Iranian National Building Regulations. (2020). Mabhas 19: Energy saving (4th Revision). Ministry of Roads and Urban Development. [In Persian]
- Kim, J., Lee, H., & Park, M. (2022). Re-engineering value engineering for sustainable infrastructure: A review of post-2020 literature. *Infrastructures*, 7(8), 105.
- Olanrewaju, A., Khew, S. F., & Al-Ashmori, Y. Y. (2023). Synergizing LCC, LCA, and VE for optimal sustainable building design in Malaysia. *Cleaner Engineering and Technology*, 12, 100609.
- Park, S., Kim, Y., & Han, S. (2023). A framework for integrating LCC into the early design phase of green residential buildings. *Sustainability*, 15(2), 1450.
- Rathnayake, R. M. I. U., & Rameezdeen, R. (2023). Life cycle cost as the driver for sustainable decision-making in building projects. *Built Environment Project and Asset Management*, 13(3), 405-420.
- SAVE International. (2017). Value methodology standard. SAVE International.
- Zhong, L., & Chen, J. (2023). Application of front-end value engineering for optimizing the life cycle value of sustainable buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 22(1), 235-251.
- in building projects. *Built Environment Project and Asset Management*, 13(3), 405-420.
- SAVE International. (2017). Value methodology standard. SAVE International.
- Zhong, L., & Chen, J. (2023). Application of front-end value engineering for optimizing the life cycle value of sustainable buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 22(1), 235-251.