



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

Research Article

Application of Value Engineering in Optimizing the Supply Chain of Construction and Industrial Projects

Ali Mirzadeh¹, Mohsen MohammadiZadeh^{2*}

1- PhD student of Structural Engineering, department of Civil Engineering, S.I.C,
Islamic Azad University, Sirjan, Iran

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

Received: 24 November 2025; Revised: 13 December 2025; Accepted: 28 December 2025; Published: 23 July 2026

Abstract

This study adopts a combined, evidence-based approach to propose an integrated analytical-executive framework for optimizing supply chains in complex chemical engineering projects through value engineering. Results indicate that in high operational-risk environments, value engineering should shift from mere cost reduction to multi-objective life-cycle cost optimization. Findings include the identification of causal relationships between enabling constructs (e.g., supplier technical involvement and digital modeling) and final performance indicators (NPV and operational risk). Early engagement of specialized suppliers enables realistic evaluation of technical trade-offs. Simulations demonstrate that investment in this framework, despite slight increases in CAPEX and extended basic engineering phases, results in a 6% reduction in specific energy consumption and a 33% reduction in unexpected downtime risk. The proposed framework, aligning technical, informational, contractual, and organizational layers, assists project managers in making optimized, resilient, and innovation-driven supply decisions.

Keywords: Value Engineering, Supply Chain, Multi-objective Optimization, Chemical Engineering Projects, Technical Innovation

Cite this article as MohammadiZadeh,M and Mirzadeh,A . (2026). Application of Value Engineering in Optimizing the Supply Chain of Construction and Industrial Projects. (e237455). Civil and Project, 8(5), e237455 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2025.568523.1424>

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.

*Corresponding author E-mail address: mohsen,mohammadizadeh@iau.ac.ir



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

کاربرد مهندسی ارزش در بهینه‌سازی زنجیره تامین پروژه‌های ساختمانی و صنعتی

علی میرزاده^۱، محسن محمدی زاده^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای سازه، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران
۲*- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

تاریخ دریافت: ۰۳ آذر ۱۴۰۴ ؛ تاریخ بازنگری: ۲۲ آذر ۱۴۰۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۰۷ دی ۱۴۰۴ ؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ مرداد ۱۴۰۵

چکیده

این پژوهش با رویکرد ترکیبی و مبتنی بر شواهد صنعتی، چارچوب تحلیلی-اجرایی یکپارچه‌ای برای بهینه‌سازی زنجیره تامین در پروژه‌های پیچیده مهندسی شیمی از طریق مهندسی ارزش ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مهندسی ارزش در محیط‌های با ریسک عملیاتی بالا باید از کاهش هزینه صرف به بهینه‌سازی چندمتغیره هزینه چرخه عمر منتقل شود. یافته‌ها شامل شناسایی روابط علی-معلولی بین سازه‌های توانمندساز (نظیر مشارکت فنی تأمین‌کننده و مدل‌سازی دیجیتال و شاخص‌های عملکرد نهایی NPV و ریسک عملیاتی است. مشارکت زود هنگام تأمین‌کنندگان متخصص امکان ارزیابی دقیق trade-off فنی را فراهم می‌آورد. شبیه‌سازی‌ها نشان داد سرمایه‌گذاری در این چارچوب، علی‌رغم افزایش اندک CAPEX و طولانی‌تر شدن فاز مهندسی پایه، منجر به کاهش ۶٪ مصرف انرژی ویژه و کاهش ۳۳٪ ریسک توقف ناخواسته می‌شود. چارچوب پیشنهادی با هم‌ترازی لایه‌های فنی، اطلاعاتی، قراردادی و سازمانی، مدیران پروژه را در تصمیم‌گیری بهینه، تقویت تاب‌آوری و افزایش نوآوری فنی یاری می‌کند.

کلمات کلیدی: مهندسی ارزش، زنجیره تامین، بهینه‌سازی چندمتغیره، پروژه‌های مهندسی شیمی، نوآوری فنی

نویسنده مسئول: * Mohsen.mohammadizadeh@iaau.ac.ir

۱- مقدمه

پروژه‌های صنعتی سرمایه‌بر، به‌ویژه در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، به دلیل مقیاس بزرگ سرمایه‌گذاری، پیچیدگی فنی، تنوع ذی‌نفعان و وابستگی شدید به زنجیره تأمین، همواره با چالش‌های قابل‌توجهی در دستیابی به اهداف هزینه، زمان و عملکرد مواجه بوده‌اند. بخش عمده‌ای از این چالش‌ها ریشه در تصمیم‌گیری‌های اولیه طراحی، انتخاب تأمین‌کنندگان و نحوه یکپارچه‌سازی فرآیندهای فنی و تدارکاتی داشته است؛ به‌گونه‌ای که عدم هماهنگی میان اجزای زنجیره تأمین، منجر به افزایش هزینه‌های چرخه عمر، کاهش قابلیت اطمینان عملیاتی و افزایش ریسک توقف‌های ناخواسته در دوره بهره‌برداری شده است (Christopher, 2016; Flyvbjerg, 2014).

در این میان، مهندسی ارزش به‌عنوان یک رویکرد نظام‌مند و کارکردمحور، با هدف بهینه‌سازی ارزش از طریق ایجاد توازن میان عملکرد، کیفیت و هزینه، مورد توجه مدیران پروژه و پژوهشگران قرار گرفته است (SAVE International, ۲۰۱۵). وجود این، شواهد تجربی نشان داده است که کاربرد مهندسی ارزش در بسیاری از پروژه‌های صنعتی، عمدتاً به مراحل اولیه طراحی محدود شده و تمرکز آن بیش از حد بر کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای کوتاه‌مدت بوده است. این رویکرد محدود، نه‌تنها منجر به نادیده‌گرفتن هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری و ریسک‌های بلندمدت شده، بلکه در برخی موارد باعث انتقال هزینه‌ها به مراحل بعدی چرخه عمر پروژه گردیده است (Shen & Chung, 2018).

از سوی دیگر، نقش زنجیره تأمین در موفقیت پروژه‌های صنعتی طی سال‌های اخیر پررنگ‌تر شده است. تأمین‌کنندگان تجهیزات کلیدی و پیمانکاران تخصصی، به دلیل در اختیار داشتن دانش فنی، تجربه عملیاتی و اطلاعات چرخه عمر دارایی‌ها، می‌توانند سهم بسزایی در بهبود تصمیم‌گیری‌های مهندسی و افزایش ارزش کل پروژه ایفا کنند. با این حال، ساختارهای قراردادی سنتی، تفکیک وظایف سازمانی و فقدان سازوکارهای مشارکتی، مانع از بهره‌گیری مؤثر از این ظرفیت‌ها در فرآیند مهندسی ارزش شده است (Vrijhoef & Koskela, 2000; Eriksson, 2015).

مرور پیشینه پژوهش نشان داد که اگرچه مطالعات متعددی به بررسی مهندسی ارزش یا مدیریت زنجیره تأمین به‌صورت جداگانه پرداخته‌اند، اما پژوهش‌های اندکی به ارائه یک چارچوب عملیاتی یکپارچه پرداخته‌اند که بتواند مهندسی ارزش را به‌صورت ساخت‌یافته در مدیریت زنجیره تأمین پروژه‌های صنعتی مستقر سازد. علاوه بر این، در اغلب پژوهش‌های موجود، ارزیابی اثربخشی چارچوب‌های پیشنهادی محدود به تحلیل‌های کیفی بوده و کمتر از ابزارهای کمی و شبیه‌سازی برای راستی‌آزمایی نتایج استفاده شده است (Koskela et al., 2019).

بر این اساس، خلأ اصلی پژوهش حاضر، نبود یک چارچوب جامع، چرخه‌عمرمحور و مبتنی بر شواهد کمی برای استقرار مهندسی ارزش در زنجیره تأمین پروژه‌های صنعتی شناسایی شد. در پاسخ به این خلأ، پژوهش حاضر با هدف تدوین و ارزیابی یک چارچوب عملیاتی یکپارچه انجام گرفت که ضمن شناسایی عوامل حیاتی موفقیت، اولویت‌بندی آن‌ها و مشارکت فعال تأمین‌کنندگان، بتواند اثرات بلندمدت تصمیمات مهندسی ارزش را بر عملکرد، ریسک و ارزش اقتصادی پروژه‌ها تبیین نماید. نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب روش‌های کیفی و کمی، استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای برای وزن‌دهی عوامل و به‌کارگیری شبیه‌سازی عامل‌بنیاد برای ارزیابی اثربخشی چارچوب پیشنهادی در یک محیط واقعی صنعتی نهفته است.

۲- پیشینه پژوهش

تحقیقات مرتبط با مهندسی ارزش (Value Engineering) در پروژه‌های عمرانی و صنعتی نشان داده‌اند که این رویکرد نظام‌مند می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی هزینه، بهبود کیفیت و افزایش کارایی زنجیره تأمین ایفا کند. مهندسی ارزش با تجزیه و تحلیل عملکردها و ارائه راهکارهای جایگزین، بر افزایش ارزش چرخه عمر پروژه متمرکز است (Asa, Iskandar, Karim, & Berawi, 2025).

مطالعات متعدد اثربخشی مهندسی ارزش را در پروژه‌های مختلف بررسی کرده‌اند. به‌طور مثال، Asa و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که به‌کارگیری تحلیل مهندسی ارزش در پروژه‌های ساختمانی منجر به کاهش قابل‌توجه هزینه‌ها و بهبود عملکرد می‌شود. پژوهش‌های دیگری نیز بر انتخاب مصالح و ترکیب آن با فرآیندهای چندمعیاره در چارچوب BIM تأکید دارند، که نقش مهندسی ارزش در بهینه‌سازی انتخاب مواد در پروژه‌های ساخت را برجسته می‌کند (Integrated value engineering and multi-criteria decision making process in BIM framework for pipe materials selection, 2025).

در زمینه تلفیق مهندسی ارزش با فناوری‌های نوین، تحقیقات نشان داده‌اند که ادغام BIM با مهندسی ارزش می‌تواند به کاهش هزینه، زمان و بهبود کیفیت پروژه‌ها منجر شود. نمونه‌های موردی نشان داده‌اند که این ترکیب، همکاری ذی‌نفعان را بهبود داده و تصمیم‌گیری را داده‌محور و چندبعدی می‌کند. (Gouda, Alqahtani, Ismail, & Nabawy, 2024)

برخی مطالعات به بررسی رویکردهای نوآورانه در مدیریت ارزش پرداخته‌اند. چارچوب‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای مدیریت ارزش، با بهره‌گیری از تحلیل‌های پیش‌بینی و تصمیم‌گیری چندمعیاره، توانسته‌اند تصمیمات پروژه را در طول چرخه عمر بهبود دهند. (AI driven value management framework, 2025)

در ایران نیز تحقیقات متعددی منتشر شده‌اند. مقالات نشریه عمران و پروژه به بررسی نقش مهندسی ارزش در پروژه‌ها پرداخته و مدل‌های تحلیل و استانداردهای بین‌المللی ارزش را با دیدگاهی تطبیقی ارائه کرده‌اند، از جمله مدل‌های بهینه‌سازی برای بستر ایران. (Comparative analysis of international value engineering standards, 2025) همچنین پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مهندسی ارزش می‌تواند با کاهش هزینه چرخه عمر و افزایش پایداری ساختمان‌های سبز، عملکرد اقتصادی و محیطی پروژه‌ها را بهبود دهد (Analysing the role of value engineering in increasing sustainability and reducing life cycle costs, 2025).

در نگرش کاربردی، Zhou و همکاران (۲۰۲۵) مسیر تکاملی رفتارهای هم‌خلق ارزش در پروژه‌های ساخت تحت چارچوب تأمین مالی زنجیره ارزش را بررسی کردند و نشان دادند که مشارکت ذی‌نفعان اثرات مثبتی بر هم‌افزایی ارزش دارد. مطالعات حوزه پروژه‌های راه‌سازی نیز نشان داده‌اند که مهندسی ارزش تأثیر مثبت و معناداری بر موفقیت پروژه‌ها دارد (اعتباری، ۱۴۰۳). در پروژه‌های زیرساختی با رویکرد پایدار، به‌کارگیری مهندسی ارزش بهره‌وری و عملکرد پروژه را بهبود بخشیده است (Hamed & Gohar, 2025).

با وجود تنوع این مطالعات، خلأهای مهمی همچنان وجود دارد؛ از جمله نیاز به چارچوب‌های یکپارچه که همزمان ابعاد زنجیره تأمین و مشارکت تأمین‌کنندگان را در نظر گرفته و اثرات بلندمدت تصمیمات مهندسی ارزش را بر شاخص‌های عملکردی و اقتصادی نشان دهد. این خلأ، ضرورت پژوهش حاضر را برجسته می‌سازد.

۳- روش تحقیق

این پژوهش با هدف توسعه یک چارچوب عملیاتی برای یکپارچه‌سازی مؤثر مهندسی ارزش در مدیریت زنجیره تأمین پروژه‌های صنعتی پیچیده، به ویژه در حوزه مهندسی شیمی، طراحی و اجرا می‌شود. رویکرد کلی تحقیق، آمیخته (ترکیبی) (از روش‌های کیفی و کمی است که در سه فاز متوالی انجام می‌پذیرد. این طراحی چندمرحله‌ای به درک عمیق از ماهیت مسئله، استخراج عوامل کلیدی و در نهایت اعتبارسنجی و تعمیم‌پذیری یافته‌ها کمک می‌کند.

مطالعه اکتشافی کیفی و طراحی چارچوب اولیه

از روش مطالعه موردی چندگانه استفاده می‌شود. حداقل چهار پروژه بزرگ صنعتی در حوزه پتروشیمی، پالایشی یا انرژی که به طور رسمی از مهندسی ارزش در فرآیندهای تأمین خود استفاده کرده‌اند، انتخاب خواهند شد.

- داده‌ها از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته عمیق با خبرگان کلیدی هر پروژه جمع‌آوری می‌شود. جامعه نمونه شامل مدیران ارشد پروژه، رهبران کارگاه‌های مهندسی ارزش، مدیران خرید و تأمین، مهندسين فرآیند و نمایندگان تأمین‌کنندگان اصلی است. همچنین، مطالعه اسناد پروژه (گزارش‌های مهندسی ارزش، مستندات مناقصه، قراردادهای و گزارش‌های عملکرد تأمین) به عنوان مثلث‌سازی داده انجام می‌گیرد.
- داده‌های کیفی حاصل از مصاحبه‌ها با استفاده از روش تحلیل مضمون در نرم‌افزار MAXQDA کدگذاری و تحلیل می‌شوند. هدف، استخراج مضامین اصلی و فرعی مرتبط با فرآیندها، روابط سازمانی، مؤلفه‌های فناورانه و معیارهای ارزیابی موفقیت است.
- خروجی این فاز، طراحی چارچوب مفهومی اولیه پژوهش خواهد بود که روابط بین عوامل شناسایی شده (مانند یکپارچه‌سازی فرآیندی، قابلیت‌های فناوری اطلاعات، عوامل انسانی و قراردادی) و نتایج مطلوب در زنجیره تأمین (هزینه چرخه عمر، زمان، قابلیت اطمینان، پایداری) را ترسیم می‌کند.

توسعه و کمی‌سازی چارچوب و شاخص‌ها

- از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و به طور خاص، از فرآیند تحلیل شبکه‌ای استفاده می‌شود. دلیل انتخاب ANP، توانایی آن در مدل‌سازی تعاملات و بازخورهای پیچیده بین معیارها و زیرمعیارها در یک سیستم پویا مانند زنجیره تأمین است.
- داده‌های لازم برای ANP از طریق یک پرسشنامه مقایسات زوجی که برای خبرگان (همان جامعه فاز اول و همچنین اساتید دانشگاهی صاحب‌نظر) ارسال می‌شود، جمع‌آوری می‌گردد. این پرسشنامه وزن و اهمیت نسبی معیارها و زیرمعیارها (مانند وزن "استانداردسازی اطلاعات" نسبت به "تشکیل تیم فراتابعی" در دستیابی به "کاهش ریسک تأمین") را می‌سنجد.
 - داده‌های پرسشنامه با استفاده از نرم‌افزار Super Decisions تحلیل می‌شود تا وزن نهایی هر عامل و شاخص در مدل نهایی تعیین گردد.
 - خروجی اصلی این فاز، یک مدل سلسله‌مراتبی-شبکه‌ای وزندهی شده است که عوامل کلیدی و KPI های بهینه‌سازی زنجیره تأمین از طریق مهندسی ارزش را به همراه میزان اهمیت هر یک، مشخص می‌کند. همچنین، یک کارت امتیازی متوازن (BSC) ویژه برای پایش عملکرد در چهار چشم‌انداز مالی، مشتری/تأمین‌کننده، فرآیندهای داخلی و یادگیری/ارشد، طراحی و شاخص‌های آن کمی‌سازی می‌شود.

اعتبارسنجی و تست مدل

- از شبیه‌سازی عامل‌بنیاد در نرم‌افزاری مانند AnyLogic استفاده می‌شود. در این شبیه‌سازی، عوامل مختلف (کارفرما، پیمانکار، تأمین‌کنندگان، تیم مهندسی ارزش) با قواعد رفتاری برگرفته از یافته‌های فازهای قبل، مدل می‌شوند.
- سناریوهای مختلفی از جمله اجرای چارچوب پیشنهادی در مقابل روش متداول، بروز اختلال در زنجیره تأمین، و تغییر پارامترهای کلیدی (مانند سطح اعتماد یا اشتراک اطلاعات) اجرا و نتایج مقایسه می‌شود.
 - در نهایت، مدل و چارچوب نهایی در قالب یک کارگاه مشترک با خبرگان ارائه و از طریق پرسشنامه ارزیابی اثر بخشی مبتنی بر روش دلفی اصلاح شده، اعتبار محتوایی و کاربردی آن مورد قضاوت نهایی قرار می‌گیرد.
 - روجی این فاز، یک چارچوب اجرایی راستی‌آزمایی شده به همراه دستورالعمل‌های عملیاتی و یک سیستم پایش و ارزیابی مبتنی بر شاخص‌های کمی است که می‌تواند به مدیران پروژه‌های صنعتی برای یکپارچه‌سازی مؤثر مهندسی ارزش در مدیریت زنجیره تأمین کمک کند.

این روش‌شناسی سه‌فازی، با حرکت از شناخت کیفی عمیق به سمت مدل‌سازی کمی و در نهایت اعتبارسنجی در یک محیط کنترل‌شده، می‌تواند یافته‌های مبتنی بر شواهد، قابل تعمیم و مستقیماً قابل اجرا برای صنعت تولید کند و شکاف بین تئوری و عمل در این حوزه را پر نماید.

۴- نتایج و یافته ها

یافته‌های این پژوهش که بر اساس روش‌شناسی سه‌فازی طرح‌ریزی شده، به صورت ساختاریافته در قالب جداول و تفسیرهای تحلیلی ارائه می‌گردد. این یافته‌ها منعکس‌کننده دیدگاهی تخصصی در حوزه مهندسی شیمی و مدیریت پروژه‌های صنعتی است.

تحلیل مضمون داده‌های حاصل از مصاحبه با ۲۵ خبره در چهار پروژه پتروشیمی (اتیلن، پلی‌اتیلن، PX و یک واحد تصفیه گاز) منجر به شناسایی ۵ مضمون اصلی و ۱۷ مضمون فرعی گردید که چارچوب مفهومی اولیه پژوهش را در جدول ۱ نشان می‌دهند.

جدول ۱: مضامین اصلی و فرعی استخراج شده از تحلیل کیفی

مضمون اصلی	مضمون فرعی	شرح کلیدی از دید مهندسی شیمی
الف) یکپارچه‌سازی فرآیندی	۱. هم‌راستایی فاز کارگاه VE با برنامه زمان‌بندی تأمین	ضرورت زمان‌بندی مطالعه ارزش در فاز امکان‌سنجی یا طراحی پایه، پیش از انعقاد قراردادهای کلان تأمین تجهیزات حیاتی مانند راکتورها و برج‌های تقطیر.
الف) یکپارچه‌سازی فرآیندی	۲. مکانیزم تصویب و پیگیری پیشنهادهای ارزش در فرآیند خرید	طراحی یک گردش کار رسمی برای ارزیابی فنی-اقتصادی پیشنهادهای تغییر مشخصات مواد شیمیایی یا کاتالیزورها توسط کمیته‌ای متشکل از مهندسين فرآیند، متالورژی و خرید.
ب) قابلیت‌های اطلاعاتی و فناوریانه	۳. پایگاه داده یکپارچه چرخه عمر تجهیزات	ایجاد مخزن داده شامل عملکرد واقعی تجهیزات تحت شرایط عملیاتی (دما، فشار، محیط خورنده) برای تحلیل ارزش در پروژه‌های آتی.
ب) قابلیت‌های اطلاعاتی و فناوریانه	۴. مدل‌سازی و شبیه‌سازی دیجیتال (FEED BIM/Digital Twin) مبتنی بر	استفاده از مدل‌های دیجیتال برای ارزیابی تأثیر تغییرات پیشنهادی مهندسی ارزش بر پارامترهای کلیدی فرآیند (نرخ تبدیل، خلوص، مصرف انرژی) قبل از اجرا.
ج) عوامل انسانی و سازمانی	۵. تیم فراتابعی با مشارکت تأمین‌کننده	حضور فعال نمایندگان فنی تأمین‌کنندگان مواد شیمیایی یا کاتالیزور در کارگاه ارزش برای ارائه دانش فنی در مورد قابلیت‌ها و محدودیت‌های محصولات.
ج) عوامل انسانی و سازمانی	۶. فرهنگ اعتماد و اشتراک دانش	غلبه بر نگرانی‌های محرمانگی اطلاعات فرآیندی (مثلاً نقشه‌های P&ID دقیق) برای دستیابی به تحلیل ارزش مؤثرتر.
د) عوامل قراردادی و مشوقی	۷. بندهای تقسیم منافع در قراردادهای تأمین	طراحی فرمول‌های عادلانه برای تقسیم صرفه‌جویی ناشی از پیشنهادهای ارزش بین کارفرما و پیمانکار/تأمین‌کننده، به ویژه در مورد صرفه‌جویی‌های عملیاتی بلندمدت.
د) عوامل قراردادی و مشوقی	۸. الزامات مشخصات فنی عملکردی (Performance-Based)	تدوین مشخصات بر اساس خروجی (مثلاً سرعت واکنش یا گزینش‌پذیری کاتالیزور) به جای مشخصات توصیفی صرف، که فضای خلاقیت برای تأمین‌کنندگان ایجاد می‌کند.
ه) شاخص‌های ارزیابی عملکرد	۹. شاخص‌های غیرمالی پیش‌نگر	معیارهایی مانند کاهش عددی ریسک فرآیند (Process Risk Number) ناشی از تغییرات یا بهبود بازده حرارتی کلی واحد که می‌توانند پیش از راه‌اندازی برآورد شوند.

یافته‌های کیفی به وضوح نشان می‌دهد که موفقیت مهندسی ارزش در زنجیره تأمین پروژه‌های شیمیایی، منوط به عبور از نگاه سنتی «کاهش هزینه خرید» به سوی پارادایم «بهینه‌سازی هزینه چرخه عمر از طریق همکاری فنی» است. نکته کلیدی، لزوم درگیر کردن دانش فنی تأمین‌کنندگان در مرحله طراحی مفهومی است. به عنوان مثال، در یک پروژه اتیلن، مشارکت سازنده کوره‌های کراکینگ در کارگاه ارزش، منجر به پیشنهاد تغییر در جنس لوله‌های رادیانتی شد که با وجود افزایش ۰.۸٪ در هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، انتظار می‌رود با افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش دوره‌های سرویس‌دهی، زمان عملکرد واحد را سالانه ۱۵

روز افزایش دهد. این تصمیم تنها با در نظر گرفتن هزینه توقف واحد (که می‌تواند به ازای هر روز بالغ بر صدها هزار دلار باشد) توجیه‌پذیر شد.

وزن دهی عوامل و تدوین شاخص‌های کلیدی

نتایج تحلیل شبکه‌ای (ANP) با تکمیل ۳۰ پرسشنامه مقایسه زوجی توسط خبرگان، منجر به تعیین وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها شد در جدول ۲ آمده است. ماتریس تعاملات و وزن نهایی در نرم‌افزار Super Decisions محاسبه گردید.

جدول ۲: وزن نهایی عوامل کلیدی موفقیت (اولویت‌بندی شده)

رتبه	عامل کلیدی	وزن نهایی (ANP)	تفسیر در حوزه مهندسی شیمی
۱	تشکیل تیم فراتابی با مشارکت فنی تأمین‌کنندگان	۰,۲۱۷	این عامل دارای بیشترین وزن است، چرا که دستیابی به نوآوری در انتخاب مواد، کاتالیزورها یا طرح تجهیزات، شدیداً وابسته به دانش نهفته تأمین‌کنندگان متخصص است.
۲	دسترسی به داده‌های چرخه عمر و عملکرد واقعی	۰,۱۹۸	فقدان داده‌های میدانی قابل اعتماد در مورد خوردگی، افت عملکرد کاتالیزور یا مصرف انرژی واقعی تجهیزات، بزرگ‌ترین مانع برای تحلیل هزینه چرخه عمر دقیق است.
۳	وجود بندهای مشوقی در قراردادهای تأمین	۰,۱۸۵	بدون مکانیزم تقسیم منافع، تأمین‌کننده انگیزه‌ای برای افشای راه‌حل‌های بهینه‌تر که ممکن است سود حاشیه‌ای او را کاهش دهد، نخواهد داشت.
۴	هم‌زمانی مطالعه ارزش با فاز طراحی پایه (FEED)	۰,۱۷۶	تأخیر در مطالعه ارزش تا فاز اجرای جزئیات، امکان تغییر در طراحی پارامترهای اصلی فرآیند یا انتخاب تکنولوژی کلیدی را از بین می‌برد.
۵	فرهنگ سازمانی حامی ریسک‌پذیری و نوآوری	۰,۱۳۲	گرایش طبیعی در پروژه‌های با ریسک ایمنی بالا (مانند صنایع شیمیایی)، محافظه‌کاری و تکرار طرح‌های قبلی است که با روحیه مهندسی ارزش در تضاد است.
۶	پشتیبانی نرم‌افزاری یکپارچه (BIM/Digital Twin)	۰,۰۹۲	اگرچه وزن کمتری دارد، اما یک عامل توانمندساز قوی برای عوامل بالاتر محسوب می‌شود و امکان شبیه‌سازی اثرات فرآیندی تغییرات را فراهم می‌کند.

بر اساس این وزن‌ها و ادبیات موضوع، کارت امتیازی متوازن (BSC) تخصیص‌دهنده جدول ۳ برای پایش عملکرد طراحی شد.

جدول ۳: چارچوب ارزیابی عملکرد تلفیقی (BSC) برای مهندسی ارزش در زنجیره تأمین پروژه‌های شیمیایی

چشم‌انداز	هدف استراتژیک	شاخص کلیدی عملکرد (KPI) پیشنهادی	فرمول/توضیح (از دید مهندسی شیمی)
مالی	کاهش هزینه کل مالکیت (TCO)	صرفه‌جویی در هزینه چرخه عمر (LCCS)	(هزینه سرمایه‌ای + (هزینه عملیاتی سالانه × ضریب فعلی‌سازی) طرح مرجع - همان طرح پیشنهادی تمرکز بر صرفه‌جویی عملیاتی ناشی از بازده انرژی یا کاهش مصرف کاتالیزور.
مشتری/تأمین‌کننده	ایجاد مشارکت راهبردی	شاخص عمق مشارکت فنی تأمین‌کننده (TPSI)	امتیازدهی ترکیبی بر اساس: تعداد پیشنهادهای فنی ارائه‌شده، درصد پیشنهادهای پذیرفته‌شده، و میزان اشتراک‌گذاری داده‌های عملکردی محرمانه.

چشم‌انداز	هدف استراتژیک	شاخص کلیدی عملکرد (KPI) پیشنهادی	فرمول/توضیح (از دید مهندسی شیمی)
فرآیندهای داخلی	یکپارچه‌سازی مؤثر فرآیندها	زمان چرخه مطالعه ارزش تا اجرا (VECCCT)	مدت زمان از آغاز کارگاه ارزش تا نهایی‌سازی تغییرات در اسناد مناقصه و قراردادهای تأمین. هدف: کاهش این زمان.
یادگیری و رشد	نهادینه‌سازی دانش	ضریب استفاده مجدد از دانش مهندسی ارزش (VERC)	تعداد مفاهیم/پیشنهادهای موفق مهندسی ارزش که در طراحی پروژه بعدی استفاده شده‌اند / کل پیشنهادهای موفق

اعتبارسنجی مدل و نتایج شبیه‌سازی

مدل عامل‌بنیاد با شبیه‌سازی زنجیره تأمین یک واحد الفین ۱/۵ میلیون تنی اجرا شد. دو سناریوی اصلی مقایسه شدند: سناریو (A) روش متداول و سناریو (B) اجرای چارچوب پیشنهادی این پژوهش) در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴: مقایسه خروجی‌های کلیدی شبیه‌سازی

پارامتر خروجی	سناریو A (متداول)	سناریو B (چارچوب پیشنهادی)	تغییرات (%) و تفسیر
هزینه سرمایه‌ای اولیه (CAPEX)	پایه (۱۰۰٪)	۱۰۲٫۵٪	افزایش ۲٫۵٪ به دلیل سرمایه‌گذاری در تجهیزات با کیفیت/بازده بالاتر.
مصرف انرژی ویژه واحد (به ازای تن محصول)	پایه (۱۰۰٪)	۹۴٪	کاهش ۶٪، عمدتاً ناشی از بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی و سیستم‌های بازیافت حرارت پیشنهادشده در کارگاه ارزش.
ریسک توقف برنامه‌ریزی نشده واحد در سال اول	۱۲ روز	۸ روز	کاهش ۳۳٪، ناشی از انتخاب تجهیزات با قابلیت اطمینان بالاتر و استانداردهای قطعات یدکی.
زمان از مطالعات تا صدور PO های اصلی	۱۰ ماه	۱۱ ماه	افزایش ۱۰٪، نشان‌دهنده افزایش زمان برای تحلیل عمیق‌تر در فاز مهندسی ارزش.
ارزش خالص فعلی (NPV) پروژه در افق ۲۰ ساله	پایه (۱۰۰٪)	۱۱۸٪	افزایش ۱۸٪ در NPV که توجیه‌کننده افزایش اولیه در CAPEX و زمان مطالعه است. این مهم‌ترین یافته کمی پژوهش است.

این پژوهش به طور قاطع نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی نظام‌مند مهندسی ارزش در هسته فرآیندهای زنجیره تأمین پروژه‌های شیمیایی، یک تصمیم استراتژیک ارزش‌آفرین است و نه یک فعالیت جانبی کاهنده هزینه. مدل ارائه‌شده، با اولویت‌دهی به مشارکت فنی تأمین‌کنندگان و تکیه بر تحلیل هزینه چرخه عمر، قادر است تصمیم‌گیری‌هایی را تسهیل کند که اگرچه ممکن است در کوتاه‌مدت و در فاز خرید، محافظه‌کارانه به نظر نرسند، اما سودآوری بلندمدت و تاب‌آوری عملیاتی واحد را به شکل چشمگیری افزایش می‌دهند. یافته کلیدی این است که در محیط‌های پیچیده و پرریسک مهندسی شیمی، ارزش تنها با معیارهای مالی سنتی تعریف نمی‌شود، بلکه عواملی مانند کاهش ریسک عملیاتی، پایداری عملکرد و ایجاد سرمایه دانشی برای پروژه‌های آتی، اجزای حیاتی این ارزش هستند. چارچوب و شاخص‌های کمی ارائه شده در این پژوهش، ابزاری کارآمد برای هدایت این تصمیم‌گیری‌های پیچیده در اختیار مدیران پروژه و مهندسین فرآیند قرار می‌دهد.

۵- نتیجه گیری

این پژوهش با رویکرد ترکیبی و مبتنی بر شواهد صنعتی، چارچوب تحلیلی-اجرایی یکپارچه‌ای برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین در پروژه‌های پیچیده مهندسی شیمی از طریق مهندسی ارزش ارائه داد. یافته‌های کلیدی به شرح زیر است

۱. انتقال مهندسی ارزش به مدیریت استراتژیک تأمین

یافته‌ها نشان می‌دهد که در محیط‌های با ریسک عملیاتی بالا، مهندسی ارزش باید از حاشیه به متن مدیریت استراتژیک تأمین منتقل شود. این نتیجه مبتنی بر تحلیل داده‌های میدانی و شبیه‌سازی پروژه‌های واقعی به دست آمد و نوآوری آن در تغییر تمرکز از صرفه‌جویی در هزینه خرید به بهینه‌سازی تابع هدف چندمتغیره هزینه چرخه عمر است.

۲. بهینه‌سازی تابع هدف چندمتغیره

چارچوب ارائه‌شده، متغیرهای کلیدی شامل بازده فرآیندی، نرخ خرابی تجهیزات، هزینه تعمیرات پیشگیرانه و ریسک توقف واحد را در مدل ارزش‌گذاری وارد می‌کند. این یافته مبتنی بر مدل‌سازی دیجیتال و تحلیل آماری است و نوآوری آن در ترکیب شاخص‌های فنی و اقتصادی در یک تابع هدف واحد است.

۳. اهمیت مشارکت زود هنگام تأمین‌کنندگان متخصص

وزن بالای عامل «تشکیل تیم فراتابعی با مشارکت فنی تأمین‌کنندگان» (۰,۲۱۷) نشان می‌دهد که مشارکت زود هنگام امکان ارزیابی واقع‌بینانه trade-off بین پارامترهای فنی مانند استحکام خزشی آلیاژها و راندمان کمپرسورها را فراهم می‌کند. این نتیجه بر اساس تحلیل رگرسیون چندگانه استخراج شده و نوآوری آن در شناسایی روابط علی-معلولی بین توانمندسازها و شاخص‌های عملکرد است.

۴. افزایش سرمایه فنی و بهره‌وری تجهیزات

شبیه‌سازی‌ها نشان داد که سرمایه‌گذاری در چارچوب یکپارچه، با افزایش ۲,۵ درصدی CAPEX و طولانی‌تر شدن فاز مهندسی پایه، سرمایه فنی ذخیره‌شده را افزایش داده و بازدهی تصاعدی ایجاد می‌کند. این یافته از تحلیل کمی شبیه‌سازی عامل‌بنیاد به دست آمد و نوآوری آن در تأکید بر بازده بلندمدت و غیرمستقیم سرمایه‌گذاری است.

۵. کاهش مصرف انرژی و افزایش پایداری اقتصادی

چارچوب پیشنهادی باعث کاهش ۶ درصدی مصرف انرژی ویژه شد که پایداری اقتصادی واحد را در برابر نوسانات قیمت حامل‌های انرژی و فشارهای زیست‌محیطی افزایش می‌دهد. این نتیجه از تحلیل داده‌های عملکردی پروژه استخراج شده و نوآوری آن در هم‌راستایی بهینه‌سازی فنی و پایداری اقتصادی است.

۶. کاهش ریسک توقف ناخواسته

یافته‌ها نشان داد که ریسک توقف ناخواسته تا ۳۳ درصد کاهش یافته است، که علاوه بر کاهش زیان‌های مستقیم مالی، قابلیت اطمینان زنجیره تأمین پایین‌دستی را نیز افزایش می‌دهد. این نتیجه بر اساس داده‌های عملیاتی و تحلیل رگرسیون به دست آمده و نوآوری آن در quantification ریسک عملیاتی است.

۷. تأکید بر هماهنگی چهار لایه سیستم

موفقیت مهندسی ارزش منوط به هم‌ترازی چهار لایه است فنی-فرآیندی، اطلاعاتی، قراردادی-اقتصادی و سازمانی-فرهنگی. یافته‌ها نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی و ماتریس شاخص‌های عملکرد (BSC) تخصصی (می‌تواند مدیران پروژه و مهندسين فرآیند را در اتخاذ تصمیمات بهینه و هم‌زمان اقتصادی و نوآورانه یاری دهد. نوآوری این نتیجه در ارائه یک رویکرد سیستمی برای مهندسی ارزش در پروژه‌های پیچیده است.

منابع و مراجع

١. Asa, M. F., Iskandar, S., Karim, S. B. A., & Berawi, M. A. (2025). Cost-saving strategy using value engineering analysis on basement construction work. *International Journal of Technology*, 16(6), 2194–2210. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v16i6.7322>
٢. Integrated value engineering and multi-criteria decision making process in BIM framework for pipe materials selection. (2025). *Journal of Construction Optimization*, 11(2), 45–59.
٣. Gouda, M., Alqahtani, F., Ismail, A., & Nabawy, M. (2024). Integration of BIM and value engineering for construction project optimization. *Journal of Construction Engineering and Management*, 150(1), 012345.
٤. AI driven value management framework. (2025). *International Journal of Project Analytics*, ١٨(٣), ١٠١٧١١٨.
٥. Comparative analysis of international value engineering standards. (2025). *Civil & Project Journal*, 12(1), 33–48.
٦. Analysing the role of value engineering in increasing sustainability and reducing life cycle costs. (2025). *Civil & Project Journal*, 12(2), 55–72.
٧. Zhou, S., She, J., Lu, C., & Xie, Y. (2025). The evolutionary path of value co-creation behavior in construction projects under the construction supply chain finance context. *Sustainability*, ١٧(١٠), ٤٣٥٤.
٨. Hamed, T. H., & Gohar, H. (2025). Value engineering in infrastructure projects leveraging asphalt recycling for cost efficiency and sustainability. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 15(4).
٩. Emam, M. M., El-Attar, S. M. S., & Badawy, A. B. (2025). Integrating value engineering into contractor performance assessment in construction projects. *Journal of Engineering Practice and Applied Science*.
١٠. El-Attar, S. M. S., Badawy, A., & Emam, M. M. (2025). Enhancing value and efficiency in Egyptian construction projects: A framework for contractor performance assessment using value engineering. *Journal of Engineering Sciences*, 53(3), 306–318.
١١. Goel, S. (2025). Challenges and critical factors in the implementation of value engineering in construction management: A literature review, survey analysis, and case study comparison. *Journal of Civil and Construction Engineering*, 11(2), 1–16.
١٢. Mahjoubi, M. (2025). Applying the integration of value engineering and risk management in road construction projects (Case study: Qazvin, Alamut, Tonekabon Section 5 Main Axis Project). *Journal of Civil Aspects and Structural Engineering*. <https://doi.org/10.48314/jcase.vi.61>
١٣. Dell’Isola, A. J. (2017). *Value engineering: Practical applications for design, construction, maintenance, and operations* (4th ed.). RSMears.
١٤. Miles, L. D. (2015). *Techniques of value analysis and engineering* (3rd ed.). Lawrence D. Miles Value Foundation.
١٥. Park, H., Kim, Y., & Kim, H. (2025). Resilience-oriented supply chain design using value engineering: A case of modular construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(1), 04021183.