

Evaluating the Time-Cost Trade-off as A Decision-Making Criterion in Implementing Industrialised Construction Systems in Building Projects

Mehdi Nematollah-Zadeh

PhD Candidate, Project & Construction Management, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran

Behnod Barmayehvar, PhD.



Associate Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran

Mohammad Hossein Mahmoudi Sari, PhD.

Associate Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran

Received: November 16, 2023

Accepted: February 23, 2024

(Pages: 75-92)

Mehdi Nematollah-Zadeh, Behnod Barmayehvar, Mohammad Hossein Mahmoudi Sari, 2025. Evaluating the Time-Cost Trade-off as A Decision-Making Criterion in Implementing Industrialised Construction Systems in Building Projects. *Soffeh* 35 (3): 75-92

DOI: [10.48308/SOFFEH.2025.233795.1299](https://doi.org/10.48308/SOFFEH.2025.233795.1299)

Keywords:

Construction systems, Industrialisation, Productivity, Time-cost trade-off, Construction project management.

Abstract:

Background and objectives: The construction industry has long struggled with maintaining high productivity levels compared to other sectors, hindered by inherent complexity, supply chain fragmentation, and reliance on traditional practices. Industrialisation, through systematic implementation of principles like prefabrication and automation, is proposed to address



SOFFEH

Soffeh Journal, Shahid Beheshti University, Vol. 35, Issue 3, No. 110, 2025



ISSN: 1683-870X

*. Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*. Corresponding Author Email Address: b.barmayehvar@art.ac.ir

<http://dx.doi.org/10.48308/SOFFEH.2025.233795.1299>

this. However, significant obstacles, particularly implementation costs, have impeded the widespread adoption of industrial construction systems. Various terms such as off-site construction, prefabrication, and dimensional classifications are used, often inconsistently, to describe aspects of these systems. This study investigates the time-cost implications associated with construction systems exhibiting varying levels of industrialisation. The core objective here is to develop a robust decision-making criterion to support the selection and application of these systems in specific construction project contexts.

Materials and Methods: The study first establishes a framework by carefully extracting and distinguishing the definitions of key industrial construction concepts (off-site construction, prefabrication, formwork/repetition, and construction dimensions) from the literature, treating them as characteristics rather than distinct systems. Subsequently, differences between industrial and conventional construction systems were explored to define a list of variables affecting the time-cost trade-off of construction projects that are influenced by the construction system employed. The impact mechanism of these variables on the time-cost trade-off, with respect to the defined industrialisation characteristics, is then analysed using a causal network to identify the fundamental variables of the problem.

Results and conclusion: The findings indicate that improving productivity stands out as the most significant advantage of industrial construction systems in affecting the time-cost trade-off of construction projects. Based on this central result and the relationship between direct/indirect project costs and project completion time, an approach is developed to compare industrial and conventional construction systems from the perspective of their time-cost trade-off, serving as a decision-making criterion. While industrial systems demonstrate strong potential for increased productivity and reduced project duration, the analysis suggests that cost remains a substantial challenge to their development. It appears that the maturity of the construction supply chain is a fundamental factor influencing this challenge and the overall adoption of construction industrialisation.

ارزیابی مبادلهٔ زمان - هزینه به مثابه معیار تصمیم‌گیری به کارگیری سیستم‌های احداث صنعتی در پروژه‌های ساختمانی^۱

محمدحسین محمودی ساری^۴

دانشیار دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران،
تهران، ایران

مهدی نعمت‌الله‌زاده^۲



بهنود برمایه‌ور^۳

دانشیار دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران

دریافت: ۲۵ آبان ۱۴۰۲

پذیرش: ۴ اسفند ۱۴۰۲

(صفحه ۷۵ - ۹۲)

مهدی نعمت‌الله‌زاده، بهنود برمایه‌ور، محمدحسین محمودی ساری. ۱۴۰۴. ارزیابی مبادلهٔ زمان - هزینه به مثابه معیار تصمیم‌گیری به کارگیری سیستم‌های احداث صنعتی در پروژه‌های ساختمانی. فصلنامه علمی معماری و شهرسازی ص ۳۵ (۳): ۷۵-۹۲.

کلیدواژگان: سیستم‌های ساخت‌وساز، صنعتی‌سازی، بهره‌وری، توازن زمان - هزینه، مدیریت پروژه ساخت.

چکیده

اهداف و پیشینه: صنعت ساخت‌وساز دهه‌هاست با چالش‌هایی در حفظ سطوح بالای بهره‌وری، که عاملی حیاتی در رشد اقتصادی است و بر عملکرد و رقابت‌پذیری این حوزه در مقایسه با سایر صنایع تأثیر می‌گذارد، روبه‌روست و با ویژگی‌هایی مانند پیچیدگی، فقدان یکپارچگی زنجیره تأمین، و وابستگی به روش‌های متداول مشخص می‌شود. پیاده‌سازی سیستماتیک اصول تولید، مانند پیش‌ساختگی، استانداردسازی، و اتوماسیون، راه حل پیشنهادی است برای مشکل صنعتی‌سازی ساخت‌وساز. با این حال، موانعی مانند هزینه‌های پیاده‌سازی در مسیر استفاده از سیستم‌های ساخت‌وساز صنعتی، توسعه این راه حل را کند کرده است. سیستم‌های ساخت‌وساز صنعتی اغلب با مفاهیم و اصطلاحاتی مانند احداث برون کارگاهی، احداث پیش‌ساخته، و احداث پودمان یک‌بعدی، دوبعدی، و سه‌بعدی شناخته می‌شوند که به‌طور متناقض استفاده می‌شوند و نیاز به چارچوبی شفاف‌تر بر اساس این مشخصه‌ها و تأثیر آنها بر عملکرد پروژه احساس می‌شود. این مطالعه به بررسی پیامدهای زمان - هزینه مرتبط با سیستم‌های ساخت‌وساز، که نمایانگر سطوح متفاوتی از صنعتی‌سازی هستند، اختصاص دارد. در پژوهش حاضر هدف اصلی، توسعه یک معیار

تصمیم‌گیری قوی برای پشتیبانی از انتخاب و به کارگیری این سیستم‌ها در بستر پروژه‌های ساختمانی است.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه ابتدا با استخراج تعاریف مفاهیم کلیدی ساخت‌وساز صنعتی (احداث برون کارگاهی، احداث پیش‌ساخته، و احداث پودمان یک‌بعدی، دوبعدی، و سه‌بعدی) و ایجاد تمایز دقیق این مفاهیم از ادبیات، چارچوبی مبتنی بر این مشخصه‌ها و نه سیستم‌های مجزا، ایجاد می‌شود. در مرحله بعد، با بررسی تفاوت‌های بین سیستم‌های ساخت‌وساز صنعتی و متداول در ادبیات، فهرستی از متغیرهای مؤثر بر مبادلهٔ زمان - هزینهٔ پروژه‌های ساختمانی که تحت تأثیر تغییر در سیستم ساخت‌وساز قرار می‌گیرند، تعریف می‌شود. سپس، با تحلیل مکانیسم تأثیر این متغیرها بر مبادلهٔ زمان - هزینهٔ پروژه، با توجه به مشخصه‌های صنعتی‌سازی یادشده، در یک شبکهٔ علیت، متغیرهای بنیادی مسئله شناسایی می‌شوند.

نتایج و جمع‌بندی: نتایج نشان می‌دهند که بهبود بهره‌وری مهم‌ترین مزیت سیستم‌های ساخت‌وساز صنعتی در تأثیر بر مبادلهٔ زمان - هزینهٔ پروژه‌های ساختمانی برجسته است. بر اساس این نتیجه‌محوری و رابطهٔ بین هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم پروژه با زمان تکمیل پروژه، رویکردی برای مقایسهٔ

۱. این مقاله برخاسته از پروژه پژوهشی کلاسی نویسنده نخست است در درس فناوری‌های نوین ساختمانی (دورهٔ دکتر رشته مدیریت پروژه و ساخت) در دانشکدهٔ معماری و شهرسازی دانشگاه هنر ایران که به راهنمایی نویسندگان دوم و سوم در نیم‌سال دوم تحصیلی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ انجام شده است.

۲. دانشجوی دکتر تخصصی مدیریت پروژه و ساخت، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران

m_nematollah@outlook.com

۳. نویسندهٔ مسئول

b.barmayehvar@art.ac.ir

4. mahmoudi@art.ac.ir



۱۱۰ شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴، فصلنامه علمی معماری و شهرسازی، سال سی‌ونهم، پاییز ۱۴۰۴، شماره ۳، پاییز ۱۱۰
*. Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

فصلنامه علمی معماری و شهرسازی، سال سی‌ونهم، پاییز ۱۴۰۴، شماره ۳، پاییز ۱۱۰
*. Corresponding Author Email Address: b.barmayehvar@art.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.48308/SOFFEH.2025.233795.1299>

پرسش‌های تحقیق

پرسش اصلی:

– با چه رویکردی می‌توان سیستم‌های احداث پروژه‌های ساختمانی را از منظر صنعتی‌سازی، بر مبنای مبادلهٔ زمان – هزینه، برای دستیابی به یک معیار تصمیم‌گیری بررسی کرد؟

پرسش‌های فرعی:

۱. سیستم‌های احداث مختلف بر اساس کدام مشخصه‌ها و معیارهای صنعتی‌سازی طبقه‌بندی می‌شوند؟

۲. مشخصه‌های صنعتی‌سازی سیستم‌های احداث مختلف چگونه بر مدت‌زمان و هزینهٔ تکمیل پروژه‌های ساختمانی اثر می‌گذارند؟

۳. نحوهٔ رابطهٔ زمان – هزینه و عناصر اصلی آن در پروژه‌های ساختمانی کدامند؟

۴. سازوکار تمایز مبادلهٔ زمان – هزینهٔ سیستم‌های احداث متداول و صنعتی بر مبنای عناصر اصلی مشخص شده چگونه است؟

5. A. Tavares, et al., "Construction Systems", in *Structural Rehabilitation of Old Buildings*, Springer Berlin Heidelberg, 2013, 1-35.
6. T. Schmid, et al., *Systems Building: An International Survey of Methods* (London: Pall Mall Press, 1969).
7. A. Warzawski, "System Building - Education and Research", *Proceedings of 7 CIB Congress*, 1977, 113-125.
8. G. Sebestyén, "System in Construction", *Proceedings of 8Q Congress of CIB, Building Research World Wide*, CIB/ Norwegian Building Research Institute, 1980, 773-776.
9. Ibid.

سیستم‌های ساخت‌وساز صنعتی و متداول از منظر مبادلهٔ زمان – هزینه، به‌منزلهٔ یک معیار تصمیم‌گیری، تعریف می‌شود. درحالی‌که سیستم‌های صنعتی پتانسیل بالایی برای افزایش بهره‌وری و کاهش مدت زمان پروژه دارند، از تحلیل سیستم‌های یادشده چنین برمی‌آید که هزینه به‌منزلهٔ یک چالش قابل‌توجه در توسعهٔ آنها باقی خواهد ماند. به‌نظر می‌رسد که بلوغ زنجیرهٔ تأمین ساخت‌وساز یک عامل بنیادی مؤثر بر این چالش و پذیرش کلی صنعتی‌سازی ساخت‌وساز است. مقیاس پروژه نیز عامل مهمی در ارزیابی امکان‌سنجی اقتصادی در استفاده از سیستم‌های ساخت‌وساز صنعتی قلمداد می‌شود.

مقدمه

تکامل سیستم‌های احداث نتیجهٔ قرن‌ها انطباق آنها با اقلیم، موقعیت جغرافیایی، و شرایط خاک و همچنین تحت تأثیر پیشینهٔ فرهنگی، ملاحظات اقتصادی، سلیقه، و مد است. با این حال، صنعتی‌سازی فزایندهٔ روش‌های ساخت‌وساز و نیاز روزافزون جامعه به کنترل‌های کیفی، اطمینان در عملکرد ساخت‌وساز، و قوانین ساختمانی موجب افزایش کنترل بر ویژگی‌های مصالح و اجزای مورد استفاده و عملکرد ساختاری و محیطی ساختمان شده است.^۵

مفهوم سیستم احداث به‌تدریج با تعریف فرایند صنعتی پیوند نزدیک‌تری یافته است. ابتدا شمید و همکارانش سیستم احداث را ترکیبی از ساختارهایی شامل سازماندهی، فناوری، و فرایند طراحی معرفی کردند.^۶ بعد ورشوزکی آن را به‌صورت ترکیبی از فناوری‌های تولید، طراحی قطعات، و سازماندهی ساخت‌وساز تعریف کرد.^۷ سپس سیبستین کاربرد مفهوم سیستم احداث را تنها در مورد فرایندهای صنعتی پیشرفته ساخت‌وساز ممکن دانست و سیستم‌های احداث را در سه وجه (۱) فرایند طراحی و روش‌های مدیریت و کنترل ساخت؛ (۲) زیرسیستم‌های فنی مانند سازه، سقف، دیوارها، و غیره؛ (۳) مجموعهٔ کاملی از فعالیت‌های مربوط به تولید، ساخت، و نگهداری همهٔ اجزای خاص، طبقه‌بندی کرد.^۸ این تعریف بیانگر این فرض اساسی است که ساخت‌وساز تنها در صورتی می‌تواند یک سیستم در نظر گرفته شوند که عملکرد پیش‌بینی‌شدهٔ هریک از مواد و اجزای آن، از یک فرایند مستمر ارزیابی و کنترل، حین برنامه‌ریزی تا طراحی و مراحل ساخت و درنهایت بهره‌برداری، پیروی کند.^۹

احداث صنعتی‌شده شکل جدیدی از تولید و مدیریت است که با پذیرش نوآوری‌های ساخت‌وساز، مهندسی صنایع، و مدیریت منفرد (اما مرتبط) هدایت



ت ۱ (راست).

الف) مبادلهٔ زمان - هزینه - بهره‌وری،
مأخذ:

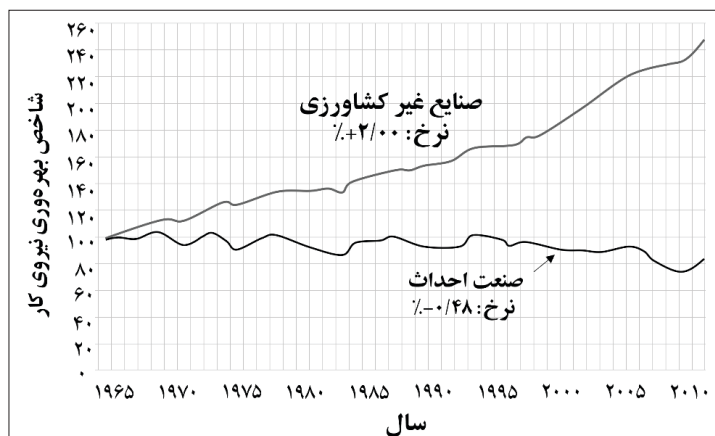
L.F. Copertari, *Time, Cost and Performance Tradeoffs in Project Management* (McMaster University, 2002).

ب) مثلث محدودیت‌های پروژه،
مأخذ:

H. Kerzner, *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*. Hoboken (New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2017).

ت ۲ (چپ). شاخص بهره‌وری نیروی انسانی در صنعت احداث و صنایع غیرکشاورزی ایالات متحده،
مأخذ:

Teicholz, "Labor-Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies - AECbytes Viewpoint". Apr. 2004, 14.



اثر بخشی و کارایی نیز دانست. اثر بخشی مستقیماً به نتیجهٔ نهایی و کاربرد آن به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر مربوط می‌شود. از سوی دیگر، کارایی نتیجهٔ اندازه‌گیری عملکرد کار بر حسب هزینه یا زمان، بر اساس یک روش معین است. بنابراین حاصل ضرب پیش‌گفته منجر به شاخص بهره‌وری می‌شود.^{۱۴} در «ت ۱» مبادلهٔ زمان، هزینه، و بهره‌وری (عملکرد) در یک پروژه مشاهده می‌شود.

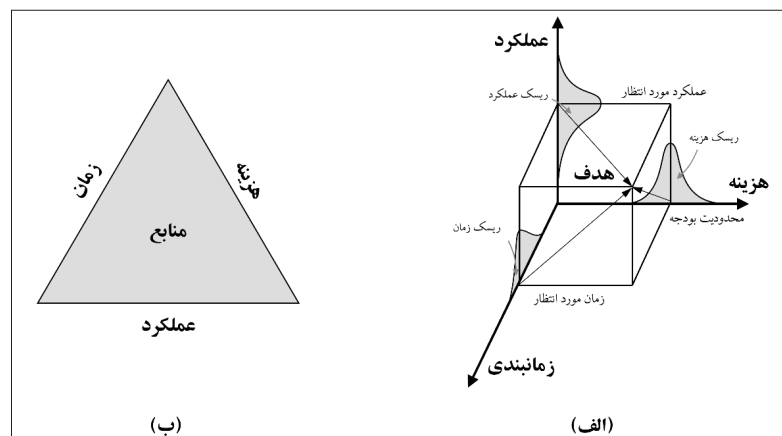
مانند بسیاری از صنایع دیگر، صنعت احداث نیز برای ارتقای بهره‌وری، کاهش هزینه، و به حداقل رساندن ضایعات در عملیات، تحت فشار دائمی است. در حالی که بهره‌وری در صنعت تولید در قرن گذشته ۴۰۰٪ ارتقا یافته است، بهره‌وری صنعت ساخت‌وساز در بهترین حالت ثابت باقی مانده است^{۱۵} (ت ۲).

بهبود عملکرد پروژه مستلزم سرمایه‌گذاری بیشتر منابع است که باعث افزایش هزینه و افزایش زمان در صورت محدود بودن این منابع می‌شود. اما اگر منابع بیشتری سرمایه‌گذاری شود و تکمیل پروژه بیشتر طول بکشد یا هزینه بیشتری داشته باشد، نرخ بازده داخلی (IRR)^{۱۶} پروژه، که سودآوری آن را می‌سنجد، کاهش می‌یابد. در نتیجه، باید یک مبادلهٔ

می‌شود که هدف از آن بهبود بهره‌وری و توسعهٔ پایدار در صنعت ساخت‌وساز است.^{۱۷} لیو و همکاران استدلال کرده‌اند که بزرگ‌ترین تفاوت بین احداث پیش‌ساخته و احداث درون‌کارگاهی متداول این است که فرایند و دامنهٔ مدیریت ساخت به سمت تولید گسترش می‌یابد.^{۱۸}

در نهایت می‌توان در تعریف صنعتی‌سازی احداث به اهداف و مقاصد هنگام اجرای فرایند آن اشاره داشت. تحول مؤثر صنعتی‌سازی احداث دارای پتانسیل کمک به صنعت است تا با حفظ ویژگی‌های سبز، سازگار با محیط زیست، صرفه‌جویی در انرژی، و عرضهٔ سطح لازم از رضایت مشتری، با چالش بهره‌وری مواجه گردد.^{۱۹}

بهره‌وری در اقتصاد به منزلهٔ نسبتی بین حجم خروجی و حجم ورودی‌ها تعریف می‌شود. به بیان دیگر، میزان کارآمدی نهاده‌های تولید، مانند نیروی کار و سرمایه، را در یک اقتصاد برای تولید سطح معینی از خروجی می‌سنجد.^{۲۰} به همین ترتیب، بهره‌وری در کار پروژه با مشاهدهٔ رابطهٔ بین نتایج نهایی و هزینه یا زمان تعیین می‌شود. این نسبت اگر به‌طور مداوم در فواصل زمانی منظم اندازه‌گیری شود، سندی از سابقهٔ روند بهره‌وری را نشان خواهد داد. بهره‌وری را می‌توان حاصل ضرب



10. S. Costa, et al., "A Systematic Literature Review and Conceptual Framework of Construction Industrialization", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 149, no. 2 (February 2023).

جدول ۱ (چپ، بالا). واژه‌شناسی سیستم‌های احداث، مأخذ:

Pan, A *Decision Support Tool for Optimising the Use of Offsite Technologies in Housebuilding* (Repository: lboro.ac.uk, 1 Jan. 2006).

جدول ۲ (پایین). تمایز احداث و تولید از سه جنبه محصول، فرایند و زنجیره تأمین، مأخذ:

Lee, et al., "Classification of Modular Building Construction Projects Based on Schedule-Driven Approach", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 145, no. 5 (May 2019): 04019031.

زمان - هزینه بهینه وجود داشته باشد که عملکرد بهینه پروژه را همان‌طور که با IRR سنجیده می‌شود، به‌همراه داشته باشد.^{۱۷} یک فرایند تحلیل مبادله زمان - هزینه برای تعیین مجموعه بهینه گزینه‌های زمان - هزینه به‌منظور افزایش سود کلی پروژه ساخت‌وساز به کار می‌رود.

با توجه به این موضوع که هدف صنعتی‌سازی احداث، ارتقای بهره‌وری راكد یا رو به کاهش در صنعت ساخت است و سطح و نوع صنعتی‌سازی در سیستم‌های احداث مختلف متفاوت است، تا کنون رویکردی که بتواند با بررسی مبادله زمان - هزینه، معیار معینی را برای پشتیبانی تصمیم عرضه کند، تعریف نشده است.

۱. سیستم‌های احداث صنعتی

پن با گردآوری روش‌های مختلف طبقه‌بندی سیستم‌های احداث، واژه‌شناسی خود را مطابق با «جدول ۱» طرح کرد.^{۱۸}

اما، همان‌طور که پیش‌تر طرح شد، اغلب سیستم‌های احداث صنعتی به سمت تولید تمایل یافته‌اند. بنابراین، بررسی تمایز تولید و احداث در جوانب مختلف می‌تواند به بینش بهتری نسبت به امر طبقه‌بندی سیستم‌های احداث از منظر صنعتی‌سازی بیانجامد. لی و همکاران با در نظر گرفتن سیستم احداث پودمانی در میانه طیف تولید تا احداث، به وجه تمایز آنها در سه جنبه محصول، فرایند، و زنجیره تأمین پرداخته‌اند^{۱۹} (جدول ۲).

بر اساس پیشینه طبقه‌بندی سیستم‌های احداث، می‌توان به این نتیجه رسید که تمایز طبقه‌بندی‌های مختلف در هدف و مقصود آن طبقه‌بندی نهفته است. با توجه به این موضوع که مقصود در این پژوهش، بررسی سیستم‌های احداث در افق جامع و از منظر صنعتی‌سازی است، معیار طبقه‌بندی، مشخصه‌های صنعتی‌سازی است و وجود، سطح، و ترکیب این مشخصه‌ها با یکدیگر است که می‌تواند یک سیستم احداث را از منظر صنعتی‌سازی توصیف کند (ت ۳). در ادامه تعاریف این مشخصه‌ها تشریح شده است.

احداث برون‌کارگاهی^{۲۰} به ساخت، برنامه‌ریزی، طراحی، مونتاژ عناصر ساختمان در مکانی غیر از محل نصب نهایی آنها (کارگاه) برای پشتیبانی از ساخت سریع و کارآمد یک سازه دائمی اشاره دارد.^{۲۱} درحالی‌که احداث پیش‌ساخته^{۲۲} به‌منزله فرایند تولید و پیش‌مونتاژ تعداد معینی از اجزای ساختمان، پودمان‌ها، و عناصر، قبل از ارسال و نصب آنها در کارگاه ساختمانی توصیف

Terminology	Category Term	واژه نوع
OS	Offsite Production (OSP) Offsite manufacturing (OSM) Offsite Fabrication (OSF) Offsite Construction	ساخت (تولید محصول) برون‌کارگاهی ساخت (تولید صنعتی) برون‌کارگاهی ساخت (مونتاژ) برون‌کارگاهی
PRE	Pre-assembly Prefabrication Prefab	پیش‌مونتاژ پیش‌ساخت‌سازی پیش‌ساخته
MM	Modern Methods of Construction (MMC) Modern Methods of House Construction Modern Methods of House Building	روش‌های نوین احداث روش‌های نوین احداث خانه روش‌های نوین خانه‌سازی
Building	System Building Non-traditional Building Industrialized Building	ساخت سیستمی ساخت نامتداول ساخت صنعتی

جنبه	تولید	احداث
محصول	اجزا نقشی محوری در تعریف معماری محصول دارند.	در ساختمان‌ها اجزا و حفره‌های فضایی ترکیب می‌شوند که مهم‌ترین عملکردهای محصول از آنهاست.
فرایند	تأمین‌کنندگان پودمان‌های پیچیده‌ای را تحویل می‌دهند که به‌سادگی توسط سازنده اصلی مونتاژ می‌شوند.	بیشتر کارها اغلب با استفاده از فناوری‌های سنتی در محل انجام می‌شود.
زنجیره تأمین	زنجیره تأمین در طراحی و تولید پودمان‌ها در تعداد زیادی از محصولات مشارکت دارد.	زنجیره‌های تأمین موقت معمولاً انگیزه محدودی برای تولید همان پودمان برای تعداد زیادی پروژه دارند.

11. Y. Liu, et al., "A Conceptual Development Framework for Prefabricated Construction Supply Chain Management: An Integrated Overview", *Sustainability*, vol. 12, no. 5 (March 2020): 1878.

12. Costa, et al., "A Systematic Literature Review and Conceptual Framework of Construction Industrialization".

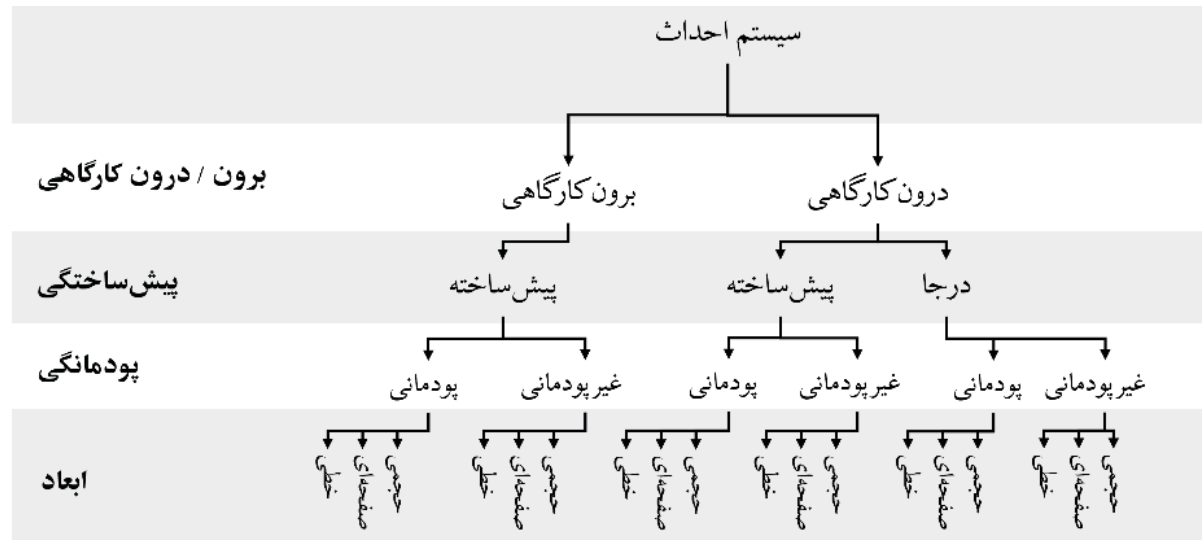
13. P. Krugman, *Defining and Measuring Productivity* (OECD, 1994).

14. P.C. Dinsmore, "Boosting Productivity on Projects: Building up from the Basics", *PM Network*, vol. 3, no. 7 (1989): 23-25.

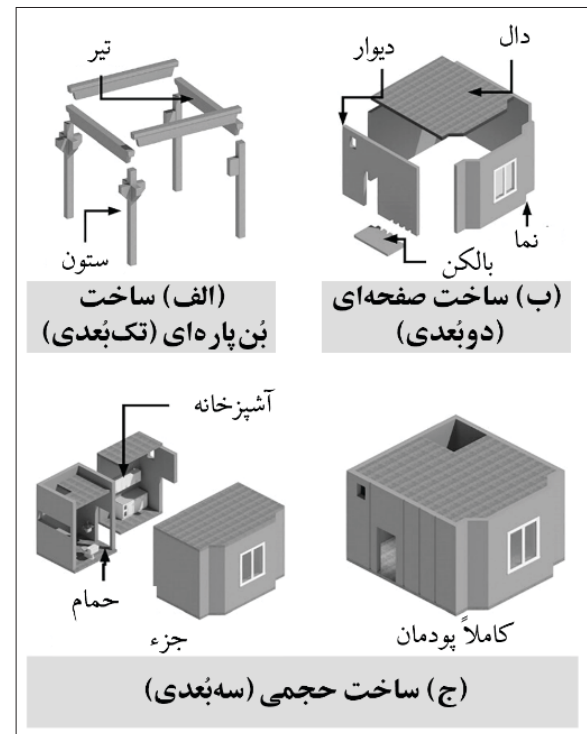
ت ۳ (بالا). چارچوب مشخصه‌های صنعتی‌سازی و مراتب شکل‌گیری سیستم‌های احداث با ترکیب این مشخصه‌ها، تدوین: نگارندگان.

ت ۴ (پایین). ابعاد سیستم‌های احداث، مأخذ:

Lim, et al., "A Preliminary Design Tool for Volumetric Buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 31, no. 13 (May 2022).



شده است.^{۲۳} در مورد احداث پودمانی^{۲۴}، پودمان در یک سیستم، واحد عملکردی اساسی و مستقل نسبت به محصولی است که بخشی از آن است. این پودمان، نسبت به تعریف سیستم، دارای واسطها و تعاملات استاندارد شده‌ای است که ترکیب محصولات را با اجماع امکان‌پذیر می‌کند.^{۲۵} یک پودمان در صنعت احداث از نظر فیزیکی به مثابه یک واحد احداث و بخشی از یک مجموعه گسترده‌تر شامل همه اجزاست که می‌توانند از طریق رابط‌های از پیش برنامه‌ریزی شده یکپارچه شوند. اجزا ممکن است در سطوح سلسله‌مراتبی مختلف در معماری کلی محصول در نظر گرفته شوند، ممکن است در داخل یا خارج از کارگاه تولید شوند، و می‌توانند حجمی، صفحه‌ای، یا خطی باشند.^{۲۶} مشخصه دیگر سیستم‌های احداث، ابعاد احداث است (ت ۴). یک ساختمان بن‌پاره‌ای، از اعضای پیش‌ساخته خطی یک‌بعدی مانند تیرها و ستون‌ها شکل می‌گیرد، درحالی‌که یک ساختمان مسطح از دیافراگم‌های دوبعدی مانند دیوارها و دال‌ها ساخته می‌شود. در پژوهش‌های مختلف، برتری پذیرش حجمی (یا ساخت‌وساز پودمانی) از نظر سرعت ساخت‌وساز،



15. S.C. Vereen, et al., Development and Comparative Analysis of Construction Industry Labor Productivity Metrics", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 142, no. 7 (July 2016): 04016020.

16. Internal Rate of Return

17. Dinsmore, "Boosting Productivity on Projects: Building up from the Basics", 23-25.

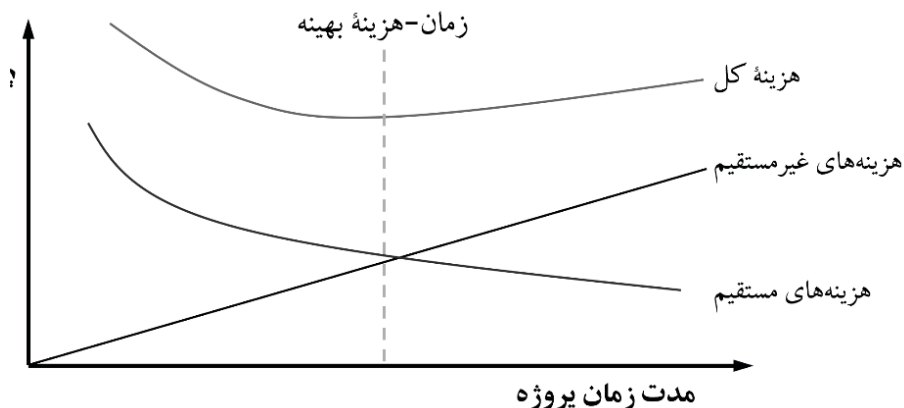
ت ۵. نمودار زمان - هزینه پروژه بر اساس تفکیک هزینه‌های پروژه به هزینه‌های مستقیم و هزینه‌های غیرمستقیم، تدوین: نگارندگان.

مقرون به صرفه بودن، و پایداری اثبات شده است.^{۲۷} همان طور که در این تحقیق طرح شد، یک سیستم احداث می‌تواند با ترکیبی از مشخصه‌های فوق توصیف شود. در ضمن در ترکیب مشخصه‌های سیستم‌های احداث محدودیت‌هایی وجود دارد.

۲. مبادله زمان - هزینه در پروژه‌های ساختمانی

به طور کلی دو رویکرد را می‌توان برای تعیین ارتباط عوامل زمان و هزینه به کار برد. رویکردی که در سطح کل پروژه این ارتباط را با تفکیک عوامل هزینه پروژه به هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم نشان می‌دهد. در «ت ۵» نحوه ارتباط هزینه و زمان بر اساس این دو نوع هزینه مشاهده می‌شود.

هزینه‌های مستقیم به طور مستقیم به یک موضوع نسبت داده می‌شود. در ساخت و ساز، هزینه‌های مواد، نیروی کار، تجهیزات، و غیره، و همه تلاش‌ها یا مصارفی که به طور مستقیم درگیر با موضوع مورد هزینه باشند، هزینه‌های مستقیم هستند. کرزنر در بخش تحلیل مبادلات در محیط پروژه، بیان می‌کند که شیب نمودار مبادله زمان - هزینه پروژه وابسته به عملکردی است که در تحلیل ثابت فرض می‌شود.^{۲۸} پس



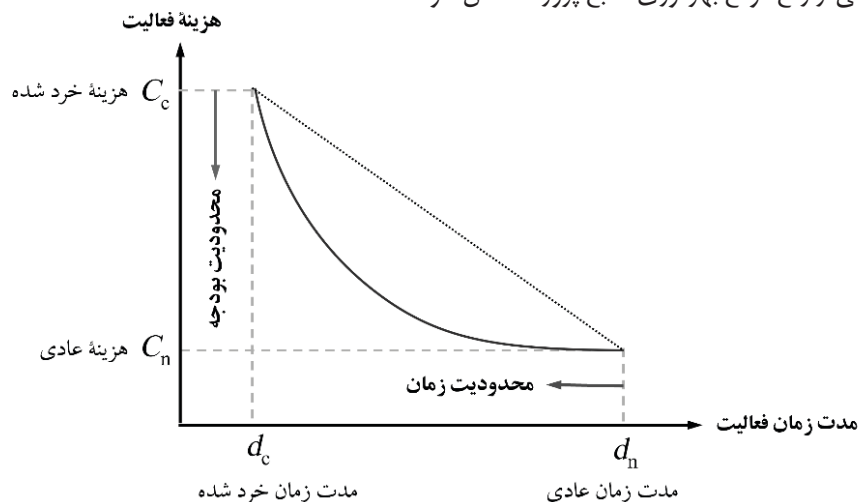
افزایش بهره‌وری پروژه به واسطه عواملی غیر از زمان و هزینه تکمیل پروژه، موجب کاهش شیب نمودار هزینه‌های مستقیم در مبادله زمان - هزینه می‌شود.

هزینه‌های غیرمستقیم، اما نه لزوماً، مستقیماً به یک موضوع هزینه نسبت داده نمی‌شوند. انجام کار مورد نظر باید از نظر مالی با هزینه مستقیم غیرممکن باشد. هزینه‌های غیرمستقیم معمولاً بر اساس برخی از موارد به یک موضوع هزینه اختصاص می‌یابند. در ساخت و ساز، کل هزینه‌ای که برای تکمیل ساخت مورد نیاز است، ولی مستقیماً قابل انتساب به موضوع هزینه نیست، غیرمستقیم است، مانند بالاسری.

رویکرد دوم را که به منظور تعیین ارتباط عوامل هزینه و زمان می‌توان به کار برد، در سطح فعالیت‌های پروژه است. سه روش برای فشرده‌سازی زمان یا تسریع زمان‌بندی پروژه وجود دارد که عبارتند از خرد کردن، هم‌پوشانی یا زمان‌کاهی، و جایگزینی. خرد کردن فعالیت‌ها با تخصیص منابع بیشتر به فعالیت مدت زمان فعالیت را کاهش می‌دهد. اما به علت محدودیت‌های دسترسی منابع و هماهنگی آنها، محدودیت‌های فیزیکی کارگاه و تجهیزات، کاهش کارایی و ریسک‌های دوباره‌کاری، و کاهش کیفیت هزینه بیشتری را به پروژه تحمیل خواهند کرد (ت ۶). روش زمان‌کاهی نیز با هم‌پوشانی اجرای فعالیت‌ها، مدت زمان کلی پروژه را کاهش می‌دهد که البته همراه با ریسک دوباره‌کاری یا تغییر است که ممکن است منجر به افزایش هزینه شود. همچنین امکان فشرده‌سازی مدت زمان پروژه با استفاده از این روش، فراتر از یک‌چهارم مدت زمان اولیه پروژه امکان‌پذیر نیست.^{۲۹} سیستم‌های احداث مختلف با تغییر نحوه اجرای فعالیت‌ها و دستیابی به اجزای تحویل‌شدنی به وسیله روش‌های متفاوت، امکان به کارگیری روش جایگزینی را به منظور کاهش مدت زمان کلی پروژه یا فعالیت‌ها را فراهم می‌آورند.

18. W. Pan, A Decision Support Tool for Optimising the Use of Offsite Technologies in Housebuilding. Repository: lboro.ac.uk, 1 Jan. 2006.

ت ۶ رابطهٔ زمان - هزینه در مورد یک فعالیت در حالت عادی و در حالت زمانبندی فشرده، تدوین: نگارندگان.



امروزه اغلب در پروژه‌های ساخت، به دلیل محدودیت‌های فیزیکی در محل کارگاه که از موانع بهره‌وری نیروی کار به‌شمار می‌آیند،^{۳۱} ساخت همه یا بخشی از عناصر را به خارج از کارگاه منتقل می‌کنند. همچنین یکی از مزیت‌های احداث برون کارگاهی امکان ساخت و مونتاژ اجزای ساختمان در فضایی سربسته است، به نحوی که تأثیر عوامل آب‌وهوایی که در احداث درون کارگاهی موجب اختلال در فرایند احداث و کاهش بهره‌وری و افزایش مدت زمان اتمام پروژه می‌شود، برطرف شود.^{۳۲}

از سوی دیگر، باید به این نکته توجه داشت که ساخت و مونتاژ برون کارگاهی، فعالیت‌هایی را به فرایند احداث اضافه می‌کند که این فعالیت‌ها هزینه و مدت زمان معینی را شامل می‌شوند. حمل و نقل، انبارداری، و نصب عناصر ساختمانی که در محل خارج از کارگاه ساخته و مونتاژ شده‌اند از جمله این فعالیت‌ها هستند.^{۳۳} همچنین ساخت عناصر ساختمانی خارج از کارگاه، شامل هزینه‌های اولیه‌ای است به منظور تأمین تسهیلات برون کارگاهی.^{۳۴} بنابراین هزینه‌های اضافی ساخت برون کارگاهی باید با صرفه‌جویی‌های ناشی از رفع موانع بهره‌وری منابع پروژه متعادل شود.

در پژوهش پیش رو با مقایسهٔ این عوامل در مورد سیستم‌های احداث صنعتی و متداول و در نظر گرفتن فرآیندهای مختلف، دیدگاه واضح‌تری در مورد تصمیم به کارگیری سیستم‌های احداث صنعتی عرضه می‌شود.

برترم و همکاران^{۳۵} به منظور مقایسهٔ مدت زمان و هزینهٔ پروژه‌های ساختمانی در سیستم‌های احداث پودمانی و متداول، عوامل مؤثر را به هشت مورد تفکیک کرده‌اند: طراحی، بالاسری، مواد، نیروی کار، حمل و نقل، دوباره کاری، تأمین مالی، و هزینه‌های کارخانه.

۳. تأثیر سیستم‌های احداث صنعتی بر مبادلهٔ زمان - هزینه

در این پژوهش چارچوبی به منظور تعیین ماهیت سیستم‌های احداث بر اساس مشخصه‌های برون کارگاهی، پیش ساخته‌سازی، پودمانگی، و ابعاد احداث معرفی شده است. به بیان دیگر، یک سیستم احداث بر مبنای سطح هریک از این مشخصه‌ها و ترکیب این مشخصه‌ها با یکدیگر تعریف می‌شود.

۳.۱. بررسی تأثیر در چارچوب مشخصه‌ها

در ادامه، تأثیر هر کدام از مشخصه‌های سیستم‌های احداث صنعتی بر زمان و هزینهٔ پروژه‌های ساختمانی در ادبیات موضوع بررسی می‌شود.

۳.۱.۱. احداث برون کارگاهی

این مشخصهٔ سیستم‌های احداث با محل ساخت و مونتاژ عناصر ساختمانی ارتباط دارد، به نحوی که در سیستم‌های احداث متداول، محل ساخت همان محل نصب عنصر ساختمانی (کارگاه) است. در صورتی که اجرای عناصر ساختمانی در محلی غیر از محل نصب نهایی آنها باشد، آن سیستم احداث دارای مشخصهٔ احداث برون کارگاهی است.

۳.۱.۲. احداث پیش ساخته

در ساخت عناصر ساختمانی به صورت پیش ساخته بر زمان فرایند تولید و مونتاژ اجزای ساختمانی تأکید می شود و ممکن است به صورت برون کارگاهی یا در داخل کارگاه انجام شود. در مقابل پیش ساخته سازی، ساخت در جای عناصر به معنی ساخت عناصر ساختمانی در محل قرارگیری نهایی آنها و هم زمان با نصب آن عناصر است.

مهم ترین ظرفیت پیش ساخته سازی به منزله مشخصه یک سیستم احداث، امکان تولید، و مونتاژ عناصر ساختمان به صورت هم زمان است که این موضوع می تواند مدت زمان تکمیل پروژه را به میزان قابل توجهی (تا ۵۰٪ مدت زمان احداث متداول) کاهش دهد؛^{۳۵} به طور مثال، در احداث ساختمان های بتنی، عناصر طبقات وابسته به تکمیل و به مقاومت رسیدن اجزای باربر طبقه پایین هستند. در حالی که این وابستگی در احداث پیش ساخته تنها محدود به فعالیت نصب اجزا می شود.

مزیت اقتصادی اولیه این موضوع، تسریع فرایند ساخت و ساز است، اما ارزش اقتصادی تکمیل زود هنگام به عملیات تجاری خاص و پتانسیل کاهش جریان نقدی و درآمد اضافی بستگی دارد. این موضوع را می توان به آسانی برای یک هتل زنجیره ای یا یک عملیات با محدودیت زمانی، مانند یک دانشگاه یا مدرسه، سنجید، اما ممکن است برای یک سازنده خانه خصوصی که در یک بازار سوداگرانه فعالیت می کند، این موضوع کمتر آشکار باشد. در صورتی که احداث پیش ساخته به صورت برون کارگاهی انجام شود، یکی از مزایای اقتصادی دیگر آن، کاهش مصرف و پیشگیری از اتلاف مصالح است؛ چراکه فرایندهای تولید در کارخانه منجر به سفارش انبوه مواد کارآمدتر در اندازه های صحیح برای پروژه خاص می شود. تعداد کل پرسنل کارگاه به حدود نیمی از پرسنل مورد نیاز برای ساخت و ساز درون کارگاهی کاهش می یابد و پرسنل کارگاه عمدتاً برای کارهای

19. J. Lee, et al., "Classification of Modular Building Construction Projects Based on Schedule-Driven Approach". In *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 145, no. 5, (May 2019): 04019031.

20. Off-site Construction

21. R.E. Smith and J.D. Quale, *Offsite Architecture: Constructing the Future* (London, New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2017).

22. Prefabricated Construction

ت ۷. رابطه میانگین برآورد هزینه ساختمان بر حسب واحد سطح و مقیاس آن بر حسب فوت مربع و ارتفاع، مأخذ:

Eriksen and Orlando, "Returns to Scale in Residential Construction: The Marginal Impact of Building Height", *Real Estate Economics*, (Aug. 2021).

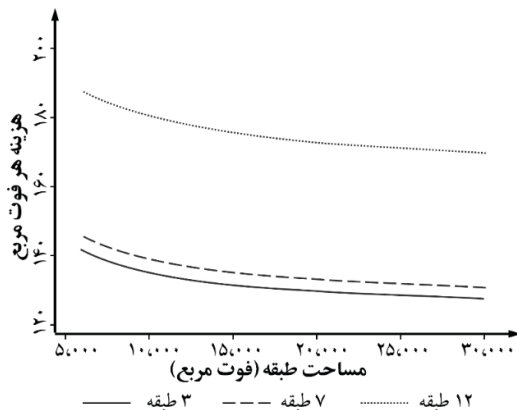
فونداسیون و پوشش (نما) ساختمان مورد نیاز هستند.^{۳۶}

در مقابل، تولید عناصر ساختمانی به صورت پیش ساخته مستلزم وجود یک کارخانه تولید عناصر ساختمانی است که توسط یک تأمین کننده راه اندازی می شود یا در پروژه های بزرگ به صورت کارخانه موقت توسط عوامل پروژه راه اندازی شده است. تولید عناصر ساختمانی در کارخانه به معنی تبدیل شدن فرایند ساخت به فرایند تولید است.

۳.۱.۳. احداث پودمانی

ساخت پودمانی را می توان در جهت تسهیل گرایش صنعت ساخت به سمت تولید عناصر ساختمانی به منظور افزایش بهره وری توضیح داد. به بیان دیگر، احداث پودمانی با فراهم آوردن سطح مناسبی از تکرار در عناصر ساختمانی و تسهیل اجماع و مونتاژ اجزا در کنار یکدیگر فرایند ساخت را بیشتر به سمت تولید متمایل کرده است.

عموماً احداث پودمانی به مثابه نوعی احداث پیش ساخته شناخته می شود که در آن تجمیع و اتصال اکثر عناصر ساختمانی در مرحله طراحی و برنامه ریزی قابل پیش بینی است و سطح بالای تکرار در تولید این عناصر، امکان انتفاع از ظرفیت های تولید انبوه از جمله منحنی یادگیری را فراهم می آورد تا حدی



آن، عناصر حجمی سه‌بعدی افزایش داد. با افزایش مقیاس واحد (ابعاد) احداث، ضمن تأمین یکپارچگی بیشتر بین اجزای ساختمان، از میزان کار در داخل کارگاه نیز کاسته می‌شود؛ اگرچه حمل‌ونقل و نصب عناصر ساختمانی بزرگ‌تر نیازمند تجهیزات سنگین‌تری است.^{۴۰}

۲.۳. متغیرهای تأثیر

بررسی اثرات مشخصه‌های سیستم‌های احداث صنعتی بر عوامل زمان و هزینه در ادبیات حاکی از آن است که برخی متغیرهای اساسی که در ادبیات بیشتر، تحت عنوان معیارهای تصمیم‌گیری در مورد به‌کارگیری سیستم‌های احداث صنعتی در پروژه‌های ساختمانی مطرح هستند، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی مبادله زمان - هزینه دارند، بنابراین به‌منظور بررسی سازوکار تأثیر مشخصه‌های سیستم‌های احداث صنعتی بر مبادله زمان - هزینه در پروژه‌های ساختمانی، ابتدا به تشریح این متغیرها پرداخته‌ایم. عبدالنبی و الادوی با تحلیل و مرور سیستماتیک مطالعات احداث پودمانی از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۹، فهرستی از معیارهای تصمیم‌گیری به‌کارگیری سیستم‌های احداث صنعتی را معرفی کرده‌اند.^{۴۱} در «جدول ۳» معیارهای مرتبط با عوامل زمان و هزینه مشخص شده است.

هزینه	نیروی کار
	بالاسری
	حمل‌ونقل و انبارداری
	طراحی و مهندسی
	مصالص و مواد اولیه
	تأمین مالی و سرمایه‌گذاری اولیه
زمان	دوباره‌کاری
	توالی فعالیت‌ها
	اختلال ناشی از محدودیت‌های فیزیکی کارگاه
	وابستگی به شرایط جوی
	دوباره‌کاری

که ۷۰ تا ۹۵٪ ساختمان در کارخانه تولید می‌شود (ت ۷).^{۳۷} درواقع، صرفه‌جویی در مقیاس تولید ازجمله مزیت‌های اقتصادی احداث پودمانی به‌شمار می‌رود.^{۳۸} هرچند این موضوع در مورد هزینه احداث ساختمان‌ها با سیستم احداث متداول نیز بررسی شده است (ت ۷). منظور از مقیاس در این موضوع، ابعاد و اندازه کل پروژه احداث است.

بنابراین احداث پودمانی مستلزم بهره‌برداری از کارخانه تولید به‌مراتب مجهزتر و صنعتی‌تر است. کارخانه‌های خودکار مدرن برای تولید واحدهای پودمانی نیاز به سرمایه‌گذاری برای راه‌اندازی دارند و این هزینه‌ها باید طی یک دوره بازپرداخت معین با خروجی پیش‌بینی‌شده تعداد واحد در سال مستهلک شوند. تنوع راه‌حل‌های پودمانی مشخص‌شده از طرف مشتریان و بازار ساختمانی متغیر، بر پیچیدگی دستیابی به مقیاس اقتصادی در تولید می‌افزاید. در مقابل این هزینه‌های سرمایه ثابت در فرایندهای ساخت پیشرفته‌تر پودمان‌ها، بهبود قابل‌توجهی در بهره‌وری و صرفه‌جویی در جابه‌جایی، استفاده، و اتلاف مواد در مقایسه با ساخت‌وساز درون‌کارگاهی ایجاد می‌شود. بهبود کیفی واحدهای تولیدی همچنین باعث صرفه‌جویی در بازرسی و دوباره‌کاری می‌گردد. تخمین زده می‌شود که برای تولید متوسط ۱۰۰ پودمان در یک پروژه معین، بهره‌وری کار در شرایط کارخانه با ضریب دوبرابر برای فعالیت مشابه در کارگاه ساختمان‌سازی افزایش یابد. برای پروژه‌های بزرگ‌تر، بهره‌وری ممکن است تا سه‌برابر افزایش یابد.^{۳۹}

۳.۱.۴. ابعاد احداث

مشخصه دیگر سیستم‌های احداث مبتنی بر ابعاد احداث است که می‌توان آن را با مفهوم مقیاس واحد احداث مرتبط دانست. درواقع با به‌کارگیری تجهیزات جدید می‌توان مقیاس واحد احداث را از عناصر خطی به عناصر صفحه‌ای، فراتر از

23. C. Goodier and A. Gibb, "Future Opportunities for Offsite in the UK", *Construction Management and Economics*, vol. 25, no. 6 (June 2007): 585-595.

24. Modular Construction

25. T.D. Miller and P.E.E. Pedersen, "Defining Modules, Modularity and Modularization: Evolution of the Concept in a Historical Perspective", In *Proc., 13th IPS Conf. Design for Integration in Manufacturing*, 1998.

جدول ۳. معیارهای تصمیم‌گیری مرتبط با زمان و هزینه در مورد به‌کارگیری سیستم‌های احداث صنعتی، مأخذ:

AbdulNabi and El-adaway, "Modular Construction: Determining Decision-Making Factors and Future Research Needs", *Journal of Management in Engineering*, vol. 36, no. 6 (Nov. 2020): 04020085

۱.۲.۳. طراحی

فرایند طراحی مستلزم هماهنگی کامل بین معماران، پیمانکاران، و تأمین‌کنندگان است که ممکن است منجر به طولانی شدن مدت طراحی شود. هزینه طراحی از هزینه‌های غیرمستقیم پروژه محسوب می‌شود و اغلب هزینه‌های بیشتری، به دلیل فقدان تجربه در طراحی پودمانی یا احتمال طراحی مجدد در صورتی که طراحی اولیه با هدف رویکرد احداث متداول باشد، اعمال می‌شود. اما از آنجا که صنعت با ایجاد طرح‌های تکرارپذیری که می‌توانند چندین بار مورد استفاده و تطبیق قرار گیرند، سازگار می‌شود، این هزینه احتمالاً کاهش می‌یابد؛ توسعه ابزارهای دیجیتال مانند طراحی خودکار به این موضوع کمک خواهد کرد.^{۴۲}

۲.۲.۳. بالاسری

کاهش مدت زمان ساخت به منزله یکی از کلیدی‌ترین عوامل انتخاب سیستم‌های احداث صنعتی طرح شده است،^{۴۳} که این خود یکی از عواملی است که هزینه‌های بالاسری و مدیریت ساخت را کاهش می‌دهد.

۳.۲.۳. مواد و مصالح

در مورد مواد و مصالح، هزینه نهایی به شرایط و عوامل متعددی وابسته است و نمی‌توان در مورد بیشتر یا کمتر بودن هزینه نسبت به سیستم‌های احداث متداول قضاوت کرد. افزایش بهره‌وری تولید قطعات ساختمانی در کارخانه منجر به کاهش مصرف مواد و مصالح نسبت به سیستم‌های احداث متداول می‌شود. از طرفی، ضوابط و معیارهای ساخت و تولید در سیستم‌های احداث صنعتی ممکن است بر میزان یا سطح کیفیت مواد و مصالح به کاررفته تأثیر بگذارد و موجب افزایش هزینه مواد و مصالح کل پروژه شود.^{۴۴}

۴.۲.۳. نیروی کار

در یک ساختمان پودمانی تا ۸۰٪ از فعالیت‌های متداول کارگری می‌تواند خارج از کارگاه و به تأسیسات تولیدی منتقل شود. برخی از مهارت‌محورترین و گران‌ترین انواع کار (از جمله کارهای مکانیکی، برقی، و لوله‌کشی) را می‌توان به کارگران تولیدی کم‌هزینه محول کرد که این امر باعث کاهش صورت‌حساب دستمزد می‌شود. مهم‌تر اینکه، محیط عملیاتی استاندارد، خودکار، و کنترل‌شده‌تر یک کارخانه می‌تواند بهره‌وری را بیش از آنچه با ساخت‌های متداول به دست می‌آید، دو برابر کند و مقدار زیادی از زمان توقف درون کارگاهی را بکاهد و این موضوع باید پیش از در نظر گرفتن مزایای بهره‌وری ناشی از ایجاد فرایندهای ساده، تکراری، یا تجهیزات اتوماسیون پیشرفته در نظر باشد. مونتاژ پودمان‌های درون کارگاهی نیز به نیروی کار با مهارت کمتر و در نتیجه کم‌هزینه نیاز دارد و یک تولیدکننده تخمین می‌زند که ۲۵٪ از زمان صرف‌شده درون کارگاه صرف ایجاد ارزش می‌شود، در حالی که ۷۵٪ از زمانی که در خارج از کارگاه صرف می‌شود، ارزش ایجاد می‌کند. به‌طور کلی، ما انتظار داریم که انتقال به تولید خارج از کارگاه هزینه‌های نیروی کار در یک پروژه را تا ۲۵٪ کاهش دهد. صرفه‌جویی زمانی قابل‌توجه‌تر است که بیشتر فعالیت‌های بارزش مانند نصب برق، لوله‌کشی، و تهویه مطبوع را بتوان به خارج از کارگاه انتقال داد.^{۴۵}

۵.۲.۳. حمل‌ونقل

سیستم‌های احداث صنعتی نیازمند برنامه‌ریزی و هماهنگی دقیق برای اطمینان از تحویل کارآمد و به‌موقع اجزا به محل ساخت‌وساز است. این موضوع می‌تواند شامل قوانین حمل‌ونقل، محافظت از اجزا در طول حمل‌ونقل، و مدیریت ترتیبات و تعهدات سازمانی باشد.^{۴۶} درواقع موضوع حمل‌ونقل

26. J. Gosling, et al., "Defining and Categorizing Modules in Building Projects: An International Perspective", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 142, no. 11 (November 2016): 04016062.

27. R.Z.C. Lim, et al., "A Preliminary Design Tool for Volumetric Buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 31, no. 13 (May 2022).

28. H. Kerzner, *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling* (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2017).

29. P. Ballesteros-Pérez, "Modelling the Boundaries of Project Fast-Tracking", *Automation in Construction*, vol. 84 (December 2017): 231-241.

30. N. Bertram, et al., *Modular Construction: From Projects to Products* (McKinsey & Company, 2019).

31. P.F. Kaming, et al., "Factors Influencing Craftsmen's Productivity in Indonesia", *International Journal of Project Management*, vol. 15, no. 1 (February 1997): 21-30.

32. M. Arashpour, et al., "Optimization of Process Integration and Multi - Skilled Resource Utilization in Off-site Construction", *Automation in Construction*, vol. 50 (February 2015): 72-80.

33. N. Blismas, et al., "Benefit Evaluation for Off-Site Production in Construction", *Construction Management and Economics*, vol. 24, no. 2 (Feb. 2006): 121-130; T. Si, et al., "A Dynamic Just-In-Time Component Delivery Framework for Off-Site Construction", *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, no. 15 (June 2021): 1-19.

34. W. Pan and R. Sidwell, "Demystifying the Cost Barriers to Offsite Construction in the UK", *Construction Management and Economics*, vol. 29, no. 11, (November 2011): 1081-1099.

35. T. Gunawardena and P. Mendis, "Prefabricated Building Systems—Design and Construction", *Encyclopedia*, vol. 2, no. 1 (January 2022): 70-95; R. Lawson, et al., "Application of Modular Construction in High-Rise Buildings", *Journal of Architectural Engineering*, vol. 18, no. 2 (June 2012): 148-154.

از نکات حایز توجه این است که در احداث برون کارگاهی پرداخت‌های اولیه معمولاً بالاتر است. در یک پروژه ساختمانی متداول دوساله، کارفرما ممکن است نیمی از بهای زمین را پیشاپیش بپردازد و نیمی دیگر را در طول دو سال احداث تقسیم کند. در یک اجرای پودمانی با مدت فشرده شده به یک سال، کل پرداخت می‌تواند از قبل پرداخت شود، اما تأمین مالی تنها برای یک سال به جای دو سال مورد نیاز است. با فرض ۱۰٪ هزینه سرمایه در دو سال، در این مثال، هزینه‌های تأمین مالی حدود ۵٪ از کل هزینه پروژه کاهش می‌یابد.^{۴۹}

۳.۲.۸. هزینه‌های کارخانه

هزینه ساخت کارخانه باید در مقابل صرفه‌جویی در هزینه متعادل شود. بازپرداخت سرمایه و هزینه‌های عملیاتی مستمر اداره کارخانه باید لحاظ شود. تعریف یک محدوده معمولی از هزینه سرمایه‌گذاری دشوار است؛ زیرا به اندازه تسهیلات و سطح اتوماسیون در حال اجرا بستگی دارد. با ایجاد یک سند کسب‌وکار برای خود کارخانه و با فرض نرخ بازده در تسهیلات، استهلاک سرمایه، و همچنین هزینه‌های عملیاتی و جایگزینی ماشین‌آلات معقول باشند، می‌توانیم تأثیر هزینه را بر هر پروژه تخمین بزنیم. بسته به راه‌اندازی، هزینه تخصیص یافته کارخانه می‌تواند بین ۵ تا ۱۵٪ از کل هزینه‌های یک پروژه ساخت‌وساز را تشکیل دهد.^{۵۰}

۴. نتایج

در این پژوهش به منظور ارزیابی مبادله زمان - هزینه به‌منزله یک معیار تصمیم‌گیری در به‌کارگیری سیستم‌های احداث صنعتی، با بررسی وجوه تمایز سیستم‌های احداث صنعتی و متداول، فهرستی از متغیرهای مؤثر بر مبادله زمان - هزینه پروژه‌های ساختمانی که تحت تأثیر تغییر سیستم احداث

یکی از چالش‌های به‌کارگیری سیستم‌های احداث صنعتی به‌شمار می‌آید و پژوهش‌های متعددی به‌منظور بهینه‌سازی حمل‌ونقل اجزای پیش‌ساخته صورت گرفته است.^{۴۷}

۳.۲.۶. دوباره‌کاری

درحالی‌که یکی از بارزترین مزایای سیستم‌های احداث صنعتی، تحویل سریع‌تر پروژه نسبت به سیستم‌های احداث متداول است، اما دوباره‌کاری ممکن است تأثیر شدیدتری در این سیستم‌های احداث نسبت به سیستم‌های احداث متداول داشته باشد؛ چراکه نیاز به تثبیت طرح‌های پودمانی در مراحل اولیه، چالش‌های متعددی را برای متخصصان طراحی ایجاد می‌کند. هنگامی که طرحی نهایی شد، به‌دلیل ابعاد استاندارد واحدهای پودمانی و انعطاف‌پذیری محدود، اجرای تغییرات می‌تواند دشوار و پرهزینه باشد. علاوه‌براین، محدودیت‌های حمل‌ونقل و محدودیت‌های چیدمان کارگاه ممکن است فرایند طراحی را محدود و چالش‌های آن را پیچیده‌تر کند.^{۴۸}

۳.۲.۷. تأمین مالی

زنجیره‌های تأمین کنونی توسعه‌نیافته و پراکنده هستند؛ به این معنی که استانداردسازی بین متصدی‌های مختلف وجود ندارد. این فقدان قابلیت همکاری در بازاری با متصدی‌های کوچک و سابقه محدود، خطر ورشکستگی را تقویت می‌کند. امروزه نرخ‌های وام برای پروژه‌هایی که از احداث برون کارگاهی استفاده می‌کنند، بیشتر است؛ چراکه این یک مفهوم نسبتاً جدید است و همیشه به‌طور کامل از سوی صنعت تأمین مالی درک نمی‌شود. اما با تحقیق و توسعه بیشتر، توسعه سوابق و دستیابی به مقیاس، این موضوع در طول زمان تغییر خواهد کرد. مهم‌تر آنکه، چون زمان برابر است با پول، توانایی تسریع در پروژه‌ها می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد. با این حال، یکی

هستند، مبنای تحلیل سازوکار تأثیر مشخصه‌های سیستم‌های احداث صنعتی بر مبادلهٔ زمان - هزینه قرار گرفت.

به این ترتیب، محدودیت‌های فیزیکی کارگاه، دسترسی به نیروی کار، شرایط نامساعد جوی، و مقیاس (ظرفیت) کم ساخت، محدودیت‌هایی هستند که با به کارگیری سیستم احداث برون کارگاهی مرتفع می‌شوند. محدودیت‌های فیزیکی مستقیماً بر بهره‌وری فرایند ساخت تأثیر می‌گذارند. در مقابل، کاهش دسترسی به نیروی کار در مناطق دورافتاده نیز می‌تواند موجب شود که فعالیت‌های ساخت با تعداد نیروی کار حداقل اجرا شوند؛ این موضوع به این معناست که در سیستم‌های احداث متداول همواره تعداد نیروی کار در فرایند ساخت تحت تأثیر بازهٔ دسترسی به نیروی کار و محدودیت‌های فیزیکی کارگاه قرار دارد. در حالی که احداث برون کارگاهی با فراهم آوردن فضای فیزیکی بزرگ‌تر در کارخانه و همچنین قرارگیری در منطقه مناسب، موجب افزایش بهره‌وری فرایند ساخت می‌شود. شرایط نامساعد جوی به مثابهٔ عاملی شناخته شده است که در مرحلهٔ اول موجب تأخیر در فرایند ساخت می‌شود، که اختلال ناشی از آن موجب کاهش بهره‌وری می‌گردد.

اگرچه احداث پیش ساخته و برون کارگاهی هزینه‌های تولید یا تجهیز کارخانه و انبارداری و حمل و نقل را به هزینه‌های پروژه اضافه می‌کنند، مقیاس ساخت یا تولید می‌تواند به منزلهٔ یک عامل اقتصادی بر هزینهٔ تولید و مستقیماً بهره‌وری اثر بگذارد. این عامل همچنین با به کارگیری مشخصهٔ احداث پیش ساخته تقویت می‌شود؛ چراکه با صنعتی سازی فرایند ساخت، امکان بهره‌گیری از ماشین آلات بیشتر می‌شود.

وابستگی میان فعالیت‌ها از جمله اثرگذارترین عوامل بر مدت زمان پروژه‌های ساختمانی به شمار می‌رود و روش‌های تسریع پروژه، شامل خرد کردن یا هم پوشانی فعالیت‌ها اغلب موجب افزایش هزینه و احتمال ریسک‌های دوباره کاری پروژه

36. M. Lawson, et al., *Design in Modular Construction* (Boca Ratón, Crc Press, 2014).

37. Z. Yang and W. Lu, "Facility Layout Design for Modular Construction Manufacturing: A Comparison Based on Simulation and Optimization", *Automation in Construction*, vol. 147 (Mar. 2023): 104713; Huu-Tai Thai, et al., "A Review on Modular Construction for High-Rise Buildings", *Structures*, vol. 28, (December 2020): 1265-1290.

38. Lawson, et al., "Application of Modular Construction in High-Rise Buildings", 148-154.

39. Lawson, et al., *Design in Modular Construction*.

40. Lim, et al., "A Preliminary Design Tool for Volumetric Buildings

جدول ۴ تأثیر متغیرها به تفکیک مشخصه‌های سیستم‌های احداث صنعتی، تدوین: نگارندگان.

می‌شوند. احداث پیش ساخته به مثابهٔ یک روش جایگزینی فعالیت‌ها، می‌تواند با رفع وابستگی‌های ماهوی فعالیت‌های ساخت، بر مدت زمان فرایند ساخت تأثیر چشمگیری بگذارد و بر بهره‌وری بیفزاید.

با صنعتی سازی فرایند احداث و تبدیل آن از ساخت به تولید، می‌توان از ظرفیت‌های تولید صنعتی، از جمله تکرارپذیری، بهره برد. این موضوع با طراحی و تولید پودمانی اجزای ساختمان امکان پذیر می‌شود و می‌تواند مستقیماً بر بهره‌وری تأثیر مثبت بگذارد. اما، در عین حال، احداث پودمانی موجب کاهش انعطاف پذیری طرح می‌گردد و در صورت بروز تغییر طرح یا خطای طراحی و تولید می‌تواند بر بهره‌وری اثرات منفی داشته باشد.

ابعاد احداث به واسطهٔ سه مشخصه بر مبادلهٔ زمان - هزینهٔ پروژه‌های ساختمانی اثر می‌گذارد: برون کارگاهی، پیش ساخته سازی، پودمانی. احداث سه بعدی به معنی کاهش نیاز به مونتاژ اجزا در محل کارگاه است، اما، در عین حال موجب افزایش حجم و وزن واحدهای حمل و نقل و انبارداری می‌شود. همچنین طرح پودمان‌های سه بعدی انعطاف پذیری کمتری را به همراه دارند.

هدف از تحلیل سازوکار تأثیر، تعیین عوامل و متغیرهای

مشخصه	متغیر	تأثیر متغیر
احداث برون کارگاهی	محدودیت‌های فیزیکی کارگاه (-)	بهره‌وری (-)
	تأثیر شرایط نامساعد جوی (-)	مدت زمان (+)
احداث پیش ساخته	هزینهٔ حمل و نقل و انبارداری (+)	هزینه (+)
	وابستگی فعالیت‌ها (-)	مدت زمان (-)
احداث پودمانی	هزینهٔ تولید و تأمین (+)	هزینه (+)
	تکرارپذیری (+)	بهره‌وری (+)
ابعاد احداث	انعطاف طرح (-)	دوباره کاری (-)
	وابستگی فعالیت‌ها (-)	مدت زمان (-)
	هزینهٔ حمل و نقل و انبارداری (+)	هزینه (+)
	فعالیت‌های مونتاژ (-)	بهره‌وری (+)

رابطه علیت زمان - هزینه در پروژه‌های ساختمانی بررسی گردید، به نحوی که تأثیر مشخصه‌های صنعتی‌سازی بر مبادله زمان - هزینه پروژه‌های ساختمانی به شکل واضحی تبیین شود (ت ۸).

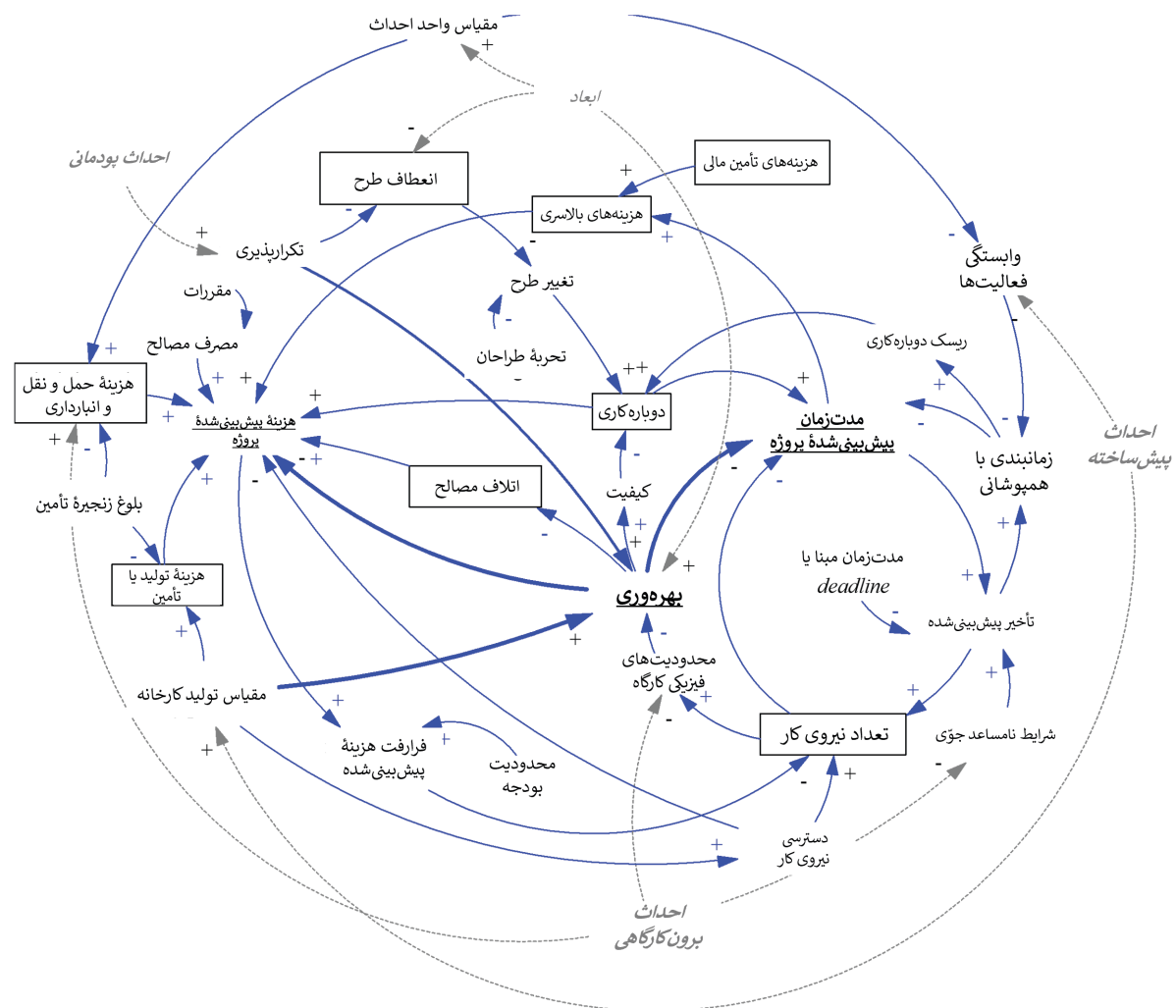
اساسی در مورد مسئله است. در این پژوهش پس از شناسایی متغیرهای تأثیر، به منظور تبیین سازوکار تأثیر مشخصه‌های سیستم‌های احداث صنعتی بر مبادله زمان - هزینه، ابتدا تأثیر هر کدام از متغیرها بر مبنای ادبیات بر هر کدام از متغیرهای تأثیر مشخص شد (جدول ۴). سپس تعامل این عوامل با

41. M. AbdulNabi and I.H. El-adaway, "Modular Construction: Determining Decision-Making Factors and Future Research Needs", *Journal of Management in Engineering*, vol. 36, no. 6 (Nov. 2020): 04020085.

42. W. Zhang, et al., "The Hindrance to Using Prefabrication in Hong Kong's Building Industry". *Journal of Cleaner Production*, vol. 204 (Dec. 2018): 70-81; Bertram, et al., *Modular Construction: From Projects to Products*.

43. N. Thurairajah, et al., "Unexpected Challenges in the Modular Construction Implementation: Are UK Contractors Ready?", *Sustainability*, vol. 15, no. 10 (2023): 8105.

ت ۸. شبکه علیت سازوکار تعامل عناصر مؤثر بر مبادله زمان - هزینه پروژه‌های ساختمانی و نحوه تأثیر مشخصه‌های سیستم‌های احداث صنعتی، تدوین: نگارندگان.



تحلیل و نتیجه گیری

این شبکه علّیت نشان می‌دهد که مهم‌ترین امتیاز سیستم‌های احداث صنعتی در پروژه‌های ساختمانی، با ارتقای بهره‌وری حاصل می‌شود. با استفاده از این شبکه علّیت و مدل‌سازی پویایی سیستم می‌توان تأثیر سیستم‌های احداث صنعتی‌سازی بر مبادله زمان - هزینه پروژه‌های ساختمانی را سنجید. اما این امر مستلزم داشتن اطلاعات گسترده کمی در مورد متغیرهای این شبکه علّیت است، که به‌منزله یکی از محدودیت‌ها، در چارچوب این پژوهش نمی‌گنجد و می‌تواند موضوع یکی از پژوهش‌های آتی باشد. با این حال، با در نظر گرفتن بهره‌وری به‌منزله مهم‌ترین عامل اثرگذار سیستم‌های احداث صنعتی بر مبادله زمان - هزینه پروژه‌های ساختمانی و رابطه هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم با مدت زمان کل پروژه می‌توان نتایج احتمالی این تحلیل را تخمین زد.

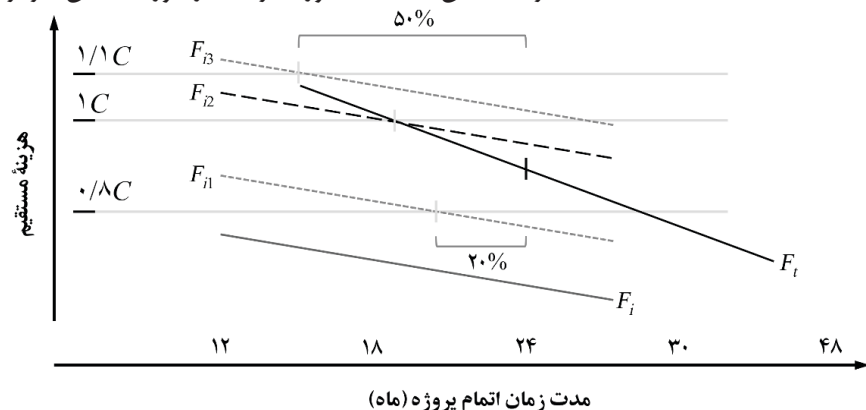
با توجه به «ت ۹» که مدلی فرضی از مبادله زمان - هزینه پروژه‌های ساختمانی است، در صورتی که رابطه هزینه‌های مستقیم یک پروژه با سیستم احداث متداول (غیرصنعتی) با مدت زمان پروژه به صورت خطی F_t در نظر گرفته شود، شیب این رابطه در مورد سیستم‌های احداث صنعتی با فرض بهره‌وری بیشتر، که طبق مطالعات صورت گرفته، در صورت تحقق، فراتر

44. S. Wang, et al., "Cost Analysis between Prefabricated Buildings and Traditional Buildings", In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 768, no. 31 (Mar. 2020): 052090.

45. Bertram, et al., *Modular Construction: From Projects to Products*.

ت ۹. مقایسه رابطه زمان - هزینه احتمالی پروژه‌های ساختمانی مبتنی بر سیستم‌های احداث متداول و صنعتی، تدوین: نگارندگان؛ مأخذ اعداد و درصدها:

Bertram, et al., *Modular Construction: From Projects to Products* (McKinsey & Company, 2019).



از ظرفیت سیستم‌های احداث متداول خواهد بود، کمتر است (F_1) در «ت ۹». اما با وجود این موضوع، به کارگیری سیستم‌های احداث صنعتی، هزینه‌های دیگری را بر پروژه اعمال می‌کند که موجب افزایش متغیر هزینه در رابطه خطی فرضی خواهد شد. با این استدلال سه حالت ممکن وجود خواهد داشت؛ (۱) رابطه زمان - هزینه پروژه با سیستم احداث صنعتی در قسمت پایین (F_{11}) رابطه زمان - هزینه پروژه ساختمانی با سیستم احداث متداول قرار می‌گیرد که به این معناست که سیستم احداث صنعتی به لحاظ مدت زمان تکمیل و هزینه تکمیل، انتخاب بهینه خواهد بود. (۲) این دو رابطه در یک نقطه متقاطع باشند (F_{12})، که به این معناست که در صورتی که اولویت پروژه هزینه تکمیل باشد، سیستم احداث متداول در مدت زمان‌های تکمیل طولانی‌تر، انتخاب بهینه خواهد بود؛ اما در مدت زمان‌های کوتاه‌تر، سیستم احداث صنعتی هزینه تکمیل کمتری خواهد داشت. (۳) رابطه زمان - هزینه پروژه با سیستم احداث صنعتی در همه مدت زمان‌های تکمیل پروژه، هزینه بیشتری (F_{13}) نسبت به احداث با استفاده از سیستم احداث متداول خواهد داشت.

سیستم‌های احداث صنعتی ظرفیت بالایی در ارتقای بهره‌وری و کاهش مدت زمان تکمیل پروژه‌های ساختمانی دارند. اما متغیر هزینه، یکی از موانع جدی به کارگیری این سیستم‌ها در احداث پروژه‌های ساختمانی به شمار می‌آید. در این پژوهش بر اساس مرور مطالعات صورت گرفته، به نظر می‌رسد که عامل اساسی بلوغ زنجیره تأمین می‌تواند به رفع این مانع کمک کند. همچنین مقیاس پروژه ساختمانی می‌تواند مهم‌ترین معیار در امکان‌سنجی اقتصادی به کارگیری سیستم‌های احداث صنعتی در نظر گرفته شود. به نحوی که پروژه‌های ساختمانی با مقیاس بزرگ‌تر می‌تواند گام‌های نخستین توسعه به کارگیری و بلوغ زنجیره تأمین سیستم‌های احداث صنعتی قلمداد شود.



References

- AbdulNabi, Mohamad and Islam H. El-adaway. "Modular Construction: Determining Decision-Making Factors and Future Research Needs". *Journal of Management in Engineering*, vol. 36, no. 6 (Nov. 2020): 04020085. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000859](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000859).
- Arashpour, Mehrdad, Ron Wakefield, Nick Blismas, and James Minas. "Optimization of Process Integration and Multi - Skilled Resource Utilization in Off-Site Construction". *Automation in Construction*, vol. 50 (February 2015): 72-80.
- Ballesteros-Pérez, Pablo. "Modelling the Boundaries of Project Fast-Tracking". *Automation in Construction*, vol. 84 (December 2017): 231-241.
- Bertram, Nick. et al. *Modular Construction: From Projects to Products*. McKinsey & Company, 2019.
- Blismas, Nick, Christine Pasquire, and Alistair Gibb. "Benefit Evaluation for Off-Site Production in Construction". *Construction Management and Economics*, vol. 24, no. 2 (Feb. 2006): 121-130.
- Copertari, Luis F. *Time, Cost and Performance Tradeoffs in Project Management*. McMaster University, 2002.
- Costa, Sara, Maria Sameiro Carvalho, Carina Pimentel, and Claudia Duarte. "A Systematic Literature Review and Conceptual Framework of Construction Industrialization". *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 149, no. 2 (February 2023).
- Dinsmore, Paul C. "Boosting Productivity on Projects: Building up from the Basics". *PM Network*, vol. 3, no. 7 (1989): 23-25.
- Eriksen, Michael D. and Anthony W. Orlando. "Returns to Scale in Residential Construction: The Marginal Impact of Building Height". *Real Estate Economics*, (Aug. 2021).
- Goodier, Chris and Alistair Gibb. "Future Opportunities for Offsite in the UK". *Construction Management and Economics*, vol. 25, no. 6 (June 2007): 585-595.
- Gosling, Jonathan, Margherita Pero, Manuel Schoenwitz, Denis Towill, Roberto Cigolini. "Defining and Categorizing Modules in Building Projects: An International Perspective". *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 142, no. 11 (November 2016): 04016062.
- Gunawardena, Tharaka and Priyan Mendis. "Prefabricated Building Systems—Design and Construction". *Encyclopedia*, vol. 2, no. 1 (January 2022): 70-95.
- Kaming, Peter F., Paul O. Olomolaiye, Gary D. Holt and Frank C. Harris. "Factors Influencing Craftsmen's Productivity in Indonesia". *International Journal of Project Management*, vol. 15, no. 1 (February 1997): 21-30.
- Kerzner, Harold. *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- Krugman, Paul. *Defining and Measuring Productivity*. OECD, 1994.
- Lawson, Mark, Ray Ogden, and Chris Goodier. *Design in Modular Construction*. Boca Ratón, Crc Press, 2014.
- Lawson, R. Mark, Ray G. Ogden, and Rory Bergin. "Application of Modular Construction in High-Rise Buildings". *Journal of Architectural Engineering*, vol. 18, no. 2 (June 2012): 148-154.
- Lee, Jeonghoon, Moonseo Park, Hyun-Soo Lee, and Hosang Hyun. "Classification of Modular Building Construction Projects Based on Schedule-Driven Approach". *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 145, no. 5 (May 2019): 04019031.
- Lim, Robert Z.C., Daniel T.W. Looi, Hing-Ho Tsang, John L. Wilson. "A Preliminary Design Tool for Volumetric Buildings". *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 31, no. 13 (May 2022).
- Liu, Yang, Jianjun Dong, and Ling Shen. "A Conceptual Development Framework for Prefabricated Construction Supply Chain Management: An Integrated Overview". *Sustainability*, vol. 12, no. 5 (March 2020): 1878.
- Mao, Chao, Qiping Shen, Wei Pan, and Kunhui Ye. "Major Barriers to Off-Site Construction: The Developer's Perspective in China". *Journal of Management in Engineering*, vol. 31, no. 3 (May 2015): 04014043.
- Mashaqbeh, Mohammad and Khaled El-Rayes. "Minimizing Transportation Cost of Prefabricated Modules in Modular Construction Projects". *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 29, no 10 (2022): 3847-3867.
- Miller, T.D. and P.E.E. Pedersen. "Defining Modules, Modularity and Modularization: Evolution of the Concept in a Historical Perspective". In *Proc., 13th IPS Conf. Design for Integration in Manufacturing*, 1998.
- Pan, Wei. *A Decision Support Tool for Optimising the Use of Offsite Technologies in Housebuilding*. Repository: lboro.ac.uk, 1 Jan. 2006.
- Pan, Wei and Robert Sidwell. "Demystifying the Cost Barriers to Offsite Construction in the UK". *Construction Management and Economics*, vol. 29, no. 11, (November 2011): 1081-1099.
- Schmid, Thomas, Carlo Testa, and Henry A. Frey. *Systems Building: An International Survey of Methods*. London: Pall Mall Press, 1969.
- Sebestyén, G. "System in Construction". *Proceedings of 8Q Congress of CIB, Building Research World Wide*, CIB/Norwegian Building Research Institute, 1980, 773-776.
- Si, Tongguang, Hong Xian Li, Zhen Lei, Hexu Liu, and SangHyeok Han. "A Dynamic Just-In-Time Component Delivery Framework for Off-Site Construction". *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, no. 15 (June 2021): 1-19.
46. C. Mao, et al., "Major Barriers to Off-Site Construction: The Developer's Perspective in China", *Journal of Management in Engineering*, vol. 31, no. 3 (May 2015): 04014043.
47. M. Almashaqbeh and Khaled El-Rayes, "Minimizing Transportation Cost of Prefabricated Modules in Modular Construction Projects". *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 29, no 10 (2022): 3847-3867.
48. Zhang, et al., "The Hindrance to Using Prefabrication in Hong Kong's Building Industry", 70-81.
49. Bertram, et al., *Modular Construction: From Projects to Products*.
50. Lawson, et al., *Design in Modular Construction*

- Smith, Ryan E. and John D. Quale. *Offsite Architecture: Constructing the Future*. London, New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2017.
- Tavares, Alice, Dina D'Ayala, Anibal Costa, and Humberto Varum. "Construction Systems", in *Structural Rehabilitation of Old Buildings*, Springer Berlin Heidelberg, 2013, 1-35.
- Teicholz, Paul. "Labor-Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies -- AECbytes Viewpoint". Apr. 2004, 14. www.aecbytes.com/viewpoint/2004/issue_4.html.
- Thai, Huu-Tai, Tuan Ngo, and Brian Uy. "A Review on Modular Construction for High-Rise Buildings". *Structures*, vol. 28, (December 2020): 1265-1290.
- Thurairajah, Niraj, Akila Rathnasinghe, Mehvish Ali, and Shashwat Shashwat. "Unexpected Challenges in the Modular Construction Implementation: Are UK Contractors Ready?". *Sustainability*, vol. 15, no. 10 (2023): 8105.
- Vereen, Stephanie C., William Rasdorf, and Joseph E. Hummer. "Development and Comparative Analysis of Construction Industry Labor Productivity Metrics". *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 142, no. 7 (July 2016): 04016020.
- Wang, Guangbin, Huan Liu, Heng Li, Xiaochun Luo, and Jiaxi Liu. "A Building Project-Based Industrialized Construction Maturity Model Involving Organizational Enablers: A Multi-Case Study in China". *Sustainability*, vol. 12, no. 10 (May 2020): 4029.
- Wang, Shu, Hengchun Zhang, Chan Wang, and Yuanyuan Wu. "Cost Analysis between Prefabricated Buildings and Traditional Buildings". In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 768, no. 31 (Mar. 2020): 052090.
- Warzawski, A. "System Building - Education and Research". *Proceedings of 7 CIB Congress*, 1977, 113-125.
- Yang, Zhongze and Weisheng Lu. "Facility Layout Design for Modular Construction Manufacturing: A Comparison Based on Simulation and Optimization". *Automation in Construction*, vol. 147 (Mar. 2023): 104713.
- Zhang, Wei, Ming Wai Lee, Lara Jaillon, and Chi-Sun Poon. "The Hindrance to Using Prefabrication in Hong Kong's Building Industry". *Journal of Cleaner Production*, vol. 204 (Dec. 2018): 70-81.