http://context-faru.um.ac.ir

Vol. 1, No. 1, 2025, p. 171-185

Research Article

Essentials of Architectural Design for 3D Printed Homes

M. Rezazadeh [1]*, H. Mazaherian [2], M. R. Matini [3]

How to cite this article:
Rezazadeh, M. Mazaherian, H. and Matini, M.R. (2025). Essentials of Architectural Design for 3D Printed Homes. *contextual architecture and urbanism design studies*, 1(1), 171-184.
https://doi.org/10.22067/context.2025.91936.1012.

Receive: 31 January 2025
Revise : 24 February 2025
Accept: 28 February 2025
Available Online: 28 February 2025

Introduction

This research proposes a conceptual framework for identifying effective elements and components in the design of 3D-printed housing. The framework is derived from a systematic review of literature focusing on the architectural characteristics of such housing. The study addresses key aspects and considerations essential to the design process for 3D-printed homes. Additionally, it provides an overview of foundational architectural principles required for housing design using 3D printing technology. By analyzing academic articles, books, and other scholarly sources, this review synthesizes relevant insights. The findings aim to assist architects, engineers, and researchers by informing their design strategies and decision-making processes.

Materials and Methods

To identify relevant design features, the study categorizes them into five groups: structure, materials, printer type, construction site, and architectural characteristics. In the selected literature, we examined case studies and attributes within each category to enhance designers' understanding of this field. The research methodology follows a systematic literature review approach.

Results and Discussion

Materials: Concrete is the predominant material for 3D-printed housing, and its use complies with construction regulations in Iran, facilitating permit approvals.

1- PhD in Architecture, Department of Architecture, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran,Tehran,Iran.
2- Associate Professor, Department of Architecture, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.
3- Associate Professor, Department of Architecture, School of Architecture, Art University of Iran, Tehran, Iran.
(*- Corresponding Author Email: m.rezazade@ut.ac.ir)

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

https://doi.org/10.22067/context.2025.91936.1012

Printer Systems: Two systems dominate the field, accounting for over 90% of 3D-printed structures:

Gantry systems are widely used for linear layouts, large-scale projects, and simple rectangular forms.

Robotic arm systems are better suited for complex geometries and smaller-scale constructions.

Construction Site: On-site construction using gantry printers is ideal for large projects, while workshop-based fabrication is recommended for intricate designs with limited scope.

Structural Considerations: Concrete's low tensile strength can be mitigated by manually integrating steel elements or adding reinforcing additives (e.g. glass fibers).

Architectural Features:

Limitations: Constraints include printer dimensions, permissible angles for inclined forms, and challenges in reinforcing and installing utilities.

Design Opportunities: Curved walls, free-form geometries, and compatibility with computational design tools enable innovative applications. Such designs are particularly suitable for single-story structures but can be combined with conventional structural systems (e.g. traditional roofs) to expand floor count and formal possibilities.

Conclusion

Currently, 3D-printed housing is most effective for compact, single-story designs made from concrete that is manually reinforced with glass fibers. These structures typically showcase curvilinear shapes and open floor plans, made possible through advanced computational design techniques. The unique design flexibility allows for innovative architectural forms that traditional construction methods might struggle to achieve. By combining 3D-printed components with conventional structural systems, such as hybrid roofs, the capabilities of this technology can be significantly broadened. This integration opens the door to constructing multi-story buildings and a variety of architectural styles, making it a versatile option for future developments. As the technology evolves, it holds the promise of not only enhancing aesthetic appeal but also improving efficiency and sustainability in construction. The potential for rapid, cost-effective building solutions could revolutionize the housing market, particularly in addressing urban housing shortages and promoting eco-friendly practices.Keywords: housing construction, house 3D printing, digital fabrication, mass customization, architectural design criteria.

Keywords: housing construction, digital fabrication, mass customization, architectural design criteria, 3D-printed housing.

جلد ۱، شماره ۱، بهار و تابستان ۱٤۰٤، ص ۱۸۵ -۱۷۱

http://context-faru.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

مؤلفه‌های مؤثر طراحی معماری مسکن ساخته‌شده با پرینت سه‌بعدی: یک مرور سیستماتیک

میلاد رضازاده [۱]*، حامد مظاهریان [۲]، محمدرضا متینی [۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰

چکیده

این مقاله به بررسی اصول طراحی معماری برای ساخت‌وساز مسکن با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی می‌پردازد. هدف این مقاله بررسی نمونه‌های ساخته‌شده با روش پرینت سه‌بعدی در راستای درک الگوی تکرارشونده در این نمونه‌ها جهت درک مبانی معماری موردنیاز برای طراحی مسکن با استفاده از چاپ سه‌بعدی است. این مطالعه منجر به ارائه پیشنهادهایی برای مسکن مناسب ساخت با این فناوری شده است. خلأ این مبانی منجر به طراحی فرم‌هایی می‌شود که شاید مناسب ساخت با این فناوری نباشند. این بررسی شامل تجزیه‌وتحلیل طیف گسترده‌ای از مقالات مرتبط معتبر برای جمع‌آوری اطلاعات است. در این پژوهش با مطالعه‌ی سیستماتیک منابع فوق، فراوانی رویکرد و راهکارهای اتخاذشده جهت طراحی مسکنی که قرار است با پرینتر سه‌بعدی ساخته شود انجام گردیده است. این بررسی جنبه‌های مختلف ازجمله مصالح، نوع پرینتر، محل ساخت، سازه و معماری را پوشش خواهد داد. یافته‌های این تحقیق برای معماران در راستای افزایش آگاهی قبل از طراحی و ساخت این مدل مسکن ارزشمند خواهد بود، زیرا می‌تواند با افزایش آگاهی هنگام طراحی از ایجاد خطا در طول فرایند ساخت جلوگیری کند. درنهایت می‌توان گفت ساخت مسکن با پرینترهای سه‌بعدی، مناسب برای مسکن یک طبقه کم متراژ با بتن مسلح شده به‌صورت دستی و با الیاف شیشه با فرم‌های منحنی و هندسه و پلان آزاد و منتج از طراحی رایانشی می‌باشد. و در صورت ترکیب با سیستم‌های سازه‌ای و سقف‌های مرسوم می‌توان تعداد طبقات را افزایش داد و از کاربردهای فرمی این فناوری بیشتر بهره برد.

واژه‌های کلیدی: ساخت مسکن، پرینت سه‌بعدی مسکن، ساخت دیجیتال، شخصی‌سازی انبوه، ساخت رایانشی.

۱- دکتری معماری، گروه معماری، دانشکده معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- دانشیار گروه معماری دانشگاه تهران، گروه معماری، دانشکده معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳- دانشیارگروه معماری دانشگاه هنر ایران، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: m.rezazade@ut.ac.ir

این مقاله برگرفته از رساله‌ی دکتری نگارنده‌ی اول با عنوان«مبانی طراحی مسکن جمعی با پرینت سه‌بعدی» به راهنمایی نگارنده دوم و سوم در دانشکده معماری دانشگاه تهران است.

https://doi.org/10.22067/context.2025.91936.1012

نحوه ارجاع به این مقاله:

رضازاده، میلاد. مظاهریان، حامد. متینی، محمدرضا. (۱۴۰۳). مؤلفه‌های مؤثر طراحی معماری مسکن ساخته‌شده با پرینت سه‌بعدی: یک مرور سیستماتیک. *مطالعات طراحی معماری و شهرسازی زمینه گرا*، ۱ (۱). ۱۷۱-۱۸۴. https://doi.org/10.22067/context.2025.91936.1012

مقدمه

صنعت ساخت‌وساز حدود ۱۳ درصد از تولید ناخالص کشورهای جهان را تشکیل می‌دهد و پیش‌بینی می‌شود این عدد در پنج سال آینده به علت رشد سریع شهرنشینی شش درصد افزایش پیدا کند(Valente, Sibai & Sambucci, 2019). به علت حجم عظیم صنعت ساخت‌وساز در جهان تأثیرات اقتصادی و زیست‌محیطی این صنعت را نمی‌توان نادیده گرفت به‌عبارت‌دیگر یک تغییر کوچک در راستای بهبود روش‌های ساخت می‌تواند تأثیر عظیمی در فرایند ساخت‌وساز در جهان بگذارد. از طرفی کشورهای درحال‌توسعه با مشکل کمبود مسکن، گسترش شهری سریع و کمبود زیرساخت‌ها، به‌ویژه برای نسل‌های آینده‌ی خود مواجه هستند(Du Plessis,2002). باید توجه کرد که مشکلات و معضلات مسکن قرن ۲۱ که شامل گسترش شهرها، رشد افسارگسیخته‌ی جمعیت، آلودگی محیطی، کمبود انرژی، کمبود زمین مناسب و کمبود مسکن قابل تأمین می‌شود را نمی‌توان با راهکارهای قرن بیستمی حل کرد (Summary 2019). یک راهکار مطلوب برای ساخت مسکن، مدلی است که بتواند مزایای روش‌های ساخت صنعتی را با مزایای فرایندهای مرسوم و غیر صنعتی ساخت مسکن ترکیب نماید. فرض بر این است که روش ساخت مسکن با پرینترهای سه‌بعدی در آینده‌ای نزدیک نه‌تنها یک روش مرسوم بلکه یک انتخاب اجتناب‌ناپذیر برای تأمین مسکن موردنیاز جوامع خواهد بود(Ngo & et al. 2018). ساخت‌وساز صورت گرفته با پرینترهای سه‌بعدی ظرفیت فناوری‌های خودکار را برای ساخت ساختمان از طریق روش‌های ساخت افزایشی بیان می‌کند. این پژوهش با تمرکز بر روی ساخت مسکن با پرینتر سه‌بعدی به‌عنوان یک روش جایگزین برای ساخت مسکن انبوه سعی در ایجاد بستری مناسب برای آن خواهد داشت. ولادیمیر لوجانیکا و همکاران در مقاله‌ای تحت عنوان " خانه‌سازی آینده، چهارمین انقلاب صنعتی" به بررسی فرصت‌ها و محدودیت‌های خانه‌سازی با پرینت سه‌بعدی پرداخته است و نتیجه گرفته است که این فناوری تأثیر عمیقی بر پژوهش طراحی معماری و فرایند تولید خانه می‌گذارد همچنین به‌صورت قابل‌توجهی سرمایه‌گذاری کلی، زمان، منابع و مصالح مصرفی، نیروی کار و آلودگی منتشرشده را کاهش می‌دهد(Lojanica, Colic-Damjanovic, & Jankovic, 2018). از آنجایی که ساختمان‌های ساخته‌شده با پرینت سه‌بعدی ترکیبات گوناگونی را ارائه می‌کنند، بررسی ویژگی‌های معماری برای این بناها برای ساخت‌وسازهای مشابه با این فناوری در آینده ضروری به نظر می‌رسد(García-Alvarado, Moroni-Orellana et al. 2021). گسترش ساخت مسکن با پرینتر سه‌بعدی در کنار تسهیل به‌کارگیری این فناوری لزوم توجه به تبیین ویژگی‌های طراحی معماری برای این روش ساخت را بیان می‌کند. علی‌رغم گسترش فناوری ساخت با پرینت سه‌بعدی، چهارچوب مدونی در زمینه‌ی ویژگی‌های معماری مساکنی که قرار است با این فناوری ساخته شود در پیشینه‌ی پژوهش یافت نگردید. همان‌طور که دیگر سیستم‌های ساخت ازجمله قالب تونلی یا سیستم نورد سرد سبک نیازمند رعایت مواردی در طراحی معماری خود می‌باشند، ساخت با فناوری پرینت سه‌بعدی ملزوماتی از باب طراحی معماری دارد که باید مدنظر طراحان قرار گیرد که به این مورد در پژوهش‌های انجام‌شده کمتر توجه شده است و بیشتر تمرکز بر روی مسائل فنی ساخت با این فناوری بوده است. لذا کمبود پژوهش در زمینه‌ی پرینت سه‌بعدی در مقیاس بزرگ برای ساخت مسکن و آگاهی در مورد ویژگی‌های معماری این مدل مساکن، انگیزه‌ای بود برای این پژوهش در راستای دستیابی به مدلی که در آن محدودیت‌ها و پتانسیل‌های طراحی این بناها جهت حداکثر استفاده از قابلیت‌های فناوری ساخت افزایشی برای ساخت مسکن و دیگر مستحدثات ارائه شود. با توجه به هدف این پژوهش، سؤال پژوهش را می‌توان چنین تبیین نمود: در طراحی مساکنی که قرار است با فناوری پرینت سه‌بعدی ساخته شوند چه مواردی را باید در طراحی معماری در نظر گرفت؟

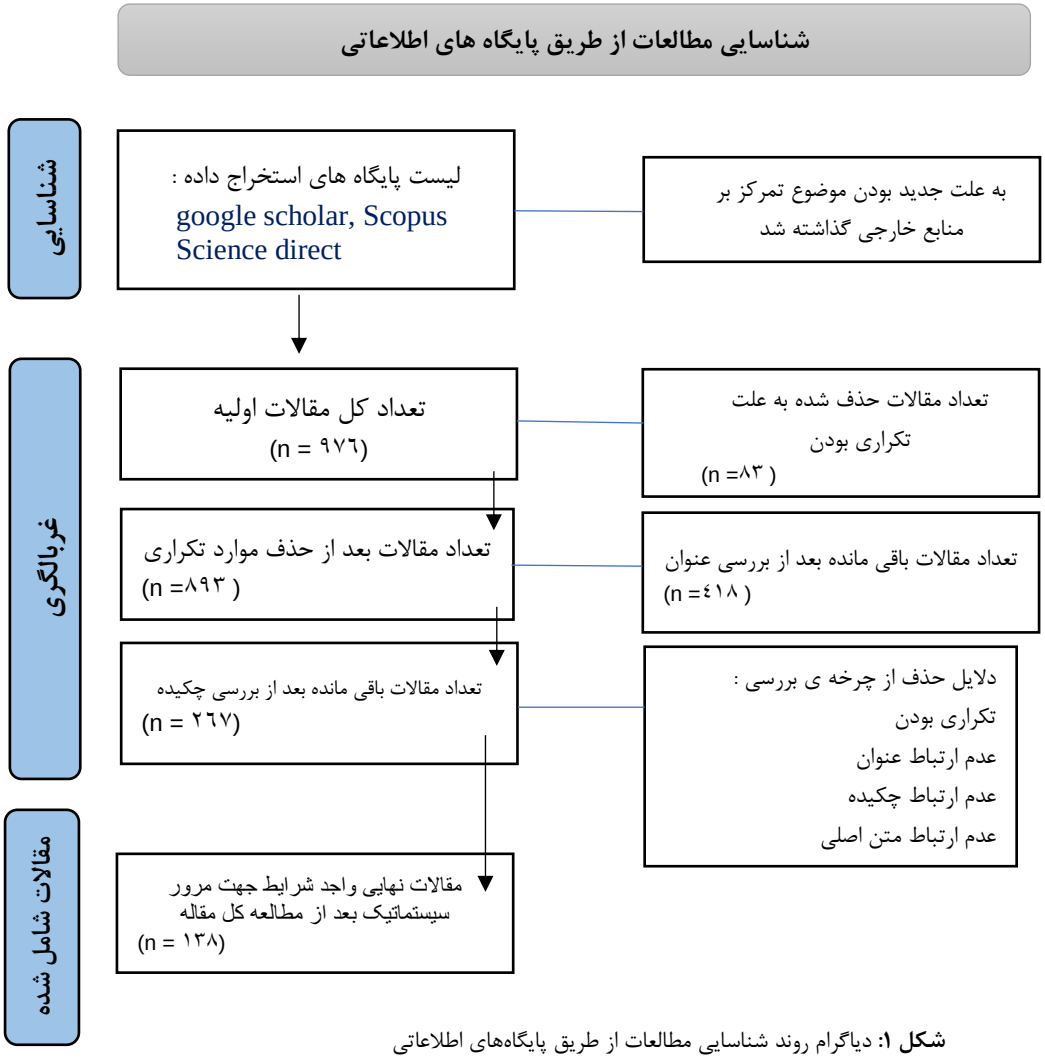
پرسش پژوهش: ویژگی‌های طراحی مسکن ساخته‌شده با پرینت سه‌بعدی چیست؟ (محدوده: مساکن یک طبقه تک خانواری با متراژ ۳۰ تا ۱۰۰ مربع) لازم به ذکر است محدوده‌ی پژوهش بر اساس نمونه‌های ساخته‌شده‌ی موجود در دنیا با فناوری پرینت سه‌بعدی تعریف‌شده است.

نوآوری پژوهش: علی‌رغم ظهور فناوری ساخت با پرینت سه‌بعدی، چهارچوب مدونی در زمینه‌ی ویژگی‌های طراحی مساکنی که قرار است با این فناوری ساخته شود در پیشینه‌ی پژوهش یافت نگردید. همان‌طور که دیگر سیستم‌های ساخت ازجمله قالب تونلی یا سیستم نورد سرد سبک نیازمند رعایت مواردی در طراحی معماری خود می‌باشند، ساخت با فناوری پرینت سه‌بعدی ملزوماتی از باب طراحی و معماری دارد که باید مدنظر طراحان قرار گیرد که به این مورد در پژوهش‌های انجام‌شده کمتر توجه شده است و بیشتر تمرکز بر روی مسائل فنی ساخت با این فناوری بوده است.

روش پژوهش

جهت انجام مطالعه و بررسی نظام‌مند ادبیات پژوهش، با توجه به جدید بودن موضوع تقریباً تمامی مقالات معتبر مرتبط با سؤالات تحقیق در ده سال اخیر که حدود صد و چهل مقاله بود استخراج گردید. مرور سیستماتیک ابزاری مناسب برای تعیین مرز پژوهش‌های موجود در خصوص یک مسئله است. جهت بررسی مقالات در جستجوی پنج مورد در شاخه‌های مرتبط با سؤالات تحقیق بوده‌ایم. این پنج مورد شامل مصالح مناسب جهت ساخت مسکن با پرینت سه‌بعدی، سیستم مناسب جهت ساخت مسکن با این روش، محل ساخت، سازه و نوع مسلح سازی بنا و ویژگی‌های معماری بکار گرفته در پژوهش موردمطالعه بوده است. مرور سیستماتیک با گزینش پایگاه‌های داده‌ی معتبر خارجی شامل:Scopus ,google scholar و Science direct به‌منظور پوشش دهی منابع بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ موردبررسی قرار گرفتند. جست‌وجو در این سه پایگاه با استفاده از ترکیب دو گروه کلمات 3d printed housing, additive manufacturing for housing construction, architectural aspects of 3d printed building, 3d printed building design صورت گرفت. لازم به توضیح است که جستجو در منابع ایرانی Sid, Magiran, Civilica نیز صورت گرفت اما به دلیل جدید بودن موضوع مقالات مرتبط و مناسب یافت نگردید. پس از جستجوی اولیه در پایگاه‌ها، درمجموع ۹۷۶ مقاله خارجی به دست آمد. در ابتدای امر موارد تکراری حذف و سپس عنوان و چکیده‌ی ۸۹۳ مقاله باقی‌مانده به‌دقت مطالعه و مقالات غیر مرتبط از فرایند خارج گردید. درنهایت متن کامل مقالات مرتبط احتمالی بررسی و ۱۳۸ مقاله خارجی برای بررسی مؤلفه‌ها، انتخاب گردیدند. تصویر (۱) جزئیات این فرایند را بر اساس فلوچارت پریزما ن(Page & et al, 2021) شان می‌دهد. مقالات را از پایگاه‌های اطلاعاتی بر اساس کلیدواژه‌های مرتبط با تحقیق استخراج نمودیم و پس از بررسی اولیه مقالاتی که ارتباط کافی با موضوع و نیز سؤالات تحقیق را نداشتند و یا امکان دسترسی به متن کامل آن‌ها وجود نداشت از لیست مقالات حذف گردید. به‌منظور عدم سوگیری در فرآیند انتخاب و حذف مقالات، منابع توسط دو پژوهشگر به‌صورت مستقل از یکدیگر موردبررسی قرار گرفتند و پس از به اشتراک‌گذاری نتیجه با یکدیگر در صورت وجود اختلاف‌نظر در مورد حذف یا انتخاب مقاله، توسط پژوهشگر سوم موردبررسی مجدد قرار گرفت و در مورد آن تصمیم‌گیری شد. بعد از گردآوری مقالات، جهت استخراج مؤلفه‌های مؤثر در طراحی مسکن ساخته‌شده با فناوری پرینت سه‌بعدی، رویکرد متاسنتز[1] اتخاذ گردید. متا سنتز یا فرا ترکیب روشی کیفی مبتنی بر مرور سیستماتیک مطالعات کتابخانه‌ای برای شناختی ژرف پیرامون پدیده موردمطالعه است. روش فراترکیب یک روش تحقیق کیفی محسوب می‌شود که ابزار گردآوری داده‌های آن مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی پیشینه پژوهش است(Pooya & et al. 2020) در این پژوهش از الگوی فراترکیب سندولوسکی و باروسو استفاده گردیده است. روش ساندلوسکی و باروسو الگوی منسجم فراترکیب است که اطلاعات و یافته‌های استخراج‌شده از دیگر مطالعات با موضوع مرتبط را بررسی می‌کند. این روش با فراهم کردن یک نگرش نظام‌مند برای پژوهشگران از طریق ترکیب پژوهش‌های کیفی مختلف، به کشف موضوعات و استعاره‌های جدید و اساسی می‌پردازد (Sandelowski & Barroso, 2006). این الگو شامل هفت مرحله به شرح ذیل است:

۱-تنظیم سؤال پژوهش، ۲-مرور نظام‌مند ادبیات، ۳-جست‌وجو و انتخاب متون مناسب، ۴- استخراج اطلاعات پژوهش، ۵-تجزیه‌وتحلیل و ترکیب داده‌ها، ۶-کنترل کیفی و ۷-ارائه یافته‌ها(Sandelowski & Barroso, 2006) . در این پژوهش مراحل فوق انجام گردید. در مورد پایایی پژوهش و میزان توافق بین دو کدگذار از روش ضریب کاپای کوهن استفاده‌شده است که برای تحقیق حاضر این ضریب بین ۰.۸۰-۰.۹۰ است که بیانگر ۶۴٪ تا ۸۱٪ اعتبار تحلیل کیفی می‌باشد (Carletta 1996).



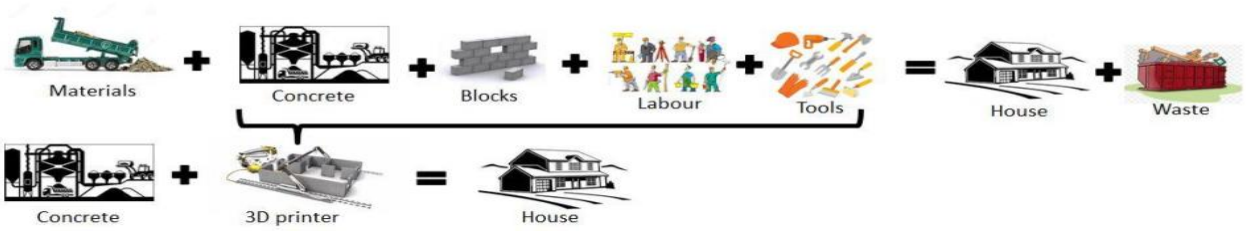
شکل ۱: دیاگرام روند شناسایی مطالعات از طریق پایگاه‌های اطلاعاتی

پیشینه پژوهش

روش ساخت لایه‌لایه‌ی بتن با پرینت سه‌بعدی اولین بار توسط خوشنویس و همکاران در دانشگاه کالیفرنیا مطرح گردید آن‌ها به بررسی قابلیت‌های این روش برای ساخت در مقیاس بزرگ و استفاده از دامنه‌ی وسیعی از مصالح و استفاده از فیبرهای افزودنی برای مسلح سازی بتن پرداخته‌اند(Khoshnevis & et al, 2006).

سیاوش خواجوی و همکاران در مقاله‌ای تحت عنوان" ساخت افزایشی در صنعت ساخت‌وساز: بررسی رقابت‌پذیری پرینت سه‌بعدی بتن"، ساخت افزایشی و در اینجا پرینت سه‌بعدی را راه‌حلی برای

بهبود تولید مسکن و کاهش اثرات زیست‌محیطی می‌دانند. آن‌ها با تعریف هفت سناریوی مختلف در زمینه‌ی طراحی و ساخت خانه، به این نتیجه رسیده‌اند که استفاده از پرینت سه‌بعدی در ساخت(به‌ویژه برای فرم‌های نامنظم و غیرتکراری و پیچیده) می‌تواند در زمان و هزینه به میزان قابل قبولی صرفه‌جویی کند. آن‌ها استفاده از بازوی رباتیک در محل را برای پرینت سه‌بعدی در مقایسه با دیگر روش‌ها، توصیه می‌کنند(Khajavi & et al, 2021). داگلاس آگیمن و همکاران در مقاله‌ای تحت عنوان" فراهم آوردن چهارچوب برای ساخت مسکن با پرینت سه‌بعدی در آفریقای جنوبی" از طریق بررسی و تحلیل فاکتورهای مرتبط دریافته‌اند که پرینت سه‌بعدی در ساخت مسکن ازنظر کاهش هزینه، افزایش تولید پذیری، رضایت سرمایه‌گذاران و مزایای اجتماعی اقتصادی موجب افزایش کیفیت تحویل و ساخت شده است. در کنار این مزایا، معایبی هم از قبیل مسائل فنی و اجرایی پرینت سه‌بعدی، موارد سازمانی و شخصی و کمبود آگاهی و درک از فناوری پرینت سه‌بعدی در میان سرمایه‌گذاران و خریداران برای به‌کارگیری کامل این فناوری وجود دارد(Aghimien & et al, 2020). امیر ابوعللا و همکاران در مقاله‌ای تحت عنوان" فناوری پرینت سه‌بعدی، راهکاری به سمت طراحی مسکن پایدار و ارزان"، چالش‌های پیش روی تأمین مسکن پایدار و ارزان را بررسی می‌کنند و فناوری پرینت سه‌بعدی را راهکاری برای این چالش‌ها می‌دانند. نویسندگان با استفاده از روش تحقیق توصیفی تحلیلی و تجربی راهکاری را برای طراحی خانه‌های قابل تأمین ارائه می‌دهند. این راهکار منطبق با شرایط نامساعد آب و هوایی و در جهت کاهش زمان ساخت و طراحی فرم‌های آزاد می‌باشد(Abouelela & Malek Ali 2021). در شکل زیر ناداراجا (Nadarajah, 2018) در پژوهش خود توضیح می‌دهد که چگونه پرینت سه‌بعدی با ادغام چند مرحله از ساخت می‌تواند باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت شود.



شکل ۱- ادغام مراحل ساخت در پرینت سه‌بعدی (Nadarajah, 2018)

در مقاله "ساخت افزایشی در صنعت ساخت" (Khajavi & et al, 2021) نویسندگان عنوان می‌دارند که ساخت دیوارهای گرد با فناوری پرینت سه‌بعدی ازنظر هزینه به‌صرفه‌تر از روش‌های دیگر است. در مقاله "توسعه دیوارها در بناهای مسکونی با فناوری پرینت سه‌بعدی" (García-Alvarado, Moroni-Orellana & Banda, 2022) بیان‌شده است که عناصر و پارتیشن‌های غیر سازه‌ای و ایجاد چیدمان‌های مختلف با عناصر پرینت شده در شبکه سازه‌ای یکسان انجام می‌شود چون قابلیت‌های فرمی فناوری پرینت سه‌بعدی نسبت به روش‌های مرسوم بیشتر است. در مقاله "به‌سوی ساخت‌وساز خودکار: گردش کار طراحی تا چاپ برای یک خانه چاپ سه‌بعدی رباتیک در محل" (Xu & et al, 2022) نویسنده به این نتیجه رسیده است که پرینتر بازوی رباتیک شش محوره برای ساخت فرم‌های پیچیده‌تر مناسب است ولی ابعاد ساخت کوچک‌تری نسبت به پرینتر دروازه‌ای دارد.

در مقاله "بررسی روند چاپ سه‌بعدی در صنعت ساختمان و ساخت‌وساز" (Tay & et al, 2017) نویسندگان به این نتیجه رسیده‌اند که در ساخت با پرینترهای سه‌بعدی چون بتن از یک شیبی بیشتر ریزش می‌کند محدودیت ساخت سازه‌هایی با برآمدگی در مقطع و طاق نما را داریم که باید در طراحی معماری به آن توجه کرد. در مقاله "کاربرد تولید افزودنی در صنعت ساخت‌وساز - بررسی آینده‌نگر" (Camacho & et al, 2018) اشاره‌شده است که این فناوری مناسب برای شخصی‌سازی انبوه بدون تحمیل هزینه‌های اضافی بر فرایند ساخت است. در مقاله "ارزیابی معماری ساختمان‌های چاپ سه‌بعدی" (García-Alvarado, Moroni-Orellana et al. 2021) در زمینه ویژگی‌های معماری بیان‌شده است که اشکال متعامد با گوشه‌های گرد و دیواره‌های منحنی کلاستیک و آنتی کلاستیک مناسب ساخت با این فناوری هستند همچنین شکست‌های زیاد و کوچک در پلان

توصیه نمی‌شود. به‌علاوه دیواره‌های قوسی پایداری سازه‌ای بهتری دارند اما مبله کردن و نصب تجهیزات و تأسیسات در آن‌ها سخت‌تر است. همچنین پرینت سه‌بعدی برای ساخت خانه‌های تک خانواری ناپیوسته و پیوسته یک طبقه بر مبنای دیوار باربر مناسب‌تر است. در مقاله "چاپ سه‌بعدی در صنعت ساخت‌وساز" (Perkins & Skitmore, 2015) گفته‌شده ایجاد گوشه‌های کاملاً عمود مطلوب نیست و ساخت آن با این روش سخت است. در مقاله "بررسی انتقادی پرینت سه‌بعدی در ساخت‌وساز: مزایا، چالش‌ها و خطرات" (El-Sayegh, Romdhane & Manjikian 2020) عنوان‌شده که باید حتماً محل تأسیسات را در طراحی معماری در نظر گرفت چون در غیر این صورت تخریب بعد ساخت برای این موارد داریم. در مقاله "مروری بر چاپ سه‌بعدی در ساخت‌وساز و تأثیر آن بر بازار کار" (Hossain & et al, 2020) عنوان‌شده که باید دقت کرد مسلح سازی احجام معماری را محدود می‌کند و هرچند ازنظر فناوری پرینت می‌توان فرم‌های زیادی را اجرا کرد اما اگر نیاز به مسلح سازی و ورود قفس و شبکه آرماتور به داخل حجم باشد باید از طراحی و ایجاد انحناهای شدید و حجم‌هایی که ورود مسلح سازی به آن‌ها سخت می‌باشد خودداری کرد. در مقاله "پرینت سه‌بعدی در معماری: یک قدم نزدیک‌تر به یک محیط ساخت پایدار" (Beyhan & Arslan Selçuk, 2018) بیان‌شده که محدودیت ساخت با توجه به خواص مصالح و میزان رئولوژی درنهایت تعیین می‌شود و نمی‌توان برای تمام مصالح و انواع پرینتر و احجام یک قانون کلی تعیین کرد.

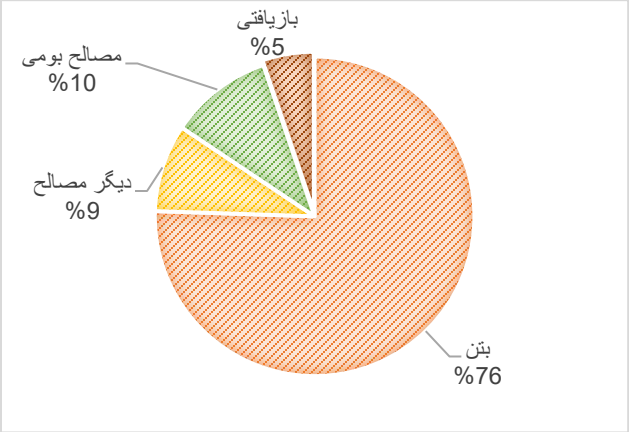
مرور نظام‌مند ادبیات پژوهش

بررسی جامع ادبیات پژوهش در مورد مبانی طراحی مسکن ساخته‌شده با پرینتر سه‌بعدی، شامل چندین مرحله کلیدی است. ابتدا، یک رویکرد سیستماتیک برای اطمینان از جستجوی کامل و بی‌طرفانه برای مطالعات، مقالات و انتشارات مرتبط اتخاذ گردید. این فرایند شامل استفاده از عبارات و معیارهای جستجوی خاص برای شناسایی طیف گسترده‌ای از منابع بود. این منابع در مرحله‌ی بعد با توجه به ارتباطشان با موضوع تحقیق غربالگری شدند. هنگامی‌که ادبیات مربوطه شناسایی شد، تجزیه‌وتحلیل دقیق برای استخراج اطلاعات و پارامترهای کلیدی انجام شد. این تجزیه‌وتحلیل بر مبنای سؤالات پژوهش بر روی یافته‌ها و محدودیت‌های هر مطالعه انجام گردید. در ادامه به بررسی مؤلفه‌های مورد اشاره و داده‌های حاصل از آن می‌پردازیم.

مصالح

برای چاپ سه‌بعدی ساختمان‌ها، از موادی استفاده می‌شود که بهره‌وری بالا و کارایی مناسبی داشته باشند. این مواد باید دارای خواص مناسبی باشند مانند مقاومت در برابر فشار، انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر عوامل جوی تا بتوانند به‌درستی شکل‌دهی شوند و ساختمان‌های مقاوم و پایداری را تشکیل دهند. مصالح ساختمانی معمولاً شامل بتن، فلزات، پلاستیک‌ها و چوب است. این مصالح برای ساخت بخش‌های مختلف ساختمان مورداستفاده قرار می‌گیرند.

در مطالعه مقالات ذکرشده در زمینه مصالح مورداستفاده، مشاهده گردید که حدود ۷۶ درصد موارد از انواع بتن، ۱۰ درصد مصالح بومی ازجمله گل و خاک و چوب، پنج درصد مصالح بازیافتی ازجمله مشتقات پلاستیک و بتن و چوب و ۹ درصد از دیگر مصالح استفاده نموده‌اند(نمودار ۱).

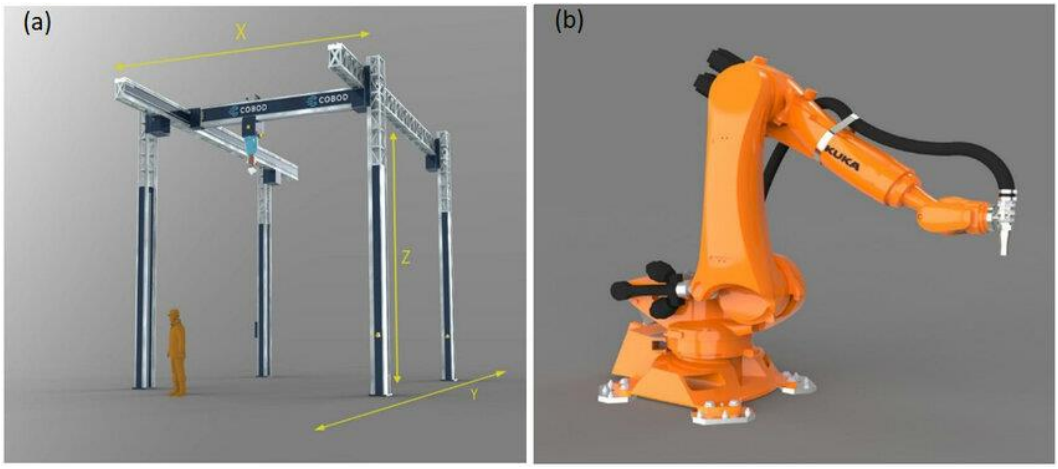


نمودار ۱: درصد مصالح مورداستفاده در بررسی نظام‌مند ادبیات پژوهش

سیستم پرینتر

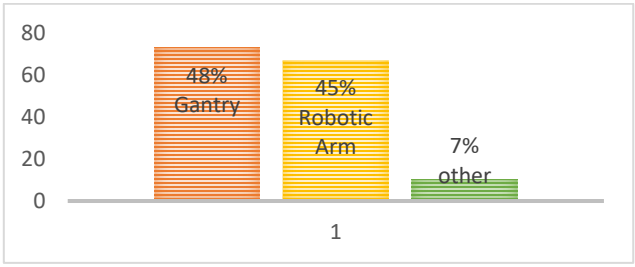
وقتی صحبت از پرینت سه‌بعدی ساختمان می‌شود، انتخاب بین استفاده از سیستم دروازه‌ای یا بازوی رباتیک بسیار مهم است. هر دو سیستم مزایا و معایب منحصربه‌فرد خود را دارند که باید قبل از تصمیم‌گیری در نظر گرفته شوند. سیستم دروازه‌ای به دلیل توانایی آن در پوشش یک منطقه وسیع، یک انتخاب محبوب برای پرینت

سه‌بعدی سازه‌های بزرگ است (Ngo & et al, 2018).چهارچوب دروازه‌ای یک سیستم ثابت است که در امتداد مجموعه‌ای از ریل‌ها حرکت می‌کند و امکان چاپ دقیق را فراهم می‌کند. بااین‌حال، ممکن است به‌اندازه یک سیستم بازوی رباتیک که می‌تواند در جهات و زوایای مختلف حرکت کند، انعطاف‌پذیر نباشد(شکل زیر).



شکل-۲ پرینتر دروازه‌ای (a) پرینتر بازوی رباتیک(b)-(Aboelhassan, 2023)

از سوی دیگر، یک سیستم بازوی رباتیک انعطاف‌پذیری بیشتری ارائه می‌دهد و می‌تواند برای چاپ اشکال و طرح‌های پیچیده استفاده شود (Puzatova & et al, 2022). در مطالعه مقالات ذکرشده در زمینه سیستم پرینتر مورداستفاده، مشاهده گردید که حدود ۴۸ درصد موارد از پرینتر دروازه‌ای، ۴۵ درصد پرینتر بازوی رباتیک و ۷ درصد از دیگر سیستم‌های پرینت استفاده نموده‌اند(شکل زیر).

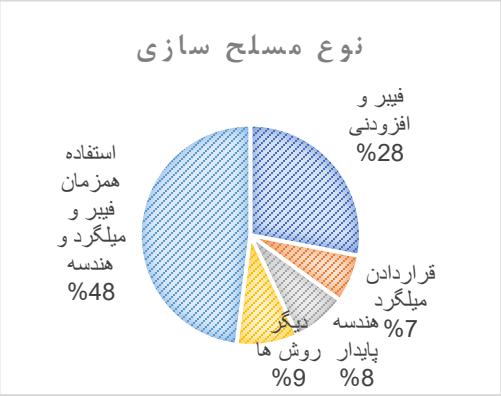


نمودار ۲ : درصد استفاده از سیستم‌های مختلف پرینتر سه‌بعدی در مطالعه نظام‌مند ادبیات پژوهش

سازه

تکنیک‌های مسلح‌سازی نقش مهمی در افزایش یکپارچگی ساختاری ساختمان‌های پرینت سه‌بعدی دارند. همان‌طور که فناوری پرینت سه‌بعدی به پیشرفت خود ادامه می‌دهد، اطمینان از اینکه این ساختمان‌ها می‌توانند همان نیروها و تنش‌های سازه‌های معمول را تحمل کنند، اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کند. از روش‌های رایج تقویت شامل ترکیب مواد اضافی در لایه‌های چاپ‌شده است. به‌عنوان‌مثال، میله‌های فولادی را می‌توان به‌صورت دستی در ساختار چاپی قرارداد تا استحکام و پایداری بیشتری را ایجاد کند. با قراردادن عناصر تقویت‌کننده، مانند میله‌های فولادی یا پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف، در ساختار چاپی، دوام کلی و ظرفیت باربری ساختمان را می‌توان به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشید.

در مطالعه مقالات ذکرشده در زمینه نوع مسلح سازی و سازه، مشاهده گردید که حدود ۴۸ درصد موارد استفاده هم‌زمان از سه روش افزودن فیبر و دیگر افزودنی‌ها، افزودنی دستی میلگرد و استفاده از هندسه پایدار، ۲۸ درصد افزودن فیبر و دیگر افزودنی‌ها به‌تنهایی، ۷ درصد افزودن میلگرد به‌تنهایی، هشت درصد استفاده تنها از هندسه پایدار سازه‌ای و ۹ درصد به‌کارگیری دیگر روش‌ها می‌باشد.(شکل زیر).



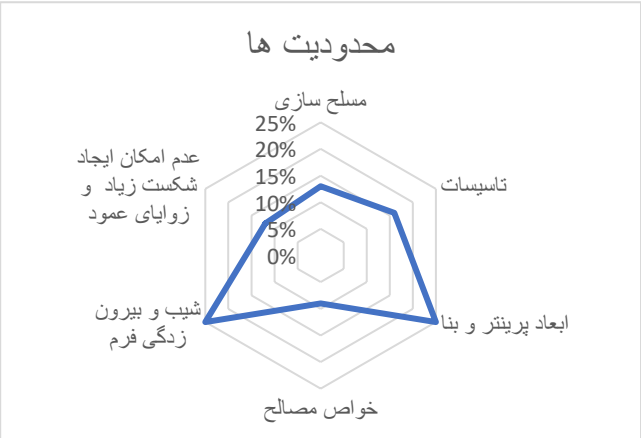
نمودار ۳ : درصد فراوانی نوع مسلح سازی در مطالعه نظام‌مند ادبیات پژوهش

شکل ۳پروژه تکلا ساخته‌شده با مصالح بومی و فرم سقف خود ایستا توسط شرکت وسپ. (Moretti, 2023)

معماری

ملاحظات طراحی برای ایجاد یک ساختمان پرینت سه‌بعدی منحصربه‌فرد است و نیاز به رویکردی متفاوت از طراحی معمول معماری دارد. هنگام طراحی ساختمان برای چاپ سه‌بعدی، معماران باید قابلیت‌ها و محدودیت‌های فناوری و همچنین الزامات خاص پروژه را در نظر بگیرند. برخلاف روش‌های ساخت‌وساز رایج، پرینت سه‌بعدی امکان ایجاد اشکال و ساختارهای پیچیده‌ای را فراهم می‌کند که قبلاً دستیابی به آن‌ها دشوار یا غیرممکن بود. این امر فرصت‌های جدیدی را برای طراحی معماری باز می‌کند، اما همچنین نیاز به یک طرز فکر و رویکرد متفاوت دارد (Davydenko & Melyushchenko 2022). چاپگرهای سه‌بعدی محدودیت‌هایی در اندازه دارند، به این معنی که معماران باید مقیاس ساختمانی را که طراحی می‌کنند به‌دقت در نظر بگیرند. علاوه بر این، مواد مورداستفاده در چاپ سه‌بعدی می‌توانند ازنظر استحکام، دوام و ظاهر متفاوت باشند. معماران باید مصالحی را انتخاب کنند که برای نیازهای خاص ساختمان مناسب باشد و درعین‌حال عواملی مانند هزینه و پایداری را نیز در نظر بگیرند. علاوه بر این، طراح باید یکپارچگی ساختاری ساختمان و همچنین عملکرد و زیبایی‌شناسی فضا را در نظر بگیرد. درحالی‌که چاپ سه‌بعدی آزادی طراحی بیشتری را فراهم می‌کند، مهم است که اطمینان حاصل شود که ساختمان ازنظر ساختاری سالم است و تمام استانداردهای ایمنی لازم را رعایت می‌کند.

در مطالعه مقالات ذکرشده در زمینه معماری، داده‌های یافت شده در سه دسته تقسیم‌بندی گردید که به شرح زیر است:
الف) موارد محدودکننده‌ی فرم و پلان، ب)ویژگی‌های فرم و پلان، ج)کاربردهای ویژه این روش. در ادامه به ارائه داده‌ها پیرامون هر کدام از موارد بالا می‌پردازیم.
الف)موارد محدودکننده‌ی فرم و پلان‌هایی که قرار است با پرینت سه‌بعدی ساخته شوند و درصد فراوانی آن‌ها در مقالات به شرح ذیل است (شکل زیر): مسلح سازی ۱۳ درصد، تأسیسات ۱۶ درصد، ابعاد پرینتر و تأثیر آن بر ابعاد ساخت ۲۵ درصد، خواص مصالح ۹ درصد، شیب فرم بیرون‌زدگی و سطوح افقی(نیاز به تکیه‌گاه) ۲۵درصد، محدودیت ایجاد شکست زیاد و کوچک و گوشه‌های عمود در پلان ۱۲ درصد.

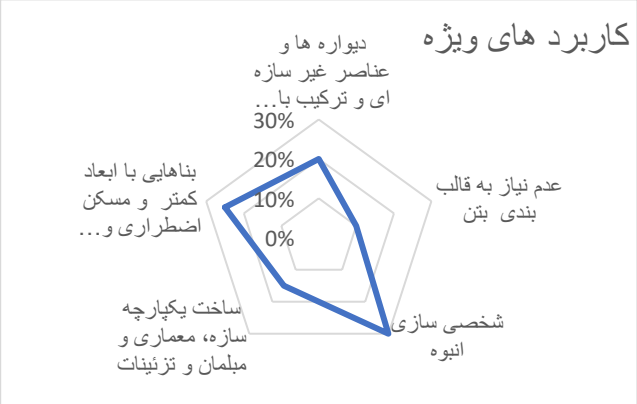


نمودار ۴ : درصد فراوانی محدودیت‌های طراحی در مطالعه نظام‌مند ادبیات پژوهش

ب)ویژگی‌های فرم پلان‌هایی که قرار است با پرینت سه‌بعدی ساخته شوند و درصد فراوانی آن‌ها در مقالات به شرح ذیل است (شکل زیر): دیواره‌های منحنی ۲۵ درصد، آزادی هندسی و پلان ۱۵ درصد، فرم‌های پیچیده ۲۵ درصد، گوشه‌های گرد ۸ درصد، فرم‌های خود ایستا و گنبدی ۱۲ درصد، فرم بر اساس هندسه سازه‌ای پایدار ۱۵ درصد.

نمودار ۵: درصد فراوانی ویژگی‌های فرم در مطالعه نظام‌مند ادبیات پژوهش

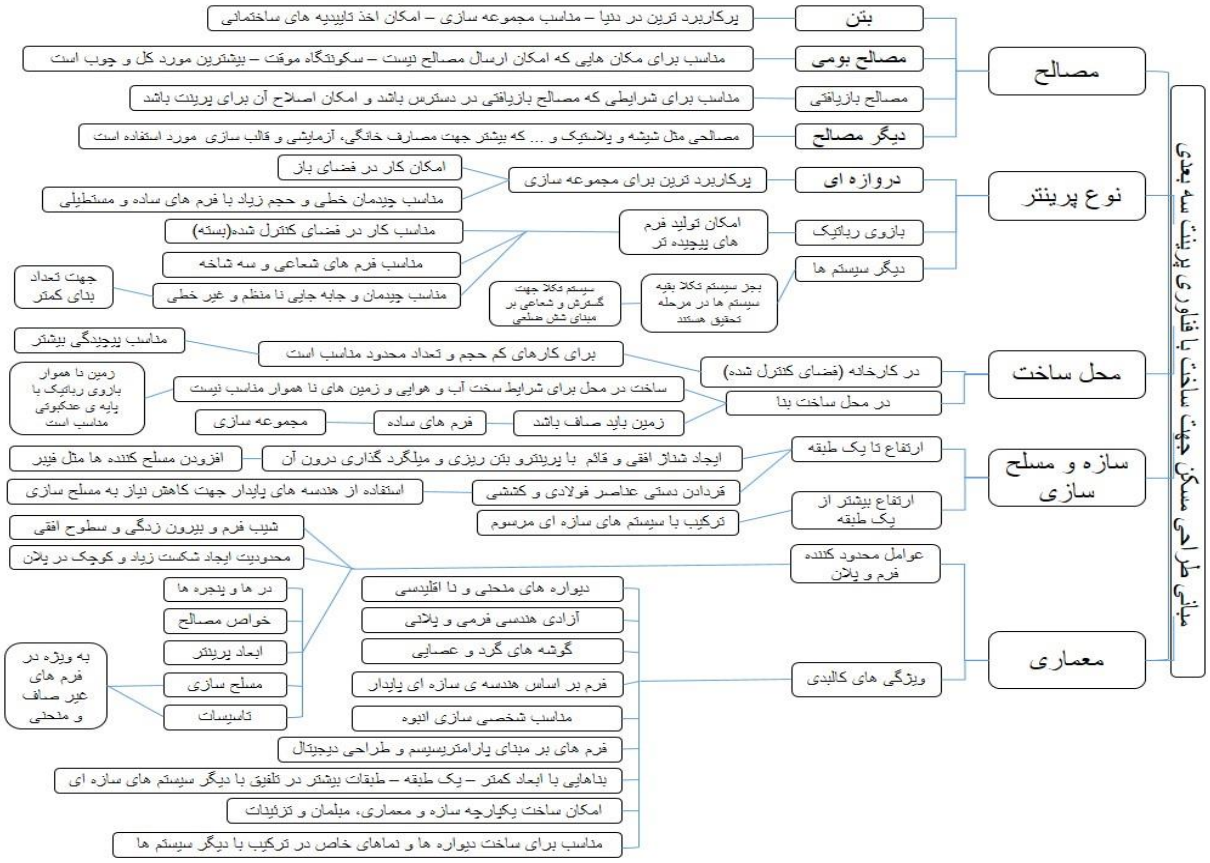
ج)کاربردهای ویژه این روش در طراحی یا به‌عبارت‌دیگر پاسخ به این پرسش که بیشتر برای چه شرایطی مناسب است و درصد فراوانی آن‌ها در مقالات به شرح ذیل است (شکل زیر): دیواره‌ها و عناصر غیر سازه‌ای و ترکیب با روش‌های دیگر ۲۰٪، عدم نیاز به قالب‌بندی بتن ۱۰٪، شخصی‌سازی انبوه ۳۰٪، ساخت یکپارچه سازه، معماری و مبلمان و تزئینات ۱۵٪، بناهایی با ابعاد کمتر و مسکن اضطراری و پاویون ۲۵٪.



نمودار ۶ : درصد فراوانی کاربردهای ویژه طراحی برای ساخت با پرینت سه‌بعدی در مطالعه نظام‌مند ادبیات پژوهش

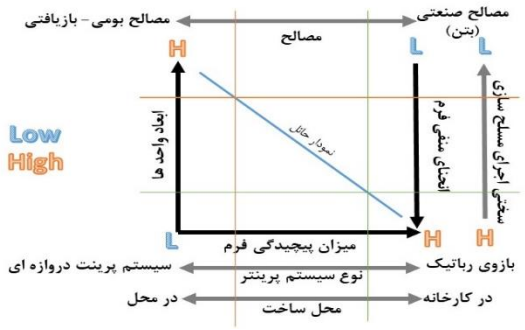
بحث

این پژوهش، یک چارچوب مفهومی از موارد و مؤلفه‌های مؤثر در طراحی مسکن ساخته‌شده با پرینتر سه‌بعدی ارائه می‌کند. این چهارچوب حاصل مطالعه‌ی نظام‌مند ادبیات پژوهش در رابطه با ویژگی‌های معماری برای این نوع مسکن می‌باشد. در دیاگرام زیر اصول ذکرشده در این مقاله به‌صورت چهارچوب مفهومی ارائه‌شده است.



شکل -۴: دیاگرام مبانی طراحی معماری مسکن ساخته‌شده با پرینتر سه‌بعدی

در ادامه در راستای بحث پیرامون ارتباط مؤلفه‌ها، موارد در قالب ماتریس زیر سازمان‌دهی شده است. این ماتریس از چهار ضلع تشکیل‌شده است. که در هر ضلع متغیرهایی در گستره‌ی مشخص تعریف‌شده‌اند(شکل زیر).



شکل ۵ : ماتریس تصمیم‌گیری جهت ساخت مسکن با پرینت سه‌بعدی در شرایط مختلف

همان‌طور که در ماتریس بالا مشاهده می‌کنیم با تغییر در نوع و اندازه مؤلفه‌ها و امتداد این تغییر در چهارچوب ماتریس و نمودار میانی، شرایط پیشنهادی برای دیگر متغیرها مشخص می‌گردد. نمودار اولیه را می‌توان نمودار ابعاد واحدها دانست. در دو حالت این ماتریس را بررسی می‌کنیم. نخست در شرایطی که ابعاد واحدها زیاد باشد در این حالت همان‌طور که در ماتریس مشاهده می‌نمایید، توصیه می‌شود پیچیدگی و انحنای فرم کم باشد، سیستم پرینت از نوع دروازه‌ای و ساخت در محل باشد. در مورد مصالح می‌توان گفت که مصالح بومی و بازیافتی برای فرم‌های ساده مناسب‌ترند البته می‌توان از مصالح صنعتی نیز در این حالت استفاده کرد. در حالت دوم ابعاد واحدها را کم در نظر می‌گیریم در این حالت پیچیدگی و انحنای فرم می‌تواند بیشتر باشد البته در این صورت سختی اجرای مسلح سازی زیاد می‌شود و حتماً باید از مصالح صنعتی استفاده و با توجه به اینکه دقت پرینت با پرینتر بازوی رباتیک بیشتر است

استفاده از این پرینتر توصیه می‌شود و درنهایت با توجه به ابعاد کم و نیاز به شرایط کنترل‌شده تر برای فرم‌های پیچیده و پرینترهای بازوی رباتیک ساخت، در کارخانه توصیه می‌گردد.

نتیجه‌گیری

هدف این مقاله ارائه یک درک جامع از جنبه‌های طراحی ساختمان‌های پرینت سه‌بعدی، در راستای افزایش آگاهی طراحان جهت کاهش ایجاد خطا در فرایند طراحی و ساخت با پرینتر سه‌بعدی است که به‌صورت دیاگرام چهارچوب مفهومی و ماتریس ارائه‌شده است. جهت یافتن ویژگی‌های مرتبط، آن‌ها را در پنج دسته‌ی سازه، مصالح، نوع پرینتر، محل ساخت و درنهایت ویژگی‌های معماری تقسیم‌بندی کرده‌ایم و در مقالات منتخب به دنبال موارد و ویژگی‌های هر دسته جهت افزایش آگاهی طراحان در این زمینه بوده‌ایم. در زمینه‌ی مصالح باید گفت که طبق بررسی‌های انجام‌شده، بتن رایج‌ترین مصالح برای ساخت مسکن با پرینتر سه‌بعدی است ضمن اینکه با ایجاد تمهیداتی حتی در ایران نیز می‌توان مطابق آیین‌نامه‌ی ساختمان‌های مصالح بنایی، اقدام به اخذ مجوزهای ساختمانی نمود. در زمینه‌ی سیستم پرینتر منتج از داده‌های حاصل از مطالعه‌ی سیستماتیک ادبیات پژوهش دو سیستم پرکاربرد شامل سیستم دروازه‌ای و بازوی رباتیک، شناسایی‌شده است که بیش از ۹۰ درصد ساخت سازه‌ها با این روش با این دو سیستم انجام می‌گردد(این داده منتج از مطالعه سیستماتیک ادبیات پژوهش است). بر طبق بررسی داده‌های حاصل از بررسی سیستماتیک ادبیات پژوهش، سیستم دروازه‌ای پرکاربردتر و مناسب احجام بزرگ و فرم‌های ساده و مستطیلی می‌باشد و سیستم بازوی رباتیک مناسب فرم‌های پیچیده‌تر با حجم ساخت‌وساز محدود است. در زمینه‌ی محل ساخت نیز باید عنوان کرد که برای مجموعه‌سازی، ساخت در محل با پرینتر دروازه‌ای مناسب‌تر است و برای فرم‌های پیچیده و ساخت محدود، ساخت در کارخانه توصیه می‌شود. در مورد سازه با افزودن دستی عناصر فولادی و افزودنی‌های مسلح کننده به بتن می‌توان کمبود مقاومت کششی بتن را جبران نمود. در زمینه‌ی معماری، دو دسته‌ی ویژگی‌های کالبدی و عوامل محدودکننده داریم. عوامل محدودکننده شامل محدودیت در زاویه شیب فرم‌ها، ابعاد پرینتر، مسلح سازی و اجرای تأسیسات می‌شود و ویژگی‌های کالبدی شامل دیواره‌های منحنی و فرم‌های هندسی آزاد، مناسب اجرای بناهای طراحی‌شده با معماری رایانشی و بناهای با ابعاد و طبقه‌ی محدود و در صورت نیاز به افزایش طبقات ترکیب با دیگر سیستم‌ها می‌باشد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در شرایط فعلی، فناوری چاپ سه‌بعدی برای ساخت مسکن یک طبقه کم متراژ مناسب‌تر است. این ساختمان‌ها معمولاً با بتن مسلح شده‌ی دستی و الیاف شیشه ساخته می‌شوند و از فرم‌های منحنی و طراحی رایانشی بهره می‌برند. همچنین در صورت ترکیب با سیستم‌های سازه‌ای و سقف‌های مرسوم می‌توان تعداد طبقات را افزایش داد و از کاربردهای فرمی این فناوری بیشتر بهره برد.

پی نوشت:

1- Meta synthesis

منابع

1. Aboelhassan, M. G. (2023). "Future of Sustainable Construction Industry: A Review of Research, Practice and Applications of 3D Concrete Printing.". Advancements in Civil Engineering & Technology. **5,** 1-8**.** http://dx.doi.org/10.31031/acet.2023.05.000616.
2. Abouelela, A. S. & Malek Ali, M. A. (2021). "3D Printing Technologies as an Approach towards Designing Sustainable Affordable Housing Units." Design Engineering, 5, 2292-2311.https://www.researchgate.net/publication/352357711_3D_Printing_Technologies_as_an_Approach_Towards_Designing_Sustainable_Affordable_Housing_Units .
3. Aghimien, D., Aigbavboa, C., Aghimien, L., Thwala, W.D. and Ndlovu, L. (2020), "Making a case for 3D printing for housing delivery in South Africa", International Journal of Housing Markets and Analysis, Vol. 13 No. 4, pp. 565-581. https://doi.org/10.1108/IJHMA-11-2019-0111.
4. Beyhan, F. Arslan Selçuk, S. (2018). 3D Printing in Architecture: One Step Closer to a Sustainable Built Environment. In: Fırat, S. Kinuthia, J. Abu-Tair, A. (eds) Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017). ISBS 2017. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 6. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63709-9_20.
5. Camacho, D. D. Clayton,P. O'Brien, W. J. Seepersad, C. Juenger, M. Ferron, R. & Salamone, S. (2018). "Applications of additive manufacturing in the construction industry–A forward-looking review." Automation in construction, 89, 110-119.https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031.

6. Carletta, J. (1996). "Assessing agreement on classification tasks: the kappa statistic." Computational Linguistics, 22, 249-254.
7. Davydenko, V. A. and N. A. Melyushchenko (2022). "INNOVATIVE CONSTRUCTION METHODS." Innovative technologies in construction and management of infrastructure technical state. Сборник научных трудов IV Всероссийской национальной научно-практической конференции.
8. Du Plessis, C. (2002). Agenda 21 for sustainable construction in developing countries. CSIR Report BOU E, 204, 2-5.
9. El-Sayegh, S. L. Romdhane and S. Manjikian (2020). "A critical review of 3D printing in construction: Benefits, challenges, and risks." Archives of Civil and Mechanical Engineering, 20, 1-25. https://doi.org/10.1007/s43452-020-00038-w.
10. García-Alvarado, R. Moroni-Orellana, G. & Banda-Pérez, P. (2021). Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings. *Buildings*, *11*(6), 254. https://doi.org/10.3390/buildings11060254.
11. García-Alvarado, R. Moroni-Orellana, G. & Banda, P. (2022). Development of Variable Residential Buildings with 3D-Printed Walls. *Buildings*, *12*(11), 1796. https://doi.org/10.3390/buildings12111796.
12. Hossain, M. A. Zhumabekova, A. Paul, S. C. & Kim, J. R. (2020). "A review of 3D printing in construction and its impact on the labor market." Sustainability, **12**(20), 1-21.
13. Khajavi, S. H. Tetik, M. Mohite, A. Peltokorpi, A. Li, M. Weng, Y. & Holmström, J. (2021). Additive Manufacturing in the Construction Industry: The Comparative Competitiveness of 3D Concrete Printing. *Applied Sciences*, *11*(9), 3865. https://doi.org/10.3390/app11093865.
14. Khoshnevis, B. Hwang, D. Ya, K.T. & Yeh, Z. (2006). "Mega-scale fabrication by contour crafting." International Journal of Industrial and Systems Engineering, 1(3), 301-320. http://dx.doi.org/10.1504/IJISE.2006.009791.
15. Lojanica, V., Colic-Damjanovic, V. -M. & Jankovic, N. (2018). "Housing of the Future: Housing Design of the Fourth Industrial Revolution," *2018 5th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA)*, Rome, Italy, 2018, pp. 1-4. https://doi.org/10.1109/EFEA.2018.8617094.
16. Moretti, M. (2023). WASP in the Edge of 3D Printing. In *3D Printing for Construction with Alternative Materials* (pp. 57-65). Springer
17. Nadarajah, N. (2018). "Development of concrete 3D printing".
18. Ngo, T. D. Kashani, A. R. Imbalzano, G. Nguyen, K. T. Q. & Hui, D. (2018). "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges." Composites Part B: Engineering, 143, 172-196. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
19. Page, M. J. J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, L. Shamseer, J .M. Tetzlaff, E. A. Akl and S. E. Brennan (2021). "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews." BMJ, *372:n71*. https://doi.org/10.1136/bmj.n71.
20. Perkins, I. & Skitmore, M. (2015). Three-dimensional printing in the construction industry: A review. *International Journal of Construction Management*, *15*(1), 1–9. https://doi.org/10.1080/15623599.2015.1012136
21. Pooya, A. Chaghoushi, A. J. Shokohyar, S. & karimizand, M. (2020). The Model of Challenges of smart contract based on blockchain technology and distributed ledger using meta-synthesis research method. 9 (03).
22. Puzatova, A. Shakor, P. Laghi, V. & Dmitrieva, M. (2022). Large-Scale 3D Printing for Construction Application by Means of Robotic Arm and Gantry 3D Printer: A Review. *Buildings*, *12*(11), 2023. https://doi.org/10.3390/buildings12112023.
23. Sandelowski, M. and J. Barroso (2006). Handbook for synthesizing qualitative research, springer publishing company.
24. Summary, E. (2019). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision.
25. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). New York: United Nations.
26. Tay, Y. W. D. Panda, B. Paul, S. C. Noor Mohamed, N. A. Tan, M. J. & Leong, K. F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, *12*(3), 261–276. https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724.
27. Valente, M., Sibai, A., & Sambucci, M. (2019). Extrusion-based additive manufacturing of concrete products: revolutionizing and remodeling the construction industry. *Journal of Composites Science*, *3*(3), 88. https://doi.org/10.3390/jcs3030088
28. Xu, W. Huang, S. Han, D. Zhang, Z. Gao, Y. Feng, P. & Zhang, D. (2022). "Toward automated construction: The design-to-printing workflow for a robotic in-situ 3D

printed house." Case Studies in Construction Materials, 17(1): e01442. http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01442.