

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)



The author(s) retain the copyright of this article. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/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.

مقاله پژوهشی

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

میلاد رضازاده^{۱*}، حامد مظاہریان^۲، محمدرضا متین^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. خلاصه این مبانی منجر به طراحی فرم‌هایی می‌شود که شاید مناسب ساخت با این فناوری نباشند. این بررسی شامل تجزیه و تحلیل 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 از جمله 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 به صورت 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، دانشکده‌گان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- دانشیار گروه معماری دانشگاه تهران، گروه معماری، دانشکده معماری، دانشکده‌گان 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، مظاہریان، حامد، متین، 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 به عبارت دیگر یک تغییر کوچک در راستای بهبود روش‌های ساخت می‌تواند تأثیر عظیمی در فرایند ساخت‌وساز در جهان بگذارد. از طرفی کشورهای در حال توسعه 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 نه تنها 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 به عنوان 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 پرینتر سه‌بعدی پرداخته است و نتیجه گرفته است که این فناوری تأثیر عمیقی بر پژوهش طراحی معماری و فرایند تولید خانه می‌گذارد همچنین به صورت قابل توجهی 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 پرینتر 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 به کارگیری این فناوری لزوم توجه به تبیین ویژگی‌های طراحی معماری برای این روش ساخت را بیان می‌کند. علی‌رغم گسترش فناوری ساخت با پرینتر 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 از جمله قالب تونلی یا سیستم نورد سرد سبک نیازمند رعایت مواردی در طراحی معماری خود می‌باشند، ساخت با فناوری پرینتر 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 پرینتر 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 پرینتر سه‌بعدی ساخته شوند چه مواردی را باید در طراحی معماری در نظر گرفت؟

پرسش پژوهش: ویژگی‌های طراحی مسکن ساخته‌شده با پرینتر 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 پرینتر سه‌بعدی تعریف شده است.

نوآوری پژوهش: علی‌رغم ظهور فناوری ساخت با پرینت سه‌بعدی، چهارچوب مدونی در زمینه‌ی ویژگی‌های طراحی مسکنی که قرار است با این فناوری ساخته شود در پیشینه‌ی پژوهش یافت نگردید. همان‌طور که دیگر سیستم‌های ساخت از جمله 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.

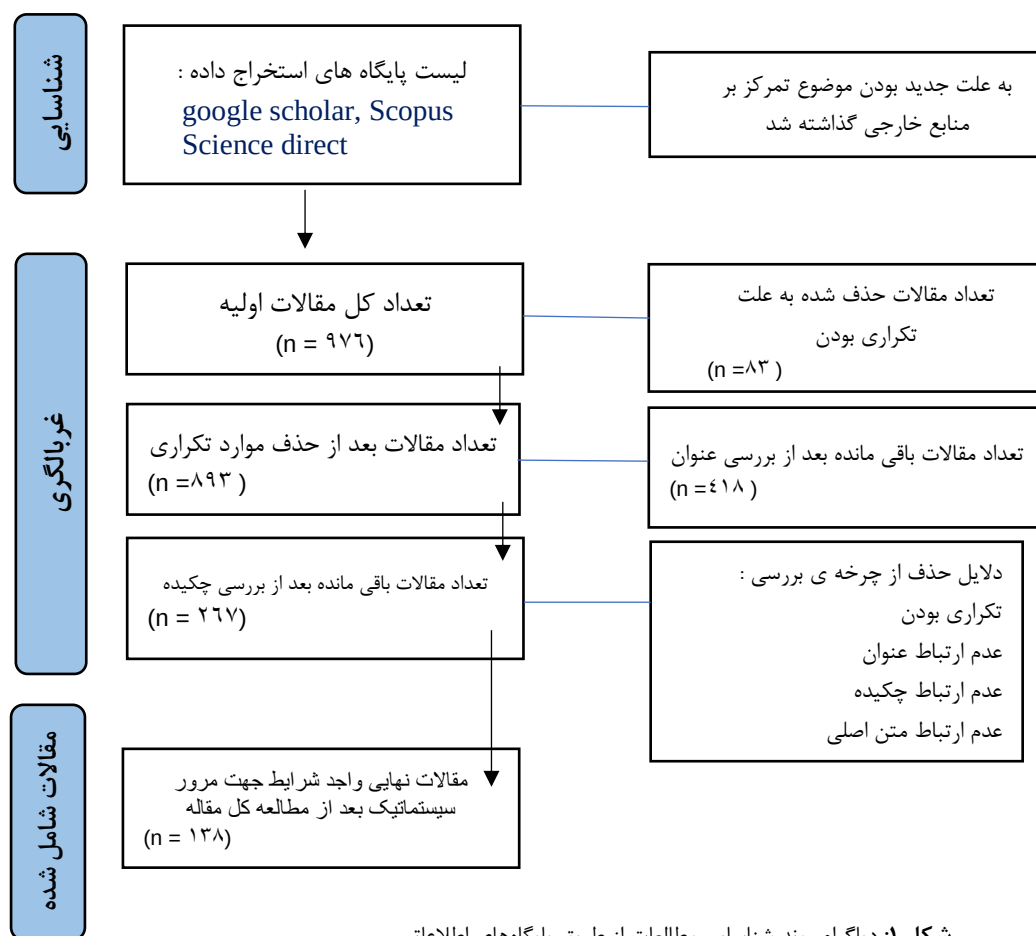
روش پژوهش

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 مورد مطالعه 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 مورد بررسی 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 پرزما ن (Page & et al, 2021) نشان 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 مورد بررسی قرار گرفتند و پس از به اشتراک‌گذاری نتیجه با یکدیگر در صورت وجود اختلاف‌نظر در مورد حذف یا انتخاب مقاله، توسط پژوهشگر سوم مورد بررسی 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 متاسنتر^۱ اتخاذ گردید. متاسنتر یا فرا ترکیب روشی کیفی مبتنی بر مرور سیستماتیک مطالعات کتابخانه‌ای برای شناختی ژرف پیرامون پدیده مورد مطالعه است. روش فرا ترکیب 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 فرا ترکیب سندولوسکی و باروسو استفاده گردیده است. روش ساندولوسکی و باروسو الگوی منسجم فرا ترکیب 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- تجزیه و تحلیل 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 کپای کوهن استفاده شده است که برای تحقیق حاضر این ضریب بین ۰.۸۰-۰.۹۰ است که بیانگر ۶۴٪ تا ۸۱٪ اعتبار تحلیل کیفی می‌باشد (Carletta 1996).

شناسایی مطالعات از طریق پایگاه‌های اطلاعاتی



شکل ۱: دیاگرام روند شناسایی مطالعات از طریق پایگاه‌های اطلاعاتی

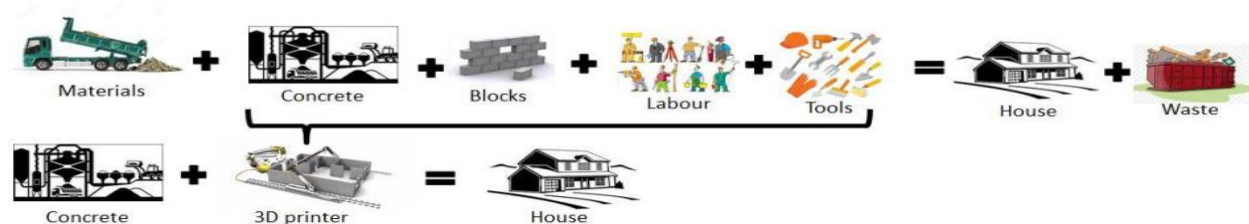
پیشینه پژوهش

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

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

فناوری پرینت سه‌بعدی در میان سرمایه‌گذاران و خریداران برای به‌کارگیری کامل این فناوری وجود دارد (Aghimien & et al, 2020). امیر ابوعلا 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 "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) اشاره شده 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 بیان شده است که اشکال متعادل با گوشه‌های گرد و دیواره‌های منحنی کلاستیک و آنتی کلاستیک مناسب ساخت با این فناوری هستند همچنین شکست‌های زیاد و کوچک در پلان

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 از نظر 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

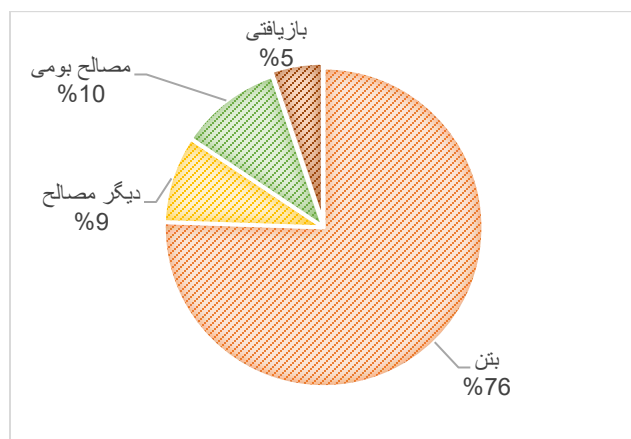
در مقاله "ساخت افزایشی در صنعت ساخت" (Khajavi & et al, 2021) نویسندگان عنوان می‌دارند که ساخت دیوارهای گرد با فناوری پرینت سه‌بعدی از نظر هزینه به‌صرفه‌تر از روش‌های دیگر است. در مقاله "توسعه دیوارها در بناهای مسکونی با فناوری پرینت سه‌بعدی" (García-Alvarado, Moroni-Orellana & Banda, 2022) بیان شده است 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.

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 مورد استفاده قرار می‌گیرند.

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



نمودار ۱: درصد مصالح مورد استفاده 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

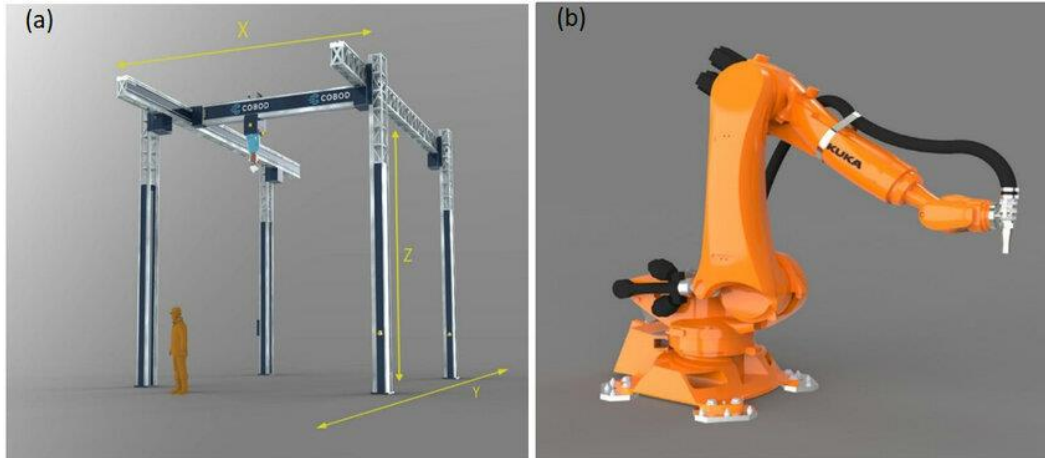
توصیه نمی‌شود. به‌علاوه دیواره‌های قوسی پایداری سازه‌ای بهتری دارند اما مبله کردن و نصب تجهیزات و تأسیسات در آن‌ها سخت‌تر است. همچنین پرینت سه‌بعدی برای ساخت خانه‌های تک خانواری ناپیوسته و پیوسته یک طبقه بر مبنای دیوار باربر مناسب‌تر است. در مقاله "چاپ سه‌بعدی در صنعت ساخت‌وساز" (Perkins & Skitmore, 2015) گفته شده 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) عنوان شده 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) عنوان شده که باید دقت کرد مسلح سازی احجام معماری را محدود می‌کند و هرچند از نظر 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 انحنای 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) بیان شده که محدودیت ساخت با توجه به خواص مصالح و میزان رئولوژی در نهایت 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 ساخته شده 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. هنگامی که ادبیات مربوطه شناسایی شد، تجزیه و تحلیل دقیق برای استخراج اطلاعات و پارامترهای کلیدی انجام شد. این تجزیه و تحلیل بر مبنای سؤالات پژوهش بر روی یافته‌ها و محدودیت‌های هر مطالعه انجام

است به اندازه یک سیستم بازوی رباتیک که می‌تواند در جهات و زوایای مختلف حرکت کند، انعطاف پذیر نباشد (شکل زیر).

سه بعدی 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. با این حال، ممکن

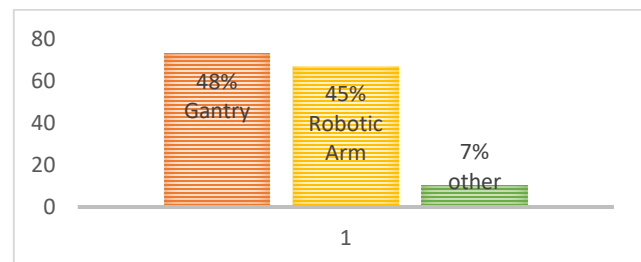


شکل ۲- پرینتر دروازه‌ای (a) پرینتر بازوی رباتیک (b) - (Aboelhassan, 2023)

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 چاپ شده است. به عنوان مثال، میله‌های فولادی را می‌توان به صورت دستی در ساختار چاپی قرارداد تا استحکام و پایداری بیشتری را ایجاد کند. با قراردادن عناصر تقویت کننده، مانند میله‌های فولادی یا پلیمرهای تقویت شده با الیاف، در ساختار چاپی، دوام کلی و ظرفیت باربری ساختمان را می‌توان به طور قابل توجهی بهبود بخشید.

در مطالعه مقالات ذکر شده 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 به تنهایی، ۷ درصد افزودن میلگرد به تنهایی، هشت درصد استفاده تنها از هندسه پایدار سازه‌ای و ۹ درصد به کارگیری دیگر روش‌ها می‌باشد. (شکل زیر).

از سوی دیگر، یک سیستم بازوی رباتیک انعطاف پذیری بیشتری ارائه می‌دهد و می‌تواند برای چاپ اشکال و طرح‌های پیچیده استفاده شود (Puzatova & et al, 2022). در مطالعه مقالات ذکر شده در زمینه سیستم پرینتر مورد استفاده، 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 سه بعدی در مطالعه نظام‌مند ادبیات پژوهش

سازه

تکنیک‌های مسلح‌سازی نقش مهمی در افزایش یکپارچگی ساختاری ساختمان‌های پرینت سه بعدی دارند. همان‌طور که فناوری پرینت سه بعدی به پیشرفت خود ادامه می‌دهد، اطمینان از اینکه این

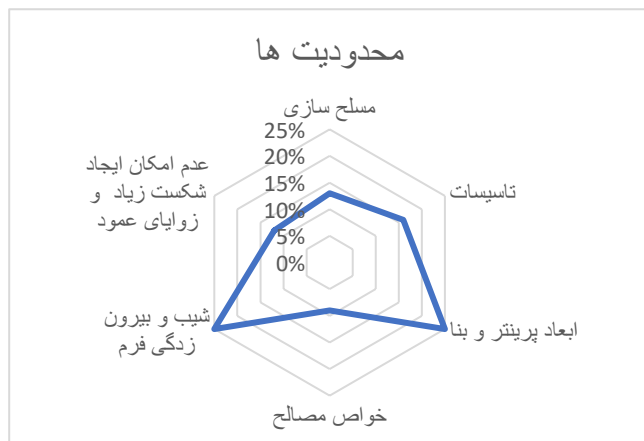


شکل ۳ پروژه نکلا ساخته شده با مصالح بومی و فرم سقف خود ایستا توسط شرکت وسپ. (Moretti, 2023)

در مطالعه مقالات ذکر شده در زمینه معماری، داده‌های یافت شده در سه دسته تقسیم‌بندی گردید که به شرح زیر است:

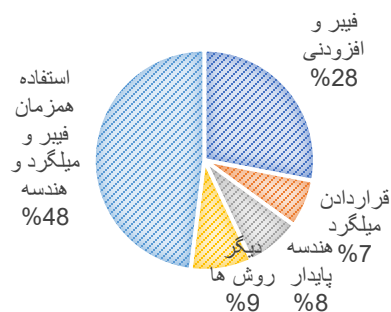
(الف) موارد محدودکننده فرم و پلان، (ب) ویژگی‌های فرم و پلان، (ج) کاربردهای ویژه این روش. در ادامه به ارائه داده‌ها پیرامون هر کدام از موارد بالا می‌پردازیم.

(الف) موارد محدودکننده فرم و پلان‌هایی که قرار است با پرینت سه‌بعدی ساخته شوند و درصد فراوانی آن‌ها در مقالات به شرح ذیل است (شکل زیر): مصالح 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) ۲۵ درصد، محدودیت ایجاد شکست زیاد و کوچک و گوشه‌های عمود در پلان ۱۲ درصد.



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

نوع مصالح سازی

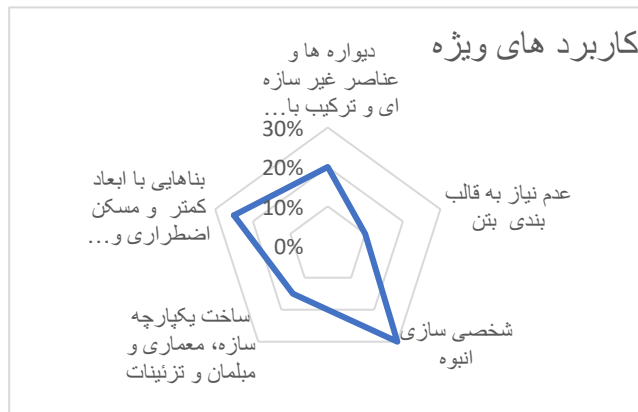


نمودار ۳: درصد فراوانی نوع مصالح سازی در مطالعه نظام‌مند ادبیات پژوهش

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 به دقت در نظر بگیرند. علاوه بر این، مواد مورد استفاده در چاپ سه‌بعدی می‌توانند از نظر استحکام، دوام و ظاهر متفاوت باشند. معماران باید مصالحی را انتخاب کنند که برای نیازهای خاص ساختمان مناسب باشد و در عین حال 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. در حالی که چاپ سه‌بعدی آزادی طراحی بیشتری را فراهم می‌کند، مهم است که اطمینان حاصل شود که ساختمان از نظر ساختاری سالم است و تمام استانداردهای ایمنی لازم را رعایت می‌کند.

ج) کاربردهای ویژه این روش در طراحی یا به عبارت دیگر 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 پلویون ۲۵٪.

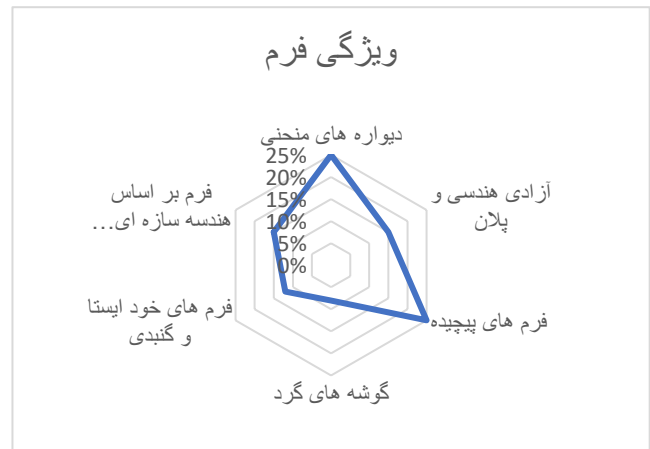


نمودار ۶: درصد فراوانی کاربردهای ویژه طراحی برای ساخت با پرینت سه‌بعدی در مطالعه نظام‌مند ادبیات پژوهش

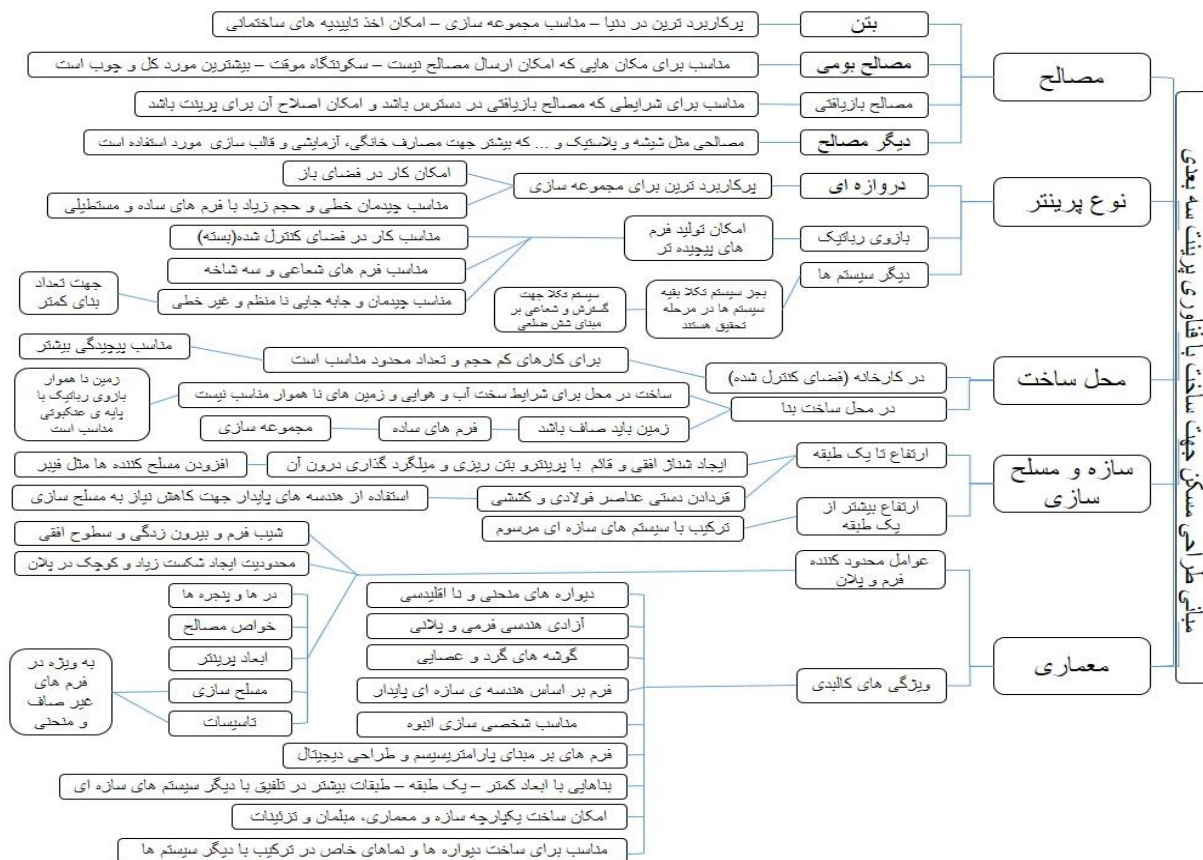
بحث

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

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.

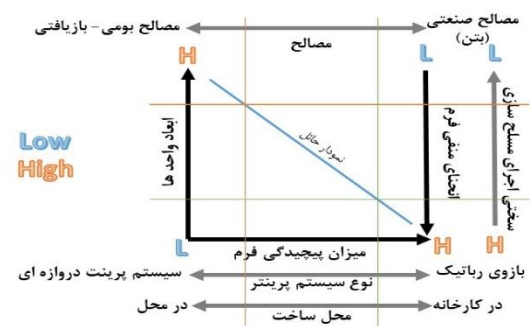


نمودار ۵: درصد فراوانی ویژگی‌های فرم در مطالعه نظام‌مند ادبیات پژوهش



شکل ۴: دیاگرام مبانی طراحی معماری مسکن ساخته شده با پرینتر سه بعدی

در ادامه در راستای بحث پیرامون ارتباط مؤلفه‌ها، موارد در قالب ماتریس زیر سازمان دهی شده است. این ماتریس از چهار ضلع تشکیل شده است. که در هر ضلع متغیرهایی در گستره‌ی مشخص تعریف شده‌اند (شکل زیر).



شکل ۵: ماتریس تصمیم گیری جهت ساخت مسکن با پرینت سه بعدی 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 مبانی، 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 انحنا 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 انحنا 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

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 مترآژ 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.

پی‌نوشت:

1- Meta synthesis

منابع

1. Aboelhasan, 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: Firat, 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>.

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 ارائه شده 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، شناسایی شده 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



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
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

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