



Research Paper

Designing Deployable Prefabricated Systems: A Re-reading of Rapid Deployment Patterns for Emergency Housing

Roghayyeh Haghi ¹, Tahereh Akbari ², Yousef Sajed ^{*3}, Yavar Rostamzadeh ⁴

¹ Master's student in Architectural Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

² Department of Architectural Engineering, Ard. C., Islamic Azad University, Ardabil, Iran.

³ Department of Civil Engineering, Ard. C., Islamic Azad University, Ardabil, Iran.

⁴ Assistant Professor, Department of Architecture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Keywords

Prefabricated System,
Deployable, Rapid
Deployment, Emergency
Housing, Parametric
Modeling, CATIA
Software.



A B S T R A C T

Providing sustainable, standardized shelters in crises, particularly for medium-term resettlement, has long required balancing rapid deployment with bioclimatic quality. A literature review shows that, despite significant geometric advances in deployable structures, a critical gap remains between “kinematic transformation mechanisms” and “logistical and operational requirements,” hindering the development of integrated systems for emergency sites. To achieve a systemic solution, this study designs and analyzes a deployable residential unit using a gear-based mechanism. The research uses an applied-developmental approach through a three-stage methodology: first, analyzing spatial requirements and emergency housing standards; second, using parametric modeling in CATIA to define the deployment geometry; and third, evaluating structural behavior during transit and assembly. Findings indicate that applying parametric logic to joint design, beyond optimizing transport volume, enables rapid assembly without heavy equipment and significantly enhances structural stability compared to traditional patterns. By clearly defining the design model for deployable modules, this study provides an operational framework that shifts emergency housing from static to dynamic, efficient system building. These findings pave the way to reduce operational time at crisis sites and improve housing efficiency for displaced populations.

*Corresponding Author: Yousef Sajed

Email Address: yousef.sajed@iau.ac.ir

Haghi, R., Akbari, T., Sajed, Y., & Rostamzadeh, Y. (2026). Designing Deployable Prefabricated Systems: A Re-reading of Rapid Deployment Patterns for Emergency Housing. *Human Ecology*, 5(14), 2355–2370.



DOI: <https://doi.org/10.22034/he.2026.583894.1219>



مقاله پژوهشی

طراحی سامانه‌های پیش ساخته گسترش پذیر؛ بازخوانی الگوهای استقرار سریع برای اسکان اضطراری

رقیه حقی^۱ طاهره اکبری^۲ یوسف ساجد*^۳ یاور رستم زاده^۴

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معماری، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲ گروه مهندسی معماری، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران.

۳ گروه مهندسی عمران، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران.

۴ استادیار گروه معماری، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

واژگان کلیدی

سامانه پیش ساخته،
گسترش پذیر، استقرار
سریع، اسکان اضطراری،
مدل سازی پارامتریک.

اسکن کنید



چکیده

تأمین سرپناه پایدار و استاندارد در شرایط بحران، به ویژه در اسکان میان مدت، همواره با چالش تقابل میان سرعت برپایی و کیفیت زیستی همراه بوده است. مرور مطالعات نشان داد که با وجود پیشرفت‌های هندسی در سازه‌های تاشونده، هنوز شکافی میان سازوکارهای گسترش پذیری هندسی و الزامات لجستیکی و اجرایی وجود دارد که مانع از توسعه سامانه‌های یکپارچه در سایت‌های اضطراری شده است. در راستای دستیابی به این طراحی یکپارچه، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل سازی پارامتریک، به تحلیل و توسعه واحد مسکونی تاشونده مبتنی بر سازوکار حرکتی چرخ دنده‌ای پرداخت. روش پژوهش در این مطالعه مبتنی بر رویکرد کاربردی-توسعه‌ای و به صورت ترکیبی بود که در سه گام صورت بندی شد: نخست، تحلیل و واکاوی نیازهای فضایی و استانداردهای اسکان اضطراری؛ دوم، مدل سازی پارامتریک در محیط کتیا به منظور تعریف منطق هندسی بازشوندگی؛ و سوم، ارزیابی کیفی و تحلیل رفتاری سازه در شرایط انتقال و برپایی. یافته‌های این مطالعه نشان داد که به کارگیری منطق پارامتریک در طراحی اتصالات، علاوه بر بهینه سازی فضای اشغالی در حمل و نقل، امکان مونتاژ سریع را بدون نیاز به تجهیزات سنگین فراهم می‌آورد و پایداری سازه‌ای واحد را به شکلی معنادار در مقایسه با الگوهای سنتی ارتقا می‌دهد. نتایج این پژوهش ضمن صورت بندی دقیق الگوی طراحی ماژول‌های تاشونده، چارچوبی عملیاتی ارائه داد که می‌تواند فرایند اسکان اضطراری را از رویکردهای ایستا، به سمت سیستم سازی پویا و کارآمد سوق دهد. این یافته‌ها مسیر را برای کاهش زمان عملیاتی در سایت‌های بحرانی و بهبود بهره‌وری در اسکان آسیب دیدگان هموار می‌سازد.

۱. مقدمه

بالای طبیعی نظیر زلزله، سیل و طوفان، در کنار بحران‌های انسان‌ساخت مانند جنگ و جابه‌جایی‌های اجباری، سالانه میلیون‌ها نفر را با فقدان سرپناه مواجه می‌سازند و نیاز فوری به تأمین مسکن موقت را به‌وجود می‌آورند (کمیساریای عالی سازمان ملل در امور پناهندگان، ۲۰۲۳). اگرچه چادرهای ساده و سازه‌های سبک اولیه در پاسخ‌گویی به نیازهای کوتاه‌مدت مؤثرند، اما در اقامت‌های میان‌مدت و بلندمدت، به‌دلیل محدودیت در دوام سازه‌ای، آسایش حرارتی، ایمنی و کیفیت روانی زندگی، کارایی لازم را ندارند (انجمن اسفیر، ۲۰۱۸). در پاسخ به این چالش‌ها، پژوهش‌های اخیر دو رویکرد کلیدی را در ارتقای کیفیت مسکن اضطراری برجسته ساخته است: نخست، پیش‌ساختگی و مدولاسازی که امکان تولید کارخانه‌ای، حمل‌ونقل آسان و نصب سریع را فراهم می‌سازد (مونتالبانو و سانتی، ۲۰۲۳)؛ و دوم، سازه‌های تاشونده و گسترش‌پذیر که با کاهش حجم در حالت بسته، قابلیت ذخیره‌سازی و جابه‌جایی بهینه را ارائه می‌دهند و علاوه بر پاسخ‌گویی به شرایط محیطی و کارکردی متغیر، ظرفیت بالایی در ایجاد فضاهای مسکونی و اضطراری دارند (مادن، ۲۰۱۹). تلفیق این دو رویکرد، زمینه‌ساز توسعه راهکارهایی نوآورانه برای اسکان پس از بحران است، هرچند چالش‌هایی نظیر مقاومت سازه‌ای، دوام مکانیکی و استانداردسازی همچنان پابرجا هستند (کالوی و همکاران، ۲۰۱۹).

در این میان، ساندویچ‌پنل‌ها به‌عنوان مصالحی با عملکرد بالا، نقش مهمی در طراحی سازه‌های مدولار ایفا می‌کنند. ویژگی‌هایی چون وزن کم، مقاومت مکانیکی مطلوب، عایق‌بودن حرارتی و سرعت مونتاژ بالا، این پنل‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای پاسخ‌گویی سریع در شرایط اضطراری بدل ساخته است (شرافی و همکاران، ۲۰۱۸). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که ترکیب ساندویچ‌پنل‌ها با سیستم‌های پیش‌ساخته، می‌تواند الزامات عملکردی و فضایی مسکن موقت را با هزینه کمتر و بهره‌وری بالاتر تأمین کند (مونتالبانو و سانتی، ۲۰۲۳). با این حال، خلأ قابل توجهی در ادبیات پژوهش در زمینه به‌کارگیری ساندویچ‌پنل‌ها در سازه‌های حجمی تاشونده وجود دارد. یافته‌های مطالعات اولیه، از جمله پژوهش بالارد و همکاران (بالارد و همکاران، ۲۰۱۶)، نشان می‌دهد که رفتار سازه‌ای این پنل‌ها در حالت تاشده یا هنگام اتصال به مفاصل متحرک، به‌طور مستقیم تحت تأثیر نوع اتصال، شرایط تکیه‌گاهی و تغییرشکل‌های ناشی از باز و بسته‌شدن قرار دارد. طراحی دقیق اتصالات، نه‌تنها ظرفیت باربری، بلکه دوام و ایمنی کل سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پیشرفت‌های اخیر در بهره‌گیری از هندسه‌های اورینگامی و قابل گسترش برای پنل‌های ضخیم، افق‌های جدیدی را در طراحی مازول‌های حجمی تاشونده گشوده‌اند (رهاردجو و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال، مطالعات جدید تأکید دارند که تحقق چنین سازه‌هایی مستلزم تحلیل دقیق رفتار پنل‌ها، لولاها و مفاصل است و چالش اصلی، حفظ هم‌زمان عملکرد سازه‌ای و حرارتی در کنار قابلیت تاشوندگی می‌باشد (ینکین و مادن، ۲۰۲۴). بخش عمده‌ای از این مطالعات در سطح مفهومی یا مدل‌های آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس باقی مانده‌اند و داده‌های میدانی قابل اتکا برای کاربردهای واقعی هنوز محدود است. به‌طور معمول پس از وقوع یک سانحه در ابعاد گسترده و وسیع، مناطق مسکونی موجود به نوعی غیر قابل استفاده می‌گردند و آسیب‌دیدگان و بازماندگان فاجعه، بعد از مرحله امداد و نجات و مراقبت‌های درمانی، ناگزیر نیاز به سکونت در مکانی غیر از خانه‌های خود تا زمان تأمین اسکان دائم می‌شوند. از دست دادن سرپناه، باعث شکست روحیه و پراکندگی انسان‌ها می‌گردد. به همین دلیل پس از چنین حوادثی، اولین موضوعی که تا حدی در افراد آسیب‌دیده ایجاد امنیت و آرامش می‌نماید، داشتن سرپناه مناسب و جمع شدن خانواده است (زهرایی و همکاران، ۱۴۰۱).

در این راستا و با توجه به نیاز روزافزون جوامع بحران‌زده به سرپناهی پایدار، سریع‌الاحداث و منطبق با استانداردهای بین‌المللی، پژوهش حاضر چارچوبی برای توسعه واحد مسکونی موقت مبتنی بر سازه‌های تاشونده با مکانیزم بازشونده چرخ‌دنده‌ای و مصالح پیش‌ساخته پانلی ارائه داده است. این راهکار نوآورانه در راستای معماری پاسخ‌گو، انعطاف‌پذیر و مقاوم در برابر بحران‌های انسانی و طبیعی است.

۲. روش تحقیق

این پژوهش با ماهیت کاربردی-توسعه‌ای و بهره‌گیری از روش ترکیبی (کیفی-توصیفی)، به دنبال دستیابی به الگویی کارآمد برای طراحی «سامانه‌های گسترش‌پذیر» در پاسخ به نیازهای اسکان اضطراری است. فرآیند پژوهش در سه گام نظام‌مند زیر تدوین شده است: گام نخست (تحلیل محتوایی نمونه‌های موردی): در این مرحله، با بررسی اسنادی و واکاوی نمونه‌های شاخص پیشین، مؤلفه‌های بنیادین در طراحی سامانه‌های گسترش‌پذیر استخراج شد. تمرکز اصلی در این واکاوی، بر شناخت منطق بازشوندگی، نحوه پیوند اجزا و هندسه‌ای استقرار فضایی بود تا مبانی نظری طراحی الگوی پیشنهادی شکل گیرد. گام دوم (مدلسازی و الگوسازی معماری): بر پایه یافته‌های گام نخست، یک «واحد گسترش‌پذیر» با سازمان‌دهی شعاعی طراحی گردید. در این گام، با استفاده از نرم‌افزار کتیا، مدلسازی پارامتریک سامانه صورت گرفت. تأکید این مرحله بر «خوانایی هندسی»، «دقت اتصالات» و «منطق حرکتی سامانه» است تا الگویی منعطف، سبک و قابل تکرار برای شرایط ناپایدار حاصل شود.

گام سوم (ارزیابی کیفی و مقایسه‌ی تطبیقی): در نهایت، برای سنجش کارآمدی الگوی طراحی‌شده، مقایسه‌ی تطبیقی کیفی با نمونه‌های پیشین انجام گرفت. شاخص‌های اصلی این ارزیابی عبارتند از: «سرعت برپایی»، «سهولت جابه‌جایی»، «انعطاف‌پذیری فضایی» و «سازگاری با محیط». این ارزیابی، بازتاب‌دهنده‌ی توانمندی ساختار طراحی‌شده در پاسخ‌گویی به الزامات اسکان اضطراری است.

۳. پیشینه پژوهش

در دهه اخیر، پژوهش‌های معماری و مهندسی سازه به‌طور فزاینده‌ای به سوی توسعه راهکارهای تاشونده و قابل استقرار سوق یافته‌اند. رویکردی که هدف آن، کاهش محدودیت‌های لجستیکی در حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی و نصب واحدهای مسکونی موقت در شرایط بحرانی است. در این میان، مطالعات جدید نشان داده‌اند که بهره‌گیری از هندسه‌های اوریگامی و کیریگامی مبتنی بر پانل‌های ضخیم، ظرفیت‌های نوینی برای طراحی سازه‌هایی با قابلیت فشردگی بالا و توان باربری مطلوب فراهم می‌سازد. این پژوهش‌ها همچنین بر توسعه روش‌های هندسی و جزئیات اتصال تمرکز داشته‌اند که استقرار ایمن سازه پس از باز شدن و پایداری مکانیکی آن را تضمین می‌کنند (راهاردجو و همکاران، ۲۰۲۴؛ ژو و فیلیپوف، ۲۰۲۴؛ دینگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۴).

همچنین مطالعات نشان می‌دهد که تلفیق هندسه‌های تاشونده با مصالح پیشرفته، نظیر پانل‌های ساندویچی، و استفاده از اتصالات لولایی یا مفصلی، می‌تواند گذار مؤثری از مدل‌های مفهومی آزمایشگاهی به واحدهای قابل سکونت صنعتی فراهم آورد. با این حال، علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر، یک خلأ اساسی در ادبیات علمی همچنان پابرجاست: رفتار سازه‌ای مجموعه‌هایی از پانل‌های ساندویچی که در قالب سیستم‌های چندپانله و با اتصالات متحرک طراحی می‌شوند، هنوز به‌صورت جامع و در مقیاس واقعی مورد بررسی قرار نگرفته است. اهمیت این خلأ زمانی دوچندان می‌شود که الزامات عملکردی سرپناه‌های اضطراری، قابلیت حمل‌ونقل و استقرار سریع، دوام نسبی، و رعایت معیارهای بهداشتی، در کنار ملاحظات سازه‌ای، اجرایی و اقتصادی در نظر گرفته شود. در همین راستا، مطالعات حوزه مسکن موقت و پایداری نیز بر ضرورت توجه هم‌زمان به مقرون‌به‌صرفگی، تولید صنعتی و پیش‌ساخته‌سازی، و ارزیابی چرخه عمر تأکید کرده‌اند (فوساس و همکاران، ۲۰۲۰؛ کنزاتی و همکاران، ۲۰۲۲؛ موتالبانو و سانتی، ۲۰۲۳؛ گریز و هوروات، ۲۰۲۳).

مرور پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات اولیه عمدتاً بر سازه‌های تاشونده با هندسه‌های ساده متمرکز بوده‌اند، اما در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند اتصالات چرخ‌دنده‌ای، مصالح پیش‌ساخته و ابزارهای طراحی دیجیتال، افق‌های جدیدی را در توسعه معماری تحول‌پذیر و زمان‌مند گشوده‌اند. با این حال، نبود پژوهش‌های جامع در خصوص سیستم‌های چندپانله ساندویچی که بتوانند به‌طور هم‌زمان الزامات سازه‌ای و معیارهای عملکردی سرپناه‌های اضطراری را برآورده سازند، همچنان محسوس است.

پژوهش حاضر در راستای پر کردن این خلأ علمی گام برمی‌دارد و با طراحی و تحلیل نمونه‌ای عملیاتی از یک سازه تاشونده و گسترش‌پذیر مبتنی بر سیستم چرخ‌دنده‌ای، می‌کوشد راهکاری عملی، پاسخ‌گو و قابل توسعه برای معماری ماژولار در شرایط بحرانی ارائه دهد. در ادامه، برای تکمیل تحلیل ساختاری و مقایسه‌ای، جدول پیشینه‌ای ارائه می‌شود که منتخبی از پژوهش‌های سال‌های اخیر را با تأکید بر نوع ساختار، مکانیزم‌های بازشوندگی، نوع اتصالات، و نقاط قوت هر مطالعه به‌صورت فشرده و ساختاریافته ارائه می‌دهد. این جدول به درک بهتر روند تحولات پژوهشی در زمینه‌ی معماری تحول‌پذیر کمک کرده و جایگاه پژوهش حاضر را در این چارچوب مشخص می‌سازد.

جدول ۱. تحقیقات صورت گرفته در زمینه سازه‌های تاشونده و پانل‌های پیش‌ساخته

ردیف	عنوان مقاله	نشریه / منبع	نویسنده(گان)	توضیحات
۱	A conceptual design and structural analysis of thick panel kirigami for deployable volumetric modular structure (2024)	Structures (Elsevier) https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107625	A. S. Rahardjo, S. Navaratnam, G. Zhang, K. Nguyen	طراحی مفهومی و تحلیل ساختاری کیریگامی با پیل ضخیم برای سازه مدولار حجمی قابل گسترش، معرفی یک ساختار مدولار الهام گرفته از کیریگامی که به یک بسته مسطح فشرده تبدیل می‌شود و به شکل حجمی باز می‌شود، به چالش‌های کلیدی در ساخت ماژولار، مانند محدودیت‌های حمل و نقل و بالابری، می‌پردازد. این تحقیق دو مکانیسم سینماتیکی کیریگامی بازشو (تاشو و کشویی) را با استفاده از مواد پانل ضخیم برای عناصر سازه‌ای ماژولار بررسی می‌کند.
۲	Large-scale modular and uniformly thick origami-inspired adaptable and load-carrying structures (2024)	Nature Communications https://doi.org/10.1038/s41467-024-46667-0	Y. Zhu, E. T. Filipov	سازه‌های مدولار و با ضخامت یکنواخت الهام گرفته از اوریگامی، با ایجاد سازه‌های بزرگ‌مقیاس، سازگار، قابل استقرار و حمل بار، شیوه‌های سنتی در مهندسی عمران را به چالش می‌کشد و کاربردهای گسترده‌تری پیشنهاد می‌دهد.
۳	Kirigami-inspired thick-panel deployable structures (2022)	International Journal of Solids and Structures https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2022.111752	C. Wang, D. Zhang, J. Li, Z. You	اوریگامی با پیل ضخیم به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از این رویکردها، چین‌های اوریگامی را به اتصالات چرخشی ساده تبدیل می‌کند و اوریگامی با پیل ضخیم را به عنوان مجموعه‌ای از پیوندهای فضایی در نظر می‌گیرد. این یافته‌ها برای طراحی سازه‌های قابل گسترش در کاربردهای مختلف را میسر می‌سازد.
۴	Transition analysis of flat-foldable origami-inspired deployable	Engineering Structures https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115074	A. Verzoni, M. Rais-Rohani	با الهام از ویژگی‌های هندسی اوریگامی، مفاهیم طراحی سرپناه تاشو با قابلیت گسترش سریع، با در نظر گرفتن الزاماتی مانند ۱. قابلیت تاشوندگی مسطح، ۲. سازگاری

سینماتیکی ۳. اتصال پنل و ۴. نیاز به بار برای باز کردن کامل سرپناه به حالت عمودی، ارائه و تجزیه و تحلیل می‌شوند.			shelter concepts (2022)	
ارائه یک مدل دینامیکی کیریگامی با پنل ضخیم با استفاده از روش چندجسمی مقید که می‌تواند فرآیند استقرار کامل سازه‌های کیریگامی پنل ضخیم را تجزیه و تحلیل کند. با کاربردهای قابل توسعه	C. Wang, J. Li, D. Zhang	<i>International Journal of Mechanical Sciences</i> https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108215 .	Deployment of thick-panel kirigami with dynamic model (2023)	۵
تمرکز بر استقرار سازه کیریگامی با پنل ضخیم با حالت فنر-کابل، مدل سینماتیک بر اساس توپولوژی سازه ایجاد شده و بر این اساس، فرآیند تاخوردگی و استقرار سازه را می‌توان با فرمول‌های مبتنی بر دینامیک که توسط محدودیت‌های سیستم چندجسمی توسعه یافته، بیان کرد.	C. Wang, J. Li, Q. Wang, P. Li, X. Zhang, D. Zhang	<i>Mechanism and Machine Theory</i> https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2023.105362	Deploying thick-panel kirigami structure with spring-cable-driven mode (2023)	۶
با ایجاد مجموعه‌ای از مفاصل الاستیک در یک محدوده حرکتی خاص، یک مکعب کیریگامی سه‌پایه توسعه یافته که صفحات الاستیک و محورهای لولای قابل تغییر را با الهام از رفتارهای سینماتیکی یک مکعب کیریگامی با وجوه ضخیم ادغام می‌کند. استفاده از مفاصل الاستیک و محورهای لولای قابل تغییر و امکان استفاده در کاربری‌های مختلف از دستاوردهای این پژوهش است.	X. Zhang et al.	<i>Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)</i> https://doi.org/10.1073/pnas.2117649119 .	Kirigami-based metastructures with programmable multistability (2023)	۷
طراحی یک پناهگاه مدولار مبتنی بر پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی ساخته شده از پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) پر شده با هسته عایق حرارتی فوم پلی اورتان (PUR) را در نظر می‌گیرد. آزمایش‌های تجربی و تحلیل‌های عددی به ترتیب برای تعیین کمیت رسانایی حرارتی پانل‌ها و تلفات گرما از طریق اتصالات پانل‌ها پرداخته است.	R. Sarmento, M. Posani, P. Fernandes, A. M. Rodrigues, M. G. Gomes	<i>Journal of Building Engineering</i> https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110029 .	Energy efficiency in modular emergency shelters: Impact of envelope finishings and shadowing (2024)	۸
ترکیب جمیع و پنل، یک مدل تطبیقی مدولار برای مراقبت‌های بهداشتی اولیه و ارزیابی و تحلیل انرژی. این مدل برای بهره‌وری مناسب در مناطق آب و هوایی مختلف ایتالیا در شرایط اضطراری طراحی شده است.	S. Brunoro, L. Mensi	<i>Buildings (MDPI)</i> https://doi.org/10.3390/buildings14082295 .	A comparative study to assess the energy efficiency of temporary structures to guarantee emergency basic healthcare in Italy (2024)	۹
طراحی یک پنل ساندویچی جدید با هسته کانالی برای مقاومت فشاری و جذب انرژی همزمان؛ آزمایش فشار خارج از صفحه شبه استاتیک و تحلیل فشاری و جذب انرژی پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی به صورت تجربی و عددی انجام شده است.	K. Zhu et al.	<i>Composite Structures</i> https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115461 .	Compressive response and energy absorption of all-composite sandwich panels with channel cores (2022)	۱۰
مروری بر انواع سازه‌های قیچی‌سان طبقه‌بندی دقیق بر اساس شکل اعضا، اتصالات، روش مونتاژ و سیستم‌های ترکیبی. تبیین مفاهیم و انواع سازه‌های تاشونده قیچی‌شکل	Yuan Liao & Sudarshan Krishnan	<i>Automation in Construction</i> https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105547	Deployable scissor structures: Classification of modifications and applications (2024)	۱۱

با وجود پیشرفت‌های شایان در توسعه‌های هندسه‌های تاشونده و پنل‌های پیش‌ساخته، واکاوی پیشینه‌ی پژوهش نشان می‌دهد که یک «شکاف مفهومی» میان مطالعات بنیادی متمرکز بر «مکانیسم اتصالات» و الزامات چندبعدی «فضاهای زیستی اضطراری» وجود دارد. در حالی که مطالعات اخیر نظیر (ژو و فیلیپوف، ۲۰۲۴) و (رهاردجو و همکاران، ۲۰۲۴) دستاوردهای ارزنده‌ای در بهینه‌سازی رفتارهای کینماتیک و ظرفیت باربری سازه‌ای حاصل کرده‌اند، اکثر این پژوهش‌ها به‌صورت ایزوله بر رفتارهای هندسی قطعات تمرکز داشته‌اند. در واقع، فقدان مدلی که بتواند «منطق پارامتریک بازشوندگی» را به‌گونه‌ای یکپارچه با «ملاحظات معماری و عملکردی اسکان» تلفیق کند، همچنان به عنوان یک خلأ پژوهشی مطرح است. به‌عبارت‌دیگر، آنچه در ادبیات موضوع کمتر مورد توجه قرار گرفته، فرآیند تبدیل این پیچیدگی‌های هندسی به یک «راهکار سیستمی» است که بتواند به‌صورت هم‌زمان و بدون تداخل، الزامات متضاد «سرعت در برپایی»، «بهره‌وری فضایی» و «سادگی در مونتاژ» را در سایت‌های بحرانی محقق سازد. پژوهش حاضر، با هدف گذر از سطح «مکانیسم‌سازی» به سمت «سیستم‌سازی معماری»، تلاش دارد تا با اتکا به مدل‌سازی پارامتریک در محیط کتیا، بستری برای هم‌افزایی میان طراحی فنی و نیازهای عملکردی فضاهای اضطراری فراهم آورد.

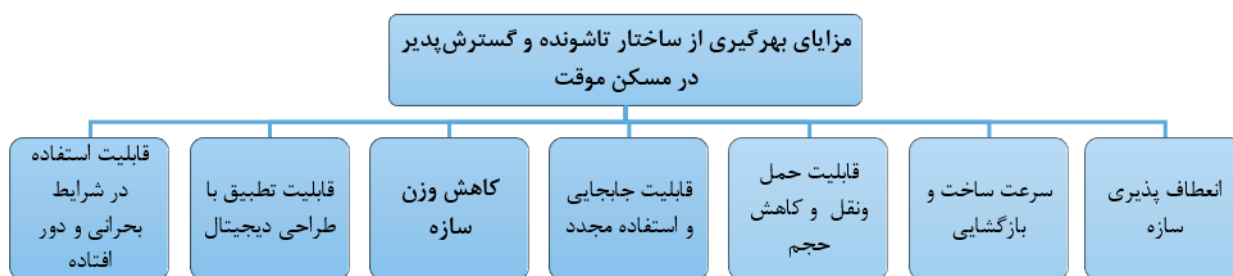
۴. بررسی مبانی نظری

۴-۱. مسکن پس از بلایا و نقش سرپناه‌های موقت در چرخه بازتوانی

تأمین سرپناهی ایمن، سریع و قابل اعتماد پس از وقوع بلایا، یکی از ارکان بنیادین در فرآیند بازتوانی جوامع آسیب‌دیده به‌شمار می‌رود. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که اسکان پس از بحران معمولاً در قالب چهار مرحله متوالی اما هم‌پوشان رخ می‌دهد: پناهگاه اضطراری، سرپناه موقت، اسکان انتقالی و در نهایت مسکن دائم.

این چارچوب که در مطالعات مرتبط بازلزله و فرایندهای چندمرحله‌ای بازخوانی تمرکز دارند، مبنایی نظری برای درک مسیر بازسازی کالبدی و اجتماعی واحدهای مسکونی فراهم می‌کنند (لاین و همکاران، ۲۰۲۲؛ ساتلی و همکاران، ۲۰۲۰) با این حال، در عمل، این مراحل می‌توانند بسته به شرایط فرهنگی، اقتصادی و اقلیمی منطقه، دچار تغییر در مدت زمان یا نحوه اجرا شوند.

در میان راهکارهای مختلف برای پاسخ‌گویی سریع به نیازهای اسکان اضطراری، سازه‌های تاشونده با اتصالات لولایی و پانل‌های صلب، به‌دلیل طراحی ماژولار و قابلیت جمع‌شوندگی، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. این سازه‌ها با فراهم‌سازی امکان حمل‌ونقل آسان، استقرار سریع و جابه‌جایی در نقاط مختلف، نقش مؤثری در افزایش اثربخشی عملیات امدادی ایفا می‌کنند (ژو و فیلیپوف، ۲۰۲۴؛ ورزونی و رئیس روحانی، ۲۰۲۲). ترکیب پانل‌های ساندویچی با اتصالات لولایی، ضمن حفظ قابلیت تاشوندگی، ظرفیت باربری مناسبی ارائه می‌دهد. جزئیات طراحی اتصالات و نوع لولاهای، نقش تعیین‌کننده‌ای در دوام و ایمنی سازه‌های تاشونده و گسترش‌پذیر دارند (بالارد و همکاران، ۲۰۱۶) همچنین مطالعات نشان دادند، با بهینه‌سازی مفصل‌ها و تقویت جزئیات اتصال، می‌توان از پانل‌های سبک در ساختارهایی با الزامات مکانیکی بالا بهره برد (کالوی و همکاران، ۲۰۱۹؛ شرفی و همکاران، ۲۰۱۸). بکارگیری مکانیزم‌های گسترش‌پذیر و هندسه‌های تاشونده، علاوه بر تضمین پایداری سازه‌ای، امکان ایجاد فضاهایی چندمنظوره و مقیاس‌پذیر را فراهم می‌کند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ مادن، ۲۰۱۹). همچنین توسعه مدل‌هایی از سازه‌های مبتنی بر پانل‌های ضخیم که علاوه بر سرعت نصب، مقاومت قابل توجهی در برابر شرایط نامساعد محیطی دارند (راهاردجو و همکاران، ۲۰۲۴). نوع ساختارها می‌توانند به‌طور هم‌زمان الزامات باربری، پایداری و انطباق‌پذیری فضایی را برآورده سازند. (ژو، فیلیپوف (۲۰۲۴)، وانگ، ایتال (۲۰۲۳)). این پیشرفت‌ها، چشم‌اندازی روشن برای توسعه پناهگاه‌های موقت بادوام، قابل حمل و کارآمد در شرایط بحرانی ترسیم می‌کنند. در شکل ۱، نمودار مزایای بهره‌گیری از سازه‌های تاشونده و گسترش‌پذیر در مسکن موقت پس از بحران ارائه شده است. این مزایا باعث شده پژوهش حاضر به ارائه مدلی با ویژگی‌هایی چون تاشوندگی و انعطاف‌پذیری بپردازد.



شکل ۱، مزایای بهره‌گیری از سازه‌های تاشونده و گسترش‌پذیر در مسکن موقت

۲-۴. سازه‌های تاشونده و گسترش‌پذیر: مبنای، مکانیزم‌ها و کاربردها

در سال‌های اخیر، سازه‌های تاشونده و گسترش‌پذیر به‌عنوان راهکاری موثر در مهندسی بحران و معماری پاسخ‌گو، جایگاه ویژه‌ای در طراحی سرنهادهای موقت و قابل حمل یافته‌اند. اساس عملکرد این سازه‌ها بر تغییر شکل هندسی و بهره‌گیری از مکانیزم‌های بازشونده استوار است که امکان فشردگی در زمان حمل‌ونقل و گسترش سریع در محل نصب را فراهم می‌سازد. مرور ادبیات علمی نشان می‌دهد که این سازه‌ها عمدتاً در سه دسته اصلی طبقه‌بندی می‌شوند: سازه‌های مبتنی بر اورینگ‌ها و کیریگامی، سیستم‌های قیچی‌وار یا لولایی، و سازه‌های پوسته‌ای یا غشایی (لیائو و کریشنان، ۲۰۲۰؛ موی و همکاران، ۲۰۲۲؛ اروفتی و همکاران، ۲۰۱۸). این دسته‌بندی، ضمن روشن‌سازی مسیر تکامل فناوری، نشان می‌دهد که انتخاب نوع سازه ارتباط مستقیمی با شرایط محیطی، سرعت استقرار و الزامات باربری دارد. در میان این دسته‌ها، سازه‌های اورینگ‌ها و کیریگامی با الهام از الگوهای هندسی تکرارشونده، امکان طراحی ساختارهایی سبک، ماژولار و انعطاف‌پذیر را فراهم می‌کنند. این ساختارها به‌ویژه برای ایجاد فضاهای چندمنظوره و قابل تنظیم مناسب‌اند، اما در مقیاس‌های بزرگ با محدودیت‌هایی در ظرفیت باربری و پیچیدگی‌های اجرایی مواجه می‌شوند (تومیتا و همکاران، ۲۰۲۳؛ ژو و فیلیپوف، ۲۰۲۴). در مقابل، سازه‌های پوسته‌ای و غشایی، به‌دلیل وزن پایین و قابلیت پوشش‌دهی وسیع، در پروژه‌های موقت و کوتاه‌مدت کارایی بالایی دارند، ولی وابستگی شدید آن‌ها به شرایط محیطی مانند باد و بارندگی، لزوم استفاده از تقویت‌کننده‌های اضافی را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد (لیائو و کریشنان، ۲۰۲۰؛ مایر و همکاران، ۲۰۲۱).

در این میان، سیستم‌های قیچی‌وار (scissor-like structures) با بهره‌گیری از مکانیزم‌های لولایی و اتصالات متحرک، به‌عنوان یکی از مؤثرترین گزینه‌ها برای اسکان سریع پس از بحران شناخته شده‌اند. این سیستم‌ها به‌دلیل قابلیت باز و بسته شدن سریع، مقیاس‌پذیری، و سادگی اجرایی، در پروژه‌های امدادی و موقت کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند (پرز-والکارسل و همکاران، ۲۰۲۲؛ موی و تان، ۲۰۲۴). مطالعات تجربی و عددی نشان داده‌اند که طراحی بهینه مفصل‌ها و مکانیزم‌های قفل‌شونده، نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری، دوام و ظرفیت باربری

این سازه‌ها ایفا می‌کند (آرنوتر و همکاران، ۲۰۲۰؛ وانگ، ۲۰۲۲). به همین دلیل، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های اخیر بر بهبود جزئیات اتصالات و توسعه سیستم‌های قفل ایمن متمرکز بوده‌اند. سازه‌های تاشو و گسترش‌پذیر بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای کلیدی ارزیابی می‌شوند که کارایی آنها را در مراحل جمع‌شدن، بازشدن و عملکرد پس از استقرار تعیین می‌کنند. این معیارها بر قابلیت حمل، پایداری و امکان‌سنجی به‌کارگیری سازه در معماری موقت و اضطراری تأثیرگذارند (لیائو، ۲۰۲۴ و کریشن، ۲۰۲۴).

•نسبت تراکم:

نسبت تراکم میزان کارایی سازه را در کاهش حجم هنگام جمع‌شدن مشخص می‌کند. هندسه بهینه‌شده لولاها و پیکربندی‌های اورینگامی به‌طور چشمگیری این تراکم‌پذیری را افزایش می‌دهند (گائو و همکاران، ۲۰۲۲).

•کارایی سینماتیکی و سرعت بازشدن:

کارایی سینماتیکی بالا، تبدیل سازه را به‌صورت روان و سریع تضمین می‌کند. مکانیزم‌های قیچی‌وار معمولاً بازشدن هماهنگ و سریع را فراهم می‌کنند و برای کاربردهای اضطراری مناسب هستند. (لیائو و کریشن، ۲۰۲۴).

•پایداری سازه پس از بازشدن:

سختی و رفتار باربری پس از استقرار کامل از الزامات اساسی عملکرد سازه می‌باشد. سیستم‌های ترکیبی اورینگامی-لینکج به‌دلیل بهبود مکانیزم‌های انتقال نیرو، پایداری بیشتری ایجاد می‌کنند (لیو و همکاران، ۲۰۲۴).

•دوام در برابر چرخه‌های تکراری باز و بسته‌شدن:

سازه‌های تاشوی کارآمد باید در برابر خستگی ناشی از سیکل‌های مکرر تا شدن مقاوم باشند. پانل‌های کامپوزیتی دوام‌مندی (bistable) و نواحی تقویت‌شده در لولاها دوام چرخه‌ای را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند (گائو و همکاران، ۲۰۲۲).

•انرژی تحریک:

کاهش انرژی موردنیاز برای باز و بسته شدن، قابلیت استفاده سازه را در سیستم‌های سیار یا خودکار افزایش می‌دهد. مکانیزم‌های اورینگامی با خطاهای منحنی معمولاً به‌دلیل تبدیل هندسی پیوسته به نیروی کمتری نیاز دارند (جیانگ و همکاران، ۲۰۲۴).

•قابلیت اطمینان اتصالات:

کارایی سازه‌های تاشو به‌طور مستقیم به قابلیت اتکای اتصالات وابسته است. اتصالات لولا-لینکج ساده‌سازی شده و تقویت‌شده میزان سایش را کاهش داده و طول عمر سازه را افزایش می‌دهند (لیو و همکاران، ۲۰۲۴).

•عملکرد باربری پس از استقرار:

واحدهای تاشو باید عملکرد سازه‌ای و حرارتی قابل قبولی پس از بازشدن کامل ارائه دهند. مطالعات مرتبط با پانل‌های پیش‌ساخته سبک‌وزن، پتانسیل آنها را برای به‌کارگیری در سیستم‌های مدولار تاشو تأیید می‌کند (سا، لیس و هائو، ۲۰۲۴).

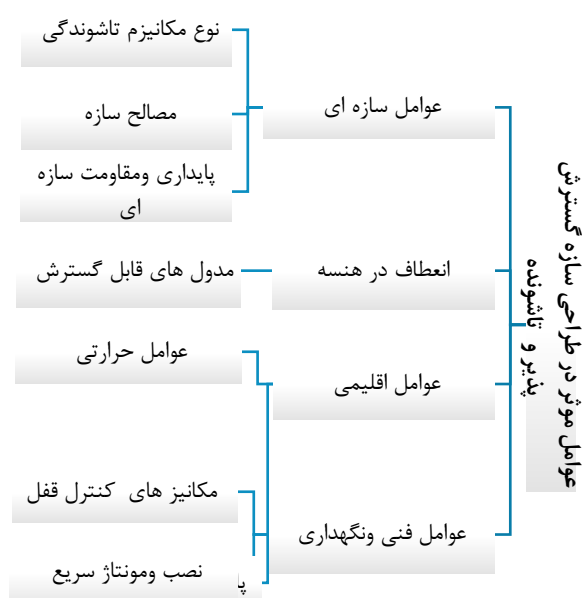
سازه‌های تاشو باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که هم در حالت جمع‌شده و هم در حالت گسترش‌یافته عملکرد بهینه داشته باشند. این امر نیازمند هماهنگی دقیق میان اجزای سازه‌ای، اتصالات مکانیکی و سیستم‌های مصالح است تا پایداری، تراکم‌پذیری و سهولت تبدیل سازه تضمین شود. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که لولا‌های طراحی‌شده بهینه، پانل‌های سبک‌وزن و سیستم‌های لینکج تقویت‌شده، قابلیت اعتماد سازه را در مراحل بازشدن و در طول استفاده‌های مکرر به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند (گائو و همکاران، ۲۰۲۲) (لیائو، ۲۰۲۴ و کریشن، ۲۰۲۴).

همچنین توجه به دوام مصالح و بهینه‌سازی جزئیات اتصالات برای حفظ عملکرد پایدار در طول چرخه‌های متعدد باز و بسته‌شدن ضروری است. این ملاحظات مبنای ارزیابی نمونه‌های موجود و استخراج راهبردهای قابل کاربرد برای سیستم تاشوی پیشنهادی را تشکیل می‌دهد. برای قرار دادن سازه‌های تاشو در جایگاه مناسب میان مجموعه گسترده فناوری‌های ساخت پیش‌ساخته، لازم است عملکرد آنها با سیستم‌های پیش‌ساخته متداول مقایسه شود. هرچند هر دو سیستم با هدف کاهش زمان ساخت، بهبود بهره‌وری حمل‌ونقل و امکان‌پذیر کردن تولید صنعتی توسعه یافته‌اند، اما از نظر رفتار سازه‌ای، مکانیزم‌های استقرار و الزامات بهره‌برداری تفاوت‌های چشمگیری دارند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که سیستم‌های تاشو از فشردگی بالاتر، نصب سریع‌تر در محل و تطبیق‌پذیری فضایی بیشتر برخوردارند، در حالی که واحدهای پیش‌ساخته متداول معمولاً سختی سازه‌ای بالاتر و جزئیات اتصالات ساده‌تری ارائه می‌دهند (لیائو و کریشن، ۲۰۲۴؛ ساه، لیس و هائو، ۲۰۲۴).

۳-۴. مواد و فناوری‌های نوین در طراحی و استقرار سریع سازه‌ها

در طراحی سازه‌های تاشونده، انتخاب مصالح نه تنها بر وزن و قابلیت حمل‌ونقل اثرگذار است، بلکه عملکرد حرارتی، مقاومت خمشی و دوام اتصالات در برابر تکرار باز و بسته شدن را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. حالت‌هایی وجود دارد که در آن نوع هسته در کنار کیفیت ورق‌های بیرونی و نحوه اتصال آنها، نقش تعیین‌کننده‌ای در مقاومت خمشی و شکست برشی پانل‌های ساندویچی ایفا می‌کند (کوثر و همکاران، ۲۰۲۳).

بررسی سازه‌های کامپوزیتی نازک‌جداره قابل‌استقرار، بر اهمیت طراحی دقیق مفصل‌ها تاکید دارد؛ به‌ویژه در کاهش خستگی و جلوگیری از شکست در چرخه‌های مکرر باز و بسته شدن. این یافته‌ها با الزامات طراحی حاضر، که نیازمند اتصالات لولایی مقاوم و قابل اعتماد است، هم‌راستا هستند (لیو و همکاران، ۲۰۲۴). تحلیل ساختارهای ((origami-kirigami) مجهز به مفصل‌های لولایی و پنل‌های ضخیم، امکان دستیابی به سازه‌هایی با یک درجه آزادی را مطرح کرده‌اند که در حالت بسته جمع می‌شوند و در حالت باز، پایداری و باربری مناسبی ارائه می‌دهند. ژائو و همکاران (۲۰۲۵). مجموعه‌ی این مطالعات، بنیانی علمی و تجربی برای انتخاب پنل ساندویچی و مفصل‌های لولایی در طراحی حاضر فراهم می‌کنند؛ رویکردی که در این پژوهش به‌صورت عملیاتی و منطبق با الزامات اجرایی و شرایط بحرانی پیاده‌سازی شده است. در شکل ۲، عوامل موثر بر طراحی مدل تاشونده پیشنهادی ارائه شده است.



شکل ۲، عوامل موثر در طراحی سازه گسترش پذیر و تاشونده. منبع نگارندگان

علاوه بر این، بیشتر این سازه‌ها برای نصب نیازمند نیروی کار ماهر هستند و همین امر فرایند نصب را طولانی‌تر می‌کند. اگرچه سرپناه‌های موقت باید از مصالح سبک ساخته شوند تا امکان حمل و نقل آن‌ها در مواقع ضروری فراهم گردد، اما سرپناه‌های موقت سنتی اغلب از قطعات پیش‌ساخته‌ای تشکیل می‌شوند که معمولاً سنگین بوده و تعداد محدودی از آن‌ها را می‌توان هم‌زمان جابه‌جا کرد. این نوع سازه‌ها همچنین فاقد انعطاف‌پذیری برای گسترش واحدهای خدماتی یا پاسخگویی به نیازهای فضایی متغیر هستند. از این رو، نیاز به توسعه‌ی سرپناه‌های تطبیق‌پذیری وجود دارد که بتوانند متناسب با نیازها تغییر کنند. ضرورت توسعه سرپناه‌های موقت تطبیق‌پذیر که راهکارهایی عملی، بادوام و به‌موقع ارائه دهند، منجر به این نتیجه‌گیری شده است که سامانه‌های متحرک در زمینه‌ی طراحی سرپناه‌های موقت، راهکار مناسبی هستند. بر این اساس، این مطالعه یک سرپناه موقت تاشونده را پیشنهاد می‌دهد که ویژگی‌هایی چون چندمنظوره بودن، سهولت در تا شدن و قابلیت حمل را فراهم می‌سازد. در توصیف و بسط و گسترش عوامل موثر در طراحی سازه‌های تاشونده، در جدول ۳، به شرح و توصیف بیشتر این عوامل پرداخته شده است.

جدول ۳. مولفه‌های تاثیرگذار در طراحی سازه تاشونده

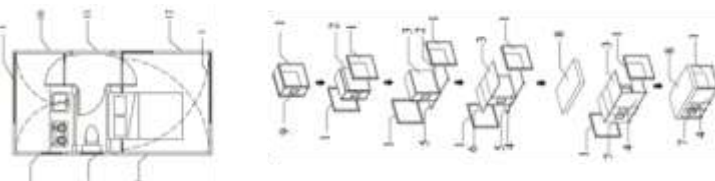
عامل موثر در طراحی	توضیح علمی	نحوه تأثیرگذاری در سازه	منبع
هندسه سازه	الگوی باز و بسته شدن سازه،	شکل‌پذیری مناسب سازه و کاهش تمرکز تنش در حالت باز و بسته شدن سازه.	Lee, S. D., Yoo, D. Y., & Kim, J. (2019). <i>Structural behavior and stress distribution of origami-inspired foldable structures</i> . Engineering Structures, 195, 14–26.
مکانیزم‌های مفصلی و لولاها	طراحی مفصل‌های مقاوم در برابر سایش	افزایش دوام، قابلیت باز/بسته‌سازی مکرر،	Liu, K., & Paulino, G. H. (2017). <i>Origami-inspired hinged structures with enhanced fatigue life</i> . Extreme Mechanics Letters, 12, 58–66
مصلح سبک و انعطاف پذیر	استفاده از مصالح سبک برای کاهش جرم و افزایش کارایی حمل و نقل	کاهش وزن سازه و افزایش عملکرد حمل و نقل و مونتاژ سریع.	Zhai, Z., Wang, Y., & Li, S. (2019). <i>A novel metastable modular metastructure for programmable behaviors and enhanced energy dissipation</i>

Kendall, S. (2020). <i>Open Building: A Sustainable Strategy for Flexibility, Adaptability, and Circular Construction</i> . Buildings, 10(7), Article 122.	طراحی واحدهای قابل اتصال و جداسازی سریع	استفاده از ابعاد و مدول متناسب برای افزایش سرعت اجرا و امکان استفاده مجدد	مدولار بودن سازه و قابلیت مونتاژ
Pallarés, J., Cuerva, E., & Coch, H. (2020). <i>Adaptive facades in cold climates: Thermal performance and energy potential of dynamic envelope systems</i> . Energy and Buildings, 209, 109711.	افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش وابستگی به سیستم‌های گرمایش و سرمایش مکانیکی در اقلیم سرد.	استفاده از جداره متحرک با قابلیت تنظیم بازشوها، جهت پاسخ به تغییرات دما و تابش خورشید	عملکرد حرارتی
Witteman, W. J., & Sassen, S. A. E. (2000). <i>Dynamic stability of deployable truss structures during deployment</i> . AIAA Journal, 38(3), 383-390	جلوگیری از شکست جزئی در هنگام باز شدن یا جمع شدن	تحلیل رفتار سازه ای و تنش‌ها در حین حرکت سازه از بسته به حالت کامل باز	پایداری سازه‌ای
Liu, K., & Paulino, G. H. (2017). <i>Adaptive deployable structures inspired by origami for enhanced structural reliability</i> . Extreme Mechanics Letters, 12, 58-66	بهینه‌سازی هزینه‌ها و کاهش مصرف منابع در طول عمر بهره‌برداری	برآورد هزینه مکانیکی، نگهداری مفصل‌ها و صرفه‌جویی بلندمدت در انرژی و حمل‌ونقل	صرفه اقتصادی

۴-۴. بررسی نمونه‌های موردی

در راستای تکمیل مرور ادبیات نظری، بررسی نمونه‌های واقعی از پروژه‌های مسکن تاشونده می‌تواند درک عمیق‌تری از ظرفیت‌ها و چالش‌های اجرایی این رویکرد فراهم آورد. از این رو، در این بخش چند نمونه‌ی شاخص از ساختمان‌های تاشونده و گسترش‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا روند تکامل فناوری ساخت، نوع سیستم سازه‌ای، شیوه‌ی اتصال و ویژگی‌های موثر بر سازمان فضایی و کیفیت معماری پروژه‌ها تحلیل شود. نمونه‌های انتخاب‌شده بر اساس معیارهایی چون نوآوری در سازه‌کار سازه‌ای، شیوه‌ی تولید و مونتاژ، و عملکرد فنی و کیفیت فضایی گزینش شده‌اند. تحلیل این موارد زمینه‌ای برای ارزیابی نقاط ضعف و قوت موجود در ساختارهای تاشونده فعلی و در نهایت، تبیین ضرورت توسعه‌ی مدل پیشنهادی فراهم می‌سازد؛ مدلی که با رویکردی میان‌رشته‌ای، به دنبال ایجاد توازن میان الزامات سازه‌ای، انعطاف‌پذیری معماری در رسیدن به سرپناهی پایدار، سریع‌الاحداث و مناسب برای مسکن موقت می‌باشد. در جدول ۴، این نمونه‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند.

جدول ۴. بررسی نمونه‌های موردی

ویژگی‌های اصلی	طرح پیشنهادی
تولید صنعتی کامل واحدهای مدولار مونتاژ ساده حمل و نقل آسان بازیافت و استفاده مجدد قابلیت مونتاژ و جداسازی با استفاده از ابزارهای ساده و بدون نیاز به کارگران حرفه‌ای	طرح پیشنهادی مسکن مدولار پیش ساخته تاشو (Hui Yu. et al., 2018) 
تاشو و قابل حمل و جابه جایی بدون محدودیت در تعداد ماژول‌ها ساخت سریع و نصب آسان امکان ساخت خانه با ابعاد مختلف نمایشی متنوع با مصالح مختلف استفاده از مصالح مقرون به صرفه و اقتصادی سازگار با محیط زیست قابل بازیافت	طرح پیشنهادی رناتو ویدال www.archdaily.com  

www.yankodesign.com طرح پیشنهادی مایکل جانترن 	ساخت سریع و نصب آسان متشکل از دو ماژول پیش‌ساخته و قابل حمل قابل گسترش و انعطاف پذیر قابل استفاده در دفعات زیاد قابل حمل و جابه جایی پانل‌های گسترش‌پذیر سازگار با محیط زیست و قابل بازیافت
--	--

بررسی نمونه‌های موردی، امکان خوانش تحلیلی از وضعیت موجود سازه‌های تاشونده در حوزه اسکان اضطراری را فراهم می‌کند. جمع‌بندی تطبیقی نمونه‌ها نشان می‌دهد که هرچند الگوهای منتخب از مسکن مدولار پیش‌ساخته تاشو (هوی و همکاران، ۲۰۱۸) تا طرح‌های قابل حمل و پانل‌های گسترش‌پذیر، در پاسخ به نیازهایی مانند مونتاژ ساده، حمل‌ونقل آسان، توسعه‌پذیری و قابلیت استفاده مجدد حرکت کرده‌اند، اما در عمل نوعی «گسست بین ایده و اجرا» پابرجاست. این گسست عمدتاً از آنجا ناشی می‌شود که بسیاری از نمونه‌ها یا در سطح پیشنهادی مفهومی متوقف شده‌اند، یا در انتقال هم‌زمان الزامات استقرار سریع به یک سامانه دارای منطق سازه‌ای و اجرایی یکپارچه (شامل سازوکار تغییرشکل، مسیر انتقال بار، و جزئیات اتصال) با محدودیت روبه‌رو هستند. به بیان دقیق‌تر، در بخشی از نمونه‌ها مؤلفه‌های عملکردی مانند سرعت نصب و قابلیت حمل برجسته است، اما پیوند آن‌ها با راهبردهای پایداری سازه‌ای و تثبیت در وضعیت باز (به‌ویژه تحت بارهای جانبی) کمتر صورت‌بندی شده؛ در بخشی دیگر، ایده گسترش‌پذیری مطرح می‌شود، اما سازوکارهای کنترل حرکت، قفل‌شدن و اطمینان از عملکرد تکرار شونده، جزئیات فنی لازم برای قابلیت تعمیم به شرایط بحرانی را ندارد. از این رو، گپ اصلی را می‌توان در «فقدان یک مدل سیستمی» دانست که در آن، انتخاب مصالح سبک، نحوه اتصال، سازوکار تغییرشکل و منطق باربری، هم‌زمان و در چارچوب قیود لجستیکی اسکان اضطراری هم‌راستا شوند. بر همین مبنا، طرح پیشنهادی پژوهش حاضر می‌کوشد با تکیه بر اسکلت فلزی سبک و مدولار، پوسته ساندویچ‌پنل با هسته پلی‌یورتان، اتصالات مکانیکی و مکانیزم‌های خودقفل‌شونده، این شکاف را کاهش دهد و به جای تمرکز صرف بر «قابلیت تاشوندگی»، یک چارچوب اجرایی-سازه‌ای منسجم‌تر برای حمل، استقرار و تثبیت سریع ارائه کند.

۵. معرفی طرح پیشنهادی

در راستای پاسخگویی به نیازهای معماری بحران، پروژه حاضر با هدف طراحی یک سازه پیش‌ساخته، ماژولار و تاشونده با قابلیت استقرار سریع در موقعیت‌های اضطراری و رویدادهای موقت تعریف شده است. این طرح با بهره‌گیری از اصول طراحی تطبیق‌پذیر و سازه‌های گسترش‌پذیر، در جستجوی راه‌حلی میان کارایی سازه‌ای، سرعت نصب، و سهولت حمل‌ونقل بوده است.

۱-۵. ساختار کلی سازه

ساختار کلی این سازه شامل یک اسکلت فلزی سبک و مدولار است. این سیستم توسط اجزای مکانیکی امکان باز و بسته شدن سریع سازه را از حالت فشرده به حالت باز و عملکردی فراهم می‌سازد. فرم کلی سازه برگرفته از یک هندسه‌ی مرکزی است که به آن اجازه می‌دهد با حداقل نیروی ورودی انسانی، در زمانی کوتاه گسترش یابد و تثبیت شود. سازه در حالت بسته به صورت یک مکعب فشرده قابل حمل با وانت یا کامیونت می‌باشد. پس از استقرار در محل، اجزای سقف و دیواره‌ها توسط لولاها به بیرون باز می‌شوند. زمان تخمینی باز شدن کامل، حدود ۸-۱۰ دقیقه توسط دو نفر در نظر گرفته شده است.

۲-۵. سیستم سازه‌ای و عملکرد مکانیکی

اجزای اصلی سازه به‌صورت قطعات پیش‌ساخته طراحی شده‌اند و در هنگام نصب، از طریق محورهای لولایی و اتصالات مکانیکی به یکدیگر متصل می‌شوند. اسکلت مرکزی، شامل یک قاب فولادی صلب است که از چهار ستون اصلی قوطی فولادی و تیرهای پیرامونی تشکیل شده و وظیفه‌ی تحمل بارهای قائم و جانبی را بر عهده دارد. این بخش، نقطه‌ی تکیه‌گاه و اتصال اجزای متحرک است. دو پانل متحرک کف از طریق لولاها پیوسته به قاب مرکزی متصل‌اند و پس از باز شدن، سطح کف را تا دو برابر گسترش می‌دهند. در همین راستا، پانل‌های سقف متحرک نیز با مکانیزم لولایی و بازوهای کمکی تلسکوپی باز شده و سطح پوشش را کامل می‌کنند.

در مرحله‌ی استقرار، دیوارهای جانبی متحرک میان لبه‌های کف و سقف برپا می‌شوند و با قفل‌های اهرمی پیش‌باردار، سازه را به یک حجم صلب و مقاوم در برابر بارهای جانبی تبدیل می‌نمایند.

۳-۵. اتصالات و مکانیزم بازشدن:

لولاهای فلزی با محور چرخش افقی و عمودی که اجازه باز شدن چندوجهی را می‌دهند. ریل و بلبرینگ صنعتی در درب و پنجره‌ها برای حرکت روان بدون نیاز به نیروی زیاد، قفل‌های کشویی و مکانیکی دستی که در حالت باز و بسته پایداری سازه را تضمین می‌کنند.

۴-۵. مواد، اجزاء و مسیر بارگذاری

پوشش خارجی از ساندویچ‌پنل‌های فولادی با هسته پلی‌یورتان تشکیل شده است که ضمن کاهش وزن مرده، عملکرد حرارتی مناسبی دارد. کف از ترکیب پروفیل فولادی و پانل‌های مقاوم رطوبتی ساخته شده و سقف با اتصالات آب‌بند محافظت می‌شود. مسیر انتقال بار از پانل‌های سقف به تیرک‌های لبه و ستون‌های گوشه، و از آنجا به شاسی کف و پایه‌های قابل تنظیم منتقل می‌شود. بر اساس داده‌های وزنی، جرم کل سامانه حدود ۱۸۲۰ کیلوگرم است که شامل ۷۲۰ کیلوگرم برای شاسی، ۶۰۰ کیلوگرم برای سقف‌های متحرک، ۳۰۰ کیلوگرم برای دیوارها، و ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم برای کف متحرک می‌باشد. این توزیع جرمی باعث پایین آمدن مرکز جرم و پایداری سازه در حالت باز و بسته می‌گردد.

۵-۵. مکانیزم حرکتی و پایداری عملکردی

باز و بسته شدن اجزای سقف از طریق سامانه‌ی چرخ‌دنده حلزونی خودقفل‌شونده انجام می‌شود وزن هرپانل متحرک (۳۰۰ کیلوگرم) منجر به گشتاور حداکثر حدود ۱۸ تا ۲۷ کیلونیوتن‌متر در هنگام بازشدن کامل می‌شود. برای غلبه بر این گشتاور، استفاده از گیربکس‌های حلزونی خودقفل‌شونده با نسبت تبدیل ۶۰ تا ۸۰:۱ و موتورهای برقی با توان تقریبی ۳۰۰ الی ۴۰۰ وات توصیه می‌شود. پژوهش‌های رهاوردجو و همکاران (۲۰۲۴) و اسمیت و ژانگ (۲۰۲۵) تأکید کرده‌اند که چنین مکانیزم‌هایی در سازه‌های متحرک موجب افزایش ایمنی، کاهش نیاز به نیروی دستی و پایداری در شرایط باد می‌شوند. در پروژه حاضر نیز استفاده از این فناوری، کنترل حرکتی دقیق و ایمن اجزاء سقف و کف را ممکن می‌سازد و خطر پیچش قاب در مرحله استقرار را مرتفع می‌سازد.

۶-۵. تحلیل رفتاری و مقایسه با نمونه‌های مشابه

بر اساس مطالعات بوراتی و همکاران (۲۰۲۳) و چن و همکاران (۲۰۲۱)، سیستم‌های تاشونده مبتنی بر ساندویچ‌پنل عموماً در سه طبقه مکانیزمی تقسیم می‌شوند:

۱. سامانه‌های اریگامی با تاخوردگی سطحی،
۲. سامانه‌های بازوی لولایی،
۳. و سامانه‌های کشویی-تلسکوپي.

طرح حاضر در رده‌ی دوم قرار دارد، اما با تلفیق مکانیزم‌های لولایی و کشویی، پایداری بیشتری نسبت به سیستم‌های صرفاً کشویی ارائه می‌دهد. همچنین نتایج اولیه نشان می‌دهد، مقاومت سازه در برابر بادهای شدید با سرعت مرجع حدود ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت مطابق الزامات مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران (۱۳۹۸) و در تطابق با استاندارد اروپایی EN 1991-1-4:2005 تأمین شده است. همچنین مسیر انتقال بارهای جانبی به کمک مهاربندهای ضربدری و قفل‌های پیرامونی، موجب عملکرد دیافراگمی پیوسته در کف و سقف می‌شود؛ مشابه یافته‌های کیم و همکاران (۲۰۲۴) که نشان داده‌اند قفل‌های پیش‌باردار می‌توانند سختی جانبی سازه‌های بازشونده را تا چند برابر افزایش دهند.

۷-۵. عملکرد انرژی و پایداری زیست‌محیطی

روی پانل‌های متحرک میانی سقف، ردیفی از پنل‌های فتوولتائیک نصب شده است که توانایی تأمین بارهای پایه‌ی روشنایی و تهویه را دارد. مسیر کابل‌ها در داخل داکت مرکزی پیش‌بینی شده و عبور از پوسته با گلد ضدآب و بوش پلی‌آمیدی انجام می‌شود تا پل حرارتی حذف گردد. استفاده از این راهکار با نتایج گزارش‌شده در پژوهش‌های مدول‌های ماژولار انرژی‌پایا در مجله مهندسی ساختمان (راجانایاگام و همکاران، ۲۰۲۴) همسو است. پس از تبیین چارچوب نظری و تحلیل نمونه‌های موردی و مدل‌سازی کامل سامانه پیش‌ساخته تاشونده در محیط نرم‌افزار کتیا، مشخصات فنی مدل پیشنهادی تعیین گردید که بخشی از آن در جدول ۵. ارائه شده است.

جدول ۵. مشخصات فنی سازه تاشونده پیشنهادی، منبع نگارندگان

ردیف	مؤلفه فنی	مشخصات و توضیحات فنی
۱	نوع سازه	پیش‌ساخته تاشونده مبتنی بر ساندویچ‌پنل فولادی
۲	ابعاد در حالت بسته	۲٫۵ × ۶٫۰ × ۲٫۷ متر
۳	ابعاد در حالت باز	۶٫۰ × ۶٫۰ × ۲٫۷ متر (مساحت خالص ≈ ۲۲ مترمربع)
۴	جرم کل سازه	حدود ۱۸۲۰ تا ۱۸۷۰ کیلوگرم

۵	نوع اسکلت	فولاد قوطی سبک با مهاربند ضربدری
۶	نوع پانل‌ها	ساندویچ پنل فولادی با هسته PIR، ضخامت ۸۰-۱۰۰ میلی‌متر
۷	نوع اتصال کف و سقف	لولای پیوسته فولادی با پوشش ضدزنگ
۸	مکانیزم حرکتی	چرخ‌دنده حلزونی خودقفل‌شونده، بازوی کمکی تلسکوپی
۹	قفل‌های سازه‌ای	قفل اهرمی پیش‌باردار، فاصله نصب ۶۰۰-۸۰۰ میلی‌متر
۱۰	فشار باد طراحی	۰٫۴۷ تا ۰٫۶۸ kPa مطابق (EN ۱۹۹۱-۱-۴)
۱۱	زمان نصب	حدود ۳۰ تا ۶۰ دقیقه توسط ۳ نفر
۱۲	کاربردها	اسکان اضطراری، کمپ‌های موقت، واحدهای امدادی میدانی

۶. بحث و یافته‌ها

۶-۱. ویژگی‌های طراحی

• پیش‌ساختگی و حمل آسان: تمام اجزای سازه به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که در یک بسته‌ی فشرده قابل حمل باشند و در محل نصب، بدون نیاز به ماشین‌آلات سنگین برپا شوند. • سرعت در استقرار: طراحی مکانیزم بازشونده، فرآیند برپاشدن را به کمتر از ۳۰ دقیقه کاهش می‌دهد. • تطبیق‌پذیری محیطی: مصالح سبک، مقاوم در برابر رطوبت و اشعه UV، به‌کارگیری عایق‌های حرارتی و تهویه غیرفعال، امکان استفاده در شرایط جوی گوناگون را فراهم می‌سازد. • قابلیت بازچیدمان و توسعه: مدول‌های سازه قابلیت اتصال به یکدیگر را دارند و امکان توسعه‌ی آن را بسته به نوع نیاز فراهم می‌آورند.

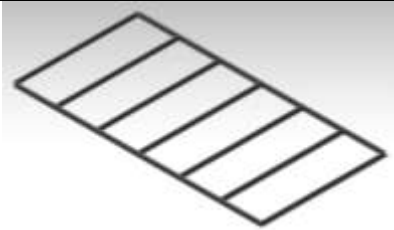
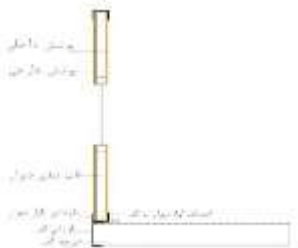
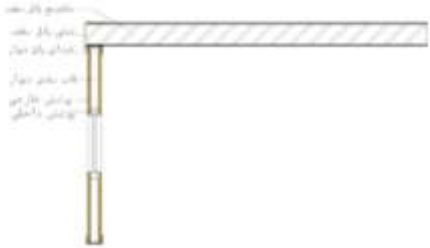
۶-۲. اهداف عملکردی

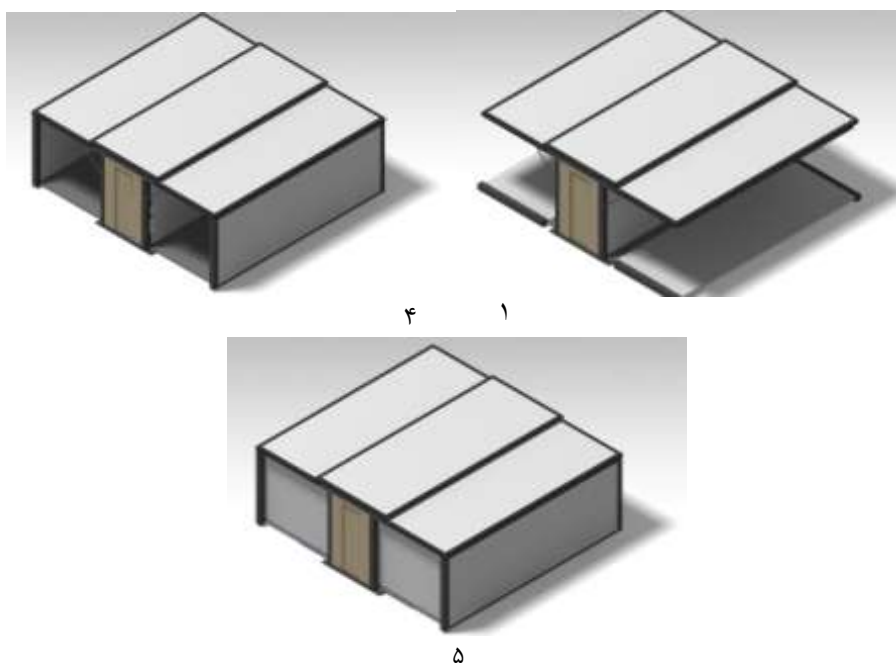
• ایجاد یک سرپناه سریع و پایدار برای بحران‌های طبیعی یا سکونتگاه‌های موقت • کاهش زمان و هزینه‌ی ساخت در موقعیت‌های کم‌دسترسی • ارتقاء کیفیت معماری سازه‌های اضطراری از منظر زیبایی‌شناسی، عملکرد و بوم‌سازگاری در ادامه، طرح معماری و جزئیات عملکردی-سازه‌ای برای نمایش دقیق‌تر سازوکار پروژه ارائه خواهد شد.

۶-۳. نوآوری و مزیت‌ها

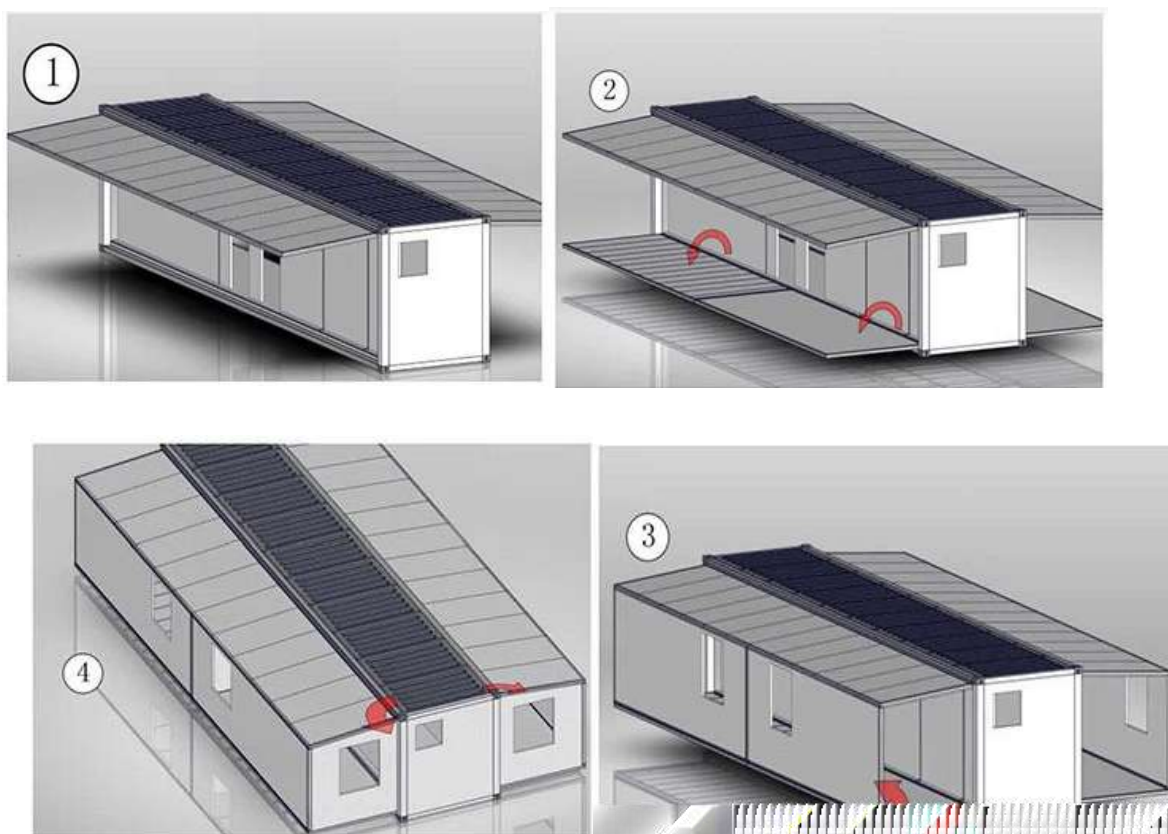
استفاده ترکیبی از لولای ریل و بلبرینگ برای روان‌سازی باز و بسته شدن نیاز به ابزار، امکان تولید انبوه به‌دلیل طراحی مدولار و مصالح در دسترس، طراحی با هزینه پایین‌تر نسبت به سازه‌های دیگر، عدم نیاز به نیروی تخصصی برای استقرار، قابل استفاده توسط تیم‌های امداد غیرحرفه‌ای، قابلیت انطباق با اقلیم‌های مختلف با تغییر عایق و تهویه از جمله ویژگی‌های نوآورانه در نمونه موردی حاضر می‌توان به طراحی دقیق مفاصل و اتصالات اشاره کرد. در این سازه، پنل‌های افقی و عمودی با بهره‌گیری از سیستم‌های لولایی ساده و اتصالات قفل‌شونده، بدون نیاز به ابزارآلات سنگین یا پیچیدگی‌های اجرایی، در کوتاه‌ترین زمان مونتاژ و دیمونتاژ می‌شوند. مکانیزم بازشونده با چرخ‌دنده‌های مخروطی، با عملکردی دستی یا موتور الکتریکی کم‌توان، امکان گسترش یا جمع‌شدن سازه را با نیرویی حداقلی فراهم کرده و این مسئله در شرایط بحران و استقرار سریع در محیط‌های ناپایدار بسیار حائز اهمیت است. ساختار مدولار و پنل‌های سبک در ترکیب با چنین سیستم مکانیکی کارآمدی، منجر به توسعه الگویی از معماری واکنش‌گرا و سریع‌الاجرا شده است که قابلیت تکرار، توسعه و انتقال به مکان‌های گوناگون را داراست. این سازه با ترکیب سه ویژگی اصلی، پیش‌ساختگی، تاشوندگی کنترل‌شده و استفاده از ساندویچ‌پنل‌های سبک، راهکاری عملی و اقتصادی برای اسکان اضطراری در شرایط بحرانی ارائه می‌دهد. قابلیت حمل آسان، وزن کم، زمان استقرار کمتر از یک ساعت، و ایمنی مکانیکی بالا، آن را برای استفاده در بحران‌های طبیعی، اردوگاه‌های موقت و پروژه‌های میدانی بسیار مناسب می‌سازد.

جدول ۶. جزئیات طراحی سازه ای مدل پیشنهادی

ردیف	توضیحات	تصویر جزئیات
۱	اسکلت اصلی و ثابت سازه	
۲	مقاطع فولادی پانل متحرک کف	
۳	جزئیات اتصالات پانل های متحرک دیوار به کف	
۴	جزئیات سازه	
۵	جزئیات اتصال دیوار به سقف	



شکل ۳. نحوه بازشدن سازه پیش‌ساخته تاشونده. به ترتیب، از شماره ۱ تا ۵



شکل ۴. نحوه استقرار مدل پیشنهادی. به ترتیب، از شماره ۱ تا ۴

۷. نتیجه‌گیری، محدودیت‌ها و پیشنهادها

در مواجهه با نیازهای روزافزون به اسکان اضطراری در پی بحران‌های طبیعی، اقلیمی و حتی شرایط خاص مانند جنگ و ناپایداری‌های منطقه‌ای، لزوم طراحی فضاهای قابل استقرار سریع و انعطاف‌پذیر بیش از پیش احساس می‌شود. پژوهش حاضر با هدف ارتقای ظرفیت‌های معماری پیش‌ساخته در حوزه‌ی اسکان اضطراری، به تبیین و ارائه الگوی «واحد گسترش‌پذیر با سازمان‌دهی شعاعی» پرداخت. دستاورد بنیادین این تحقیق، گذار از رویکردهای ایستا در طراحی فضاهای اضطراری به سمت مدل‌های پویا و پاسخگو است. یافته‌ها نشان داد که بهره‌گیری از مدلسازی پارامتریک در محیط نرم‌افزار کتیا، بستری فراهم می‌آورد تا پیچیدگی‌های هندسی اتصالات بازشونده به شکلی کنترل‌شده و دقیق مدیریت شوند؛ به گونه‌ای که می‌توان میان دوگانه‌ی «سرعت در برپایی» و «دقت در عملکرد حرکتی»، تعادلی پایدار ایجاد کرد.

پژوهش حاضر با تمرکز بر تحلیل یک مدل پیشنهادی از سازه‌های تاشو با قابلیت بازشوندگی چندباره، نشان داد که به‌کارگیری سیستم‌های ساخت سبک‌وزن، طراحی مبتنی بر مکانیزم‌های بازشونده ساده، و مصالح صنعتی عایق‌شده می‌تواند منجر به تولید فضاهایی با زمان استقرار بسیار کوتاه، سهولت در حمل‌ونقل، و قابلیت استفاده در طیف وسیعی از موقعیت‌ها شود.

بررسی ساختار و عملکرد این نمونه موردی بیانگر آن است که بهره‌گیری از رویکردهای مهندسی‌شده در طراحی مفاصل، لولاها، و فرم کلی سازه می‌تواند به بهینه‌سازی در هزینه، وزن، و پایداری سازه منجر شود. همچنین، استفاده از ماژولار بودن و انعطاف‌پذیری در ترکیب چند واحد، امکان توسعه‌پذیری و تنوع عملکردی را در پاسخ به نیازهای متفاوت فراهم می‌سازد.

با این حال، این پژوهش با محدودیت‌هایی نیز همراه بوده است. از جمله، تمرکز اصلی بر یک نمونه واحد باعث می‌شود تعمیم‌پذیری یافته‌ها با احتیاط صورت گیرد. همچنین، ارزیابی عملکرد حرارتی و مقاومت در برابر بارهای شدید جوی نیازمند آزمون‌های گسترده‌تری در شرایط واقعی است. نبود استانداردهای بومی مشخص برای این گونه سازه‌ها نیز از دیگر چالش‌های فراروی توسعه آن‌ها در ایران است.

بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی موارد زیر مورد توجه قرار گیرد:

- ارزیابی رفتار دینامیکی و لرزه‌ای سازه‌های تاشو در مقیاس واقعی
 - طراحی نمونه‌های متنوع با رویکرد تطابق با اقلیم‌های گوناگون ایران
 - تحلیل چرخه عمر مصالح و اثرات زیست‌محیطی در سازه‌های موقت
 - تدوین دستورالعمل‌های بومی استاندارد برای طراحی، تولید و بهره‌برداری از این سازه‌ها
- ادامه این مسیر می‌تواند به شکل‌گیری نسل جدیدی از معماری بحران با تکیه بر فناوری‌های ساخت نوین، بهره‌وری بالا و پاسخ‌گویی مؤثر به شرایط پیش‌بینی‌ناپذیر کمک شایانی کند.

۸. منابع:

1. Ballard, Z. C., Gerbo, E. J., Thrall, A. P., & Smith, B. J. (2016). Behavior of sandwich panels in a deployable structure. *Journal of Structural Engineering*, 142(10), 04016073 .
2. Ballard, Z. C., Thrall, A. P., & Smith, B. J. (2016). Behavior of folding sandwich panel structures: Impact of ground conditions, anchorage, and panel warping. *Construction and Building Materials*, 112, 1110–1122 .
3. Chong Zhao, Cui, E., Zou, S., Yang, G., Zhao, H., Sheng, Q., Zhang, L., Guo, H., Liu, R., Zhao, G., & Wang, K. (2025). One-degree-of-freedom flat-foldable thick-panel origami–kirigami structures: Modular arrays and closed polyhedral. *Nature Communications*, 16, 3150 .
4. Conzatti, A., Kershaw, T., Copping, A., & Coley, D. (2022). A review of the impact of shelter design on the health of displaced populations. *Journal of International Humanitarian Action*, 7, 1–15 .
5. Ding, S., Li, H., & Xie, X. (2022). Novel deployable panel structure integrated with thick origami for rapidly deployable shelters. *Materials*, 15(5), 1942 .
6. Ding, Y., Guo, H., He, Y., Huang, X., & Zhou, Y. (2022). Novel deployable panel structure integrated with thick-panel bistable composite structure. *Applied Sciences*, 12(6), 2896 .
7. Fosas, D., Moran, F., Natarajan, S., Orr, J., & Coley, D. A. (2020). The importance of thermal modelling and prototyping in shelter design. *Building Research & Information*, 48(7), 1–15 .
8. Gomes, P., Silva, R., & Almeida, M. (2023). Deployable structures for emergency housing: Mechanisms and sustainability. *Automation in Construction*, 151, 104917 .
9. Greer, F., & Horvath, A. (2023). Modular construction's capacity to reduce embodied carbon emissions in California's housing sector. *Building and Environment*, 232, 110432 .
10. Karagiozova, D., et al. (2023). The compressive and shear characteristics of Miura-ori forms as core materials of sandwich structures. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 36, 1–14 .

11. Kausar, A., Zulfikar, S., & Irfan, M. (2023). State-of-the-art of sandwich composite structures: Materials, design and applications. *Journal of Composites Science*, 7(3), 102 .
12. Liao, Y., & Krishnan, S. (2024). Deployable scissor structures: Classification of modifications and applications. *Automation in Construction*, 165, 105547 .
13. Liu, C., Xu, J., Zhang, Y., Zhang, J., & Zhou, W. (2024). Thin-walled deployable composite structures: A review. *Thin-Walled Structures*, 196, 111318 .
14. Ma, T., Zhang, L., & Han, Y. (2022). Origami-inspired reconfigurable shelters for rapid deployment. *Journal of Building Engineering*, 57, 104940 .
15. Maden, F. (2019). *The architecture of movement: Transformable structures and spaces*. Yaşar University, Turkey.
16. Montalbano, G., & Santi, G. (2023). Sustainability of temporary housing in post-disaster scenarios: A requirement-based design strategy. *Buildings*, 13(12), 2952 .
17. Rahardjo, A. S., Navaratnam, S., Zhang, G., & Nguyen, K. (2024). A conceptual design and structural analysis of thick panel kirigami for deployable volumetric modular structure. *Structures*, 70, 107625 .
18. Sharafi, P., Mortazavi, M., Ronagh, H., & Gad, E. (2018). Development of an innovative modular foam-filled panelized system for rapidly assembled post-disaster housing. *Buildings*, 8(8), 97 .
19. Singh, R., Kaur, H., & Tiwari, A. (2020). Modular emergency shelters using lightweight materials. *Materials Today: Proceedings*, 32, 195–200.
20. Sphere Association. (2018). *The Sphere Handbook: Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response*. Geneva: Sphere Association.
21. UNHCR. (2023). *Emergency shelter standards and guidelines*. UNHCR Emergency Handbook. Retrieved from
22. Wang, C., Zhang, D., Li, J., & You, Z. (2022). Kirigami-inspired thick-panel deployable structures. *International Journal of Solids and Structures*, 243, 111752 .
23. Wang, J., Roveroni, M., Meneghetti, G., & Hao, G. (2024). Parametric design, simulation, fabrication and test of an origami-core based sandwich composite material. *Mechanics Based Design of Structures and Machines* .
24. Wang, X., Li, J., & Chen, Y. (2021). Thermal insulation performance of polyurethane sandwich panels in temporary buildings. *Construction and Building Materials*, 290, 123210.
25. Yeenkin, İ., Maden, F., Tosun, S., Kilit, Ö., Akgün, Y., Kiper, G., Korkmaz, K., & Gündüzalp, M. (2024). A foldable temporary shelter design. *Proceedings of the IASS 2024 Symposium: Redefining the Art of Structural Design*.
26. Yin, D., Lu, W., & Hou, Y. (2024). Design strategies for deployable architecture in disaster zones. *Sustainable Cities and Society*, 94, 104843.
27. Yu, H., & Bai, G. (2018). Research on modularization and sustainable design of temporary housing. *Art and Design Review*, 6, 125–132.
28. Zhou, Y., & Chen, Z. (2023). Lightweight steel frame systems for rapid-deploy housing. *Journal of Constructional Steel Research*, 205, 107021.
29. Zhu, Y., & Filipov, E. T. (2024). Large-scale modular and uniformly thick origami-inspired adaptable and load-carrying structures. *Nature Communications*, 14 .