

A Comparative Study of Architectural Forms Under Blast Loads Using AHP and Finite Element Modeling

Ali Bitarafan^a, Mahtiam Shahbazi^{b*}, Farah Habib^c

a. Department of Architecture, S.R.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

b. Department of Architecture, S.R.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

c. Department of Architecture, S.R.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2025.2071840.1212>

ARTICLE INFO

Keywords:

Urban rivers,
Land use organization,
Sustainable tourism
development,
Riversides,
Noor City.

Received:

16 September 2025

Received in revised form:

30 November 2025

Accepted:

6 December 2025

pp.151-174

ABSTRACT

With the increasing growth of man-made threats in urban environments, particularly explosions caused by terrorist attacks, the need for architectural design compatible with passive defense principles has become increasingly critical. The present study aims to identify and evaluate the key indicators affecting the performance of architectural building forms against blast loads and to propose an appropriate pattern for reducing vulnerability. In the first stage, based on literature review and expert questionnaires, eleven major indicators were extracted, including basic building form, form composition, roof type, corner articulation, external envelope geometry, surface-to-height ratio, plan irregularity, façade irregularity, architectural element continuity, compatibility between architectural and structural forms, and compatibility of building form with the surrounding environment. The collected data from 18 experts were weighted and ranked using the Analytic Hierarchy Process (AHP). To enhance the reliability of the results and avoid sole reliance on subjective judgments, numerical simulations were performed in the second stage using the finite element method in Abaqus software, where selected forms were subjected to TNT blast scenarios. The results indicate that basic form and form composition have the greatest influence on blast-resistant architectural design. Moreover, noticeable differences were observed between expert judgments and numerical simulation outcomes for some indicators. Finite element analyses show that compact forms and geometries that reduce stress concentration perform better in mitigating blast-induced forces. The main contribution of this research lies in integrating multi-criteria decision-making techniques with finite element modeling to provide a comprehensive framework for evaluating architectural forms in blast-resistant design, which can support architects and designers in improving building safety and urban resilience.

* Corresponding Author: Mahtiam Shahbazi Email: mahtiamshahbazi@iaui.ac.ir

Extended Abstract

Background and Significance In recent decades, the escalation of man-made threats, particularly bombings and terrorist attacks, has underscored the urgent need for designing architectural forms that comply with the principles of passive defense and civil protection. Explosions in urban areas cause not only direct structural damage but also secondary hazards such as debris projection, fire, and the collapse of non-structural components. These consequences highlight the importance of architectural decisions in mitigating vulnerabilities and enhancing urban resilience. Historically, architectural theorists, from Vitruvius to contemporary scholars such as Francis D.K. Ching, have emphasized the role of form as a fundamental determinant in the performance of buildings. In the context of blast resistance, architectural form plays a pivotal role in how shock waves interact with the building's geometry, distribute stresses, and ultimately influence the extent of damage.

Objectives of the Study

The present research seeks to identify and evaluate the most influential indicators related to architectural form in the context of blast resistance, with the ultimate aim of providing a design framework that reduces vulnerability and supports the objectives of passive defense. Eleven key indicators were defined for this purpose:

- Basic building form type.
- Combination of architectural forms.
- Articulation of corners.
- Roof type.
- Compatibility between architectural and structural form.
- Adaptation of architectural form with

the surrounding environment.

- Continuity and integration of architectural elements.
- Geometry of the external shell.
- Surface-to-height ratio.
- Irregularities in building plan.
- Irregularities in building façade.

Methodology

The research methodology combines expert-based evaluation and numerical simulation, thereby bridging qualitative and quantitative approaches. In the first phase, expert opinions were collected through structured questionnaires distributed among specialists in civil engineering, architecture, and crisis management. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied to systematically weight and rank the indicators, enabling a structured comparison of the relative importance of architectural features. However, relying solely on expert judgment can be insufficient, since the actual behavior of buildings under blast loading is highly complex and influenced by numerous factors that may not be fully captured in subjective evaluations. Therefore, in the second phase, finite element modeling (FEM) was conducted using Abaqus software to simulate the performance of various architectural forms under blast loading conditions. The explosive material was modeled as TNT, and incident wave interactions were introduced to represent realistic blast scenarios. Material properties were defined using a Concrete Damaged Plasticity (CDP) model to capture both compressive and tensile cracking behaviors of reinforced concrete.

Findings

The AHP analysis of expert questionnaires revealed certain priorities among the identified indicators. Experts generally emphasized the aerodynamic qualities of forms, perceiving dome and conical roofs as more blast-resistant, while they considered flat roofs and box-like forms to be less efficient due to their lack of aerodynamic features. Similarly, irregularities in plan and façade were unanimously identified as significant weaknesses in reducing blast resistance. Finite element analysis, however, presented a different perspective. The simulations demonstrated that flat and compact forms actually performed better in terms of reducing maximum reaction forces at structural supports. Specifically, the flat roof building recorded the lowest force of 18,728 N, while pyramidal and gable roofs showed maximum forces of 38,128 N and 38,666 N, respectively. These findings indicate that the projected surface area exposed to the blast wave is more critical than aerodynamic shape alone. Moreover, irregular geometries resulted in concentrated stress zones, validating the expert concern regarding irregularity, yet challenging their assumption about the superiority of aerodynamic roofs.

Discussion

The comparative analysis between expert judgment and numerical modeling highlighted both alignments and divergences. While both approaches agreed on the detrimental impact of irregularities in plan and façade, their views diverged concerning roof performance. Experts, influenced by subjective notions of aerodynamics, ranked dome and conical roofs higher, whereas finite element results placed flat roofs at the top due to their reduced exposed surface area. This discrepancy underscores the importance of validating expert-based evaluations with numerical modeling, as intuitive impressions may not accurately reflect actual blast dynamics. The study further emphasizes that the interaction between form and environment

plays a secondary yet meaningful role. Buildings aligned harmoniously with their

surrounding topography and urban context demonstrated better integration in terms of energy distribution. Similarly, ensuring compatibility between architectural and structural forms significantly improved overall blast resistance, as incongruities between design intent and structural system created weak links under loading. Innovation of the Study The primary innovation of this research lies in the integration of multi-criteria decision-making (MCDM) with finite element modeling to provide a comprehensive evaluation of architectural form under blast loading. Unlike previous studies that focused solely on expert opinions or isolated numerical simulations, this research combines both approaches to reveal discrepancies and strengthen the reliability of findings. By systematically identifying eleven indicators and subjecting them to both qualitative and quantitative validation, the study offers a holistic framework for architectural decision-making in blast-resistant design. Applications and Implications The findings of this research provide practical insights for architects, engineers, and policymakers engaged in the design of secure urban spaces. By highlighting the limitations of relying exclusively on subjective expert evaluations, the study advocates for an evidence-based design approach where numerical modeling validates and refines expert intuition. The identified indicators can be directly incorporated into design guidelines for critical infrastructure, governmental buildings, and high-risk urban zones, thereby enhancing resilience against explosive threats. Furthermore, the study contributes to the broader discourse on passive defense, bridging architectural design with urban crisis management.

Conclusion

The comparative analysis revealed that flat and compact forms, contrary to expert----assumptions, exhibit superior blast resistance due to reduced exposed surface areas. At the same time, irregularities in plan and façade remain critical weaknesses that exacerbate vulnerability. The combined use of AHP and finite element modeling not only enhanced the robustness of the findings but also introduced a replicable methodology for future studies. This research thus establishes a methodological and conceptual foundation for integrating architectural form into the broader framework of blast-resistant and resilient urban design.



تحلیل تطبیقی فرم‌های معماری در برابر انفجار با استفاده از روش AHP و مدل‌سازی اجزای محدود

علی بیطرفان - گروه علمی معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
مه تیام شهبازی* - گروه علمی معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
فرح حبیب - گروه علمی معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2025.2071840.1212>

چکیده	واژگان کلیدی
<p>افزایش تهدیدات انسان‌ساز به‌ویژه انفجارها در محیط‌های شهری، ضرورت طراحی معماری سازگار با اصول پدافند غیرعامل را بیش از پیش آشکار ساخته است. هدف پژوهش حاضر، شناسایی و ارزیابی شاخص‌های مؤثر در فرم معماری ساختمان‌ها در برابر انفجار و ارائه الگوی مناسب برای کاهش آسیب‌پذیری است. بدین منظور، یازده شاخص کلیدی شامل نوع فرم پایه، ترکیب فرم‌ها، نوع بام، نحوه مفصل‌بندی کنج‌ها، شکل پوسته خارجی، نسبت سطح به ارتفاع و نامنظمی‌های هندسی استخراج شدند. در مرحله نخست، داده‌های حاصل از پرسشنامه خبرگان با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) وزن‌دهی و رتبه‌بندی گردید. سپس، برای اعتبارسنجی نتایج، مدل‌سازی اجزای محدود با نرم‌افزار Abaqus انجام شد و فرم‌های مختلف تحت بار انفجار TNT شبیه‌سازی شدند. یافته‌ها نشان می‌دهد که نتایج حاصل از قضاوت خبرگان با تحلیل عددی تطابق کامل ندارد و در برخی موارد تفاوت معناداری مشاهده می‌شود. بر اساس مدل‌سازی عددی، فرم‌های تخت و فشرده عملکرد بهتری در کاهش نیروهای وارده دارند. در حالی که خبرگان به دلیل برداشت ذهنی از اثرات آیرودینامیکی برخی فرم‌ها، رتبه‌بندی متفاوتی ارائه کرده بودند. نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب دو رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره و مدل‌سازی اجزای محدود برای بررسی جامع شاخص‌های معماری است. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر انفجار و ارتقای تاب‌آوری شهری استفاده قرار گیرد.</p>	<p>فرم معماری، پدافند غیر عامل، ساختمان، انفجار،</p>
<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵</p>	
<p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹</p>	
<p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵</p>	
<p>صص: ۱۷۴-۱۵۱</p>	

مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد شهرنشینی، پیچیدگی زیرساخت‌ها و افزایش تهدیدات انسان‌ساز به‌ویژه حملات تروریستی و بمب‌گذاری ها، ضرورت بازنگری در اصول طراحی معماری و سازه‌ای ساختمان‌ها را بیش از پیش آشکار ساخته است. انفجار به‌عنوان یکی از جدی‌ترین تهدیدات در محیط‌های شهری، می‌تواند نه تنها موجب فروپاشی اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای ساختمان شود، بلکه با پرتاب آوار، آتش‌سوزی و امواج ضربه‌ای پیامدهای انسانی و اقتصادی جبران‌ناپذیری ایجاد کند. از این‌رو، تحلیل رفتار فرم معماری در برابر انفجار و شناسایی شاخص‌هایی که می‌توانند میزان آسیب‌پذیری را کاهش دهند، به یکی از موضوعات کلیدی در حوزه معماری مقاوم و پدافند غیرعامل تبدیل شده است. شناسایی خطر و میزان خسارت احتمالی نقش مهمی در آمادگی برای مقابله و مقاومت در برابر پیامدهای منفی بمباران هوایی در مناطق شهری ایفا می‌کند. اگر ابعاد این خطرات و خسارات محتمل به‌درستی مطالعه شوند، سطح و نوع آمادگی‌های مقاومتی می‌تواند حتی در مقیاس ساختمان‌های منفرد تعریف و توسعه یابد (Bitarafan & Amini Hosseini, 2023). انفجار بمب در داخل یا خارج یک ساختمان، پیامدهای فاجعه‌باری به همراه خواهد داشت؛ از جمله تخریب بخش‌های داخلی و خارجی ساختمان، دیوارها، درها و پنجره‌ها و همچنین اختلال در تمامی تأسیسات بنا. همچنین، اثرات ناشی از انفجار شامل پرتاب آوار، آتش و دود می‌تواند باعث جراحت یا مرگ ساکنان شود (Hosseini et al., 2012). با توجه به اینکه مقاومت ساختمان در برابر موج انفجار وابسته به شکل و فرم بنا، تعداد بازشوها و جنس مصالح به‌کاررفته است، در فرآیند طراحی ضروری است خطرات بالقوه و ابعاد آن‌ها مشخص گردد. مهم‌تر از همه، ایمنی انسان باید تضمین شود. علاوه بر این، برای تضمین تداوم عملکرد پس از انفجار، عوامل معماری و سازه‌ای باید در طراحی در نظر گرفته شوند و یک طرح بهینه برای ساختمان تدوین گردد (Koccaz, 2008). بنابراین، مطالعه و ارزیابی فرم ساختمان در برابر انفجار اهمیت ویژه‌ای دارد. همانگونه که اشاره گردید یکی از مهمترین اجزای ساختمان که با انفجار ناشی از بمباران هوایی دشمن درگیر است، فرم ساختمان است. مساله اصلی این تحقیق شناسایی شاخص‌های موثر بر رفتار فرم معماری ساختمان‌ها در برابر اثرات ناشی از انفجار در سطح زمین می‌باشد. تحقیقات بسیاری در زمینه فرم‌های معماری برای مقابله با تهدیدات صورت گرفته است و از جمله آنها می‌توان به این موارد اشاره نمود: باراکات و هترینگتون (۱۹۹۸) در یکی از اولین پژوهش‌ها در این حوزه، به بررسی رفتار فرم‌های مختلف معماری در برابر انفجار

پرداختند. آن‌ها نشان دادند که فرم‌های هندسی مختلف بسته به سطح مقطع در معرض موج انفجار، رفتار متفاوتی دارند و برخی فرم‌ها مانند نیم‌کره یا مخروط توانایی بیشتری در پراکندگی فشار موج انفجار دارند. لوچونی و همکاران (۲۰۰۵) نیز با شبیه‌سازی عددی تأیید کردند که انتخاب فرم پایه می‌تواند در کاهش میزان تخریب ساختمان نقش کلیدی ایفا کند. همچنین در دستورالعمل FEMA-426 (۲۰۰۳) تأکید شده است که نوع سقف و نحوه طراحی پوسته خارجی از عوامل بسیار تعیین‌کننده در میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در برابر انفجار است. گیبکن (۲۰۱۰) نیز در پژوهشی بر اهمیت سطوح آیرودینامیک در کاهش اثرات موج انفجار تأکید کرده و نشان داده است که طراحی صحیح پوسته خارجی می‌تواند مسیر حرکت موج را تغییر دهد و اثر آن را بر سازه کاهش دهد.

در ایران، مجتهدپور (۲۰۰۹) برخی شاخص‌های تأثیرگذار بر معماری مقاوم در برابر انفجار را بررسی کرد. اگرچه پژوهش او در این زمینه پیشگام بود، اما تنها بر تعدادی محدود از معیارها تمرکز داشت و رویکرد جامعی ارائه نکرد. در ادامه، پژوهش‌های بیشتری در ایران و سایر کشورها انجام شد که ابعاد گسترده‌تری از موضوع را پوشش دادند.

بیطرفان و همکاران (۲۰۱۶) در مقاله‌ای با عنوان ارزیابی معماری شاخص‌های ساختمان در مدیریت بحران انفجار شاخص‌های مختلف معماری مؤثر در مدیریت بحران انفجار را شناسایی کردند. آن‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، معیارهایی همچون فرم معماری، بازشوها، موقعیت بنا نسبت به سطح زمین، نوع مصالح، تزئینات معماری، میزان انرژی مصرفی و طراحی فضاهای داخلی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که برخی شاخص‌ها مانند فرم معماری و جانمایی بازشوها سهم بیشتری در کاهش خسارت دارند.

در پژوهشی دیگر، بیطرفان و همکاران (۲۰۱۳) در مقاله انتخاب ترکیب بهینه فرم‌های معماری از منظر پدافند غیرعامل با استفاده از روش‌های AHP و IHWP، فرم‌های ترکیبی معماری را ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که فرم مرکزی‌گرا بهترین عملکرد را برای ساختمان‌های حیاتی دارد.

نخعی و همکاران (۲۰۱۵b) در مقاله تقویت نمای شیشه‌ای لمینت‌شده در برابر بار انفجار به موضوع نماهای شیشه‌ای پرداختند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی، هشت مدل مختلف شیشه لمینت‌شده را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که برخی مدل‌ها توانایی بیشتری در کاهش اثر انفجار دارند. بیطرفان و نعمتی (۲۰۲۶) با استفاده از یک چارچوب ترکیبی

شهری در برابر زلزله با استفاده از رویکرد فازی RANCOM ابعاد مختلف تاب‌آوری شهری در برابر زلزله را بررسی کردند و نشان دادند که عوامل سازه‌ای و کاربری اراضی بیشترین سهم را در میزان تاب‌آوری دارند.

این مرور نشان می‌دهد که تحقیقات پیشین هرچند ابعاد مهمی از موضوع را روشن کرده‌اند، اما اغلب به شاخص‌های محدود پرداخته‌اند یا تنها به قضاوت خبرگان بسنده کرده‌اند. نیاز به پژوهشی جامع که هم‌زمان شاخص‌های مختلف معماری را در برابر انفجار بررسی و با مدل‌سازی عددی اعتبارسنجی کند، همچنان احساس می‌شود.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اگرچه پژوهش‌های متعددی به نقش فرم معماری و پوسته ساختمان در کاهش اثرات انفجار پرداخته‌اند (Smith & Hetherington, 1994; Remennikov & Rose, 2005)، اما اغلب این مطالعات یا به تحلیل‌های عددی بسنده کرده‌اند یا صرفاً مبتنی بر قضاوت خبرگان بوده‌اند. در سال‌های اخیر، استفاده ترکیبی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و مدل‌سازی اجزای محدود به‌عنوان رویکردی معتبر در مهندسی ایمنی ساختمان‌ها مطرح شده است (Ngo et al., 2007; Zavadskas et al., 2014)

بر همین اساس، تحقیق حاضر تلاش می‌کند با شناسایی و ارزیابی یازده شاخص کلیدی معماری در برابر انفجار، ترکیب روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و مدل‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار Abaqus را به کار گیرد تا تصویری دقیق و معتبر از سازگاری فرم‌های معماری با اصول پدافند غیرعامل ارائه کند. نوآوری اصلی پژوهش حاضر در جامعیت آن، ترکیب رویکردهای کیفی و کمی و مقایسه تطبیقی نتایج حاصل از قضاوت خبرگان و مدل‌سازی عددی نهفته است. این رویکرد می‌تواند مبنای مناسبی برای تدوین دستورالعمل‌های طراحی معماری مقاوم در برابر انفجار در کشور باشد و نقش مهمی در ارتقای تاب‌آوری شهری و حفاظت از جان شهروندان ایفا کند.

۲- مبانی نظری

شاخص‌های موثر بر انتخاب فرم معماری سازگار در ساختمان‌های مقاوم در برابر انفجار

یکی از مهمترین مقوله‌های معماری که از زمان ویتروویوس تا امروز، معماران بر روی اهمیت آن اتفاق نظر داشته‌اند، فرم معماری بوده است که برای بررسی این مقوله با استناد به کتاب‌هایی همانند فرم، فضا و نظم فرانسیس دی کی چینگ می‌توان شاخص‌های

یادگیری ماشین توضیح‌پذیر، ایمنی و قابلیت اطمینان سازه‌های شهری در برابر اثرات انفجار را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که متغیرهایی نظیر فاصله از انفجار، مقدار TNT، تعداد موانع ساختمانی و ویژگی‌های معماری، تأثیر معناداری بر سطح آسیب دارند و استفاده از رویکردهای داده‌محور می‌تواند مکمل مناسبی برای روش‌های عددی و تجربی مرسوم باشد.

حسینی و همکاران (۲۰۱۴) در مقاله بازشوهای سازگار با معماری پدافند غیرعامل با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی اهمیت بازشوها را در کاهش اثرات انفجار بررسی کردند. نتایج نشان داد که نسبت مساحت بازشو به دیوار و نحوه نورگیری بیشترین تأثیر را در کاهش آسیب دارند.

بیطرفان و همکاران (۲۰۱۳) در مقاله نقش فضای معماری در ساختمان‌های مقاوم در برابر انفجار نقش فضاهای داخلی را در کاهش خسارات ناشی از انفجار بررسی کردند و نشان دادند که طراحی ارگونومیک و موقعیت‌یابی صحیح فضاهای حساس می‌تواند تلفات انسانی را کاهش دهد.

هاشمی‌نسب و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله نقش مصالح نما در ساختمان‌های مقاوم در برابر انفجار: یک ارزیابی بر پایه دلفی فازی و روش فازی EDAS به بررسی مصالح نما پرداختند و دریافتند که نمای سیمانی با پوشش مقاوم‌ترین گزینه است.

بیطرفان و همکاران (۲۰۱۵) در مقاله ارزیابی تاب‌آوری شهری در برابر حملات تروریستی؛ مطالعه موردی محله باغ‌فیض تهران با استفاده از روش IHWP و GIS نشان دادند که بیش از ۶۰ درصد از محله باغ‌فیض دارای تاب‌آوری بسیار پایین است.

نخعی و همکاران (۲۰۱۵a) در مقاله انتخاب بهترین تونل‌های شهری به‌عنوان فضای امن در بحران با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی تونل‌های تهران را ارزیابی کردند و تونل توحید را بهترین گزینه معرفی نمودند.

بیطرفان و همکاران (۲۰۲۳a) در مقاله شناسایی و ارزیابی تهدیدات انسان‌ساز علیه شهرها با استفاده از روش ترکیبی Grey BWM-Grey MARCOS به تهدیدات انسان‌ساز پرداختند و حملات سایبری، نظامی و تروریستی را مهم‌ترین تهدیدات شناسایی کردند.

در پژوهشی دیگر، بیطرفان و همکاران (۲۰۲۳b) در مقاله ارزیابی مخاطرات طبیعی در شهرها با استفاده از یک رویکرد ترکیبی نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره (مطالعه موردی: شهر تهران) خطرات طبیعی تهران را بررسی کردند و دریافتند که زلزله، سیل و زمین‌لغزش سه خطر اصلی در این شهر هستند.

همچنین بیطرفان و همکاران (۲۰۲۵) در مقاله ارزیابی تاب‌آوری

در برابر انفجار، ابتدا با استفاده از منابع کتابخانه‌ای انواع فرم‌ها معماری شناسایی گردیدند و متغیرهای موثر بر فرم معماری ساختمان‌ها تعیین شد. دو متغیر قابلیت کاهش اثر انفجار و قابلیت استتار به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شد و تاثیر یازده متغیرهای مستقل شامل نوع فرم پایه، ترکیب فرم‌های ساختمان، نحوه مفصل بندی کنج فرم‌ها، نوع بام ساختمان، تطبیق فرم معماری با فرم سازه‌ای، میزان تطبیق فرم معماری با فرم محیط، پیوند یا پیوستگی عناصر معماری با یکدیگر، شکل سطح پوسته خارجی، نسبت سطح به ارتفاع ساختمان، نامنظمی در پلان ساختمان، نامنظمی در نما در متغیرهای وابسته ارزیابی شد. به منظور کسب نظر سنجی از خبرگان، پرسش‌نامه‌ای جهت وزن دهی به متغیرهای مستقل در معرض ۱۸ فرد خبره که آشنا به زمینه عمران، معماری و انفجار بوده‌اند، قرار گرفت. سپس نتایج بدست آمده از پرسشنامه‌ها با استفاده از نرم افزارهای SPSS تجزیه و تحلیل شدند. در هنگام طراحی پرسشنامه و مصاحبه با افراد خبره در این زمینه، تصمیم بر آن شد که برای بررسی سازگاری تعدادی از شاخص‌ها با اهداف پدافند غیرعامل نمی‌توان تنها به نتایج حاصل از پرسشنامه اکتفا نمود، زیرا رفتار ساختمان‌ها در برابر انفجار بسیار پیچیده است و به متغیرهای بسیاری بستگی دارد. بنابراین تعدادی از شاخص‌ها با استفاده از نرم افزار المان محدود مدل سازی شدند. جهت ارزیابی نمونه‌ها علاوه بر نظر سنجی از خبرگان، مدل سازی المان محدود در نرم افزار Abaqus، نیز صورت گرفت، با توجه به این موضوع که تنها یکی از دو متغیر وابسته، قابلیت مدل سازی در نرم افزارهای المان محدود را دارد، مدلسازی المان محدود بر روی متغیرهای موثر نیز انجام گردید. در این راستا در ادامه نتایج حاصل از روش شبیه سازی المان محدود تکنیک AHP بیان می‌گردد و شاخص‌های فرم معماری ساختمان‌های مقاوم در برابر انفجار تعیین گردید. برای سنجش پایایی پرسش‌نامه می‌توان از آزمون آلفای کرونباخ نیز استفاده کرد. آلفای کرون باخ این تحقیق برابر ۰/۷۸۶ بدست آمده است که به نظر مناسب می‌باشد.

۱-۲- روش AHP

روش AHP که توسط ساعتی (۱۹۸۰) توسعه یافت، ابزاری برای تعیین اهمیت نسبی مجموعه‌ای از فعالیت‌ها در مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره است. در این روش، تصمیم‌گیرنده می‌تواند قضاوت‌های کیفی ناملموس را در کنار معیارهای کمی ملموس وارد فرآیند تصمیم‌گیری کرده و آن‌ها را به شکل کمی ترجمه کند (Badri, 2001).

زیر را برای مقایسه فرم‌های مختلف در نظر گرفت که شامل موارد زیر می‌باشد.

نوع فرم پایه ساختمان: به شکل اصلی هندسی ساختمان (مانند مکعب، استوانه، مخروط یا نیم‌کره) گفته می‌شود که نخستین عامل تعیین‌کننده در نحوه برخورد موج انفجار با سطوح بنا است.

ترکیب فرم‌های ساختمان: نحوه سازماندهی و ترکیب فرم‌های مختلف معماری (مانند ترکیب مرکزی، خطی یا خوشه‌ای) که بر توزیع و انتقال نیروهای ناشی از انفجار تأثیرگذار است.

نحوه مفصل بندی کنج فرم‌ها: نوع طراحی و جزئیات گوشه‌ها و اتصال سطوح بنا که می‌تواند موجب تمرکز یا پراکندگی فشار ناشی از موج انفجار شود.

نوع بام ساختمان: شکل هندسی بام (تخت، شیبدار، گنبدی یا مخروطی) که بر میزان سطح در معرض موج انفجار و نحوه انتقال نیرو به سازه اثر مستقیم دارد.

تطبیق فرم معماری با فرم سازه‌ای: میزان هماهنگی میان فرم معماری و سیستم باربر سازه‌ای که می‌تواند مقاومت کلی بنا را در برابر انفجار افزایش یا کاهش دهد.

میزان تطبیق فرم معماری با فرم محیط: هماهنگی فرم بنا با شرایط طبیعی و محیطی (مانند توپوگرافی، اقلیم و بافت شهری) که می‌تواند در کاهش آسیب‌پذیری و استتار بنا مؤثر باشد.

پیوند یا پیوستگی عناصر معماری با یکدیگر: میزان انسجام و یکپارچگی اجزای معماری که از ایجاد نقاط ضعف و گسست در برابر فشار ناشی از انفجار جلوگیری می‌کند.

شکل سطح پوسته خارجی ساختمان: فرم هندسی و سطح خارجی بنا (مانند سطوح صاف، منحنی یا شکست‌دار) که بر نحوه بازتاب یا انحراف موج انفجار تأثیر دارد.

نسبت سطح به ارتفاع ساختمان: تناسب میان ابعاد افقی و عمودی بنا که تعیین‌کننده میزان سطح در معرض انفجار نسبت به ارتفاع کلی سازه است.

نامنظمی در پلان ساختمان: وجود شکستگی‌ها، بیرون‌زدگی‌ها یا پیچیدگی‌های غیرضروری در نقشه افقی بنا که موجب تمرکز نیرو و افزایش آسیب‌پذیری می‌شود.

نامنظمی در نما: بی‌نظمی در طراحی نمای خارجی (مانند شکست‌های متعدد یا تغییرات ناهمگون) که می‌تواند مسیر موج انفجار را تغییر داده و باعث ایجاد نقاط ضعف سازه‌ای شود.

۳- روش شناختی اجرای مدل ارزیابی و تحلیل نتایج
در این پژوهش جهت شناسایی فرم معماری ساختمان‌های مقاوم

روش AHP شامل سه مرحله اصلی است (Dağdeviren, 2008):

۱. ساختاردهی مدل
 ۲. قضاوت مقایسه‌ای میان گزینه‌ها و معیارها
 ۳. ترکیب و استخراج اولویت‌ها
- در گام نخست، مسئله پیچیده تصمیم‌گیری به صورت سلسله‌مراتبی ساختار بندی می‌شود؛ به گونه‌ای که هدف اصلی در رأس، معیارها در سطح میانی و گزینه‌ها در سطح پایینی سلسله‌مراتب قرار می‌گیرند. در گام دوم، مقایسات زوجی میان گزینه‌ها و معیارها انجام می‌گیرد. این مقایسات در AHP بر اساس مقیاس ۹ درجه‌ای استاندارد (جدول ۱) صورت می‌پذیرد.

جدول ۱ - مقیاس ۹ درجه‌ای شدت اهمیت و توصیف آن

تعریف	شدت اهمیت
اهمیت برابر	۱
اندکی مهم‌تر	۳
به‌طور قوی مهم‌تر	۵
بسیار قوی مهم‌تر	۷
فوق‌العاده مهم‌تر	۹
مقادیر میانی	۲، ۴، ۶، ۸

۲-۲- مدل‌سازی المان محدود

یکی از کاربردهای شبیه‌سازی تحقیق در شرایط خطرناک بدون در خطر انداختن انسان است. به طور مثال شبیه‌سازی رفتار ساختمانها در برابر حوادثی مانند زلزله، طوفان و یا انفجار (گروت و وانگ، ۱۳۸۶).

تحقیق شبیه‌سازی برای پرداختن به مسائلی چون مقیاس و پیچیدگی نیز کاربرد دارد. فناوری جدید رایانه‌ای به خوبی قادر به شبیه‌سازی پدیده‌های مصنوعی و طبیعی در مقیاس کلان و خرد می‌باشد (گروت و وانگ، ۱۳۸۶)..

با توجه به هزینه بالا ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، مدل‌های المان محدود مناسب‌ترین راه برای بررسی رفتار انفجاری ساختمان‌ها می‌باشد. اما امکان استفاده از آن در طراحی‌های کاربردی سازه وجود ندارد. دامنه کاربرد این روش به کارهای تحقیقاتی محدود است (Bitarafan, 2012). البته امروزه اکثر نرم افزارهای تحقیقاتی انفجاری بر مبنای تحلیل المان محدود استوار بوده و به دلیل دقت

بالای این نرم افزارها همانند ABAQUS و به روز بودن آن در این تحقیق از این روش در قالب مدل سازی کامپیوتری استفاده شده است.

با توجه به متغیرهای تأثیرگذار بر رفتار ساختمان‌های مقاوم در برابر انفجار، در این پژوهش، ۱۹ مدل المان محدود در نرم افزار Abaqus ایجاد شده است. ۵ مدل جهت بررسی میزان سازگاری هر یک از فرم‌های پایه، ساخته شده است. ۵ مدل المان محدود دیگر نیز جهت بررسی رفتار انواع مختلف بام در ساختمان‌ها شبیه‌سازی گردید و جهت بررسی رفتار انواع پوسته خارجی ساختمان‌ها ۵ مدل المان محدود دیگر ایجاد گردید. ۲ مدل المان محدود دیگر جهت بررسی رفتار کنج ساختمان‌ها و ۲ مدل هم جهت بررسی میزان سازگاری شاخص نسبت سطح به ارتفاع ساختمان مدل سازی گردید. سناریوی انفجار با Incident Wave (Air Blast, TNT) در Abaqus تعریف شد؛ پارامترها برای تمامی نمونه‌ها یکسان نگه‌داشته شد تا مقایسه مستقیم امکان‌پذیر باشد.

ویژگی‌های مکانیکی مصالح

مصالح به‌کاررفته در تمام نمونه‌های اجزای محدود توسعه‌یافته در این پایان‌نامه، همگن و ایزوتروپیک فرض شده‌اند. در تمامی نمونه‌ها، مصالح به‌عنوان بتن معرفی شده‌اند. برای مدل‌سازی بتن از مدل Plasticity-Damaged استفاده شده است. این مدل یک مدل ترکیبی است که توانایی در نظر گرفتن ترک‌های همزمان ناشی از فشار و کشش در بتن را دارد (Dassault Systèmes, Simulia Corp., 2009).

جدول ۲. ویژگی‌های مصالح به‌کاررفته در مدل‌های اجزای

محدود

مشخصه	مقدار	واحد
چگالی	2400	kg/m ³
مدول یانگ	2.35×10 ¹⁰	Pa (معادل ۲۳.۵ GPa)
ضریب پواسون	0.3	-
تنش فشاری مجاز	2.5×10 ⁷	Pa (معادل ۲۵ MPa)
تنش کششی مجاز	3.0×10 ⁶	Pa (معادل ۳ MPa)

مراحل مدل‌سازی انفجار در نمونه‌ها

برای مدل‌سازی شرایط انفجار در نمونه‌های اجزای محدود، در بخش Interaction نرم‌افزار از Incident wave استفاده شد. ویژگی‌های این امواج به صورت انفجار هوایی (Air Blast) تعریف شدند (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2009). مواد منفجره به صورت TNT فرض گردیدند. همانگونه که در جدول زیر مشاهده می‌شود در مدل‌های مختلف، وزن مواد منفجره استفاده شده متفاوت است. برای مدل‌سازی شرایط انفجار در نمونه‌های اجزای محدود، در بخش Interaction نرم‌افزار از Incident wave استفاده شد. ویژگی‌های این امواج به صورت انفجار هوایی (Air Blast) تعریف شدند (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2009). مواد منفجره به صورت TNT فرض گردیدند. همانگونه که در جدول زیر مشاهده می‌شود در مدل‌های مختلف، وزن مواد منفجره استفاده شده متفاوت است.

جدول ۳. مشخصات انفجار شبیه‌سازی شده در مدل‌های

المان محدود

فاصله تا مرکز انفجار (m)	وزن مواد منفجره (kg)	عنوان مدل
۱۰	۱۴۰۰	انواع فرم پایه
۱۰	۱۴۰۰	انواع بام
۱۰	۱۰۰	انواع پوسته خارجی ساختمان
۵	۱۰۰	مفصل بندی کنج
۱۰	۷۰۰	نسبت سطح به ارتفاع

مش‌بندی نمونه‌ها

یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی اجزای محدود، تعیین شبکه‌بندی مدل است. در این مدل‌سازی، از مش‌های نرم‌افزار به صورت چهاروجهی با Seed Part ویژه برای هر بخش از دیوار برشی

استفاده شد. نوع مش نیز از نوع Free Tet با المان‌های استاندارد و تحلیل تنش سه‌بعدی و ترتیب هندسی خطی در نظر گرفته شد. بدیهی است که تعیین مقدار عددی مناسب بر اساس تحلیل همگرایی برای هر نمونه انجام شده است.

گردآوری داده‌ها

در نخستین گام، مدیران ارشد با تجربه در حوزه مدیریت بحران و گروهی از متخصصان مهندسی عمران و معماری در یک نشست مشترک برای تصمیم‌گیری در این زمینه شرکت کردند. پس از یک کار مقدماتی، تیم تصمیم‌گیری ۱۱ معیار مهم برای فرم معماری در برابر انفجار تعیین نمود.

۳- نتایج و بحث

بخش نتایج و بحث به‌عنوان یکی از مهم‌ترین قسمت‌های پژوهش، به تبیین و تحلیل یافته‌های حاصل از مراحل مختلف تحقیق اختصاص دارد. در این پژوهش، ابتدا داده‌های گردآوری‌شده از طریق پرسشنامه‌های خبرگان و تحلیل آن‌ها با استفاده از روش سلسله‌مراتبی (AHP) مورد بررسی قرار گرفته و شاخص‌های مؤثر بر انتخاب فرم‌های معماری مقاوم در برابر انفجار رتبه‌بندی شده‌اند. از آنجا که رفتار واقعی ساختمان‌ها در شرایط انفجار بسیار پیچیده بوده و تنها اتکا به قضاوت‌های کارشناسی نمی‌تواند تمامی ابعاد مسئله را آشکار سازد، مرحله دوم پژوهش به مدل‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار Abaqus اختصاص یافته است. در این بخش، نتایج شبیه‌سازی‌های عددی تحت بار انفجار TNT ارائه شده و رفتار فرم‌های مختلف معماری در شرایط واقعی‌تر ارزیابی می‌شود. مقایسه تطبیقی میان دیدگاه خبرگان و یافته‌های مدل‌سازی عددی، امکان شناسایی نقاط اشتراک و افتراق را فراهم آورده و تصویری جامع‌تر از میزان سازگاری فرم‌های معماری با اصول و اهداف پدافند غیرعامل ارائه می‌کند. بنابراین نتایج این بخش، علاوه بر پاسخ به پرسش‌های تحقیق، مبنایی کاربردی برای تدوین راهکارهای طراحی معماری مقاوم در برابر انفجار به شمار می‌رود.

۴-۱- مدل‌سازی المان محدود

جهت ارزیابی تاثیر هر یک از شاخص‌های ذکر شده در انتخاب فرم سازگار در برابر انفجار، در پرسشنامه یک ماتریس مقایسه زوجی در نظر گرفته شد که بعد از تجزیه و تحلیل نتایج پرسشنامه‌ها در نرم افزارهای آماری و مقایسات زوجی AHP، نتایج ذیل حاصل گردید:

نرم‌افزار Abaqus انجام شده است و سپس نتایج این دو روش ارائه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با تحلیل نتایج پرسشنامه‌ها، امتیاز هر یک از فرم‌های هندسی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج پرسشنامه مربوط به فرم‌های پایه

نیم‌کره	مخروط	هرم	استوانه	مکعب
8	7.81	6.18	5.7	2.67
بسیار سازگار	بسیار سازگار	سازگار	سازگار	ناسازگار

در شبیه‌سازی اجزای محدود، ابعاد نمونه‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که حجم تمامی فرم‌ها برابر باشد. برای ارزیابی نتایج مدل‌های اجزای محدود، نمودار واکنش نیرو نسبت به زمان ترسیم شده است.

• فرم مکعبی

بر اساس نتایج، نیروی ایجادشده در تکیه‌گاه فرم مکعبی برابر با ۵۲۳،۹۱۷ نیوتن بوده و در میان سایر فرم‌ها در رتبه چهارم قرار گرفته است. دلیل عملکرد بهتر این فرم نسبت به فرم استوانه‌ای می‌تواند کمتر بودن سطح تصویر عمودی فرم مکعبی نسبت به فرم استوانه‌ای باشد. از دیدگاه کارشناسان، پوسته محدب در رتبه پنجم قرار گرفته است. علت تفاوت بین نظر کارشناسان و نتایج تحلیل اجزای محدود این است که کارشناسان اثر آیرودینامیکی سطح استوانه را بیش از سطح تصویر آن در صفحه عمودی در نظر گرفته‌اند.

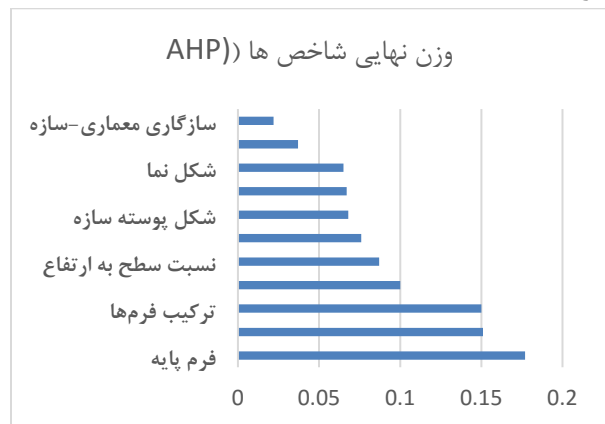
• فرم استوانه‌ای

نیروی ایجادشده در تکیه‌گاه فرم استوانه‌ای برابر با ۶۵۴،۷۹۳ نیوتن است و در مقایسه با سایر پوسته‌ها، از دیدگاه پدافند غیرعامل ناسازگارترین پوسته محسوب می‌شود. از دیدگاه کارشناسان، این فرم در رتبه چهارم قرار گرفته است. در این فرم، سطح تصویر آن بر روی صفحه عمودی برابر با ۲۵۳،۸ مترمربع است که بیشتر از سایر فرم‌های پایه بوده و می‌تواند دلیلی برای نیروی بالاتر آن باشد. با مقایسه تصویر تنش متقابل فرم مکعبی و فرم استوانه‌ای می‌توان نتیجه گرفت که سطح تحت تأثیر انفجار در فرم استوانه‌ای بیشتر از فرم مکعبی است.

جدول ۴: ماتریس مقایسه زوجی نهایی شاخص‌های محور فرم معماری سازگار با اصول و اهداف پدافند غیرعامل

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	Weight
X ₁	1	1	4.12	3.74	3.37	2.77	2.62	1.0	3.0	2.1	2.82	0.177
X ₂		1	4.12	3.74	3.37	2.77	2.62	1.0	3.0	2.1	2.82	0.177
X ₃			1	0.833	0.820	0.671	0.637	0.243	0.730	0.510	0.685	0.043
X ₄				1	0.909	0.820	0.699	0.267	0.800	0.562	0.758	0.047
X ₅					1	0.901	0.775	0.297	0.893	0.625	0.840	0.053
X ₆						1	0.943	0.361	1.08	0.758	1.01	0.064
X ₇							1	0.382	1.14	0.806	1.08	0.068
X ₈								1	1.43	1	1.34	0.150
X ₉									1	0.699	0.943	0.064
X ₁₀										1	1.34	0.091
X ₁₁											1	0.068

همانگونه که در جدول ۴ قابل مشاهده است نوع فرم پایه و ترکیب فرم بیشترین تاثیر را در انتخاب فرم سازگار با پدافند غیرعامل دارد و پس از آنها شکل سطح پوسته خارجی با میزان تاثیرگذاری ۱۵ درصد در رتبه بعدی قرار دارد. این سه شاخص در مجموعه ۵۰/۴ درصد از تاثیرگذاری بر فرم معماری سازگار با دفاع غیرعامل را دارند.



شکل ۱. اهمیت نسبی شاخص‌ها در سازگاری فرم معماری در برابر انفجار (AHP)

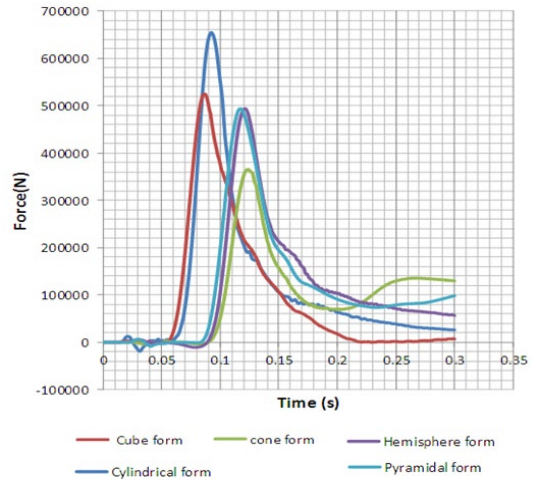
۱-۴-۱- فرم پایه

فرم‌های پایه پرکاربرد در معماری شامل فرم‌های هندسی مکعبی، استوانه‌ای، هرم، مخروط و کره می‌شوند. با تحلیل نتایج پرسشنامه‌ها میزان نمره برای هر یک از فرم‌های هندسی در شکل زیر آورده شده است.

همان‌طور که اشاره شد، به‌منظور ارزیابی و امتیازدهی به این فرم‌ها، علاوه بر دریافت نظرات کارشناسان، شبیه‌سازی انفجار نیز در

۲-۱-۴- ترکیب فرم‌های ساختمان

سازماندهی فضایی نوع و روش چیدمان یا کناره هم قرارگیری احجام، فضاهاى مختلف و... می‌باشد و یکی از مراحل بسیار مهم در فرایند طراحی فضای معماری و شهرسازی می‌باشد. در طراحی معماری جهت انتظام بخشی به فضاهاى مختلف عمدتاً از یکی از انواع سازماندهی فضا بهره‌گیری می‌شود. انتخاب نوع سازماندهی فضا نقش بسیار مهمی در کاهش آسیب پذیری و افزایش ایمنی ساختمان‌ها دارد. از این شناخت سازماندهی‌ها و مزایا و معایب هر یک در برابر انفجار موضوعی بسیار با اهمیت می‌باشد. سازماندهی‌های متداول در طراحی حجمی ساختمان‌های منفرد و بلوکی عبارتند از: فرم‌های خطی، شعاعی، مرکزی، مرکزگرا با حیاط مرکزی، خطی U شکل.

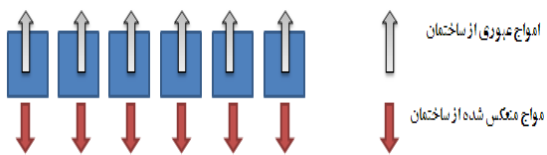


شکل ۱. تصویر تنش متقابل در فرم‌های پایه

• سازماندهی خطی

به الگویی گفته می‌شود شامل هسته در داخل یا خارج و سایر بخش‌ها به صورت بازوهای دور شونده از مرکز و هسته. در این حالت طول و عرض ساختمان دارای اندازه‌های نامساوی می‌باشند و فاصله بخش‌ها تا هسته متفاوت است.

در سازماندهی خطی در صورت بروز انفجار، قسمتی از امواج ناشی از آن بعد از برخورد با ساختمان از طریق بازوها عبور نموده و قسمت دیگری از امواج منعکس می‌گردند. در هر دو حالت با توجه به ترکیب فرم خطی امواج دوباره بازگشتی به ساختمان نداشته اما در سازماندهی‌های دیگر امکان بازگشت امواج وجود دارد.

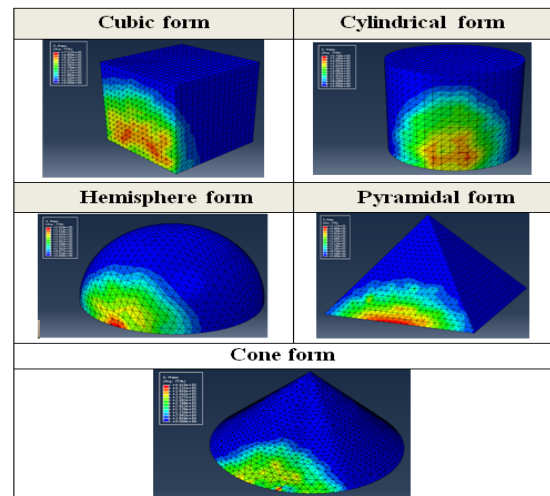


شکل ۳. تصویری از نحوه عبور و انعکاس امواج انفجار در سازماندهی خطی

• سازماندهی شعاعی

به الگویی گفته می‌شود که مانند الگوی خطی دارای بازوهای دورشونده از مرکز می‌باشد ولی این حالت برخلاف الگوی خطی دارای بیش از دو جهت است که می‌تواند از مرکز در جهت‌های مختلف گسترش یافته باشد. (فرزام شاد، ۱۳۸۸: ۱۲۳)

بازوها در سازماندهی شعاعی زوایه‌های کمتر از ۱۸۰ درجه را بوجود می‌آورند که در این حالت در صورت انفجار در اطراف



شکل ۲. تصویر تنش متقابل در انواع فرم‌ها

جدول ۶. نتایج مدل‌های اجزای محدود ایجادشده در

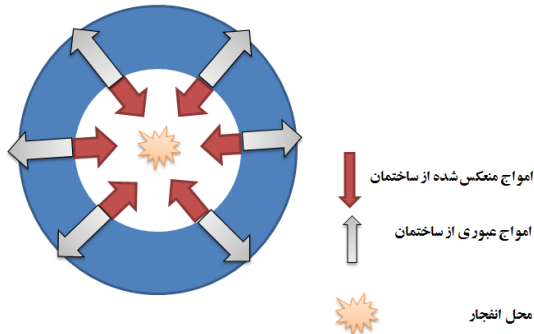
نرم‌افزار آباکوس

عنوان	بیشینه نیرو (N)	رتبه‌بندی اجزای محدود	رتبه‌بندی پرسشنامه	میزان سازگاری
فرم استوانه‌ای	654793	5	4	بسیار ناسازگار
فرم مکعبی	523917	4	5	ناسازگار
فرم مخروطی	365003	1	2	بسیار ناسازگار
فرم کروی	493302	2	1	سازگار
فرم هرمی	493728	3	3	سازگار

• سازماندهی فرم مرکز‌گرا با حیاط مرکزی

این الگوی کاملاً شبیه به الگوی مرکزی است با این تفاوت که در این الگو که بخش خالی و روباز (حیاط) در داخل مجموعه قرار گرفته و ساختمان به شکل‌های متفاوت در اطراف آن شکل گرفته است. (فرزام شاد، ۱۳۸۸: ۱۲۳)

فضای روباز داخل این الگو، امکان ایجاد حفاظت پیرامونی را از بین برده و با ایجاد یک فضای کاملاً محصور، فضای مستعدی را برای تشدید حداکثری اثر انفجار پدید می‌آورد (عراقی زاده، ۱۳۹۰: ۱۳۷).

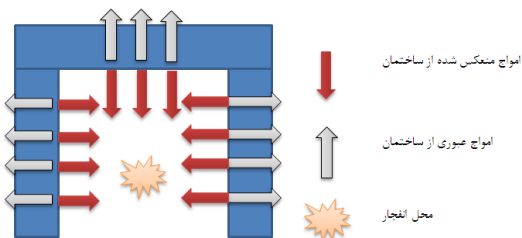


شکل ۶. تصویری از نحوه عبور و انعکاس امواج انفجار در سازماندهی حیاط مرکزی

• سازماندهی فرم خطی U شکل

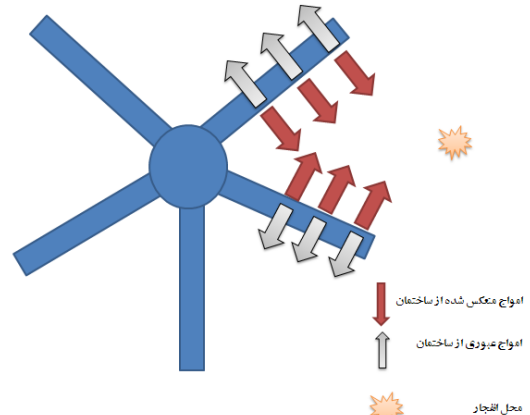
این الگوی کاملاً شبیه به الگوی خطی است با این تفاوت که در دوطرف آن خم خورده و به نوعی محصوریت ایجاد کرده است. (بیطرفان، ۲۰۱۲)

فضای بسته ایجاد شده، امکان ایجاد حفاظت پیرامونی را از بین برده و بدلیل آنکه محصوریت ایجاد گردیده امواج منعکس شده از ساختمان به ضلع روبرویی فضا مانند یک موج تشدید کننده عمل می‌کند.



شکل ۷. تصویری از نحوه عبور و انعکاس امواج انفجار در سازماندهی خطی U شکل

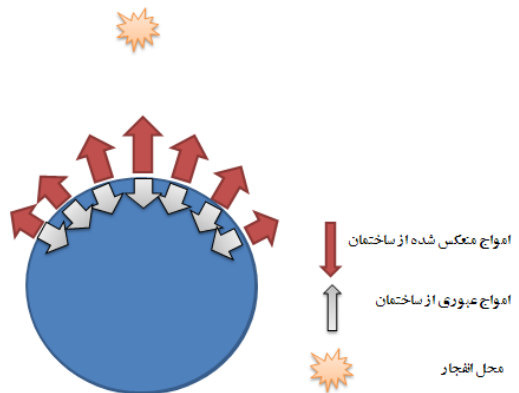
ساختمان امواج در این زوایا محبوس می‌گردد و ساختمان انرژی بیشتری را از انفجار جذب می‌نماید که در این صورت این ترکیب فرم رفتار مناسبی در برابر انفجار ندارد.



شکل ۴. تصویری از نحوه عبور و انعکاس امواج انفجار در سازماندهی شعاعی

• سازماندهی مرکز‌گرا

به الگویی گفته می‌شود که شامل هسته در داخل و تراکم سایر بخش‌ها به دور آن به گونه‌ای است که طول و عرض ساختمان تقریباً با هم برابر می‌باشد. این الگو متراکم‌ترین حالت را در بین سایر الگوها داراست (عراقی زاده، ۱۳۹۰: ۱۳۶). در این نوع از ترکیب فرم با توجه به زاویه امواج منعکس شده امکان بازگشت امواج به ساختمان وجود نداشته و در صورت نفوذ امواج به داخل ساختمان امکان رسیدن آنها به مرکز مشکل می‌باشد بنابراین قسمت مرکزی این نوع از سازماندهی برای استقرار عملکردهای حیاتی و حساس مناسب می‌باشد.

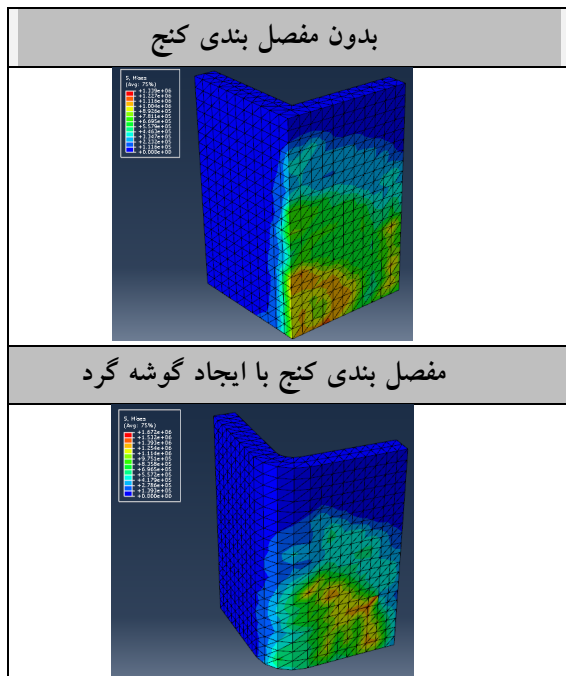


شکل ۵. تصویری از نحوه عبور و انعکاس امواج انفجار در سازماندهی مرکز‌گرا

کنج تیز به دلیل تمرکز تنش و این موضوع که تمامی مصالح در این حالت در یک فاصله ثابت و نزدیک به انفجار پخش شده است، نسبت به کنج تیز رفتار ناسازگار تری را دارد. نظر خبرگان و نتایج شبیه سازی المان محدود نیز این موضوع را تایید می نماید.

جدول ۹. نتایج مدل‌سازی المان محدود انواع نحوه‌ی مفصل

بندی کنج فرم‌ها



همانگونه که در جدول زیر مشاهده می شود نیرو بوجود آمده در حالت کنج تیز در حدود دو برابر حالت کنج گرد می باشد. بنابر این می توان به این نتیجه رسید که کنج تیز با اعداف پدافند غیرعامل خیلی ناسازگار بوده و کنج گرد خیلی سازگار می باشد.

جدول ۱۰: نتایج مدل های المان محدود ایجاد شده در

Abaqus

عنوان	نیرو حداکثر	رتبه بندی المان محدود	رتبه بندی پرسشنامه	میزان سازگاری
کنج تیز	۶۷۶۸۶,۹	۲	۲	خیلی ناسازگار
کنج گرد	۳۴۸۹۷,۳	۱	۱	خیلی سازگار

• سایر سازماندهی

با توجه به رفتار سایر سازماندهی‌ها (خوشه ای، شبکه ای و ...) در برابر انفجار و همچنین اهمیت مرکزیت وقوع انفجار در سایر سازماندهی‌ها نمی توان تحلیل ثابتی را ارائه نمود و با توجه به موارد مذکور رفتار ساختمان می تواند در یکی از سازماندهی‌های اشاره شده قرار گیرد.

جدول ۷. نتایج انواع ترکیب فرم‌های ساختمان

فرم خطی	فرم شعاعی	فرم مرکزگرا با محیط مرکزی	فرم مرکزگرا	فرم خطی L شکل
۵,۹۳	۴,۷۴	۳,۴	۷,۱۱	۲,۹۳
سازگار	نا سازگار	ناسازگار	خیلی سازگار	ناسازگار

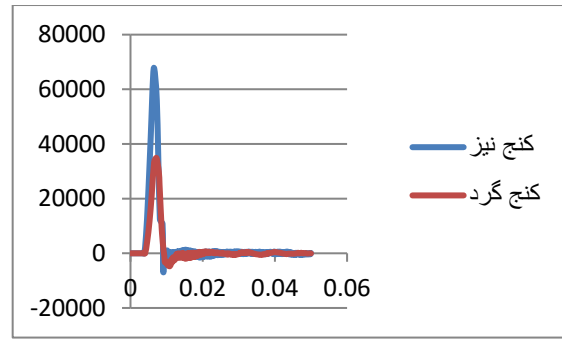
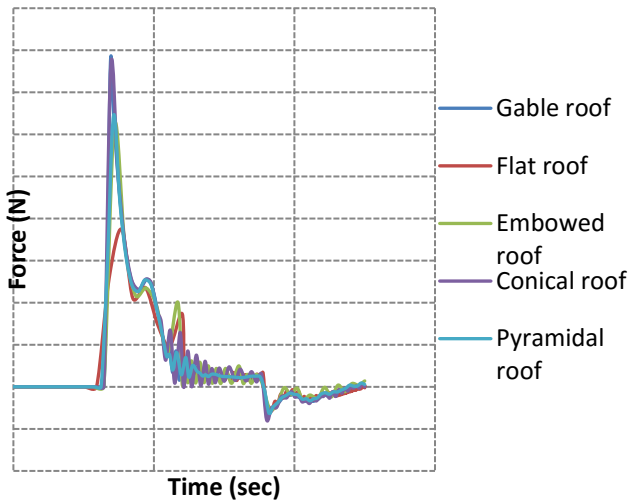
۳-۱-۴- نحوه ی مفصل بندی کنج فرم‌ها

در این خصوص دو نوع مفصل‌بندی مورد بررسی قرار گرفت که شامل:

۱. بدون مفصل بندی کنج (کنج تیز)
۲. ایجاد گوشه گرد

جدول ۸. نتایج انواع نحوه‌ی مفصل بندی کنج فرم‌ها

بدون مفصل بندی کنج
۲,۵۶
نا سازگار
مفصل بندی کنج با ایجاد گوشه گرد
۷,۸۱
سازگار



شکل ۸. نمودار نیرو - زمان هر یک از فرم های مدل سازی شده در نرم افزار Abaqus

۴-۱-۴ - نحوه ی مفصل بندی کنج فرم ها

با توجه به منابع مختلف معماری، متداولترین و پرکاربردترین اشکال به کار رفته در بام ساختمان ها شامل، بام مخروطی، بام مسطح، بام شیروانی، بام گنبدی، بام هرمی می باشد. با تحلیل نتایج پرسشنامه ها میزان امتیاز برای هر یک از فرم های هندسی در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۱۱. نتایج پرسشنامه مربوط به سقف های ساختمان

سقف تخت	سقف شیروانی	سقف مخروطی	سقف گنبدی	سقف هرمی
3.44	4.07	6.18	8.07	5.11
ناسازگار	ناسازگار	سازگار	بسیار سازگار	سازگار

در شبیه سازی المان محدود ابعاد نمونه ها به گونه ای انتخاب شده است که حجم همه فرم ها با هم برابر باشند. جهت بررسی نتایج مدل های المان محدود نمودار نیرو عکس العمل تکیه گاه به زمان رسم گردید (نمودار ۱).

جدول ۱۲. نتایج مدل های اجزای محدود

عنوان	رتبه بندی نتایج اجزای محدود	بیشینه نیرو (N)	سطح سازگاری
تخت	1	18728.1	بسیار سازگار
شیروانی	5	38666.6	بسیار ناسازگار
مخروطی	3	32232.1	ناسازگار
گنبدی	2	31068.1	ناسازگار
سقف هرمی	4	38128	بسیار ناسازگار

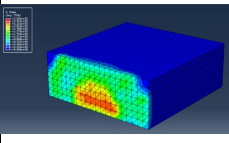
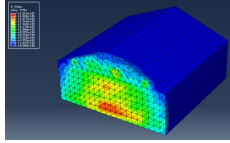
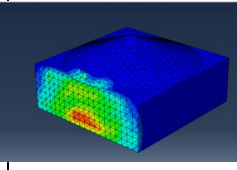
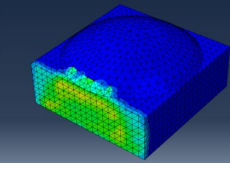
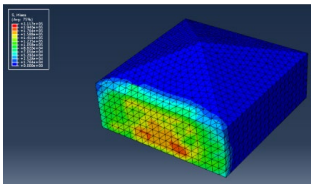
شکل ۹. رابطه نیرو-زمان برای هر فرم مدل شده در تحلیل اجزای محدود سقف تخت

بر اساس نتایج به دست آمده، نیروی ایجاد شده در پایه ساختمان با سقف تخت برابر با ۱۸۷۲۸٫۱ نیوتن بوده و در مقایسه با سایر انواع سقف ها در رتبه اول قرار گرفته است. دلیل عملکرد بهتر این نوع سقف نسبت به دیگر سقف ها می تواند به دلیل کمتر بودن سطح تصویر عمودی سقف تخت نسبت به سایر سقف ها باشد؛ در واقع سطح کمتری در معرض امواج انفجار قرار گرفته و در نتیجه نیروی کمتری به ساختمان وارد می شود.

از دیدگاه کارشناسان، سقف تخت در رتبه پنجم قرار گرفته است. علت این تفاوت زیاد میان نظر کارشناسان و نتایج تحلیل اجزای محدود، برداشت ذهنی نادرست آنان از نحوه عملکرد انفجار بوده است؛ کارشناسان اثر آیرودینامیکی سقف را در نظر گرفته و چون سقف تخت فاقد خاصیت آیرودینامیکی است، آن را بدترین حالت تصور کرده اند. در نتیجه با توجه به نتایج تحلیل اجزای محدود، این نوع سقف به عنوان سازگارترین نوع سقف مقاوم در برابر انفجار شناخته می شود.

سقف شیروانی

بر اساس نتایج به دست آمده، نیروی ایجاد شده در پایه ساختمان با سقف شیروانی ۱۸۷۲۸٫۱ نیوتن بوده و در میان سایر سقف ها در رتبه پنجم قرار گرفته است. دلیل عملکرد ضعیف تر این نوع سقف نسبت به سایر انواع، بزرگ تر بودن سطح تصویر عمودی آن است؛ در واقع سطح بیشتری در معرض امواج انفجار قرار گرفته و در

سقف تخت	سقف شیروانی
	
سقف مخروطی	سقف گنبدی
	
	
سقف هرمی	
	

شکل ۱۰. تصویری از تنش متقابل انواع بام‌های ساختمان‌ها

۵-۱-۴- تطبیق فرم معماری با فرم سازه‌ای

در این خصوص دو مدل مورد بررسی قرار گرفت که شامل فرم معماری کاملاً منطبق بر فرم سازه‌ای و عدم انطباق فرم معماری با فرم سازه‌ای می‌باشد.

جدول ۱۳. نتایج حاصل از پرسشنامه مرتبط با تطبیق فرم

معماری با فرم سازه‌ای

فرم معماری کاملاً منطبق بر فرم سازه‌ای	عدم انطباق فرم معماری با فرم سازه‌ای
	
۷,۵۱	۲,۸۸
خیلی سازگار	خیلی ناسازگار

نتیجه نیروی بیشتری به ساختمان وارد می‌شود.

از دیدگاه کارشناسان، سقف شیروانی در رتبه سوم قرار گرفته و آنان نیز معتقدند این نوع سقف در برابر انفجار عملکرد مناسبی نخواهد داشت. در نتیجه با توجه به نتایج تحلیل اجزای محدود، این سقف به‌عنوان غیرسازگارترین نوع سقف مقاوم در برابر انفجار شناخته می‌شود.

• سقف مخروطی

در مدل‌سازی انفجار برای سقف مخروطی، نیروی بیشینه وارد بر پایه برابر با ۳۲۲۳۲,۱ نیوتن به‌دست آمده است. این سقف در میان سقف‌های ناسازگار قرار دارد. بر اساس نظرات کارشناسان، سقف مخروطی در رتبه دوم قرار گرفته و بر اساس نتایج تحلیل اجزای محدود در رتبه سوم جای دارد؛ بنابراین هر دو نتیجه این سقف را در دسته سقف‌های ناسازگار در برابر انفجار قرار می‌دهد. دلیل این امر، کمتر بودن سطح تصویر عمودی سقف مخروطی نسبت به سقف شیروانی و سقف گنبدی است که سبب جذب انرژی کمتر در این نوع سقف می‌شود.

• سقف گنبدی

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بیشینه نیروی ایجادشده در سقف گنبدی ۳۱۰۶۸,۱ نیوتن بوده و در میان سایر سقف‌ها در رتبه دوم قرار گرفته است. از دیدگاه کارشناسان، سقف گنبدی در رتبه اول جای دارد و آنان بر این باورند که این نوع سقف به دلیل خاصیت آیرودینامیکی در برابر انفجار عملکرد خوبی خواهد داشت. در حالی که با توجه به بزرگ‌تر بودن سطح تصویر عمودی آن، نیروی قابل توجهی دریافت کرده و برخلاف نظر کارشناسان، سقف گنبدی در دسته سقف‌های ناسازگار در برابر انفجار طبقه‌بندی می‌شود.

• سقف هرمی

بیشینه نیروی ایجادشده در پایه سقف هرمی برابر با ۳۸۱۲۸ نیوتن بوده و در مقایسه با سایر سقف‌ها در رتبه چهارم قرار گرفته است. از دیدگاه کارشناسان، این سقف در رتبه سوم جای دارد. در این نوع سقف، سطح تصویر آن روی صفحه عمودی کمتر از سقف شیروانی ولی بیشتر از سایر سقف‌ها است و بنابراین انرژی زیادی دریافت می‌کند. در نتیجه این نوع سقف به‌عنوان ناسازگارترین نوع سقف در برابر انفجار شناخته می‌شود.

جدول ۱۵. نتایج حاصل از پرسشنامه مرتبط با میزان
تطبيق فرم معماری با محیط

میزان تطبيق فرم معماری با محیط اطراف			اهداف پدافند غیرعامل در بخش ساختمان
کاملاً منطبق با محیط	نسبتاً منطبق با محیط	عدم انطباق با محیط	
			
۳	۵,۱۵	۷	قابلیت کاهش اثر انفجار
۱,۹۶	۶,۶	۸,۷	افزایش قابلیت استتار
۲,۳۹	۵,۹۹	۷,۹۹	امتیاز نهایی
خیلی نا سازگار	سازگار	خیلی سازگار	مزیت سازگاری

با توجه به این موضوع که وظیفه اصلی سازه ساختمان ها میرا نمودن امواج انفجار است، در حالتی که فرم معماری با فرم سازه ای انطباق کامل دارد انرژی و نیروی حاصل از انفجار به راحتی توسط سازه جذب شده و به فونداسیون منتقل می شود اما در حالت عدم انطباق ممکن است بارهایی ناشی از انفجار به درستی به سازه منتقل نگردد و قسمتی از فرم معماری (عناصر غیرسازه ای) ساختمان مورد آسیب قرار گیرد. در نتیجه فرم معماری کاملاً منطبق بر فرم سازه ای، کاملاً سازگار و عدم انطباق فرم معماری با فرم سازه ای بسیار ناسازگار تعیین گردید.

بر اساس نظرسنجی به عمل آمده فرم معماری کاملاً منطبق بر فرم سازه ای، کاملاً سازگار و عدم انطباق فرم معماری با فرم سازه ای بسیار ناسازگار تعیین گردید.

۴-۱-۶- میزان تطبيق فرم معماری با محیط

این مورد از دو زاویه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. یکی از زاویه قابلیت کاهش اثر انفجار و دیگری افزایش قابلیت استتار و بر این اساس میزان تطبيق فرم معماری با محیط اطراف در سه گروه دسته بندی گردید که عبارتند از:

۱. کاملاً منطبق با محیط
۲. نسبتاً منطبق با محیط
۳. عدم انطباق با محیط

۷-۱-۴- پیوند یا پیوستگی عناصر معماری با یکدیگر

در این مورد دو مدل مورد بررسی قرار گرفت که شامل فرم معماری یکپارچه و فرم معماری با عناصر منفصل می باشد.

• فرم معماری یکپارچه

یکپارچگی بین عناصر معماری استقلال اجزا را کاهش داده و کل فرم ساختمان به صورت یک عنصر واحد مطرح می گردد. در این صورت اثرات امواج ناشی از انفجار به صورت یکنواخت بر کل فرم تاثیر گذار می باشد.

• فرم معماری با عناصر منفصل

فرم معماری با عناصر منفصل بر استقلال اجزا تاکید می ورزد و نقش خاص عناصر مختلف تشکیل دهنده بنا در برابر اثرات ناشی از انفجار را تقویت می کند.

جدول ۱۴. جدول میزان اهمیت هر یک از اهداف پدافند
غیرعامل در مورد شاخص میزان تطبيق فرم معماری با
محیط

قابلیت کاهش اثر انفجار	افزایش قابلیت استتار
۵,۵۵	۷,۷۴

• کاهش اثر انفجار

عدم انطباق فرم معماری با محیط پیرامونی باعث تشدید و اعتشاش در اثرات امواج ناشی از انفجار می گردد.

• افزایش قابلیت استتاری

در حالت فرم کاملاً منطبق بر محیط طبیعی پیرامونی، بدیهی است که امکان استتار، اختفا و فریب وجود دارد، بنابراین در این شاخص، گزینه اول کاملاً سازگار، گزینه دوم، سازگار و گزینه سوم بسیار ناسازگار تشخیص داده شد.

جدول ۱۶. نتایج حاصل از پرسشنامه مرتبط با پیوند یا

پیوستگی عناصر معماری با یکدیگر

فرم معماری یکپارچه	فرم معماری با عناصر منفصل
	
۶,۵۹	۳,۸

جدول ۱۹. نتایج مدل‌های المان محدود

رتبه بندی مدل‌ها	نیرو حداکثر	عنوان مدل المان محدود
۳	۱۵۲۸۸.۱	پوسته مسطح
۱	۱۱۹۶۳.۲	پوسته محدب
۵	۲۲۶۶۴	پوسته مقعر
۴	۱۶۹۲۷.۷	پوسته شکسته فرو رفته
۲	۱۲۳۱۸.۴	پوسته شکسته بیرون رفته

• پوسته مسطح

بر اساس نتایج بدست آمده نیرو به وجود آمده در پوسته مسطح برابر ۱۵۲۸۸,۱ می‌باشد و در بین پوسته‌های دیگر در رتبه سوم قرار گرفته است. علت آنکه این پوسته از پوسته‌های مقعر و پوسته شکسته فرو رفته رفتار بهتری داشته است، زاویه انعکاس امواج انفجار از سطح این پوسته باشد که امکان تشدید امواج در این حالت وجود ندارد. از نظر خبرگان پوسته محدب در رتبه دوم قرار گرفته است.



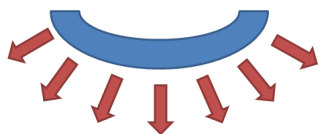
شکل ۱۱. تصویری از زاویه انعکاس موج انفجار در

پوسته مسطح

در تصویر زیر کانتور تنش در پوسته مسطح در زمان ۰,۰۱۲۶ ثانیه نشان داده شده است، همانگونه که مشاهده می‌شود، بیش از ۵۰ درصد دیوار تحت تاثیر انفجار قرار گرفته است.

• پوسته محدب

نیرو بوجود آمده در تکیه گاه پوسته محدب برابر ۱۱۹۶۳,۲ می‌باشد که نسبت به سایر پوسته به عنوان سازگار ترین پوسته از منظر پدافند غیرعامل است. از نظر خبرگان نیز پوسته محدب نیز در رتبه یک قرار دارد. یکی از دلایل آنکه این نوع پوسته رفتار بهتری نسبت به پوسته‌های دیگر دارد، می‌تواند آیرودینامیک بودن این دیوار و زاویه انعکاس موج انفجار باشد.



شکل ۱۲. تصویری از زاویه انعکاس موج انفجار در پوسته

محدب

۸-۱-۴ - پوسته خارجی ساختمان‌ها

در انفجارهای بیرون از ساختمان، پوسته خارجی ساختمان‌ها جهت کاهش آسیب پذیری ساختمان و کاهش تلفات انسانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پوسته خارجی ساختمان سد اول دفاعی در برابر امواج و ترکش‌های ناشی از انفجار است و در صورت برخورداری از مقاومت کافی امواج انفجار داخل ساختمان می‌شود و به افراد و تاسیسات داخل آن صدمه‌های جبران ناپذیری می‌زند. برای بررسی شکل‌های مختلف پوسته خارجی ساختمان علاوه بر نظر سنجی از خبرگان، پنج مدل المان محدود ایجاد گردید که مشخصات هر یک از نمونه‌ها در تصاویر زیر آورده شده است.

جهت بررسی نتایج مدل‌های المان محدود نمودار نیرو عکس‌العمل تکیه‌گاه به زمان رسم گردید. همانگونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، پوسته محدب انرژی کمتری از انفجار جذب نموده و در نتیجه مجموع نیرو بوجود آمده در تکیه‌گاه برابر ۱۱۹۶۳ نیوتن می‌باشد و در نظر خواهی از خبرگان نیز پوسته محدب بیشترین امتیاز را کسب نموده است و میزان سازگاری آن خیلی زیاد است. پوسته شکسته بیرون آمده پس از پوسته محدب کم‌ترین نیرو را متحمل می‌شود و به ترتیب پوسته مسطح، پوسته شکسته فرو رفته و پوسته مقعر در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

جدول ۱۸. نتایج نظر سنجی از خبرگان در مورد شکل سطح

پوسته‌های خارجی ساختمان

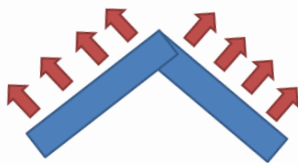
پوسته محدب	پوسته مقعر	پوسته مسطح	پوسته شکسته
۷,۹	۳,۶	۴	۱,۸
خیلی سازگار	نا سازگار	ناسازگار	خیلی ناسازگار

• **پوسته بیرون آمده**

نیرو بوجود آمده در تکیه گاه پوسته محدب برابر ۱۲۳۱۸،۴ می باشد که نسبت به سایر پوسته به عنوان پوسته سازگار از منظر پدافند غیرعامل می باشد و تنها ۳ در صد نیرو تکیه گاهی آن بیشتر از پوسته محدب می باشد. یکی از دلایل آنکه این نوع پوسته رفتار بهتری نسبت به پوسته های مسطح، شکسته فرورفته و مقعر دارد، می تواند آیرودینامیک بودن این نوع دیوار و زاویه انعکاس موج انفجار باشد.

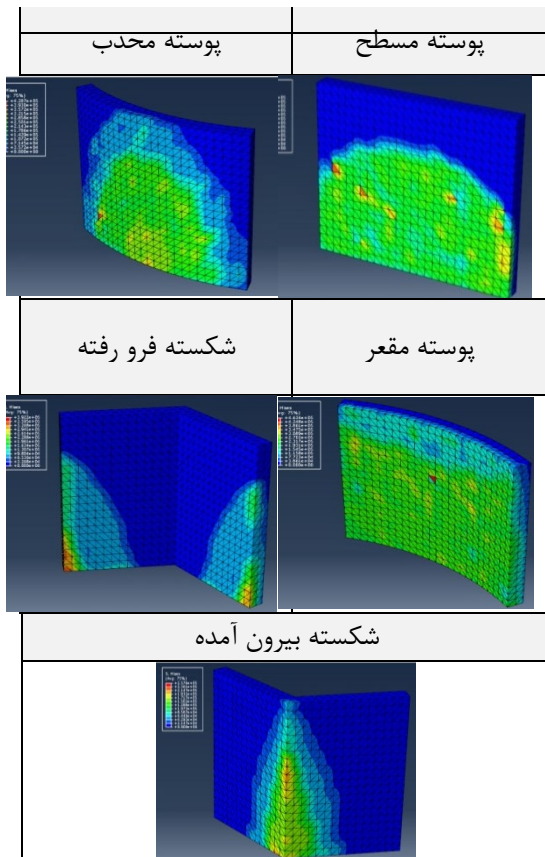
شکل ۱۵. تصویری از زاویه انکسار موج انفجار در پوسته

شکسته بیرون آمده



در تصویر شماره ۲ کانتور تنش این نوع پوسته آورده شده است. با توجه به شکل پوسته موج انفجار ابتدا به میانه دیوار می رسد.

شکل ۱۶. تصویری از تنش متقابل انواع پوسته خارجی



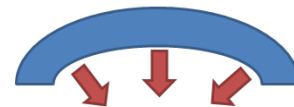
همانگونه که در شکل زیر مشاهده می شود در این حالت قسمت کمتری از سطح دیوار تحت تاثیر انفجار در ثانیه ۰،۰۱۳ کمتر از حالت پوسته مسطح می باشد.

• **پوسته مقعر**

در نمونه شبیه سازی شده پوسته مقعر در نرم افزار المان محدود، نیرو بوجود آمده در تکیه گاه برابر ۲۲۶۶۴ می باشد که در میان دیگر پوسته ها، به عنوان ناسازگار ترین پوسته می باشد. در نظر سنجی از خبرگان نیز پوسته مقعر در رتبه سوم و جزء پوسته های ناسازگار با پدافند غیرعامل می باشد. علت ناسازگاری این نوع از پوسته خارجی ساختمان، جذب انرژی ناشی از انفجار و همچنین بازگشت دوباره امواج بعد از انعکاس آنها از دیوار می باشد. علت بازگشت امواج انفجار به دلیل زاویه انعکاس امواج می باشد.

شکل ۱۳. تصویری از زاویه انعکاس موج انفجار در پوسته

مقعر



در شکل شماره ۲ تصویر کانتور تنش در پوسته مقعر نشان داده شده است. در این حالت تمام سطح دیوار تحت تاثیر بار انفجار در زمان ۰،۰۱۳ ثانیه قرار گرفته است.

• **پوسته شکسته فرو رفته**

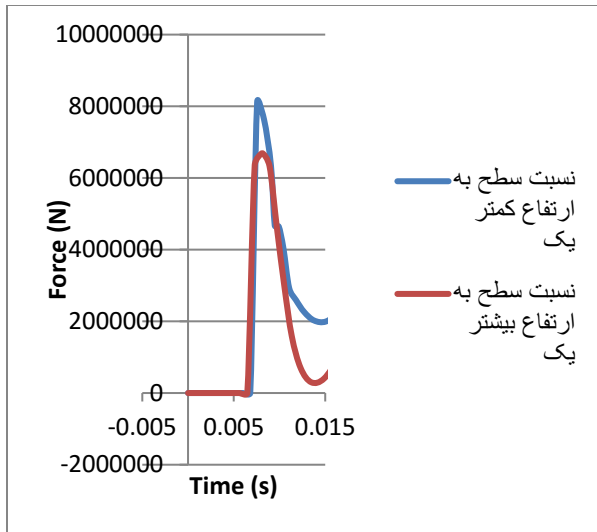
با توجه به نیرو بوجود آمده در مدل سازی انفجاری دیوار خارجی با سطحی فرو رفته، این دیوار در زمره دیوار های ناسازگار قرار گرفته است. و براساس نظر سنجی دیوار های شکسته در زمره پوسته های خیلی ناسازگار با دفاع غیرعامل قرار گرفته است. دلیل این موضوع می تواند جذب انرژی انفجار به علت عدم آیرودینامیکی این نوع پوسته است.

شکل ۱۴. تصویری از زاویه انعکاس موج انفجار در پوسته

شکسته فرو رفته



همانگونه که در تصویر کانتور تنش این نوع از پوسته قابل ملاحظه است، با توجه به شکل پوسته موج انفجار ابتدا به سمت راست و چپ دیوار رسیده و سپس به میانه دیوار می رسد.



شکل ۱۸. تصویری از تنش متقابل انواع بام‌های ساختمان

۴-۱-۱۰- نامنظمی در پلان ساختمان

فرم پلان در سه مدل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت که عبارتند از:

۱. پلان نامتقارن با فرورفتگی و پیش آمدگی
 ۲. پلان متقارن با فرورفتگی و پیش آمدگی
 ۳. پلان متقارن بدون فرورفتگی و پیش آمدگی
- بر اساس نظرسنجی به عمل آمده و همچنین مدل‌سازی انفجاری، گزینه اول و دوم، ناسازگار و گزینه پلان متقارن بدون فرورفتگی و پیش آمدگی بسیار سازگار تعیین گردید.

جدول ۲۱. نتایج نظر سنجی از خبرگان در مورد نامنظمی در

پلان ساختمان

پلان نامتقارن با فرورفتگی و پیش آمدگی در پلان ساختمان	پلان متقارن با فرورفتگی و پیش آمدگی در پلان ساختمان	پلان متقارن بدون فرورفتگی و پیش آمدگی در پلان ساختمان
۳,۱۱	۴,۸۸	۷,۱۸
ناسازگار	ناسازگار	خیلی سازگار

۴-۱-۱۱- نامنظمی در نمای ساختمان

فرم نمای در چهار مدل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت که شامل:

- نما با فرورفتگی در ارتفاع ساختمان
نما با پیش آمدگی بیش از ۲۵٪ طول ساختمان

۴-۱-۹- نسبت سطح به ارتفاع ساختمان (ضریب لاغری)

نسبت عرض به ارتفاع ساختمان در دو گزینه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت که عبارتند از:

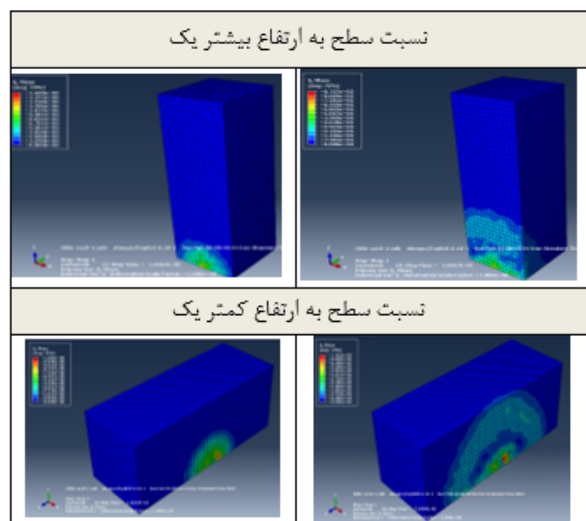
۱. نسبت عرض به ارتفاع کمتر یک
۲. نسبت عرض به ارتفاع بیشتر یک

نسبت سطح به ارتفاع بیشتر یک	نسبت سطح به ارتفاع کمتر یک
۷,۱۸	۳,۳۷
خیلی سازگار	ناسازگار

جدول ۲۰. نتایج نظر سنجی از خبرگان در مورد نسبت

سطح به ارتفاع ساختمان (ضریب لاغری)

بر اساس نظرسنجی به عمل آمده و همچنین مدل‌سازی انفجاری، گزینه اول، ناسازگار و گزینه دوم بسیار سازگار تعیین گردید.



شکل ۱۷. تصویری از تنش متقابل انواع بام‌های ساختمان

منظر مقاومت در برابر انفجار نشان داد، در حالی که فرم استوانه‌ای به دلیل داشتن بیشترین سطح تصویر عمودی، آسیب‌پذیرترین فرم شناخته شد. در حوزه ترکیب فرم‌ها نیز، سازماندهی مرکزگرا بهترین عملکرد را داشت، زیرا از بازگشت امواج انفجار به ساختمان جلوگیری کرده و بخش مرکزی بنا را برای استقرار کاربری‌های حساس ایمن‌تر می‌سازد.

بررسی بام‌ها نشان داد که بام تخت علی‌رغم تصور کارشناسان که آن را ضعیف‌ترین نوع سقف می‌دانستند، بیشترین سازگاری را در برابر انفجار دارد. دلیل این موضوع کاهش سطح در معرض موج انفجار و در نتیجه کاهش نیروی وارده است. در مقابل، بام‌های شیروانی و هرمی به علت داشتن سطح عمودی بیشتر، ناسازگارترین نتایج را ثبت کردند. همچنین، بام‌های مخروطی و گنبدی عملکرد متوسط داشتند، اگرچه از دید کارشناسان به دلیل آیرودینامیکی بودن، بام گنبدی بسیار مناسب تلقی می‌شد.

در حوزه جزئیات معماری، گرد کردن گوشه‌های کنج ساختمان به‌طور چشمگیری موجب کاهش تمرکز تنش و افزایش سازگاری ساختمان در برابر انفجار شد. همچنین، افزایش نسبت سطح به ارتفاع بیش از یک، موجب پایداری بیشتر و کاهش نیروی وارده گردید. تطابق کامل فرم معماری با فرم سازه‌ای نیز نقشی کلیدی در انتقال صحیح نیروها به فونداسیون و کاهش آسیب به اجزای غیرسازه‌ای ایفا می‌کند. به علاوه، نتایج نشان داد که فرم‌های یکپارچه معماری نسبت به فرم‌های منفصل مقاومت بیشتری دارند، زیرا اثرات ناشی از موج انفجار به‌صورت یکنواخت توزیع می‌شود. تحلیل پوسته‌های خارجی ساختمان نیز اهمیت بالایی هندسه در کاهش آسیب‌پذیری را نشان داد. پوسته محدب و پوسته شکسته بیرون‌آمده بهترین عملکرد را در دفع امواج انفجار داشته‌اند، در حالی که پوسته مقعر و پوسته شکسته فرورفته به علت تمرکز و بازگشت امواج، بیشترین آسیب‌پذیری را داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سطوح آیرودینامیکی و شکست‌های مناسب در طراحی نما و پوسته خارجی، می‌تواند اثرات انفجار را تا حد زیادی کاهش دهد.

به طور کلی، یافته‌های این پژوهش بیانگر آن است که طراحی فرم معماری ساختمان می‌تواند نقشی به‌مراتب مهم‌تر از تصور رایج در کاهش اثرات انفجار ایفا کند و تنها توجه به جنبه‌های سازه‌ای کافی نیست. مقایسه نظرات کارشناسان و نتایج اجزای محدود نیز نشان داد که برداشت ذهنی معماران و مهندسان گاهی با نتایج واقعی شبیه‌سازی متفاوت است، بنابراین استفاده هم‌زمان از قضاوت خبرگان و ابزارهای عددی برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر ضروری

نما با پیش آمدگی کمتر از ۲۵٪ طول ساختمان
نما بدون فرورفتگی و پیش آمدگی
بر اساس نظرسنجی به عمل آمده و همچنین مدل‌سازی انفجاری،
گزینه اول و دوم، بسیار ناسازگار و گزینه سوم ناسازگار و گزینه نما
بدون فرورفتگی و پیش آمدگی سازگار تعیین گردید.

جدول ۲۲. نتایج نظر سنجی از خبرگان در مورد نامنظمی در

نمای ساختمان

نمای ساختمان	نما با پیش آمدگی کمتر از ۲۵٪ طول ساختمان	نما با پیش آمدگی بیش از ۲۵٪ طول ساختمان	نما با فرورفتگی در ارتفاع ساختمان
نما بدون فرورفتگی و پیش آمدگی	۳،۷۷	۱،۹۶	۷،۳۷
سازگار	ناسازگار	خیلی ناسازگار	خیلی سازگار

۵- نتیجه گیری

هدف این پژوهش، شناسایی و ارزیابی فرم‌های معماری مقاوم در برابر انفجار و ارائه شاخص‌هایی برای طراحی سازگار با اصول پدافند غیرعامل بود. در این راستا، ابتدا بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای، یازده شاخص اصلی شامل نوع فرم پایه، ترکیب فرم‌های ساختمان، نحوه مفصل‌بندی کنج‌ها، نوع بام، میزان انطباق فرم با سازه، میزان انطباق فرم با محیط، پیوستگی عناصر معماری، شکل پوسته خارجی، نسبت سطح به ارتفاع، نامنظمی در پلان و نامنظمی در نما استخراج گردید. سپس این شاخص‌ها به کمک پرسشنامه و نظرخواهی از خبرگان وزن‌دهی شدند و نتایج با روش AHP تحلیل شد. در گام بعدی، به‌منظور افزایش دقت و سنجش واقعی‌تر عملکرد فرم‌ها، شبیه‌سازی انفجار در نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus صورت گرفت و در نهایت نتایج دو روش با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که شاخص‌های «نوع فرم پایه» و «ترکیب فرم‌های ساختمان» بیشترین سهم را در انتخاب فرم سازگار در برابر انفجار دارند. در میان فرم‌های پایه، فرم مخروطی بیشترین سازگاری را از

است.

با وجود این دستاوردها، پژوهش حاضر محدودیت‌هایی نیز دارد. فرض ایزوتروپیک بودن مصالح، استفاده صرف از بتن به‌عنوان ماده سازه‌ای، و مدل‌سازی شرایط انفجار در مقیاس محدود از جمله این موارد هستند. علاوه بر این، یکی از متغیرهای وابسته یعنی قابلیت استتار، امکان شبیه‌سازی در Abaqus نداشت و تنها از طریق پرسشنامه بررسی شد.

پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده:

- از مصالح نوین مقاوم در برابر انفجار مانند کامپوزیت‌ها و بتن‌های پربازده استفاده شود.
- اثرات انفجار در فواصل و مقیاس‌های متفاوت و با ترکیب شرایط محیطی واقعی‌تر مدل‌سازی گردد.
- روش‌های عددی با آزمایش‌های میدانی یا آزمایشگاهی ترکیب شوند تا نتایج اعتبار بیشتری پیدا کنند.
- شاخص‌های جدیدی مانند هزینه ساخت، سهولت اجرا و ملاحظات زیست‌محیطی نیز در مدل تصمیم‌گیری وارد شوند. در نهایت، نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک راهنمای عملی برای معماران و طراحان مورد استفاده قرار گیرد تا با انتخاب فرم‌های معماری مناسب، ایمنی و پایداری ساختمان‌ها در برابر انفجار افزایش یافته و جان ساکنان تا حد زیادی محافظت گردد.

- [1] Badri, M. A. (2001). A combined AHP–GP model for quality control systems. *International Journal of Production Economics*, 72(1), 27–40. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(00\)00077-3](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00077-3)
- [2] Barakat, M., & Hetherington, J. G. (1998). New architectural forms to reduce the effects of blast waves and fragments on structures. In *Structures Under Shock and Impact V* (pp. 53–62). WIT Press.
- [3] Bitarafan, M., & Amini Hosseini, K. (2023). Developing a model for assessing urban resilience to aerial attacks. *Safe City*, 6(1), 116–142.
- [4] Bitarafan, M., & Nemati, A. (2026). Constructed urban infrastructure safety prediction under explosive effects. *Structures*, 84, 110928.
- [5] Bitarafan, M., Abazarlou, S., & Zarei, G. (2025). Assessing urban resiliency against terrorist attacks. *Journal of Urban Studies on Space and Place*, 9(34), 131–152.
- [6] Bitarafan, M., Hosseini, K. A., & Zolfani, S. H. (2023a). Identification and assessment of man-made threats to cities using integrated Grey BWM-Grey MARCOS method. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 6(2), 581-599.
- [7] Bitarafan, M., Hosseini, S. B., Hashemi-Fesharaki, S. J., & Esmailzadeh, A. (2013). Role of architectural space in blast-resistant buildings. *Frontiers of Architectural Research*, 2(1), 67–73.
- [8] Bitarafan, M., Hosseinzadeh, Y., Pichkah, F., & Lale Arefi, S. (2012). Finite element modeling and analysis of cold-formed steel frame shear walls. *International Conference on Civil Engineering and Architecture*.
- [9] Bitarafan, Mahdi, Kambod Amini Hosseini, and Sarfaraz Hashemkhani Zolfani. "Evaluating natural hazards in cities using a novel integrated MCDM approach (case study: Tehran city)." *Mathematics* 11.8 (2023b): 1936.
- [10] Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297–334. <https://doi.org/10.1007/BF02310555>
- [11] Dağdeviren, M., & Yüksel, I. (2008). Developing a fuzzy analytic hierarchy process (AHP) model for behavior-based safety management. *Information Sciences*, 178(6), 1717–1733. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2007.10.016>
- [12] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2009). ABAQUS user's manual. Dassault Systèmes.
- [13] Federal Emergency Management Agency. (2003). Risk management series: Reference manual to mitigate potential terrorist attacks against buildings (FEMA 426). U.S. Department of Homeland Security.
- [14] Gebbeken, N., & Döge, T. (2010). Explosion protection—Architectural design, urban planning and landscape planning. *International Journal of Protective Structures*, 1(1), 1–24.
- [15] Groat, L., & Wang, D. (2007). *Architectural research methods* (A. Eini-Far, Trans.). University of Tehran Press.
- [16] Hasheminasab, H., Hashemkhani Zolfani, S., Bitarafan, M., Chatterjee, P., & Abhaji Ezabadi, A. (2019). The role of façade materials in blast-resistant buildings. *Algorithms*, 12(6), 119.
- [17] Hosseini, S. B., Bitarafan, M., Hashemi-Fesharaki, S. J., & Norouziyan-Maleki, S. (2012). The role of basic building forms in explosion protection. *International Journal of Science and Advanced Technology*, 2(8), 47–50.
- [18] Hosseini, B., Bitarafan, M., Hosseini, B., Hashemi, J., & Fesharak, S. J. (2014). Openings compatible with passive defense architecture using AHP. *Journal of Architecture and Urban Planning*, 6(11), 25–38.
- [19] Kheiraldin, A., Naderpour, H., & Hosseini-Vaez, S. R. (2007). The effect of architectural form on structural vulnerability. *Proceedings of the First National Conference on Structure and Architecture*, Tehran, Iran.

- [20] Koccaz, Z., Sutcu, F., & Torunbalci, N. (2008). Architectural and structural design for blast-resistant buildings. 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- [21] Luccioni, B. M., Ambrosini, R. D., & Danesi, R. F. (2005). Failure of a reinforced concrete building under blast loads. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 49, 217–226.
- [22] Mojtahed Pour, M. (2009). The influence of building shape on stress distribution under blast loading (Master's thesis). Persian Gulf University, Iran.
- [23] Nakhaei, J., Bitarafan, M., & Lale Arefi, S. (2015a). Choosing the best urban tunnels as safe spaces in crisis using the AHP method. *Journal of Architecture and Urbanism*, 39(2), 149–160.
- [24] Nakhaei, J., Forghani, S., Bitarafan, M., Lale Arefi, S., & Šaparauskas, J. (2015b). Reinforcement of laminated glass facades against blast load. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(8), 1085–1097.
- [25] Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., & Ramsay, J. (2007). Blast loading and blast effects on structures: An overview. *Electronic Journal of Structural Engineering*, Special Issue, 76–91.
- [26] Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric theory* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- [27] Pourirahim, A. A., Bitarafan, M., & Lale Arefi, S. (2012). Evaluation of types of building roof shapes against explosion. *International Conference on Civil Engineering and Architecture*.
- [28] Remennikov, A. M., & Rose, T. A. (2005). Modelling blast loads on buildings in complex urban environments. *International Journal of Impact Engineering*, 31(8), 921–947.
- [29] Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.
- [30] Smith, P. D., & Hetherington, J. G. (1994). *Blast and ballistic loading of structures*. Butterworth-Heinemann.
- [31] Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Kildienė, S. (2014). State-of-the-art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and Economic Development of Economy*, 20(1), 165–79.