



ISSN: 2821-157X	<a href="https://www.jasd.khadu.ir">https://www.jasd.khadu.ir</a>	
	<b>Journal of Aerospace Defense</b> Volume 4 Issue 1 Spring 2025 Pages 1– 21	
<b>Research Paper;</b> 		
<b>Reinforcement of structures against explosion by providing suitable structural shape and determining the optimal type of the fibers in concrete mix</b>		
<b>Hassan Salehi<sup>1</sup>, Mohammad Sepehri<sup>2</sup>, Mohammad Amin Abbasi<sup>3</sup></b>		
1..Director of Materials and Passive Defense Department, Faculty of Mechanical Engineering, Khatam al-Anbia Air Defense University 2.Director of Materials and Passive Defense Department, Faculty of Mechanical Engineering, Khatam al-Anbia Air Defense University 3. Master of Science in Structural Engineering, Zand University, Shiraz, Iran		
<b>Article Information</b>	<b>Abstract</b>	
<b>Accepted:</b> 2025/05/20  <b>Received:</b> 2025/02/06	Considering the importance of the defense and military fields of the country and the increasing spread of terrorist and missile attacks, the need to strengthen the sensitive and vital structures of the country is extremely necessary. In this article, two important parameters in the discussion of strengthening structures against blast load have been investigated in Abaqus finite element software. In the first step, the type of concrete materials resistant to the blast load and in the second step, the geometric shape of the structure resistant to the blast load has been investigated. To determine the blast-resistant concrete materials, reinforced concrete design models were subjected to blast load, and finally concrete reinforced with macro steel-micro steel hybrid fibers showed the best resistance against blast load. By reinforcing concrete with macro steel-micro steel hybrid fibers, the amount of concrete damage can be reduced by 70%. Also, to determine the structural form resistant to explosion, two structural forms, cubic and hemispherical, were subjected to the blast load and the results showed that the hemispherical structural form shows more resistance to the blast load. Also, to determine the structural form resistant to explosion, two structural forms, cubic and hemispherical, were subjected to the blast load, and the results showed that the hemispherical structural form shows more resistance to the blast load, and the level of structural damage It is reduced to 49%. Also, two hemispherical structures made with control concrete and macro steel-micro steel composite fibers were subjected to severe blast load and it was found that the use of fibers in this form of structures reduces the vulnerability by 26%.	
<b>Keywords:</b>  <i>Concrete, Explosion, Hemisphere structure, Cubic structure, Strengthening</i>		
<b>Corresponding Author:</b> Hassan Salehi  <b>Email:</b> hsalehi1362@yahoo.com		
<b>HOW TO CITE:</b> <i>Hassan Salehi, Mohammad Sepehri, Mohammad Amin Abbasi. (2025). Structural strengthening against explosions from the perspective of passive defense using optimal structural forms and fiber types in concrete. Aerospace Defense, Vol 4(Issue1), Page 1–21.</i>		



## فصلنامه علمی دفاع هوافضایی

شماره ۱ دوره ۴  
بهار ۱۴۰۴  
صفحات ۱-۲۱



مقاله پژوهشی؛ 

### مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار از منظر پدافند غیرعامل با استفاده از ارائه شکل سازه‌ای مناسب و مدل‌سازی عددی برای تعیین نوع الیاف بهینه در بتن

حسن صالحی<sup>۱</sup>، محمد سپهری<sup>۲</sup>، محمد امین عباسی<sup>۳</sup>

۱. مدیر گروه مواد و پدافند غیرعامل، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء(ص)
۲. استادیار، دانشکده مهندسی کنترل، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء(ص)، تهران، ایران
۳. کارشناس ارشد عمران سازه، دانشگاه زند، شیراز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸	<p>با توجه به اهمیت حوزه دفاعی وجود حملات تروریستی نیاز به تقویت سازه‌های حساس و حیاتی کشور به شدت ضروری است. در این مطالعه دو پارامتر مهم در مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر بار انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله اول جنس مصالح مقاوم بتنی در برابر بار انفجار و در مرحله دوم شکل هندسی سازه‌ای مقاوم در برابر بار انفجار بررسی شده است. برای تعیین مصالح بتنی مقاوم در برابر انفجار از مشخصات مکانیکی و نمودار تنش کرنش مخلوط‌های بتنی ساخته شده در آزمایشگاه برای مدل‌سازی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شد. با انجام مدل‌سازی عددی، بتن با طرح‌های مختلف به صورت مسلح تحت بار انفجار قرار گرفت و مشخص شد که بتن تقویت شده با الیاف ترکیبی فولاد ماکرو-فولاد میکرو بهترین مقاومت را در برابر بار انفجار از خود نشان می‌دهد. با تقویت بتن با این ترکیب از الیاف می‌توان تا حدود ۷۰ درصد میزان خرابی را در دال بتنی کاهش داد. جهت تعیین شکل سازه‌ای مقاوم در برابر انفجار، دو شکل سازه‌ای مکعبی و نیم‌کره تحت بار انفجار قرار گرفتند. نتایج نشان داد که شکل سازه‌ای نیم‌کره مقاومت بیشتری در برابر بار انفجار از خود نشان داده و با تغییر شکل سازه از مکعب به نیم‌کره، میزان آسیب سازه تحت بار انفجار به میزان ۴۹ درصد کاهش می‌یابد. همچنین دو سازه نیم‌کره ساخته شده با بتن شاهد و الیاف ترکیبی فولاد ماکرو-فولاد میکرو، تحت بار انفجار شدید قرار گرفتند و مشخص شد که استفاده از الیاف در این شکل از سازه‌ها به میزان ۲۶ درصد آسیب‌پذیری را کاهش می‌دهد.</p>
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۳۰	
کلیدواژه‌ها:	
<p>بتن، انفجار، شکل سازه، الیاف، مقاوم سازی</p>	
نویسنده مسئول: حسن صالحی ایمیل: hsalehi1362@yahoo.com	
<p><b>استناد:</b> حسن صالحی، محمد سپهری، محمد امین عباسی (۱۴۰۴). مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار از منظر پدافند غیرعامل با استفاده از ارائه شکل سازه‌ای مناسب و تعیین نوع الیاف بهینه در بتن. <i>دفاع هوافضایی</i>، دوره ۴ (شماره ۱)، صفحه ۱-۲۱.</p>	

## ۱- مقدمه

با گسترش روزافزون حملات تروریستی و بروز خسارات جانی و مالی ناشی از آن‌ها، مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار به‌خصوص سازه‌های حساس و حیاتی مانند ساختمان‌های دولتی مهم، انبارهای نظامی، کارخانه‌های شیمیایی، نیروگاه‌های حرارتی و اتمی، پل‌های استراتژیک، پایانه‌های حمل و نقل و مراکز پرجمعیت، از اهمیت بالایی برخوردار است. در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در مورد بتن‌های تقویت شده با الیاف و بررسی مقاومت آن‌ها در برابر انفجار صورت پذیرفته است. هایلین<sup>۱</sup> و همکاران [۱] به بررسی مقاومت در برابر انفجار دال بتنی مسلح شده با الیاف شیشه پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف شیشه حصیری در دال بتنی باعث افزایش مقاومت آن در برابر ضربه ناشی از انفجار می‌شود. یانگ<sup>۲</sup> و همکاران [۲]، به بررسی آزمایشگاهی مقاومت در برابر پوسته شدن دال بتنی تقویت شده با الیاف فولادی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف فولادی در دال بتنی باعث بهبود مقاومت در برابر انفجار و تورق می‌شود.

قاسم<sup>۳</sup> و همکاران [۳] به بررسی توانایی الیاف فولادی برای بهبود رفتار برشی و خمشی تیرهای بتنی پرمقاومت تحت بار انفجاری پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از الیاف فولادی در تیرهای بتنی باعث افزایش مقاومت در برابر انفجار، بهبود کنترل جابه‌جایی‌ها و در نتیجه افزایش تحمل تیر در برابر آسیب می‌شود. همچنین الیاف فولادی می‌تواند جایگزین آرماتورهای عرضی شوند و از شکست برشی ناشی از انفجار جلوگیری کنند. لوسیونی<sup>۴</sup> و همکاران [۴] به بررسی تأثیر طول الیاف فولادی قلاب‌دار در دال بتنی تحت بار انفجار پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف فولادی با طول کوتاه‌تر در دال‌های بتنی مقاومت بیشتری ایجاد می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر نیز لوسیونی و همکاران [۵] به این نتیجه رسیدند که استفاده از الیاف فولادی باعث بهبود ترک‌خوردگی بتن و کاهش پوسته شدن بتن در برابر انفجار می‌شود. لی<sup>۵</sup> و همکاران [۶] به بررسی رفتار دال ساخته شده با بتن‌های فوق توانمند و معمولی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از بتن فوق توانمند در دال بتنی باعث بهبود عملکرد آن تحت بار انفجار می‌شود. آده<sup>۶</sup> و همکاران [۷]،

به بررسی رفتار ستون‌های بتنی الیافی با کارایی بالا تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. آن‌ها ثابت نمودند که نوع و طول الیاف عواملی هستند که می‌تواند بر رفتار بار انفجار و حالت شکست ستون‌ها تأثیر بگذارد. همچنین نشان دادند که استفاده از الیاف در ستون باعث کاهش جابه‌جایی آن‌ها می‌شود. طباطبایی و همکاران [۸] به بررسی پل‌های بتنی تقویت شده با الیاف بلند کربن در معرض بارگذاری انفجاری پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف بلند کربن مقاومت بتن در برابر انفجار را افزایش داده و میزان ترک‌خوردگی مربوط به پل‌های بتنی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

1 Hailin

2 Dapeng

3 Algassem

4 Luccioni

5 Li

6 Aoude

مقاوم‌سازی سازه‌های مختلف در برابر بار انفجار در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله در مطالعه‌ای صالحی [۹] به مطالعه عددی اتصال‌های از پیش تأیید شده مبحث دهم مقررات ساختمان تحت بار انفجار پرداخته است. این مطالعه نشان داد که در میان اتصال‌های مختلف پیشنهادی آیین‌نامه، قاب با اتصال گیردار فلنجی با چهار پیچ و بدون سخت‌کننده دارای کمترین جابجایی و بهینه‌ترین عملکرد در مقابل بار انفجار است. در مطالعه‌ای دیگر به ارائه راه‌کاری جهت کاهش میزان نفوذ بمب‌های سنگر شکن هدایت شونده در دو محیط خاک و بتن پرداخته شده است [۱۰]. در این پژوهش با پیشنهاد یک روش لایه‌بندی خاک و بتنی، نفوذ این کلاهک جنگی به عمق زمین تا نصف کاهش داده شده است.

یونگ شیانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۱] به تجزیه و تحلیل عددی سازه‌های قوسی چند لایه متشکل از مواد مختلف در معرض بار انفجار پرداختند. نتایج نشان داد که سازه قوس‌دار متشکل از لایه‌های فوم بتن، بتن الیافی فولادی و فولاد، مقاومت خوبی در برابر انفجار دارد. ژو<sup>۲</sup> و همکاران [۱۲] به مدل‌سازی عددی سد قوسی تحت بار انفجار پرداختند. نتایج نشان داد که می‌توان رفتار غیرخطی سدهای بتنی را به‌طور رضایت‌بخشی با مدل‌سازی عددی پیش‌بینی نمود. یو<sup>۳</sup> و همکاران [۱۳] به مطالعه تجربی عملکرد ضد انفجاری سازه‌های قوسی بتن مسلح تقویت شده با پلی‌اوره پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت در برابر انفجار این سازه‌ها نسبت به سازه‌های قوسی بتن آرمه بیشتر است. چن<sup>۴</sup> و همکاران [۱۴] به مطالعه عددی پلنل درب دولایه مقاوم در برابر انفجار پرداختند. آن‌ها ثابت کردند که پانل با این فرم ساختاری جدید می‌تواند بار انفجاری بیشتری را تحمل کند.

صالحی [۱۵] با استفاده از مدل‌سازی در نرم افزار المان محدود ال‌اس‌داینبا به بررسی عملکرد درب‌های چند قوسی در برابر انفجار پرداخت. پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه شامل تعداد قوس، ارتفاع قوس، وزن ماده منفجره و مصالح مورد استفاده در ساخت درب جهت افزایش مقاومت آن بود. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد قوس از ۱ تا ۵ قوس، حداکثر جابجایی مرکز درب تا ۶۰٪ کاهش یافت. در مطالعه‌ای دیگر صالحی و محمودی [۱۶] به بهبود عملکرد درب‌های ضد انفجار با تمرکز بر پیکربندی، چینش و مشخصات سخت‌کننده‌ها پرداختند. آن‌ها ثابت کردند که استفاده از سخت‌کننده غیر منشوری بجای مستطیلی با ثابت نگهداشتن وزن درب، باعث کاهش جابه‌جایی مرکز آن تا حدود ۳۰ درصد می‌گردد.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در زمینه مقاوم‌سازی سازه‌ها به کمک الیاف در مقابل بار انفجار، مطالعات متعددی انجام گرفته است. اما اکثر مطالعات پیشین حول محور استفاده از الیاف به صورت منفرد جهت مقاوم‌سازی سازه‌ها بوده است. در این مطالعه جهت مقاوم‌سازی این سازه‌ها در

1 Yongxiang

2 Xue

3 Yue

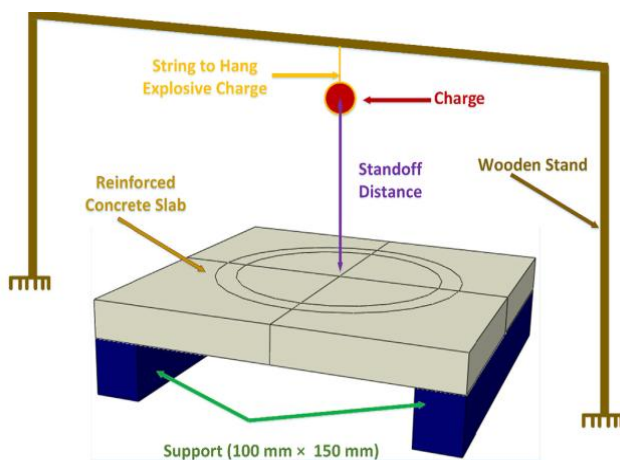
4 Chen

مقابل بار انفجار، دو پارامتر بسیار مهم مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامتر اول، مقاوم‌سازی این سازه‌ها به کمک تقویت بتن استفاده شده در این سازه‌ها است. پارامتر دوم نیز تعیین شکل سازه‌ای مناسب جهت کاهش میزان آسیب سازه است. بنابراین در این مقاله در ابتدا جهت تعیین بهترین مصالح بتنی در برابر انفجار، با انجام مطالعه آزمایشگاهی، خصوصیات رفتاری (مقاومت کششی، فشاری، مدول الاستیسته و نمودار تنش- کرنش) چند مخلوط بتن یافی جهت مدل‌سازی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس تعیین گردید. در نرم‌افزار مربوطه چند دال بتنی تقویت شده با الیاف به صورت منفرد و ترکیبی مدل‌سازی شد و بهترین مصالح بتنی مقاوم در برابر انفجار از بین طرح‌های مورد بررسی معرفی گردید. از میان هفت طرح پیشنهادی با الیاف‌های مختلف، پس از تعیین نوع الیاف بهینه، دو شکل سازه‌ای مکعبی و نیم‌کره بتن آرمه به کمک نرم‌افزار المان محدود مدل‌سازی شد. بدین ترتیب از میان دو شکل سازه‌ای پیشنهاد شده در این مطالعه، شکل سازه‌ای مناسب‌تر جهت کاهش میزان آسیب سازه در مقابل بار انفجار تعیین گردید. در نهایت با ترکیب شکل سازه‌ای مناسب و بهترین مصالح بتنی، عملکرد سازه مربوطه تحت بار انفجار مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- صحت‌سنجی مدل‌سازی و مطالعه آزمایشگاهی تعیین نوع الیاف بهینه در بتن

### ۲-۱- صحت‌سنجی

جهت صحت‌سنجی رفتار دال بتنی مسلح تحت اثر انفجار از پژوهش کومار<sup>۱</sup> و همکاران [۱۷] تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی و عددی دال‌های بتنی مسلح تحت بارگذاری انفجاری استفاده شد. در این پژوهش از یک دال بتنی با ابعاد یک در یک متر و ضخامت ۱۰ سانتی‌متری مطابق با شکل ۱ استفاده شد. آرماتورهای طولی و عرضی با فاصله ۱۰ سانتی‌متر نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند و قطر این آرماتورها ۱۰ میلی‌متر است.



شکل ۱: شرایط مرزی و بارگذاری در مطالعه کومار و همکاران [۱۷]

<sup>۱</sup> Kumar

کومار و همکاران از نرم‌افزار آباکوس برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی مطالعه خود استفاده نمودند. نتایج بدست آمده نشان داد که انفجار روی دال بتنی در حالت آزمایشگاهی و عددی بسیار نزدیک می‌باشد، که این مورد نشان از دقت نرم‌افزار آباکوس در بحث انفجار دارد. فاصله ماده منفجره TNT تا دال بتنی ۱۰ سانتی‌متر و مقدار آن ۰/۸۵ کیلوگرم در نظر گرفته شد. به دلیل تغییرات تنش و آسیب در محل وسط دال بتنی، نیاز است که در این بخش مش ریزتری برای مدل استفاده شود تا دقت بالاتری برای مسئله حاصل شود. کومار با توجه به آنالیز حساسیت پیشنهاد داد که در قطاع اول دال بتنی مش با اندازه ۱/۵ میلی‌متری ساخته شود، قطاع بیرونی با اندازه ۵ میلی‌متر و قطاع میانی به‌صورت گذار از ۱/۵ تا ۵ میلی‌متر افزایش یابد.

در این مطالعه از مدل رفتاری هلمکوئیست-جانسون-کوک<sup>۱</sup> برای مدل‌سازی رفتار بتن تحت اثر بار انفجار استفاده شده است [۱۷، ۱۸]. این مدل رفتاری برای مدل‌سازی هرچه بهتر بتن تحت اثر انفجار فرمول‌بندی شده تا بتواند وابستگی بتن به شدت فشار، بزرگی کرنش‌های ایجاد شده، آسیب و نرخ کرنش را در نظر بگیرد [۱۹]. چگالی بتن ( $\rho$ )، مقاومت فشاری ( $f_c$ )، مقاومت کششی ( $f_t$ ) و مدول برشی ( $G$ ) بتن با کمک آزمایشات انجام شده در آزمایشگاه به دست آمد. سایر پارامترهای مدل رفتاری مربوطه (HJC) به‌طور مستقیم از مطالعه کومار و همکاران [۱۷] برداشت شده و در جدول ۱ نمایش داده شده است.

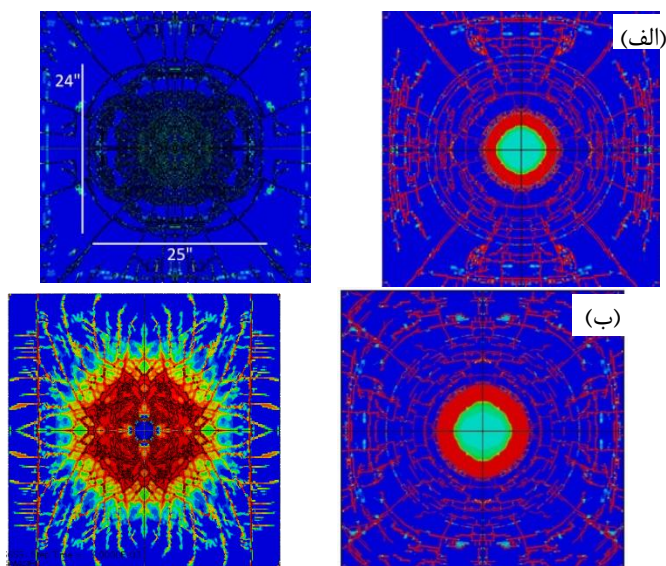
جدول ۱: پارامترهای HJC برای بتن [۱۷]

پارامتر مصالح	مقدار	پارامتر مصالح	مقدار
$\rho$ ( $Kg/m^3$ )	۲۴۳۰	$D_1$	۰/۰۴
$A$	۰/۷۹	$D_2$	۱
$B$	۱/۶	$(GPA) P_{crush}$	۰/۰۱۵۶۷
$N$	۰/۶۱	$(GPA) P_{lock}$	۰/۱۸
$C$	۰/۰۰۷	$\mu_{crush}$	۰/۰۰۱
$(MPA) f_c$	۴۷	$\mu_{lock}$	۰/۱
$S_{MAX}$	۷	$(GPA) K_1$	۸۵
$(MPA) G$	۱۴۶۴۸	$(GPA) K_2$	-۱۷۱
$(MPA) T$	۳/۸	$(GPA) K_3$	۲۰۸

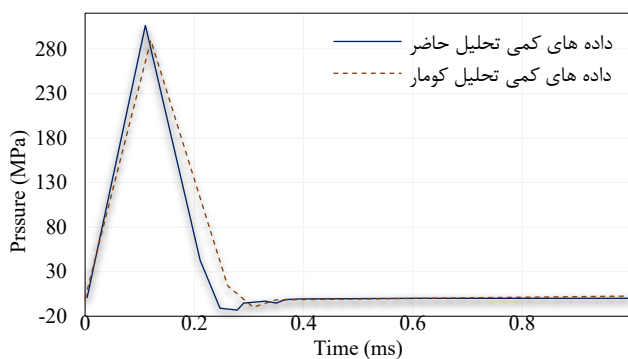
در جدول ۱،  $\rho$  چگالی،  $A$  مقاومت چسبندگی،  $B$  ضریب سخت شدن فشار،  $N$  توان سخت شدن فشار،  $C$  ضریب حساسیت نرخ کرن  $S_{MAX}$ ، حداکثر مقاومت معمولی بتن،  $G$  مدول برشی،  $T$  حداکثر فشار هیدرواستاتیک کششی،  $D_1$  و  $D_2$  پارامترهای آسیب،  $P_{crush}$ ،  $P_{lock}$ ،

<sup>۱</sup> HJC

میلگردها) در بخش‌های بعدی این مطالعه نیز از مدل رفتاری جانسون کوک استفاده شده است که پارامترهای مورد استفاده در آن در مراجع مختلف درج شده است [۱۸، ۲۰]. مقایسه نتایج این صحت‌سنجی با نتایج تحلیل کومار در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۲ الگوی آسیب و قلوه‌کنی در بخش میانی، به‌صورت محدود می‌باشد و ترک‌های شعاعی در نواحی اطراف قلوه‌کنی‌ها اتفاق افتاده است. همچنین با توجه به شکل ۳ ملاحظه می‌شود که داده‌های کمی و صحت‌سنجی تحلیل حاضر منطبق با تحلیل کومار است.



شکل ۲: نتایج گرافیکی الف) تحلیل کومار ب) تحلیل حاضر



شکل ۳: مقایسه داده‌های صحت‌سنجی با نتایج تحلیل کومار [۱۸]

## ۲-۲- مطالعه آزمایشگاهی تعیین خصوصیات مکانیکی و رفتاری مخلوط‌های بتن حاوی الیاف

### مختلف

بتن ماده‌ای شکننده با مقاومت کششی و ظرفیت کرنشی پایین است به همین دلیل برای برطرف کردن ضعف آن نیاز به تقویت دارد. یکی از روش‌های تقویت بتن استفاده از الیاف در بتن است که نقش آن بهبود خصوصیات مکانیکی و پل زدن بین ترک‌های بتن است. از الیاف‌های رایج مورد استفاده در بتن می‌توان به الیاف آزیست، فولادی، کربن، آراماید، پلی‌پروپیلن، آکریلیک، نایلون، پلی‌استر، پلی‌اتیلن، پلی‌الفین، الکل، شیشه، طبیعی و هیبریدی یا ترکیبی اشاره کرد [۲۳، ۲۱].

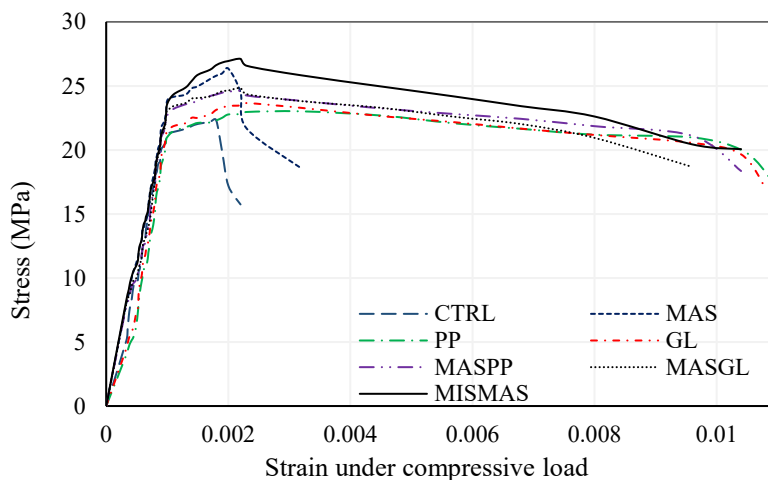
در این مطالعه از مشخصات مکانیکی و نمودار تنش کرنش مخلوط‌های بتنی ساخته شده در آزمایشگاه برای مدل‌سازی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. خصوصیات مکانیکی این طرح‌های بتنی در جدول ۲ نمایش داده شده است. طرح CTRL نمونه کنترل و فاقد الیاف، MAS دارای الیاف فولادی بزرگ، PP دارای الیاف پلی‌پروپیلن، GL دارای الیاف شیشه، MASPP ترکیب الیاف فولادی بزرگ و الیاف پلی‌پروپیلن، MASGL ترکیب الیاف فولادی بزرگ و الیاف شیشه، و در نهایت طرح MISMAS دارای ترکیب الیاف فولادی ریز و الیاف فولادی بزرگ است. مقادیر مشخصات مکانیکی طرح مخلوط‌ها در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲: خصوصیات مکانیکی طرح‌های بتنی

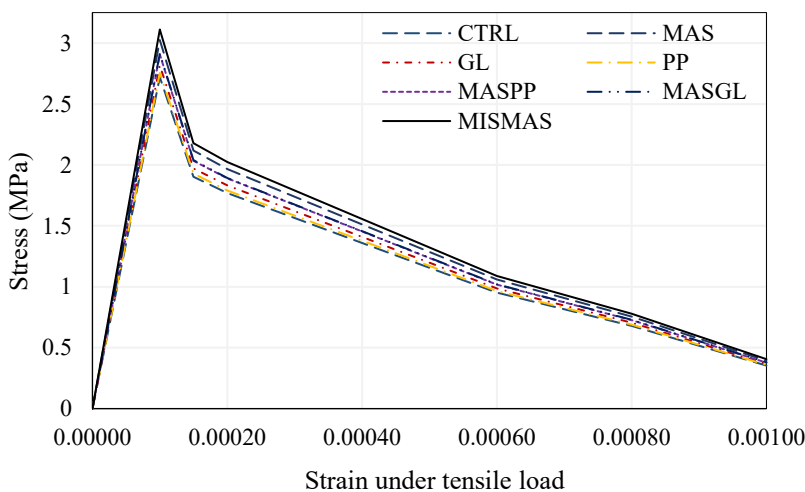
نمونه	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
CTRL	۲۲/۲	۲۲/۳۳	۲/۷۲
MAS	۲۴/۱۲	۲۶/۳۵	۳/۰۲
PP	۲۲/۵۴	۲۳/۰۱	۲/۷۵
GL	۲۲/۸۶	۲۳/۶۶	۲/۸۱
MASPP	۲۳/۳۱	۲۴/۶۱	۲/۹۰
MASGL	۲۳/۴۲	۲۴/۸۴	۲/۹۱
MISMAS	۲۴/۴۷	۲۷/۱۱	۳/۱۱

برای مدل‌سازی نمونه‌های بتنی در نرم‌افزار آباکوس، از خصوصیات مکانیکی بتن که در جدول ۲ ارائه شده است استفاده گردید. از آنجایی که برای بالا بردن دقت مدل‌سازی، علاوه بر مشخصه‌های فوق نیاز به معرفی نمودار تنش-کرنش بتن در حالت‌های کششی و فشاری نیز وجود دارد، بنابراین آزمایش‌های مربوط به آن‌ها نیز انجام و داده‌های مربوط به آن‌ها حاصل شد. شکل‌های ۴ و ۵ نشان‌دهنده رفتار تنش نمونه‌های مختلف بتن در مقابل کرنش آن تحت بارهای فشاری و کششی

می‌باشد. با در اختیار داشتن این نمودارها و تعریف خصوصیات مصالح بر اساس آن‌ها می‌توان پاسخ درست و واقع‌بینانه‌ای از مدل‌سازی نمونه‌ها دریافت کرد.



شکل ۴: نمودار تنش- کرنش طرح مخلوط‌ها تحت بار فشاری



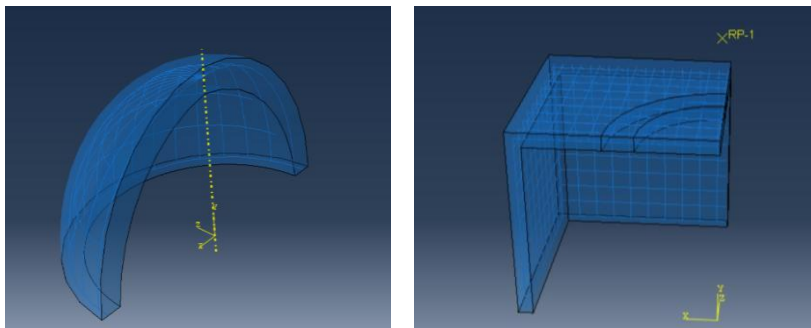
شکل ۵: نمودار تنش- کرنش طرح مخلوط‌ها تحت بار کششی

بر اساس شکل‌های ۴ و ۵، بیشینه مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها مربوط به مخلوط بتنی ساخته شده با الیاف ترکیبی فولاد ماکرو-فولاد میکرو است. زیرا در این نمونه، الیاف فولادی بلند و کوتاه با هم ترکیب شده و به شکل مناسبی جلوی شروع و گسترش ترک را می‌گیرند. از آنجا که الیاف فولادی نسبت به سایر الیاف دارای مدول الاستیسیته بیشتری هستند، در نتیجه بتن این طرح مقاومت بالاتری از خود نشان می‌دهد. همچنین این نمودارها نشان‌دهنده شکل‌پذیری

مخلوط‌ها نیز می‌باشند، به طوری که نمونه‌های دارای الیاف پلی‌پروپیلن، شیشه و ترکیب الیاف فولادی ماکرو- میکرو به ترتیب دارای بیشترین شکل‌پذیری می‌باشند

### ۲-۳- مدل‌سازی سازه‌هایی با شکل‌های متفاوت برای مقاوم‌سازی در مقابل بار انفجار

برای بررسی تأثیر شکل سازه بر مقاومت سازه‌ها در مقابل بار انفجار، دو شکل سازه‌ای مکعبی و نیم‌کره به کمک نرم‌افزار المان محدود شبیه‌سازی شدند. قطر نیم‌کره بتنی برابر با ۲ متر و ضخامت دال بتنی آن ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. جایگذاری آرماتورها با زاویه ۱۰ درجه و فاصله ۱۵ سانتی‌متری نسبت به یکدیگر مطابق با مطالعه طاهاسن<sup>۱</sup> [۲۳] است. قطر آرماتورهای مصرفی نیز ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۶ هندسه مدل و نحوه آرایش آرماتورهای سازه‌های نیم‌کره و مکعبی نشان داده شده است. جهت مدل‌سازی سازه مکعبی دقیقاً همانند طراحی دال‌های بتن آرمه عمل کردیم. همه اضلاع سازه مکعبی بتنی برابر ۲ متر و ضخامت دال بتنی آن برابر با ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. قطر آرماتورهای استفاده شده ۱۰ میلی‌متر و آرماتورهای طولی و عرضی با فاصله ۱۰ سانتی‌متر نسبت به یکدیگر قرار گرفتند. مدل رفتاری بتن و فولاد هر دو شکل سازه‌ای دقیقاً همانند طراحی دال‌های بتن آرمه ارائه شده در بخش قبل می‌باشد.



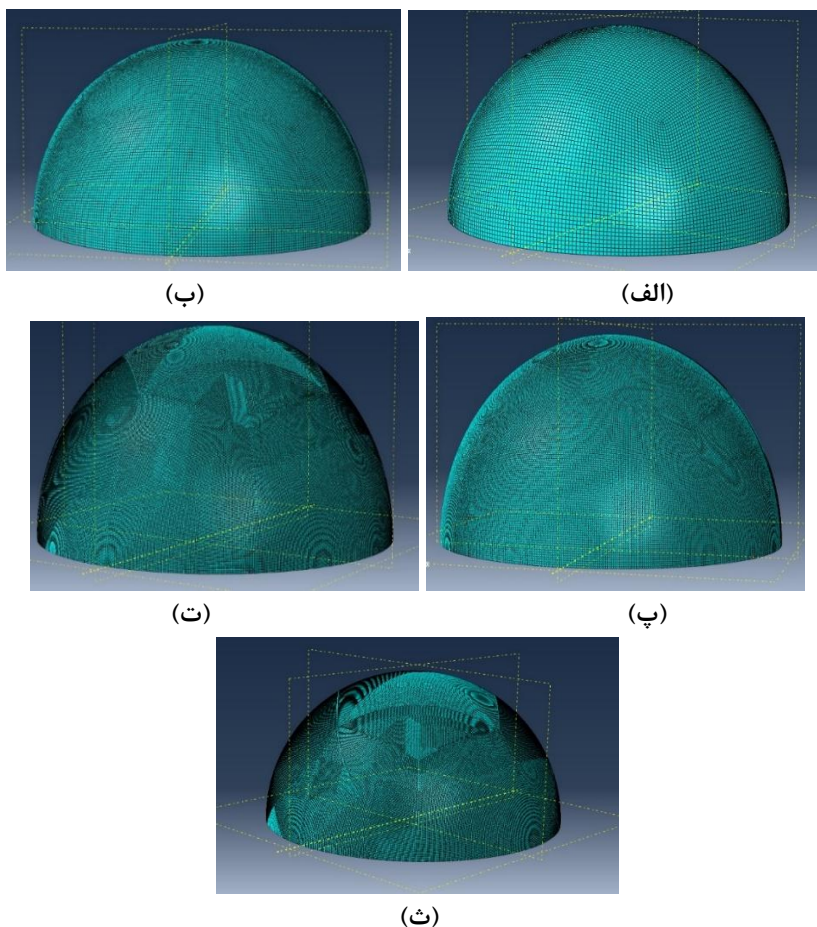
شکل ۶: مدل‌سازی آرماتورها

### ۲-۴- تحلیل حساسیت مش

جهت بارگذاری بار انفجار بر هر دو شکل سازه‌ای، از یک موج فشاری از نوع CONWEP استفاده شده است. فاصله انفجار تا دال بتنی ۲ متر و مقدار بار آن ۱۲ کیلوگرم TNT در نظر گرفته شد. پس از انجام تحلیل حساسیت مش، مش بندی مدل‌ها به صورت زیر صورت پذیرفت. مش بندی سازه مکعب بتنی همانند مش بندی دال بتنی بخش قبل اعمال گردید. بدین ترتیب که قطاع بیرونی با اندازه ۵ میلی‌متر و قطاع میانی به صورت گذار از ۵ تا ۱/۵ میلی‌متر کاهش یافت. مش بندی مدل حاضر بر اساس المان‌های سه بعدی بوده است به طوری که در مش بندی مدل از المان‌های مکعبی شش وجهی

<sup>۱</sup> TAHASEEN

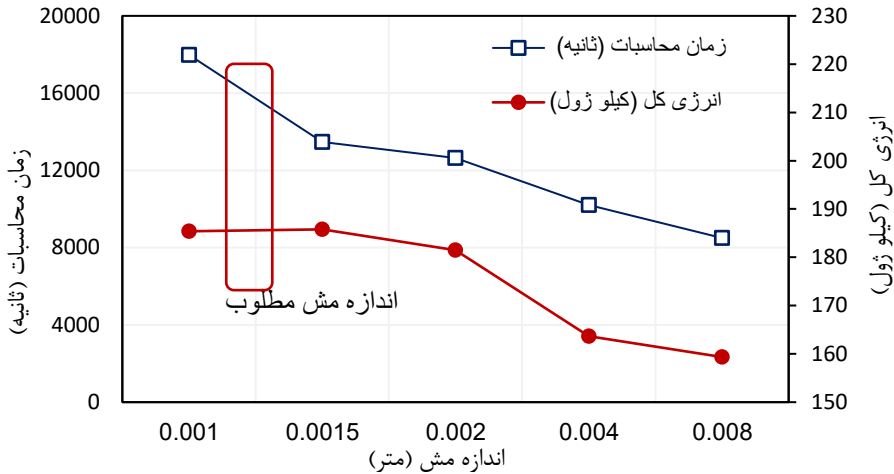
هشت گرهی و در ناحیه گذار نیز از المان‌های گوه‌ای پنج وجهی شش گرهی استفاده شد. برای مش بندی سازه نیم کره بتنی نیز از مش بندی  $1/5$  میلی‌متر استفاده شد. المان انتخابی برای مش بندی سازه نیم کره بتنی، المان C3D8R خطی با ۸ گره است. در شکل (۷) به صورت شماتیک اندازه شبکه‌های مش مورد استفاده در سازه نیم کره بتنی نمایش داده شده است.



شکل ۷: نمای شماتیک مش بندی سازه نیم کره بتنی با اندازه مش (الف) ۸ میلی‌متر (ب) ۴ میلی‌متر (پ) ۲ میلی‌متر (ت)  $1/5$  میلی‌متر (ث) ۱ میلی‌متر

برای این که بتوان به پاسخی که به دست آمده اطمینان شود، باید همگرایی و استقلال شبکه مش مورد بررسی قرار بگیرد. برای رسیدن به این نتیجه که از کدام اندازه برای مش بندی باید استفاده نمود، از نموداری که به آنالیز حساسیت مش معروف است مطابق شکل (۸) استفاده شده است. پارامتر مورد بررسی برای همگرایی مش، میزان کل انرژی جذب شده توسط سازه بوده است. با توجه به اندازه و نوع المان بندی سازه نیم کره که مطرح شد و بر اساس نمودار مربوطه می‌توان به این نتیجه رسید که در مش بندی  $1/5$  میلی‌متر و کوچک‌تر از آن، پاسخ‌ها بسیار به هم نزدیک بوده و

اختلاف آن‌ها در حدود ۱٪ است. از طرفی با استفاده از اندازه مش ۱/۵ میلی‌متر در حداقل زمان ۱۳۴۷۰ ثانیه تحلیل مدل انجام و پاسخ مربوطه حاصل شد؛ این در شرایطی است که در اندازه مش کوچک‌تر از آن که ۱ میلی‌متر بود هزینه زمانی انجام تحلیل بسیار افزایش یافت در حالی که تقریباً به همان پاسخ مرحله قبل رسیدیم. بنابراین می‌توان گفت اندازه مش ۱/۵ میلی‌متر برای انجام این پژوهش بسیار مناسب است.



شکل ۸: آنالیز حساسیت مش برای تعیین اندازه بهینه مش سازه نیم کره

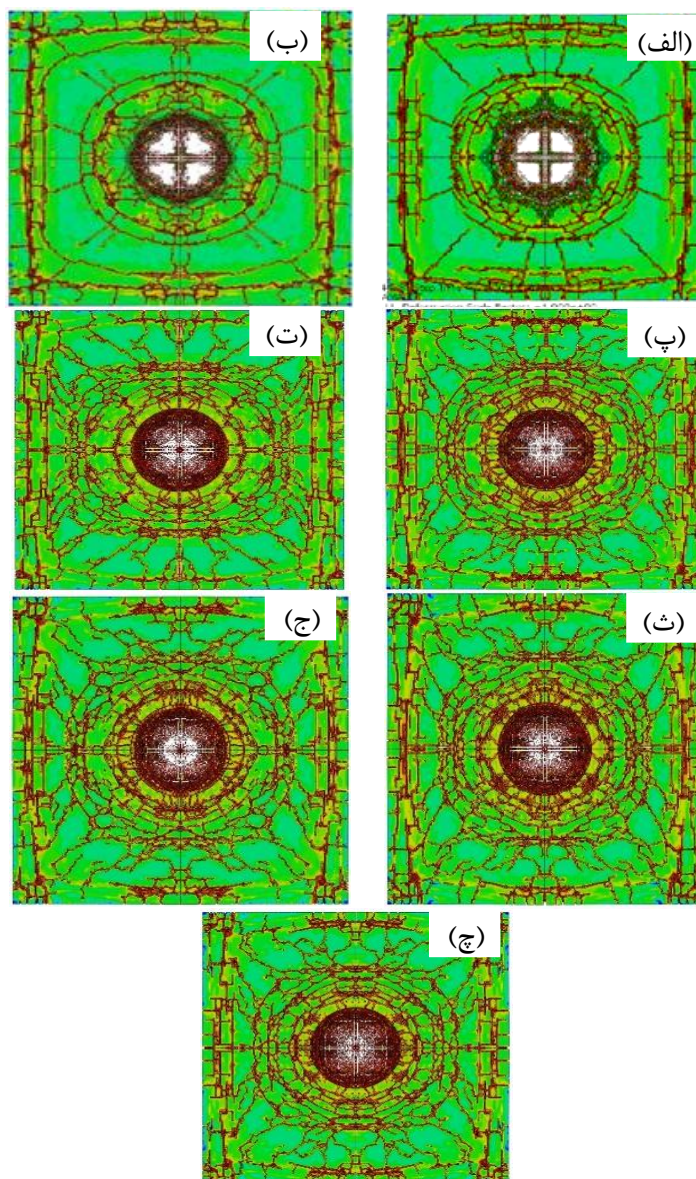
### ۳- تحلیل نتایج

در این بخش به بررسی نتایج هفت طرح دال بتنی جهت تعیین بهترین طرح مقاوم در برابر انفجار و مقایسه نتایج مربوط به سازه نیم کره و مکعبی در برابر بار انفجار ۱۲ کیلوگرم TNT پرداخته شده است.

#### ۳-۱-۱ نتایج اعمال بار انفجار بر دال‌های بتنی ساخته شده با طرح مخلوط‌های مختلف

به کمک روش ارائه شده توسط کومار و همکاران و وارد کردن خصوصیات رفتاری ۷ طرح بتنی در نرم‌افزار مطابق با جدول ۲ و نمودار شکل‌های ۴ و ۵، دال‌های بتن آرمه تحت بار انفجار شبیه‌سازی شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند.

با اعمال بار انفجار بر دال بتن آرمه نمونه شاهد، مشاهده شد که در قسمت میانی بتن به دلیل ترد بودن رفتار آن، قله‌کنی در فشار اتفاق افتاده است. همچنین رشد ترک‌های عمودی از وجه بالایی تا وجه پایینی و رشد ترک‌های افقی به صورت گسترده‌تری در این مدل اتفاق افتاده است که در شکل ۹-الف به وضوح نشان داده شده است. بنابراین سازه‌های بتن آرمه بدون تقویت الیافی رفتاری ترد از خود نشان می‌دهند و به سرعت در مقابل بار انفجار دچار آسیب می‌شوند و مناسب برای ساخت سازه‌های حساس و حیاتی نیستند.

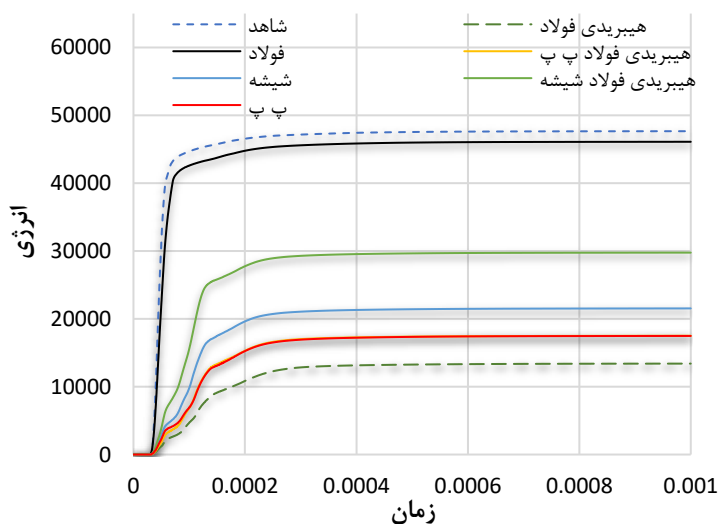


شکل ۹: تأثیر انفجار بر نمونه دال ساخته شده با بتن (الف) شاهد (ب) حاوی الیاف فولاد ماکرو (پ) الیاف شیشه (ت) الیاف پلی پروپیلن (ث) ترکیب الیاف فولاد ماکرو-پلی پروپیلن (ج) ترکیب الیاف فولاد ماکرو-شیشه (چ) ترکیب الیاف فولاد ماکرو- فولاد میکرو

با اعمال بار انفجار بر دال بتنی حاوی الیافی فولادی ماکرو مشاهده شد که در قسمت میانی نمونه قله‌کشی بتن به دلیل ترد بودن رفتار آن در فشار اتفاق افتاده است. رشد ترک‌های عمودی از وجه بالایی تا وجه پایینی، و رشد ترک‌های افقی مانند طرح بتنی شاهد در این مدل نیز اتفاق افتاده است که در شکل ۹-ب کاملاً مشاهده می‌شود. این طرح از نظر رفتار، به علت ترد بودن بتن بسیار شبیه به طرح شاهد عمل کرده، زیرا از الیاف فولادی با طول بلند استفاده شده است. در نتیجه میزان کمتری الیاف در یک حجم مشخص از بتن وجود دارد و بتن همچنان رفتار ترد از خود نشان می‌دهد. در این

حالت میزان آسیب بتن کمی کمتر از بتن بدون الیاف است اما به علت عدم شکل‌پذیری بتن، سازه‌های ساخته شده با این نوع بتن نیز در مقابل انفجار مقاوم نخواهند بود.

مدل‌های رفتاری دال‌های بتن آرمه الیافی حاوی شیشه، پلی‌پروپیلن، ترکیب الیاف فولاد ماکرو-پلی‌پروپیلن، الیاف فولاد ماکرو-شیشه و الیاف فولاد ماکرو-فولاد میکرو تحت بار انفجار به ترتیب مطابق با شکل‌های ۹-پ تا ۹-چ نمایش داده شده است. با تحلیل انفجار روی دال‌های بتن آرمه الیافی مشاهده شد که در قسمت میانی مدل‌ها قلوه‌کنی بتن نسبت به طرح‌های شاهد و فولادی کمتر اتفاق افتاده است. اما از طرفی دیگر رشد ترک‌های عمودی از وجه بالایی تا وجه پایینی و رشد ترک‌های افقی در این مدل‌ها نسبت به دو طرح بتن شاهد و فولادی منفرد بیشتر اتفاق افتاده است. دلیل این موضوع آن است که بتن انسجام بیشتری از خود نشان می‌دهد و در کشش مقاومت بیشتری داشته و تا شعاع بیشتری تغییر شکل‌ها اتفاق می‌افتد. در حالی که دو طرح بتن شاهد و فولادی منفرد از خود مقاومتی در برابر کشش نشان نمی‌دهند. بنابراین این طرح‌های بتنی به علت میزان آسیب کمتر (شکل‌پذیری زیاد) بتن‌هایی مناسب برای طراحی سازه‌های حساس و حیاتی می‌باشند. همچنین از میان تمامی طرح‌ها، طرح ساخته شده با بتن الیافی ترکیبی فولاد ماکرو- فولاد میکرو کمترین میزان آسیب را داشت؛ زیرا از دو الیاف کوچک و بزرگ با مدول الاستیسته بالا در این طرح استفاده شده است. پس با بهره‌گیری از بتن این طرح‌ها در ساخت سازه‌ها می‌توان میزان خسارت‌های جانی و مالی را به حداقل رساند. نمودار میزان آسیب دال‌های بتن آرمه ساخته شده با طرح مخلوط‌های مختلف بتن در برابر بار انفجار در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰: میزان آسیب دال‌های بتن آرمه در برابر بار انفجار

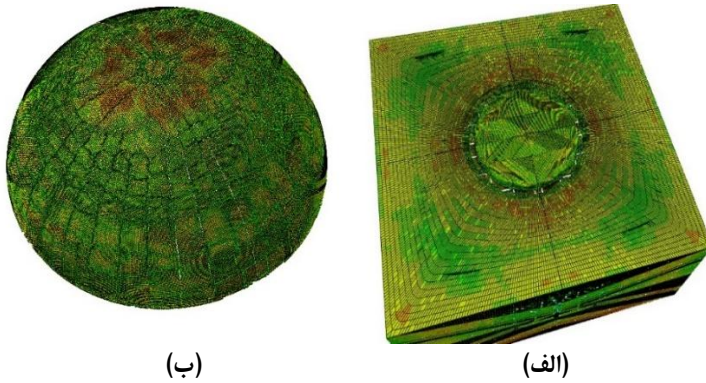
مطابق با شکل ۱۰ کمترین میزان آسیب دال‌های بتن آرمه تحت بار انفجار مربوط به دال بتن آرمه الیافی ساخته شده با الیاف ترکیبی فولاد ماکرو-فولاد میکرو می‌باشد. پس با استفاده از این طرح

مخلوط بتن می‌توان تا حدود ۷۰ درصد میزان آسیب بتن را نسبت به بتن بدون تقویت الیافی کاهش داد.

## ۲-۳ نتایج حاصل از اعمال بار انفجار بر دو شکل سازه‌های نیم‌کره و مکعبی

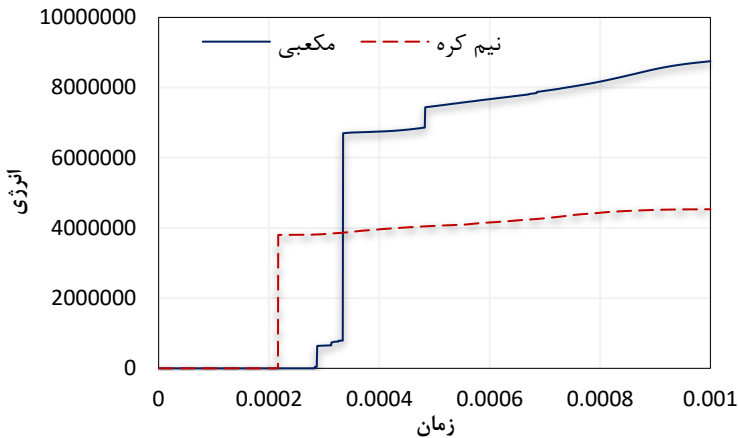
پس از شبیه‌سازی ۷ مدل بتن آرمه الیافی و تعیین بهترین الیاف جهت کاهش میزان آسیب وارد به سازه در برابر بار انفجار، در این بخش شکل سازه‌ای مناسب جهت کاهش میزان آسیب در برابر انفجار مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به این که اکثر سازه‌ها با شکل مکعبی و سطوحی صاف ساخته می‌شوند، بنابراین دو شکل سازه‌ای، مکعبی (سازه‌های متعارف) و نیم‌کره تحت بار انفجار قرار داده شد تا شکل سازه‌ای مناسب معرفی گردد.

در شکل ۱۱ نتایج حاصل از انفجار ۱۲ کیلوگرم TNT در فاصله ۲ متری از سازه‌های مکعبی و نیم‌کره نشان داده شده است. سازه مکعبی در اثر برخورد موج انفجار دچار قله‌کشی و آسیب شدیدی در وجه رو به انفجار شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این شکل سازه‌ای در برابر بار انفجار عملکرد خوبی از خود نشان نمی‌دهد. در طرف مقابل، سازه نیم‌کره به کمک شکل سازه‌ای خود بار انفجار را از خود عبور داده و مقدار اندکی از بار مربوطه را جذب کرده است. در نتیجه میزان آسیب سازه نیم‌کره نسبت به مکعبی بسیار اندک بوده و مناسب برای ساخت سازه‌های حساس و حیاتی می‌باشد.



شکل ۱۱: تصویر گرافیکی میزان آسیب سازه مکعبی و نیم‌کره تحت بار انفجار

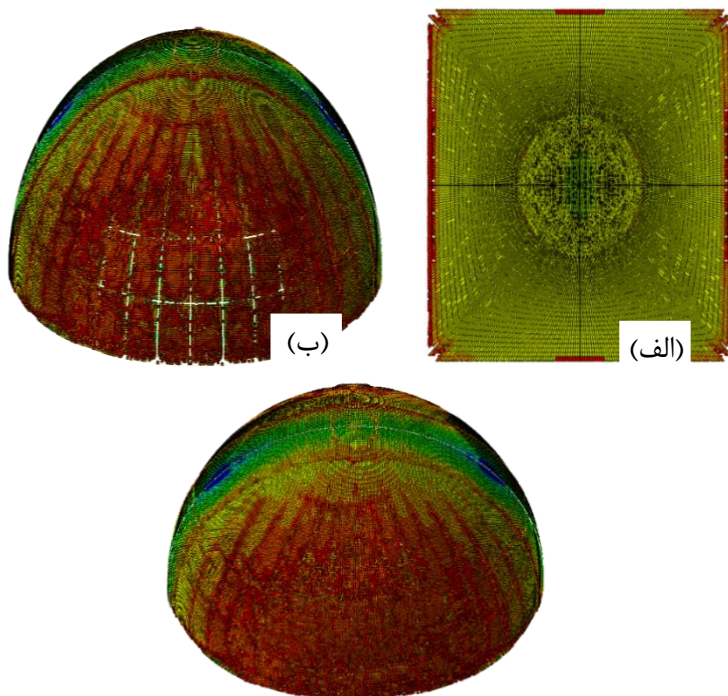
برای انجام مقایسه و تجزیه و تحلیل بهتر نتایج، میزان آسیب سازه نیم‌کره و مکعبی ساخته شده با بتن شاهد در برابر بار انفجار به صورت نموداری در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که میزان آسیب سازه مکعبی بتن آرمه به میزان چشمگیری بیشتر از سازه نیم‌کره بتن آرمه می‌باشد. پس با تغییر شکل سازه‌ای از مکعبی به نیم‌کره تا ۴۹ درصد می‌توان میزان آسیب سازه را در برابر انفجار کاهش داد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هر چه سطح عمود بر موج انفجار کمتر باشد میزان آسیب سازه در برابر بار انفجار بهبود می‌یابد.



شکل ۱۲: میزان آسیب سازه نیم‌کره و مکعبی تحت بار انفجار

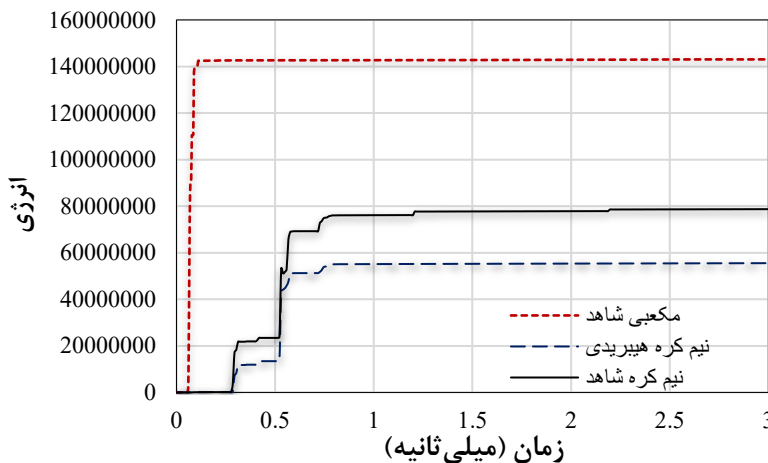
### ۳-۳ بررسی هم‌زمان شکل سازه و نوع بتن در کاهش میزان تخریب ناشی از انفجار

پس از تعیین بهترین شکل سازه‌ای، دو شکل سازه‌ای مکعبی و نیم‌کره تحت بار انفجاری معادل با ۴۵۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۳۵ متری مدل‌سازی شدند تا عملکرد این سازه‌ها تحت بار انفجاری واقعی و معادل موشک‌های امروزی مورد بررسی قرار بگیرد. در این بخش سازه مکعبی با بتن شاهد اما سازه نیم‌کره یک‌بار با بتن معمولی (شاهد) و یک‌بار با بتن حاصل از بهترین طرح مخلوط مرحله قبل یعنی بتن الیافی ترکیبی فولاد ماکرو-فولاد میکرو مدل‌سازی شد. بدین ترتیب تأثیر هم‌زمان الیاف و شکل سازه‌ای تحت بار انفجار بررسی می‌گردد. جهت شبیه‌سازی اعمال بار انفجار سلاح‌های امروزی بر سازه‌ها، از اعمال بار انفجار ۴۵۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۳۵ متری از نمونه استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۱۳-الف ملاحظه می‌شود، سازه مکعبی بتن آرمه ساخته شده با بتن شاهد که به علت شکل و مصالح نماینده اکثر سازه‌های متعارف موجود است، تحت بار انفجار مربوطه دچار آسیب شدیدی شده است که در وجه رو به انفجار دچار قله‌کنی و فرورفتگی شدید و در لبه‌های سازه نیز دچار آسیب عمده شده است. در نتیجه در مواقع بحرانی و بروز انفجار این سازه‌ها، سازه‌های ایمنی جهت ارائه خدمات در بحث دفاعی و امنیتی نمی‌باشند و خسارت‌های جبران‌ناپذیری به بار می‌آورند.



شکل ۱۳: میزان آسیب سازه‌های محصف تحت بار انفجار الف) سازه مکعبی ب) سازه نیم‌کره ساخته شده با بتن شاهد پ) سازه نیم‌کره ساخته شده با بتن الیاف ترکیبی

بر اساس شکل ۱۳-ب، سازه نیم‌کره ساخته شده با بتن شاهد به علت شکل مناسب نسبت به نمونه مکعبی ساخته شده با بتن شاهد دچار آسیب کمتری شده است و سازه همچنان قابل بهره‌برداری است. همان‌طور که در شکل ۱۳-پ مشاهده می‌شود، سازه نیم‌کره ساخته شده با بتن الیافی ترکیبی فولاد ماکرو-فولاد میکرو به علت شکل مناسب و مصالح بهتر، نسبت به نمونه‌های مکعبی و نیم‌کره ساخته شده با بتن شاهد دچار خرابی کمتری شده است. در نتیجه در مواقع بحرانی و بروز انفجار، سازه‌های نیم‌کره سازه‌های ایمنی جهت ارائه خدمات در بحث دفاعی و امنیتی می‌باشند و میزان خسارت‌های جانی و مالی را به حداقل می‌رسانند. از طرفی استفاده از بتن‌های الیافی و در بهترین حالت آن ترکیب الیاف فولادی ماکرو و میکرو می‌تواند آسیب‌ها را تا حد زیادی کاهش دهد. نتایج تحلیل گرافیکی شکل‌های مختلف سازه‌ای تحت بار انفجار، در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. بر اساس این شکل، میزان آسیب سازه مکعبی به میزان چشمگیری بیشتر از نیم‌کره ساخته شده با بتن شاهد و ترکیبی است. در واقع با تغییر شکل سازه‌ای از مکعبی به نیم‌کره میزان آسیب سازه تحت بار انفجار به میزان ۴۹ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با مقاوم‌سازی سازه نیم‌کره به کمک الیاف ترکیبی فولاد ماکرو- فولاد میکرو می‌توان ۲۶ درصد میزان خسارت سازه را نسبت به سازه نیم‌کره ساخته شده با بتن شاهد بهبود بخشید.



شکل ۱۴: نمودار میزان آسیب سازه‌های نیم کره و مکعبی تحت بار انفجار

#### ۴- تشکر و قدردانی

به پاس الطاف بی‌دریغ و همت والایان، صمیمانه‌ترین سپاس‌ها را تقدیم می‌دارم و قدردان بزرگواری و فضل شما هستم.

#### ۵- تعارض منافع

نویسنده(گان) اعلام می‌دارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این، موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل داده‌ها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر توسط نویسندگان رعایت شده است.

#### ۶- دسترسی آزاد

این نشریه دارای دسترسی باز است و اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

#### ۷- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تأثیر جنس مصالح بتنی و شکل هندسی سازه بر افزایش مقاومت سازه‌ها در مقابل بار انفجار می‌پردازد. با انجام مدل‌سازی عددی، دو شکل سازه‌ای مکعبی و نیم‌کره به همراه مخلوط‌های بتنی مسلح شده با الیاف مختلف تحت بار انفجار قرار گرفتند و نتیجه‌های زیر به دست آمده است:

۱- با بررسی نمودارهای آسیب بتن مشاهده شد که در طرح مخلوط‌های شاهد و الیافی تقویت شده با فولاد منفرد، میزان بار انفجاری قابل تحمل و نیز تعداد ترک‌های ایجاد شده در بتن کمتر از سایر

طرح‌ها شد. زیرا در این دو طرح، بتن ترد بوده و در برابر انفجار به سرعت دچار شکستگی می‌شود. اما در سایر طرح‌ها بتن از انسجام بیشتری برخوردار بوده، با این مقاومت تا شعاع بیشتری ضربه ناشی از بار انفجار را پخش نموده و بدین ترتیب میزان ترک‌های رخ داده در آن‌ها بیشتر است.

۲- کمترین میزان آسیب و قلوه‌کن شدن بتن در دال‌های بتنی مربوط به طرح ساخته شده با بتن حاوی الیاف ترکیبی فولاد ماکرو-فولاد میکرو بود. به کمک تقویت دال بتنی با این الیاف تا ۷۰ درصد میزان آسیب آن نسبت به دال شاهد کاهش یافت. زیرا الیاف‌ها به صورت ریز و درشت در بتن توزیع شده و شکل‌پذیری مناسبی ایجاد نمودند. از طرفی فولاد از مدول الاستیسیته بالاتری نسبت به شیشه و پلی‌پروپیلن برخوردار بوده، در نتیجه بتن مقاومت بالایی داشته و همچنین از شکل‌پذیری مناسبی نیز برخوردار بود. بدین ترتیب این طرح در برابر بار انفجار دارای بهترین عملکرد در بین تمامی طرح‌ها بود.

۳- با تغییر شکل سازه‌ای از مکعبی به نیم‌کره میزان آسیب سازه تحت بار انفجار به میزان ۴۹ درصد کاهش یافت.

۴- سازه نیم‌کره ساخته شده با بتن الیافی با این که شکل سازه‌ای یکسانی با سازه نیم‌کره ساخته شده با بتن شاهد دارد، اما به علت تقویت بتن آن با الیاف، میزان آسیب کمتری متحمل می‌گردد. پس با مقاوم‌سازی سازه نیم‌کره با الیاف ترکیبی فولاد ماکرو- فولاد میکرو می‌توان حدود ۲۶ درصد میزان خسارت سازه را نسبت به سازه نیم‌کره ساخته شده با بتن شاهد بهبود بخشید.

۵- هر چه سطح عمود بر موج انفجار کمتر باشد میزان آسیب سازه در برابر بار انفجار بهبود می‌یابد. همچنین برای کاهش میزان آسیب و افزایش مقاومت در برابر بار انفجار، بهترین شکل سازه‌ای نیم‌کره و بهترین مصالح بتنی در بین طرح‌های ساخته شده، بتن تقویت شده با الیاف فولاد ماکرو- فولاد میکرو بود. بنابراین با ساخت سازه‌ای به شکل نیم‌کره و استفاده از بتن الیافی حاوی ترکیب الیاف فولاد ماکرو- فولاد میکرو میزان آسیب سازه‌ای به حداقل رسیده و تلفات جانی و خسارت‌های مالی در مقابل حملات موشکی به حداقل می‌رسد.

## ۸-منابع

- [1] Ye H, Jiang C, Qi W, Feng Z. “Study on Explosion Resistance of Reinforced Concrete Slab Wrapped with Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP)”. *Journal of Physics: Conference Series: IOP Publishing*. 012009, 2022.
- [2] Yang D, Zhang B, Liu G. “Experimental study on spall resistance of steel-fiber reinforced concrete slab subjected to explosion”. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 15-23, 2021.
- [3] Algassem O, Li Y, Aoude H. “Ability of steel fibers to enhance the shear and flexural behavior of high-strength concrete beams subjected to blast loads”. *Engineering Structures*. **199**, 109611, 2019.
- [4] Luccioni B, et al. “Experimental and numerical analysis of blast response of High Strength Fiber Reinforced Concrete slabs”. *Engineering structures*. **175**, 113-22, 2018.
- [5] Luccioni B, et al. “Effect of steel fibers on static and blast response of high strength concrete”. *International journal of impact engineering*. **107**, 23-37, 2017.
- [6] Li J, Wu C, Hao H. “Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion”. *Engineering Structures*. **102**, 395-408, 2015.
- [7] Aoude H, Dagenais FP, Burrell RP, Saatcioglu M. Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under blast loading”. *International Journal of Impact Engineering*. **80**, 185-202, 2015.
- [8] Tabatabaei ZS. “Numerical analyses of long carbon fiber reinforced concrete panels exposed to dynamic loading”. *Missouri University of Science and Technology*, 2013.
- [9] Salehi H. “Increasing the defense capability of steel structures by determining optimal steel connections against blast load and providing methods to improve their performance”. *Aerospace Defense*. **2**, 70-92, 2023.
- [10] Salehi H, Heshmati rad M, Vaseli khabbaz M. “Numerical analysis of the penetrating of non-nuclear bunker buster bombs in underground structures and the changes of the energy in the projectile”. *Journal of Aeronautical Engineering*. **17**, 23-43, 2015.
- [11] Yongxiang D, et al. “Numerical analysis on protecting performance of layered arch structures subjected to blast loading”. *Defence Science Journal*. **59**, 131-6, 2009.
- [12] Xue X, Yang X, Zhang W. “Numerical modeling of arch dam under blast loading”. *Journal of Vibration and Control*. **20**, 256-65, 2014.
- [13] Yue ZY, et al. “Experimental study on the anti-blast performance of polyurea reinforced concrete arch structures”. *Journal of Building Engineering*. **77**, 107483, 2023.

- [14] Chen W, Hao H. “Numerical study of a new multi-arch double-layered blast-resistance door panel”. *International Journal of Impact Engineering*. **43**, 16-28, 2012.
- [15] Salehi H. “Reinforcing Doors of the Safe Constructions Using Multi-Arch Geometric Structures”. *Journal of Advanced Defense Science & Technology*. **13**, 203-14, 2022.
- [16] Salehi H, Sahebi FM. “Enhancing the Performance of Explosion-Proof Doors by Focusing on the Configuration of Stiffeners”. *Journal of Advanced Defense Science & Technology*. **14**, 79-91, 2023.
- [17] Kumar V, Kartik K, Iqbal MA. “Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading”. *Engineering Structures*. **206**, 110125, 2020.
- [18] Holmquist TJ, Johnson GR. “A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures”, 2011.
- [19] Polanco Loria M, et al. “Numerical predictions of ballistic limits for concrete slabs using a modified version of the HJC concrete model”. *International Journal of Impact Engineering*. **35**, 290-303, 2008.
- [20] Barton D. “Determination of the high strain rate fracture properties of ductile materials using a combined experimental/numerical approach”. *International journal of impact engineering*. **30**, 1147-59, 2004.
- [21] Khorami M, Jamshidi M. “Processing of natural and artificial fibers in the production of cement sheets”. *Tehran: Road, Housing and Urban Development Research Center*; 1354.
- [22] Naniz A, Maesoumi A. “Fiber reinforced concrete”. Tehran, Iran: *Sirjan Nano Thread and Granule Company*; 1396.
- [23] Hosseini Moradi, S. A. Increasing concrete performance with synthesized graphene oxide nanoparticles and silica. *Concrete Research*, 2025; 18(1): 93-107. doi: 10.22124/jcr.2025.27381.1660
- [23] TAHASEEN S. “Reinforced Cement Concrete (RCC) Dome Design”. *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*. **3**, 39-45, 2015.