

ISSN: 2821-157X		https://www.jasd.khadu.ir	
	Journal of Aerospace Defense Volume 4 Issue 1 Spring 2025 Pages 1 – 21		
Research Paper; 			
Reinforcement of structures against explosion by providing suitable structural shape and determining the optimal type of the fibers in concrete mix Hassan Salehi¹, Mohammad Sepehri², Mohammad Amin Abbasi³ 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			
Article Information		Abstract	
Accepted: 2024/11/08 Received: 2025/04/20		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%.	
Keywords:			
<i>Concrete, Explosion, Hemisphere structure, Cubic structure, Strengthening</i>			
Corresponding Author: Hassan Salehi Email: hsalehi1362@yahoo.com			
HOW TO CITE: Hassan Salehi, Mohammad Sepehri, Mohammad Amin Abbasi. (2024). 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.			



فصلنامه علمی دفاع هوافضایی

شماره ۱ دوره ۴

بهار ۱۴۰۴

صفحات ۲۱ - ۱



مقاله پژوهشی؛

مقاوم سازی سازه ها در برابر انفجار از منظر پدافند غیر عامل با استفاده از ارائه شکل سازه های مناسب و مدل سازی عددی برای تعیین نوع الیاف بهینه در بتن

حسن صالحی^۱، محمد سپهری^۲، محمد امین عباسی^۳

۱. مدیر گروه مواد و پدافند غیر عامل، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)

۲. استادیار، دانشکده مهندسی کنترل، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)، تهران، ایران

۳. کارشناس ارشد عمران سازه، دانشگاه زند، شیراز، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

با توجه به اهمیت حوزه دفاعی وجود حملات تروریستی نیاز به تقویت سازه های حساس و حیاتی کشور به شدت ضروری است. در این مطالعه دو پارامتر مهم در مقاوم سازی سازه ها 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 سازه های مقاوم در برابر بار انفجار بررسی شده است. برای تعیین مصالح بتنی مقاوم در برابر انفجار از مشخصات مکانیکی و نمودار تنش کرنش مخلوط های بتنی ساخته شده در آزمایشگاه برای مدل سازی در نرم افزار المان محدود آباکوس استفاده شد. با انجام مدل سازی عددی، بتن با طرح های 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 می دهد. با تقویت بتن با این ترکیب از الیاف می توان تا حدود ۷۰ درصد میزان خرابی را در دال بتنی کاهش داد. جهت تعیین شکل سازه های مقاوم در برابر انفجار، دو شکل سازه ای مکعبی و نیم کره تحت بار انفجار قرار گرفتند. نتایج نشان داد که شکل سازه های نیم کره مقاومت بیشتری در برابر بار انفجار از خود نشان داده و با تغییر شکل سازه از مکعب به نیم کره، میزان آسیب سازه تحت بار انفجار به میزان ۴۹ درصد کاهش می یابد. همچنین دو سازه نیم کره 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 سازه ها به میزان ۲۶ درصد آسیب پذیری را کاهش می دهد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۸/۱۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱/۳۱

کلیدواژه ها:

بتن، انفجار،
شکل سازه،
الیاف،
مقاوم سازی

نویسنده مسئول:

حسن صالحی

ایمیل:

hsalehi1362@yahoo.com

استناد: حسن صالحی، محمد سپهری، محمد امین عباسی (۱۴۰۴). مقاوم سازی سازه ها در برابر انفجار از منظر پدافند غیر عامل با استفاده از ارائه شکل سازه های مناسب و تعیین نوع الیاف بهینه در بتن. *دفاع هوافضایی*، دوره ۴ (شماره ۱)، صفحه ۱-۲۴.

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^۱ 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^۲ 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^۳ 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^۴ 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^۵ 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^۶ 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 جابجایی 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.

مقاوم سازی 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

1 Hailin

2 Dapeng

3 Algassem

4 Luccioni

5 Li

6 Aoude

ساختمان تحت بار انفجار پرداخته است. این مطالعه نشان داد که در میان اتصال های مختلف پیشنهادی آیین نامه، قاب با اتصال گیردار فلنجی با چهار پیچ و بدون سخت کننده دارای کمترین جابجایی و بهینه ترین عملکرد در مقابل بار انفجار است. در مطالعه ای دیگر به ارائه راه کاری جهت کاهش میزان نفوذ بمب های سنگر شکن هدایت شونده در دو محیط خاک و بتن پرداخته شده است [۱۰]. در این پژوهش با پیشنهاد یک روش لایه بندی خاک و بتنی، نفوذ این کلاهک جنگی به عمق زمین تا نصف کاهش داده شده است.

یونگ شیانگ^۱ و همکاران [۱۱] به تجزیه و تحلیل عددی سازه های قوسی چند لایه متشکل از مواد مختلف در معرض بار انفجار پرداختند. نتایج نشان داد که سازه قوس دار متشکل از لایه های فوم بتن، بتن الیافی فولادی و فولاد، مقاومت خوبی در برابر انفجار دارد. ژو^۲ و همکاران [۱۲] به مدل سازی عددی سد قوسی تحت بار انفجار پرداختند. نتایج نشان داد که می توان رفتار غیرخطی سدهای بتنی را به طور رضایت بخشی با مدل سازی عددی پیش بینی نمود. یو^۳ و همکاران [۱۳] به مطالعه تجربی عملکرد ضد انفجاری سازه های قوسی بتن مسلح تقویت شده با پلی اوره پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت در برابر انفجار این سازه ها نسبت به سازه های قوسی بتن آرمه بیشتر است. چن^۴ و همکاران [۱۴] به مطالعه عددی پلنل درب دولایه مقاوم در برابر انفجار پرداختند. آن ها ثابت کردند که پانل با این فرم ساختاری جدید می تواند بار انفجاری بیشتری را تحمل کند.

صالحی [۱۵] با استفاده از مدل سازی در نرم افزار المان محدود ال اس داینا به بررسی عملکرد درب های 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 مطالعه ای دیگر صالحی و محمودی [۱۶] به بهبود عملکرد درب های ضد انفجار با تمرکز بر پیکربندی، چینش و مشخصات سخت کننده ها پرداختند. آن ها ثابت کردند که استفاده از سخت کننده غیر منشوری بجای مستطیلی با ثابت نگهداشتن وزن درب، باعث کاهش جابه جایی مرکز آن تا حدود ۳۰ درصد می گردد.

بررسی مطالعات پیشین نشان می دهد که در زمینه مقاوم سازی سازه ها 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 مقاوم سازی سازه ها بوده است. در این مطالعه جهت مقاوم سازی این سازه ها در مقابل بار انفجار، دو پارامتر بسیار مهم مورد بررسی قرار می گیرد. پارامتر اول، مقاوم سازی این سازه ها به کمک تقویت بتن استفاده شده در این سازه ها است. پارامتر دوم نیز تعیین شکل سازه ای مناسب

1 Yongxiang

2 Xue

3 Yue

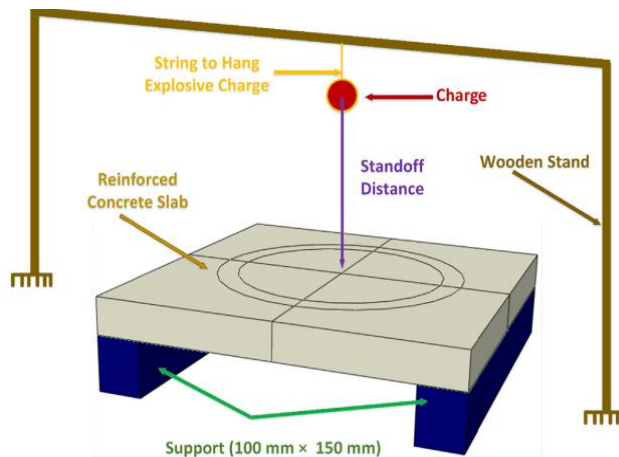
4 Chen

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 الیافی جهت مدل سازی در نرم افزار المان محدود آباکوس تعیین گردید. در نرم افزار مربوطه چند دال بتنی تقویت شده با الیاف به صورت منفرد و ترکیبی مدل سازی شد و بهترین مصالح بتنی مقاوم در برابر انفجار از بین طرح های مورد بررسی معرفی گردید. از میان هفت طرح پیشنهادی با الیاف های مختلف، پس از تعیین نوع الیاف بهینه، دو شکل سازه ای مکعبی و نیم کره بتن آرمه به کمک نرم افزار المان محدود مدل سازی شد. بدین ترتیب از میان دو شکل سازه ای پیشنهاد شده در این مطالعه، شکل سازه ای مناسب تر جهت کاهش میزان آسیب سازه در مقابل بار انفجار تعیین گردید. در نهایت با ترکیب شکل سازه ای مناسب و بهترین مصالح بتنی، عملکرد سازه مربوطه تحت بار انفجار مورد بررسی قرار گرفت.

۲- صحت سنجی مدل سازی و مطالعه آزمایشگاهی تعیین نوع الیاف بهینه در بتن

۲-۱- صحت سنجی

جهت صحت سنجی رفتار دال بتنی مسلح تحت اثر انفجار از پژوهش کومار^۱ و همکاران [۱۷] تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی و عددی دال های بتنی مسلح تحت بارگذاری انفجاری استفاده شد. در این پژوهش از یک دال بتنی با ابعاد یک در یک متر و ضخامت ۱۰ سانتی متری مطابق با شکل ۱ استفاده شد. آرماتورهای طولی و عرضی با فاصله ۱۰ سانتی متر نسبت به یکدیگر قرار گرفته اند و قطر این آرماتورها ۱۰ میلی متر است.



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

^۱ Kumar

کومار و همکاران از نرم افزار 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 می باشد، که این مورد نشان از دقت نرم افزار آباکوس در بحث انفجار دارد. فاصله ماده منفجره TNT تا دال بتنی ۱۰ سانتی متر 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 میلی متری ساخته شود، قطاع بیرونی با اندازه ۵ میلی متر و قطاع میانی به صورت گذار از ۱/۵ تا ۵ میلی متر افزایش یابد.

در این مطالعه از مدل رفتاری هلمکوئیست-جانسون-کوک^۱ برای مدل سازی رفتار بتن تحت اثر بار انفجار استفاده شده است [۱۷، ۱۸]. این مدل رفتاری برای مدل سازی هرچه بهتر بتن تحت اثر انفجار فرمول بندی شده تا بتواند وابستگی بتن به شدت فشار، بزرگی کرنش های ایجاد شده، آسیب و نرخ کرنش را در نظر بگیرد [۱۹]. چگالی بتن (ρ)، 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) به طور مستقیم از مطالعه کومار و همکاران [۱۷] برداشت شده و در جدول ۱ نمایش داده شده است.

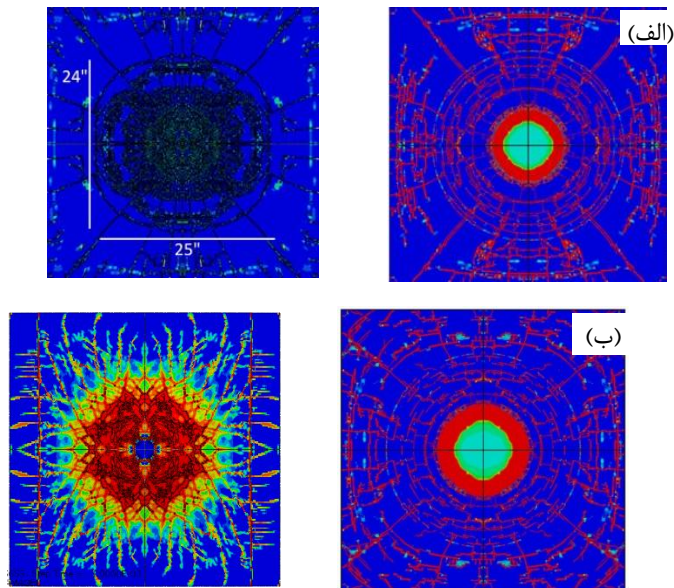
جدول ۱: پارامترهای HJC برای بتن [۱۷]

پارامتر مصالح	مقدار	پارامتر مصالح	مقدار
ρ (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	μ_{crush}	۰/۰۰۱
$(MPa) f_c$	۴۷	μ_{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

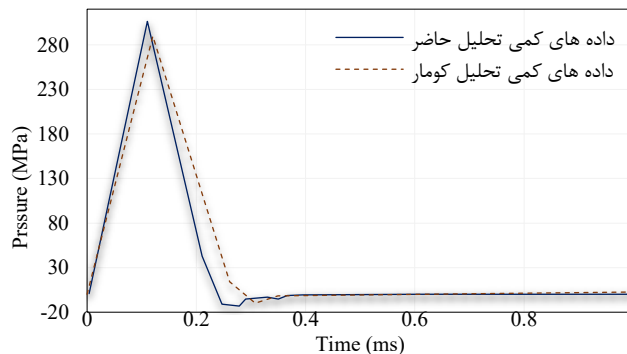
در جدول ۱، ρ چگالی، A مقاومت چسبندگی، B ضریب سخت شدن فشار، N توان سخت شدن فشار، C ضریب حساسیت نرخ کرن S_{MAX} ، حداکثر مقاومت معمولی بتن، G مدول برشی، T حداکثر فشار هیدرواستاتیک کششی، D_1 و D_2 پارامترهای آسیب، P_{crush} ، P_{lock} ، μ_{crush} ، μ_{lock} ، K_1 ، K_2 و K_3 ثابت های فشار در تقویت هستند. همچنین برای مدل سازی فولاد

^۱ 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 [۲۰، ۱۸]. 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 مخلوط های بتن حاوی

الیاف مختلف

بتن ماده ای شکننده با مقاومت کششی و ظرفیت کرنشی پایین است به همین دلیل برای برطرف کردن ضعف آن نیاز به تقویت دارد. یکی از روش های تقویت بتن استفاده از الیاف در بتن است که نقش آن بهبود خصوصیات مکانیکی و پل زدن بین ترک های بتن است. از الیاف های رایج مورد استفاده در بتن می توان به الیاف آزیست، فولادی، کرین، آراماید، پلی پروپیلن، آکرلیک، نایلون، پلی استر، پلی اتیلن، پلی الفین، الکل، شیشه، طبیعی و هیبریدی یا ترکیبی اشاره کرد [۲۱، ۲۲].

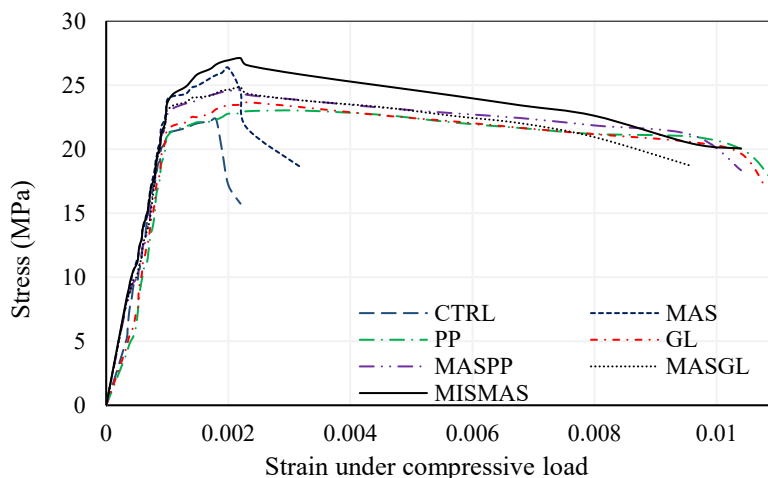
در این مطالعه از مشخصات مکانیکی و نمودار تنش کرنش مخلوط های بتنی ساخته شده در آزمایشگاه برای مدل سازی در نرم افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. خصوصیات مکانیکی این طرح های بتنی در جدول ۲ نمایش داده شده است. طرح CTRL نمونه کنترل و فاقد الیاف، MAS دارای الیاف فولادی بزرگ، PP دارای الیاف پلی پروپیلن، GL دارای الیاف شیشه، MASPP ترکیب الیاف فولادی بزرگ و الیاف پلی پروپیلن، MASGL دارای 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 مخلوط ها در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲: خصوصیات مکانیکی طرح های بتنی

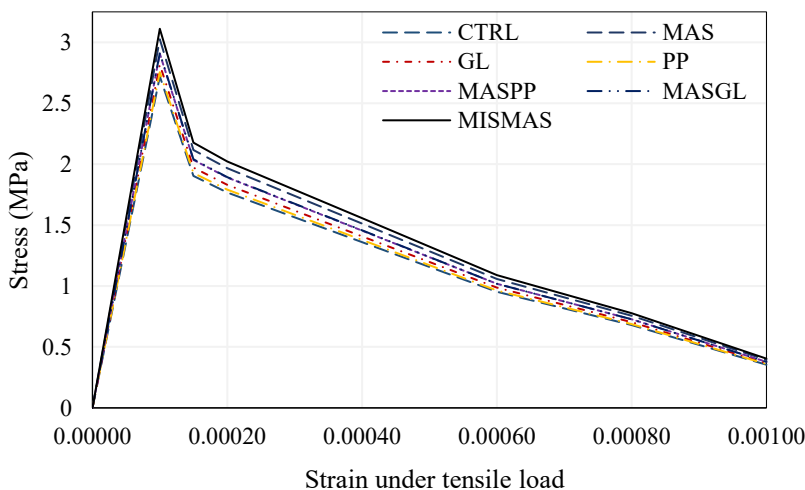
نمونه	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
CTRL	۲۲/۲	۲۲/۳۳	۲/۷۲
MAS	۲۴/۱۲	۲۶/۳۵	۳/۰۲
PP	۲۲/۵۴	۲۳/۰۱	۲/۷۵
GL	۲۲/۸۶	۲۳/۶۶	۲/۸۱
MASPP	۲۳/۳۱	۲۴/۶۱	۲/۹۰
MASGL	۲۳/۴۲	۲۴/۸۴	۲/۹۱
MISMAS	۲۴/۴۷	۲۷/۱۱	۳/۱۱

برای مدل سازی نمونه های بتنی در نرم افزار آباکوس، از خصوصیات مکانیکی بتن که در جدول ۲ ارائه شده است استفاده گردید. از آنجایی که برای بالا بردن دقت مدل سازی، علاوه بر مشخصه های فوق نیاز به معرفی نمودار تنش - کرنش بتن در حالت های کششی و فشاری نیز وجود دارد، بنابراین آزمایش های مربوط به آن ها نیز انجام و داده های مربوط به آن ها حاصل شد. شکل های ۴ و ۵ نشان دهنده رفتار تنش نمونه های 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

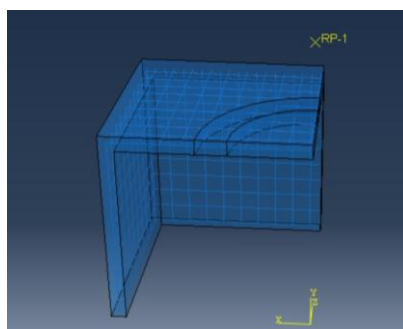
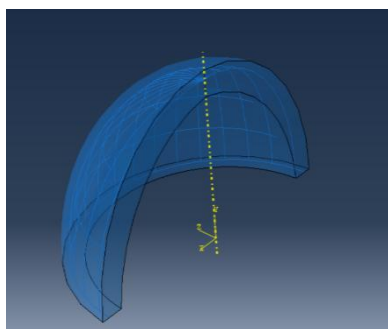
بر اساس شکل‌های ۴ و ۵، بیشینه مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها مربوط به مخلوط بتنی ساخته شده با الیاف ترکیبی فولاد ماکرو-فولاد میکرو است. زیرا در این نمونه، الیاف فولادی بلند و کوتاه با هم ترکیب شده و به شکل مناسبی جلوی شروع و گسترش ترک را می‌گیرند.

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 می باشند، به طوری که نمونه های دارای الیاف پلی پروپیلن، شیشه و ترکیب الیاف فولادی ماکرو- میکرو به ترتیب دارای بیشترین شکل پذیری می باشند

۲-۳- مدل سازی سازه های با شکل های متفاوت برای مقاوم سازی در مقابل بار انفجار

برای بررسی تأثیر شکل سازه بر مقاومت سازه ها در مقابل بار انفجار، دو شکل سازه ای مکعبی و نیم کره به کمک نرم افزار المان محدود شبیه سازی شدند. قطر نیم کره بتنی برابر با ۲ متر و ضخامت دال بتنی آن ۱۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. جایگذاری آرماتورها با زاویه ۱۰ درجه و فاصله ۱۵ سانتی متری نسبت به یکدیگر مطابق با مطالعه طاهاسن^۱ [۲۳] است. قطر آرماتورهای مصرفی نیز ۱۰ میلی متر می باشد. در شکل ۶ هندسه مدل و نحوه آرایش آرماتورهای سازه های نیم کره و مکعبی نشان داده شده است. جهت مدلسازی سازه مکعبی دقیقاً همانند طراحی دال های بتن آرمه عمل کردیم. همه اضلاع سازه مکعبی بتنی برابر ۲ متر و ضخامت دال بتنی آن برابر با ۱۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. قطر آرماتورهای استفاده شده ۱۰ میلی متر و آرماتورهای طولی و عرضی با فاصله ۱۰ سانتی متر نسبت به یکدیگر قرار گرفتند. مدل رفتاری بتن و فولاد هر دو شکل سازه ای دقیقاً همانند طراحی دال های بتن آرمه ارائه شده در بخش قبل می باشد.



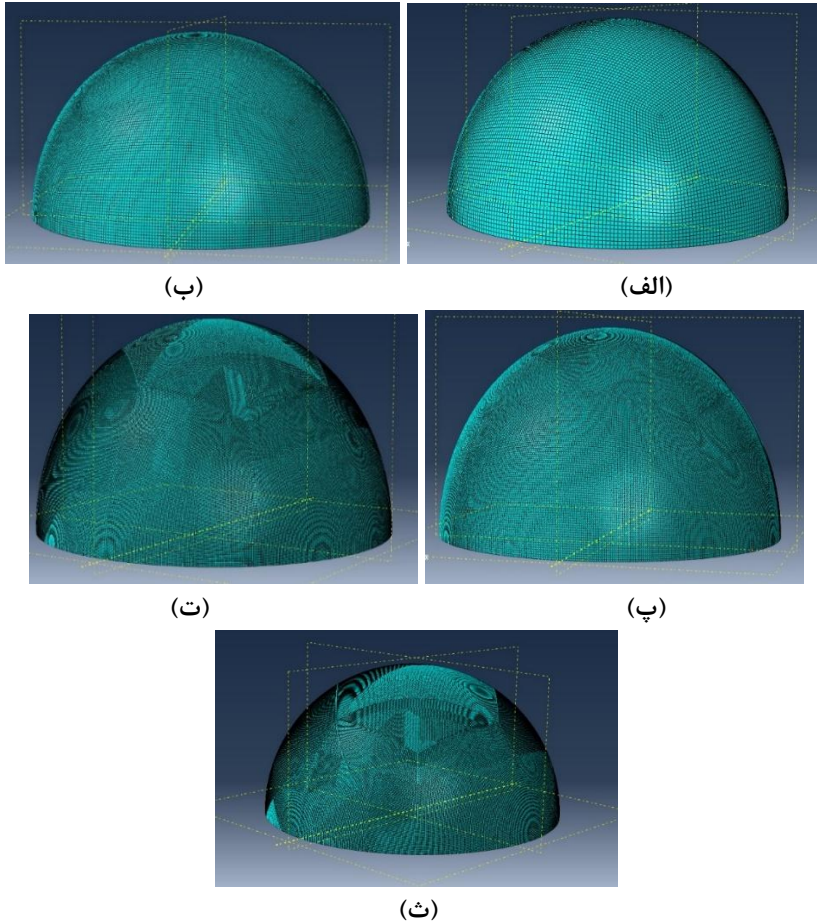
شکل ۶: مدل سازی آرماتورها

۲-۴- تحلیل حساسیت مش

جهت بارگذاری بار انفجار بر هر دو شکل سازه ای، 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 مدل ها 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 میلی متر و قطاع میانی به صورت گذار از ۵ تا ۱/۵ میلی متر کاهش یافت. مش بندی مدل حاضر بر اساس المان های سه بعدی بوده است به طوری که در مش بندی مدل از المان های مکعبی شش وجهی

^۱ TAHASEEN

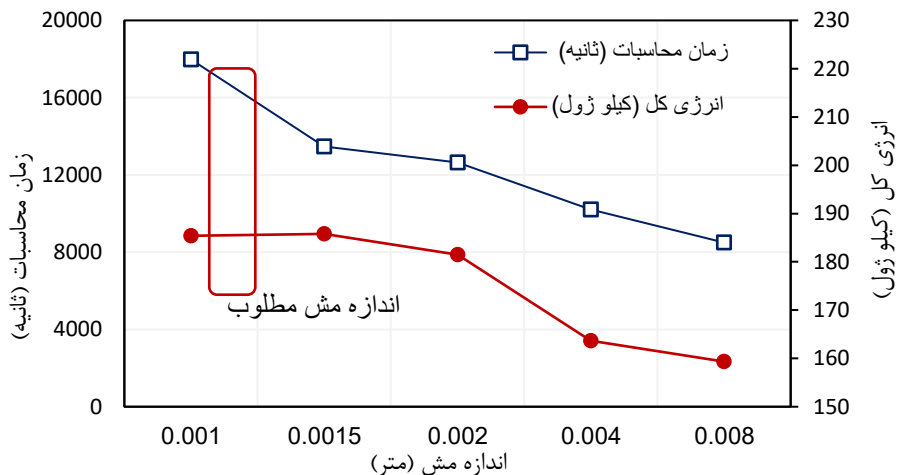
هشت گرهی و در ناحیه گذار نیز از المان‌های گوه‌ای پنج وجهی شش گرهی استفاده شد. برای مش بندی سازه نیم کره بتنی نیز از مش بندی ۱/۵ میلی‌متر استفاده شد. المان انتخابی برای مش بندی سازه نیم کره بتنی، المان C3D8R خطی با ۸ گره است. در شکل (۷) به صورت شماتیک اندازه شبکه‌های مش مورد استفاده در سازه نیم کره بتنی 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) ۱/۵ 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 ۱/۵ 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 میلی متر بود هزینه زمانی انجام تحلیل بسیار افزایش یافت در حالی که تقریباً به همان پاسخ مرحله قبل رسیدیم. بنابراین می توان گفت اندازه مش ۱/۵ میلی متر برای انجام این پژوهش بسیار مناسب است.



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

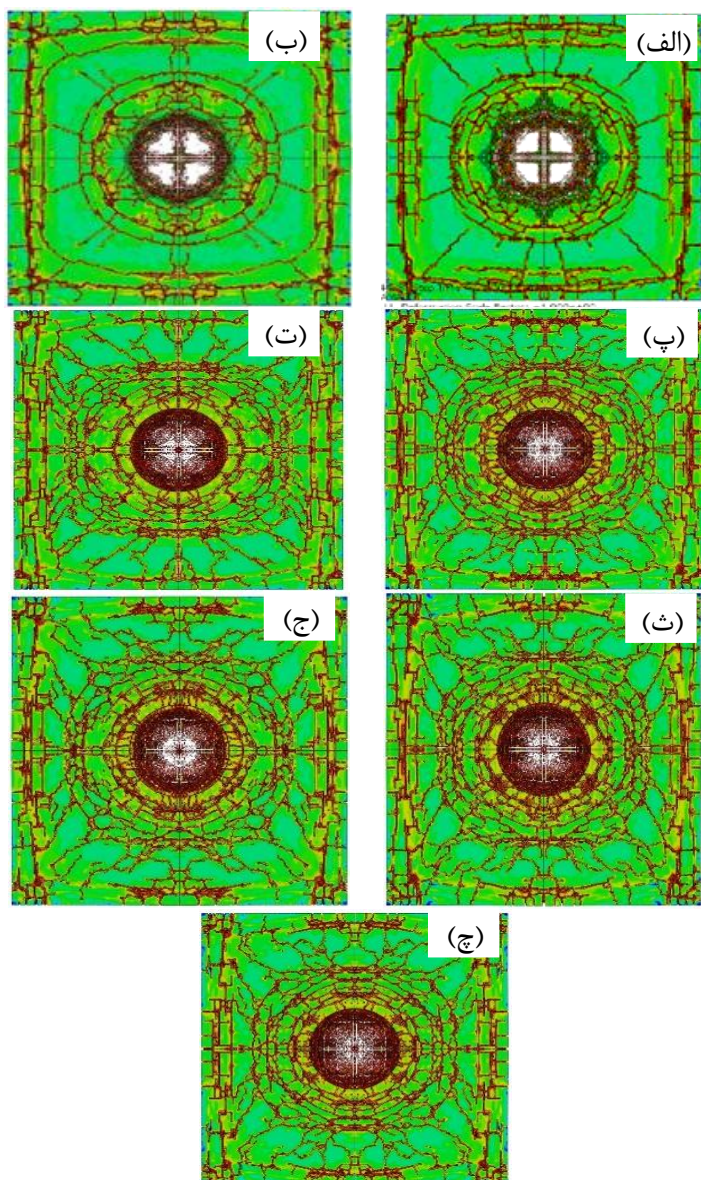
۳- تحلیل نتایج

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 دال های بتنی ساخته شده با طرح مخلوط های مختلف

به کمک روش ارائه شده توسط کومار و همکاران و وارد کردن خصوصیات رفتاری ۷ طرح بتنی در نرم افزار مطابق با جدول ۲ و نمودار شکل های ۴ و ۵، دال های بتن آرمه تحت بار انفجار شبیه سازی 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، قلوه کنی در فشار اتفاق افتاده است. همچنین رشد ترک های عمودی از وجه بالایی تا وجه پایینی و رشد ترک های افقی به صورت گسترده تری در این مدل اتفاق افتاده است که در شکل ۹-الف به وضوح نشان داده شده است. بنابراین سازه های بتن آرمه بدون تقویت الیافی رفتاری ترد از خود نشان می دهند و به سرعت در مقابل بار انفجار دچار آسیب می شوند و مناسب برای ساخت سازه های حساس و حیاتی نیستند.

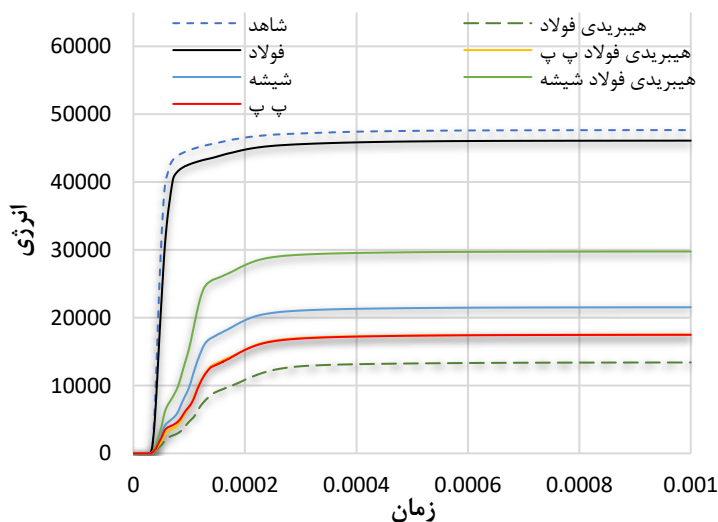


شکل ۹: تأثیر انفجار بر نمونه دال ساخته شده با بتن (الف) شاهد (ب) حاوی الیاف فولاد ماکرو (پ) الیاف شیشه (ت) الیاف پلی پروپیلن (ث) ترکیب الیاف فولاد ماکرو-پلی پروپیلن (ج) ترکیب الیاف فولاد ماکرو-شیشه (چ) ترکیب الیاف فولاد ماکرو-فولاد میکرو

با اعمال بار انفجار بر دال بتنی حاوی الیافی فولادی ماکرو مشاهده شد که در قسمت میانی نمونه قله‌کنی 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 شکل پذیری بتن، سازه های ساخته شده با این نوع بتن نیز در مقابل انفجار مقاوم نخواهند بود.

مدل های رفتاری دال های بتن آرمه الیافی حاوی شیشه، پلی پروپیلن، ترکیب الیاف فولاد ماکرو- پلی پروپیلن، الیاف فولاد ماکرو- شیشه و الیاف فولاد ماکرو- فولاد میکرو تحت بار انفجار به ترتیب مطابق با شکل های ۹-پ تا ۹-چ نمایش داده شده است. با تحلیل انفجار روی دال های بتن آرمه الیافی مشاهده شد که در قسمت میانی مدل ها قله کنی بتن نسبت به طرح های شاهد و فولادی کمتر اتفاق افتاده است. اما از طرفی دیگر رشد ترک های عمودی از وجه بالایی تا وجه پایینی و رشد ترک های افقی در این مدل ها 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 می دهد و در کشش مقاومت بیشتری داشته و تا شعاع بیشتری تغییر شکل ها اتفاق می افتد. در حالی که دو طرح بتن شاهد و فولادی منفرد از خود مقاومتی در برابر کشش نشان نمی دهند. بنابراین این طرح های بتنی به علت میزان آسیب کمتر (شکل پذیری زیاد) بتن هایی مناسب برای طراحی سازه های حساس و حیاتی می باشند. همچنین از میان تمامی طرح ها، 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 بهره گیری از بتن این طرح ها در ساخت سازه ها می توان میزان خسارت های جانی و مالی را به حداقل رساند. نمودار میزان آسیب دال های بتن آرمه ساخته شده با طرح مخلوط های مختلف بتن در برابر بار انفجار در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



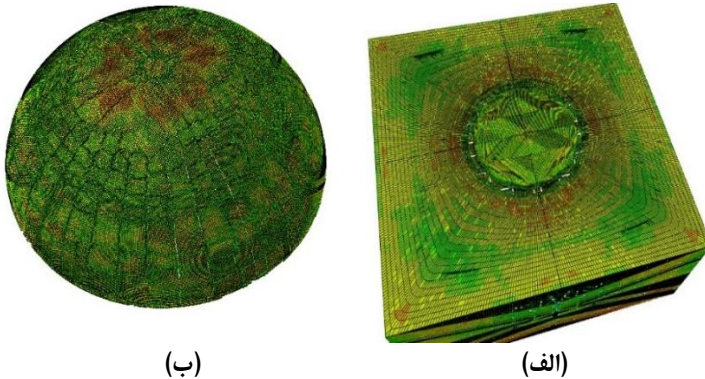
شکل ۱۰: میزان آسیب دال های بتن آرمه در برابر بار انفجار

مطابق با شکل ۱۰ کمترین میزان آسیب دال های بتن آرمه تحت بار انفجار مربوط به دال بتن آرمه الیافی ساخته شده با الیاف ترکیبی فولاد ماکرو- فولاد میکرو می باشد. پس با استفاده از این طرح مخلوط بتن می توان 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 سازه‌ای نیم کره و مکعبی

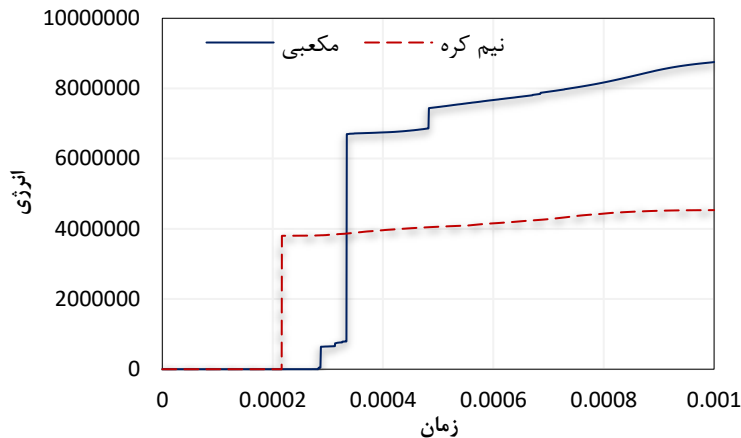
پس از شبیه‌سازی ۷ مدل دال بتن آرمه الیافی و تعیین بهترین الیاف جهت کاهش میزان آسیب وارد به سازه در برابر بار انفجار، در این بخش شکل سازه‌ای مناسب جهت کاهش میزان آسیب در برابر انفجار مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به این که اکثر سازه‌ها با شکل مکعبی و سطوحی صاف ساخته می‌شوند، بنابراین دو شکل سازه‌ای، مکعبی (سازه‌های متعارف) و نیم کره 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 نیم کره 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 نیم کره 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 نیم کره نسبت به مکعبی بسیار اندک بوده و مناسب برای ساخت سازه‌های حساس و حیاتی می‌باشد.



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

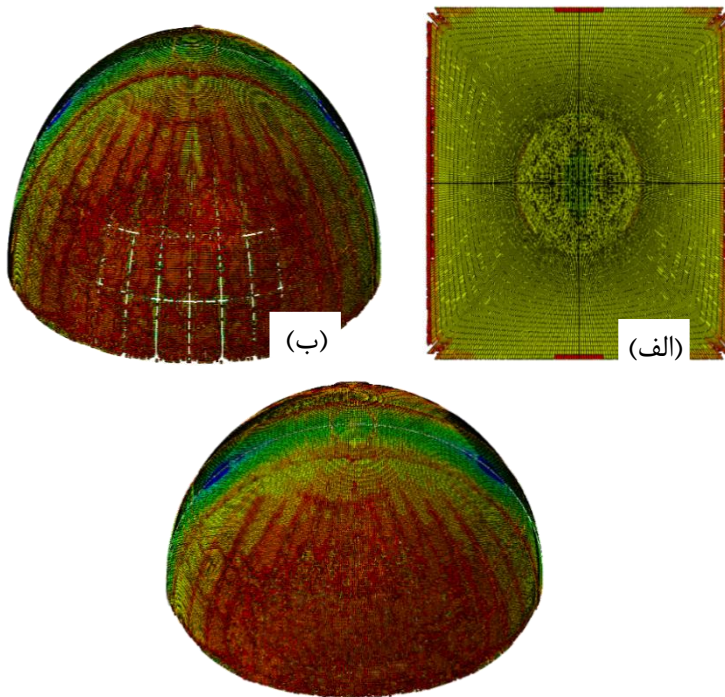
برای انجام مقایسه و تجزیه و تحلیل بهتر نتایج، میزان آسیب سازه نیم کره و مکعبی ساخته شده با بتن شاهد در برابر بار انفجار به صورت نموداری در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که میزان آسیب سازه مکعبی بتن آرمه به میزان چشمگیری بیشتر از سازه نیم کره بتن آرمه می‌باشد. پس با تغییر شکل سازه‌ای از مکعبی به نیم کره 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 نیم کره 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 نیم کره تحت بار انفجاری معادل با ۴۵۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۳۵ متری مدل سازی 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 نیم کره یک بار با بتن معمولی (شاهد) و یک بار با بتن حاصل از بهترین طرح مخلوط مرحله قبل یعنی بتن الیافی ترکیبی فولاد ماکرو فولاد میکرو مدل سازی شد. بدین ترتیب تأثیر همزمان الیاف و شکل سازه‌ای تحت بار انفجار بررسی می‌گردد. جهت شبیه سازی 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 قله‌کشی 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.

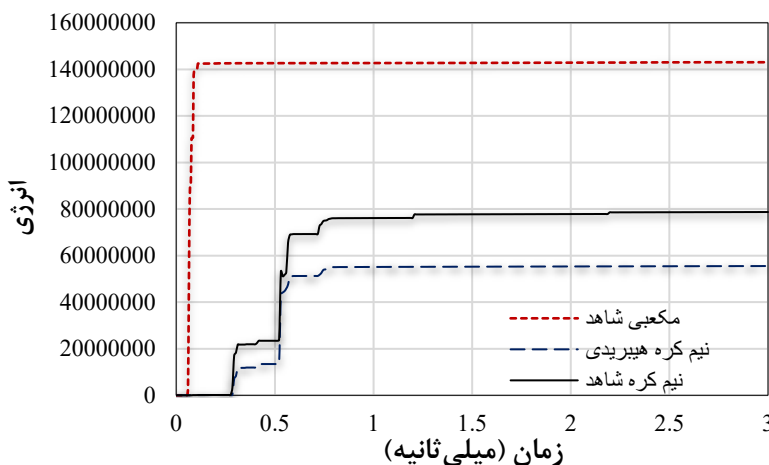


(پ)

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

بر اساس شکل ۱۳-ب، سازه نیم کره 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 نیم کره ساخته شده با بتن الیافی ترکیبی فولاد ماکرو-فولاد میکرو به علت شکل مناسب و مصالح بهتر، نسبت به نمونه‌های مکعبی و نیم کره ساخته شده با بتن شاهد دچار خرابی کمتری شده است. در نتیجه در مواقع بحرانی و بروز انفجار، سازه‌های نیم کره 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 نیم کره ساخته شده با بتن شاهد و ترکیبی است. در واقع با تغییر شکل سازه‌ای از مکعبی به نیم کره ساخته شده با بار انفجار به میزان ۴۹ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با مقاوم‌سازی سازه نیم کره به کمک الیاف ترکیبی فولاد ماکرو- فولاد میکرو می‌توان ۲۶ درصد میزان خسارت سازه را نسبت به سازه نیم کره ساخته شده با بتن شاهد بهبود بخشید.



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

۴-تشکر و قدردانی

به پاس الطاف بی دریغ و همت والایان، صمیمانه ترین سپاس ها را تقدیم می دارم و قدردان بزرگواری و فضل شما هستم.

۵-تعارض منافع

نویسنده (گان) اعلام می دارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این، موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل داده ها، 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 می دهد.

۷-منابع (از نرم افزار Endnote)

مراجع می تولند شامل کتاب ها، مقالات مجلات علمی، اختراعات ثبت شده، مقالات کنفرانس ها، پایان نامه ها، گزارش های فنی، کارگاه های آموزشی، وبسایت های معتبر و دیگر منابع قابل استناد بوده و از ارجاع به گزارش های منتشر نشده، مقالات پذیرفته نشده و دیگر منابع غیرقابل استناد باید خودداری نمود.

۸- نتیجه گیری

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.

۹-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. (2025). Increasing concrete performance with synthesized graphene oxide nanoparticles and silica. *Concrete Research*, *18*(1), 93-107. doi: 10.22124/jcr.2025.27381.1660.
- [24] TAHASEEN S. "Reinforced Cement Concrete (RCC) Dome Design". *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*. **3**, 39-45, 2015.