

ارزیابی آزمایشگاهی ظرفیت گنبد‌های بتنی حاوی الیاف فولادی تحت اثر بار ضربه

رضا گراوند^۱، علیرضا مرتضایی^{۲*}، احمد عزیزی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- rezageravand72@gmail.com

۲- al.mortezaei@iaua.ac.ir

۳- aazizi46@yahoo.com

چکیده:

در این مقاله، خصوصیات مکانیکی و ضربه‌ای گنبد‌های بتنی با الیاف فولادی بررسی شده است. هدف اصلی از این مقاله بررسی و مقایسه پارمترهای افزایش درصد فولادی و افزایش ضخامت گنبدها بر مقاومت ضربه‌ای آنها تحت اثر بار ضربه وزنه افتان است. در این پژوهش درصد الیاف‌های ۰، ۵/۰، ۱ و ۱/۵، همچنین گنبد‌های با ضخامت ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. اکثر پژوهش‌های صورت گرفته تاکنون بر روی دال‌های بتنی بوده است و با توجه به اهمیت گنبد‌ها به دلیل پوشش فضاهای وسیع این مهم به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داد که الیاف فولادی می‌تواند مقاومت گنبد‌ها را در برابر ضربه افزایش دهد. همچنین اثر افزودن الیاف فولادی و ضخامت گنبد‌ها نشان داد که افزایش الیاف فولادی و ضخامت گنبد‌ها به طور قابل توجهی جذب انرژی افزایش می‌یابد که در گنبد با الیاف ۱/۵٪ و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر قابل مشاهده است.

واژگان کلیدی:

گنبد، ضربه، خرابی، جذب انرژی، الیاف فولادی

Experimental evaluation of the capacity of concrete domes containing steel fibers under impact load

Reza Geravand¹, Alireza Mortezaei^{2*}, Ahmad Azizi³

1- Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Semnan branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

rezageravand72@gmail.com

2- Professor, Department of Civil Engineering, Semnan branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

al.mortezaei@iau.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Semnan branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

aazizi46@yahoo.com

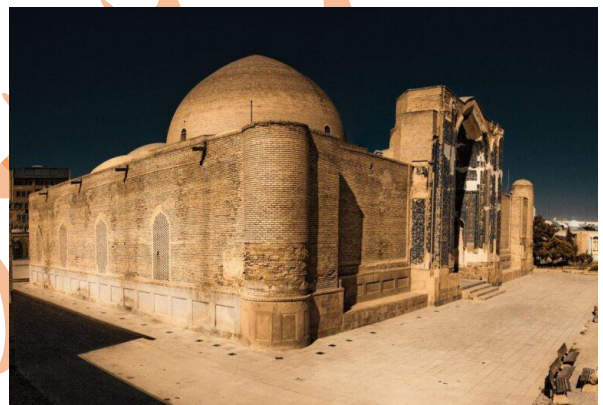
Abstract:

The arch is a fundamental and aesthetic component of Iranian architecture, integral to the stability and beauty of buildings since ancient times. Modern domes often cover large spaces without internal supports, with their shape playing a vital role in handling gravitational and lateral loads. Domes can also be subjected to shock loads from events like earthquakes, impacting their structural integrity. This study explores the mechanical and impact properties of concrete domes reinforced with steel fibers. While most previous research has focused on the impact effects on concrete slabs, this study shifts the focus to concrete domes. It examines how different percentages of steel fibers (0, 0.5, 1, and 1.5) and varying dome thicknesses (50, 75, and 100 mm) affect impact resistance. Steel fibers enhance the compressive strength, crack control, and overall durability of concrete. The research involved compressive, tensile, and bending strength tests, as well as an impact test using a 10 kg steel weight dropped from a height of 3260 mm. Abaqus software was employed to compare numerical simulations with laboratory results, using models from Popovich for compression and Shima for tensile behavior. The impact test assessed three key parameters: the number of impacts to create the first effective crack, the number of impacts until dome failure, and the energy absorbed by the dome. Findings revealed that steel fibers significantly improve the impact resistance and energy absorption of concrete domes. A 100 mm thick dome with 0.5% steel fibers absorbed 33% more energy than a 50 mm dome without fibers. When the fiber content was increased to 1% and 1.5%, energy absorption rose by 60% and 78%, respectively. Similarly, increasing dome thickness to 75 mm with 0.5% fibers resulted in a 67% increase in energy absorption compared to the control sample without fibers. For domes with 1% and 1.5% fibers, energy absorption increased by 80% and 82%, respectively. The study concluded that both the addition of steel fibers and increased dome thickness substantially enhance the impact resistance of concrete domes. The most significant improvements were observed in domes with a 100 mm thickness, where the number of impacts required to cause damage increased by 68% and 64% compared to 50 mm and 75 mm thick domes with 1.5% fiber content. This highlights the crucial role of both fiber reinforcement and thickness in improving dome resilience against impacts.

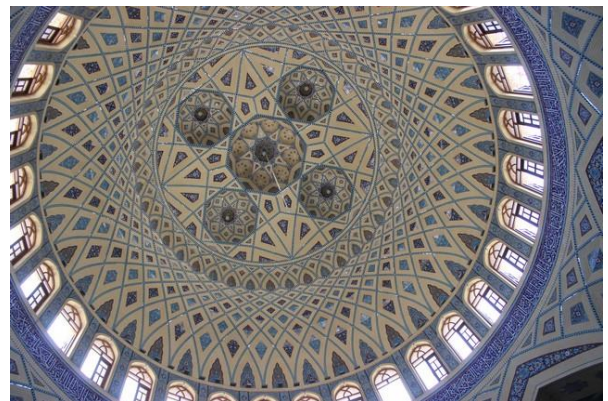
Keywords: Dome, Impact, Failure, Energy absorption, Steel fiber.

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

یکی از عناصر بسیار مهم در معماری ایران، قوس است که در طول تاریخ به وسیله معماران و سازندگان ایرانی به کار گرفته شده است. قوس، یکی از عناصر اصلی و زیبای معماری ایرانی است که از دوران باستان تا به امروز نقش مهمی در زیبایی و پایداری ساختمان‌ها داشته است. امروزه از گنبدها معمولاً برای پوشش فضاهای وسیع و بدون استفاده از تکیه‌گاه داخلی استفاده می‌شود. در این طراحی‌ها، فرم پوسته خارجی گنبد از جهت رویکرد معماری، ظرفیت باربری ثقلی و بارهای جانبی و ضربه‌ای را به طور بسیار حیاتی تأثیر می‌گذارد [۱] و [۲]. پیدایش گنبد در ساختمان را می‌توان از هزاره دوم و ساخت آن را به ایرانیان نسبت داد چراکه طاق، گنبد و قوس در ایران پیشینه کهن داشته است [۳]. در شکل ۱ نمونه‌ای از گنبد سنتی و معاصر آورده شده است.



a

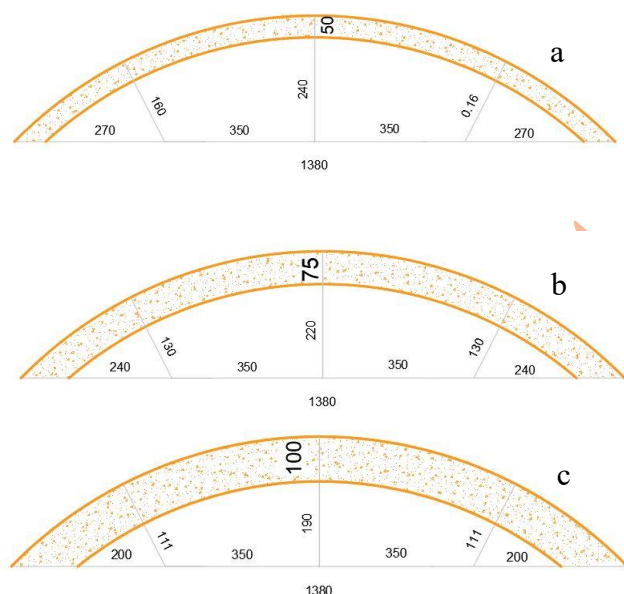


b

شکل ۱: (a) گنبد مسجد کبود (b) گنبد مصلاي امام اردکان

کروی، با مبنای الاستیسیته روش P-Riz را ارائه دادند. پارامترها با شرایط تکیه‌گاهی مختلف مورد بررسی قرار گرفت و فرمول پیشنهادی توانست فرکانس و شکل‌های مختلف سازه را با اطمینان محاسبه نماید [۴]. حجازی و همکارش، به بررسی پارامتریک گنبدهای بتنی با توجه به شکل مقطع گنبد، حضور یا عدم حضور بازشوها در داخل گنبد، نوع زیرسازه و شرایط تکیه‌گاهی به عنوان پارامترهای متغیر، در مواجهه با بار وزن، باد، حرارت و زلزله پرداختند. ایشان از نتایج تحلیل دریافتند که اثر باد تعیین‌کننده نمی‌باشد. اما اثر زلزله و حرارت در سازه بسیار مهم می‌باشد [۵]. فریرا و همکارانش، به تجزیه و تحلیل اثر توالی‌های انباشته شده بر پاسخ ضربه پوسته‌های کامپوزیتی بافته شده نیمه استوانه‌ای پرداختند. ایشان دریافتند که افزایش سختی خمشی ضربه‌ای منجر به افزایش حداکثر نیرو می‌شود که با کاهش حداکثر جابجایی، زمان تماس و انرژی تلف شده همراه است [۶]. نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که بتن غیر مسلح در مواجهه با بارهای ضربه‌ای، دارای نواقصی است [۷]. که برای افزایش مقاومت بتن در برابر ضربه از الیاف‌های طبیعی و مصنوعی می‌توان استفاده نمود [۸]. مستالی و همکاران به بررسی تأثیر به کار بردن الیاف فولادی در بالا بردن مقاومت دال‌های بتنی در مقابل ضربه پرداختند. ایشان دریافتند که افزایش مقاومت فشاری ممکن است باعث افزایش عمق نفوذ گلوله و ناحیه تخریب شده جلوی نمونه شود، در حالی که افزایش مقاومت کششی ممکن است باعث کاهش عمق نفوذ گلوله و ناحیه تخریب شده جلوی نمونه گردد [۹]. امیدی‌نسب و همکاران به بررسی خصوصیات مکانیکی و ضربه‌ای بتن‌های کامپوزیتی توانمند خود تراکم پرداختند. ایشان دریافتند که الیاف فولادی پارامتر بسیار مهمی در افزایش مقاومت ضربه‌ای دال‌ها می‌باشد [۱۰]. مرتضایی و ابراهیمیان اثر اندازه نمونه بر مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن‌های حاوی الیاف فولادی را مورد ارزیابی قرار دادند ایشان دریافتند که مقاومت نمونه‌ها با حضور الیاف تا ۳۵٪ افزایش یافت و ضرایب تبدیل برای نمونه‌های الیافی ارائه گردید [۱۱]. دیانی و همکاران یک مطالعه تجربی انجام دادند که در آن تأثیر الیاف بر روی ستون‌های مربع کوتاه کامپوزیت سیمانی مهندسی شده را بررسی کردند. ایشان دریافتند که نتایج نشان داد که افزایش اصطکاک الیاف و نسبت ابعاد برشی طول ناحیه پلاستیک و شکل‌پذیری را به ترتیب حداقل ۵۰٪ و ۱۰۰٪ افزایش می‌دهد [۱۲]. بوشهریان و گلستان با بررسی الیاف فلزی تولید داخل دریافتند که استفاده از الیاف با درصد پایین تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها ندارد اما درصدهای بالاتر باعث افزایش مقاومت فشاری

بوده است. خاکستر بادی استفاده شده کلاس F و آب مصرفی، آب آشامیدنی شهر سمنان می‌باشد. الیاف فولادی مورد استفاده از نوع الیاف فولادی دوسر قلاب با طول ۳۵ میلی‌متر [۱۸] و قطر ۰/۳۸۷ میلی‌متر است که مشخصات این الیاف در جدول (۳) نشان داده شده است. مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش عبوری الک نمره ۸ می‌باشد. برای ایجاد خاصیت خودتراکمی در بتن از فوق روان‌کننده Carboxal SRF521، به میزان ۰/۵ الی ۱/۲ درصد وزن سیمان استفاده شد. تصاویر مصالح مورد مصرفی در این پژوهش در شکل (۳) آورده شده است.



شکل ۲: گنبد‌های ساخته شده با ضخامت (a) ۵۰ (b) ۷۵ (c) ۱۰۰ میلی‌متر

جدول ۱: مشخصات گنبد‌ها و میزان درصد مصرف الیافی

Fibers (%) content	Thickness (mm)	Sample
0	50	Dome-01
0.5	50	Dome-02
1	50	Dome-03
1.5	50	Dome-04
0	75	Dome-05
0.5	75	Dome-06
1	75	Dome-07
1.5	75	Dome-08
0	100	Dome-09
0.5	100	Dome-10
1	100	Dome-11
1.5	100	Dome-12

می‌گردد [۱۳]. Song و Hwang افزودن الیاف فولادی به بتن با مقاومت بالا (HSC) باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی آن مانند مقاومت فشاری، کششی، مدول گسیختگی و شاخص چقرمگی می‌شود [۱۴]. Wang و همکاران در یک مقاله مروری بر خواص شکست SFRC و مدل‌های شکست مختلف را بررسی کردند و دریافتند که با افزایش درصد الیاف فولادی، خواص شکست به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد [۱۵]. با توجه به اینکه اکثر پژوهش‌های صورت گرفته بر روی گنبد‌ها تحت اثر زلزله و باد بوده است و همچنین مقاوم‌سازی نمونه‌ها بر روی دال‌های بتنی می‌باشد در این پژوهش اثر ضربه بر گنبد‌ها که می‌تواند بر اثر تخریب سازه‌ها تحت اثر زلزله باشد مورد بررسی قرار گرفته و با الیاف فولادی مقاوم‌سازی شده است.

۲- روش ساخت نمونه‌ها

در این پژوهش تعداد ۱۲ عدد گنبد بتنی با ضخامت‌های ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شد. که در شکل (۲) نشان داده شده است. از هر کدام ضخامت‌های ساخته شده ۳ عدد گنبد بدون الیاف فولادی، ۳ عدد دارای ۰/۵ درصد الیاف فولادی، ۳ عدد دارای ۱ درصد الیاف فولادی و ۳ عدد دارای ۱/۵ درصد الیاف فولادی ساخته شد. مشخصات گنبد‌ها و درصد الیاف فولادی در جدول (۱) آورده شده است. همچنین در این تحقیق ۱۲ عدد نمونه فشاری مکعبی با ضلع ۱۵۰ میلی‌متر، ۱۲ عدد نمونه کششی استوانه‌ای با ابعاد ۱۵۰ × ۳۲۰ میلی‌متر و ۱۲ عدد تیرخمشی با ابعاد ۶۰ × ۸۰ × ۳۲۰ میلی‌متر با درصد‌های مختلف الیاف فولادی ساخته نشان داده شده در جدول (۲) ساخته شده است. در ساخت نمونه‌ها از سیمان پرتلند تیپ ۲ شاهرود بر اساس استاندارد ASTM C150 استفاده شده است [۱۶]. دانه بندی ریز دانه مطابق استاندارد ASTM C-33 انتخاب می‌شود [۱۷]. حداکثر اندازه اسمی شن‌های مصرفی ۱۹ میلی‌متر برای شن بادامی و ۱۲/۵ میلی‌متر برای شن نخودی می‌باشد. دانه بندی و حداکثر اندازه سنگدانه نه تنها بر نسبت ترکیب سنگدانه‌ها، بلکه بر سیمان و آب مورد نیاز، کارایی، قابلیت پمپاژ، تخلخل، جمع شدگی، دوام و یکنواختی بتن نیز تأثیر می‌گذارد. مشخصات سنگدانه‌های ریز و درشت طبق روش‌های تست D2419، C136، C128، C127، C33، C29 از استاندارد ASTM تعیین شده است. لازم به ذکر است که مصالح شن و ماسه مصرفی در ساخت نمونه‌های پر مقاومت به صورت خشک

جدول ۲: خصوصیات الیاف فولادی مورد استفاده

Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Density (kg/m ³)	Length-to-diameter ratio	Diameter (mm)	Length (mm)	Fiber type
2730	210	7870	91.14	0.387	35	Steel



b



a

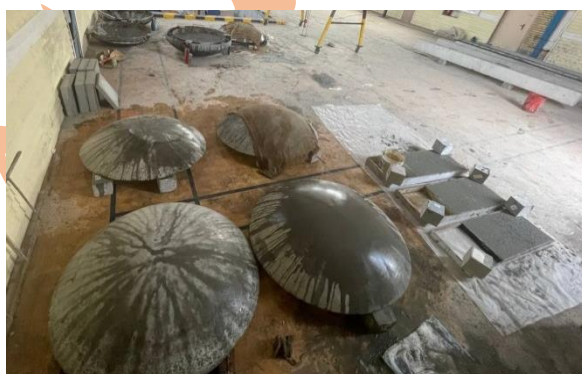


d



c

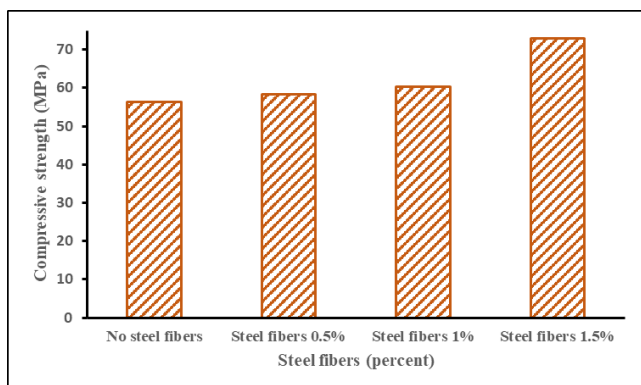
شکل ۳: مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها (a) سیمان (b) شن (c) الیاف فولادی (d) روان‌کننده



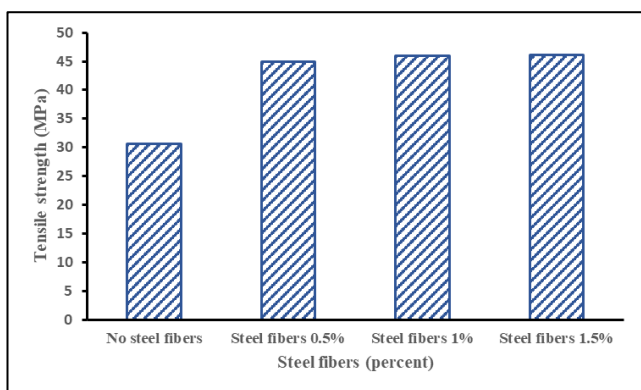
شکل ۴: مراحل ساخت نمونه‌ها

۳- انجام آزمایش‌ها

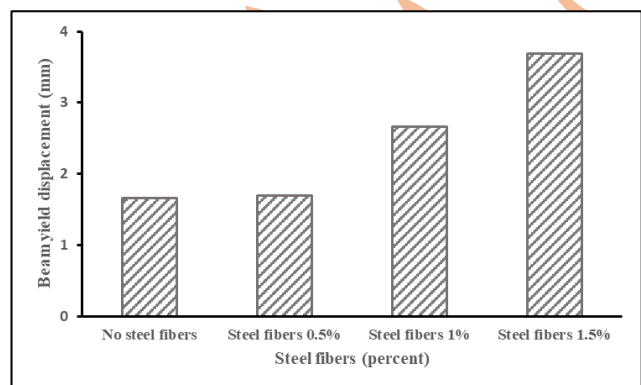
به منظور بررسی تأثیر الیاف فولادی بر روی بتن‌ها آزمایش قیف V، جعبه L، جعبه U، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی نمونه‌ها انجام شده است. در ادامه در شکل‌های ۵ الی ۱۰ نتایج آزمایش‌ها نشان داده شده است.



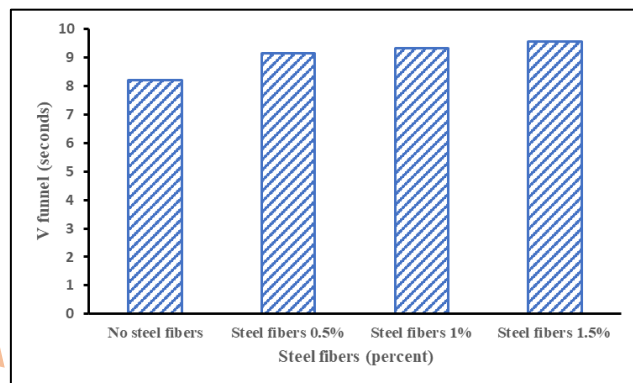
شکل ۸: نتایج آزمایش مقاومت فشاری



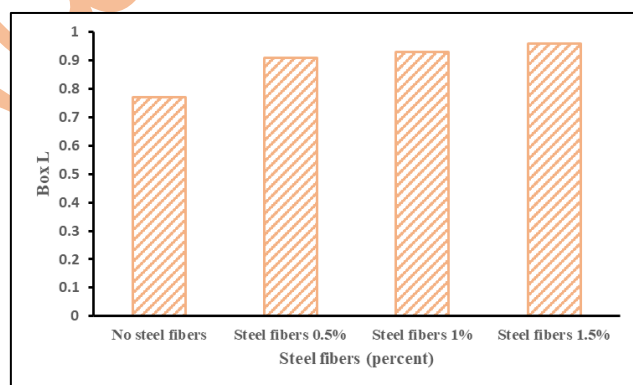
شکل ۹: نتایج آزمایش مقاومت کششی



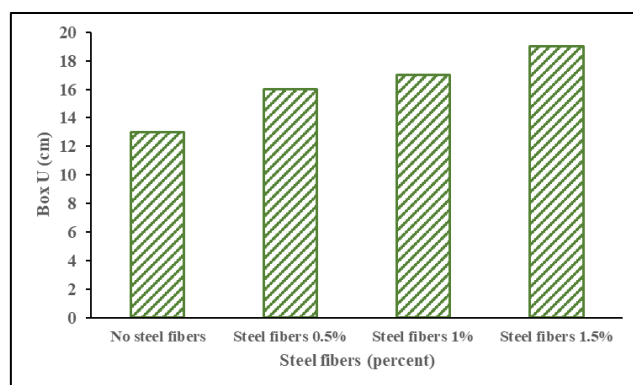
شکل ۱۰: نتایج آزمایش خمشی تیر



شکل ۵: نتایج آزمایش قیف V

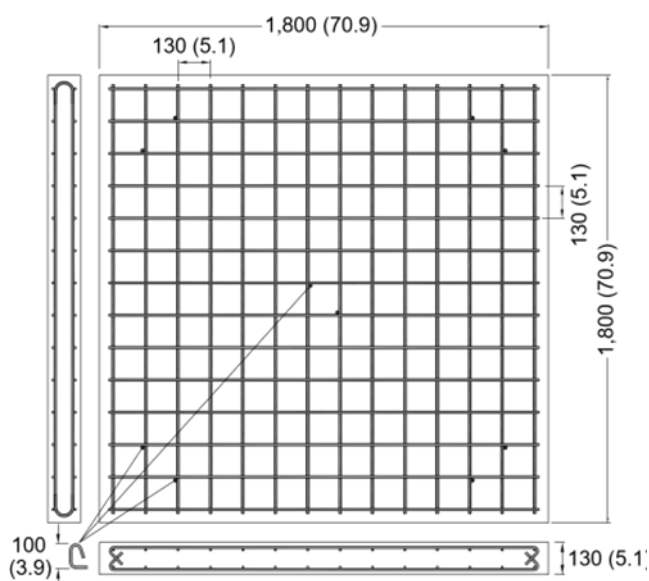


شکل ۶: نتایج آزمایش جعبه L

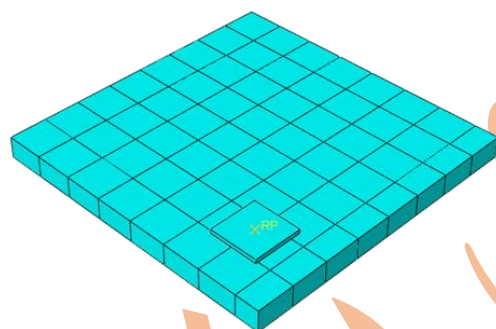


شکل ۷: نتایج آزمایش جعبه U

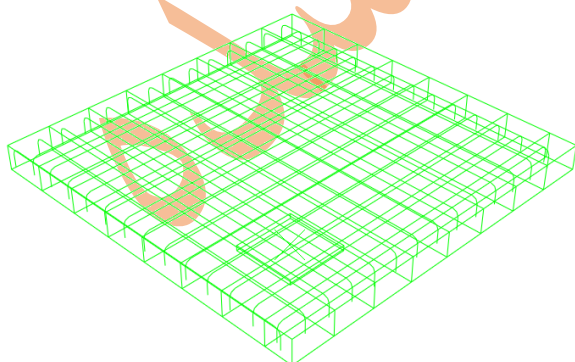
از نتایج آزمایش مقاومت فشاری می‌توان بیان کرد که درصد الیاف فولادی نمی‌توانند تأثیر قابل توجهی در مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه بدون الیاف (شاهد) داشته باشد. تنها در



شکل ۱۱: جزئیات نمونه‌های دال



شکل ۱۲: مش‌بندی دال مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس



شکل ۱۳: شبکه آرماتوربندی شده در نرم‌افزار آباکوس

شکل ۱۴: جابجایی محاسبه شده - دال با ۰/۴۲٪ آرماتور و بدون الیاف

الیاف فولادی ۱/۵٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. اما نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها نشان داد که استفاده از الیاف فولادی در نمونه‌ها مقاومت کششی را نسبت به نمونه بدون الیاف (شاهد) افزایش داده است که این درصد افزایش به ترتیب برای نمونه‌های الیاف ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ برابر با ۰/۳۱٪، ۰/۳۳٪ و ۰/۳۳٪ رشد بوده است. همچنین تغییرمکان تسلیم در آزمایش مقاومت خمشی تیر با افزودن درصد الیاف فولادی افزایش قابل توجهی را داشته است که برای نمونه‌های ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ نسبت به نمونه شاهد ۰/۲٪، ۰/۳۸٪ و ۰/۵۵٪ رشد داشته است.

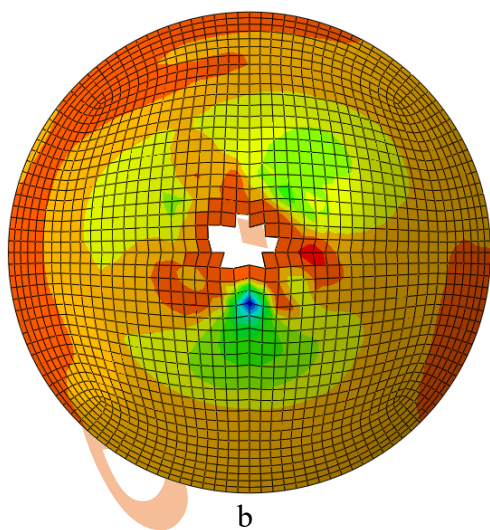
۴ - صحت‌سنجی

به‌منظور انجام تحلیل‌های عددی بر روی گنبد‌ها لازم است ابتدا از صحت مدل عددی اطمینان یافت. اما تاکنون مدل گنبد‌ها به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار نگرفته است. بدین منظور ابتدا برای صحت‌سنجی آزمایش ضربه، یک دال بتنی از آزمایش Vecchio و Hrynyk در نرم‌ربعی با ابعاد ۱۸۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۳۰ میلی‌متر که در هر دو جهت به صورت دابل مسلح گردیده را مورد بررسی قرار داده‌اند. ایشان از چهار لایه میل تقویت کننده فولادی طولی برای تقویت دال استفاده کرده‌اند. سه مورد از هفت دال با استفاده از طراحی مخلوط بتن معمولی ساخته شدند و چهار دال دیگر با استفاده از یک طراحی مخلوط بتن مسلح شده با فیبر فولادی (SFRC) ساخته شدند که نسبت حجمی فیبر در طیف ۰/۵ تا ۱/۵ درصد بوده است. وزنه از یک ارتفاع ثابت انداخته شده است، سرعت برخورد اسمی ثابت ۸ متر بر ثانیه ایجاد می‌کند که با استفاده از تصویربرداری سرعت بالا تأیید گردیده است [۱۹]. در شکل (۱۱)، ابعاد، جزئیات آرماتورگذاری دال بتنی را نشان داده است. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب مدل‌سازی و آرماتورگذاری دال را در نرم‌افزار آباکوس نشان داده است. نتایج حاصل از ضربه بر دال نشان داد که میزان اختلاف بین مدل نرم-افزاری با مدل مقاله به ترتیب برای کنترل جابجایی از مرکز ۵/۲۷٪ و برای کنترل جابجایی بر حسب زمان برابر با ۱۱٪ می‌باشد که از شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به‌دست آمده است.

هستند یا ترکیبی از المان‌های مکعبی و چهاروجهی، که اکثریت آن‌ها مکعبی (hex-dominant) هستند (شکل ۱۶-ب).

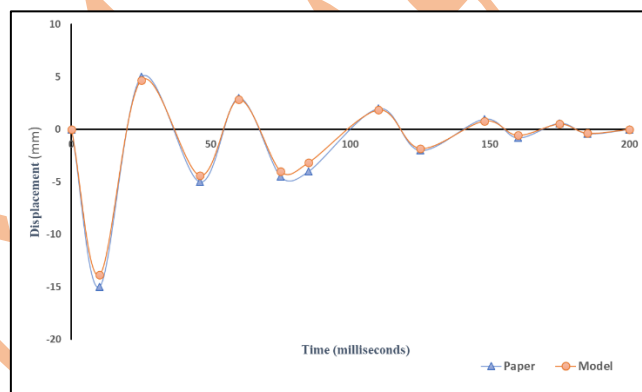
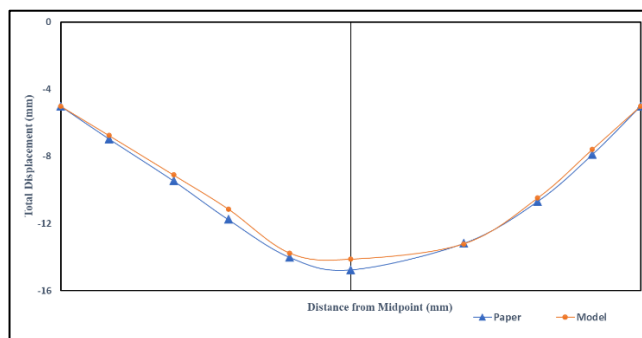


a



b

شکل ۱۶: مقایسه شکست در (a) آزمایشگاهی (b) تحلیلی



شکل ۱۵: جابجایی بر حسب زمان - دال با ۴۲٪ آرماتور و بدون الیاف

برای صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و الیاف فولادی ۱ درصد مورد ارزیابی قرار گرفته است. نرم‌افزار Abaqus تحلیل شده و شکست گنبد ارزیابی شده است. برای ارزیابی شکست گنبد در نرم‌افزار، strain fracture با کرنش شکست (۰/۰۱۰۷۹۱۲۷۹) و جابجایی خسارت (۱۵ میلی‌متر) تعریف شده است. مشخصات دیگر مدل‌سازی به‌طور کامل در بخش ۶ (نرم‌افزار) توضیح داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده، می‌توان گفت که با استفاده از ضربه ۳۱ وزنه افتان از گنبد عبور کرده است و نتایج با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته است. نوع تحلیل دینامیکی استفاده شده، تحلیل (Explicit) بوده و نوع المان به کار رفته C3D8R بوده است. برای مش‌بندی دال در ماژول Abaqus، از تکنیک مش‌بندی structured استفاده شده است. در این تکنیک، مدل مورد نظر با استفاده از مجموعه توپولوژی‌های پیش‌فرض ایجاد شده در Abaqus، شبکه‌بندی می‌شود. در یک مش‌بندی ساختارمند، تمام المان‌ها یا المان‌های مکعبی (brick or hexahedral)

۵- برنامه آزمایشگاهی و نتایج

تعداد ۱۲ گنبد در ضخامت‌های ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر ساخته و تحت اثر بار ضربه افتان آزمایش شدند. در هر ضخامت ۳ گنبد بدون الیاف فولادی، ۳ گنبد با ۰/۵٪ الیاف فولادی، ۳ گنبد با ۱٪ الیاف فولادی و ۳ گنبد با ۱/۵٪ الیاف فولادی ساخته شده است. در این آزمایش اثر ضخامت گنبد و درصد الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام آزمایش دستگاهی مطابق شکل (۱۷) طراحی و ساخته شد، دستگاه ضربه شامل یک وزنه فولادی به وزن ۱۰ کیلوگرم است که با استفاده از کابل تا ارتفاع ۳۲۶۰ میلی‌متر بالا رفته است. در این آزمایش سه پارامتر تعداد ضربه برای ایجاد اولین ترک مؤثر، تعداد ضربه تا ایجاد گسیختگی در گنبد و انرژی جذب شده در گنبد در نظر گرفته شد. انرژی جذب شده در گنبد توسط رابطه (۱) بر حسب کیلوژول نشان داده شده است.

$$E = N \times W \times H \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، W وزن گوی فولادی بر حسب کیلو نیوتن، H ارتفاع سقوط گوی بر حسب متر و N تعداد ضربات برای برای ایجاد گسیختگی در گنبد می‌باشد.



شکل ۱۷: دستگاه آزمایش وزنه افتان

در این تحقیق معیار انهدام گنبدها، سوراخ شدن در مرکز دال یا چند تکه شدن گنبد بر اثر تعداد ضربات می‌باشد.

۵-۱- مقاومت اولین ترک ایجاد شده در گنبد

ترک‌ها در بتن به عنوان شکاف‌های ناچیز تا شکستگی‌های قابل مشاهده تعریف می‌شوند. این ترک‌ها می‌توانند به صورت ریز (micro-cracks) یا ماکرو (macro-cracks) ظاهر شوند. ترک‌های ریز در مقیاس میکروسکوپی در سطح یا زیر سطح سازه رخ می‌دهند و ممکن است با چشم غیرمسلح دیده نشوند، اما ترک‌های بزرگ‌تر به راحتی قابل مشاهده هستند و می‌توانند نشان‌دهنده آسیب جدی‌تر باشند. ترک‌های ریز در سازه‌های بتنی، به ویژه در گنبدها، در اثر نیروهای دینامیکی و ضربه‌هایی که به سطح وارد می‌شود، به وجود می‌آیند. این ترک‌ها ممکن است در لایه‌های سطحی یا زیرین بتن ایجاد شوند و در ابتدا قابل مشاهده نباشند، اما اگر توسعه پیدا کنند، ممکن است به شکستگی‌های قابل مشاهده و خطرناک تبدیل شوند. روش‌های مختلفی برای شناسایی ترک وجود دارد که در این پژوهش بازرسی چشمی و ترک‌های قابل اندازه‌گیری معیار بوده است. با توجه به جدول ۳، مشاهده می‌شود که تعداد ضربه برای ایجاد اولین ترک در گنبدها با افزودن الیاف فولادی افزایش یافته است. این اثر الیاف فولادی با افزایش ضخامت گنبد، بیشتر قابل توجه‌تر بوده است. به طوری که درصد الیاف فولادی در گنبدهای با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و درصد الیاف ۱/۵٪ نسبت به نمونه شاهد گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر بدون الیاف فولادی ۵۷٪ افزایش یافته است، در حالی که همین مقدار الیاف در گنبدهای با ضخامت ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر به ترتیب ۷۸٪ و ۸۲٪ افزایش مقاومت اولین ترک را نشان داده است. این درحالی است که افزایش ضخامت گنبد به اندازه افزودن الیاف فولادی نتوانست مقاومت اولین ترک را به طور قابل توجهی افزایش دهد.

جدول ۳: نتایج آزمایش وزنه افتان برای ایجاد اولین ترک قابل مشاهده در گنبد

Absorbed energy (J)	Distance to specimen (m)	Weight (kN)	Number of blows to initiate first crack	Sample
11.18	3.26	0.098	35	Dome-01
6.39	3.26	0.098	20	Dome-02
5.75	3.26	0.098	18	Dome-03
4.79	3.26	0.098	15	Dome-04
3.51	3.26	0.098	11	Dome-05
3.19	3.26	0.098	10	Dome-06
1.92	3.26	0.098	6	Dome-07
0.64	3.26	0.098	2	Dome-08
2.87	3.26	0.098	9	Dome-09
1.60	3.26	0.098	5	Dome-10
0.96	3.26	0.098	3	Dome-11
0.64	3.26	0.098	2	Dome-12

۵-۲- مقاومت نهایی ایجاد شده در گنبد

با توجه به جدول ۴، نکته قابل توجه آن بود که تعداد ضربه برای شکست در گنبدها با افزودن ضخامت و درصد الیاف فولادی به طور قابل توجهی افزایش داشته است. همچنین نتایج نشان داد که در نمونه‌های بدون الیاف فولادی ترک‌هایی در گنبد با اولین ضربه‌ها ایجاد شده است که بعد از چند ضربه گنبدها سریع به چند قسمت تقسیم شده‌اند که به دلیل رفتار تردشکنی گنبدهای بدون الیاف فولادی بوده است. افزایش ضخامت گنبدها از ۵۰ میلی‌متر به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر توانست میزان تردشکنی گنبد بدون الیاف را کاهش دهد ولی همچنان با تعداد ضربات کم نسبت به نمونه‌های دارای الیاف فولادی نمونه‌ها دچار گسیختگی شده‌اند. افزودن الیاف فولادی توانایی گنبد در جذب انرژی و تغییر شکل قبل از وقوع شکست (چقرمگی) را به طور قابل قبولی افزایش داد به طوری که مقاومت نهایی در گنبد با ضخامت ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر و الیاف

فولادی ۱/۵٪ نسبت به گنبد شاهد (بدون الیاف فولادی)، ۸۸٪، ۸۵٪ و ۱۰۴٪ افزایش داشته است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی که در شکل‌های ۱۸ الی ۲۰ نشان داده شده است می‌توان بیان کرد که استفاده از الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت سازه در سازه شده است و در گنبدهای با درصد الیاف بالاتر با افزایش تعداد ضربه در گنبد با ایجاد حفره در گنبد، گسیختگی ایجاد شده است. همچنین به دلیل ضعف در قسمت تکیه‌گاهی ایجاد ترک‌ها در گنبد از قسمت تکیه‌گاه به سمت میانه گنبد رشد داشته است اما باعث شکست نهایی در گنبد نشده و ناپایداری در گنبد به وجود نیامده است.



۱/۵ درصد

۱ درصد

۰/۵ درصد

بدون الیاف

شکل ۱۸: نحوه ایجاد ترک و گسیختگی در گنبد با ضخامت ۵۰ میلی‌متر



۱/۵ درصد

۱ درصد

۰/۵ درصد

بدون الیاف

شکل ۱۹: نحوه ایجاد ترک و گسیختگی در گنبد با ضخامت ۷۵ میلی‌متر



۱/۵ درصد

۱ درصد

۰/۵ درصد

بدون الیاف

شکل ۲۰: نحوه ایجاد ترک و گسیختگی در گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر

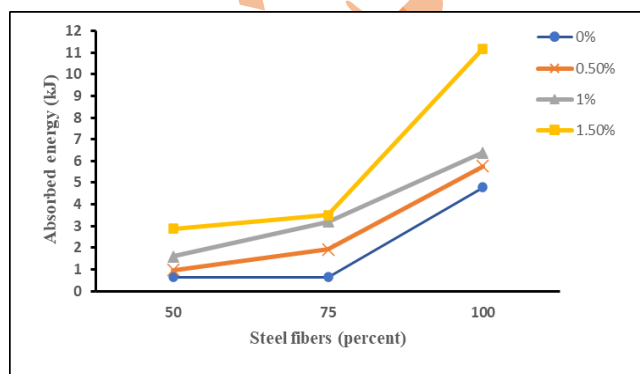
۵-۳- میزان انرژی جذب شده در گنبد

با توجه به رابطه (۱)، و جدول (۴)، انرژی جذب شده در گنبدها برای لحظه گسیختگی (ایجاد حفره در گنبد) بر حسب کیلوژول نشان داده شده است. در شکل (۲۱)، اثر افزایش الیاف فولادی بر جذب انرژی گنبدهای با ضخامت‌های مختلف قابل مشاهده است که نشان می‌دهد در گنبد با ضخامت ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر و بدون الیاف فولادی جذب انرژی گنبدها تفاوت چندانی ندارند. که با افزایش ضخامت گنبد اثر الیاف فولادی افزایش یافته

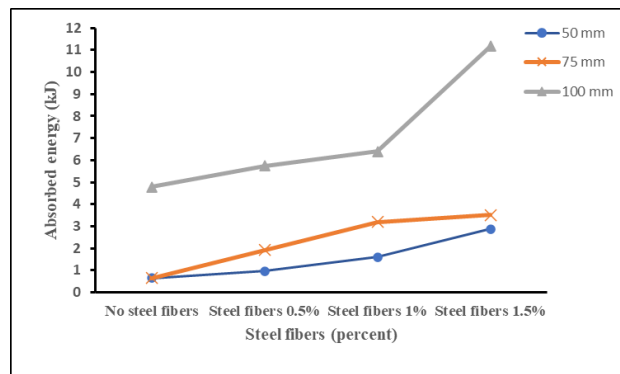
است. همچنین در گنبد با ضخامت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر افزودن الیاف فولادی جذب انرژی را افزایش داده است که این افزایش در گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر چشم‌گیر بوده است. همچنین می‌توان از نتایج بیان کرد که افزایش ضخامت گنبدها میزان جذب انرژی در گنبدها افزایش یافته و همچنین با اضافه کردن الیاف فولادی تعداد ضربات برای ایجاد گسیختگی در گنبدها افزایش می‌یابد.

جدول ۴: نتایج آزمایش وزنه افتان برای انهدام در گنبد

Absorbed energy (J)	Distance to specimen (m)	Weight (kN)	Number of blows to failure in dome	Sample
1.28	3.26	0.098	4	Dome-01
3.19	3.26	0.098	10	Dome-02
7.35	3.26	0.098	23	Dome-03
11.18	3.26	0.098	35	Dome-04
1.92	3.26	0.098	6	Dome-05
4.47	3.26	0.098	14	Dome-06
10.22	3.26	0.098	32	Dome-07
12.78	3.26	0.098	40	Dome-08
7.99	3.26	0.098	25	Dome-09
9.90	3.26	0.098	31	Dome-10
18.52	3.26	0.098	58	Dome-11
35.14	3.26	0.098	110	Dome-12



b

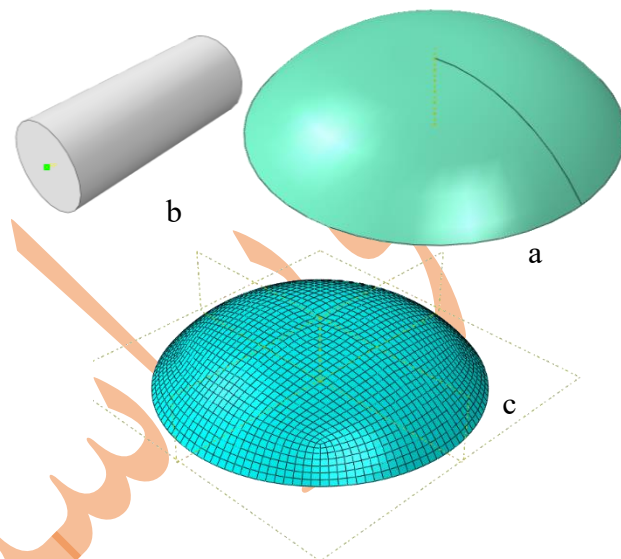


a

شکل ۲۱: انرژی جذب شده (a) بر حسب درصد الیاف فولادی (b) بر حسب ضخامت گنبدها

۶- شبیه سازی و نتایج عددی

در این مطالعه برای مدل سازی و مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی از نرم افزار آباکوس نسخه ۲۰۱۹ استفاده شده است. در شکل ۲۲، گنبد، وزنه و مش بندی در نرم افزار نشان داده شده است.



شکل ۲۲: (a) گنبد مدل سازی شده، (b) وزنه مدل سازی شده، (c) مش بندی گنبد مدل سازی شده در نرم افزار آباکوس

در جدول (۵)، مشخصات و ویژگی های مصالح گنبد مورد مطالعه در نرم افزار آورده شده است. وزنه مدل سازی شده در نرم افزار دارای سرعت ۸ متر بر ثانیه به هنگام ضربه می باشد. در این پژوهش مدل های رفتاری پوپویچ و شیما برای مدل سازی نرم افزاری استفاده شده است. از مدل فشاری پوپویچ برای پیش بینی مدل فشاری بتن استفاده شده است که از روابط (۲) الی (۴) محاسبه شده است. از مدل رفتاری شیما برای پیش بینی مدل کششی بتن با استفاده از روابط (۵) و (۶) محاسبه شده است [۲۰].

$$\delta_{ci} = \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_c} \right) \times f'_c \times \frac{n}{n-1 + \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_c} \right)^{nk}} \quad (2)$$

$$n = 0.8 + \frac{f'_c}{17} \rightarrow (f'_c \rightarrow Mpa) \quad (3)$$

$$k = 1 \rightarrow for 0 < \varepsilon_{ci} < \varepsilon_c \quad (4)$$

$$k = 0.67 + \frac{f'_c}{62} \geq 1 \rightarrow for \varepsilon_{ci} > \varepsilon_c$$

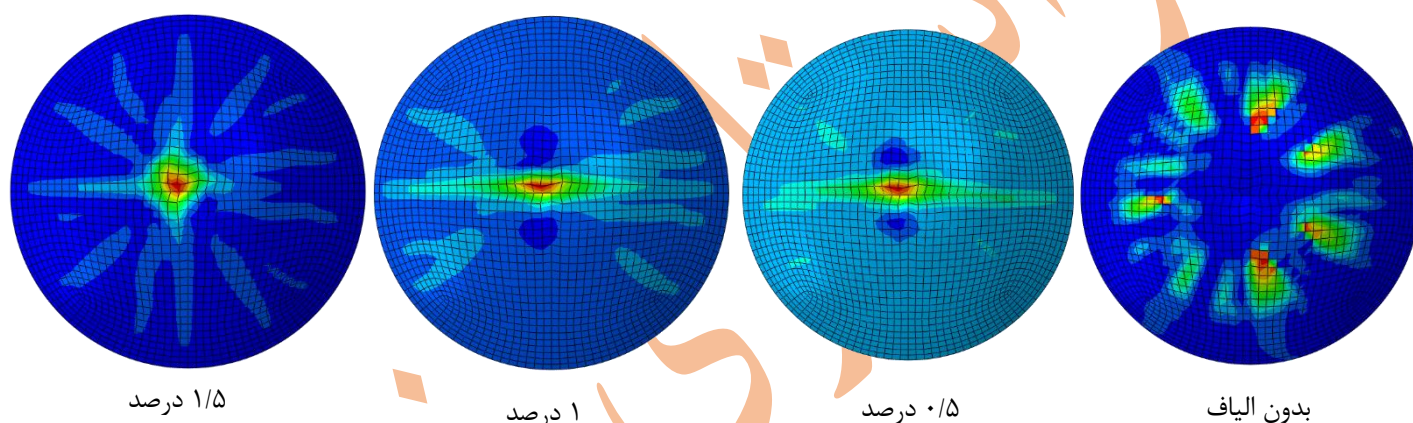
$$\delta_{ii} = f_t \times \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_c} \right)^c \quad (5)$$

$$f_t = 0.2 \times (f'_c)^{\frac{2}{3}} \rightarrow (Mpa) \quad (6)$$

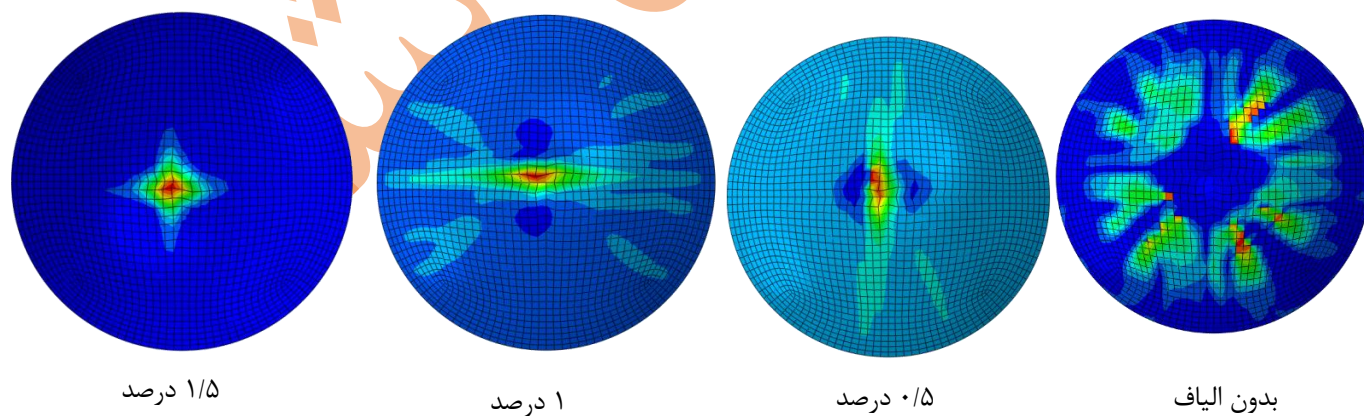
برای بررسی میزان آسیب در گنبدها از PEEQ که نشان دهنده کرنش مؤثر یا معادل پلاستیک می باشد که یک پارامتر اسکالر است که میزان پلاستیسیتیه شدن گنبدها را نشان می دهد. هر ناحیه ای از گنبد وارد خرابی یا شکست شده باشد میزان کرنش مؤثر از عدد صفر بیشتر می شود. مقاومت فشاری و مقاومت کششی وارد شده در رابطه های (۲) الی (۶)، با استفاده از نتایج شکل های (۸) و (۹) به دست آمده است. با توجه به شکل های (۲۳) الی (۲۵)، می توان بیان کرد که در گنبدهای بدون الیاف فولادی در ضخامت های ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی متر میزان پلاستیسیتیه شدن گنبدها از ناحیه تکیه گاه به سمت مرکز گنبد قابل مشاهده است که نشان دهنده گسیختگی و تقسیم شدن گنبدها می باشد. با افزودن الیاف فولادی به نمونه ها نوع خرابی در گنبدها تغییر یافته که از تقسیم شدن به چند تکه به ایجاد حفره در مرکز گنبد به دلیل افزایش تعداد ضربات وارد شده به گنبد برای گسیختگی تغییر حالت داده است که ترک و خرابی از مرکز گنبد شروع و به سمت تکیه گاه حرکت کرده است.

Compressive modulus of elasticity (GPa)	Tensile modulus of elasticity (GPa)	Density (kg/m ³) [21]	Poisson's ratio	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Fibers content (%)	Thickness (mm)	Sample
35	27	2345	0.2	53.403	30.62	0	50	Dome-01
38	33	2370	0.2	58.41	44.95	0.5	50	Dome-02
41	35	2460	0.2	60.37	45.96	1	50	Dome-03
45	36	2485	0.2	72.86	46.06	1.5	50	Dome-04
35	27	2345	0.2	53.403	30.62	0	75	Dome-05
38	33	2370	0.2	58.41	44.95	0.5	75	Dome-06
41	35	2460	0.2	60.37	45.96	1	75	Dome-07
45	36	2485	0.2	72.86	46.06	1.5	75	Dome-08
35	27	2345	0.2	53.403	30.62	0	100	Dome-09
38	33	2370	0.2	58.41	44.95	0.5	100	Dome-10
41	35	2460	0.2	60.37	45.96	1	100	Dome-11
45	36	2460	0.2	72.86	46.06	1.5	100	Dome-12

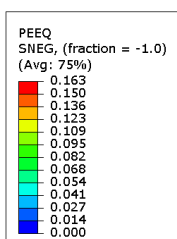
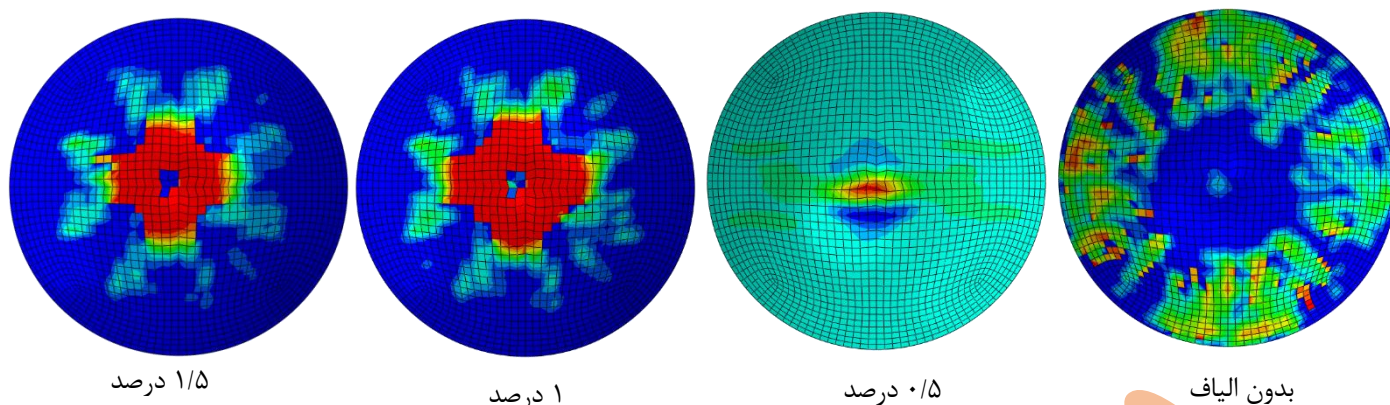
جدول ۵: معرفی ویژگی‌های مصالح مصرفی مورد استفاده در تحلیل عددی



شکل ۲۳: کرنش معادل پلاستیک در گنبد با ضخامت ۵۰ میلی‌متر



شکل ۲۴: کرنش معادل پلاستیک در گنبد با ضخامت ۷۵ میلی‌متر



شکل ۲۵: کرنش معادل پلاستیک در گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر

۲- نتایج آزمایشگاهی نشان داد که افزایش ضخامت گنبد بر میزان مقاومت آن در برابر ضربه تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. بیشترین تأثیر در گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر قابل مشاهده بود که تعداد ضربات برای ایجاد خرابی در گنبد نسبت به گنبدهای ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر با درصد الیاف ۱/۵، به ترتیب ۶۸٪ و ۶۴٪ رشد داشته است.

۳- با توجه به نتایج آزمایشگاهی می‌توان بیان کرد که افزودن الیاف فولادی و افزایش ضخامت تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش جذب انرژی دارد. به‌طوری‌که در گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و با ۰/۵٪ الیاف فولادی نسب به گنبد با ضخامت ۵۰ میلی‌متر و بدون الیاف فولادی جذب انرژی ۳۳٪ رشد داشته است اما در همین گنبد با الیاف ۱٪، جذب انرژی ۶۰٪ و در گنبد با الیاف ۱/۵٪ جذب انرژی ۷۸٪ رشد داشته است. با افزایش ضخامت گنبدها به ۷۵ میلی‌متر در گنبد با الیاف ۰/۵٪ نسبت به نمونه شاهد (بدون الیاف) جذب انرژی ۶۷٪ رشد داشته است. در همین گنبد با الیاف ۱٪ و ۱/۵٪ جذب انرژی به ترتیب ۸۰٪ و ۸۲٪ رشد داشته است. در گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر با الیاف ۰/۵٪، جذب انرژی نسبت به نمونه شاهد (بدون الیاف)، ۱۷٪ رشد داشته است. اما در نمونه با الیاف ۱٪ و ۱/۵٪ جذب انرژی به

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، خصوصیات مکانیکی و ضربه‌ای گنبدهای بتنی با الیاف فولادی بررسی شده است. هدف اصلی از این مقاله بررسی و مقایسه پارمترهای افزایش درصد فولادی و افزایش ضخامت گنبدها بر مقاومت ضربه‌ای آن‌ها تحت اثر با ضربه وزنه افتان است. در این پژوهش درصد الیاف‌های ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ همچنین گنبدهای با ضخامت ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن به شرح ذیل است:

۱- نتایج آزمایشگاهی نشان‌دهنده تأثیر الیاف فولادی بر اولین ترک ایجاد شده در گنبدها می‌باشد. البته نکته قابل توجه آن است که در گنبدهای بدون الیاف فولادی در اولین ضربه‌های وارد شده به گنبد خرابی ایجاد شده به‌صورتی که گنبدها به چندین تکه تقسیم شده‌اند. اما استفاده از الیاف فولادی تا حدی تعداد ضربات برای ایجاد خرابی در گنبدها را افزایش داده است که بیشترین تأثیر در گنبدهای با الیاف ۱/۵٪ بوده است. به‌طور مثال در گنبد ۱۰۰ میلی‌متر تعداد ضربات برای ایجاد خرابی نسبت به نمونه شاهد (بدون الیاف)، برای درصد الیاف ۰/۵، ۱ و ۱/۵، به ترتیب ۱۹٪، ۵۷٪ و ۷۷٪ رشد داشته است.

pp.104952.

<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104952>

- 7 Mastali, M., Dalvand, A. and Sattarifard, A. 2017. The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages. *Composites Part B: Engineering*, 112, pp.74-92.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.029>.
- 8 Song, P.S., Hwang, S. and Sheu, B.C. 2005. Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 35.8, pp.1546-1550.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.033>.
- 9 Mastali, M., Naghibdehi, M.G., Naghipour, M. and Rabiee, S.M. 2015. Experimental assessment of functionally graded reinforced concrete (FGRC) slabs under drop weight and projectile impacts. *Construction and Building Materials*, 95, pp.296-311.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.151>.
- 10 Sahraei Moghadam, A. and Dalvand, A. 2019. Investigation of mechanical and impact properties of high performance self-compacting composite concrete. *Ferdowsi Civil Engineering*, 32.3, pp.49-66 [In Persian].
<https://doi.org/10.22067/civil.v32i3.79476>
- 11 Ebrahimian, A. and Mortezaei, A. 2021. The effect of specimen size on compressive, tensile and flexural strength of steel fiber reinforced concrete. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 6.2, pp.80-103 [In Persian].
<https://doi.org/10.30478/jcsm.2021.276570.1199> [In Persian].
- 12 Dayyani, M., Mortezaei, A., Rouhanimanesh, M.S. and Marnani, J.A. 2022. Experimental study on the effect of fibers on engineered cementitious composite short square columns. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66.3, pp.798-808.
<https://doi.org/10.3311/PPci.19612>
- 13 Golestan, A. and Hajiani Boushehrian, A. 2017. Investigation the application of the steel fiber in special steel fiber concrete and its effect on concrete permeability and compression strength parameters. *Concrete Research*, 9.2, pp.111-121 [In Persian].
- 14 Song, P.S. and Hwang, S. 2004. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18.9, pp.669-673.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027>

ترتیب ۲۵٪ و ۵۷٪ رشد داشته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد افزودن ضخامت گنبد بدون الیاف خود جذب انرژی را افزایش می‌دهد اما این افزایش قابل توجه نمی‌باشد در گنبدهای با ضخامت ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر جذب انرژی به هم نزدیک می‌باشد و رشد قابل توجهی نداشته است در گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر جذب انرژی نسبت به گنبد با ضخامت ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر رشد حدود ۸۶٪ را داشته است. که نشان از تأثیر ضخامت در جذب انرژی می‌باشد.

۴- نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داد که در گنبدهای بدون الیاف فولادی نحوه ترک و خرابی بسیار به هم نزدیک بوده است به‌طوری که در گنبدهای بدون الیاف فولادی گنبدها به چند قسمت تقسیم را نشان می‌دهد که با افزودن الیاف فولادی نوع خرابی از چند تکه تقسیم شدن به ایجاد حفره تحت اثر تعداد ضربه‌های بالا تغییر کرده است.

منابع

- 1 Mehdinezhad, J., Sharghi, A. and Asadpour, F. 2021. Integration of architectural form and structure in the formation of physical structure of historical buildings using Iranian arches. *Journal of Architectural Thought*, 5.10, pp.89-108 [In Persian].
<https://doi.org/10.30479/at.2020.11225.1280>
- 2 Khosrowjerdi, S. and Sarkardeh, H. 2021. Effect of arch height on wind load in shape dome structure. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53.2, pp.627-638 [In Persian].
<https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16424.6220>
- 3 Pirnia, M.K. 2005. *Iranian architectural stylistics*, 4th Edn., pp.50-200, Soroush Danesh, Tehran.
- 4 Micallef, K., Sagaseta, J., Ruiz, M.F. and Muttoni, A. 2014. Assessing punching shear failure in reinforced concrete flat slabs subjected to localised impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 71, pp.17-33.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.04.003>.
- 5 Hinman, E. 2003. *Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks*. Risk Management Series FEMA, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- 6 Ferreira, L.M., Muñoz-Reja, M. and Reis, P.N.B. 2024. Impact response of semicylindrical woven composite shells: The effect of stacking sequence. *International Journal of Impact Engineering*, 189,

- 15 Zhang, P., Wang, C., Gao, Z. and Wang, F. 2023. A review on fracture properties of steel fiber reinforced concrete. *Journal of Building Engineering*, 67, pp.105975. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105975>
- 16 ASTM C150. 2012. *Standard specification for Portland cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- 17 ASTM C33. 2003. *Standard specification for concrete aggregates*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA.
- 18 Babaei, A., Mortezaei, A. and Salehian, H. 2021. Experimental study on seismic performance of steel fiber reinforced concrete wall piers. *Structural Concrete*, 22.3, pp.1363-1377. <https://doi.org/10.1002/suco.202000104>
- 19 Hrynyk, T.D. and Vecchio, F.J. 2017. Modeling of reinforced and fiber-reinforced concrete slabs under impact loads. *ACI Structural Journal*, 321, pp.8-1.
- 20 Arazbzade, A. and Mozaffar Jazi, M. 2016. Comparative study on effects of area and position of opening on behavior and shear capacity of concrete shear walls. *Concrete Research*, 8.2, pp.125-135.
- 21 Faris, M.A., Abdullah, M.M.A.B., Muniandy, R., Abu Hashim, M.F., Błoch, K., Jež, B. and Ghazali, M.F. 2021. Comparison of hook and straight steel fibers addition on Malaysian fly ash-based geopolymer concrete on the slump, density, water absorption and mechanical properties. *Materials*, 14.5, pp.1310. <https://doi.org/10.3390/ma14051310>