Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Note

Experimental Evaluation of the Capacity of Concrete Domes Containing Steel Fibers Under Impact Load

Reza Geravand[1], Alireza Mortezaei[1]* and Ahmad Azizi[2]

[1]Department of Civil Engineering, Semnan branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.
[2] Department of Mechanical Engineering, Semnan branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.
* corresponding author:(al.mortezaei@iau.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 25 May 2024

Revised: 13 October 2024

Accepted: 13 November 2024

Keywords:

Dome,
impact,
failure,
energy absorption,
steel fiber.

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 the 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.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:
Geravand, R., Mortezaei, A. and Azizi, A. 2025. Experimental evaluation of the capacity of concrete domes containing steel fibers under impact load, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(3), 105-115. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64611.3334

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

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

رضا گراوند[۱]، علیرضا مرتضایی[۱*] و احمد عزیزی[۲]

[۱]گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

[۲]گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.

[*]نویسنده مسئول (al.mortezaei@iau.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۳/۰۵

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۸/۲۳

واژگان کلیدی:

گنبد،

ضربه،

خرابی،

جذب انرژی،

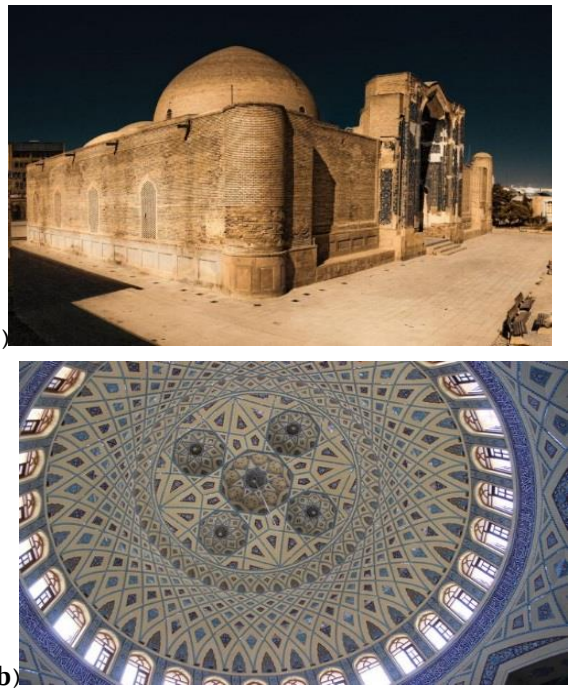
الیاف فولادی.

چکیده

در نوشتار حاضر، با هدف بررسی و مقایسه‌ی پارامترهای افزایش درصد فولاد و افزایش ضخامت گنبدها در مقاومت ضربه‌ای آن‌ها تحت اثر ضربه‌ی وزنه‌ی افتان، خصوصیات مکانیکی و ضربه‌ای گنبدهای بتنی با الیاف فولادی بررسی شده است. همچنین، درصد الیاف‌های ۰، ۰/۵، ۱، و ۱/۵، در گنبدهای با ضخامت ۵۰، ۷۵، و ۱۰۰ میلی‌متر بررسی شده است. بیشتر پژوهش‌های صورت‌گرفته تاکنون بر روی دال‌های بتنی بوده و با توجه به اهمیت گنبدها به‌دلیل پوشش فضاهای وسیع، این مهم به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داده‌اند که الیاف فولادی می‌توانند مقاومت گنبدها را در برابر ضربه افزایش دهند. همچنین اثر افزودن الیاف فولادی و ضخامت گنبدها نشان داده است که با افزایش الیاف فولادی و ضخامت گنبدها، به‌طور قابل‌توجهی جذب انرژی افزایش می‌یابد، که در گنبد با الیاف ۱/۵٪ و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر مشاهده شده است.

۱. مقدمه

قوس، یکی از عناصر بسیار مهم در معماری ایران است؛ که در طول تاریخ توسط معماران و سازندگان ایرانی استفاده شده و 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 و در طراحی‌ها، فرم پوسته‌ی خارجی گنبد از جهت رویکرد معماری، ظرفیت باربری ثقلی، و بارهای جانبی و ضربه‌ای به‌طور بسیار حیاتی تأثیر می‌گذارد.[۱ و ۲] پیدایش گنبد در ساختمان را می‌توان از هزاره‌ی دوم و ساخت آن را به ایرانیان نسبت داد؛ چرا که طاق، گنبد، و قوس در ایران، پیشینه‌ی کهن داشته است.[۳] در شکل ۱، نمونه‌ای از گنبد سنتی و معاصر مشاهده می‌شود.



(a)

(b)

شکل ۱. (a) گنبد مسجد کبود، (b) گنبد مصلای امام اردکان.

تاکنون پژوهش‌های بسیاری درباره‌ی گنبد و پوسته انجام شده است، که می‌توان به پژوهش لیو و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرد. ایشان برای محاسبه‌ی آنالیز ارتعاشی سه‌بُعدی، یک قطعه‌ی مستطیلی از پوسته‌ی کروی با مبنای کشسانی روش P-Riz ارائه کرده‌اند. پارامترها با شرایط تکیه‌گاهی مختلف بررسی شده و فرمول پیشنهادی توانسته است بسامد و شکل‌های مختلف سازه را با اطمینان محاسبه کند.[۴] حجازی و همکارش (۲۰۰۳)، در بررسی پارامتریک گنبدهای بتنی با توجه به شکل مقطع گنبد، حضور یا عدم حضور بازشوها در داخل گنبد، نوع زیرسازه، و شرایط تکیه‌گاهی به‌عنوان پارامترهای

استناد به این مقاله:

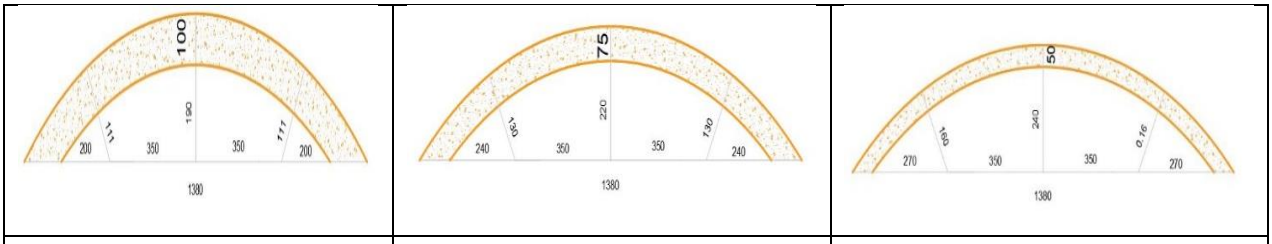
گراوند، رضا، مرتضایی، علیرضا و عزیزی، احمد، ۱۴۰۴. ارزیابی آزمایشگاهی ظرفیت گنبدهای بتنی حاوی الیاف فولادی تحت اثر بار ضربه. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۳)، صص.۱۰۵-۱۱۵.

https://doi.org/10.24200/j30.2024.64611.3334

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف



(c) (b) (a)

شکل ۲. گنبدهای ساخته‌شده با ضخامت‌های: (a) ۵۰ ، (b) ۷۵، (c) ۱۰۰ میلی‌متر.

جدول ۱. مشخصات گنبدها و میزان درصد مصرف الیافی.

Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Density (kg/m³)	Length-to-diameter ratio	Diameter (mm)	Length (mm)	Fiber type
2730	210	7870	91.14	0.387	35	Steel

متغیر، در مواجهه با بار وزن، باد، حرارت، و زلزله دریافته‌اند که اثر باد تعیین‌کننده نیست، اما اثر زلزله و حرارت در سازه بسیار مهم است.[۵] فریرا[1] و همکاران (۲۰۲۴)، به تجزیه‌وتحلیل اثر توالی‌های انباشته‌شده در پاسخ ضربه‌ی پوسته‌های کامپوزیتی بافته‌شده‌ی نیمه‌استوانه‌ای پرداخته و دریافته‌اند که افزایش سختی خمشی ضربه‌ای منجر به افزایش بیشینه‌ی نیرو می‌شود، که با کاهش بیشینه‌ی جابجایی، زمان تماس، و انرژی تلف‌شده همراه است.[۶] نتایج برخی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بتن غیرمسلح در مواجهه با بارهای ضربه‌ای، نواقصی دارد،[۷] که برای افزایش مقاومت بتن در برابر ضربه می‌توان از الیاف‌های طبیعی و مصنوعی استفاده کرد.[۸] مستالی[2] و همکاران (۲۰۱۵)، در بررسی تأثیر به‌کاربردن الیاف فولادی در بالابردن مقاومت دال‌های بتنی در مقابل ضربه دریافته‌اند که افزایش مقاومت فشاری ممکن است باعث افزایش عمق نفوذ گلوله و ناحیه‌ی تخریب‌شده‌ی جلوی نمونه شود؛ در حالی که افزایش مقاومت کششی ممکن است باعث کاهش عمق نفوذ گلوله و ناحیه‌ی تخریب‌شده‌ی جلوی نمونه شود.[۹] صحرایی مقدم و همکاران (۲۰۱۹)، در بررسی خصوصیات مکانیکی و ضربه‌ای بتن‌های کامپوزیتی توانمند خودتراکم دریافته‌اند که الیاف فولادی، پارامتر بسیار مهمی در افزایش مقاومت ضربه‌ای دال‌هاست.[۱۰] مرتضایی و ابراهیمیان (۲۰۲۱)، اثر اندازه‌ی نمونه در مقاومت فشاری، کششی، و خمشی بتن‌های حاوی الیاف فولادی را ارزیابی کرده و دریافته‌اند که مقاومت نمونه‌ها با حضور الیاف تا ۳۵٪ افزایش یافته و ضرایب تبدیل برای نمونه‌های الیافی ارائه شده است.[۱۱] دیانی و همکاران (۲۰۲۲)، در یک مطالعه‌ی تجربی، تأثیر الیاف در ستون‌های مربع کوتاه کامپوزیت سیمانی مهندسی‌شده را بررسی کردند و دریافتند که افزایش اصطکاک الیاف و نسبت ابعاد برشی، طول ناحیه‌ی خمیری و شکل‌پذیری را به ترتیب دست‌کم ۵۰ و ۱۰۰ درصد افزایش می‌دهد.[۱۲] بوشهریان و گلستان (۲۰۱۷)، با بررسی الیاف فلزی تولید داخل دریافتند که استفاده از الیاف با درصد پایین، تأثیر چندانی در مقاومت فشاری نمونه‌ها ندارد؛ اما درصدهای بالاتر باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود.[۱۳] سانگ و هوانگ[3] (۲۰۰۴)، در پژوهش خود دریافته‌اند که 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] ژانگ[4] و همکاران (۲۰۲۳)، در یک نوشتار مروری، خواص شکست SFRC و مدل‌های شکست مختلف را بررسی کرده و

جدول ۲. خصوصیات الیاف فولادی استفاده‌شده.

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

دریافته‌اند که با افزایش درصد الیاف فولادی، خواص شکست به‌طورقابل‌توجهی بهبود یافته است.[۱۵] با توجه به اینکه بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده بر روی گنبدها تحت اثر زلزله و باد بوده و همچنین مقاوم‌سازی نمونه‌ها بر روی دال‌های بتنی صورت گرفته است؛ لذا، در پژوهش حاضر اثر ضربه در گنبدها، که می‌تواند منجر به تخریب سازه‌ها تحت اثر زلزله شود، بررسی و با الیاف فولادی مقاوم‌سازی شده است.

۲. روش ساخت نمونه‌ها

در پژوهش حاضر، ۱۲ عدد گنبد بتنی با ضخامت‌های ۵۰، ۷۵، و ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده است (شکل ۲). از هر کدام از ضخامت‌های ساخته‌شده، ۳ عدد گنبد بدون الیاف فولادی، ۳ عدد با ۰/۵٪ الیاف فولادی، ۳ عدد با ۱٪ الیاف فولادی، و ۳ عدد با ۱/۵٪ الیاف فولادی ساخته شده‌اند. مشخصات گنبدها و درصد الیاف فولادی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. همچنین در پژوهش حاضر، ۱۲ عدد نمونه‌ی فشاری مکعبی با ضلع ۱۵۰ میلی‌متر، ۱۲عدد نمونه‌ی کششی استوانه‌ای با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر، و ۱۲عدد تیر خمشی با ابعاد

[1] Ferreira
[2] Mastali
[3] Song & Hwang
[4] Zhang

جدول ۳. نتایج آزمایش وزنه‌ی افتان برای ایجاد اولین ترک قابل‌مشاهده 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

۶۰×۸۰×۳۲۰ میلی‌متر با درصدهای مختلف الیاف فولادی ساخته شده‌اند (جدول ۲). در ساخت نمونه‌ها از سیمان پرتلند تیپ II شاهرود براساس استاندارد ASTM C۱۵۰ استفاده شده است.[۱۶] دانه‌بندی ریزدانه مطابق استاندارد ASTM C۳۳ انتخاب شده است.[۱۷] بیشینه‌ی اندازه‌ی اسمی شن‌های مصرفی ۱۹ میلی‌متر برای شن بادامی و ۱۲/۵ میلی‌متر برای شن نخودی بوده است. دانه‌بندی و بیشینه‌ی اندازه‌ی سنگدانه نه فقط در نسبت ترکیب سنگدانه‌ها، بلکه در سیمان و آب موردنیاز، کارایی، قابلیت پمپاژ، تخلخل، جمع‌شدگی، دوام، و یکنواختی بتن نیز تأثیر می‌گذارد. مشخصات سنگدانه‌های ریز و درشت طبق روش‌های آزمون‌های D۲۴۱۹، C۱۳۶، C۱۲۸، C۱۲۷، C۳۳ ، و C۲۹ از استاندارد ASTM تعیین شده است. این تذکر لازم است که مصالح شن و ماسه‌ی مصرفی در ساخت نمونه‌های پُرمقاومت به‌صورت خشک بوده است. خاکستر بادی استفاده‌شده از نوع کلاسF و آب مصرفی، آب آشامیدنی شهر سمنان بوده است. الیاف فولادی استفاده‌شده از نوع الیاف فولادی دوسر قلاب با طول ۳۵میلی‌متر،[۱۸] و قطر ۰/۳۸۷ میلی‌متر بوده است، که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است. مصالح سنگی استفاده‌شده در پژوهش حاضر، عبوری الک نمره‌ی ۸ بوده است. برای ایجاد خاصیت خودتراکمی در بتن از فوق روان‌کننده‌ی Carboxal ۵۲۱ SRF، به میزان ۰/۵ الی ۱/۲ درصد وزن سیمان استفاده شده است. تصاویر مصالح مصرف‌شده و مراحل ساخت نمونه‌ها در پژوهش حاضر در شکل ۳ و شکل ۴ مشاهده می‌شود.



a) سیمان b) شن c)الیاف فولادی d)روان‌کننده.

شکل ۳. مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها

۳. انجام آزمایش‌ها

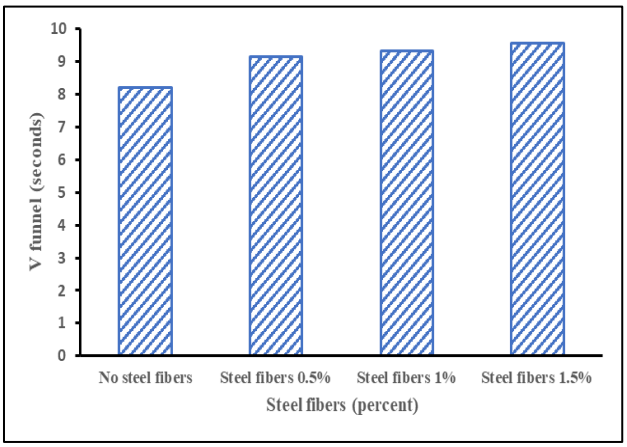
به‌منظور بررسی تأثیر الیاف فولادی در بتن‌ها، آزمایش‌های قیفV، جعبی L، جعبه‌ی U، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، و مقاومت خمشی نمونه‌ها انجام شده است. در ادامه، در شکل‌های ۵ الی ۱۰، نتایج آزمایش‌ها مشاهده می‌شوند.

از نتایج آزمایش مقاومت فشاری می‌توان ملاحظه کرد که درصد الیاف فولادی نمی‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف (شاهد) داشته باشد. فقط در الیاف فولادی ۱/۵٪، مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است. اما نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها نشان داده است که استفاده از الیاف فولادی در نمونه‌ها، مقاومت کششی را نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف (شاهد) افزایش داده است، که این درصد افزایش به ترتیب برای نمونه‌های الیاف ۰/۵، ۱، و ۱/۵ درصد، برابر با ۳۱، ۳۳، و ۳۳ درصد رشد

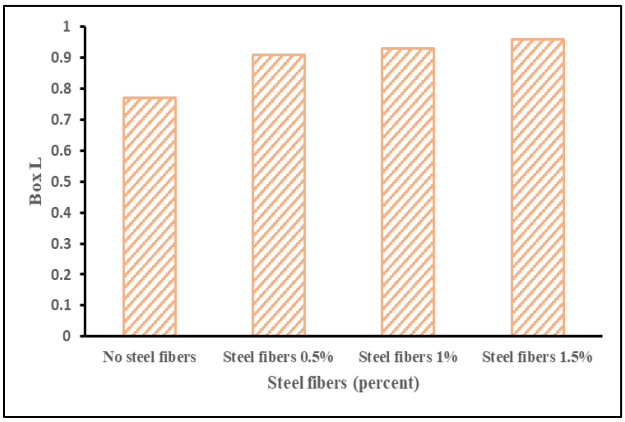


b a

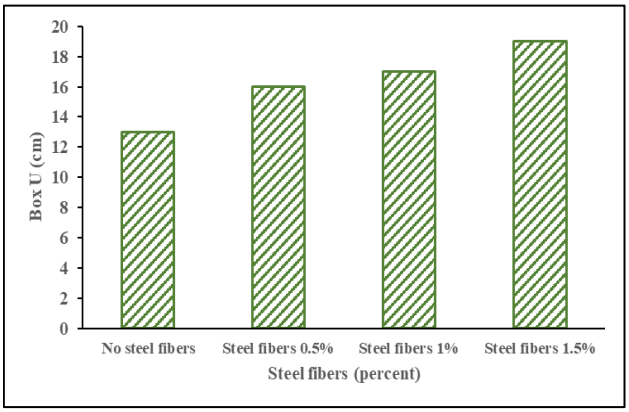
شکل ۴. مراحل ساخت نمونه‌ها.



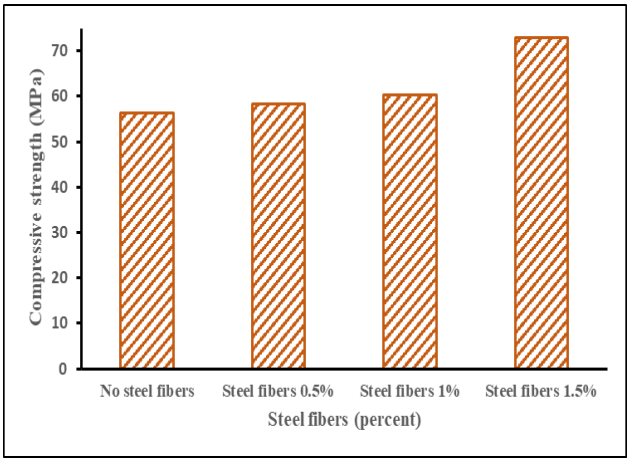
شکل ۵. نتایج آزمایش قیف V .



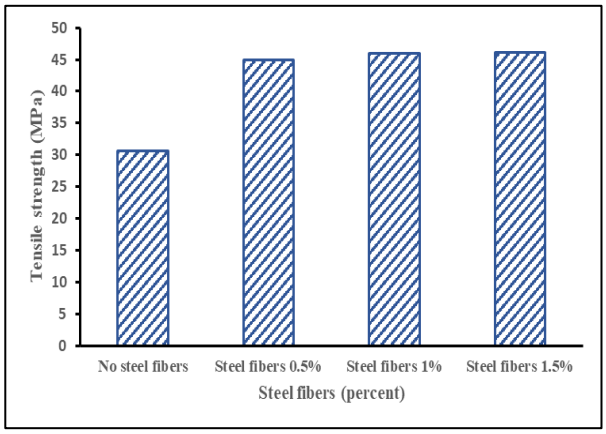
شکل ۶. نتایج آزمایش جعبه‌ی L.



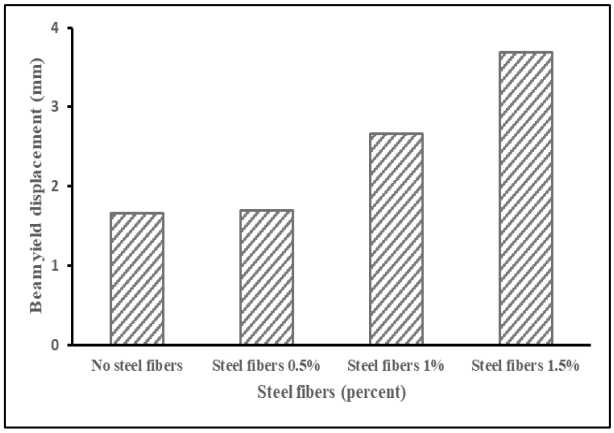
شکل ۷. نتایج آزمایش جعبه‌ی U.



شکل ۸. نتایج آزمایش مقاومت فشاری.



شکل ۹. نتایج آزمایش مقاومت کششی.

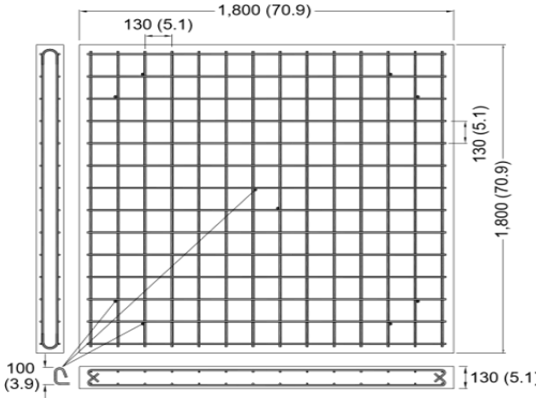


شکل ۱۰. نتایج آزمایش خمشی تیر.

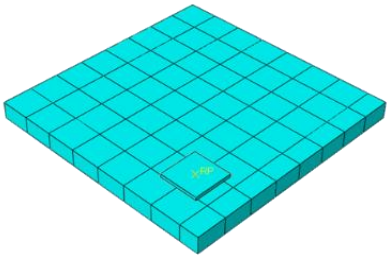
بوده است. همچنین تغییرمکان تسلیم در آزمایش مقاومت خمشی تیر با افزودن درصد الیاف فولادی افزایش قابل‌توجهی داشته است، که برای نمونه‌های ۰/۵، ۱، و ۱/۵درصد، نسبت به نمونه‌ی شاهد ۲، ۳۸، و ۵۵ درصد رشد داشته است.

۴. راستی‌آزمایی

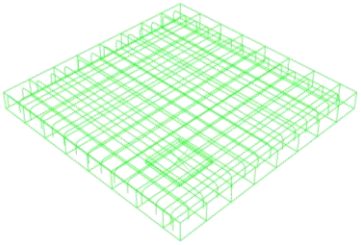
به‌منظور انجام تحلیل‌های عددی بر روی گنبدها لازم است ابتدا از درستی مدل عددی اطمینان یافت. اما تاکنون مدل گنبدها به‌صورت آزمایشگاهی بررسی نشده‌اند. بدین منظور، ابتدا برای راستی‌آزمایی آزمایش ضربه، یک دال بتنی از آزمایش هرینک و وکچیو[1] (۲۰۱۷)، و در نُرم مربعی با ابعاد ۱۸۰۰ و ضخامت ۱۳۰ میلی‌متر، که در هر دو جهت به‌صورت دوبل مسلح شده بود، بررسی شده است. ایشان از ۴ لایه میله‌ی تقویت‌کننده‌ی فولادی طولی برای تقویت دال استفاده کرده‌اند. ۳ مورد از ۷ دال با استفاده از طراحی مخلوط بتن معمولی و ۴ دال دیگر با استفاده از یک طراحی مخلوط بتن مسلح‌شده با فیبر فولادی (SFRC) ساخته شده‌اند، که نسبت حجمی فیبر در طیف ۰/۵ تا ۱/۵ درصد بوده است. وزنه از یک ارتفاع ثابت انداخته شده و سرعت برخورد اسمی ثابت ۸ متر بر ثانیه ایجاد کرده است، که با استفاده از تصویربرداری سرعت بالا تأئید شده است.[۱۹] در شکل ۱۱، ابعاد، جزئیات آرماتورگذاری دال بتنی مشاهده می‌شود. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، به‌ترتیب مدل‌سازی و آرماتورگذاری دال در نرم‌افزار آباکوس مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از ضربه بر دال نشان داده است که میزان اختلاف بین مدل نرم‌افزاری با مدل نوشتار حاضر به ترتیب برای کنترل جابجایی از مرکز ۵/۲۷٪ و برای کنترل جابجایی بر حسب زمان برابر با ۱۱٪ بوده است، که از شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به‌دست آمده‌اند.



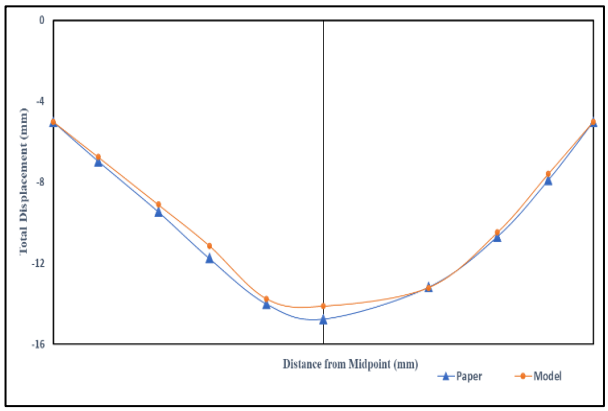
شکل ۱۱. جزئیات نمونه‌های دال.



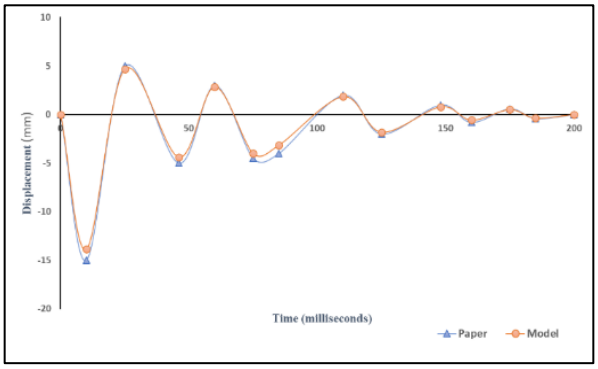
شکل ۱۲. مش‌بندی دال مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار آباکوس.



شکل ۱۳. شبکه‌ی آرماتوربندی‌شده در نرم‌افزار آباکوس.



شکل ۱۴. جابجایی محاسبه‌شده‌ی دال با ۰/۴۲٪ آرماتور و بدون الیاف.

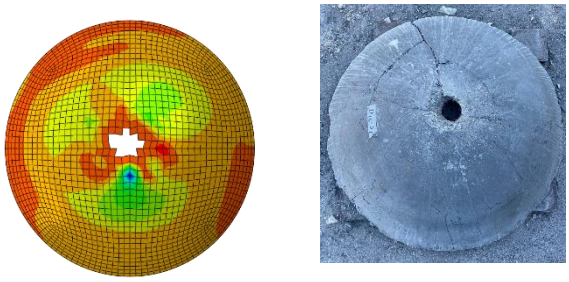


شکل ۱۵. جابجایی بر حسب زمان- دال با ۰/۴۲٪ آرماتور و بدون الیاف.

برای راستی‌آزمایی نتایج آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و الیاف فولادی ۱٪ با استفاده از نرم‌افزار آباکوس تحلیل صورت گرفته 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 کاملاً در بخش ۶ (نرم‌افزار) توضیح داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، می‌توان گفت که با استفاده از ضربه‌ی ۳۱، وزنه‌ی افتان از گنبد عبور کرده و نتایج با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته است. نوع تحلیل دینامیکی استفاده‌شده، تحلیل (Explicit) بوده و نوع المان به کاررفته، المان C3D8R بوده است. برای مش‌بندی دال در ماژول آباکوس، از روش مش‌بندی structured استفاده شده است؛ که در آن، مدل موردنظر با استفاده از مجموعه‌ی توپولوژی‌های پیش‌فرض ایجادشده در آباکوس شبکه‌بندی شده است. در یک مش‌بندی ساختارمند، تمام المان‌ها یا المان‌های مکعبی (brick or hexahedral) یا ترکیبی از المان‌های مکعبی و چهاروجهی (بیشترشان مکعبی (hex-dominant) بوده‌اند) هستند (شکل ۱۶- b).

۵. برنامه‌ی آزمایشگاهی و نتایج

۱۲ گنبد در ضخامت‌های ۵۰، ۷۵، و ۱۰۰ میلی‌متر ساخته و تحت اثر بار ضربه‌ی افتان آزمایش شده‌اند. 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 شده‌اند. در آزمایش اخیر، اثر ضخامت گنبد و درصد الیاف فولادی بررسی شده است. برای انجام آزمایش، دستگاهی مطابق شکل ۱۷ طراحی و ساخته شده است؛ که دستگاه ضربه شامل یک وزنه‌ی فولادی به وزن ۱۰ کیلوگرم بوده است، که با استفاده از کابل تا ارتفاع ۳۲۶۰ میلی‌متر بالا رفته بود. در آزمایش مذکور، سه پارامتر: تعداد ضربه برای ایجاد اولین ترک مؤثر، تعداد ضربه تا ایجاد گسیختگی در گنبد، و انرژی جذب‌شده در گنبد در نظر گرفته شده است. انرژی جذب‌شده در گنبد مطابق رابطه‌ی ۱ بر حسب کیلوژول نشان داده شده است.



(a) (b)

شکل ۱۶. مقایسه‌ی شکست در: (الف) آزمایشگاهی، (ب) تحلیلی.



شکل ۱۷. دستگاه آزمایش وزنه‌ی افتان.

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

که در آن، W وزن گوی فولادی بر حسب کیلونیوتن، H ارتفاع سقوط گوی بر حسب متر، و N تعداد ضربه‌ها برای ایجاد گسیختگی در گنبد هستند.

در پژوهش حاضر، معیار انهدام گنبدها، سوراخ‌شدن در مرکز دال یا چند تکه‌شدن گنبد در اثر تعداد ضربه‌ها بوده است.

۱.۵. مقاومت اولین ترک ایجادشده در گنبد

ترک‌ها در بتن به‌عنوان شکاف‌های ناچیز تا شکستگی‌های قابل‌مشاهده تعریف می‌شوند؛ که 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 به‌راحتی قابل‌مشاهده هستند و می‌توانند نشان‌دهنده‌ی آسیب جدی‌تر باشند. ترک‌های ریز در سازه‌های بتنی، به‌ویژه در گنبدها، در اثر نیروهای دینامیکی و ضربه‌هایی که به سطح وارد می‌شود، به وجود می‌آیند. آن‌ها ممکن است در لایه‌های سطحی یا زیرین بتن ایجاد شوند و در ابتدا قابل‌مشاهده نباشند؛ اما اگر توسعه پیدا کنند، ممکن است به شکستگی‌های قابل‌مشاهده و خطرناک تبدیل شوند. روش‌های مختلفی برای شناسایی ترک وجود دارد، که در پژوهش حاضر، بازرسی چشمی و ترک‌های قابل‌اندازه‌گیری 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. البته اثر الیاف فولادی اخیر با افزایش ضخامت گنبد، بیشتر قابل توجه‌تر بوده است؛ به‌طوری که درصد الیاف فولادی در گنبدهای با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و الیاف ۱٪/۵ نسبت به نمونه‌ی 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 درصد افزایش مقاومت در اولین ترک مشاهده شده است. این در حالی است که افزایش ضخامت گنبد به اندازه‌ی افزودن الیاف فولادی نتوانسته است مقاومت اولین ترک را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. جدول ۳. نتایج آزمایش وزنه‌ی افتان برای ایجاد اولین ترک قابل‌مشاهده در گنبد.

۲.۵. مقاومت نهایی ایجادشده در گنبد

با توجه به جدول ۴، نکته‌ی قابل توجه آن است که تعداد ضربه برای شکست در گنبدها با افزودن ضخامت و درصد الیاف فولادی به‌طور قابل توجهی افزایش داشته است. همچنین نتایج نشان داده است 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 به‌دلیل رفتار تُردشکنی گنبدهای بدون الیاف فولادی بوده است. افزایش ضخامت گنبدها از ۵۰ به ۱۰۰میلی‌متر سبب شده است که میزان تُردکنی گنبد بدون الیاف کاهش یابد، ولی همچنان با تعداد ضربه‌های کم نسبت به نمونه‌های با الیاف فولادی، نمونه‌ها دچار گسیختگی شده‌اند. افزودن الیاف فولادی، توانایی گنبد در جذب انرژی و تغییرشکل قبل از وقوع شکست (چقرمگی) را به‌طور قابل‌قبولی افزایش داده است؛ به‌طوری که مقاومت نهایی در گنبد با ضخامت‌های ۵۰، ۷۵، و ۱۰۰ میلی‌متر و الیاف فولادی ۱٪/۵ نسبت به گنبد شاهد (بدون الیاف فولادی)، به‌ترتیب ۸۸، ۸۵، و ۱۰۴ درصد افزایش داشته است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی که در شکل‌های ۱۸ الی ۲۰ مشاهده می‌شوند، می‌توان ملاحظه کرد که استفاده از الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت سازه در سازه شده است.

جدول ۴. نتایج آزمایش وزنه‌ی 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



بدون الیاف ۰/۵ درصد ۱ درصد ۱/۵ درصد

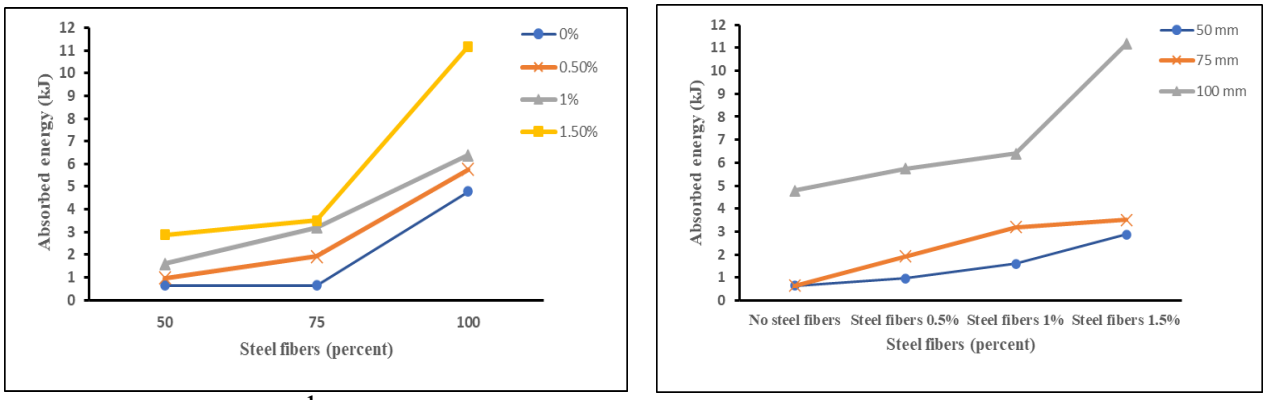
شکل ۱۸. نحوه‌ی ایجاد ترک و گسیختگی در گنبد با ضخامت ۵۰ میلی‌متر.



شکل ۱۹. نحوه‌ی ایجاد ترک و گسیختگی در گنبد با ضخامت ۷۵ میلی‌متر.



شکل ۲۰. نحوه‌ی ایجاد ترک و گسیختگی در گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر.



شکل ۲۱. انرژی جذب شده a) برحسب درصد الیاف فولادی b) بر حسب ضخامت گنبدها.

همچنین، در گنبدهای با درصد الیاف بالاتر با افزایش تعداد ضربه در گنبد با ایجاد حفره در گنبد، گسیختگی ایجاد شده و به‌دلیل ضعف در قسمت تکیه‌گاهی، ایجاد ترک‌ها درگنبد از قسمت تکیه‌گاه به سمت میانه‌ی گنبد رشد داشته است؛ اما باعث شکست نهایی در گنبد نشده و ناپایداری در گنبد به‌وجود نیامده است.

۵.۳. میزان انرژی جذب‌شده در گنبد

با توجه به رابطه‌ی ۱ و جدول ۴، انرژی جذب‌شده در گنبدها برای لحظه‌ی گسیختگی (ایجاد حفره در گنبد) بر حسب کیلوژول ارائه شده است. در شکل ۲۱، نیز اثر افزایش الیاف فولادی در جذب انرژی گنبدهای با ضخامت‌های مختلف مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در گنبدهای با ضخامت ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر و بدون الیاف فولادی، جذب انرژی گنبدها تفاوت چندانی نداشته و با افزایش ضخامت گنبد، اثر الیاف فولادی افزایش یافته است. همچنین در گنبدهای با ضخامت ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر، افزودن الیاف فولادی جذب انرژی را افزایش داده است، که در گنبد با ضخامت ۱۰۰میلی‌متر چشم‌گیر بوده است. ضمناً می‌توان از نتایج چنین استنباط کرد که افزایش ضخامت گنبدها، میزان جذب انرژی در گنبدها را افزایش داده و نیز با اضافه‌کردن الیاف فولادی، تعداد ضربه‌ها برای ایجاد گسیختگی در گنبدها افزایش یافته است.

۶. شبیه‌سازی و نتایج عددی

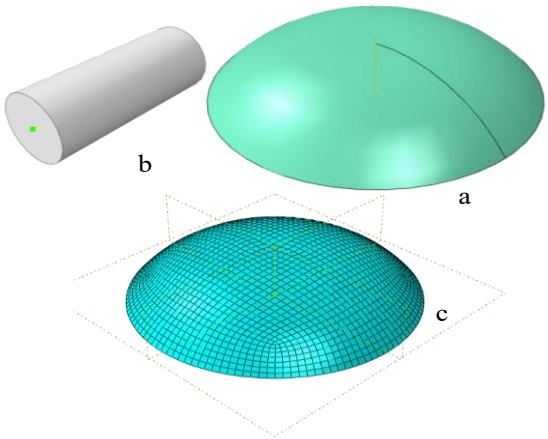
در مطالعه‌ی حاضر، برای مدل‌سازی و مقایسه‌ی نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی از نرم‌افزار آباکوس (نسخه‌ی ۲۰۱۹) استفاده شده است. در شکل ۲۲، گنبد، وزنه، و مش‌بندی در نرم‌افزار مذکور مشاهده می‌شود.

در جدول ۵، مشخصات و ویژگی‌های مصالح گنبد مطالعه‌شده در نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است. وزنه‌ی مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار با سرعت ۸ متر بر ثانیه به هنگام ضربه بوده است. در پژوهش حاضر، مدل‌های رفتاری پوپویچ و شیما برای مدل‌سازی نرم‌افزاری استفاده شده است. از مدل فشاری پوپویچ[5]

[5] Popovich

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

Compressive modulus of elasticity (GPa)	Tensile modulus of elasticity (GPa)	Density (kg/m³) [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



شکل ۲۲: a) گنبد مدل‌سازی شده، b)وزنه مدل‌سازی شده، c) مش‌بندی گنبد مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس.

برای پیش‌بینی مدل فشاری بتن مطابق روابط ۲ الی ۴ استفاده شده است. برای پیش‌بینی مدل کششی بتن نیز از مدل رفتاری شیما با استفاده از روابط ۵ و ۶ استفاده شده است.[۲۰]

$$n = 0.8 + \frac{f'_c}{17} \rightarrow (f'_c \rightarrow Mpa) \quad (2)$$

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

$$k = 1 \rightarrow for 0 < \varepsilon_{ci} < \varepsilon_c$$
$$k = 0.67 + \frac{f'_c}{62} \geq 1 \rightarrow for \varepsilon_{ci} > \varepsilon_c \quad (4)$$

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

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

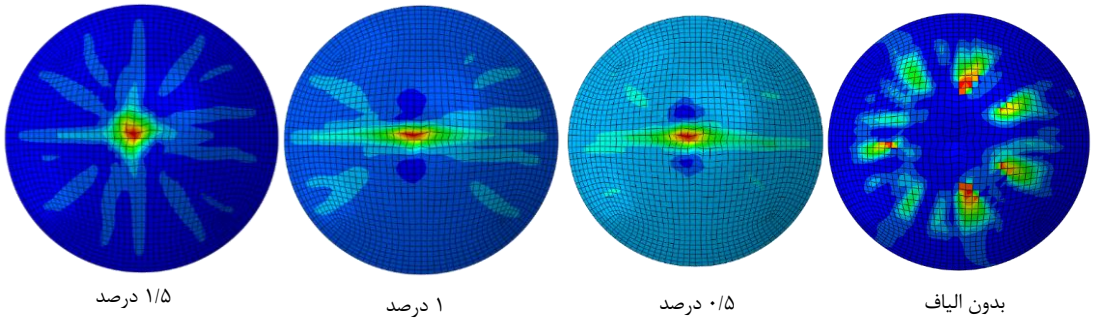
برای بررسی میزان آسیب در گنبدها از پارامتر PEEQ، که نشانگر کرنش مؤثر یا معادل خمیری است، استفاده شده است؛ که یک پارامتر اسکالر است و میزان خمیری‌شدن گنبدها را نشان می‌دهد. هر ناحیه‌ای از گنبد وارد خرابی یا شکست شود، میزان کرنش مؤثر از عدد صفر بیشتر می‌شود. مقاومت‌های فشاری و کششی واردشده در رابطه‌های ۲ الی ۶، با استفاده از نتایج شکل‌های ۸ و ۹ به‌دست آمده است. با توجه به شکل‌های ۲۳ الی ۲۵، می‌توان بیان کرد که در گنبدهای بدون الیاف فولادی در ضخامت‌های ۵۰، ۷۵، و ۱۰۰ میلی‌متر، میزان خمیری‌شدن گنبدها از ناحیه‌ی تکیه‌گاه به سمت مرکز گنبد مشاهده می‌شود، که نشان‌دهنده‌ی گسیختگی و تقسیم‌شدن گنبدهاست. با افزودن الیاف فولادی به نمونه‌ها، نوع خرابی در گنبدها از طریق تقسیم‌شدن به چند تکه و ایجاد حفره در مرکز گنبد تغییر می‌یابد؛ که به‌دلیل افزایش تعداد ضربه‌های واردشده به گنبد برای گسیختگی تغییر حالت داده و ترک و خرابی از مرکز گنبد شروع و به سمت تکیه‌گاه حرکت کرده است.

۷. نتیجه‌گیری

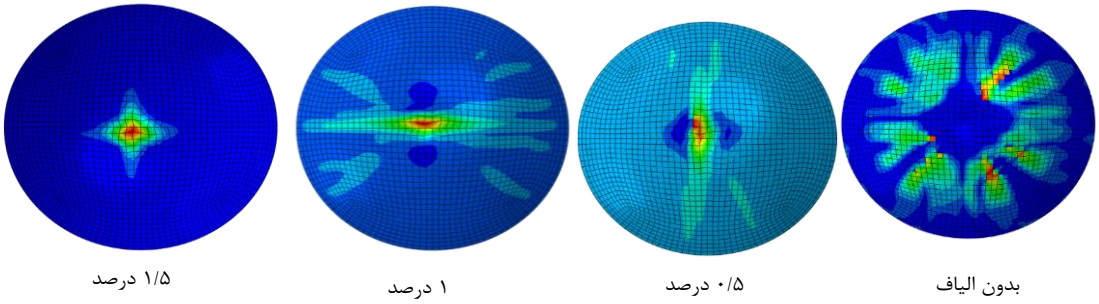
در نوشتار حاضر، با هدف اصلی بررسی و مقایسه‌ی پارامترهای افزایش درصد فولاد، افزایش ضخامت گنبدها، و مقاومت ضربه‌ای آن‌ها تحت اثر ضربه‌ی وزنه‌ی افتان، به بررسی خصوصیات مکانیکی و ضربه‌ای گنبدهای بتنی با الیاف فولادی پرداخته شده است. لذا، درصد الیاف‌های ۰، ۰/۵، ۱، و ۱/۵ و همچنین گنبدهای با ضخامت ۵۰، ۷۵، و ۱۰۰میلی‌متر بررسی شده و این نتایج به‌دست آمده است:

۱- نتایج آزمایشگاهی نشان‌دهنده‌ی تأثیر الیاف فولادی در اولین ترک ایجادشده در گنبدها بوده است. البته نکته‌ی قابل توجه آن است که در گنبدهای بدون الیاف فولادی، در اولین ضربه‌های واردشده به گنبد، خرابی ایجاد شده است؛ به‌صورتی که گنبدها به چندین تکه تقسیم شده‌اند. اما استفاده از الیاف فولادی تا حدی، تعداد ضربه‌ها برای ایجاد خرابی در گنبدها را افزایش داده است، که بیشترین تأثیر در گنبدهای با الیاف ۱/۵٪ بوده است. به‌طورمثال، در گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر، تعداد ضربه‌ها برای ایجاد خرابی نسبت به نمونه‌ی شاهد (بدون الیاف)، برای درصدهای الیاف ۰/۵، ۱، و ۱/۵، به ترتیب ۱۹، ۵۷، و ۷۷ درصد رشد داشته است.

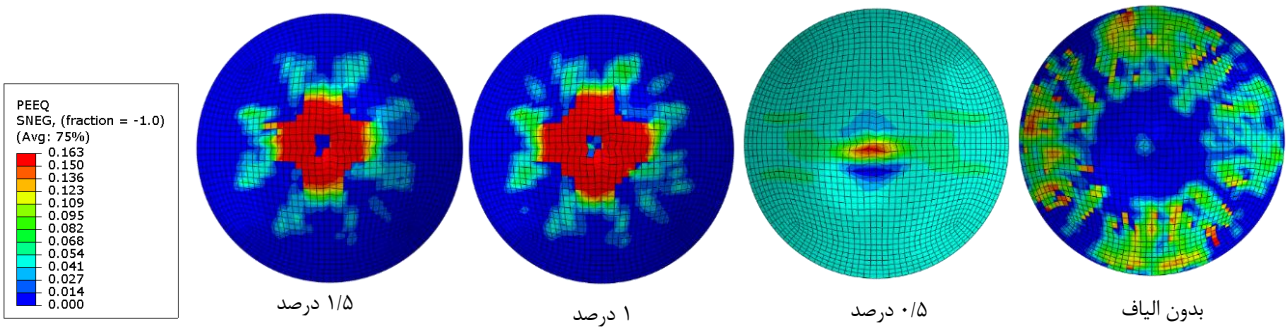
۲- نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که افزایش ضخامت گنبد در میزان مقاومت آن در برابر ضربه، تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. بیشترین تأثیر در گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر مشاهده شده است، که تعداد ضربه‌ها برای ایجاد خرابی در گنبد نسبت به گنبدهای ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر با الیاف ۱/۵٪، به ترتیب ۶۸ و ۶۴ درصد رشد داشته است.



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



شکل۲۴. کرنش معادل پلاستیک در گنبد با ضخامت ۷۵ میلی متر.



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

۳- با توجه به نتایج آزمایشگاهی می‌توان بیان کرد که افزودن الیاف فولادی و افزایش ضخامت، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش جذب انرژی داشته است. به‌طوری که در گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و با ۰/۵٪ الیاف فولادی نسبت 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 نمونه‌ی شاهد (بدون الیاف)، جذب انرژی ۶۷٪ رشد داشته است. در گنبد اخیر با الیاف ۱ و ۱/۵ درصد، جذب انرژی به ترتیب ۸۰ و ۸۲ درصد رشد داشته است. در گنبد با ضخامت ۱۰۰میلی‌متر با الیاف ۰/۵٪، جذب انرژی نسبت به نمونه‌ی شاهد (بدون الیاف)، ۱۷٪ رشد داشته است؛ اما در نمونه با الیاف‌های ۱ و ۱/۵ درصد، جذب انرژی به ترتیب ۲۵ و ۵۷ درصد رشد داشته است. همچنین نتایج نشان داده‌اند که افزودن ضخامت گنبد بدون الیاف، جذب انرژی را افزایش می‌دهند؛ اما این افزایش قابل توجه نیست. در گنبدهای با ضخامت ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر، جذب انرژی به هم نزدیک بوده و رشد قابل‌توجهی نداشته است. در گنبد با ضخامت ۱۰۰میلی‌متر، جذب انرژی نسبت به گنبد با ضخامت‌های ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر، حدود ۸۶٪ رشد داشته است؛ که نشانگر تأثیر ضخامت در جذب انرژی است.

۴- نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داده‌اند که در گنبدهای بدون الیاف فولادی، نحوه‌ی ترک و خرابی بسیار به هم نزدیک بوده است؛ به‌طوری که در گنبدهای بدون الیاف فولادی، گنبدها به چند قسمت تقسیم شده‌اند؛ که با افزودن الیاف فولادی، نوع خرابی از چند تکه تقسیم‌شدن به ایجاد حفره تحت اثر تعداد ضربه‌های بالا تغییر کرده است.

References- 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. Liew, K.M., Peng, L.X., and Ng, T.Y. 2011.Three-dimensional vibration analysis of spherical shell panels subjected to different boundaryconditios, *Concrete structures*.

5. Hejazi, M. and Zarei, Sh. (2003). Parametric investigation of concrete domes. *Proceedings of the 6th International Conference on Civil Engineering*, Isfahan, Iran. [In Persian].

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*, 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-Moghaddam, A. H., Omedia-Nasab, F. and Dalvand, A. (2019). Investigation of mechanical and impact properties of high-performance self-compacting composite concrete. *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, *32*(3), 4966. [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

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

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.jobe.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., Jeż, 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