

ارزیابی آزمایشگاهی ظرفیت گنندهای 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- rezageravand۷۲@gmail.com

۲- a.mortezaei@semnaniau.ac.ir

۳- aazizi۴۶@yahoo.com

چکیده:

در این مقاله، خصوصیات مکانیکی و ضربه‌ای گنندهای بتنی با الیاف فولادی بررسی شده است. هدف اصلی از این مقاله بررسی و مقایسه پارمترهای افزایش درصد فولادی و افزایش ضخامت گنندها بر مقاومت ضربه‌ای آنها تحت اثر بار ضربه وزنه افتان است. در این پژوهش درصد الیاف‌های ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵، همچنین گنندهای 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 گنندها 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 گنندها را در برابر ضربه افزایش دهد. همچنین اثر افزودن الیاف فولادی و ضخامت گنندها نشان داد که افزایش الیاف فولادی و ضخامت گنندها 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

R. Geravand^۱, A. Mortezaei^۲, A. Azizi^۳

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

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

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

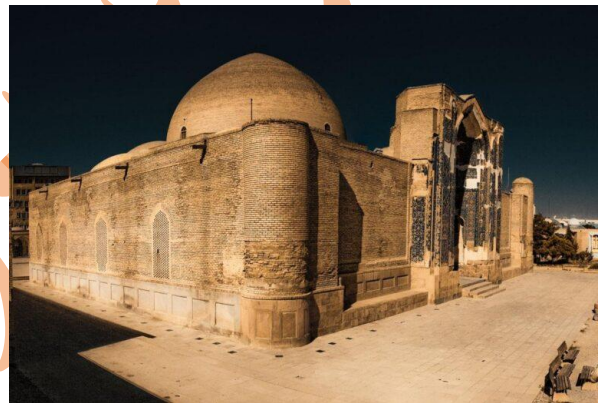
Abstract:

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 (۰, ۰.۵, ۱, and ۱.۵) and varying dome thicknesses (۵۰, ۷۵, and ۱۰۰ 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 ۱۰ kg steel weight dropped from a height of ۳۲۶۰ 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 ۱۰۰ mm thick dome with ۰.۵% steel fibers absorbed ۳۳% more energy than a ۵۰ mm dome without fibers. When the fiber content was increased to ۱% and ۱.۵%, energy absorption rose by ۶۰% and ۷۸%, respectively. Similarly, increasing dome thickness to ۷۵ mm with ۰.۵% fibers resulted in a ۶% increase in energy absorption compared to the control sample without fibers. For domes with ۱% and ۱.۵% fibers, energy absorption increased by ۸۰% and ۸۲%, 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 ۱۰۰ mm thickness, where the number of impacts required to cause damage increased by ۶۸% and ۶۴% compared to ۵۰ mm and ۷۵ mm thick domes with ۱.۵% fiber content. This highlights the crucial role of both fiber reinforcement and thickness in improving dome resilience against impacts.

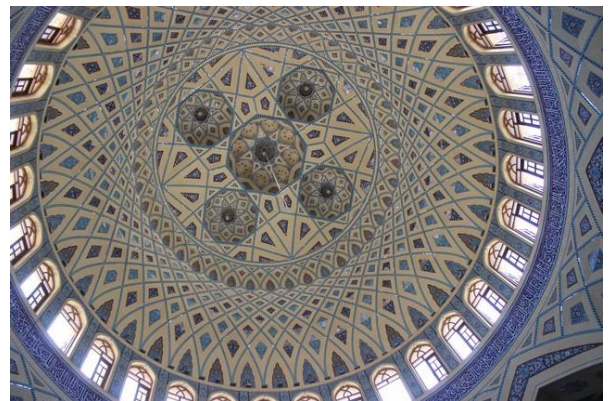
Keywords: Dome, Impact, Failure, Energy absorption, Steel fiber.

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.



الف



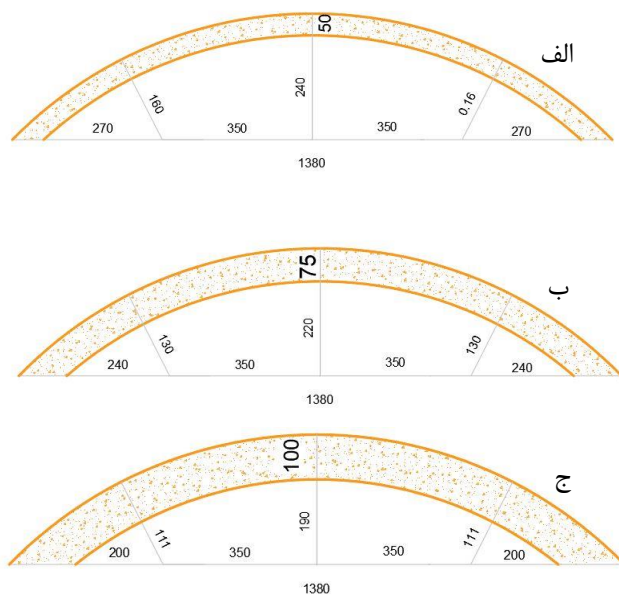
ب

شکل ۱: الف) گنبد مسجد کبود ب) 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]. امیدنسب و همکاران به بررسی خصوصیات مکانیکی و ضربه‌ای بتن‌های کامپوزیتی توانمند خودتراکم 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

تاکنون پژوهش‌های زیادی درباره گنبد و پوسته صورت گرفته است که می‌توان به پژوهش لیو و همکاران اشاره کرد، ایشان برای محاسبه آنالیز ارتعاشی سه‌بعدی یک قطعه مستطیلی از پوسته

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 SRF۵۲۱. 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 ضخامت‌های (الف) ۵۰ (ب) ۷۵ (ج) ۱۰۰ میلی‌متر

جدول ۱: مشخصات گنبد‌ها و میزان درصد مصرف الیافی

الیاف فولادی (%)	ضخامت (mm)	نمونه
۰	۵۰	Dome-۰۱
۰/۵	۵۰	Dome-۰۲
۱	۵۰	Dome-۰۳
۱/۵	۵۰	Dome-۰۴
۰	۷۵	Dome-۰۵
۰/۵	۷۵	Dome-۰۶
۱	۷۵	Dome-۰۷
۱/۵	۷۵	Dome-۰۸
۰	۱۰۰	Dome-۰۹
۰/۵	۱۰۰	Dome-۱۰
۱	۱۰۰	Dome-۱۱
۱/۵	۱۰۰	Dome-۱۲

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 × ۳۰۰ 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 C۱۵۰ استفاده شده است [۱۶]. دانه بندی ریز دانه مطابق استاندارد ASTM C-۳۳ 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 D۲۴۱۹، C۱۳۶، C۱۲۸، C۱۲۷، C۲۳، C۲۹ از استاندارد ASTM تعیین شده است. لازم به ذکر است که مصالح شن و ماسه مصرفی در ساخت نمونه‌های پر مقاومت به صورت خشک بوده است. خاکستر بادی استفاده شده کلاس F و آب مصرفی، آب

جدول ۲: خصوصیات الیاف فولادی مورد استفاده

الیاف	طول (میلی متر)	قطر (میلی متر)	نسبت طول به قطر	چگالی (kg/m ^۳)	مدول الاستیسیته (Gpa)	مقاومت کششی (Mpa)
فولادی	۳۵	۰/۳۸۷	۹۱/۱۴	۷۸۷۰	۲۱۰	۲۷۳۰



ب



الف

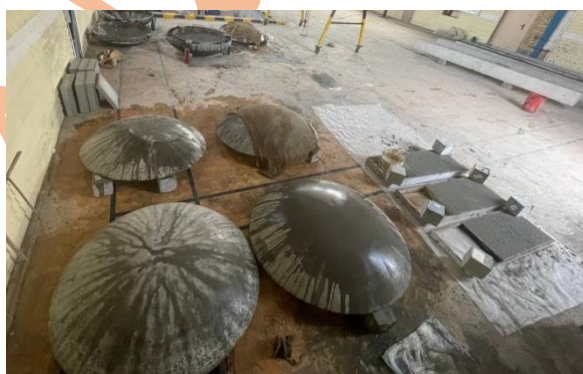


د



ج

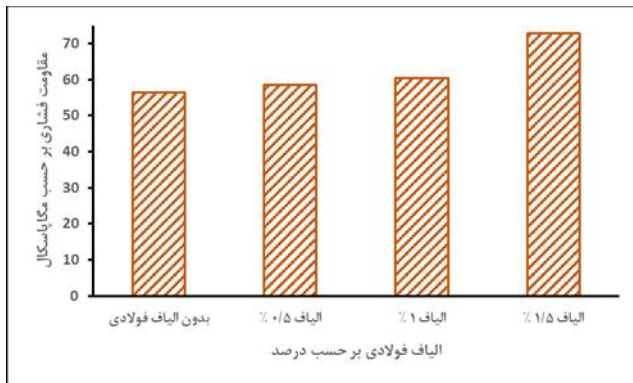
شکل ۳: مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها (الف) سیمان (ب) شن (ج) الیاف فولادی (د) روان کننده



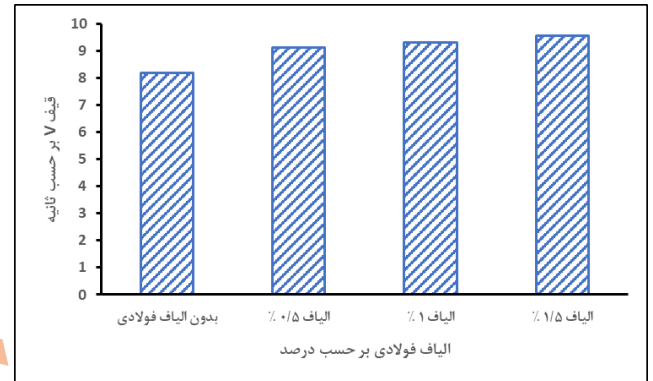
شکل ۴: مراحل ساخت نمونه‌ها

۳- انجام آزمایش‌ها

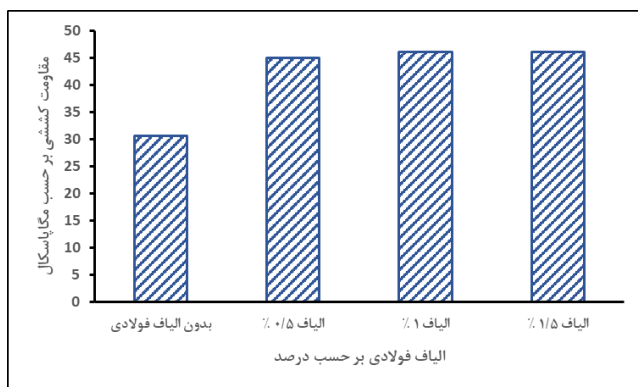
به منظور بررسی تأثیر الیاف فولادی بر روی بتن‌ها آزمایش قیف V، جعبه L، جعبه U، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی نمونه‌ها انجام شده است. در ادامه در شکل‌های ۵ الی ۱۰ نتایج آزمایش‌ها نشان داده شده است.



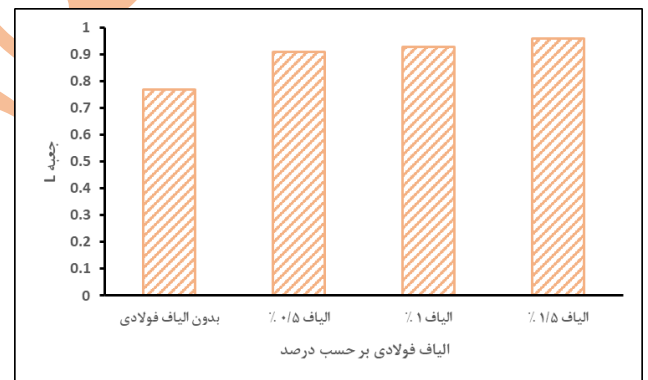
شکل ۸: نتایج آزمایش مقاومت فشاری



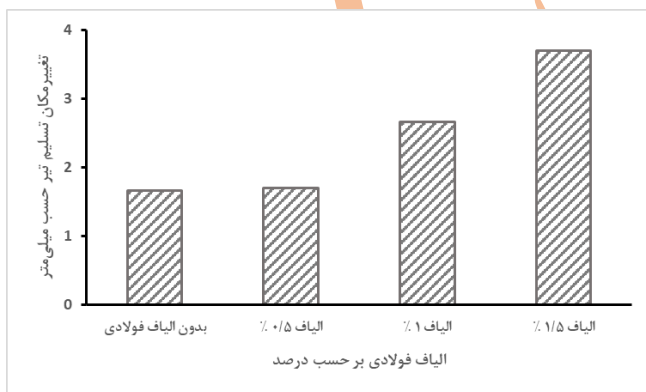
شکل ۵: نتایج آزمایش قیف V



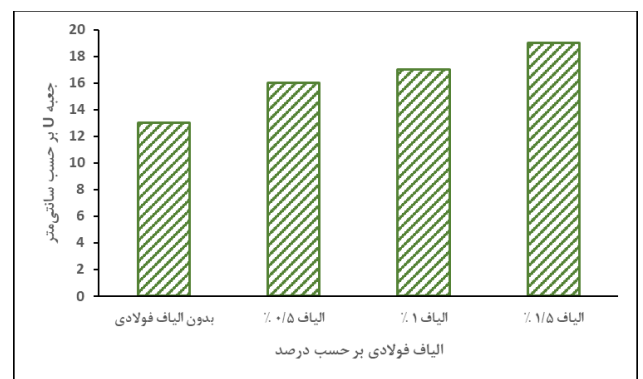
شکل ۹: نتایج آزمایش مقاومت کششی



شکل ۶: نتایج آزمایش جعبه L

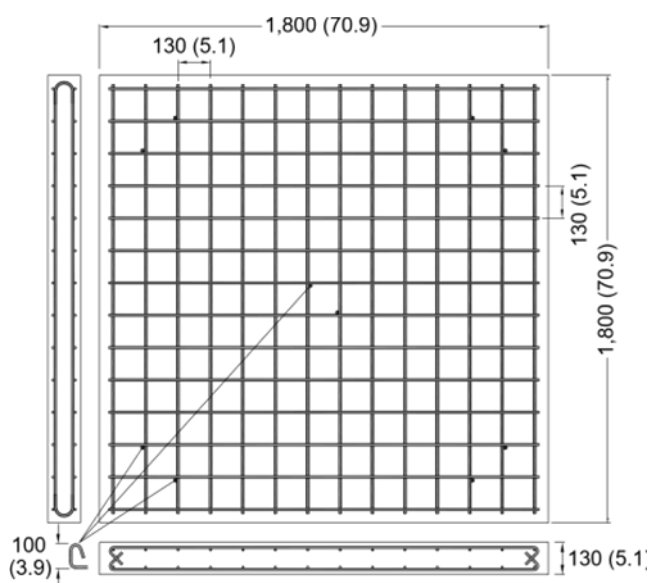


شکل ۱۰: نتایج آزمایش خمشی تیر

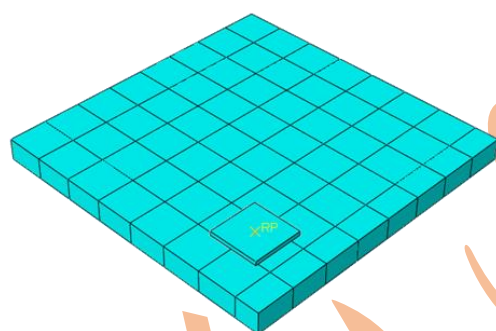


شکل ۷: نتایج آزمایش جعبه U

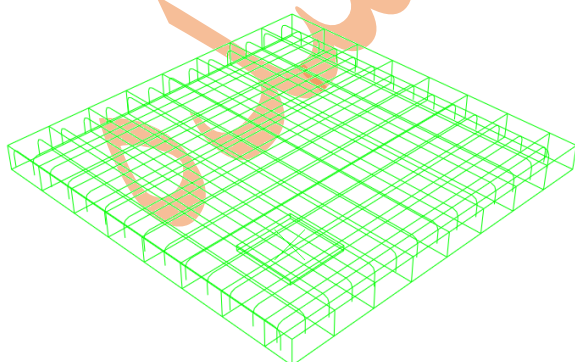
از نتایج آزمایش مقاومت فشاری می‌توان بیان کرد که درصد الیاف فولادی نمی‌توانند تأثیر قابل توجهی در مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه بدون الیاف (شاهد) داشته باشد. تنها در الیاف فولادی ۱/۵٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد افزایش



شکل ۱۱: جزئیات نمونه‌های دال



شکل ۱۲: مش‌بندی دال مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس



شکل ۱۳: شبکه آرماتوربندی شده در نرم‌افزار آباکوس

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 ۳۱٪، ۳۳٪ و 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 ۲٪، ۳۸٪ و ۵۵٪ رشد داشته است.

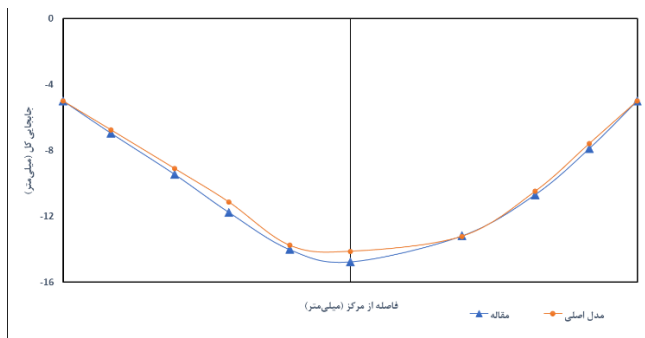
۴ - صحت‌سنجی

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 Hrynyk و Vecchio در نرم‌مربعی با ابعاد ۱۸۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۳۰ میلی‌متر که در هر دو جهت به صورت دوپل مسلح گردیده را مورد بررسی قرار داده‌اند. ایشان از چهار لایه میل‌ه 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.

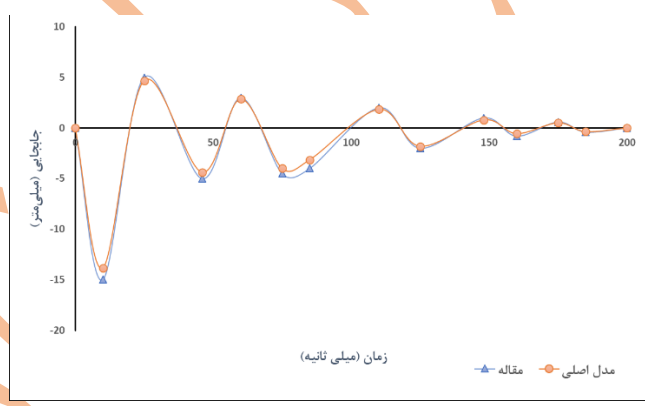
هستند یا ترکیبی از المان‌های مکعبی و چهاروجهی، که اکثریت آن‌ها مکعبی (hex-dominant) هستند (شکل ۱۶-ب).



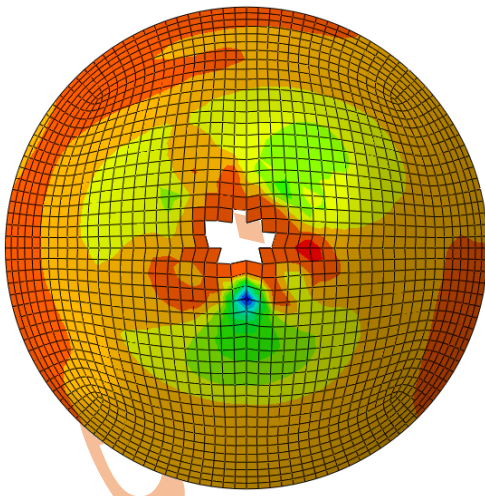
الف



شکل ۱۴: جابجایی محاسبه شده - دال با ۴۲٪ آرماتور و بدون ییاف



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



ب

شکل ۱۶: مقایسه شکست در الف) آزمایشگاهی ب) تحلیلی

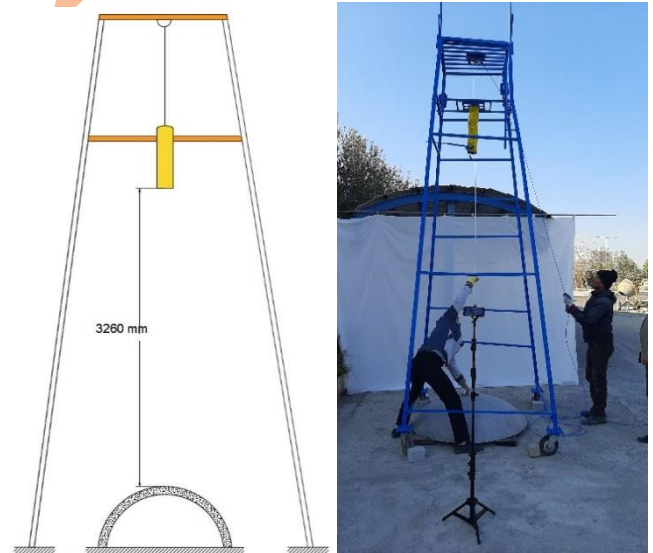
برای صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و ییاف فولادی ۱ درصد مورد ارزیابی قرار گرفته است. نرم‌افزار Abaqus تحلیل شده و شکست گنبد ارزیابی شده است. برای ارزیابی شکست گنبد در نرم‌افزار، strain fracture با کرنش شکست (۰/۰۱۰۷۹۱۲۷۹) و جابجایی خسارت (۱۵ میلی‌متر) تعریف شده است. 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 دستگای 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 کیلونیوتن، 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 قابل‌مشاهده 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 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 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

نمونه	تعداد ضربه برای ایجاد اولین ترک	وزنه (کیلو نیوتن)	فاصله تا نمونه (متر)	انرژی جذب شده (ژول)
Dome-۰۱	۲	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۰/۶۴
Dome-۰۲	۳	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۰/۹۶
Dome-۰۳	۵	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۱/۶۰
Dome-۰۴	۹	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۲/۸۷
Dome-۰۵	۲	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۰/۶۴
Dome-۰۶	۶	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۱/۹۲
Dome-۰۷	۱۰	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۳/۱۹
Dome-۰۸	۱۱	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۳/۵۱
Dome-۰۹	۱۵	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۴/۷۹
Dome-۱۰	۱۸	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۵/۷۵
Dome-۱۱	۲۰	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۶/۳۹
Dome-۱۲	۳۵	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۱۱/۱۸

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 تردکنی 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)، ۰/۸۸٪، ۰/۸۵٪ و ۰/۱۰۴٪ 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

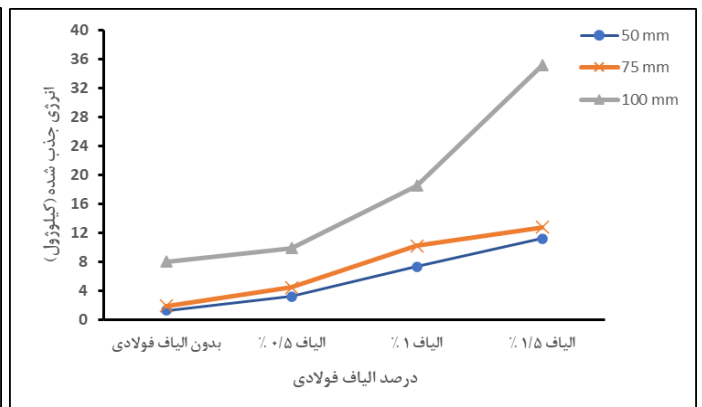
است. همچنین در گنبد با ضخامت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر افزودن الیاف فولادی جذب انرژی را افزایش داده است که این افزایش در گنبد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر چشم‌گیر بوده است. همچنین می‌توان از نتایج بیان کرد که افزایش ضخامت گنبدها میزان جذب انرژی در گنبدها افزایش یافته و همچنین با اضافه کردن الیاف فولادی تعداد ضربات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

جدول ۴: نتایج آزمایش وزنه افتان برای انهدام در گنبد

نمونه	تعداد ضربه برای شکست در گنبد	وزنه (کیلو نیوتن)	فاصله تا نمونه (متر)	انرژی جذب شده (ژول)
Dome-۰۱	۴	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۱/۲۸
Dome-۰۲	۱۰	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۳/۱۹
Dome-۰۳	۲۳	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۷/۳۵
Dome-۰۴	۳۵	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۱۱/۱۸
Dome-۰۵	۶	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۱/۹۲
Dome-۰۶	۱۴	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۴/۴۷
Dome-۰۷	۳۲	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۱۰/۲۲
Dome-۰۸	۴۰	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۱۲/۷۸
Dome-۰۹	۲۵	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۷/۹۹
Dome-۱۰	۳۱	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۹/۹۰
Dome-۱۱	۵۸	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۱۸/۵۲
Dome-۱۲	۱۱۰	۰/۰۹۸	۳/۲۶	۳۵/۱۴



ب

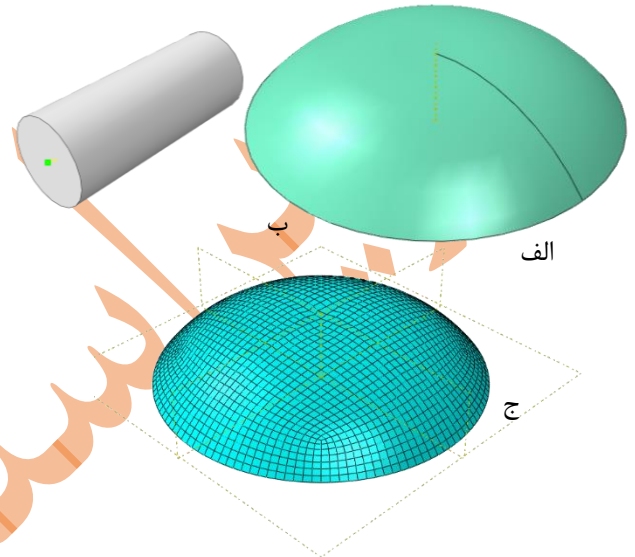


الف

شکل ۲۱: انرژی جذب شده (الف) بر حسب درصد الیاف فولادی (ب) بر حسب ضخامت گنبدها

۶- شبیه‌سازی و نتایج عددی

در این مطالعه برای مدل‌سازی و مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی از نرم‌افزار آباکوس نسخه ۲۰۱۹ استفاده شده است. در شکل ۲۲، گنبد، وزنه و مش‌بندی در نرم‌افزار نشان داده شده است.



شکل ۲۲: الف) گنبد مدل‌سازی شده، ب) وزنه مدل‌سازی شده، ج) مش‌بندی گنبد مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس

در جدول (۵)، مشخصات و ویژگی‌های مصالح گنبد مورد مطالعه در نرم‌افزار آورده شده است. وزنه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار دارای سرعت ۸ متر بر ثانیه به هنگام ضربه می‌باشد. در این پژوهش مدل‌های رفتاری پوپویچ و شیما برای مدل‌سازی نرم‌افزاری استفاده شده است. از مدل فشاری پوپویچ برای پیش‌بینی مدل فشاری بتن استفاده شده است که از روابط (۲) الی (۴) محاسبه شده است. از مدل رفتاری شیما برای پیش‌بینی مدل کششی بتن با استفاده از روابط (۵) و (۶) محاسبه شده است [۲۰].

$$\delta_{ci} = \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_c} \right) \times f'_c \times \frac{n}{n-1 + \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_c} \right)^{nk}} \quad (۲)$$

$$n = 0.8 + \frac{f'_c}{17} \rightarrow (f'_c \rightarrow \text{Mpa}) \quad (۳)$$

$$k = 1 \rightarrow \text{for } 0 < \varepsilon_{ci} < \varepsilon_c \quad (۴)$$

$$k = 0.67 + \frac{f'_c}{62} \geq 1 \rightarrow \text{for } \varepsilon_{ci} > \varepsilon_c \quad (۴)$$

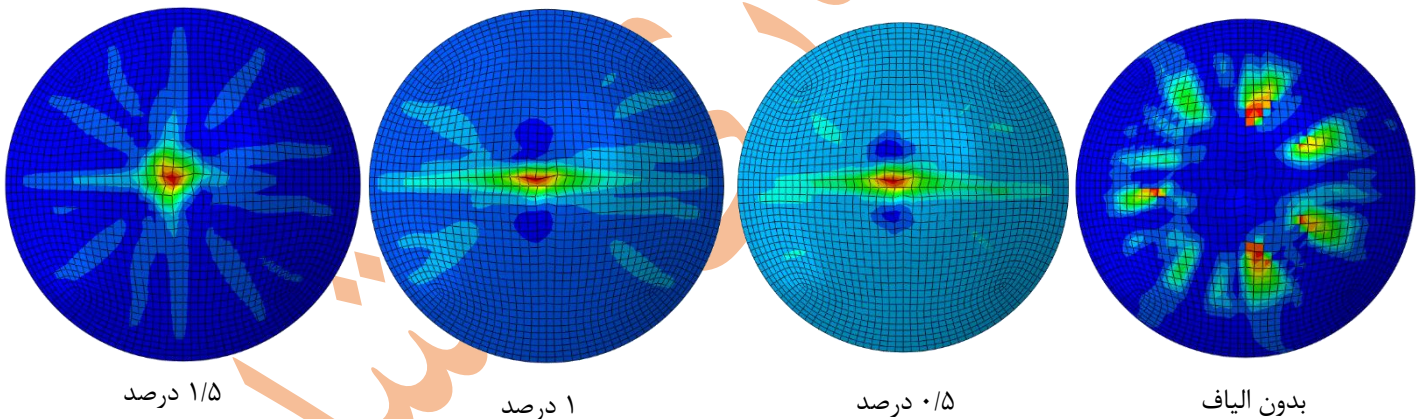
$$\delta_{ii} = f_t \times \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_c} \right)^c \quad (۵)$$

$$f_t = 0.2 \times (f'_c)^{\frac{2}{3}} \rightarrow (\text{Mpa}) \quad (۶)$$

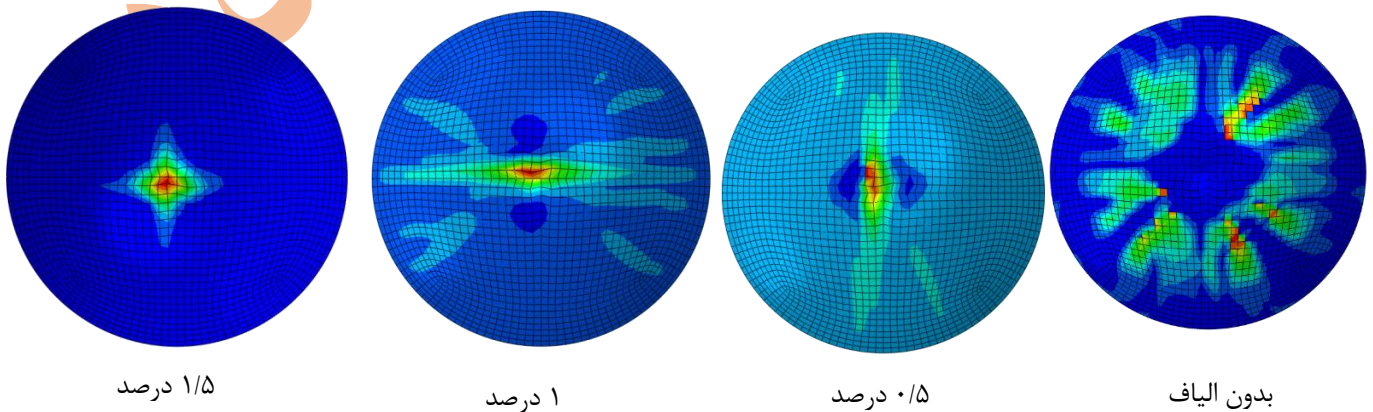
برای بررسی میزان آسیب در گنبدها از PEEQ که نشان‌دهنده کرنش مؤثر یا معادل پلاستیک می‌باشد که یک پارامتر اسکالر است که میزان پلاستیسیته شدن گنبدها را نشان می‌دهد. هر ناحیه‌ای از گنبد وارد خرابی یا شکست شده باشد میزان کرنش مؤثر از عدد صفر بیشتر می‌شود. مقاومت فشاری و مقاومت کششی وارد شده در رابطه‌های (۲) الی (۶)، با استفاده از نتایج شکل‌های (۸) و (۹) به دست 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 پلاستیسیته شدن گنبدها از ناحیه تکیه‌گاه به سمت مرکز گنبد قابل مشاهده است که نشان‌دهنده گسیختگی و تقسیم شدن گنبدها می‌باشد. با افزودن الیاف فولادی به نمونه‌ها 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 تکیه‌گاه حرکت کرده است.

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

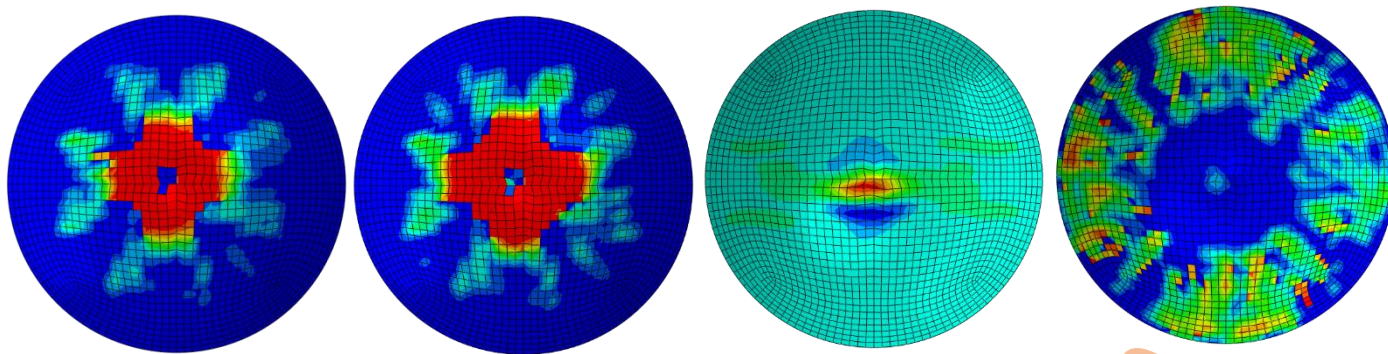
مدول الاستیسیته فشاری (Gpa)	مدول الاستیسیته کششی (Gpa)	چگالی (kg/m^3) [۲۱]	ضریب پواسون	مقاومت فشاری (Mpa)	مقاومت کششی (Mpa)	الیاف مصرفی (%)	ضخامت (mm)	نمونه
۳۵	۲۷	۲۳۴۵	۰/۲	۵۳/۴۰۳	۳۰/۶۲	۰	۵۰	Dome-۰۱
۳۸	۳۳	۲۳۷۰	۰/۲	۵۸/۴۱	۴۴/۹۵	۰/۵	۵۰	Dome-۰۲
۴۱	۳۵	۲۴۶۰	۰/۲	۶۰/۳۷	۴۵/۹۶	۱	۵۰	Dome-۰۳
۴۵	۳۶	۲۴۸۵	۰/۲	۷۲/۸۶	۴۶/۰۶	۱/۵	۵۰	Dome-۰۴
۳۵	۲۷	۲۳۴۵	۰/۲	۵۳/۴۰۳	۳۰/۶۲	۰	۷۵	Dome-۰۵
۳۸	۳۳	۲۳۷۰	۰/۲	۵۸/۴۱	۴۴/۹۵	۰/۵	۷۵	Dome-۰۶
۴۱	۳۵	۲۴۶۰	۰/۲	۶۰/۳۷	۴۵/۹۶	۱	۷۵	Dome-۰۷
۴۵	۳۶	۲۴۸۵	۰/۲	۷۲/۸۶	۴۶/۰۶	۱/۵	۷۵	Dome-۰۸
۳۵	۲۷	۲۳۴۵	۰/۲	۵۳/۴۰۳	۳۰/۶۲	۰	۱۰۰	Dome-۰۹
۳۸	۳۳	۲۳۷۰	۰/۲	۵۸/۴۱	۴۴/۹۵	۰/۵	۱۰۰	Dome-۱۰
۴۱	۳۵	۲۴۶۰	۰/۲	۶۰/۳۷	۴۵/۹۶	۱	۱۰۰	Dome-۱۱
۴۵	۳۶	۲۴۶۰	۰/۲	۷۲/۸۶	۴۶/۰۶	۱/۵	۱۰۰	Dome-۱۲



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



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

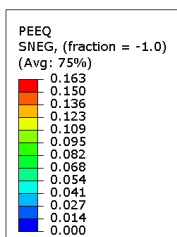


۱/۵ درصد

۱ درصد

۰/۵ درصد

بدون الیاف



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. به طوری 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 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 به صورتی 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. به طور 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.

- [۷] Mastali, M., Dalvand, A., & Sattarifard, A. (۲۰۱۷). 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, ۷۴-۹۲. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.029>
- [۸] Song, P. S., Hwang, S., & Sheu, B. C. (۲۰۰۵). Strength properties of nylon-and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and concrete research*, 35(۸), ۱۵۴۶-۱۵۵۰. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.033>
- [۹] Mastali, M., Naghibdehi, M. G., Naghipour, M., & Rabiee, S. M. (۲۰۱۵). Experimental assessment of functionally graded reinforced concrete (FGRC) slabs under drop weight and projectile impacts. *Construction and Building Materials*, ۹۵, ۲۹۶-۳۱۱.
- [۱۰] Sahraei Moghadam, A., Dalvand, A. (۲۰۱۹). 'Investigation of Mechanical and Impact Properties of High Performance Self-Compacting Composite Concrete', *Ferdowsi Civil Engineering*, ۳۲(۳), pp. ۴۹-۶۶. doi: 10.22067/civil.v32i3.79476. [In Persian]
- [۱۱] Ebrahimian, A., & Mortezaei, A. (۲۰۲۱). The Effect of Specimen size on Compressive, Tensile and Flexural Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete. *Journal of Concrete Structures and Materials*, ۶(۲), ۸۰-۱۰۳. Doi: <https://doi.org/10.30478/jcsm.2021.276570.1199> [In Persian]
- [۱۲] Dayyani, M., Mortezaei, A., Rouhanimanesh, M. S., & Marnani, J. A. (۲۰۲۲). Experimental Study on the Effect of Fibers on Engineered Cementitious Composite Short Square Columns. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(۳), ۷۹۸-۸۰۸. Doi: <https://doi.org/10.2311/PPci.19612>
- [۱۳] Golestan, A., & Hajiani Boushehri, A. (۲۰۱۷). 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(۲), ۱۱۱-۱۲۱. [In Persian]
- [۱۴] Song, P. S., & Hwang, S. (۲۰۰۴). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(۹), ۶۶۹-۶۷۳.
- [۱۵] Zhang, P., Wang, C., Gao, Z., & Wang, F. (۲۰۲۳). A review on fracture properties of steel fiber reinforced

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 به طوری 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

- [۱] Mehdinezhad, J., Sharghi, A., Asadpour, F. (۲۰۲۱). 'Integration of Architectural Form and Structure in the Formation of Physical Structure of Historical Buildings using Iranian Arches', *Journal of Architectural Thought*, ۵(۱۰), pp. ۸۹-۱۰۸. doi: 10.30478/at.2020.11225.1280. [In Persian]
- [۲] Khosrowjerdi, S., Sarkardeh, H. (۲۰۲۱). 'Effect of arch height on wind load in shape dome structure', *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, ۵۳(۲), pp. ۶۲۷-۶۳۸. doi: 10.22060/ceej.2020.16424.6270. [In Persian]
- [۳] Pirnia, M.K. (۲۰۰۵). *Iranian architectural stylistics*, ۴th Edn., pp. ۵۰-۲۰۰, Soroush Danesh, Tehran.
- [۴] Micallef, K., Sagasetta, J., Ruiz, M. F., & Muttoni, A. (۲۰۱۴). Assessing punching shear failure in reinforced concrete flat slabs subjected to localised impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 71, ۱۷-۳۳. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.04.003>.
- [۵] Hinman, E. (۲۰۰۳). Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks. *Risk management series FEMA. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.*
- [۶] Ferreira, L. M., Muñoz-Reja, M., & Reis, P. N. B. (۲۰۲۴). Impact response of semicylindrical woven composite shells: The effect of stacking sequence. *International Journal of Impact Engineering*, 189,

concrete. *Journal of Building Engineering*, 67, ۱۰۵۹۷۵.

- [۱۶] STM C۱۵۰, Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, ۲۰۱۲.
- [۱۷] ASTM C ۳۳ Standard Specification for Concrete Aggregates, Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, ۲۰۰۳.
- [۱۸] Babaei, A., Mortezaei, A., & Salehian, H. (۲۰۲۱). Experimental study on seismic performance of steel fiber reinforced concrete wall piers. *Structural Concrete*, 22(۳), ۱۳۶۳-۱۳۷۷. Doi: <https://doi.org/10.1002/suco.20200104>
- [۱۹] Hrynyk, T. D., & Vecchio, F. J. (۲۰۱۷). Modeling of reinforced and fiber-reinforced concrete slabs under impact loads. *ACI Struct. J.*, 321, ۸-۱.
- [۲۰] Arazbzade, A., Mozaffar Jazi, M. (۲۰۱۶). 'Comparative Study On Effects Of Area And Position Of Opening On Behavior And Shear Capacity Of Concrete Shear Walls', *Concrete Research*, ۸(۲), pp. ۱۲۵-۱۳۵.
- [۲۱] Faris, M. A., Abdullah, M. M. A. B., Muniandy, R., Abu Hashim, M. F., Bloch, K., Jež, B., ... & Ghazali, M. F. (۲۰۲۱). 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(۵), ۱۳۱۰. doi: <https://doi.org/10.3390/ma14051310>