

Experimental and numerical comparison of failure mechanisms of concrete cores containing rebar

Komeil Momeni^{1*}

1- Assistant professor of Civil Engineering, Faculty of Imam sadeq, Guilan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Astaneh Ashrafieh, Iran

ABSTRACT

It is difficult to determine the real strength of concrete in an existing structure because it depends on curing type record, concrete compaction quality, and pouring of concrete method. A core test is the most effective and reliable way to measure the concrete characteristics of the structure. The cores provide reliable and useful results because they are mechanically tested up to the destruction stage. The use of rebar in the concrete core samples tested in the parts of the reinforced concrete that have bar compaction is unavoidable. In most codes, using rebar is ignored, and the other factors are considered adequate on core test results; it has just been discussed and suggested to ignore the cores, including rebar. Therefore, this research aims to survey about the effect of using bars on the strength of concrete cores. In this regard, variables such as length to diameter (L/D) ratio of core, core diameter, the diameter of steel bar, number of steel bars, steel bars' order, the configuration method of rebar, the distance of bar axis from the nearer end of the core, the moisture condition and water to cement ratio (concrete strength level) are considered. In the first step, concrete samples, including rebar, were tested with a concrete core. The examined samples were validated using numerical studies and ANSYS software; then about 200 cylindrical core samples using this software were studied in order to determine the pressure drag and also the effective parameters on the behavior of cylindrical concrete core containing rebar, and the results including the pressure drag and collapse mechanism were investigated and compared. Using rebar in the cores plays an important role in the stress and strain variation of the concrete core and the bars inside.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 June 2022

Revise Date: 28 September 2022

Accept Date: 09 October 2022

Keywords:

core,
core test,
strength,
steel bar,
ANSYS software

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.346278.2840>

*Corresponding author:

Email address: kmomeni@tvu.ac.ir

مقایسه آزمایشگاهی و عددی مکانیزم شکست مغزه‌های بتنی حاوی میلگرد

کمیل مومنی^۱

۱- استادیار دانشگاه فنی و حرفه‌ای، دانشکده فنی امام جعفر صادق، آستانه اشرفیه، ایران

چکیده

تعیین مقاومت واقعی بتن در یک ساختار موجود آسان نیست، چرا که به سابقه‌ی نوع عمل‌آوری، کیفیت تراکم بتن و شیوه بتن‌ریزی بستگی دارد. آزمایش مغزه موثرترین و قابل اطمینان‌ترین راه برای سنجش خواص بتن در سازه است. مغزه‌ها نتایج قابل اطمینان و مفیدی را ارائه می‌دهند، چرا که آنها بطور مکانیکی تا مرحله تخریب آزمایش می‌شوند. در بخش‌هایی از بتن مسلح که دارای تراکم میلگرد می‌باشد، وجود میلگرد در نمونه‌های کرگیری شده شاید غیر قابل اجتناب باشد. در اکثر آیین‌نامه‌ها وجود میلگرد را نادیده گرفته و سایر عوامل را بر روی نتایج آزمایش مغزه موثر دانسته و تنها به بحث پیرامون آنها پرداخته و پیشنهاد به نادیده گرفتن مغزه‌های با میلگرد کرده‌اند. لذا هدف این تحقیق بررسی تاثیر حضور میلگرد بر روی مقاومت مغزه‌های بتنی می‌باشد. در این راستا، متغیرهایی نظیر نسبت طول به قطر مغزه، قطر مغزه، قطر میلگرد، تعداد میلگرد، نحوه آرایش میلگردها، فاصله محور میلگرد از انتهای نزدیک‌ترین سطح مغزه، شرایط نگهداری و نسبت آب به سیمان (تراز مقاومت بتن) در نظر گرفته شد. در این پژوهش ابتدا تعدادی نمونه بتنی حاوی میلگرد با استفاده از کرگیری و مغزه‌گیری مورد آزمایش قرار گرفت نمونه‌ای آزمایش شده با استفاده از مطالعات عددی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS صحت سنجی گردید سپس به منظور تعیین مقاومت فشاری و همچنین تعیین پارامترهای تاثیرگذار روی رفتار مغزه‌های بتنی استوانه‌ای حاوی میلگرد، حدود ۲۰۰ نمونه مغزه استوانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار ANSYS مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج حاصل از این نمونه‌ها از جمله مقاومت فشاری و مکانیزم شکست مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته شد. وجود میلگرد در مغزه‌ها در روند تغییرات تنش و کرنش مغزه بتنی و میلگردهای داخل آن نقش مهمی ایفاء کند.

کلمات کلیدی: مغزه؛ آزمایش مغزه؛ مقاومت؛ میلگرد فولادی؛ نرم‌افزار ANSYS

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
https://doi.org/10.22065/jsce.2022.346278.2840	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2022.346278.2840	۱۴۰۲/۰۴/۳۱	۱۴۰۱/۰۷/۱۷	۱۴۰۱/۰۷/۱۷	۱۴۰۱/۰۷/۰۶	۱۴۰۱/۰۳/۱۸
کمیل مومنی kmomeni@tvu.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- نویسنده مسئول:

پست الکترونیکی:

۱- مقدمه

در میان روش‌های مختلف تعیین مقاومت سازه‌ای که مقاومت و استحکام آن برای ما دچار تردید شده است، آزمایش مغزه‌گیری به‌طور گسترده‌ای برای مقاومت در جای بتن پذیرفته شده است. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که آزمایش مغزه می‌تواند نتایج قابل اعتمادی را ارائه دهد اما تفسیر نتایج آن به تجربه، قضاوت مهندسی و ملحوظ داشتن فاکتورهای موثر متعدد نیازمند است و این عوامل قطعاً از قابلیت اعتماد و سطح اطمینان آن می‌کاهد. عواملی چون قطر مغزه، نسبت طول به قطر $(\frac{L}{D})$ ، سن بتن، مشخصات سنگدانه، جهت مغزه-گیری و شرایط رطوبتی مغزه‌ها در هنگام آزمایش به‌عنوان فاکتورهای موثر بر رابطه بین مقاومت مغزه و مقاومت بتن متناظر مکعبی یا استوانه‌ای توسط محققینی چون G. Reddy و Rochman [2,1] و سایرین [3-6] به‌طور جامع و کامل ارائه شده است. دیگر فاکتور مهم و موثر بر مقاومت مغزه حضور میلگرد در آن است. تاثیر حضور میلگرد بر مقاومت مغزه توسط محققین محدودی مطالعه شده است [7-9]. وجود میلگرد در مغزه عدم اطمینان نتایج را افزایش داده و می‌بایست تا حد امکان از آن اجتناب شود [10]. هرچند در بخش‌هایی از سازه با تراکم میلگرد بالا ممکن است این امر میسر نباشد. چنانچه به هردلیلی، مغزه‌های استخراج شده از میلگردهای مسلح کننده عبور کرده و مغزه حاوی میلگرد باشد، ضرایب تصحیح این الزام در استانداردهای BS EN12504-1 [11] و BS 6089 [12] و BS 1881 Part 120 [13] و CS Report No.11 [14] گنجانده شده است. همچنین بتازگی اصلاحی در استاندارد اخیر، توسط Khoury و همکاران [9] ارائه شده است. این در حالیست که استانداردهایی چون ACI 214 [15] و ASTM C42 [16] توصیه می‌کنند که مغزه‌های بتنی برای آزمایش فشاری می‌بایست ترجیحاً بدون میلگرد باشند. شواهد متناقض و قابل توجهی در رابطه با تاثیر حضور میلگرد بر مقاومت مغزه مشاهده شده است. برخی محققین تاثیر قابل توجهی را بیان نکرده‌اند [8]. در حالی که گروهی دیگر رفتارهای متناقض و مختلفی را بیان داشته‌اند [8,7]. Gaynor تاثیر میلگردهای آردار ۱۳mm و ۲۵mm را در چیدمان‌های مختلف مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که حضور میلگرد باعث کاهش مقاومت‌های فشاری اندازه‌گیری شده به میزان ۱۸-۴٪ شده است. مطالعه انجام‌شده توسط Loo و همکاران [8] نشان داد که کاهش مقاومت فشاری بدلیل فولاد کارگذاری شده در نمونه‌ها، که برای نسبت طول به قطر ۲ مشاهده شده بود، آشکارا با کاهش نسبت طول به قطر $(\frac{L}{D})$ کاهش می‌یابد. همچنین برای $(\frac{L}{D}) = 1$ ، حتی افزایش مقاومت مغزه‌ها مشاهده شد که این نتیجه صرف‌نظر از موقعیت فولاد در مغزه بوده است. آنها همچنین بیان داشتند که وجود میلگرد در استوانه‌های بتنی با نسبت طول به قطر ۱ و به میزان تا ۴٪ نسبت حجمی، تاثیر منفی قابل توجهی بر مقاومت نداشته است. در عین حال، استاندارد Concrete Society [14] کاهش مقاومت مغزه را بصورت تابعی از اندازه و موقعیت میلگرد در مغزه ارائه کرده است. لذا، نتایج متناقض پیشتر گفته شده در خصوص مقاومت مغزه حاوی میلگرد، مطالعه دقیق‌تر و جامع‌تری را در ارزیابی قابل اعتماد مقاومت طلب می‌کند. بنابراین هدف این مطالعه، تلاش برای روشن کردن این مطلب بر پایه یک برنامه آزمایشگاهی جامع است. در این راستا، آزمایش مغزه با جزئیات فراوان و باتوجه ویژه به مشکلات حضور یک و یا چند میلگرد در آن و با آرایش‌های مختلف قرارگیری ارزیابی شده است. به نظر می‌رسد با توجه به پیچیده‌شدن موضوع و حضور پارامترهای مختلف، استفاده از روابط ساده آماری چندان رضایت بخش نباشد. اکثر محققین بر این باور بوده‌اند که وجود میلگرد در مغزه باعث افت مقاومت می‌گردد و هر کدام از آنها درصدهای مختلفی را به تناسب برخی پارامترها، جهت این افت مقاومت اعلام داشته‌اند. Malhotra [17] از جمله محققینی بوده‌اند که کاهش ۰ تا ۲۰ درصدی را برای مغزه‌های با میلگرد اعلام داشته‌اند. برخی دیگر مانند Petersons [18] کاهش قابل توجهی را برای مقاومت مغزه‌های حاوی میلگرد نسبت به مغزه‌های بدون میلگرد در نظر نگرفته‌اند. Loo [8] اظهار می‌نماید، که در برخی موارد وجود میلگرد داخل مغزه باعث افزایش مقاومت مغزه نسبت به مغزه‌های بدون میلگرد می‌شود. به اعتقاد وی [8] با توجه به عوامل مختلف موجود و داده‌های ضد و نقیض هیچ ضریب مطمئنی برای اعمال اثر وجود میلگرد در مغزه نمی‌توان پذیرفت. در آیین نامه‌های مختلف نیز همین تناقض در برخورد با مغزه‌های حاوی میلگرد وجود دارد. برخی آیین نامه‌ها مانند ACI وجود میلگرد در مغزه را مجاز ندانسته و برخی مانند BS و CEN با در نظر گرفتن ضریبی، اثر وجود میلگرد را درون مغزه مجاز دانسته‌اند. حتی در آیین نامه‌هایی که این اثر را مجاز دانسته‌اند نیز تنها برخی پارامترهای مربوط به وجود میلگرد بررسی گردیده و با احتیاط با این قضیه برخورد شده است. در تحقیق حاضر، با در نظر گرفتن عوامل موثر بر مقاومت مغزه‌های بدون میلگرد، تاثیر این عوامل

بر روی مقاومت مغزه های با میلگرد بررسی شده است. همچنین برخی از پارامترهایی که مختص وجود میلگرد در مغزه می باشند نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به کمک نرم افزار مبتنی بر المان محدود، برای شفاف سازی نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است.

۲- نوآوری مطالعه حاضر

اغلب مطالعات گذشته بر عدم حضور میلگرد در مغزه به دلیل پراکندگی نتایج مقاومت فشاری و کاهش مقاومت در اثر وجود میلگرد تاکید دارند. در حالی که در عمل در سازه های بتنی که دارای تراکم نسبی میلگرد می باشند، وجود میلگرد در مغزه های حفاری شده اجتناب ناپذیر است. برخی از آیین نامه ها وجود میلگرد در مغزه را پذیرفته و درصد بر آمده اند که ضرایبی را برای جبران کاهش مقاومت مغزه ارائه نمایند. لکن به دلیل تعدد پارامترهای ناشی از وجود میلگرد، تنها به برخی از آنها پرداخته اند. در مطالعه حاضر سعی گردیده است با ارائه روشهای نوین در هر دو روش عددی و آزمایشگاهی، کمکی به درک واقعی تاثیرات وجود میلگرد بر روی مقاومت فشاری مغزه ها صورت گیرد.

۳- برنامه آزمایشگاهی

طرح اختلاطهایی برای دستیابی مقاومت مکعبی ۵۶ روزه $21/3 \text{ Mpa}$ و $48/1 \text{ Mpa}$ با نسبت های آب به سیمان $0/55$ و $0/4$ در نظر گرفته شد. مقادیر سیمان به ترتیب $250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ و $280 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ انتخاب شد. همچنین مقادیر مصالح ریزدانه خوب دانه بندی شده و مصالح درشت دانه با حداکثر اندازه اسمی 19 mm به ترتیب در محدوده های $905 - 985 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ و $953 - 1020 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ تعیین گردید. در تمام اختلاطها از سیمان پرتلند تیپ II، ماسه رودخانه ای شسته شده و مصالح درشت دانه شکسته استفاده شد. تأثیر میلگرد فولادی بر مقاومت مغزه های بتنی توسط پارامترهای مختلف شامل؛ قطر مغزه، نسبت طول به قطر مغزه، شرایط رطوبتی مغزه، سطح مقاومت بتن و همچنین قطر و تعداد میلگرد و موقعیت آن در مغزه ارزیابی شده است. برای هر طرح تیرهای بتنی مسلح و غیرمسلح به ابعاد $300 \times 300 \times 1000 \text{ mm}$ ساخته شده و در شرایط آزمایشگاه با رطوبت نسبی 70% و دمای 25°C به همراه نمونه های مکعبی کنترل 100 mm نگهداری شدند. میلگردهای فولادی مصرف شده از نوع آجدار با قطرهای 16 mm و 10 mm بودند. مغزه هایی با قطرهای 75 mm و 100 mm با نسبت ابعاد ۱ و ۲ از تیرهایی ساخته شده در جهت عمود بر جهت بتن ریزی گرفته شد. مغزه ها توسط ملات گوگرد کلاهی گذاری شده و به منظور ارزیابی اهمیت شرایط رطوبت مغزه در هنگام آزمایش، در شرایط عمل آوری مختلف شامل نگهداری در هوای آزاد به مدت ۷ روز و نیز دو روز اشباع پیش از آزمایش در نظر گرفته شد. حداقل 480 مغزه بتنی برای مقاومت فشاری 56 روزه آزمایش شدند و هر نتیجه استخراج شده به صورت میانگین نتایج حداقل ۳ نمونه بوده است. جزئیات برنامه آزمایشگاهی در جدول (۱) خلاصه شده است. عملیات حفاری با دستگاهی با نام تجاری DD-160E Hilti-Core و مطابق ASTM C172 [19] انجام گرفت. عملیات برش و کپینگ در این مطالعه مطابق ASTM C617 [20]، انجام گرفت. مغزه های بدست آمده پس از رسیدن به سن های مورد نظر، مطابق آیین نامه ASTM C39 [21] مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. نمونه های مغزه گیری شده در دو سن ۲۸ و ۵۶ روزگی آزمایش شدند. از هر سنی، حداقل سه نمونه برای به حداقل رساندن خطاها مورد آزمایش قرار گرفته و در برخی موارد که نتیجه یکی از نمونه ها اختلاف فاحشی با سایر نمونه ها داشت، نتیجه آن نمونه از محاسبات و معدل گیری مقاومت نمونه ها حذف می شد.



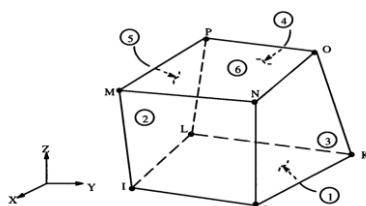
شکل ۱- جزئیات قالب بندی تیرها و عملیات حفاری (مغزه گیری)

جدول ۱: جزئیات مغزه‌های آزمایش

قطر مغزه‌ها mm	نسبت طول به قطر مغزه	قطر میلگرد mm	پوشش میلگرد درون مغزه mm
75	2	16,10	75,50,30
100	2,1	16,10	75,50,30

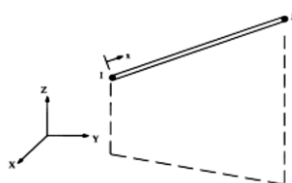
۴- مدل سازی و تحلیل نمونه‌ها

جهت مدلسازی بتن، از یک المان هشت گره ای Solid65 با سه درجه آزادی انتقال در راستای X و Y و Z استفاده شده است. این المان قابلیت تغییر شکل پلاستیک، ترک خوردگی و خرد شدگی در سه جهت متعامد را دارند. هندسه المان و مکان گره ها برای این نوع المان در شکل ۲ نشان داده شده است.



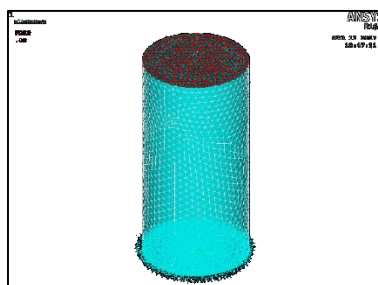
شکل ۲- المان 3-D - Solid65 برای مش بندی قطعه بتنی در نرم افزار ANSYS

در این المان امکان تعریف مصالح بتنی ترد با قابلیت شبیه سازی ترک خوردگی و خردشدگی همراه با رفتار پلاستیک و خزش وجود دارد و در کنار آن تسلیح فولادی در سه جهت اصلی قابل تعریف است. برای مدل کردن فولاد از المان Link8 استفاده شده است. دو گره برای این عنصر مورد نیاز است. هر گره دارای سه درجه آزادی و قابلیت انتقال در جهت های X و Y و Z می باشد. این المان همچنین قابلیت تغییر شکل پلاستیک را نیز دارد. هندسه و محل گره ها برای این نوع المان در شکل ۳ نشان داده شده است.



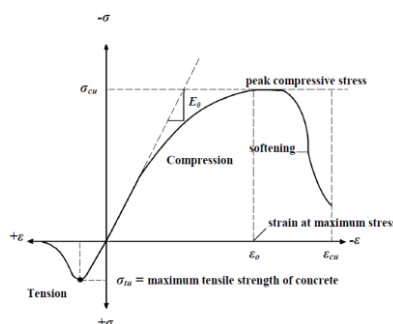
شکل ۳- المان 3-D - Link8 برای مش بندی قطعه فولادی در نرم افزار ANSYS

در این مطالعه شرایط مرزی در انتهای نمونه در نظر گرفته شده است. بدین صورت که سطح نشیمن گاه مغزه های بتنی در سه راستای X، Y و Z مقید شده است. همچنین بار اعمالی بر روی سطح تمامی نمونه‌ها به صورت گسترده بوده و بارگذاری نمونه‌ها تا لحظه گسیختگی به نمونه‌های مورد نظر وارد شده است. همچنین به منظور شبکه بندی نمونه‌های مورد نظر از مش های ۵×۵×۵ میلی متری استفاده شد. البته لازم به ذکر است که قبل از ثبت نهایی نتایج، نمونه‌ها با سایز مش بندی های مختلف از ۱ تا ۱۰ میلی متر مورد آنالیز قرار گرفتند که در تمامی نمونه‌هایی که مش بندی آن‌ها از ۵ میلی متر کم تر بود تفاوت ناچیزی در نتایج مشاهده شد با این تفاوت که زمان انجام آنالیز برای نمونه‌هایی با مش بندی کوچک تر، بسیار بیش تر بود. نحوه المان بندی نمونه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- نمای شماتیکی از شبکه بندی، شرایط مرزی و بارگذاری نمونه های مورد نظر

- مشخصات مصالح مغزه‌ها شامل بتن و فولاد به صورت غیرخطی در نرم‌افزار ANSYS تعریف شده است. برای همین منظور تحلیل نمونه‌ها از نوع استاتیکی غیرخطی در نظر گرفته شده است. در روش تحلیل استاتیکی غیر خطی، نرم افزار Ansys، از روش نیوتن رافسون برای حل معادلات دیفرانسیل مرتبه بالا استفاده می‌کند. دقت و همگرایی پاسخ‌ها بستگی به فاکتورهایی نظیر تراکم مش بندی‌ها، شاخص همگرایی و مقادیر رواداری و غیره بستگی دارد. به منظور تعریف مشخصات بتن از مصالح Concrete در بخش Non-Metal Plasticity موجود در نرم‌افزار ANSYS استفاده شده است. همانطور که در ادامه نشان داده شده است تنش ماکزیمم فشاری قابل تحمل برای نمونه B0 در آزمایشگاه به میزان 31.3Mpa بدست آمده است. برای هر نمونه، به اقتضای تنش ماکزیمم فشاری، جدول مشخصات تکمیل و به نرم افزار، معرفی گردید. مقاومت کششی تک محوره بتن حدود ۵ تا ۱۰ درصد مقاومت فشاری بتن در نظر گرفته می‌شود. آئین‌نامه‌های مختلف روابط گوناگون برای محاسبه مقاومت کششی بتن تعیین کرده‌اند. مقاومت کششی بتن در این مطالعه برابر با ۲/۸ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رفتار خطی بتن در کشش تا ۶۰٪ ظرفیت نهایی آن در نظر گرفته شده است. این ضریب، حاصل از نتایج پژوهش‌های متعدد است که در Help نرم‌افزار ANSYS نیز تعریف شده است. مقادیر مقاومت خردشدگی دو محوری هیدرواستاتیک و دیگر مقادیر در نرم‌افزار برابر با صفر وارد شده است. وارد کردن صفر برای این مقادیر به منزله آنست که مقادیر آن‌ها توسط خود نرم‌افزار تعیین می‌شود. همچنین ویژگی مصالح فولادی به صورت دوخطی با سخت شوندگی جنبشی در نظر گرفته شده است. در هیچکدام از نتایج میلگرد وارد محدوده غیر خطی نشده است. ایجاد یک مدل برای رفتار بتن یک کار چالش برانگیز است. بتن یک ماده شبه شکسته است و رفتارهای مختلفی در هنگام فشار و کشش از خود نشان می‌دهد. مقاومت کششی بتن بطور معمول بین ۸ تا ۱۵ درصد از مقاومت فشاری می‌باشد. شکل ۵ نمودار کلی تنش - کرنش برای بتن نرمال را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمودار کلی تنش - کرنش برای بتن معمولی

در حالت فشاری، محدوده خطی الاستیک منحنی در حدود ۳۰ درصد مقاومت فشاری می‌باشد. بالاتر از این ناحیه، تنش افزایش پیدا کرده تا به مرز حداکثر مقاومت فشاری برسد. پس از رسیدن تنش به مقاومت فشاری ماکزیمم (σ_{cu})، منحنی به یک منطقه نرم شده گئی افت کرده و در نهایت در کرنش نهایی (ϵ_{cu})، بتن خرد و شکسته می‌شود. در حالت کششی منحنی تنش - کرنش بتن در ناحیه الاستیک تا حداکثر مقاومت کششی به صورت تقریباً خطی ادامه پیدا می‌کند. بعد از این ناحیه، بتن ترک خورده و مقاومت کاهش می‌یابد تا به صفر برسد.

برای مدلسازی بتن، نرم افزار Ansys به ورود خواص مواد از جمله مدول الاستیسیته (E_c)، مقاومت فشاری نهایی تک محوری (f'_c)، مقاومت کششی نهایی تک محوری (f'_t)، نسبت پواسون (ν) و ضریب انتقال برش (β_t) نیازمند است. آیین نامه ACI 318-99 [22]،

با استفاده از مدول الاستیسیته بدست آمده توسط روش سرعت پالس، مقاومت فشاری و کششی نهایی بتن برای هر تیر را با استفاده از معادله های زیر محاسبه کرده است.

$$f'_c = \left(\frac{E_c}{57000} \right)^2$$

$$f_r = 7.5 \sqrt{f'_c}$$

در این معادلات E_c و f'_c و f_r بر حسب Psi می باشند. نسبت پواسون برای بتن تمامی بتن ها برابر 0.2 در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال برش (β_t) نشان دهنده شرایط صورت ترک ها می باشد. مقدار β_t بین صفر تا یک می باشد. مقدار صفر برای یک ترک صاف و مقدار 1 برای ترک زبر بکار برده شده است. پارامتر β_t در بسیاری از مطالعات سازه های بتن آرمه مورد استفاده بوده است و با این حال بین 0.5 و 0.25 متفاوت بوده است. تعدادی از تجزیه و تحلیل اولیه در این مطالعه با مقادیر مختلف برای β_t در این محدوده انجام شد اما مشکلات همگرایی در بارهای کم با β_t کمتر از 0.4 مواجه شد. بنابراین ضریب انتقال برش مورد استفاده در این مطالعه برابر با 0.4 بوده است. در مقاطع مستطیل شکل، پارامتر α ، نسبت تنش متوسط در قسمت فشاری بتن به مقاومت نهایی f'_c می باشد. همچنین عوامل تعیین کننده و موثر در مقادیر پارامترهای α و β ، نه تنها کیفیت و شکل نمودار تنش و کرنش بتن در فشار و میزان مقاومت فشاری f'_c است، بلکه بیش از هر چیز میزات تاثیر قطعه از کرنش و حد انتخابی برای E_c است، بویژه که مقادیر α و β ، برای تاثیر در حد گسیختگی با مقدار آنها در تاثیرات کمتر E_c متفاوت است. مقدار α بر اساس مقاومت فشاری مغزه بدون میلگرد و بر اساس نمودارهای مندرج در آیین نامه های ACI 318-99 و کتاب های مرجعی مانند Reinforced Concrete Structures [23]، برابر 0.68 در نظر گرفته شده است.

۵- تحلیل و تفسیر نتایج

۵-۱- نتایج آزمایشگاهی

نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه های مکعبی استاندارد در سن ۲۸ و ۵۶ روزگی در جدول ۲ آمده است. عوامل متعددی در میزان تغییرات مقاومت مغزه حاوی میلگرد، نسبت به مغزه بدون میلگرد، موثر می باشند که در این پژوهش به عواملی نظیر تاثیر قطر میلگرد (ϕ)، نسبت آب به سیمان (w/c)، پوشش میلگرد، تعداد میلگرد، موقعیت میلگرد نسبت به محور عمودی (D)، نسبت طول به قطر (l/d) پرداخته شد.

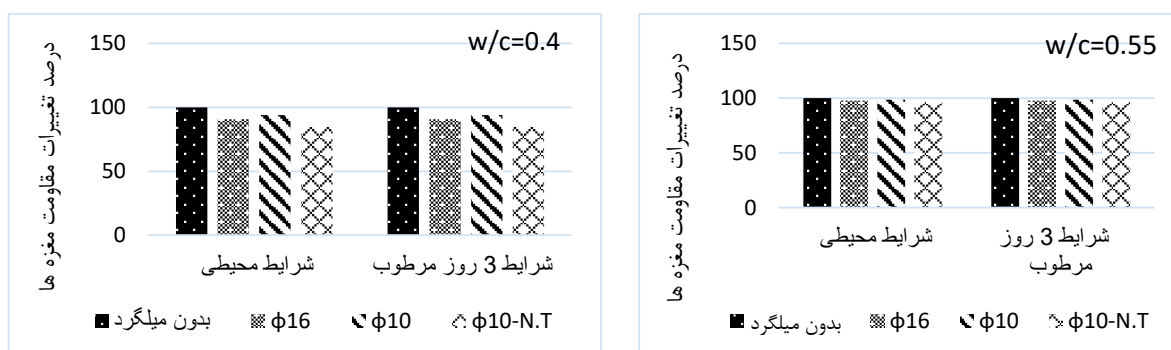
جدول ۲- مقاومت فشاری نمونه های استاندارد (مکعبی) در سن ۲۸ و ۵۶ روز

طرح	w/c	شرایط عمل آوری	نمونه های مکعبی (Mpa)	
			۲۸ روزه	۵۶ روزه
۱	0.4	۳ روز مرطوب	۴۸/۱	۵۱
		محیطی	۴۴/۶	۴۸/۵
۲	0.55	۳ روز مرطوب	۱۶/۵	۱۹/۲
		محیطی	۱۵/۴	۱۷

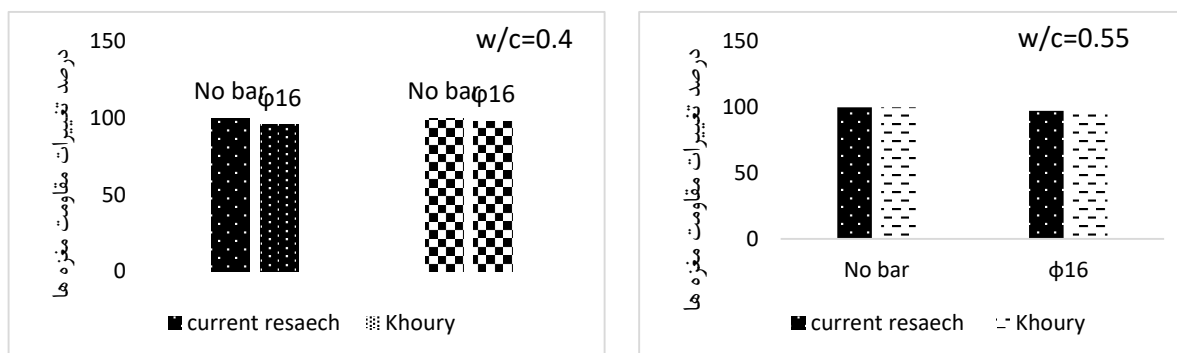
۵-۱-۱- تاثیر قطر میلگرد و نسبت آب به سیمان

مغزه های گرفته شده با قطر ۱۰ سانتی متر که حاوی تک میلگردهای آجدار با قطرهای ۱۰ و ۱۶ میلی متر و همچنین میلگرد با قطر ۱۰ میلی متر بدون آج بودند، از تیرهای ساخته شده مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. نتایج این آزمایشها در شکل ۶ آورده شده است. پوشش میلگردها در این مغزه ها ۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است. حضور تک میلگرد ۱۶، در مغزه هایی با $w/c=0.4$ سبب کاهش مقاومت به میزان ۹ درصد نسبت به مغزه بدون میلگرد گردیده است و در $w/c=0.55$ کاهش بیش از ۲ درصد مشاهده گردید. در

مغزه‌های حاوی تک میلگرد ۱۰، در $w/c=0.4$ کاهش در حدود ۷ درصد و در $w/c=0.55$ کاهش بیش‌تر از ۲ درصد نسبت به مغزه بدون میلگرد مشاهده گردید (شکل ۶). به نظر می‌رسد، با کاهش w/c ، مقاومت بتن در برابر برش ناشی از حفاری بالاتر رفته و این امر سبب ازدیاد ترک در مغزه‌ها می‌گردد. همچنین توام شدن این امر با افزایش قطر میلگرد و ازدیاد مقاومت میلگرد در برابر برش، سبب تشدید کاهش مقاومت مغزه‌های حاوی میگردد ۱۶ نسبت به مغزه‌های حاوی میلگرد ۱۰ گردیده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که در اطراف میلگردهای داخل مغزه‌های با $w/c=0.55$ ، نسبت به مغزه‌های مشابه اما با $w/c=0.4$ ، ترک‌های کمتری ایجاد شده است. به نظر می‌رسد همین عامل باعث اختلاف مقاومت کمتر بین مغزه‌های حاوی میلگرد و بدون میلگرد در مغزه‌های با $w/c=0.55$ ، نسبت به مغزه‌های مشابه اما با $w/c=0.4$ ، می‌باشد. همچنین نتایج نشان داده‌اند که، در تمامی حالات، مغزه‌های حاوی میلگرد ۱۰ فاقد آج، از تمامی مغزه‌های حاوی میلگرد آج دار، مقاومت کمتری داشته‌اند. به نظر می‌رسد این حالت احتمالاً بدلیل عدم اصطکاک مناسب بین میلگرد و بتن در اطراف میلگرد می‌تواند باشد. نتایج بیانگر این مطلب بوده‌اند که اثر تغییر شرایط نگهداری از حالت شرایط محیطی (air dried) به حالت سه روز مرطوب (soaked 72h) تاثیر چندانی بر روند کاهش یا افزایش مقاومت مغزه‌ها نداشته است. [9] Khoury، در تحقیقات مشابهی که بر روی مغزه‌های بتنی حاوی میلگرد انجام دادند، برخی از عوامل موثر بر مقاومت مغزه‌های مذکور را بررسی نموده و به مقایسه با مغزه‌های بدون میلگرد پرداختند. شکل ۷ مقایسه‌ای بین نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات [9] Khoury را بصورت درصدی نشان می‌دهد.



شکل ۶- اثر تک میلگرد در مغزه‌های با قطر ۱۰ سانتی متر و $l/d=2$ با پوششی ۵ سانتی متر - $N.T$ بدون آج

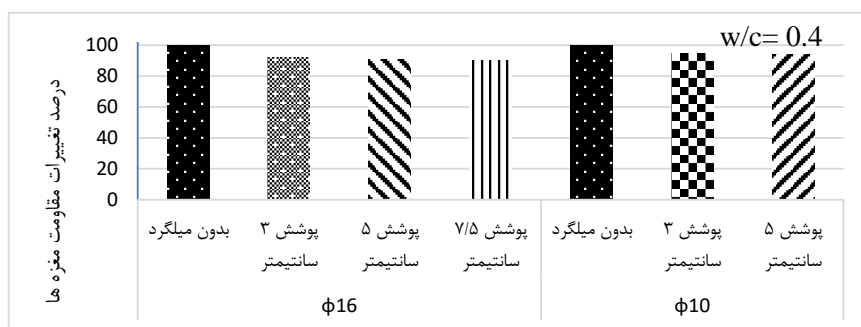


شکل ۷- مقایسه بین نتایج تحقیقات حاضر و تحقیقات [9] Khoury $l/d=1$ $d=10cm$

۵-۱-۲- تاثیر پوشش میلگرد

آزمایش‌ها نشان دادند که هنگام حفاری مغزه‌ها، زمانیکه مته به میلگرد می‌رسد، بیشترین ارتعاش بر اثر مقاومت میلگرد در برابر برش به کل مغزه وارد می‌شود، بنابراین ترک‌ها در اطراف میلگرد به سمت بالا و پایین مغزه رشد می‌کنند. به نظر می‌رسد هرچه حجم بتن زیرین میلگرد کمتر باشد، میزان ترک‌ها کمتر و در نتیجه آسیب بتن ناشی از حفاری کمتر گردیده و مقاومت مغزه‌ها بیشتر می‌گردد. شکل ۷ مقایسه اثر پوشش میلگرد بر روی مقاومت مغزه‌هایی با قطر ۱۰ سانتیمتر که حاوی میلگردهای با قطر ۱۶ و ۱۰ بوده‌اند را نشان داده است. همانطور که شکل ۸ مشاهده می‌شود در مغزه‌های با قطر ۱۰ سانتی متر و با افزایش پوشش میلگرد در مغزه‌های حاوی میلگردهای ۱۰ و ۱۶، مقاومت

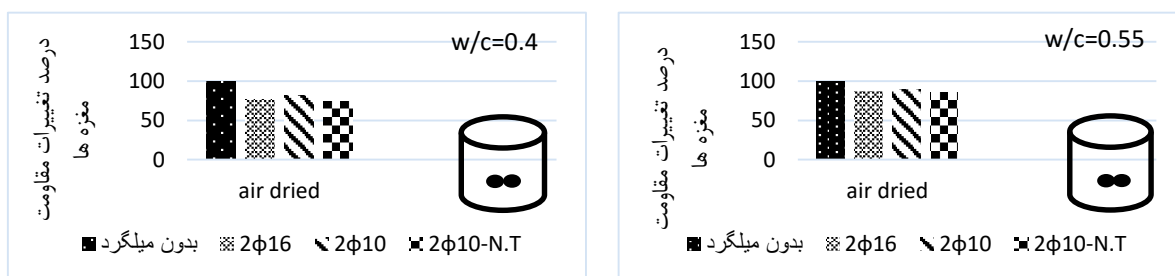
کاهش می‌یابد. از دیگر دلایل کاهش مقاومت بدلیل افزایش پوشش میلگرد، می‌توان به پدیده جمع‌شدگی اشاره کرد. با ازدیاد پوشش میلگرد تاثیر میلگرد بر کنترل تنش‌های انقباضی کمتر و با کاهش بیشتر مقاومت روبه‌رو می‌باشیم.



شکل ۸- مقایسه اثر پوشش میلگرد بر روی مقاومت مغزه‌هایی با قطر ۱۰ سانتی‌متر

۵-۱-۳- تاثیر تعداد میلگرد

شکل ۹ مربوط به تغییرات درصدی مقاومت ناشی از اثر زوج میلگرد کنار هم در مغزه‌های با قطر ۱۰ سانتی متر و $l/d=2$ بوده و پوشش میلگردها برابر ۵ سانتی‌متر می‌باشد. نتایج نشان دادند که، در مغزه‌هایی که زوج میلگرد ۱۶ در کنار هم بوده و $w/c=0.4$ می‌باشد، مقاومت کاهشی در حدود ۲۳ درصد و در مغزه‌های مشابه و با $w/c=0.55$ کاهشی بیشتر از ۱۳ درصد، نسبت به مغزه‌های بدون میلگرد مشاهده گردید. در مغزه‌هایی با زوج میلگرد ۱۰ و $w/c=0.4$ ، مقاومت کاهشی در حدود ۱۷ درصد و در $w/c=0.55$ کاهشی بیشتر از ۱۰ درصد نسبت به مغزه‌های بدون میلگرد مشاهده شد. به نظر می‌رسد، در مغزه‌های حاوی جفت میلگرد ۱۶، بدلیل تضعیف بیش از حد ماتریس سیمان در اطراف میلگردها و خصوصاً در ناحیه بین دو میلگرد، کاهش مقاومت بسیار زیادی (حدود ۳۲ درصد) نسبت به حالت بدون میلگرد اتفاق افتاده است. این مطلب به همین صورت ولی با شدت کمتری (۲۷ درصد) در مغزه‌های حاوی زوج میلگرد ۱۰ اتفاق افتاده است. نتایج بیانگر این مطلب بوده‌اند که در مغزه‌های مشابه که حاوی زوج میلگردهای ۱۰ بدون آج بوده‌اند، اختلاف ناچیزی نسبت به حالت مشابه و با میلگردهای با آج مشاهده گردید.

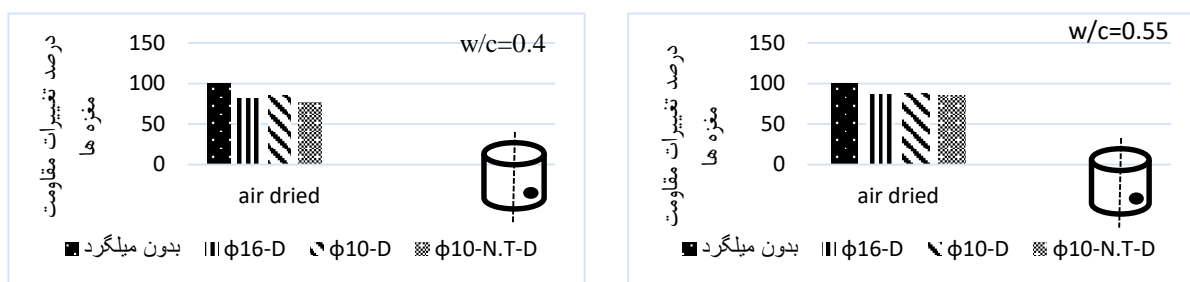


شکل ۹- اثر جفت میلگرد کنار هم در مغزه‌های با قطر ۱۰ سانتی متر و $l/d=2$ با پوشش ۵ سانتی متر air dried

۵-۱-۴- تاثیر موقعیت میلگرد

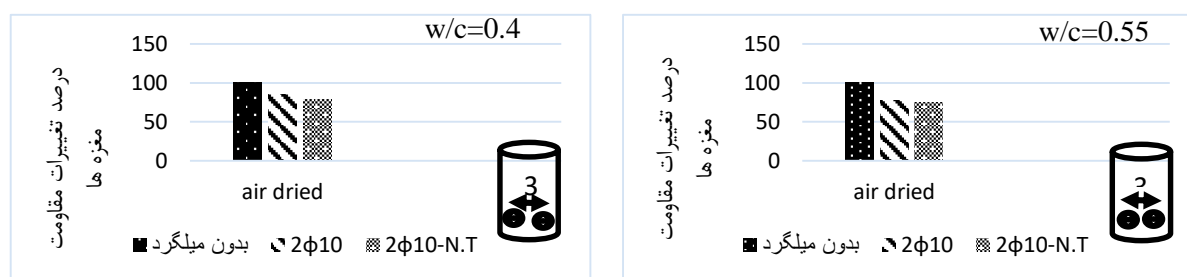
در تمامی مغزه‌های حاوی میلگرد، که میلگرد در مرکز مغزه قرار نداشته و دارای برون محوری از محور عمودی می‌باشد (به اندازه ۲،۵ سانتی متر)، نسبت به مغزه بدون میلگرد، کاهش مقاومت مشاهده شد. در $w/c=0.4$ و شرایط محیطی، در حضور تک میلگرد ۱۶، ۱۸ درصد و در $w/c=0.55$ کاهشی بیشتر از ۱۳ درصد مشاهده شده است. در حضور تک میلگرد ۱۰، در $w/c=0.4$ کاهشی در حدود ۱۴ درصد و در $w/c=0.55$ کاهشی بیشتر از ۱۲ درصد مشاهده شد. در حضور تک میلگرد ۱۰ بدون آج، در $w/c=0.4$ ، ۲۳ درصد کاهش مقاومت نسبت به مغزه بدون میلگرد مشاهده گردید. در دیگر سطح مقاومت و شرایط عمل آوری، نتایج مشابه این نتایج تکرار شده است. در شکل ۱۰، درصد تغییرات مقاومت در مغزه‌های حاوی میلگرد که نسبت به محور عمودی دارای برون محوری بوده‌اند را نشان داده شده است. آزمایش‌ها نشان دادند هرچه میلگرد از محور عمودی منحرف گردیده و بسمت لبه‌های بیرونی مغزه نزدیک گردد، مقاومت مغزه کاهش یافته و علاوه بر رشد ترک‌های قائم و قطری، ترک‌های افقی به سمت لبه خارجی نیز افزایش می‌یابد. این عامل در مغزه‌های حاوی میلگرد ۱۶ نسبت به مغزه‌های حاوی میلگرد

۱۰ شدیدتر بوده است. با مقایسه شکل‌های ۵ و ۹، مشاهده می‌گردد که میزان کاهش مقاومت در مغزه‌های حاوی میلگرد با برون محوری، نسبت به مغزه‌های حاوی میلگرد در موقعیت محور مرکزی، در هر دو قطر میلگرد (۱۰ و ۱۶)، حدود ۱۰ درصد بوده است.

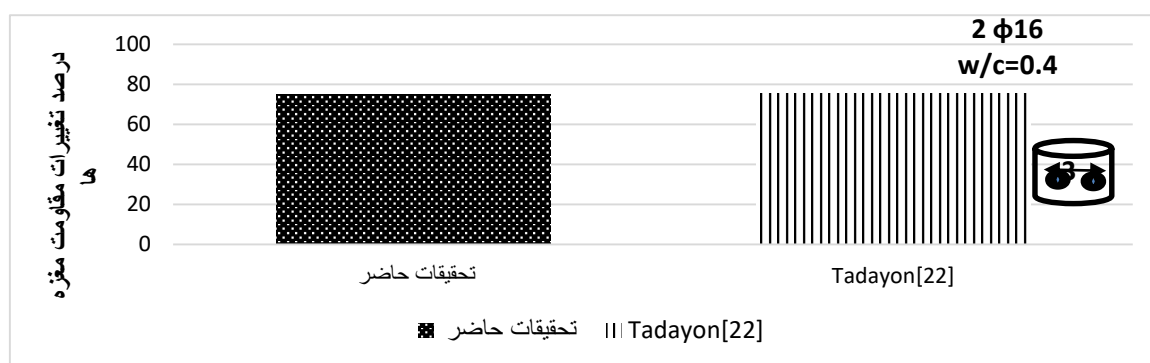


شکل ۱۰- اثر موقعیت میلگرد در مغزه‌های با قطر ۱۰ سانتی‌متر و $d=2$ با پوشش ۵ سانتی‌متر - **D-air dried** : برون محوری میلگرد از محور عمودی مغزه

شکل ۱۱ مربوط به درصد تغییرات مقاومت مغزه‌ها در اثر وجود دو میلگرد با فاصله ۳ سانتی‌متر از هم در قطر ۱۰ سانتی‌متر و $l/d=1$ در کاور ۵ سانتی‌متر می‌باشد. این میلگردها از منظر طولی در وسط مغزه قرار گرفته‌اند. ملاحظه می‌شود که در حضور دو میلگرد ۱۰، در $w/c=0.4$ کاهش در حدود ۱۴ درصد و در $w/c=0.55$ کاهش بیشتر از ۲۳ درصد و در حضور دو میلگرد ۱۰ بدون آج، در $w/c=0.4$ کاهش در حدود ۲۱ درصد و در $w/c=0.55$ کاهش بیشتر از ۲۵ درصد مشاهده گردید. در بیشتر موارد در مغزه‌های حاوی دو میلگرد ۱۰ آج دار، کاهش مقاومت کمتری نسبت به دو میلگرد بدون آج مشاهده گردید. همچنین درصد کاهش مقاومت در $w/c=0.55$ کمتر از $w/c=0.4$ بوده است. در تحقیقات مشابهی، تدین و همکارانش [24] آزمایش‌های مشابهی را بر روی مغزه‌های حاوی میلگرد انجام دادند. شکل ۱۲، مقایسه نتایج بخشی از تحقیقات آنها در خصوص مغزه‌های حاوی زوج میلگرد با نتایج تحقیق حاضر می‌باشد.



شکل ۱۱- اثر دو میلگرد با فاصله ۳ سانتی‌متر از همدیگر در مغزه‌های با قطر ۱۰ سانتی‌متر و $l/d=1$ با پوشش ۵ سانتی‌متر

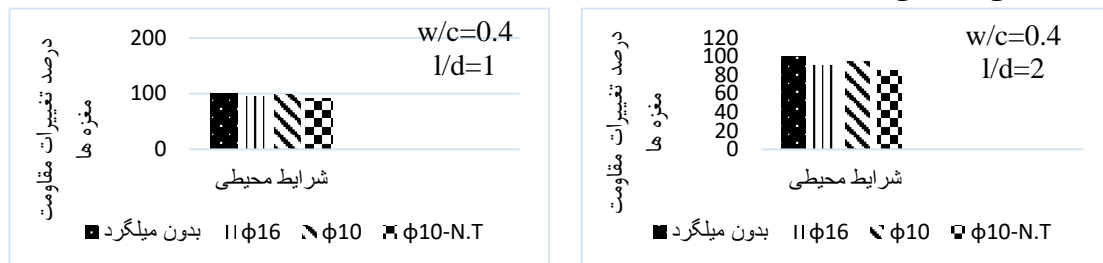


شکل ۱۲- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات Tadayon at al. [22] $D=10cm$ $l/d=2$

۵-۱-۵- تاثیر نسبت طول به قطر (l/d)

در شکل ۱۳، مقایسه‌ای بین مقاومت مغزه‌های با قطر ۱۰ سانتی‌متر که حاوی تک میلگردی با قطر ۱۶ میلی‌متر و پوشش بتنی ۵ سانتی‌متر، در نسبت‌های $l/d=1$ و $l/d=2$ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که در مغزه‌های با $l/d=1$ و در حضور تک میلگرد ۱۶، کاهش در حدود ۵ درصد و در حضور تک میلگرد ۱۰، کاهش در حدود ۲ درصد و در حضور تک میلگرد ۱۰ بدون آج، در $w/c=0.4$

کاهش در حدود ۹ درصد و در $w/c=0.55$ کاهش بیشتر از ۱۵ درصد مشاهده گردید. در حضور تک میلگرد، نتایج بصورت پراکنده تغییر کرده و در بعضی شرایط با افزایش مقاومت و در بعضی مواقع کاهش مقاومت مشاهده گردید. نتایج نشان می‌دهند، در حضور تک میلگرد، آهنگ کاهش مقاومت نسبت به همین نمونه در $l/d=2$ کمتر خواهد بود که به نظر می‌رسد، این به دلیل کاهش زمان مغزه‌گیری و آسیب‌های ناشی از آن می‌باشد.



شکل ۱۳- اثر نسبت l/d در مغزه‌های با قطر 10 سانتی‌متر، حاوی میلگرد و با پوشش بتنی 5 سانتی متر

۲-۵- نتایج عددی

۲-۵-۱- مشخصات نمونه‌ها

عوامل موثر بر روی مقاومت مغزه‌های با و بدون میلگرد از لحاظ نتایج آزمایشگاهی مورد بحث و مقایسه قرار گرفت. برخی پارامترها تأثیرات بیشتری در ایجاد اختلاف مقاومت بین مغزه‌های با و بدون میلگرد ایفا کردند. لذا در این قسمت با در نظر داشتن میزان تأثیر این پارامترها، سعی گردید، مغزه‌هایی مدلسازی و مورد تجزیه و تحلیل و با یکدیگر مقایسه گردند که پارامترهای تأثیرگذار فوق الذکر در آنها رعایت شده باشد. مشخصات نمونه‌های مورد مطالعه عددی و آرایش و نحوه قرارگیری میلگردها در مغزه‌ها در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که گفته شد، انتخاب این مدل‌ها بدلیل بررسی برخی از پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت مغزه‌های حاوی میلگرد می‌باشد. از جمله این پارامترها می‌توان به پوشش میلگرد، قطر میلگرد، نسبت L/D ، آرایش میلگرد (برون محوری) و تعداد میلگرد اشاره نمود.

جدول ۳- مشخصات نمونه‌های مورد بررسی عددی در این پژوهش

ردیف	نمونه	D (mm)	L (mm)	L/D	Bar	Fig	Div (mm)	t (mm)
۱	B0	۱۰۰	۲۰۰	۲	----	----	---	۵۰
۲	B2	۱۰۰	۲۰۰	۲	۱۰φ۱	●	---	۵۰
۳	B6	۱۰۰	۲۰۰	۲	۱۶φ۱	●	---	۵۰
۴	B12	۱۰۰	۲۰۰	۲	۱۶φ۱	●	۲۵	۵۰
۵	B16	۱۰۰	۲۰۰	۲	۱۶φ۲	●●	---	۵۰
۶	C0	۱۰۰	۱۰۰	۱	----	----	---	۵۰
۷	C6	۱۰۰	۱۰۰	۱	۱۶φ۱	●	---	۵۰

در جدول ۳، L و D ، بترتیب قطر و طول مغزه برحسب میلی‌متر، L/D : نسبت طول به قطر مغزه، Bar مشخصات میلگرد داخل مغزه، Fig نحوه قرارگیری میلگرد داخل مغزه Div برون محوری میلگرد از محور عمودی برحسب میلی‌متر، t: پوشش میلگرد داخل مغزه برحسب میلی‌متر می‌باشد.

۲-۵-۲- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی

پس از تحلیل عددی تمامی مدل‌های جدول ۳، مقادیر تنش فون میسز (ون میسز)، کرنش برای بتن و میلگرد، نحوه ترک خوردگی و خرد شدگی بتن و نمای شماتیکی از مدل سازی و المان بندی نمونه‌های مورد نظر در شکل‌های (۱۴ تا ۲۶) نشان داده شده است. تنش ایجاد شده در مدل‌ها در زمان ایجاد اولین ترک و تنش نهایی در آن و تنش آزمایشگاهی در جدول ۴ آورده شده است. همچنین میزان تنش ایجاد شده در نمونه در هنگام ایجاد اولین ترک نسبت به تنش نهایی نیز ذکر شده است. درصد خطا بین نتایج آزمایشگاهی و نرم افزاری از رابطه ۱ محاسبه گردیده است.

$$\text{درصد خطا} = \frac{[\sigma_{u(\text{exp})} - \sigma_{u(\text{NUM})}]}{[\sigma_{u(\text{exp})}]} \times 100 \quad (1)$$

$\sigma_{u(\text{EXP})}$: تنش فشاری نهایی آزمایشگاهی برحسب مگا پاسکال

$\sigma_{1(\text{crash})}$: تنش فشاری در مدل شبیه سازی اجزاء محدود در هنگام ایجاد اولین ترک برحسب مگا پاسکال

$\sigma_{u(\text{NUM})}$: تنش فشاری نهایی در مدل عددی برحسب مگا پاسکال

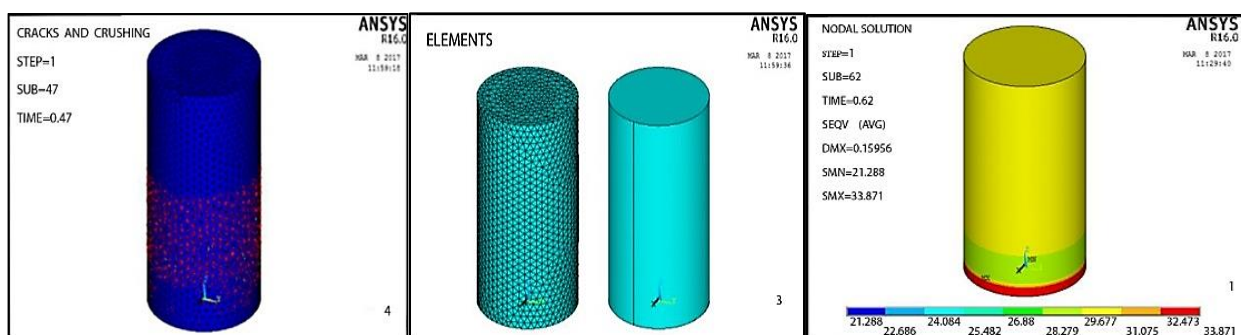
جدول ۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی

ردیف	نمونه	$\sigma_{u(\text{exp})}$	$\sigma_{1(\text{crash})}$	$\sigma_{u(\text{NUM})}$	میزان درصد کاهش مقاومت نسبت به مغزه بدون میلگرد	سهم از تنش کل در هنگام اولین ترک	خطا (%)
۱	B0	۳۱/۳۰	۱۸/۵۰	۳۳/۸۷		۵۴٪	-۸/۹٪
۲	B2	۲۹/۳۸	۱۴/۸۰	۳۰/۸۴		۴۷٪	۵/۴٪
۳	B6	۲۸/۳۸	۱۲/۴۰	۲۹/۴۰	۱۳٪/۱۹	۴۲٪	-۳/۶٪
۴	B12	۲۵/۵۴	۱۰/۴۰	۲۶/۹۰	۲۰٪/۵۷	۳۸٪	-۵/۳٪
۵	B16	۲۴/۱۰	۱۰/۱۰	۲۵/۵۰	۲۴٪/۷۱	۳۹٪	-۵/۸٪
۶	C0	۳۵/۲۰	۲۱/۳۰	۳۶/۹۸		۵۷٪	-۵/۰۵٪
۷	C6	۳۳/۶۰	۱۰/۳۰	۳۲/۴۹	۴٪/۰۷	۳۲٪	۳/۳٪

۵-۲-۳- بررسی اثر وجود میلگرد بر روی مقاومت مغزه‌ها از منظر اجزاء محدود

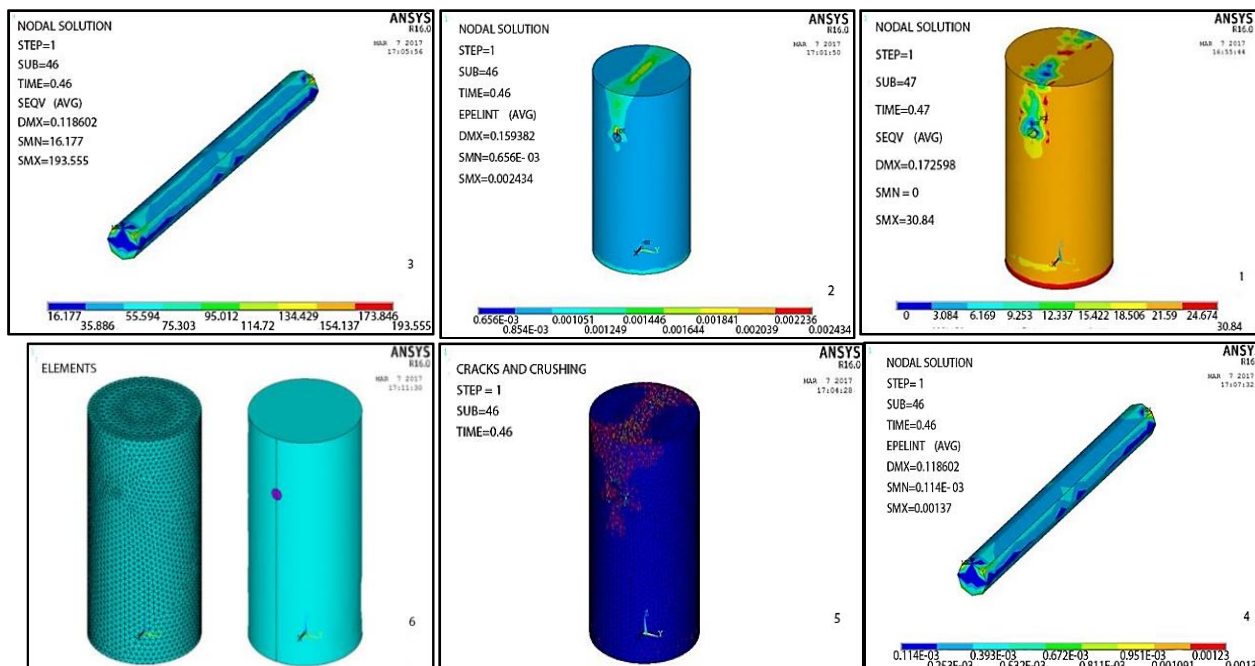
۵-۲-۳-۱- قطر میلگرد

برای بررسی تأثیر وجود میلگرد بر روی مقاومت مغزه‌ها و همچنین بررسی اثر قطر میلگرد، نمونه‌های B6, B2 که به ترتیب حاوی میلگردهای با قطر ۱۰ و ۱۶ با پوشش بتنی برابر ۵۰ میلی متر بوده‌اند با نمونه B0 که بدون میلگرد می‌باشد، مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این قسمت تنش‌های فون مایسز، کرنش‌ها و ترک‌های نمونه‌های مذکور با یکدیگر مقایسه گردیدند. نتایج مدلسازی نمونه B0 بیانگر این بوده‌اند که، مقدار تنش فشاری و مقدار کرنش معادل آن برای بتن در لحظه گسیختگی به ترتیب برابر با ۳۳/۸۷ مگاپاسکال و ۰/۰۰۱۵۱ می‌باشد. بیشینه مقاومت فشاری در ناحیه تکیه گاه به وجود آمده است (شکل ۱۴). همچنین شروع ترک خوردگی نمونه مورد نظر در تنش معادل با ۱۸/۵ مگاپاسکال بدست آمد که این مقدار تنش ۵۴٪ ظرفیت باربری کل است. مدل B2 حاوی یک میلگرد نمره ۱۰ می‌باشد. مقدار تنش فشاری و مقدار کرنش معادل آن برای بتن در لحظه گسیختگی به ترتیب برابر با ۳۰/۸۴ مگاپاسکال و ۰/۰۰۲۴۳ (شکل ۱-۱۵) و ۲-۱۵) و مقادیر مذکور برای میلگرد فولادی نیز به ترتیب برابر با ۱۹۳/۵ مگاپاسکال و ۰/۰۰۱۳۷ (شکل ۳-۱۵ و ۴-۱۵) مشاهده شده است.



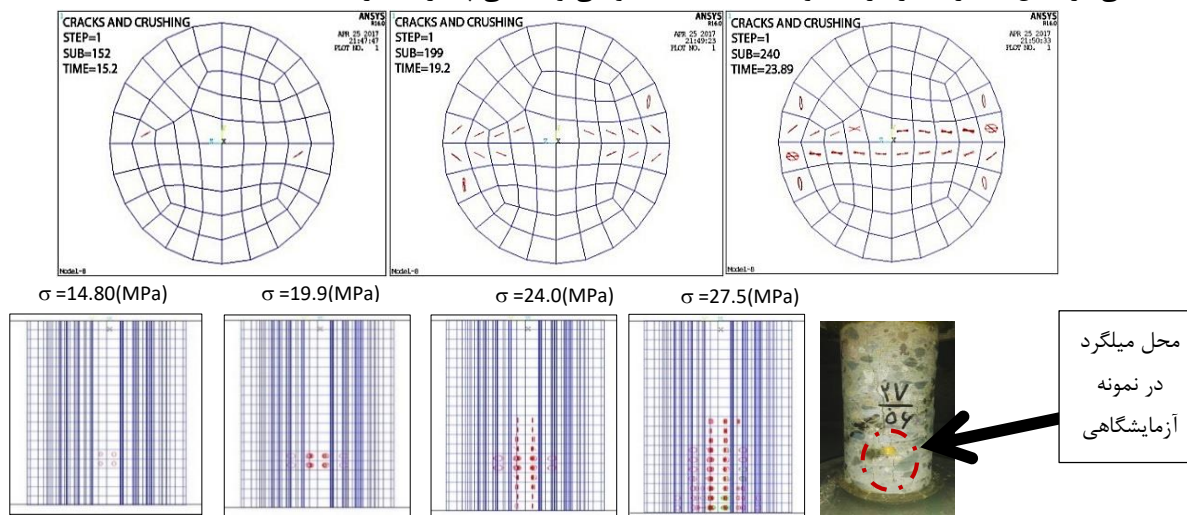
شکل ۱۴ - مقادیر تنش (MPa) Von Mises، کرنش، تغییر شکل برای بتن و میلگرد، نحوه ترک خوردگی و خردشدگی برای بتن و نمای شماتیکی از مدل سازی و شبکه بندی برای نمونه B0

نتایج بیانگر این مطلب بوده‌اند که مقدار تنش فشاری نسبت به حالت بدون میلگرد فولادی کاهش چشمگیری داشته و منجر به تمرکز ترک خوردگی در اطراف میلگرد می‌شود. نحوه تمرکز ترک خوردگی در اطراف میلگردها در نمونه مغزه مورد نظر در (شکل ۵-۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۵- مقادیر تنش (Von Mises (MPa)، کرنش، تغییر شکل برای بتن و میلگرد، نحوه ترک خوردگی و خردشدگی برای بتن و نمای شماتیکی از مدل سازی و شبکه بندی برای نمونه B2

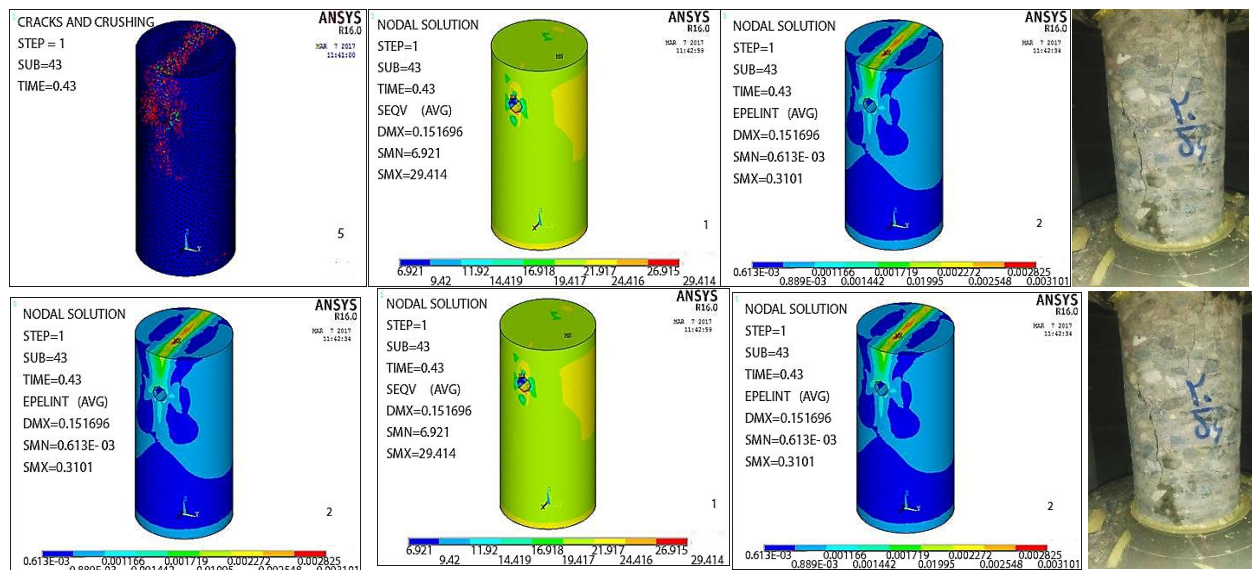
در شکل ۱۶ نحوه رشد ترک در نمونه B2 در مدل های اجزاء محدود از نمای مقطع عرضی و نمای جانبی و همچنین نمای جانبی از نمونه مشابه آزمایشگاهی در لحظه نهایی نشان داده شده است. شروع ترک خوردگی نمونه مورد نظر در تنش معادل با ۱۲/۸ مگاپاسکال بوده که این مقدار تنش ۴۶٪ ظرفیت باربری کل است. همانطور که مشاهده می شود، ترک خوردگی در مدل اجزاء محدود و نمونه مشابه آزمایشگاهی، از محل میلگرد آغاز گردیده و به سمت قسمت فوقانی و تحتانی پیشرفت کرده است.



شکل ۱۶ - نحوه رشد ترک و تنش های ایجاد شده در نمونه B2 در آزمایشگاه و در مدل های اجزاء محدود

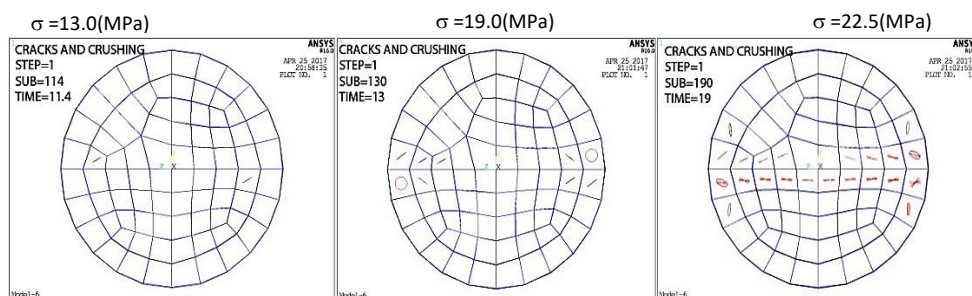
مدل B6 از لحاظ مشخصات فیزیکی و محل قرار میلگرد کاملاً مشابه مدل B2 بوده با این تفاوت که حاوی میلگرد ۱۶ می باشد. نتایج مدلسازی بیانگر این بوده اند که، مقدار تنش فشاری نیز در این حالت نسبت به حالت بدون میلگرد فولادی (نمونه B0)، ۱۵٪ کاهش یافته و منجر به تمرکز ترک خوردگی در اطراف میلگرد شده است. نحوه تمرکز ترک خوردگی در اطراف میلگردها در نمونه مغزه مورد نظر در شکل ۱۷ نشان داده شده است. در شکل ۱۸ نحوه رشد ترک در نمونه B6 در مدل های اجزاء محدود از نمای مقطع عرضی و نمای جانبی و

همچنین نمای جانبی از نمونه مشابه آزمایشگاهی در لحظه نهایی نشان داده شده است. شروع ترک خوردگی نمونه مورد نظر در تنش معادل با ۱۲/۴ مگاپاسکال بوده که این مقدار تنش ۴۲٪ ظرفیت باربری کل است.



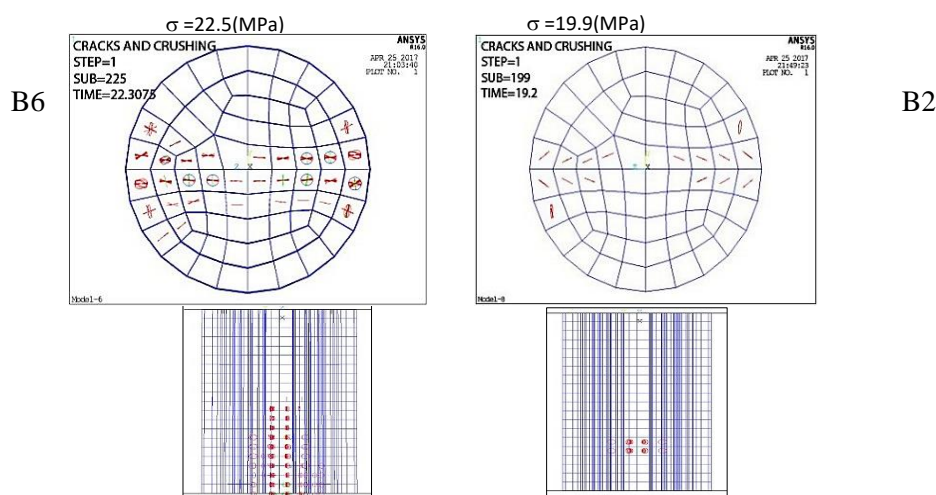
شکل ۱۷- مقادیر تنش Von Mises (MPa)، کرنش، تغییر شکل برای بتن و میلگرد، نحوه ترک خوردگی و خردشدگی برای بتن و نمای شماتیکی از مدل سازی و شبکه بندی برای نمونه B6

پیوند مکانیکی به دلیل وجود آج‌های میلگرد بین بتن و فولاد تشکیل شده و منجر به عملکرد مرکب این دو ماده نسبت به هم می‌شود. عملکرد مرکب بتن و فولاد در مسیر بارگذاری تا ظرفیت نهایی نمونه از بین رفته و منجر به جدایی و لغزش این دو ماده نسبت به هم می‌شود. این امر بتن را در پیرامون میلگرد ضعیف کرده و منجر به تمرکز تنش در این ناحیه می‌شود. همچنین از نتایج حاصله می‌توان دریافت که با افزایش قطر میلگرد و کاهش بخش بیش‌تری از بتن مقاوم در برابر تنش فشاری، مقاومت نمونه کاهش می‌یابد. (شکل ۱۷)



شکل ۱۸ - نحوه رشد ترک و تنش‌های ایجاد شده در نمونه B6 در آزمایشگاه و در مدل‌های اجزاء محدود

شکل ۱۹ نمونه B2 و B6 را در لحظه‌ای نشان می‌دهد که تنش نسبی (نسبت تنش موجود به تنش نهایی) بین این دو نمونه با یکدیگر برابر هستند. همانطور که مشاهده می‌شود تراکم ترک‌ها و گسترش آنها در اطراف میلگرد ۱۶ در نمونه B6 بسیار بیشتر از ترک‌های ایجاد شده در اطراف میلگرد ۱۰ در نمونه B2 می‌باشد. با ازدیاد ترک‌ها در مدل B6 مشاهده می‌شود که تنش نهایی نمونه مذکور کمتر از نمونه B2 گردیده که این موضوع در نمونه‌های آزمایشگاهی (همانطور که در تصاویر قبلی نشان داده شده) نیز رویت گردید. بنابراین به نظر می‌رسد در مغزه‌های مشابه هر چه قطر میلگرد موجود در مغزه بیشتر باشد، به دلیل افزایش و تراکم ترک‌ها تنش نهایی پایین‌تر می‌آید.

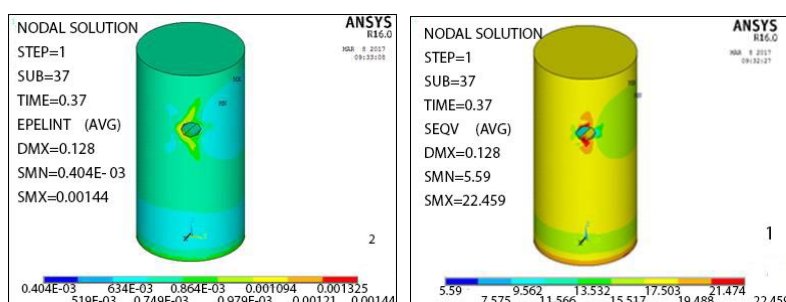


شکل ۱۹- نحوه رشد ترک و تنش‌های ایجاد شده در نمونه‌های B2 و B6 در تنش‌های نسبی مساوی

با مراجعه به جدول ۴ و مقایسه‌ی بین مدل‌های B6, B2, B0 از لحاظ نتایج آزمایشگاهی و عددی، مشاهده می‌شود وجود میلگرد در مغزه باعث پایین آمدن مقدار تنش در زمان تشکیل اولین ترک می‌شود. همچنین با زیاد قطر میلگرد داخل مغزه مقدار تنش ترک اولیه پایین تر می‌آید.

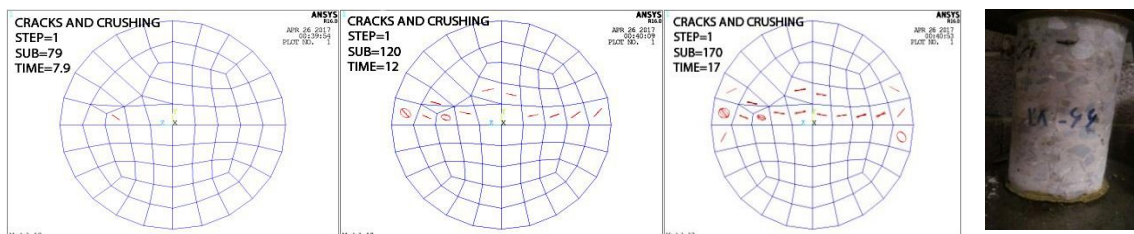
۵-۲-۳-۲- بررسی اثر موقعیت میلگرد از محور قائم (انحراف از محور)

برای بررسی تأثیر وجود انحراف از محور میلگرد بر روی مقاومت مغزه‌ها، نمونه‌های B12, B6 مورد ارزیابی قرار گرفتند. میلگرد موجود در مدل B6 با قطر ۱۶ و در روی محور عمودی بوده و در مدل B12 همین میلگرد با انحراف از محور به اندازه ۲۵ میلی متر در مغزه قرار دارد. پوشش بتنی میلگردها در هر دو مدل برابر در نظر گرفته شده است. لذا علاوه بر نتایج مدلسازی نمونه B6 که در قسمت ۳-۲-۱ ذکر گردید، نتایج مدلسازی مدل B12 در ادامه ارائه می‌گردد. نتایج مدلسازی بیانگر این بوده‌اند که، مقدار تنش فشاری نیز در این حالت نسبت به حالت بدون میلگرد فولادی (نمونه B0) کاهش یافته است و منجر به تمرکز ترک خوردگی در اطراف میلگرد شده است. نحوه تمرکز ترک خوردگی در اطراف میلگردها در نمونه مغزه موردنظر در شکل ۲۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار تنش فشاری در نمونه مغزه مورد نظر نیز در اطراف میلگرد مشاهده می‌شود. در شکل ۲۱ نحوه رشد ترک در نمونه B12 در آزمایشگاه و در مدل‌های اجزاء محدود نشان از نمای جانبی نشان داده شده است. همچنین شروع ترک خوردگی نمونه موردنظر در تنشی معادل با ۱/۴ مگاپاسکال بدست آمد که این مقدار تنش برابر ۳۸٪ ظرفیت باربری کل است.



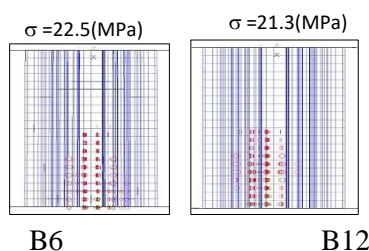
شکل ۲۰- مقادیر تنش (Von Mises (MPa)، کرنش، تغییر شکل برای بتن و میلگرد، نحوه ترک خوردگی و خردشدگی برای بتن و نمای شماتیکی از

مدل‌سازی و شبکه‌بندی برای نمونه B12



شکل ۲۱- نحوه رشد ترک و تنش‌های ایجاد شده در نمونه B12 در آزمایشگاه و در مدل‌های اجزاء محدود

انتظار می‌رود که به دلیل خروج از محوریت میلگرد و قرار گرفتن آن در خارج انتهای جانبی مثلث توزیع تنش، نمونه مغزه در این ناحیه ضعیف شده، سطح مقاوم در برابر تنش وارده را کاهش داده و خرابی را در این منطقه محدود می‌کند. توزیع تنش در این حالت، به دلیل انحراف از محوریت میلگردها، به صورت نامتقارن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیش‌ترین خرابی در این محدوده ایجاد شده است. از نتایج حاصله می‌توان دریافت که در این حالت مقادیر مقاومت فشاری نسبت به حالت بدون خروج از محوریت، کم‌تر به دست آمده است. در شکل ۲۲ نحوه گسترش ترک در دو نمونه B6 و B12 را نشان می‌دهد. در نمونه B6، میلگرد نمره ۱۶ در وسط نمونه و منطبق بر محور عمودی قرار گرفته است ولی در نمونه B12، میلگرد در حفاصل محور عمودی و سطح بیرونی نمونه قرار دارد. مشاهده می‌گردد در درصد مشابهی از تنش نهایی (حدود ۷۸ درصد تنش نهایی)، ترک‌ها در نمونه B6 بصورت متقارن گسترش پیدا کرده و مسیر افقی و عمودی را طی می‌کنند، اما در نمونه B12، تراکم ترک‌ها در حد فاصل بین میلگرد و محور عمودی قرار گرفته و رشد ترک‌ها بصورت افقی سریع‌تر می‌باشد. به همین دلیل تنش نهایی نسبت به نمونه B6 کاهش یافته است.

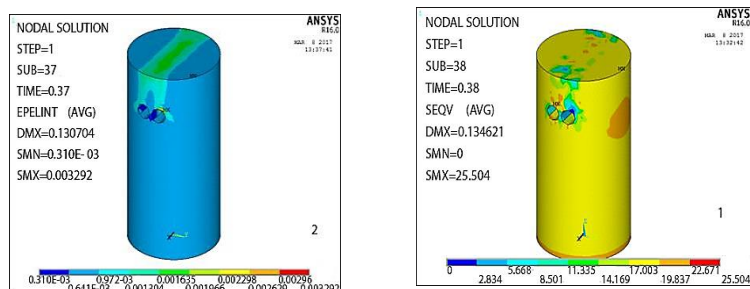


شکل ۲۲- نحوه رشد ترک در نمونه B6 و B12 در مدل‌های اجزاء محدود

با مراجعه به جدول ۴، مشاهده می‌شود، انحراف از محور میلگرد ۱۶ در مغزه نسبت به محور عمودی، حدود ۸ درصد مقاومت را نسبت به حالتی که میلگرد انحراف نداشته باشد، کاهش داده است.

۵-۲-۳- بررسی اثر تعداد و نحوه قرارگیری میلگردها نسبت به هم

برای بررسی تأثیر تعداد و نحوه قرارگیری میلگردها نسبت به هم بر روی مقاومت مغزه‌ها، نمونه‌های B16, B0 مورد ارزیابی قرار گرفتند. میلگردهای موجود در مدل B16 با قطر ۱۶ و در روی محور عمودی بوده و در کنار هم قرار گرفته‌اند. مشخصات مدل‌های B6, B0 نیز در قسمت‌های قبلی بیان گردید. همان‌طور که از نتایج نمونه‌ها مشاهده می‌شود، مدل B16 که حاوی دو میلگرد ۱۶ بوده نسبت به مدل B6 که حاوی یک میلگرد ۱۶ بوده است حدود ۱۵ درصد کاهش مقاومت داشته است. دلیل این امر را می‌توان به افزایش مساحت میلگرد و کاهش بخش بتنی و همچنین افزایش لغزش و جداسازی توجیه کرد. نحوه تمرکز ترک خوردگی در اطراف میلگردها در نمونه مغزه، در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود. شروع ترک خوردگی نمونه مورد نظر در تنش معادل با ۱۰/۱ مگاپاسکال بدست آمد که این مقدار تنش ۳۹٪ ظرفیت باربری کل است.



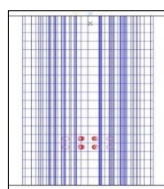
شکل ۲۳ - مقادیر تنش (Von Mises (MPa)، کرنش، تغییر شکل برای بتن و میلگرد، نحوه ترک خوردگی و خردشدگی برای بتن و نمای شماتیکی از

مدل سازی و شبکه بندی برای نمونه B16

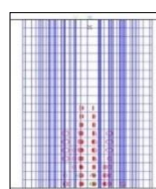
در یک موقعیت مشابه، زمانی که نسبت تنش موجود به تنش نهایی در دو نمونه B6 و B16 یکسان می گردد (به عنوان مثال ۷۰٪) مشاهده می شود که در نمونه B16 تراکم ترک ها در هر دو محور عمودی و افقی بیشتر از نمونه مشابه B6 می باشد. مجموعه این عوامل باعث تاثیر تعداد میلگرد بر روی تنش های نهایی می گردد (شکل ۲۴). بنابراین به نظر می رسد با ازدیاد تعداد میلگرد در مغزه ها، تنش نهایی کمتر می گردد.

$$\sigma = 17.85 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma = 20.58 \text{ (MPa)}$$



B6



B16

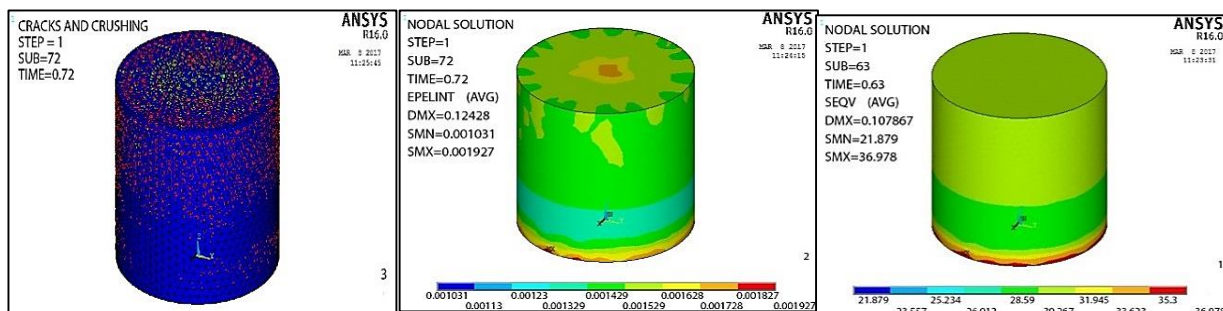


شکل ۲۴ - نحوه رشد ترک در نمونه B6 و B16 در مدل های اجزاء محدود

با مراجعه به جدول ۴، مشاهده می شود که وجود دو میلگرد در مغزه، مقاومت را در حدود ۲۵ درصد نسبت به مغزه بدون میلگرد کاهش داده و همچنین جفت شدن این میلگردها باعث کاهش مقاومت در حدود ۱۲ درصد نسبت به مغزه های حاوی تک میلگرد می گردد. نتایج بیانگر این مطلب بوده اند که، نحوه قرارگیری میلگردها (کنار یا روی هم بودن) در نمونه های مشابه، تفاوت های چشم گیری را ایجاد نمی نمایند.

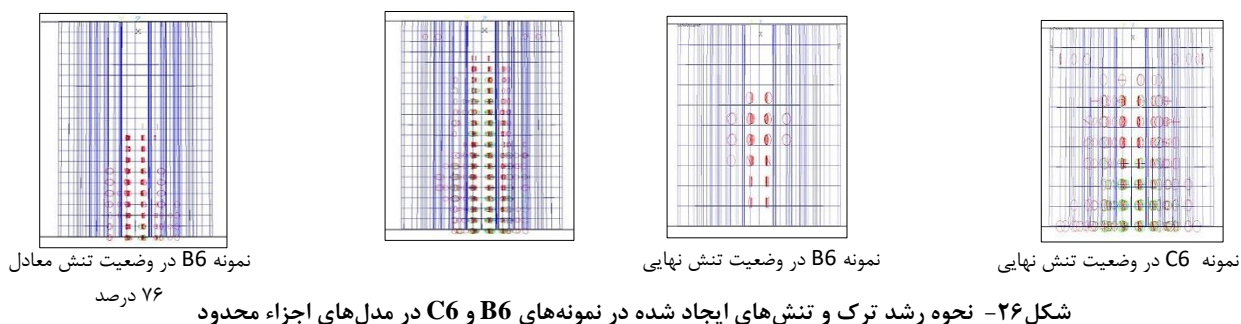
۵-۳-۴ - بررسی اثر نسبت طول به قطر در مغزه های حاوی میلگرد

جهت بررسی تاثیر نسبت طول به قطر در مغزه های حاوی میلگرد، نمونه های C0، C6 و B6 مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. نمونه C0 فاقد میلگرد بوده و دارای قطر ۱۰ سانتی متر و $l/d=2$ می باشد. مشابه با نمونه B0، بیشترین میزان ترک خوردگی در قسمت تحتانی نمونه مورد نظر تشکیل شده و بیشینه مقاومت فشاری نیز در این ناحیه به وجود آمده است. همان گونه که در شکل ۲۵ مشاهده می شود مقدار بیشینه تنش فشاری نمونه C0 نسبت به نمونه B0 افزایش یافته است. دلیل این امر را می توان با کاهش ابعاد نمونه و تغییر در نحوه و ابعاد شدت توزیع تنش توجیه کرد. همچنین شروع ترک خوردگی نمونه مورد نظر در تنش معادل با $21/3$ مگاپاسکال بدست آمده که این مقدار تنش ۵۷٪ ظرفیت باربری کل است.



شکل ۲۵- مقادیر تنش (Von Mises (MPa)، کرنش، تغییر شکل، نحوه ترک خوردگی و خردشدگی برای بتن و نمای شماتیکی از مدل سازی و شبکه بندی برای نمونه C0

نمونه C6، همان مشخصات نمونه C0 را داشته با این تفاوت که حاوی یک میلگرد ۱۶ می باشد. شروع ترک خوردگی نمونه C6 در تنش معادل با $10/3$ مگاپاسکال بدست آمده که این مقدار تنش 32% ظرفیت باربری کل است. نسبت طول به قطر (L/D) از نمونه های مغزه همیشه به عنوان عامل اصلی موثر بار گسیختگی آن ها شناخته شده است. این اثر بستگی به شرایط مختلف از جمله مقاومت بتن، مدول الاستیسیته بتن و علی الخصوص نسبت (L/D) دارد. با مراجعه به جدول ۴، مشاهده می شود که، با ازدیاد نسبت L/D از ۱ به ۲، در مغزه های حاوی میلگرد، مقاومت مغزه، در حدود ۱۲ درصد کاهش می یابد. با افزایش نسبت (L/D)، مقاومت حاصله از آزمایش نمونه ها به دلیل تاثیر شکل نمونه بر توزیع تنش وارد، کاهش می یابد. همچنین ضریب تصحیح برای نسبت طول به قطر ($F_{L/D}$)، در حالت آزمایشگاهی برای نمونه C6 برابر 0.1844 و در حالت عددی برابر 0.1904 بدست آمد. ملاحظه می شود که $F_{L/D}$ حاصل از نتایج آزمایشگاهی، اختلاف اندکی (حدود ۷ درصد) با $F_{L/D}$ حاصل از نتایج عددی دارد. همانطور که ذکر شد، مدل B6 و C6 هر دو شامل یک میلگرد با قطر ۱۶ میلی متر و با پوششی بتنی برابر با ۵۰ میلی متر بوده اند و تفاوت آنها در نسبت L/D بوده است. هنگامی که در نمونه B6 و C6 نسبت تنش موجود به تنش نهایی (در محدوده ۷۰ الی ۸۰ درصد) بررسی می شود، مشاهده می گردد که تمرکز تنش و در نتیجه تراکم ترک ها در اطراف میلگرد برای نمونه B6 بیشتر می باشد. شکل ۲۶ نحوه رشد ترک در نمونه های B6 و C6 را نشان می دهد. در نمونه B6، زمانی که تنش برابر 22.5 Mpa بوده است (۷۳ درصد از تنش کل)، ترک ها بسیار متراکم تر از همین وضعیت در نمونه C6 می باشند. این تراکم ترک ها و رشد سریعشان در طول نمونه باعث گردیده است که تنش نهایی در نمونه B6، حدود ۱۰ درصد کمتر از تنش نهایی در نمونه C6 گردد. بنابراین با زیاد شدن مقدار L/D از ۱ به ۲، در مغزه های حاوی میلگرد توزیع تنش ها تغییر کرده، تراکم ترک ها اطراف میلگرد بیشتر شده و تنش نهایی در مغزه ها کاهش می یابد که این مطلب در نتایج آزمایشگاهی نیز مشاهده شده است.



شکل ۲۶- نحوه رشد ترک و تنش های ایجاد شده در نمونه های B6 و C6 در مدل های اجزاء محدود

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

نتایج نشان دادند که بیشترین کاهش مقاومت مغزه های حاوی میلگرد هنگامی اتفاق می افتد که تعداد میلگردهای داخل مغزه زیاد شده یا میلگرد داخل مغزه نسبت به محور عمودی، دارای برون محوری باشد. مشاهده گردید که برای یک اندازه مشخص از مغزه و میلگرد، مقاومت نسبی مغزه ها با حضور میلگرد کاهش می یابد. هر چند تشخیص علت و عامل واقعی این پدیده دشوار به نظر می رسد. بر پایه نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در این مطالعه از طریق آزمایش تعداد زیادی از مغزه های بتنی، به نظر می رسد نسبت حجمی میلگردهای فولادی بزرگتر از $2/5\%$ تاثیر کاهنده بیشتری بر مقاومت اندازه گیری شده مغزه ها نداشته است. هم چنین این رفتار تقلیل شونده، به مقادیر کاهش ثابتی به ترتیب به مقدار 5% و 15%

برای نسبت‌های طول به قطر ۱ و ۲ تمایل داشته است. بر طبق نتایج بدست آمده در مغزه‌های با میلگرد، قطر مغزه به طور قابل توجهی بر مقاومت نسبی برای یک مقدار مشخص نسبت حجمی میلگرد اثرگذار است. تفسیر نتایج دو قطر مختلف مغزه نیازمند توجه ویژه بوده و می‌بایست به طور جداگانه برای دو اندازه مختلف در نظر گرفته شود. هر چند، به نظر می‌رسد برای یک مقدار مشخص از نسبت حجمی میلگرد، می‌توان از یک ضریب تبدیل ساده برای تبدیل مقاومت مغزه 75mm به مقاومت استاندارد 100mm استفاده نمود. بر پایه نتایج استخراج شده در این تحقیق، این مقدار را می‌توان به طور متوسط برابر ۱/۳۰۴ معرفی نمود. نتایج نشان داد که تغییر رفتار مغزه‌های با میلگرد در دو تراز مقاومت پایین و بالا متفاوت است. در مغزه‌های با میلگرد و با بتن مقاومت بالا، درصد کاهش مقاومت حدود ۲ تا ۷ درصد و در مقاومت پایین، کاهش مقاومت مغزه‌های با میلگرد در حدود ۱۰ تا ۲۸ درصد نسبت به نمونه بدون میلگرد می‌باشد. علت امر این است که در نمونه‌های با مقاومت بالا به علت متبلور و کریستاله شدن ذرات سیمان بدلیل وجود ذرات سیمانی بیشتر در نمونه‌های با مقاومت بالا، افزایش مقاومت بیشتری در این نمونه‌ها نسبت به نمونه با مقاومت پایین مشاهده شده است. همچنین در مقاومت بالا، در هنگام رسیدن مته به میلگرد، ترک‌های ناشی از عملیات برش به مراتب کمتر از ترک‌های ایجاد شده در مغزه‌های با مقاومت کمتر بوده است. نتایج Core-test بر روی مغزه‌های با میلگرد نشان داد که افزایش قطر میلگرد داخل مغزه، باعث کاهش تقریبی مقاومت به اندازه 13-17% نسبت به مغزه بدون میلگرد می‌گردد. همچنین در مقایسه بین مقاومت مغزه‌های حاوی میلگرد ساده و آجدار تفاوت چندانی مشاهده نگردید. نتایج بیانگر این مطلب بوده اند که تغییر شرایط نگهداری در مغزه‌های با و بدون میلگرد، تاثیر چندانی بر روند تغییرات مقاومت بین این مغزه‌ها نداشته است و میزان تغییرات در مغزه‌های با میلگرد، مشابه تغییرات مقاومت مغزه‌های بدون میلگرد در هنگام تغییر شرایط نگهداری می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت که مقدار متوسط مقاومت نسبی مغزه برای شرایط محیطی (نگهداری در هوای آزاد)، ۹/۴ درصد کوچکتر از مغزه‌های مرطوب نگهداشته شده است. نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی مغزه‌های بتنی با میلگرد، نشان دادند که آسیب پذیری بتن در اطراف ناحیه میلگردها به وجود می‌آید که به نظر می‌رسد این امر به دلیل ایجاد تمرکز تنش در اطراف این ناحیه بوده که سرانجام باعث شکست در مغزه‌های بتنی می‌شود. می‌توان عنوان نمود که مقادیر مقاومت نسبی مغزه‌ها (نسبت مقاومت فشاری متوسط نمونه‌های با میلگرد به نمونه‌های متناظر بدون میلگرد)، با ازدیاد پوشش میلگرد، به یک نزدیکتر می‌گردد. می‌توان عنوان نمود که در مغزه‌هایی که حاوی یک میلگرد $\Phi 10$ و $\Phi 16$ می‌باشند و میلگرد دارای برون محوری از محور عمودی می‌باشد، مقاومت به صورت تقریبی به میزان ۱۴-۱۸ درصد نسبت به مغزه‌های بدون میلگرد کاهش می‌یابد. مطالعات عددی نشان دادند که در درصد مشابهی از تنش نهایی، در مقایسه بین نمونه‌هایی که میلگرد در وسط نمونه و منطبق بر محور عمودی قرار گرفته (بدون برون محوری) و نمونه‌هایی که میلگرد دارای برون محوری می‌باشد در حالت بدون برون محوری، ترک‌ها بصورت متقارن گسترش پیدا کرده و مسیر افقی و عمودی را طی می‌کنند، اما در نمونه مشابه و با برون محوری، تراکم ترک‌ها در حد فاصل بین میلگرد و محور عمودی قرار گرفته و رشد ترک‌ها بصورت افقی سریعتر می‌باشد. به همین دلیل تنش نهایی نسبت به نمونه بدون برون محوری کاهش یافته است. مطالعات عددی بیانگر این مطلب بوده‌اند که، وجود دو میلگرد در مغزه، مقاومت را در حدود ۲۵ درصد نسبت به مغزه بدون میلگرد کاهش داده و همچنین جفت شدن این میلگردها باعث کاهش مقاومت در حدود ۱۲ درصد نسبت به مغزه‌های حاوی تک میلگرد می‌گردد. نتایج بیانگر این مطلب بوده‌اند که، وجود میلگردهای دوبل با فاصله ۳ سانتی متر از هم، به نحوی که از لحاظ هندسی متقارن باشند، کاهش مقاومتی در حدود ۳۰ درصد نسبت به مغزه‌های بدون میلگرد را ایجاد می‌نمایند. همچنین مشاهده می‌شود که نحوه قرارگیری میلگردها (کنار یا روی هم بودن) در نمونه‌های مشابه، تفاوت‌های چشم‌گیری را ایجاد نمی‌نمایند.

۷- مراجع

- [۱] G. Reddy Babu, B.Madhusudana Reddy, N.Venkata Ramanac, (2018), "Quality of mixing water in cement concrete", Materials Today, Volume 5, Issue 1, Part 1, Pages 1313-1320.
- [۲] Rochman, T., Suhariyanto, (2022), " Multilayer bamboo composite hollow- core: Lab-scale and non-destructive testing of full-scale concrete bridges considering transverse bamboo pole as shear reinforcement", The Institution of Structural Engineers, Volume 38, April 2022, Pages 1426-1437.
- [۳] S. Herald Lessly, R.Senthil, B.Krishnakumar, (2006), " A study on the effect of reinforcement on the strength of concrete core", Materials Today, Volume 45, Part 7, 2021, Pages 6476-6481
- [۴] Bungey, J.H., Millard, S.G., & Grantham, M.G.,. "Testing of concrete in structures", fourth ed. Taylor & Francis,

London and New York, 352p

- [۵] Neville, A.M. (1996). "Properties of concrete", fourth ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, 844p.
- [۶] A, Omer; R, Kambiz; T, Mustafa; T, Ahmet. (2008). "Effect of length-to-diameter ratio of core sample on concrete core strength - Another look", Journal of Testing and Evaluation.
- [۷] Gaynor, R.D. (1965). "Effect of horizontal reinforcing steel on the strength of molded cylinders", Journal of the American Concrete Institute, vol. 62, no. 7, pp. 837-840.
- [۸] Loo, Y.H., Tan, C.W. & Tam, C.T. (1989). "Effects of embedded reinforcement on measured strength of concrete cylinders", Magazine of Concrete Research, 41(146), 11-18.
- [۹] Houry, S. Aliabdo, A.A. & Ghazy, (2014). "A. Reliability of core test – Critical assessment and proposed new approach", Alexandria Engineering Journal, 53, 169–184.
- [۱۰] Neville, A. (2001). "Core tests – Easy to perform, not easy to interpret", Concrete International, 23(11), 59–68.
- [۱۱] BS EN 12504-1, (2019). "Testing concrete in structures – Cored specimens – Taking, examining and testing in compression", British Standards Institution, London, 8 pp.
- [۱۲] BS 6089, (2017). "Guide to Assessment of Concrete Strength in Existing Structures", British Standards Institution, 11 pp.
- [۱۳] BS 1881: Part 120: 1983, (1983). "Method for determination of the compressive strength of concrete cores", British Standards.
- [۱۴] Concrete Society, (1976). "Concrete Core Testing for Strength", Concrete Society Technical Report No. 11, 44 pp.; Addendum, 1987, pp. 45-59.
- [۱۵] ACI Committee 214.4-03, (2017). "Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results American Concrete Institute", Farmington Hills, Mich., 16pp.
- [۱۶] ASTM C42, (2018). "Standard method of obtaining and testing drilled cores and sawn beams of concrete", American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- [۱۷] Malhotra, V.M., Carino, N.J., (2014), Handbook on Nondestructive Testing of Concrete
- [۱۸] Petersons, N., (1968), Should standard cube test specimens be replaced by test specimens taken from structures? , Materials and Structures, 1, No. 5, pp. 425-35.
- [۱۹] ASTM C172/C172M-17, Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concret. American Society for Testing and Materials.
- [۲۰] ASTM C617/C617M-15, Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens American Society for Testing and Materials.
- [۲۱] ASTM C39 , Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials.
- [۲۲] ACI 318-99, American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete," American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1999.
- [۲۳] Park, R. and Paulay, T., "Reinforced Concrete Structure" , John Wiley and Sons Inc., 1975.
- [۲۴] Tadayon, M.; Moghadam, H. T. P.; Tadayon M. H. "Effect of Rebar on Compressive Strength of Concrete Cores"; 3rd International Conference on Concrete & Development CD06-011.