

تحلیل آزمایشگاهی و عددی به منظور ارزیابی تأثیر هندسه و اندازه مغزه بر مقاومت فشاری تک محوره بتن

رضا شیرین آبادی^{۱*}؛ احسان موسوی^۲؛ محمد علی طهماسبی^۳

۱-استادیار، گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲-مرکز تحقیقات مدل سازی و بهینه سازی در علوم و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳-دانشجوی دکتری مهندسی معدن- مکانیک سنگ، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶

چکیده

جهت ارزیابی مقاومت بتن در یک ساختار موجود، روش نیمه مخرب به صورت برجا همواره چالش برانگیز است. در برخی مواقع، ناگزیر به اعمال آزمایش مغزه گیری بر روی اعضای مانند ستون بوده که انجام آزمایش مغزه گیری در ستون موجب ایجاد حفره استوانه ای یا مکعب شکل در آن می گردد lk . که وجود این حفره اثر منفی در ظرفیت باربری عضو داشته باشد. به بیان دیگر، هندسه آزمایش مغزه و نیز نسبت حجم و عرض/قطر حفره نسبت به ساختگاه در بتن باعث تأثیر روی عضو شده و بر همین مبنا نسبت های مذکور تأثیر بسزایی در سنجش مقاومت ساختگاه دارد. در این تحقیق، اثر حفره بر مقاومت فشاری ۸ سری ۵ تایی نمونه بتن با ابعاد $15 \times 15 \times 15$ با اندازه های مختلف و نیز هندسه استوانه و مکعبی تهیه شد. رابطه خطی مقاومت فشاری تک محوره بتن و نسبت قطر حفره به عرض نمونه و رابطه مقاومت فشاری تک محوره بتن و نسبت حجم حفره و حجم نمونه بر اساس مدل آزمایشگاهی و عددی به صورت بار عمود بر حفره حاصل شد. نتایج حاصله نشان می دهد، چنانچه به ترتیب حجم و قطر حفره حدود ۱۴ و ۶۰ درصد حجم و عرض نمونه باشد، می تواند تا ۵۸ و ۷۴ درصد مقاومت فشاری تک محوره را تقلیل دهد.

واژگان کلیدی

مقاومت فشاری تک محوره، مدل عددی، مدل تجربی، بتن، آزمایش مغزه

۱- مقدمه

بتن به دلیل استحکام و پایداری، در دسترس بودن و ارزان بودن مواد اولیه و قابلیت شکل گیری، ماده ای پر کاربرد در زمینه ساخت و سازها است. در نتیجه، امروزه تعداد زیادی از سازه های بتنی وجود دارد و روز به روز این تعداد در حال تکامل است. در بین خصوصیات مکانیکی و فیزیکی بتن، مقاومت فشاری بتن مهم ترین خاصیت است؛ زیرا، برای طراحی یک عضو سازه یا محاسبه ظرفیت تحمل بار آن ضروری است [۱]. آزمایش بر روی نمونه های استاندارد استوانه ای و مکعبی به منظور تعیین مقاومت فشاری رایج است. اما، نمونه های قالب گیری شده ممکن است در اثر عواملی همچون عدم توجه به شرایط واقعی، شرایط متفاوت در عمل آوری، نحوه انتخاب تصادفی

نمونه ها از کل مجموعه، وجود تغییرات در نوع و مقدار مصالح و تفاوت در نوع تراکم، معرف مشخصات و خصوصیات بتن بکار رفته در ساخت اعضای ساختگاه عملیاتی نباشد. از سویی، نمونه ها در بازه های زمانی محدود ۷ الی ۲۸ روز مورد آزمایش قرار می گیرند که مخاطرات حاصله به سبب عمر ساختگاه و همچنین ترک های ایجاد شده به دلیل اثرات محیطی یا بارگذاری، ضرورت ایجاد روش های متعددی جهت تخمین مقاومت فشاری بتن به صورت برجا ابداع تا حتی المقدور کنترل کمی و کیفی بتن در ساختگاه نزدیک به واقعیت باشد. بر اساس فرایند حاکم در این روش ها می توان آن ها را به دو گروه روش های غیر مخرب و نیمه مخرب تقسیم نمود که می توانند به نحو مستقیم یا غیرمستقیم مقاومت بتن را مورد ارزیابی قرار

بتن و نسبت قطر حفره به عرض نمونه و رابطه بین UCS بتن و نسبت حجم حفره و حجم نمونه ارائه شد. استفاده از کد جریان ذرات دو بعدی (PFC-2D) به منظور شبیه‌سازی و تحلیل مشخصه‌های مکانیکی نمونه‌های بتن در دستور کار و آزمایش قرار گرفت [۳۹-۴۱]. بدین منظور نمونه مغزه از هر دو هندسه استوانه و مکعب شکل با اندازه حفرات مختلف مدل‌سازی و سپس روند شکست با استفاده از PFC شبیه‌سازی شد. در انتها، نتایج حاصله از دو مدل تجربی و عددی مورد مقایسه قرار گرفت.

۲- آزمایش تجربی

۲-۱- ساخت نمونه مغزه

جدول ۱ عناصر تشکیل‌دهنده بتن و نیز درصد اختلاط که به صورت مخلوطی همگن و یکنواخت، خاصیت مناسب بتن با مقاومت بالا را شامل می‌شود، نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات اختلاط برای ۱ مترمکعب بتن

وزن (Kg)	آب	سیمان	سنگدانه ریز	سنگدانه درشت
اختلاط	۱۵۷	۳۵۰	۱۰۰۰	۹۰۰

نمونه‌های مغزه مکعبی شکل با حفرات استوانه‌ای شکل قالب-گیری شده در هشت گروه و هر گروه شامل پنج نمونه تهیه شد. هر گروه از نمونه‌ها با اندازه‌های مختلف از حفره‌های استوانه‌ای ایجاد می‌شوند. به بیان دیگر، نمونه مغزه بدون حفره و نمونه‌های مغزه با اندازه حفرات ۲، ۲/۵، ۳/۲، ۵، ۶/۳، ۹ و ۱۱/۱ سانتی‌متر ایجاد شده است (شکل ۱). مشخصات ابعاد نمونه‌ها، وزن نمونه‌ها، وزن مخصوص، مقادیر متوسط مقاومت فشاری، میانگین وزن و نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱- تصویر نمونه مغزه حفرات استوانه‌ای با اندازه‌های مختلف

دهند [۲]. بنابراین، ارزیابی مقاومت فشاری بتن برجا در بسیاری از شرایط مطابق ذیل ضروری است [۴۰].

- کنترل کیفیت بتن برای اطمینان از انطباق با مشخصات در مورد ساختگاه جدید،
- مباحث حقوقی و قراردادی به دلیل عدم انطباق نمونه‌های استاندارد،
- تغییر در کاربری یا عملکرد یک سازه که منجر به ارزیابی مقاومت بتن به منظور محاسبه دقیق ظرفیت سازه دارد،
- آسیب ناشی از آتش‌سوزی، خستگی، اضافه بار یا انحطاط زیست محیطی،
- مسئله مقاوم‌سازی لرزه‌ای که لزوم ارزیابی دقیق برجا از مقاومت بتن در سازه‌های موجود را تأکید می‌کند.

برای این شرایط خاص، آزمایش مغزه‌گیری یک روش بسیار مفید و قابل اعتماد برای ارزیابی خصوصیات مکانیکی و فیزیکی بتن به صورت برجا به شمار می‌رود [۵-۷]. اگر چه این روش گران و زمان‌بر است؛ اما، مغزه‌ها نتایج قابل اطمینان و مفیدی را منتج می‌شوند؛ چرا که از نظر مکانیکی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند [۸-۱۶]. با این حال، نتایج آزمایش باید به دقت تفسیر شوند؛ زیرا، مقاومت مغزه تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله: قطر، نسبت طول به عرض، رطوبت نمونه مغزه، جهت‌گیری حفاری، عناصر فولادی تقویت‌شده در نمونه می‌باشد [۳۰-۱۷]. چنانچه احتمال مقاومت کم بتن در نمونه‌ها تأیید شود و محاسبات نشان دهد که ظرفیت تحمل بار به طور قابل توجهی کاهش یافته است، آزمایشات مغزه‌گیری از عضو مورد هدف مطابق با آزمایش مغزه حفاری مجاز است [۳۱ و ۳۲].

در سال‌های ۱۹۷۹، ۱۹۸۹ و ۱۹۹۴ محققین به طور جداگانه مطالعات گسترده‌ای را بین مقاومت فشاری بتن و نیز ضریب تصحیح مقاومت بتن در شرایط عادی و عملیاتی انجام دادند [۳۵-۳۳]. در سال ۲۰۰۳، رامایه و همکاران [۳۶] تحقیقات گسترده‌ای را به منظور تخمین مقاومت برجا نمونه مغزه بتن در شرایط مختلف مطالعه و عوامل تأثیرگذار در بتن سنگین برجا بر مقاومت بتن معمولی را برآورد کردند. گروهی از محققان رفتار مکانیکی بتن با مقاومت بالا در مقاومت فشاری را بررسی و نمونه‌ها را تحت کنترل کرنش آزمایش کردند. نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی شکل تحت کنترل کرنش با سرعت ثابت در طول آزمایش، مورد تحلیل قرار گرفتند. نامبردگان، به ویژه به تأثیر شکل و اندازه نمونه‌ها بر مقاومت فشاری تأکید نمودند. نتایج نشان داد، مقاومت میانگین حاصله از نمونه‌های مکعبی نسبت به نمونه‌های استوانه‌ای در بازه‌ی مدنظر تقریباً بیشتر است [۳۷ و ۳۸]. در این مقاله، تأثیر حفره با اندازه‌های مختلف و نیز با هندسه حفره استوانه‌ای و مکعبی شکل بر مقاومت فشاری تک محوره (UCS) بتن با ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نتایج آزمایشات، یک رابطه خطی بین UCS

اگر نسبت حجم حفره به حجم نمونه در گروه هشت تایی به ترتیب صفر، $1/40$ ، $2/18$ ، $3/57$ ، $13/85$ ، $28/27$ و $43/01$ و نیز نسبت قطر حفره نسبت به عرض نمونه در گروه مذکور به ترتیب صفر، $13/33$ ، $16/67$ ، $21/33$ ، $33/33$ ، $42/00$ و $60/00$ را شامل شود، UCS به ترتیب در این نمونه‌ها به مقدار صفر، $28/7$ ، $25/7$ ، $12/7$ ، $43/6$ ، $57/9$ ، $73/8$ ، $83/8$ کاهش می‌یابد. همچنین، جدول ۵ روند تغییر UCS را مطابق نسبت‌های مذکور (حجم حفره به حجم نمونه و قطر به عرض نمونه)، در خصوص نمونه با حفره مکعبی شکل نشان می‌دهد.

۲-۴- تحلیل نتایج بر اساس رگرسیون

به منظور دقت و عملیاتی بودن موضوع، از تحلیل رگرسیون خطی چند متغیره (MRA) به عنوان رویکرد آماری استفاده شده است. رگرسیون، همزمان دو یا چند پارامتر تأثیرگذار مستقل را تأیید می‌کند که در معادله (۱) قابل مشاهده است.

$$Z = a + b_1X_i + b_2X_j + \dots b_nX_k \pm e \quad (1)$$

به منظور ارزیابی درجه دقت برای معادلات پیش‌بینی، از روش مقدار میانگین خطای مربع (RMSE) مطابق رابطه (۲) استفاده شده است [۴۲].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^k (X_i - x_i)^2} \quad (2)$$

با استفاده از نتایج آزمایش نمونه‌های مکعبی با حفرات استوانه‌ای شکل بر اساس بارگذاری عمود بر محور حفره، تجزیه و تحلیل رگرسیون، روابط بین UCS و نسبت حجم حفره به حجم نمونه و نیز، روابط UCS و نسبت قطر حفره به عرض نمونه به ترتیب مطابق معادلات (۳) و (۴) حاصل شد.

$$UCS_{(Experimental\ Cylindrical\ Perpendicular)} = -7.63 \frac{V_c}{V_s} + 352.15 \quad (3)$$

$$UCS_{(Experimental\ Cylindrical\ Perpendicular)} = -5.04 \frac{d}{w} + 420.11 \quad (4)$$

همچنین، نتایج حاصله از تجزیه و تحلیل رگرسیون برای نمونه‌های مکعبی با حفرات مکعبی شکل، بر اساس روابط بین UCS و نسبت حجم حفره به حجم نمونه و همچنین روابط UCS و نسبت قطر حفره به عرض نمونه به ترتیب مطابق معادلات (۵) و (۶) حاصل شد.

$$UCS_{(Experimental\ Cube\ Perpendicular)} = -6.81 \frac{V_c}{V_s} + 269.44 \quad (5)$$

$$UCS_{(Experimental\ Cube\ Perpendicular)} = -4.47 \frac{d}{w} + 311.98 \quad (6)$$

نمونه‌های مغزه مکعبی شکل قالب‌گیری شده در شش گروه و هر گروه شامل پنج نمونه تهیه شده است. هر گروه از نمونه‌ها با اندازه‌های مختلف از حفره‌های مکعبی ایجاد می‌شوند. به بیان دیگر، نمونه مغزه بدون حفره و نمونه‌های مغزه با اندازه حفرات طول و عرض 2×2 ، 4×4 ، 6×6 ، 8×8 ، 9×9 سانتی‌متر ایجاد شده است. ابعاد نمونه‌ها، وزن نمونه‌ها، وزن مخصوص، مقادیر متوسط مقاومت فشاری، میانگین وزن و نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه و در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۲- تصویر نمونه مغزه حفرات مکعبی با اندازه‌های مختلف

۲-۲- مقاومت فشاری تک محوره

پس از تهیه و ساخت نمونه‌های مغزه با مشخصات معلوم تحت دما و رطوبت ثابت به مدت ۲۸ روز، آزمایش مقاومت فشاری با استفاده از دستگاه فشرده‌سازی ۲۰۰ تن انجام شد. میزان بار استفاده شده برای همه نمونه‌های مغزه ۵۰۰ کیلوگرم در ثانیه است. هر نمونه در دستگاه فشرده‌سازی نشان داده شده در شکل ۳ به صوت بارگذاری عمود بر حفره تا زمان خرابی کامل، بارگیری می‌شود و در این مرحله اوج بار ثبت می‌شود. مقاومت فشاری به طور خودکار توسط یک سیستم جمع‌آوری داده، اندازه‌گیری شده است.



شکل ۳- تصویر نمونه مغزه با اندازه‌های مختلف حفرات استوانه‌ای

۲-۳- نتایج آزمایشگاهی

نمونه‌های بتن مکعب شکل با حفرات استوانه و مکعبی شکل به تعداد ۵ نمونه جداگانه برای هر آزمایش اندازه‌گیری شد. نتایج حاصله از آزمایش تجربی بر روی نمونه‌های با حفرات استوانه‌ای و مکعبی شکل در جدول ۴ و ۵ قابل مشاهده است. مطابق با جدول ۴، نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه با حفره استوانه‌ای شکل نشان می‌دهد که شکل و اندازه حفره‌ها تأثیر بسزایی بر UCS دارند. بدین صورت که

جدول ۲- مشخصات نمونه‌ها با حفره استوانه‌ای شکل (بارگذاری عمود بر محور حفره، مدل آزمایشگاهی)

کد نمونه	ابعاد نمونه (cm)	وزن نمونه (gr)	وزن مخصوص (gr/cm ³)	قطر سوراخ (cm)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²)	میانگین مقاومت	میانگین وزن
T ₁	۱۵×۱۵×۱۵	۸۱۱۲	۲/۴۰	بدون حفره	۴۳۲	۴۳۲/۲	۸۱۱۷/۸
T ₁	۱۵×۱۵/۱×۱۵	۸۱۲۸	۲/۳۹	بدون حفره	۴۲۵		
T ₁	۱۵×۱۵×۱۵	۸۱۰۱	۲/۴۰	بدون حفره	۴۱۸		
T ₁	۱۵×۱۵×۱۵	۸۱۲۰	۲/۴۱	بدون حفره	۴۴۱		
T ₁	۱۵/۱×۱۵/۱×۱۵	۸۱۲۸	۲/۳۸	بدون حفره	۴۴۵		
T ₂	۱۵×۱۵×۱۵	۷۹۷۰	۲/۳۶	۲/۰	۳۸۲	۳۷۶/۸	۷۹۵۵
T ₂	۱۵×۱۵×۱۵/۱	۷۹۶۰	۲/۳۴	۲/۰	۳۸۰		
T ₂	۱۵×۱۵×۱۵	۷۹۳۲	۲/۳۵	۲/۰	۳۶۸		
T ₂	۱۵×۱۵/۱×۱۵/۱	۷۹۵۶	۲/۳۳	۲/۰	۳۷۵		
T ₂	۱۵×۱۵×۱۵	۷۹۵۷	۲/۳۶	۲/۰	۳۷۹		
T ₃	۱۵/۱×۱۵×۱۵	۷۹۲۰	۲/۳۳	۲/۵	۳۲۲	۳۲۱	۷۸۹۵/۴
T ₃	۱۵×۱۵×۱۵	۷۸۵۱	۲/۳۲	۲/۵	۳۳۹		
T ₃	۱۵×۱۵×۱۵	۷۹۰۵	۲/۳۴	۲/۵	۳۰۱		
T ₃	۱۵/۱×۱۵/۱×۱۵	۷۹۲۵	۲/۳۲	۲/۵	۳۲۹		
T ₃	۱۵×۱۵×۱۵	۷۸۷۶	۲/۳۳	۲/۵	۳۱۴		
T ₄	۱۵×۱۵×۱۵	۷۷۳۷	۲/۲۹	۳/۲	۳۰۰	۳۰۸/۲	۷۷۸۳
T ₄	۱۵/۱×۱۵×۱۵	۷۸۱۹	۲/۳۰	۳/۲	۳۲۱		
T ₄	۱۵×۱۵×۱۵	۷۸۰۴	۲/۳۱	۳/۲	۲۹۷		
T ₄	۱۵/۱×۱۵/۱×۱۵	۷۸۲۸	۲/۲۹	۳/۲	۳۱۵		
T ₄	۱۵×۱۵×۱۵	۷۷۲۹	۲/۲۹	۳/۲	۳۰۸		
T ₅	۱۵×۱۵×۱۵	۷۲۱۲	۲/۱۴	۵/۰	۲۵۲	۲۴۴	۷۲۶۵/۶
T ₅	۱۵/۱×۱۵/۱×۱۵	۷۳۸۸	۲/۱۶	۵/۰	۲۵۸		
T ₅	۱۵×۱۵×۱۵	۷۲۳۱	۲/۱۴	۵/۰	۲۳۰		
T ₅	۱۵×۱۵×۱۵	۷۲۲۲	۲/۱۴	۵/۰	۲۴۴		
T ₅	۱۵/۱×۱۵×۱۵	۷۲۷۵	۲/۱۴	۵/۰	۲۳۵		
T ₆	۱۵×۱۵×۱۵	۶۹۰۲	۲/۰۴	۶/۳	۱۸۸	۱۸۲	۶۸۹۳/۸
T ₆	۱۵×۱۵×۱۵/۱	۶۸۸۲	۲/۰۳	۶/۳	۱۷۹		
T ₆	۱۵×۱۵×۱۵	۶۹۰۰	۲/۰۴	۶/۳	۱۸۳		
T ₆	۱۵×۱۵/۱×۱۵/۱	۶۸۸۰	۲/۰۱	۶/۳	۱۷۷		
T ₆	۱۵×۱۵×۱۵	۶۹۰۵	۲/۰۵	۶/۳	۱۸۳		
T ₇	۱۵×۱۵×۱۵	۵۶۷۴	۱/۶۸	۹/۰	۱۰۹	۱۱۳	۵۶۸۲/۸
T ₇	۱۵/۱×۱۵/۱×۱۵	۵۶۹۹	۱/۶۷	۹/۰	۱۱۵		
T ₇	۱۵×۱۵×۱۵	۵۶۸۱	۱/۶۸	۹/۰	۱۱۳		
T ₇	۱۵×۱۵×۱۵	۵۶۷۰	۱/۶۸	۹/۰	۱۱۴		
T ₇	۱۵/۱×۱۵×۱۵	۵۶۹۰	۱/۶۷	۹/۰	۱۱۴		
T ₈	۱۵×۱۵×۱۵	۴۷۶۰	۱/۴۱	۱۱/۱	۷۳	۶۹/۸	۴۷۵۲
T ₈	۱۵×۱۵/۱×۱۵	۴۷۵۰	۱/۴۰	۱۱/۱	۶۸		
T ₈	۱۵×۱۵×۱۵	۴۷۴۰	۱/۴۰	۱۱/۱	۷۰		
T ₈	۱۵×۱۵×۱۵	۴۷۵۰	۱/۴۱	۱۱/۱	۶۷		
T ₈	۱۵/۱×۱۵/۱×۱۵	۴۷۶۰	۱/۴۰	۱۱/۱	۷۱		

جدول ۳- مشخصات نمونه‌ها با حفره مکعبی شکل (بارگذاری عمود بر محور حفره، مدل آزمایشگاهی)

کد نمونه	ابعاد نمونه (cm)	وزن نمونه (gr)	وزن مخصوص (gr/cm ³)	قطر سوراخ (cm)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²)	میانگین مقاومت	میانگین وزن
T ₁	۱۵×۱۵×۱۵	۸۱۱۲	۲/۴۰	بدون حفره	۳۰۸	۳۱۰	۸۰۹۵/۴
T ₁	۱۵×۱۵/۱×۱۵	۸۱۱۰	۲/۳۹	بدون حفره	۳۱۸		
T ₁	۱۵×۱۵×۱۵	۸۰۸۰	۲/۳۹	بدون حفره	۳۰۰		
T ₁	۱۵/۱×۱۵×۱۵	۸۰۷۵	۲/۳۸	بدون حفره	۳۰۸		
T ₁	۱۵/۱×۱۵/۱×۱۵	۸۱۰۰	۲/۳۷	بدون حفره	۳۱۶		
T ₂	۱۵/۱×۱۵×۱۵	۸۰۳۰	۲/۳۶	۲×۲×۱۵	۲۵۵	۲۴۸/۴	۸۰۲۲
T ₂	۱۵×۱۵×۱۵/۱	۸۰۲۵	۲/۳۶	۲×۲×۱۵	۲۴۸		
T ₂	۱۵×۱۵×۱۵	۸۰۱۰	۲/۳۷	۲×۲×۱۵	۲۴۱		
T ₂	۱۵×۱۵/۱×۱۵/۱	۸۰۳۵	۲/۳۵	۲×۲×۱۵	۲۴۸		
T ₂	۱۵×۱۵×۱۵	۸۰۱۰	۲/۳۷	۲×۲×۱۵	۲۵۰		
T ₃	۱۵/۱×۱۵×۱۵	۷۶۲۰	۲/۲۴	۴×۴×۱۵	۲۱۸	۲۱۲/۲	۷۶۱۷
T ₃	۱۵×۱۵×۱۵	۷۶۱۵	۲/۲۶	۴×۴×۱۵	۲۱۸		
T ₃	۱۵×۱۵×۱۵	۷۶۱۰	۲/۲۵	۴×۴×۱۵	۲۱۰		
T ₃	۱۵/۱×۱۵/۱×۱۵	۷۶۳۰	۲/۲۳	۴×۴×۱۵	۲۰۵		
T ₃	۱۵×۱۵×۱۵	۷۶۱۰	۲/۲۵	۴×۴×۱۵	۲۱۰		
T ₄	۱۵×۱۵×۱۵	۶۸۳۰	۲/۰۲	۶×۶×۱۵	۱۲۵	۱۱۷/۶	۶۸۲۷
T ₄	۱۵/۱×۱۵×۱۵	۶۸۱۵	۲/۰۰	۶×۶×۱۵	۱۲۱		
T ₄	۱۵×۱۵×۱۵	۶۸۲۰	۲/۰۲	۶×۶×۱۵	۱۱۵		
T ₄	۱۵/۱×۱۵/۱×۱۵	۶۸۵۰	۲/۰۰	۶×۶×۱۵	۱۱۲		
T ₄	۱۵×۱۵×۱۵	۶۸۲۰	۲/۰۲	۶×۶×۱۵	۱۱۵		
T ₅	۱۵×۱۵×۱۵	۵۵۹۸	۱/۶۶	۸×۸×۱۵	۹۳	۸۴	۵۶۰۴/۶
T ₅	۱۵/۱×۱۵/۱×۱۵	۵۶۲۰	۱/۶۴	۸×۸×۱۵	۹۰		
T ₅	۱۵×۱۵×۱۵	۵۶۰۰	۱/۶۶	۸×۸×۱۵	۸۰		
T ₅	۱۵×۱۵×۱۵	۵۵۹۵	۱/۶۶	۸×۸×۱۵	۸۰		
T ₅	۱۵/۱×۱۵×۱۵	۵۶۱۰	۱/۶۵	۸×۸×۱۵	۷۷		
T ₆	۱۵×۱۵×۱۵	۵۰۶۱	۱/۵۰	۹×۹×۱۵	۷۶	۶۹/۲	۵۰۶۵/۸
T ₆	۱۵×۱۵×۱۵/۱	۵۰۷۳	۱/۵۰	۹×۹×۱۵	۷۰		
T ₆	۱۵×۱۵×۱۵	۵۰۶۰	۱/۵۰	۹×۹×۱۵	۷۰		
T ₆	۱۵×۱۵/۱×۱۵/۱	۵۰۸۰	۱/۴۹	۹×۹×۱۵	۶۵		
T ₆	۱۵×۱۵×۱۵	۵۰۵۵	۱/۵۰	۹×۹×۱۵	۶۵		

جدول ۴- روند تغییرات مقاومت با توجه به اندازه حفرات استوانه‌ای (بارگذاری عمود بر محور حفره)

کد نمونه	وزن مخصوص میانگین (gr/cm^3)	قطر سوراخ (cm)	مقاومت فشاری میانگین ۲۸ روزه (kg/cm^2)	نسبت قطر حفره به عرض نمونه d/w (%)	نسبت حجم حفره به حجم نمونه V_c/V_s (%)	نسبت وزن مخصوص به نمونه بدون حفره (%)	نسبت مقاومت نمونه حفره دار به نمونه بدون حفره (%)
T ₁	۲/۴۰	بدون حفره	۴۳۲	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰
T ₂	۲/۳۵	۲/۰	۳۷۷	۱۳/۳۳	۱/۴۰	۹۷/۹	۸۷/۳
T ₃	۲/۳۳	۲/۵	۳۲۱	۱۶/۶۷	۲/۱۸	۹۷/۱	۷۴/۳
T ₄	۲/۳۰	۳/۲	۳۰۸	۲۱/۳۳	۳/۵۷	۹۵/۸	۷۱/۳
T ₅	۲/۱۴	۵/۰	۲۴۴	۳۳/۳۳	۸/۷۳	۸۹/۲	۵۶/۴
T ₆	۲/۰۳	۶/۳	۱۸۲	۴۲/۰۰	۱۳/۸۵	۸۴/۶	۴۲/۱
T ₇	۱/۶۸	۹/۰	۱۱۳	۶۰/۰۰	۲۸/۲۷	۷۰/۰	۲۶/۲
T ₈	۱/۴۰	۱۱/۱	۶۹/۸	۷۴/۰۰	۴۳/۰۱	۵۸/۳	۱۶/۲

جدول ۵- روند تغییرات مقاومت با توجه به اندازه حفرات مکعبی شکل (بارگذاری عمود بر محور حفره)

کد نمونه	وزن مخصوص میانگین (gr/cm^3)	ابعاد حفره (cm)	مقاومت فشاری میانگین ۲۸ روزه (kg/cm^2)	نسبت قطر حفره به عرض نمونه d/w (%)	نسبت حجم حفره به حجم نمونه V_c/V_s (%)	نسبت وزن مخصوص به نمونه بدون حفره (%)	نسبت مقاومت نمونه حفره دار به نمونه بدون حفره (%)
T ₁	۲/۳۹	بدون حفره	۳۱۰	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰
T ₂	۲/۳۶	۲×۲×۱۵	۲۴۸/۴	۱۳/۳۳	۱/۷۸	۹۸/۷	۸۰/۱
T ₃	۲/۲۵	۴×۴×۱۵	۲۱۲/۲	۲۶/۶۷	۷/۱۱	۹۴/۱	۶۸/۵
T ₄	۲/۰۱	۶×۶×۱۵	۱۱۷/۶	۴۰/۰۰	۱۶/۰۰	۸۴/۱	۳۷/۹
T ₅	۱/۶۵	۸×۸×۱۵	۸۴	۵۳/۳۳	۲۸/۴۴	۶۹/۰	۲۷/۱
T ₆	۱/۵۰	۹×۹×۱۵	۶۹/۲	۶۰/۰۰	۳۶/۰۰	۶۲/۸	۲۲/۳

۳- آزمایش عددی با PFC

استفاده از شبیه‌سازی عددی، روند شکست بصری قابل مشاهده و الگوهای شکست مطابق با نتایج تجربی به صورت منطقی قابل ارزیابی است [۳۹]. در این بخش، روش المان گسسته به شبیه‌سازی عددی نمونه بتن تحت UCS اعمال و روند تولید و توسعه شکست مشاهده شد.

۳-۱- ویژگی‌های مدل‌سازی نمونه با PFC

در مدل PFC، کلیه خصوصیات مکانیکی ماکروسکوپی تنها با تعریف فعل و انفعالات بین ذرات قابل بیان است. بنابراین، نوع تماس و انتخاب پارامترهای آن کلید موفقیت در شبیه‌سازی عددی PFC است. مدل اتصال موازی خطی (LPBM) یک مدل تماس داخلی است که اغلب در شبیه‌سازی بتن اتخاذ می‌شود و قابل اعتماد است [40,41]. از این رو، LPBM در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی بتن انتخاب شد. با اتخاذ مشخصات میکرو ذکر شده در جدول ۶ و روش-

های استاندارد کالیبراسیون، یک مجموعه ذرات PFC کالیبره شده ایجاد شد. شبیه‌سازی عددی برای همه نمونه‌ها با اندازه‌های مختلف حفره انجام که به ترتیب برای حفره استوانه و مکعبی شکل در اشکال ۴ و ۵ نشان داده شده است.

۳-۲- پیش‌بینی نتایج بر اساس رگرسیون

با استفاده از نتایج عددی نمونه‌های مکعبی با حفرات استوانه-ای شکل بر اساس بارگذاری عمود بر محور حفره، تجزیه و تحلیل رگرسیون، روابط بین UCS و نسبت حجم حفره به حجم نمونه و نیز، روابط UCS و نسبت قطر حفره به عرض نمونه به ترتیب مطابق معادلات (۷) و (۸) حاصل شد.

$$UCS_{\text{(Numerical Cylindrical Perpendicular)}} = -7.05 \frac{V_c}{V_s} + 369.86 \quad (7)$$

$$UCS_{\text{(Numerical Cylindrical Perpendicular)}} \quad (8)$$

MPa	۴۲/۳۷	مقاومت فشاری تک محوره متوسط
MPa	۵/۲۰	همبستگی اتصال موازی
Degree	۳۱	زاویه اصطکاک داخلی
-	۰/۳	نسبت پواسون متوسط

$$= -4.57 \frac{V_c}{V_s} + 429.66$$

همچنین، نتایج حاصله از تجزیه و تحلیل رگرسیون برای نمونه‌های مکعبی با حفرات مکعبی شکل، بر اساس روابط بین UCS و نسبت حجم حفره به حجم نمونه و همچنین روابط UCS و نسبت قطر حفره به عرض نمونه با استفاده از روش عددی به ترتیب مطابق معادلات (۹) و (۱۰) قابل ارزیابی است.

۴- نتایج عددی

روش عددی با استفاده از نرم‌افزار PFC بر روی نمونه‌های مکعبی شکل با دو نوع حفره استوانه و مکعبی شکل در اندازه‌های مختلف پیاده‌سازی شد. رابطه تاثیرگذار UCS و نسبت حجم حفره به حجم نمونه و نیز قطر حفره نسبت به عرض نمونه حاصل از روش عددی در نمونه‌های با حفره استوانه‌ای و مکعبی شکل به ترتیب مطابق جداول ۷ و ۸ قابل مشاهده است.

$$UCS(Numerical Cube Perpendicular) = -5.53 \frac{V_c}{V_s} + 361.7 \quad (9)$$

$$UCS(Numerical Cube Perpendicular) = -4.74 \frac{V_c}{V_s} + 426.31 \quad (10)$$

جدول ۶- خصوصیات مکانیکی نمونه بتن

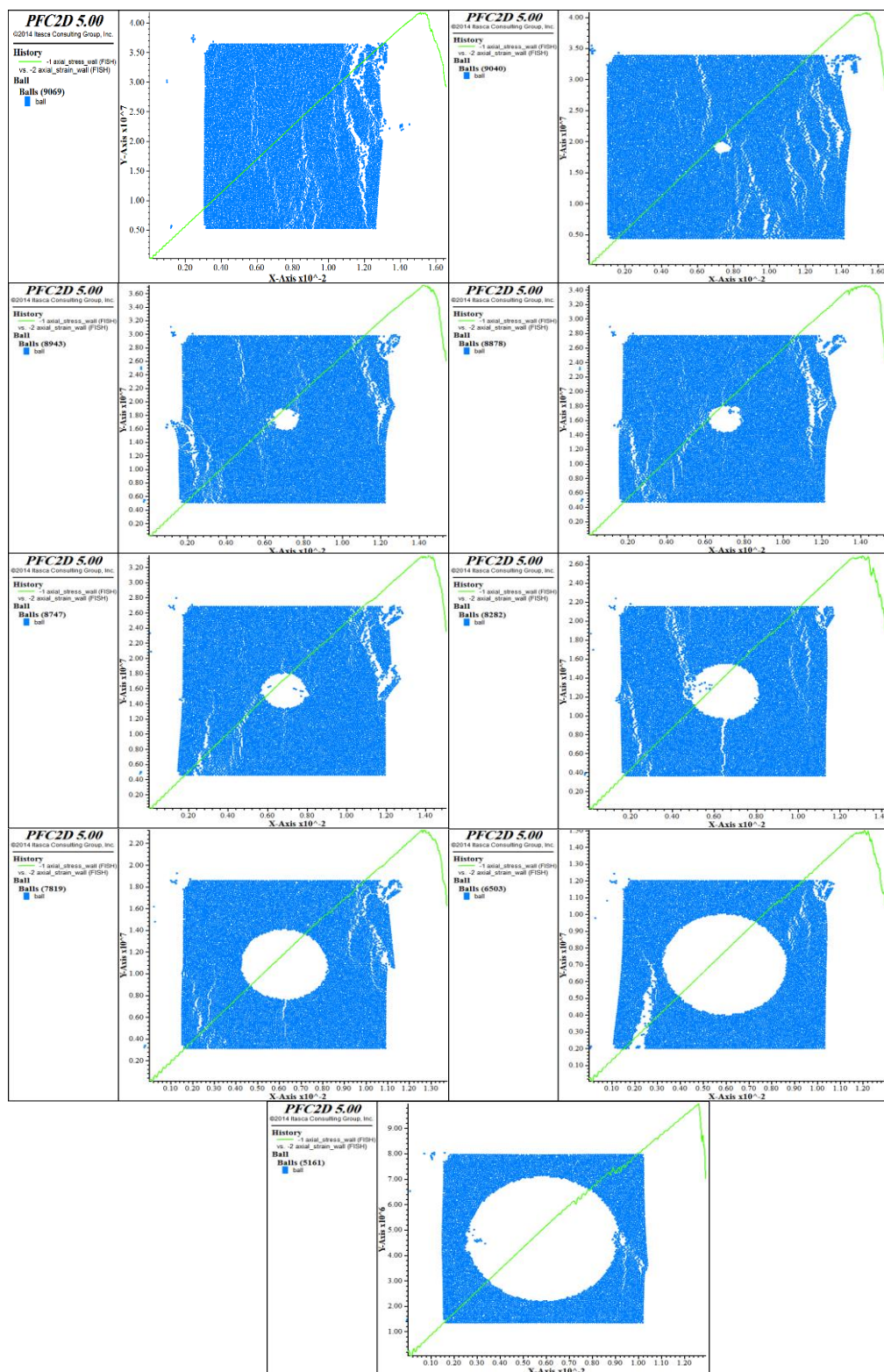
شرح	مقدار	واحد
-----	-------	------

جدول ۷- روند تغییرات مقاومت با توجه به اندازه حفرات استوانه‌ای در مدل‌سازی عددی (بارگذاری عمود بر محور حفره)

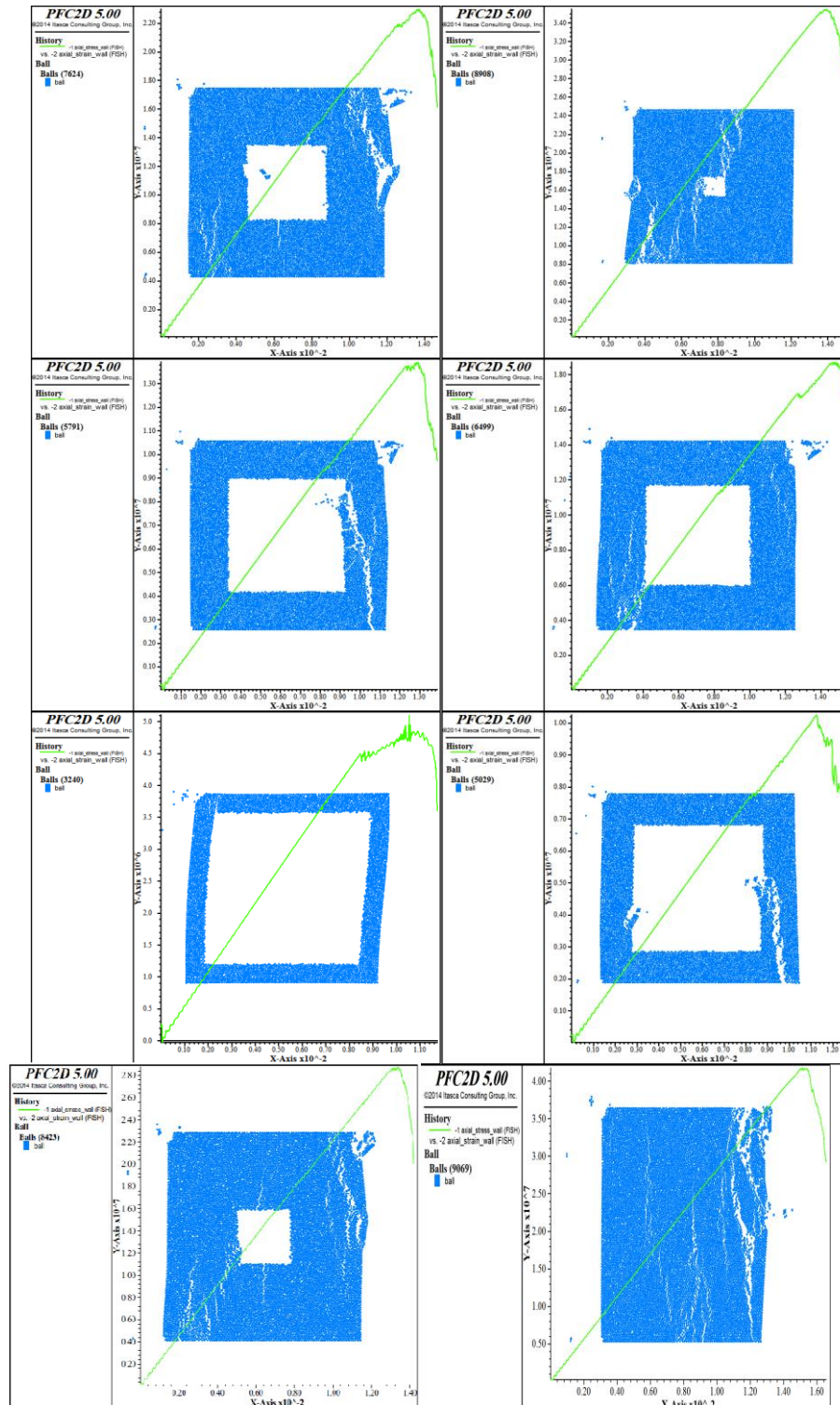
کد نمونه	قطر سوراخ (cm)	مقاومت فشاری	نسبت قطر حفره به عرض نمونه d/w (%)	نسبت حجم حفره به حجم نمونه V_c/V_s (%)	نسبت وزن مخصوص به نمونه بدون حفره (%)	نسبت مقاومت نمونه حفره‌دار به نمونه بدون حفره (%)
T ₁	بدون حفره	۴۳۱/۵	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰
T ₂	۲/۰	۳۷۷/۴	۱۳/۳۳	۱/۴۰	۹۷/۹	۸۷/۵
T ₃	۲/۵	۳۵۰	۱۶/۶۷	۲/۱۸	۹۷/۱	۸۱/۱
T ₄	۳/۲	۳۳۴/۵	۲۱/۳۳	۳/۵۷	۹۵/۸	۷۷/۵
T ₅	۵/۰	۲۵۰	۳۳/۳۳	۸/۷۳	۸۹/۲	۶۲/۶
T ₆	۶/۳	۲۳۰/۵	۴۲/۰۰	۱۳/۸۵	۸۴/۶	۵۳/۴
T ₇	۹/۰	۱۵۳	۶۰/۰۰	۲۸/۲۷	۷۰/۰	۳۵/۵
T ₈	۱۱/۱	۱۰۰	۷۴/۰۰	۴۳/۰۱	۵۸/۳	۲۳/۱

جدول ۸- روند تغییرات مقاومت با توجه به اندازه حفرات مکعبی شکل در مدل‌سازی عددی (بارگذاری عمود بر محور حفره)

کد نمونه	ابعاد حفره (cm)	مقاومت فشاری	نسبت قطر حفره به عرض نمونه d/w (%)	نسبت حجم حفره به حجم نمونه V_c/V_s (%)	نسبت مقاومت نمونه حفره‌دار به نمونه بدون حفره (%)
T ₁	بدون حفره	۴۳۱/۵	۰	۰	۱۰۰
T ₂	۲×۲×۱۵	۳۶۲/۱	۱۳/۳۳	۱/۷۸	۸۳/۹
T ₃	۴×۴×۱۵	۲۸۹/۷	۲۶/۶۷	۷/۱۱	۶۷/۱
T ₄	۶×۶×۱۵	۲۳۴/۶	۴۰/۰۰	۱۶/۰۰	۵۴/۴
T ₅	۸×۸×۱۵	۱۸۷/۷	۵۳/۳۳	۲۸/۴۴	۴۳/۵
T ₆	۹×۹×۱۵	۱۴۲/۸	۶۰/۰۰	۳۶/۰۰	۳۳/۱
T ₇	۱۰×۱۰×۱۵	۱۰۴	۶۶/۶۷	۴۴/۴۴	۲۴/۱
T ₈	۱۲×۱۲×۱۵	۴۷/۹	۸۰/۰۰	۶۴/۰۰	۱۱/۱



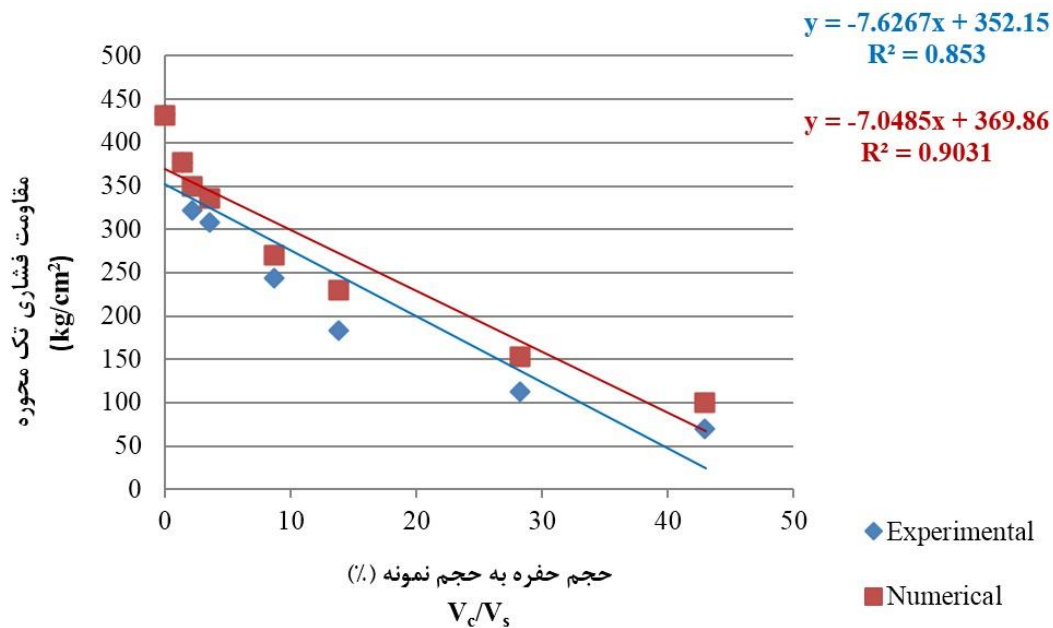
شکل ۴- مدل سازی عددی نمونه ها به منظور آزمایش مقاومت حفره استوانه ای با نرم افزار PFC



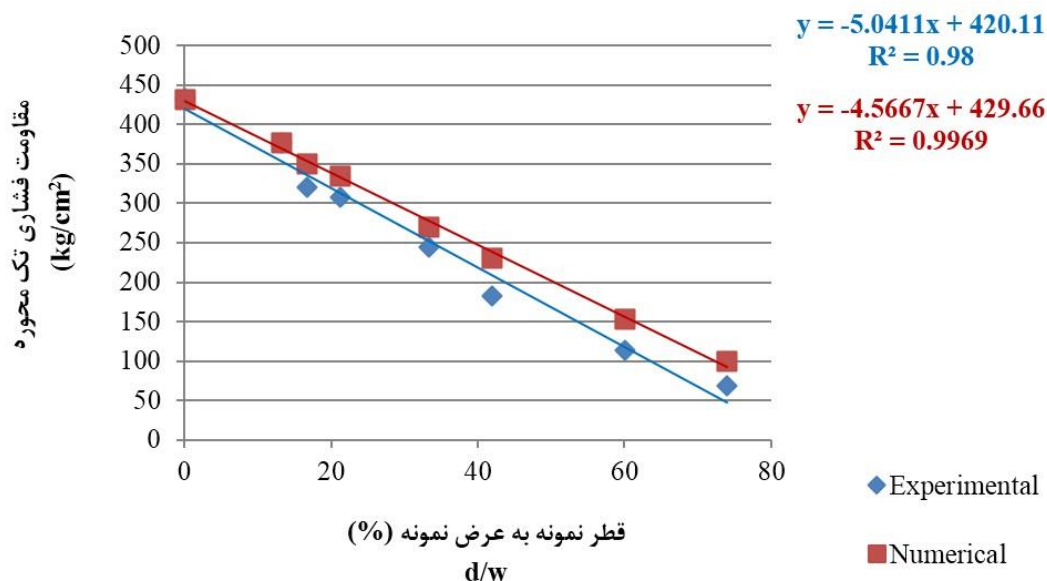
شکل ۵- مدل سازی عددی نمونه ها به منظور آزمایش مقاومت حفره مکعبی با نرم افزار PFC

۵- مقایسه نتایج تجربی و عددی

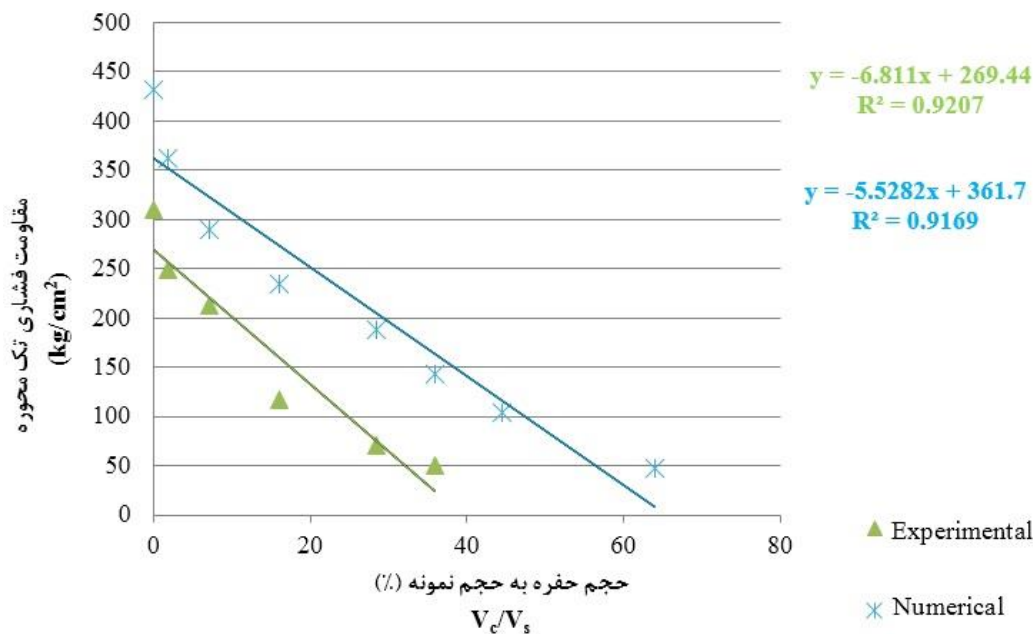
در این بخش به منظور قیاس حاصله از روش تجربی و عددی برای نمونه‌های دارای حفرات استوانه و مکعبی شکل، نتایج به صورت آماری و رگرسیون از مدل‌های ارائه شده به ترتیب در اشکال ۶ الی ۹ قابل ارزیابی است. مطابق شکل ۶، ضریب تعیین که مجذور ضریب همبستگی به شمار می‌رود برای نتایج حاصله از روش آزمایشگاهی و تجربی در نمونه‌های با حفرات استوانه‌ای شکل به نسبت حجم حفره به حجم نمونه، مقدار $0/853$ را شامل شده است و این ضریب برای مدل عددی با استفاده از PFC، ارزش $0/9031$ را به خود اختصاص



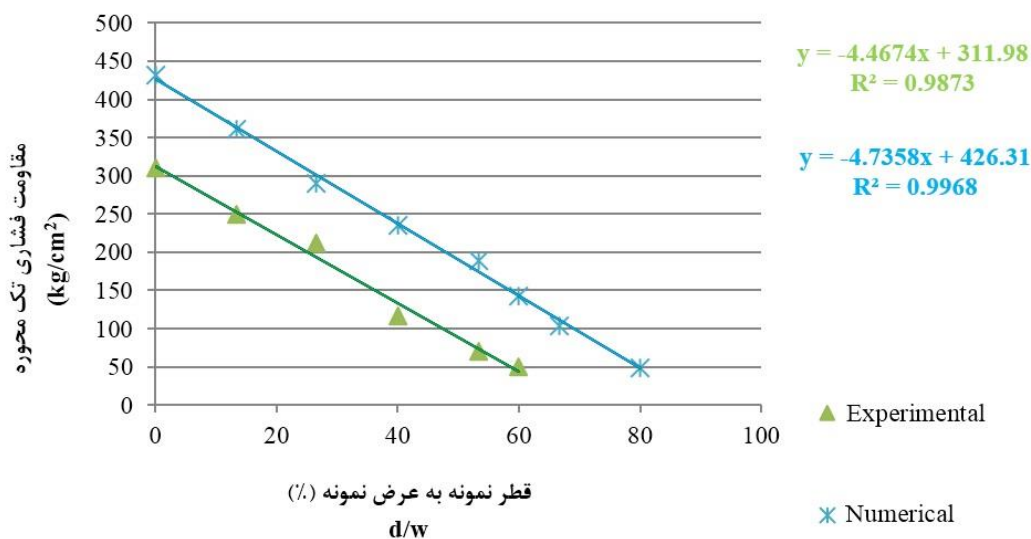
شکل ۶- ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره با نسبت حجم حفره به حجم نمونه‌ها با حفرات استوانه‌ای شکل



شکل ۷- ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره با نسبت قطر نمونه به عرض نمونه‌ها با حفرات استوانه‌ای شکل



شکل ۸- ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره با نسبت حجم حفره به حجم نمونه‌ها با حفرات مکعبی شکل



شکل ۹- ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره با نسبت قطر نمونه به عرض نمونه‌ها با حفرات مکعبی شکل

۶- نتیجه‌گیری

به عنوان روش نیمه مخرب، پاسخگوی نیاز بوده است. در واقع، آزمایش مغزه در بسیاری از شرایط بحرانی به یک ضرورت تبدیل می‌شود و گاهی اوقات به ابزاری منحصر به فرد برای ارزیابی کیفیت بتن تبدیل می‌شود.

در این پژوهش، روش تجربی و روش عددی به منظور ارزیابی تاثیر اندازه مغزه‌ی بتنی ایجاد شده در ساختگاه بر مقاومت فشاری تک محوره‌ی عضو ساختگاه پیشنهاد شده است. همچنین، علاوه بر اندازه مغزه ایجاد شده، شکل مغزه بنا به استوانه و مکعبی شکل

تعیین مقاومت بتن متداول‌ترین روش به منظور ارزیابی مقاومت بتن در هنگام ایجاد ساختگاه جدید است. با این حال، عدم وجود نتایج حقیقی یا تردید در نتایج ممکن است برخی شرایط بحرانی را ایجاد کند. علاوه بر این، در هنگام بازسازی سازه‌های موجود، رویکرد متناسب با وضع موجود برای ارزیابی مقاومت بتن از اهمیت زیادی برخوردار است. از این‌رو، آزمایش مغزه‌گیری بتن در سازه‌های موجود

۷- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
UCS	kg/cm ²	مقاومت فشاری تک محوره
Z	-	معادله رابطی خطی
X_{i,j,...k}	-	متغیر
a	-	عرض از مبدا
b_{1,2,...,n}	-	شیب خط
e	-	جمله خطا
X_i	kg/cm ²	مقاومت فشاری اندازه‌گیری شده
x_i	kg/cm ²	مقاومت فشاری پیش‌بینی شده
n	-	تعداد نمونه‌ها
$\frac{V_c}{V_s}$	%	حجم حفره به حجم نمونه
$\frac{d}{w}$	%	قطر نمونه به عرض نمونه

تحلیل شده است. به منظور ارزیابی دقیق، نسبت حجم حفره‌ای ایجاد شده به حجم نمونه و نیز نسبت قطر به عرض نمونه در تأثیر مقاومت فشاری تک محوره به عنوان نتایج حاصله از تحقیق موارد ذیل را شامل شده است:

- تعداد حفره‌های ایجاد شده در عضوی از ساختگاه (به عنوان مثال، ستون) مبین ارزیابی مقدار تقلیل مقاومت فشاری تک محوره عضو مذکور را منتج خواهد شد.
- اندازه و شکل حفره ایجاد شده در عضو ساختگاه (ستون)، تعیین‌کننده‌ی میزان کاهش مقاومت فشاری تک محوره ستون است. به بیان دیگر، سطوح ایجاد شده از حفره روی ستون، به چه میزان UCS ستون را کاهش می‌دهد.
- هنگامی که قطر حفره به نسبت عرض نمونه افزایش یابد، UCS به چه میزان کاهش می‌یابد.
- با افزایش نسبت حجم حفره به حجم نمونه، UCS کاهش می‌یابد.

۸- منابع‌ها

- [1]Bungey, J. H. and Millard S. G., & Grantham M. G., Testing of concrete in structures. 4th ed. Taylor & Francis Groups, London and New York, 2006. 352.
- [2]Long, A., & Murray A., The pull-off partially destructive test for concrete. Proc. Int. Conf. on In-Situ Non-Destructive Testing of Concrete. Ottawa, Canada, October. ACI SP-82, 1984. 327-350.
- [3]Meynink, P., & Samarin, A., Assessment of compressive strength of concrete by cylinders, cores, and nondestructive tests. Quality Control of Concrete Structures, Rilem Symposium Stockholm, 1979. 1, 127-134.
- [4]Kabashi, N., Krasniqi, C., & Dautaj, A., Evaluation the Compressive Strength in Concrete Structures Using the In-situ Test Methods. Journal of Civil Engineering and Environmental Sciences, 2016. 2(1), 001-004.
- [5]Arioz, O., Tuncan, M., Ramyar K., & Tuncan, A., Assessing concrete strength by means of small diameter cores. Constr Build Mater, 2008. 22 981-988.
- [6]Okhrimenko, G. M. Single-crystal silicon, piezoelectric ceramics, and ferrite under uniaxial compression. Strength of Materials, 1998. 21(9), 1174-1180.
- [7]Okhrimenko, G. M. Effects of specimen size on limiting compressive loading for silicate, ceramic, and other materials. Strength of Materials, 1994. 26(10), 729-733.
- [8]Nikbin, I. M., Eslami, M., & Rezvani, D. S. M. An experimental comparative survey on the interpretation of concrete core strength results. Eur. J. Sci. Res, 2009.

37 (3), 445-456.

- [9]Neville, A.M. Properties of Concrete. Addison-Wesley, UK, 1995.
- [10]Bungey, J. H. Determining concrete strength by using small diameter cores. Mag. Concr. Res, 1979. 31 (107), 91-98.
- [11]Bartlett, F. M., & MacGregor, J. G. Effect of core diameter on concrete core strengths. ACI Mater. J, 1994. 91 (5), 460-470.
- [12]Bartlett, F. M., & MacGregor, J. G. Effect of core length-to-diameter ratio on concrete core strengths. ACI Mater. J, 1994. 91 (4), 339-348.
- [13]Bartlett, F. M., & MacGregor, J. G. Effect of moisture condition on concrete core strengths. ACI Mater, J, 1993. 91 (3), 227-236.
- [14]Bartlett, F. M. Precision of in-place concrete strengths predicted using core strength correction factors obtained by weighed regression analysis. Struct. Saf, 1997. 19 (4), 397-410.
- [15]Bartlett, F. M., & MacGregor, J. G. Cores from high-performance concrete beams. ACI Mater. J, 1994. 91 (6) 567-576.
- [16]American Society for Testing and Materials. Test for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete. ASTM C 42/C 42M-90, Annual Book of ASTM Standards, 2008.
- [17]British Standards Institution. Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cores. British Standards, BS 1881: Part 120, 1983.
- [18]Turkish Standards Institute. Testing Concrete in Structures-part 1: Cored Specimens-taking, Examining

- and Testing in Compression. Turkish Standards Institute, TS EN 12504-1, Ankara, 2002.
- [19]Concrete Society Technical Report 11. Concrete core testing for strength. Technical Report No.11, The Concrete Society, London, 1976. 44.
- [20]Ghazi, A. Reliability of core test. M.Sc. Thesis, Faculty of Engineering, University of Alexandria, Alexandria, Egypt, 2011. 151.
- [21]American Concrete Institute. Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results American Concrete Institute. ACI 214.4-03, Farmington Hills, Mich., 2013. 16.
- [22]Dolce, M., Masi, A., & Ferrini. M. Estimation of the actual in-place concrete strength in assessing existing RC structures. The Second International Fib Congress, June 5-8, Naples, Italy, 2006.
- [23]British Standards Institution. Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cores. British Standards, BS, 1983. 1881: Part 120.
- [24]American Concrete Institute. Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214-77). American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1977. 14.
- [25]American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. C 39-68, Annual Book of ASTM Standards, V. 04.02, ASTM, Philadelphia, 1990. 20-23.
- [26]British Standards Institution. Testing Concrete in Structures Cored specimens. Taking, examining and testing in compression. British Standards, BS EN 12504-1, 2009. 12.
- [27]British Standards Institution. Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cores. BS 1881: Part 120, London, 1983. 6.
- [28]Comité Européen de Normalisation (CEN). Design of structures. Part 3: Assessment and retrofitting of building, EN 1998-3, 2005.
- [29]Concrete Society, Concrete Core Testing for Strength. Technical Report No. 11, The Concrete Society, London, 1987. 44.
- [30]Turkish Standards Institute. Test Methods for Concrete-Obtaining Samples and Determination of Compressive Strength in Structures (Destructive Method). TS 10465, Turkish Standards Institute, Ankara, Turkey, 1992. 16.
- [31]State Management and Planning Organization. Concrete Code of Iran. Office of Technical Affairs Deputy, Iran, 2000. 94-96.
- [32]Ministry of Housing and Urban Development. Iranian National Building Code," Part 9, Iran, 2006. 94-96.
- [33]Pertersons, N. Recommendations for Estimation of Quality of Concrete in Finished Structures. Materials and Structures, 4 (24), 1971. 379-397.
- [34]Tomosawa, F., Masuda, Y., Tanano, H., Uenish, T., Noguchi, T., & Onoyama, K. Study on Standard test method for compressive strength of high strength concrete [Part.3: Effect of height/diameter of cylindrical test specimen]. Summaries of Technical Paper of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, A, October, 1989. 509-510.
- [35]Bartlett, F. M., & MacGregor, J. G. Effect of Core Length-to-Diameter Ratio on Concrete Core Strength. ACI Material Journal, 1994. 91 (4), 339-348.
- [36]Ramaiah, S. V., McCullough, B. F. & Dossey, T. (2003). Estimating in Situ Strength of Concrete Pavements under Various Field Conditions. research report for Transportation Research the University of Texas at Austin in August.
- [37]Viso, J. R., Carmona, J. R., & Ruiz, G. (2008). Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concret. Cement and Concrete Research, 38, 386-395.
- [38]Sudin, M. A. S., & Ramli, M. Effect of Specimen Shape and Size on the Compressive Strength of Foamed Concrete. MATEC Web of Conferences, 14th Building Surveying and Technology Undergraduate Conference, Malaysia, 2014. 1-6.
- [39]Cundall, P. A., & Hart, R. D. Numerical modelling of discontinua. Engineering computations, 1992. 9(2), 101-113.
- [40]Potyondy, D. O., & Cundall, P. A. A bonded-particle model for rock. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2004. 41(8), 1329-1364.
- [41]Zhou, S., Zhu, H., Yan, Z., Ju, J. W., & Zhang, L. A micromechanical study of the breakage mechanism of microcapsules in concrete using PFC2D. Construction and Building Materials, 2016. 115, 452-463.
- [42]Liu, J. C., Sue, M. L., & Kou, C. H. Estimating the Strength of Concrete Using Surface Rebound Value and Design Parameters of Concrete Material. Tamkang Journal of Science and Engineering, 2009.12(1), 1-7.