

بررسی آماری مقاومت ضربه‌ای بتن مبتنی بر پودر واکنش‌زا و بتن مبتنی بر پودر واکنش‌زای مسلح به الیاف فولادی

علیرضا باقری^۱؛ حامد زنگانه^۲

چکیده

کاربرد بتن مبتنی بر پودر واکنش‌زا به دلیل خواص ویژه مانند مقاومت فشاری بیش از ۱۴۰ مگاپاسکال، در سازه‌های خاص مانند سازه‌های محافظ توسط محققان در حال بررسی است. در تحقیق حاضر مقاومت ضربه‌ای بتن مبتنی بر پودر واکنش‌زا و بتن مبتنی بر پودر واکنش‌زا مسلح به الیاف فولادی با استفاده از آزمایش وزنه افتان با ضربه‌های تکراری مطابق با ۵۴۴ ACI بررسی و نتایج آزمایش با استفاده از روش‌های آماری تجزیه و تحلیل شده است.

برخلاف مقاومت فشاری زیاد بتن مبتنی بر پودر واکنش‌زا، مقاومت ضربه‌ای آن بسیار کم است. با کاربرد الیاف فولادی مقاومت ضربه‌ای بتن مبتنی بر پودر واکنش‌زا افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. همچنین نتایج آزمون کلموگروف-اسمیرنوف مشخص می‌کند که برخلاف پراکنده‌گی زیاد، نتایج مقاومت ضربه‌ای بتن مبتنی بر پودر واکنش‌زا و بتن مبتنی بر پودر واکنش‌زا مسلح به الیاف فولادی که به روش وزنه افتان با ضربه‌های تکراری تعیین شده‌اند دارای توزیع نرمال هستند.

کلمات کلیدی : بتن مبتنی بر پودر واکنش‌زا، الیاف فولادی، مقاومت ضربه‌ای، آزمایش وزنه افتان، آزمون کلموگروف-اسمیرنوف.

Statistical assessment of impact resistance of Reactive Powder Concrete and Steel Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete

A.R. Bagheri; H. Zanganeh

ABSTRACT

The application of Reactive Powder Concrete for the construction of strategic structures such as shelters is under investigation by many researchers, because of their extremely high compressive strength. In this paper, the impact resistance of Reactive Powder Concrete and Steel Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete has been studied by using the repeated drop-weight impact test, recommended by ACI Committee 544. The results have been analyzed using statistical methods.

Results show that despite the very high compressive strength of Reactive Powder Concrete; its impact resistance is very low. The impact resistance of Reactive Powder Concrete is substantially increased by application of steel fibers. Kolmogorov-Smirnov test indicated that despite large variability of the results, impact resistance of Reactive Powder Concrete and Steel Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete obtained from the repeated drop weight test had the normal distribution.

KEYWORDS

Reactive Powder Concrete, Steel Fiber, Impact Strength, Drop-weight test, Kolmogorov-Smirnov test.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۶/۲

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۱۱/۲۸

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی: Email: bagheri@kntu.ac.ir

^۲ کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی: Email: hamed_zanganeh@yahoo.com



اولین ترک و مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن مقاومت بالا به ترتیب ۳/۹ برابر و ۴/۲ برابر می‌شود. همانطور که دیده می‌شود اثر الیاف فولادی در افزایش مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن بیشتر از مقاومت ضربه‌ای اولین ترک است.

در تحقیق Nataraja و همکاران [۵] ضریب تغییرات نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن مقاومت بالای مسلح به الیاف فولادی برای ۳۰ نمونه به ترتیب برابر ۵۷/۳ و ۴۶/۵ درصد و ضریب تغییرات نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن مقاومت بالای بدون الیاف برای ۳۲ نمونه به ترتیب برابر ۵۲/۷ و ۵۰/۶ درصد بدست آمده‌است. همچنین در تحقیق Song و همکاران [۱۰] ضریب تغییرات نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن مقاومت بالای مسلح به الیاف فولادی برای ۴۸ نمونه به ترتیب برابر ۴۴/۳ و ۴۲/۳ درصد و ضریب تغییرات نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن مقاومت بالای بدون الیاف برای ۴۸ نمونه به ترتیب برابر ۴۱/۹ و ۴۰/۷ درصد بدست آمده‌است.

همچنین در تحقیق دیگر گزارش شده توسط Song و همکاران [۳] ضریب تغییرات نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن مسلح به الیاف فولادی به ترتیب برابر ۵۹ و ۵۲ درصد بدست آمده‌است.

نتایج مقاومت ضربه‌ای بدست آمده از آزمایش وزنه افتان با ضربات تکرار شونده مطابق ACI ۵۴۴،۲R [۸] برخلاف نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری یا مقاومت کششی بتن دارای پراکندگی زیادی است. بعنوان مثال در تحقیق Badr و همکاران [۱۱] ضریب پراکندگی مقاومت فشاری بتن مسلح به الیاف پلی-پروپیلنی نزدیک به ۱۰ درصد گزارش شده‌است. اما ضریب تغییرات مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و مقاومت ضربه‌ای نهایی همان بتن به ترتیب نزدیک به ۵۹ و ۵۰ درصد گزارش شده است. مهمترین علل یاد شده برای پراکندگی زیاد نتایج مقاومت ضربه‌ای در آزمایش وزنه افتان عبارتند از: ماهیت بارگذاری ضربه‌ای، ناهمگنی‌های موجود در بتن، وجود معیارهای چشمی برای تعیین گسیختگی، بارگذاری نقطه‌ای آزمایش [۸]، [۱۱]، [۱۲].

با توجه به پراکندگی زیاد نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای، احتمال برابر نبودن توزیع نتایج نمونه‌های آزمایش شده با توزیع نرمال زیاد است. لذا این موضوع مورد توجه محققان قرار گرفته است و برابری نتایج این آزمایش با توزیع نرمال بررسی شده‌است [۵]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲].

روشهای بررسی فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها را

بتن مبتنی بر پودر واکنش‌زا (RPC) یکی از انواع بتن فرا توانمند است که به دلیل خواص ویژه مانند مقاومت فشاری بیش از ۱۴۰ مگاپاسکال، خواص آن برای کاربرد در سازه‌های خاص مانند سازه‌های محافظ و سازه‌های دریایی توسط محققان در دست بررسی است [۱]، [۲].

با افزایش مقاومت فشاری بتن رفتار آن تردتر می‌شود لذا رفتار بتن مبتنی بر پودر واکنش‌زا نسبت به بتن مقاومت بالای معمولی تردتر است [۲]. برای بهبود شکل‌پذیری بتن RPC یکی از روش‌های مورد استفاده، افزودن الیاف فولادی (که بطور تصادفی در ماتریس پخش شده‌اند) به ماتریس است. الیاف فولادی با جلوگیری از گسترش ترک‌ها باعث بهبود رفتار بتن می‌شوند [۳]، [۴]، [۵]، [۶].

در این سازه‌ها بتن علاوه بر نیروهای استاتیکی تحت اثر نیروهای دینامیکی کوتاه مدت (ضربه) نیز قرار دارد. این نیروهای ضربه‌ای می‌توانند در اثر برخورد یک وسیله، انفجار یک ماده، زلزله و یا بادهای شدید ایجاد شوند. با توجه به اندک تحقیقات انجام شده پیرامون عملکرد بتن RPC تحت بارهای ضربه‌ای، این تحقیق با هدف بررسی مقاومت ضربه‌ای بتن RPC و تاثیر الیاف فولادی در میزان بهبود عملکرد آن تحت این نوع بارگذاری انجام شده‌است.

هرچند برای تعیین مقاومت ضربه‌ای بتن روش استاندارد وجود ندارد، برخی از آزمایش‌های متداولی که برای بررسی رفتار ضربه‌ای بتن بکار می‌روند عبارتند از آزمایش ضربه پرتابه، آزمایش شاریپ، آزمایش وزنه افتان، آزمایش میله هاپکینسون [۷]، [۸]، [۹]. با دستگاه آزمایش وزنه افتان با ضربات تکرار شونده مطابق ACI ۵۴۴-۲R [۸] تعداد ضربه برای ایجاد سطح مشخصی از گسیختگی بدست می‌آید که معیاری از ظرفیت جذب انرژی مصالح است. سقوط وزنه از ارتفاع نزدیک به نیم متری انجام می‌شود و ضربات تکراری تا رسیدن به سطوح مشخص از ترک خوردگی (اولین ترک خوردگی و گسیختگی پایانی) ادامه می‌یابد [۸]. در این تحقیق، از این روش برای تعیین مقاومت ضربه‌ای بتن استفاده شده‌است.

بررسی نتایج تحقیق Nataraja، Dhang و Gupta [۵] نشان می‌دهد با کاربرد ۰/۵ درصد حجمی الیاف فولادی موجدار مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن معمولی به ترتیب ۱/۵ برابر و ۱/۸ برابر می‌شود. همچنین بررسی نتایج تحقیق Song و همکاران [۱۰] نشان می‌دهد با کاربرد ۱ درصد حجمی الیاف فولادی قلابدار مقاومت ضربه‌ای

میلیمتر تا ۰/۱۵ میلیمتر و با توزیع ابعادی مشابه با مراجع شماره ۱۶ و شماره ۱۷ بوده است.

برای ساخت بتن مبتنی بر پودر واکنشزا مسلح به الیاف فولادی (SFRRPC^y) از الیاف فولادی صاف با قطر ۰/۱۸ میلیمتر و طول ۱۲ میلیمتر با نسبت ظاهری (نسبت طول به قطر) ۷۲ استفاده شده است [۱۶]، [۱۷]. طول الیاف بکار رفته در این تحقیق ساخت کشور کره با قطر ۰/۲ میلیمتر، طول ۱۴ میلیمتر، نسبت طول به قطر ۷۰ و مقاومت کششی ۲۰۰۰ مگاپاسکال می‌باشد.

جدول ۱ ترکیبات شیمیایی سیمان و دوده سیلیسی

ترکیبات	سیمان	دوده سیلیسی
CaO	۶۴٫۸۳	۰/۴۹
SiO ₂	۲۱٫۳۴	۹۳/۶
Al ₂ O ₃	۵٫۷۹	۱/۲۳
Fe ₂ O ₃	۲٫۷۵	۰/۸۷
MgO	۲٫۵۸	۰/۹۷
SO ₃	۱٫۶۶	۰/۱
Na ₂ O	۰/۱۹	۰/۳۱
K ₂ O	۰/۶۴	۱/۰۱

مقادیر سیمان، دوده سیلیسی، سنگدانه بازالتی و آب در طرح اختلاط بتن RPC در یک متر مکعب به ترتیب برابر با ۹۵۵، ۲۳۸، ۱۰۵۰/۵ و ۲۳۸ کیلوگرم می‌باشد. همچنین درصد فاز جامد در فوق روان کننده نسبت به سیمان برابر ۱/۱۹ می‌باشد. برای ساخت بتن مسلح به الیاف فولادی ۲ درصد حجمی کل مصالح به مخلوط بدون الیاف، الیاف فولادی اضافه شده‌است. برای ساخت مخلوطها ابتدا دوده سیلیسی و سیمان در حالت خشک مخلوط شده‌اند. سپس آب و فوق‌روان‌ساز به مخلوط اضافه نموده و بعد از آنکه خمیر بطور کامل یکنواخت و منسجم شد، سنگدانه بازالتی به مخلوط در حال دوران اضافه می‌شود. مخلوط کردن آنقدر ادامه می‌یابد که مخلوط بتن بطور کامل یکنواخت شود. برای ساخت بتن RPC مسلح به الیاف فولادی، الیاف فولادی کم کم و با دست به مخلوط کن در حال دوران اضافه شده‌اند.

کارآیی دو مخلوط بتن مبتنی بر پودر واکنشزا و بتن مبتنی بر پودر واکنشزا مسلح به الیاف فولادی، پیش از قالب‌گیری نمونه‌ها، با استفاده از میز سیلان اندازه‌گیری شد که سیلان نمونه‌ها نزدیک به ۱۵ سانتی‌متر بود. برای رسیدن به کارآیی یکسان دو مخلوط، مقدار فوق‌روان‌ساز در بتن حاوی الیاف فولادی افزایش داده شده‌است.

بعد از اندازه‌گیری روانی، نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰×۲۰ سانتی‌متر برای تعیین مقاومت فشاری و نمونه‌های استوانه‌ای

می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم نمود. گروه اول مبتنی بر روشهای تجربی (روشهای ترسیمی) مانند روش بررسی هیستوگرام فراوانی و منحنی تجمعی درصد احتمال توزیع نرمال هستند. گروه دیگر آزمونهای نیکویی برازش هستند که با استفاده از روشهای عددی، برابری توزیع داده‌ها را با توزیع‌های مورد نظر مورد بررسی قرار می‌دهد. آزمونهای فراوانی برای بررسی نیکویی برازش وجود دارد. در این میان آزمون کلموگروف-اسمیرنوف^۱ برای داده‌های کوچک مناسب است. گفنتی است که استفاده از روش آزمون نیکویی برازش نسبت به روشهای ترسیمی، به لحاظ امکان مقایسه کمی مناسبتر است [۱۹].

در تحقیق Nataraja و همکاران [۵] بررسی نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن معمولی و بتن مسلح به الیاف فولادی، نشانگر برابری ضعیف نتایج با توزیع نرمال است. همچنین برابری نتایج مقاومت ضربه‌ای بتن مسلح به الیاف فولادی با توزیع نرمال بهتر از بتن معمولی است. از سوی دیگر نتایج تحقیق Song و همکاران [۱۰] بر روی مقاومت ضربه‌ای بتن مقاومت بالای مسلح به الیاف فولادی و بدون الیاف فولادی نشان می‌دهد که نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن مقاومت بالای بدون الیاف فولادی دارای توزیع نرمال است. اما نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن مقاومت بالای مسلح به الیاف فولادی با توزیع نرمال برابری ندارد.

با توجه به تفاوت‌های موجود در نتایج گزارش شده توسط محققین یاد شده، در تحقیق حاضر علاوه بر ارزیابی مقاومت ضربه‌ای بتن RPC و تاثیر کاربرد الیاف فولادی بروی آن، بررسی آماری برای مشخص کردن میزان برابری نتایج با توزیع نرمال صورت گرفته‌است.

در این مقاله برای بررسی برابری نتایج مقاومت ضربه‌ای با توزیع نرمال هم از روشهای ترسیمی شامل برابر نمودن توزیع نتایج با منحنی توزیع نرمال و منحنی تجمعی درصد احتمال توزیع نرمال و هم از آزمون نیکویی برازش کلموگروف-اسمیرنوف استفاده شده است.

۲- مصالح و آماده سازی مخلوطها

سیمان مورد استفاده سیمان نوع ۱ رده مقاومتی Kg/cm² ۴۲۵ تولید کارخانه سیمان ایلام (آنالیز شیمیایی در جدول ۱) و دوده سیلیسی مصرفی خاکستری رنگ و تولید کارخانه فروآلیاژ ایران با ریزی ۲۰ m²/gr و چگالی ۲/۲ gr/cm³ (آنالیز شیمیایی در جدول ۱) بوده‌است. سنگدانه‌ی مصرفی در این طرح از نوع سنگدانه‌ی بازالتی و میزان اندازه آنها بین ۰/۶۰



پایه دستگاه به دو قطعه جدا از هم تقسیم شده‌اند که این نقطه نیز بعنوان نقطه گسیختگی نهایی در بتن‌های بدون الیاف در نظر گرفته شده‌است.

۴- نتایج و تجزیه و تحلیل آنها

نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن RPC و SFRRPC در جدول ۲ ارائه شده است. تعداد ۳ نمونه برای تعیین مقاومت فشاری ۲۸ روزه هر مخلوط آزمایش شده‌است. پس از ارائه و تحلیل آماری نتایج آزمایش مقاومت فشاری در ادامه نتایج آزمون مقاومت ضربه‌ای بتن RPC و SFRRPC ارائه و بررسی شده‌است. تعداد ۲۰ نمونه برای تعیین مقاومت ضربه‌ای هر مخلوط مورد آزمایش قرار گرفته‌است.

۴-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن‌های RPC و SFRRPC به ترتیب برابر با ۱۳۹/۵ و ۱۴۹/۰ مگاپاسکال حاصل گردید که نشانگر افزایش نزدیک به ۱۷ درصد در مقاومت فشاری بتن بعلت کاربرد الیاف می‌باشد.

بعلت آنکه تعداد داده‌ها کم است فقط از آزمونهای نیکویی برازش کلموگروف-اسمیرنوف برای تعیین برابری نتایج با توزیع نرمال استفاده شده‌است. نتایج در جدول ۲ ارائه شده-است.

با مقایسه آماره آزمون کلموگروف-اسمیرنوف (KS) با مقادیر حداکثر مجاز ارائه شده در جداول مرجع، فرض نرمال بودن نتایج مقاومت فشاری بتن RPC و SFRRPC در سطح معنی داری ۰/۰۵ تایید می‌شود. گفتنی است در این آزمون کوچکترین سطح معناداری (p -value) نیز تعیین می‌شود. در بررسی‌های آماری برای کنترل درستی فرض نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف اگر کوچکترین سطح معناداری کوچکتر از ۰/۰۵ باشد، فرض نرمال بودن نتایج رد می‌شود [۱۹]، [۲۱].

جدول ۲ نتایج مقاومت فشاری

SFRRPC	RPC	
۱۴۹/۰	۱۳۹/۵	میانگین مقاومت فشاری (MPa)
۵/۱	۴/۹	ضریب پراکندگی نتایج مقاومت فشاری
۰/۲۰۰	۰/۲۲۷	آماره کلموگروف-اسمیرنوف (KS)
۰/۷۰۸	۰/۷۰۸	حداکثر مقادیر مجاز آماره در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح معنی داری ۵ درصد
>۰/۲۰	>۰/۲۰	کوچکترین سطح معناداری در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف

۱۵×۶/۳۵ سانتی‌متر برای تعیین مقاومت ضربه‌ای قالبگیری شده‌اند.

بر اساس پیشنهاد کمیته ۵۴۴ ACI [۸] می‌توان از نمونه‌های قالبگیری شده، یا نمونه‌های بریده شده از نمونه‌ی استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی‌متر، برای آزمایش تعیین مقاومت ضربه‌ای استفاده کرد. اما در صورتیکه طول الیاف بزرگتر از ۲۰ میلی‌متر باشد، در آزمایش تعیین مقاومت ضربه‌ای برای جلوگیری از جهت‌گیری خاص الیاف در مخلوط، باید از نمونه‌های بریده شده از استوانه‌ی ۱۵×۳۰ سانتی‌متر استفاده شود. در این تحقیق از نمونه‌های قالبگیری شده (قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۶/۳۵ سانتی‌متر) استفاده شده‌است. برای عمل آوری، نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و بعد از ۲ روز عمل آوری در آب ۲۳ درجه سانتی‌گراد، در درون آب ۸۵ درجه سانتی‌گراد تا سن ۲۸ روز عمل آوری شده‌اند.

۳- روش انجام آزمایش

برای بررسی مقاومت ضربه‌ای بتن و مصالح ساختمانی مشابه از چندین روش آزمایش ضربه‌ای استفاده می‌شود. هیچکدام از این آزمایش‌ها تاکنون بعنوان آزمایش استاندارد اعلام نشده‌اند. در این خصوص، کمیته ۵۴۴ ACI [۸] آزمایش ضربه‌ای وزنه افتان را برای بررسی مقاومت ضربه‌ای بتن پیشنهاد کرده‌است. این آزمایش بدلیل سادگی در بسیاری از موارد استفاده می‌شود. در این تحقیق از روش پیشنهاد شده توسط کمیته ۵۴۴ ACI [۸] برای بررسی مقاومت ضربه‌ای استفاده شده‌است.

چگونگی انجام آزمایش بدین صورت است که یک چکش به جرم ۴/۵۴ کیلوگرم از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متر بطور متناوب بر روی یک گوی فولادی سخت با قطر ۶۳/۵ میلی‌متر (که در مرکز دایره سطح بالایی نمونه استوانه‌ای قرار دارد) رها می‌شود.

برای کاهش اثر گیرداری و اصطکاک بین صفحه‌ی زیرین و نمونه، صفحه‌ی زیرین با گریس اندود شده‌است.

دو مقدار مربوط به گسیختگی اولیه و نهایی در هر نمونه مشخص شده‌است. اولین مقدار، تعداد ضربات مورد نیاز برای ایجاد اولین ترک را بر روی سطح نمونه می‌توان دید که مقاومت ضربه‌ای اولین ترک (FC^A) نامیده می‌شود. مقدار بعدی تعداد ضربات مورد نیاز برای ایجاد و پخش ترک تا گسیختگی نهایی، مقاومت ضربه‌ای نهایی (UR^1) نامیده می‌شود. بر طبق ۵۴۴،۲R ACI [۸]، گسیختگی نهایی هنگامی است که نمونه‌ی مورد آزمایش با سه پایه از چهار پایه دستگاه تماس یابد. در این تحقیق نمونه‌های بتن بدون الیاف فولادی قبل از تماس با



طبق نتایج جدول ۲ با توجه به بالاتر بودن کوچکترین سطح معناداری از عدد ۰/۲، فرض نرمال بودن داده‌ها براساس این معیار نیز تایید می‌گردد.

۲-۴- مقاومت ضربه‌ای بتن RPC

نتایج مقاومت ضربه‌ای بتن RPC در جدول شماره ۳ ارائه شده است. مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن RPC به ترتیب ۴ و ۵ ضربه است. اختلاف بین مقاومت ضربه‌ای نهایی و اولین ترک بتن RPC نزدیک به یک ضربه است. در جدول شماره ۴ نتایج میانگین مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن بدون الیاف بدست آمده در سایر تحقیقات منتشر شده با تحقیق حاضر مقایسه شده است. همانطور که در جدول ۴ دیده می‌شود مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن بدون الیاف دارای محدوده وسیع می‌باشد و اعداد مختلفی برای آن از ۵ ضربه تا ۴۵۴ ضربه گزارش شده است. اما بیشتر بتن‌های بدون الیاف دارای مقاومت ضربه‌ای بیشتر از ۳۰ ضربه بوده اند. همچنین اختلاف بین مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن بدون الیاف کم می‌باشد. نتایج تحقیق حاضر نشانگر این است که باوجود مقاومت فشاری بسیار بالای بتن RPC، مقاومت ضربه‌ای آن در مقایسه با بتن معمولی کم می‌باشد.

کاهش نسبت آب به سیمان یا مواد سیمانی مهمترین عامل افزایش مقاومت فشاری بتن است. اما با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، شکل پذیری بتن کاهش و تردی آن افزایش می‌یابد [۲۴]، [۲۵]. لذا بتن RPC بدلیل نسبت آب به مواد سیمانی بسیار پایین و همچنین عمل آوری در دمای بالا دارای رفتار تردی است [۲۳]. با توجه به نوع تنش‌های ایجاد شده در بارگذاری ضربه‌ای وزنه افتان بر اساس روش ACI ۵۴۴،۲R [۸] تاثیر عواملی مانند مقدار سنگدانه، اندازه حداکثر و جنس سنگدانه بر روی مقاومت ضربه‌ای بتن بیشتر از مقاومت فشاری است. زیرا سنگدانه‌ها دارای مقاومت بیشتری نسبت به خمیر سیمان می‌باشند و باعث می‌شوند مسیر توسعه ترک بسته شده و قابلیت انتقال تنش بین سطوح ترک افزایش یابد. از دلایل کم بودن مقاومت ضربه‌ای بتن RPC مقدار کم سنگدانه و همچنین ریز بودن سنگدانه (اندازه حداکثر ۰/۴۲۵ میلیمتر) بکار رفته در این نوع بتن می‌باشد. برخلاف مقاومت فشاری بسیار بیشتر بتن RPC مقاومت ضربه‌ای آن در مقایسه با بتن معمولی کم می‌باشد، که نشانگر قابلیت جذب انرژی کمتر این نوع بتن بعد از ایجاد ترک در آن در مقایسه با بتن معمولی است.

علاوه بر موارد یاد شده، بعلت آنکه حجم خمیر سیمان بکار رفته زیاد در بتن RPC زیاد و نسبت آب به مواد سیمانی بسیار پایین می‌باشد، جمع شدگی خودبخودی آن بیشتر از بتن

معمولی است [۲۴]، [۲۵]، [۲۶]، [۲۷]. لذا احتمال وجود ریزترکهای اولیه در بتن RPC بعلت جمع شدگی، بیشتر از بتن معمولی می‌باشد [۲۸]. وجود ریزترکهای اولیه بیشتر می‌تواند باعث کاهش مقاومت ضربه‌ای بتن می‌شود.

حداقل و حداکثر مقاومت ضربه‌ای اولین ترک بتن RPC به ترتیب برابر با ۲ ضربه و ۸ ضربه و ضریب تغییرات آن برابر با ۴۲/۷۴ درصد می‌باشد. حداقل و حداکثر مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن RPC به ترتیب برابر با ۲ ضربه و ۹ ضربه و ضریب تغییرات آن برابر با ۴۰/۲۹ درصد می‌باشد.

خطای استاندارد تعیین میانگین نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن RPC نزدیک به ۱ ضربه است. با ۹۵ درصد اطمینان میانگین مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن RPC به ترتیب در محدوده‌های ۳ تا ۵ ضربه و ۴ تا ۶ ضربه قرار دارد.

جدول ۳ نتایج مقاومت ضربه‌ای بتن RPC

شماره نمونه	ارتفاع نمونه	تعداد ضربه در اولین ترک روی سطح	تعداد ضربه در گسیختگی نهایی	درصد افزایش تعداد ضربه بعد از ایجاد اولین ترک تا گسیختگی نهایی
۱	۶،۲۸	۷	۷	۰/۰۰
۲	۶،۴۷	۸	۹	۱۲،۵۰
۳	۶،۳۸	۵	۵	۰/۰۰
۴	۶،۴۴	۲	۳	۵۰/۰۰
۵	۶،۲۱	۳	۴	۳۳،۳۳
۶	۶،۴۰	۲	۲	۰/۰۰
۷	۶،۴۱	۴	۴	۰/۰۰
۸	۶،۳۶	۴	۴	۰/۰۰
۹	۶،۲۳	۴	۵	۲۵/۰۰
۱۰	۶،۳۳	۸	۹	۱۱/۱۱
۱۱	۶،۳۸	۳	۳	۰/۰۰
۱۲	۶،۲۱	۶	۶	۰/۰۰
۱۳	۶،۳۴	۳	۳	۰/۰۰
۱۴	۶،۱۴	۳	۳	۰/۰۰
۱۵	۶،۴۱	۳	۴	۳۳،۳۳
۱۶	۶،۳۴	۵	۶	۲۰/۰۰
۱۷	۶،۲۹	۲	۳	۵۰/۰۰
۱۸	۶،۲۲	۵	۶	۲۰/۰۰
۱۹	۶،۳۶	۵	۶	۲۰/۰۰
۲۰	۶،۳۴	۴	۵	۲۵/۰۰
میانگین	۶،۳۴	۴	۵	۱۵/۰۱
انحراف معیار	۰/۰۸	۱/۸۴	۱/۹۵	۱۶/۹۳
ضریب پراکنندگی	۱/۲۶	۴۲/۷۴	۴۰/۲۹	۱۲۷/۷۹

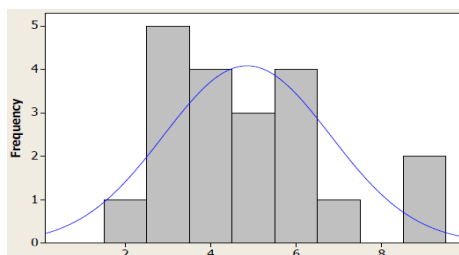
در شکل ۱ هیستوگرام مقاومت ضربه‌ای اولین ترک به

مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمون در مورد نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن RPC در جدول ۵ ارائه شده‌است. همچنین نتایج آزمون نیکویی برآزش کلموگروف-اسمیرنوف مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و ضربه‌ای نهایی بتن بدون الیاف در تحقیقات Song و همکاران [۱۰] و Nataraja و همکاران [۵] محاسبه و با نتایج این تحقیق حاضر در جدول ۵ مقایسه شده‌است.

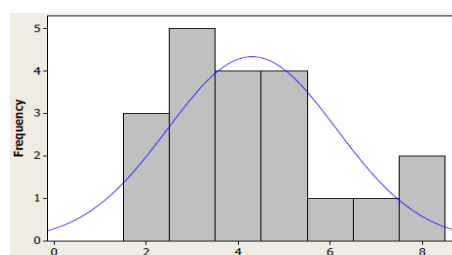
همراه منحنی توزیع نرمال و در شکل ۲ نمودار منحنی تجمعی درصد احتمال توزیع نرمال مقاومت ضربه‌ای اولین ترک بتن RPC نشان داده شده‌است. در شکل ۳ هیستوگرام مقاومت ضربه‌ای نهایی به همراه منحنی توزیع نرمال و در شکل ۴ نمودار منحنی تجمعی درصد احتمال توزیع نرمال مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن RPC نشان داده شده‌است. با استفاده از آزمون نیکویی برآزش کلموگروف-اسمیرنوف توزیع نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن RPC

جدول ۴ نتایج میانگین مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن بدون الیاف

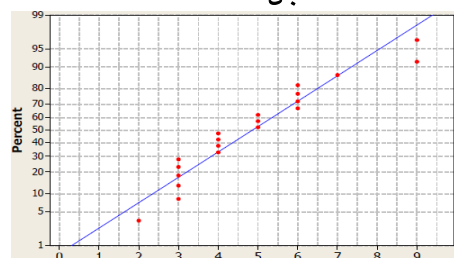
نام نویسنده	مقاومت ضربه‌ای اولین ترک	مقاومت ضربه‌ای نهایی	نسبت مقاومت ضربه‌ای - ای نهایی به مقاومت ضربه‌ای اولین ترک	مقاومت فشاری بتن (MPa)	نوع سنگدانه درشت	اندازه حداکثر سنگدانه (mm)	نسبت وزنی مصالح سنگی به سیمان	نسبت آب به مواد سیمانی
Nataraja و همکاران [۵]	۷۰	۷۷	۱/۱۰	۲۹	گرانیتی	۲۰	۴/۲۳	۰/۴۹
Nataraja و همکاران [۱۳]	۷۶	۷۹	۱/۰۴	۳۳	گرانیتی	۱۲	۴/۵۸	۰/۶۱
Nataraja و همکاران [۱۳]	۱۳۷	۱۴۰	۱/۰۲	۵۱	گرانیتی	۱۲	۲/۷۲	۰/۴۰
Song و همکاران [۱۲]	۱۶۸	۱۷۷	۱/۰۵	۲۳	شکسته	۲۵/۴	۶/۳۳	۰/۶۵
Song و همکاران [۱۰]	۴۴۶	۴۵۴	۱/۰۲	۶۶	شکسته	۱۹	۳/۷۷	۰/۲۸
Toutanji و همکاران [۱۸]	---	۵	---	---	رودخانه-ای	۹	۴	۰/۴۱
Shah و همکاران [۲۲]	۲۶	۳۹	۱/۵	---	---	---	---	---
بتن RPC (تحقیق حاضر)	۴	۵	۱/۲۵	۱۳۹/۵	بازالتی	۰/۶۰	۱/۱	۰/۲۵



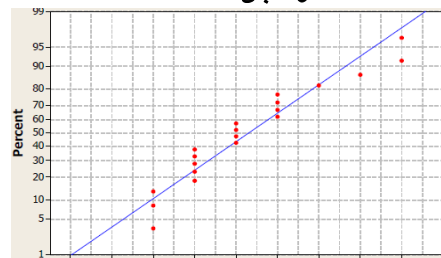
شکل ۳ هیستوگرام و منحنی توزیع نرمال مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن RPC



شکل ۱ هیستوگرام و منحنی توزیع نرمال مقاومت ضربه‌ای اولین ترک بتن RPC



شکل ۴ نمودار منحنی تجمعی درصد احتمال توزیع نرمال مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن RPC



شکل ۲ نمودار منحنی تجمعی درصد احتمال توزیع نرمال مقاومت ضربه‌ای اولین ترک بتن RPC

جدول ۵ نتایج آزمون کلموگروف-اسمیرنوف مقاومت ضربه‌ای بتن بدون الیاف

UR	FC		
۵	۴	مقاومت ضربه‌ای	۲۰ نمونه بتن RPC (تحقیق حاضر)
۰/۰۹۳	۰/۰۹	آماره کلموگروف-اسمیرنوف (KS)	
۰/۲۹۴	۰/۲۹۴	حداکثر مقادیر مجاز آماره در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح معنا داری ۵ درصد	
>۰/۲۰	>۰/۲۰	کوچکترین سطح معناداری در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف	
۷۷	۷۱	مقاومت ضربه‌ای	۱۶ نمونه بتن معمولی Nataraja و همکاران [۵]
۰/۱۶۶	۰/۱۵۱	آماره کلموگروف-اسمیرنوف (KS)	
۰/۳۳۸	۰/۳۳۸	حداکثر مقادیر مجاز آماره در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح معنا داری ۵ درصد	
>۰/۲۰	>۰/۲۰	کوچکترین سطح معناداری در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف	
۴۵۴	۴۴۶	مقاومت ضربه‌ای	۴۸ نمونه بتن مقاومت بالا Song و همکاران [۱۰]
۰/۰۷۸	۰/۰۸۰	آماره کلموگروف-اسمیرنوف (KS)	
۰/۱۹۶	۰/۱۹۶	حداکثر مقادیر مجاز آماره در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح معنا داری ۵ درصد	
>۰/۲۰	>۰/۲۰	کوچکترین سطح معناداری در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف	

۴-۳- مقاومت ضربه‌ای بتن SFRRPC

نتایج مقاومت ضربه‌ای بتن RPC در جدول شماره ۶ ارائه شده است. مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن SFRRPC به ترتیب ۱۷۰۰ و ۲۹۴۲ ضربه است. اختلاف بین مقاومت ضربه‌ای نهایی و اولین ترک بتن SFRRPC نزدیک به ۱۲۴۲ ضربه است. در جدول شماره ۷ نتایج میانگین مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن مسلح به الیاف فولادی بدست آمده در سایر تحقیقات منتشر شده با تحقیق حاضر مقایسه شده است.

جدول ۶ نتایج مقاومت ضربه‌ای بتن SFRRPC

شماره نمونه	ارتفاع نمونه	تعداد ضربه در اولین ترک روی سطح	تعداد ضربه در گسیختگی نهایی	درصد افزایش تعداد ضربه بعد از ایجاد اولین ترک تا گسیختگی نهایی
۱	۶/۲۴	۱۲۳۰	۲۶۰۰	۱۱۱/۳۸
۲	۶/۱۹	۱۵۰۰	۲۸۰۰	۸۶/۶۷
۳	۶/۴۴	۱۵۰۰	۲۶۰۰	۷۳/۳۳
۴	۶/۰۷	۷۰۰	۱۸۱۰	۱۵۸/۵۷
۵	۶/۲۷	۲۳۷۶	۳۴۲۰	۴۳/۹۴
۶	۶/۰۵	۱۱۶۰	۲۴۹۰	۱۱۴/۶۶
۷	۶/۳۷	۲۸۶۰	۴۴۰۴	۵۳/۹۹
۸	۶/۱۰	۹۹۰	۱۳۹۴	۴۰/۸۱
۹	۶/۶۱	۴۰۰۰	۶۰۰۰	۵۰/۰۰
۱۰	۶/۴۶	۱۸۰۰	۳۹۹۵	۱۲۱/۹۴
۱۱	۶/۴۸	۲۱۰۰	۳۲۰۰	۵۲/۳۸
۱۲	۶/۴۷	۱۴۰۰	۱۹۱۳	۳۶/۶۴
۱۳	۶/۴۳	۱۴۰۰	۲۶۲۴	۸۷/۴۳
۱۴	۶/۱۸	۱۲۵۰	۲۰۴۵	۶۳/۶۰
۱۵	۶/۳۱	۷۵۰	۱۵۸۵	۱۱۱/۳۳
۱۶	۶/۳۱	۹۱۰	۲۲۲۷	۱۴۴/۷۳
۱۷	۶/۱۹	۱۶۸۰	۳۶۱۷	۱۱۵/۳۰
۱۸	۶/۳۸	۱۹۰۵	۳۱۵۲	۶۵/۴۶
۱۹	۶/۳۸	۲۰۹۵	۳۰۱۵	۴۳/۹۱
۲۰	۶/۳۸	۲۳۹۸	۳۹۴۵	۶۴/۵۱
میانگین	۶/۳۲	۱۷۰۰	۲۹۴۲	۸۲/۰۲
انحراف معیار	۰/۱۵	۷۹۳/۲	۱۰۹۷/۰	۳۶/۷۶
ضریب پراکنندگی	۲/۳۷	۴۶/۶۶	۳۷/۲۹	۴۴/۸۱

با کاربرد الیاف فولادی هرچند مقاومت فشاری بتن RPC افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا نمی‌کند، اما مقاومت ضربه‌ای آن بسیار بهبود می‌یابد. میزان بهبود مقاومت ضربه‌ای بتن RPC در اثر کاربرد ۲ درصد حجمی الیاف فولادی صاف نسبت به مقادیر گزارش داده شده توسط Nataraja و همکاران [۵]، Song و همکاران [۱۰] و تحقیق دیگر Nataraja و همکاران [۱۳]

با توجه به نتایج آزمون کلموگروف-اسمیرنوف مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن RPC، هر دو دارای توزیع نرمال هستند. شایان گفتن است که بررسی آماری نتایج Song و همکاران [۱۰] و Nataraja و همکاران [۵] نیز موید برابری توزیع نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن‌های معمولی و مقاومت بالای بدون الیاف با توزیع نرمال بوده است. با توجه به کمتر بودن آماره KS برای مقاومت ضربه‌ای اولین ترک بتن RPC در مقایسه با آماره KS برای مقاومت ضربه‌ای نهایی این بتن و همچنین بررسی نمودار توزیع فراوانی و منحنی توزیع تجمعی ترسیم شده نشان می‌دهد برابری توزیع نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک بتن RPC با توزیع نرمال بهتر از مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن RPC است.



در محدوده‌های ۱۳۲۹ تا ۲۰۷۱ ضربه و ۲۴۲۸ تا ۳۴۵۵ ضربه قرار دارد.

در شکل ۵ هیستوگرام مقاومت ضربه‌ای اولین ترک به همراه منحنی توزیع نرمال و در شکل ۶ نمودار منحنی تجمعی درصد احتمال توزیع نرمال مقاومت ضربه‌ای اولین ترک بتن SFRRPC نشان داده شده‌است. در شکل ۷ هیستوگرام مقاومت ضربه‌ای نهایی به همراه منحنی توزیع نرمال و در شکل ۸ نمودار منحنی تجمعی درصد احتمال توزیع نرمال مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن SFRRPC نشان داده شده‌است.

با استفاده از آزمون نیکویی برازش کلموگروف-اسمیرنوف توزیع نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن SFRRPC مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمون در مورد نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن SFRRPC در جدول ۸ ارائه شده‌است. نتایج آزمون نیکویی برازش کلموگروف-اسمیرنوف مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و ضربه‌ای نهایی بتن مسلح به الیاف فولادی در تحقیقات Song و همکاران [۱۰] و Nataraja و همکاران [۵] محاسبه و با نتایج این تحقیق در جدول ۸ مقایسه شده‌است.

جدول ۷ نتایج میانگین مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن مسلح به الیاف فولادی

نام نویسنده	مقاومت ضربه‌ای اولین ترک	مقاومت ضربه‌ای نهایی	نسبت مقاومت ضربه‌ای نهایی به مقاومت ضربه‌ای اولین ترک	درصد حجمی الیاف فولادی	نوع الیاف فولادی	نسبت طول به قطر الیاف	مقاومت فشاری بتن (MPa)	نسبت آب به مواد سیمانی
Nataraja و همکاران [۵]	۱۰۳	۱۴۲	۱/۳۸	۰/۵	موجدار	۴۰	۳۶	۰/۴۹
Nataraja و همکاران [۱۳]	۲۱۴	۲۹۱	۱/۳۶	۰/۵	موجدار	۴۰	۳۰	۰/۶۱
Nataraja و همکاران [۱۳]	۱۰۸۳	۱۶۰۰	۱/۴۸	۱/۵	موجدار	۴۰	۲۸	۰/۶۱
Nataraja و همکاران [۱۳]	۹۰۸	۱۴۵۹	۱/۶۱	۰/۵	موجدار	۴۰	۵۰	۰/۴۰
Nataraja و همکاران [۱۳]	۲۵۲۲	۳۵۸۲	۱/۴۲	۱/۵	موجدار	۴۰	۵۱	۰/۴۰
Song و همکاران [۱۰]	۱۷۳۴	۱۸۹۶	۱/۱۰	۱/۰	قلابداری	۴۰	۷۶	۰/۲۸
Song و همکاران [۲۰]	۲۳۴	۳۳۰	۱/۴۱	۰/۵	قلابداری	۸۰	۲۴	۰/۶۵
Shah و همکاران [۲۲]	۲۳۴	۵۵۰	۲/۳۵	۰/۷۵	قلابداری	۶۰	---	---
بتن SFRRPC (تحقیق حاضر)	۱۷۰۰	۲۴۹۲	۱/۷۳	۲/۰	صاف	۷۰	۱۴۰/۰	۰/۲۵

بسیار بیشتر می‌باشد. از دلایل این امر کمتر بودن قطر الیاف بکار رفته در بتن RPC نسبت به الیاف بکار رفته در تحقیقات یاد شده می‌باشد. قطر کمتر الیاف باعث بهبود عملکرد آن در جلوگیری از توسعه ترکهای ریز می‌شود. همچنین تعداد این نوع الیاف فولادی در نسبت حجمی یکسان در بتن به مراتب بیشتر از الیاف متداول بوده و این عامل نیز باعث بهبود عملکرد الیاف در بتن RPC در جلوگیری از توسعه ریز ترک و ترک نسبت به بتن‌های الیافی متداول می‌شود.

حداقل و حداکثر مقاومت ضربه‌ای اولین ترک بتن SFRRPC به ترتیب برابر با ۷۰۰ ضربه و ۴۰۰۰ ضربه و ضریب تغییرات آن برابر با ۶/۶۶ درصد می‌باشد. حداقل و حداکثر مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن SFRRPC به ترتیب برابر با ۱۳۹۴ ضربه و ۶۰۰۰ ضربه و ضریب تغییرات آن برابر با ۲۷/۲۹ درصد می‌باشد.

خطای استاندارد تعیین میانگین نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن SFRRPC به ترتیب نزدیک به ۱۷۷ ضربه و ۶۵۷ ضربه است. با ۹۵ درصد اطمینان میانگین مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن SFRRPC به ترتیب

Song و همکاران [۱۰] مطابق توزیع نرمال نمی‌باشد.

با توجه به نتایج آزمون کلموگروف-اسمیرنوف و نمودار توزیع فراوانی و منحنی توزیع تجمعی ترسیم شده برابری توزیع نتایج مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن SFRRPC با توزیع نرمال قدری بهتر از مقاومت ضربه‌ای اولین ترک بتن SFRRPC است.

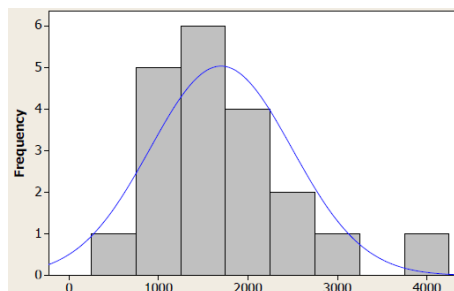
جدول ۸ نتایج آزمون نیکویی برازش مقاومت ضربه‌ای بتن مسلح به الیاف فولادی

UR	FC	مقاومت ضربه‌ای	۲۰ نمونه بتن SFRRPC (تحقیق حاضر)
۲۹۴۲	۱۷۰۰	آماره کلموگروف-اسمیرنوف (KS)	
۰/۱۱۴	۰/۱۲۵	حداکثر مقادیر مجاز آماره در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح معنا داری ۵ درصد	
۰/۲۹۴	۰/۲۹۴	کوچکترین سطح معناداری در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف	
> ۰/۲۰	> ۰/۲۰	مقاومت ضربه‌ای	۱۵ نمونه بتن مسلح به الیاف فولادی Nataraja و همکاران [۵]
۱۳۹	۹۹	آماره کلموگروف-اسمیرنوف (KS)	
۰/۱۵۲	۰/۱۲۸	حداکثر مقادیر مجاز آماره در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح معنا داری ۵ درصد	
۰/۳۳۸	۰/۳۳۸	کوچکترین سطح معناداری در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف	
> ۰/۲۰	> ۰/۲۰	مقاومت ضربه‌ای	۴۸ نمونه بتن مقاومت بالا مسلح به الیاف فولادی Song و همکاران [۱۰]
۱۸۹۶	۱۷۳۴	آماره کلموگروف-اسمیرنوف (KS)	
۰/۲۰۹	۰/۲۱۵	حداکثر مقادیر مجاز آماره در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح معنا داری ۵ درصد	
۰/۱۹۶	۰/۱۹۶	کوچکترین سطح معناداری در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف	
< ۰/۰۱۰	< ۰/۰۱۰		

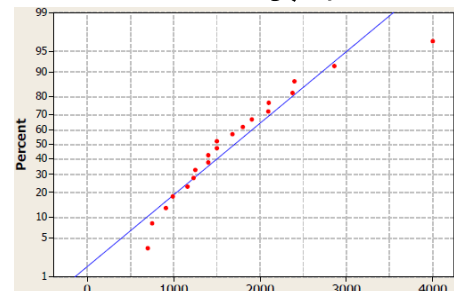
گفتنی است که در این تحقیق نتایج نشانگر آن است که برابری توزیع نتایج مقاومت ضربه‌ای بتن RPC مسلح به الیاف فولادی با توزیع نرمال کمتر از بتن RPC است.

۴-۵- تعیین حداقل تعداد نمونه

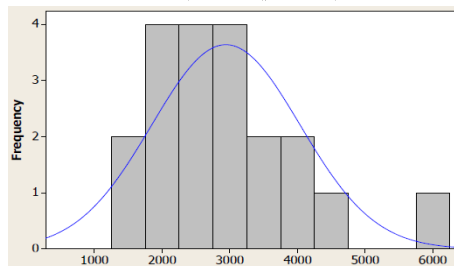
در آزمایش مقاومت ضربه‌ای بتن RPC برای اینکه خطای آزمایش کمتر از حد مشخص e در سطح اطمینان مورد نظر باشد، با استفاده از فرمول ۱ ارائه شده در مراجع شماره ۵ و شماره ۱۰ و با توجه به ضرایب تغییرات ارائه شده در جداول ۳ و ۶ می‌توان حداقل تعداد نمونه لازم را تعیین نمود.



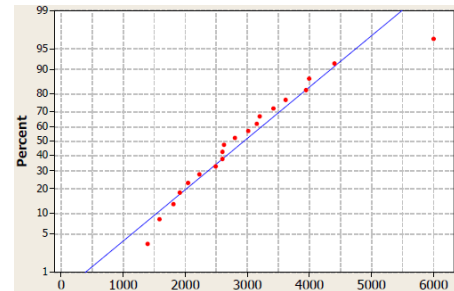
شکل ۵ هیستوگرام و منحنی توزیع نرمال مقاومت ضربه‌ای اولین ترک بتن SFRRPC



شکل ۶ نمودار منحنی تجمعی درصد احتمال توزیع نرمال مقاومت ضربه‌ای اولین ترک بتن SFRRPC



شکل ۷ هیستوگرام و منحنی توزیع نرمال مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن SFRRPC



شکل ۸ نمودار منحنی تجمعی درصد احتمال توزیع نرمال مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن SFRRPC

با توجه به نتایج آزمون کلموگروف-اسمیرنوف مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن SFRRPC، هر دو دارای توزیع نرمال هستند.

شایان گفتن است که بررسی آماری نتایج Nataraja و همکاران [۵] نیز موید برابری توزیع نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن معمولی مسلح به الیاف فولادی با توزیع نرمال بوده است. اما توزیع نتایج مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بتن مقاومت بالای مسلح به الیاف فولادی در تحقیق

$$n = t^2 v^2 / e^2 \quad (1)$$

که n : تعداد نمونه، e : درصد خطا، v : ضریب تغییرات، t : مقدار توزیع استیودنت در سطح اطمینان مشخص است.

با توجه به فرمول ۱ و ضریب تغییرات بدست آمده در این تحقیق حداقل تعداد نمونه مورد نیاز برای آزمایش مقاومت ضربه ای بتن RPC یا بتن SFRRPC در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای درصد خطاهای مختلف در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹ تعداد نمونه‌ها در درصدهای مختلف خطا در سطح اطمینان ۹۵ درصد

درصد خطا	تعداد نمونه UR	تعداد نمونه FC
<۱۰	۴۵	۶۰
<۱۵	۲۰	۲۶
<۲۰	۱۱	۱۵
<۲۵	۷	۱۰
<۳۰	۵	۷
<۳۵	۴	۵
<۴۰	۳	۴

۵- نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از این تحقیق عبارتند از:

۱. مقاومت ضربه ای اولین ترک و مقاومت ضربه ای نهایی بتن RPC بدون الیاف در مقایسه با نتایج گزارش شده توسط محققان دیگر برای بتنهای معمولی و بتنهای مقاومت بالا، پایین بوده و این نوع بتن در برابر بارهای ضربه ای عملکرد بسیار تندی از خود نشان می دهد.

۷- مراجع

- [۱] Cargile, O'Neil, Neeley, "Very-High-Strength Concretes for Use in Blast- and Penetration-Resistant Structures", The AMPTIAC Quarterly, Vol.6, NO.4, pp. 61-66, 2001.
- [۲] Bagheri, Zanganeh, "Energy Absorption of Reactive Powder Concrete (RPC) in Static and Impact Loadings", CSCE 2007 Annual General Meeting & Conference, Yellowknife, Northwest Territories, June 6-9, 2007.
- [۳] Nataraja, Nagaraj, Basavaraja, "Reproportioning of steel fibre reinforced concrete mixes and their impact resistance", Cement and Concrete Research, Vol.35, pp. 2350-2359, 2005.
- [۴] Marar Kh., Eren Ö., Çelik T., "Relationship between impact energy and compression toughness energy of high-strength fiber-reinforced concrete", Materials Letters, Vol.47, pp. 291-304, 2001.
- [۵] Nataraja M.C., Dhang N., Gupta A.P., "Statistical variations in impact resistance of steel fiber-reinforced concrete subjected to drop weight test", Cement and Concrete Research, Vol.29, pp. 989-995, 1999.
- [۶] Fanella DA, Naaman AE., "Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression", ACI Journal, Vol.82, pp. 457-483, 1985.
- [۷] Hancox N.L., "Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures", Edited by Reid and Zhou, CRC Press, 2000.
- [۸] American Concrete Institute (ACI)-544.2R Committee report on Fiber Reinforced Concrete, 1999.
- [۹] Zhao, "A study on testing Techniques for Concrete-like materials under compressive impact loading", Cement and Concrete Composites, Vol.20, pp. 293-299, 1998.
- [۱۰] Song, Wu, Hwang, Sheu, "Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength steel fiber-reinforced concrete", Cement and Concrete Research, Vol.35, pp. 393-399, 2005.
- [۱۱] Badr, Ashour, Platten, "Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete", International Journal of impact engineering, Vol.32, pp. 1907-1920, 2006.

۲. استفاده از الیاف فولادی تاثیر بسیار مهمی در افزایش مقاومت ضربه ای بتن RPC داشته است به گونه ای که مقاومت ضربه ای اولین ترک و مقاومت ضربه ای نهایی بتن SFRRPC به ترتیب نزدیک به ۴۲۵ و ۵۸۸ برابر بتن RPC بوده است.

۳. اثر الیاف فولادی در افزایش مقاومت ضربه ای نهایی بتن بیشتر از مقاومت ضربه ای اولین ترک بتن است.

۴. برخلاف بالا بودن پراکندگی در نتایج مقاومت ضربه ای اولین ترک و نهایی بتنهای RPC و SFRRPC تعیین شده به روش ACI ۵۴۴ [۸] میزان پراکندگی نتایج مشابه با آنچه محققین دیگر برای بتنهای معمولی و یا بتنهای مقاومت بالا بر اساس این روش آزمایش گزارش کرده اند می باشد. به نظر نمی رسد سطح مقاومتی بالای بتنهای RPC تاثیری در میزان پراکندگی نتایج داشته باشد.

۵. توزیع نتایج مقاومت ضربه ای اولین ترک و نهایی بتن RPC و بتن SFRRPC بدست آمده از آزمایش وزنه افتان با ضربه های تکراری از توزیع نرمال پیروی می کند. اما برابری نتایج مقاومت ضربه ای اولین ترک و نهایی بتن RPC با توزیع نرمال بهتر از بتن SFRRPC است

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از آقایان عوض عباس زاده، عباس زنگانه و مصطفی علیزاده که ما را در انجام بخش های مختلف این تحقیق یاری نمودند تشکر و قدردانی می نمایند.



- Kar, Mohanty, "Multistage gearbox condition monitoring using motor current signature analysis and Kolmogorov-Smirnov test", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 290, pp.337-368, 2006. [۲۱]
- Balaguru P.N., Shah S.P., "Fiber reinforced cement composites", McGrawhill. 1992. [۲۲]
- Richard P., Chyerezy M. "Reactive Powder Concrete with high ductility and 200-800 MPa compressive strength", ACI spring convention, SP 144-24, San Francisco, California, 1994. [۲۳]
- Wittmann F.H. "Crack formation and fracture energy of normal and high-strength concrete", *Sādhanā* Vol. 27, Part 4, Pp. 413-423, August 2002. [۲۴]
- Orgass, M.; Klug, Y., "Steel Fibre Reinforced Ultra-High Strength Concretes", *Leipzig Annual Civil Engineering Report No. 9*, Pp. 233 - 244, 2004. [۲۵]
- Collepari S., Coppola L., Troli R., Collepari M., "Mechanical properties of modified reactive powder concrete", *Proceedings of the Fifth conference on superplastizers and other chemical admixtures in concrete*, ACI publication SP-173, Rome, Italy, Pp. 1-21, 1997. [۲۶]
- Graybeal B.A., "Characterization of the behavior of ultra high performance concrete", Ph.D. Thesis, University of Maryland, United States, 2005. [۲۷]
- Ma J., Orgass M., "Comparative investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without coarse aggregates", *Leipzig Annual Civil Engineering Report No. 9*, Pp. 245 - 256, 2004. [۲۸]
- Song, Hwang, Sheu, "Strength properties of nylon and polypropylene-fiber-reinforced concretes", *Cement and Concrete Research*, Vol.35, pp. 1546-1550, 2005. [۱۲]
- Nataraja, Nagaraj, Basavaraja, "Reproportioning of steel fibre reinforced concrete mixes and their impact resistance", *Cement and Concrete Research*, Vol.35, pp. 2350-2359, 2005. [۱۳]
- Bader, Ashour, "Modified ACI Drop-weight impact test for concrete", *ACI materials Journal*, Vol.102, No.4, Pp.249-255, 2005. [۱۴]
- Neville A. M., "Properties of Concrete", 1995. [۱۵]
- Richard P., Chyerezy M., "Composition of Reactive Powder Concretes", *Cement and Concrete Research*, Vol.25, No.7, Pp.1501-1511, 1995. [۱۶]
- Collepari M. et al, "Influence of superplasticizer type on the compressive strength of Reactive powder mortars", *ACI SP 173-27*, 1997. [۱۷]
- Toutanji, McNeil, Bayasi, "Chloride permeability and impact resistance of Polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.28, No.7, pp. 961-968, 1998. [۱۸]
- Sheskin D.J. "Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures", 3rd ed, Champan Hall/CRC, 2004 [۱۹]
- Song, Wu, Hwang, Sheu, "Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.19, pp. 1-9, 2005. [۲۰]

۸- زیر نویس ها

- ¹ Reactive Powder Concrete
- ² Projectile impact test
- ³ Charpy-type impact test
- ⁴ Drop-weight test
- ⁵ Split-Hopkinson bar test
- ⁶ Kolmogorov-Smirnov
- ⁷ Steel Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete
- ⁸ First-Crack Impact Resistance
- ⁹ Ultimate Impact Resistance
- ¹⁰ Significance level

