

مقاومت ضربه‌ای بتن حاوی الیاف فولادی تحت شرایط مختلف عمل‌آوری: مطالعه آزمایشگاهی و تحلیل آماری

محمد محتشم‌معین^۱، سیددیا سین موسوی^{۲*}، رحمت مدن دوست^۳ و حمیدرضا ناصر سعید^۱

^۱ کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه علامه محدث نوری، مازندران

^۲ گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان

^۳ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

(دریافت: ۹۵/۱۱/۲۰، پذیرش: ۹۶/۶/۴، نشر آنلاین: ۹۶/۶/۵)

چکیده

در این مطالعه به بررسی آزمایشگاهی و تحلیل آماری مقاومت ضربه‌ای بتن حاوی الیاف فولادی در شرایط مختلف عمل‌آوری پرداخته شده است. برای این منظور از دو نوع الیاف فولادی شامل الیاف قلاب‌دار و همچنین الیاف موج‌دار (در دو نسبت طول به قطر) در ساخت بتن الیافی استفاده گردید. علاوه بر سنجش مقاومت‌های فشاری و کششی نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه، مقاومت اولین ترک، مقاومت شکست و همچنین تعداد ضربات بعد از اولین ترک بر اساس آزمون سقوط وزنه در هر طرح مخلوط، بر روی ۶۴ دیسک بتنی با ابعاد قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۶/۴ سانتی‌متر ارزیابی شد. نتایج نشان داد که حضور الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و ضربه‌ای بتن صرف نظر از نوع عمل‌آوری آن خواهد شد. با در نظر گرفتن تأثیر محیط عمل‌آوری، نگهداری نمونه‌ها در محیط خشک در مقایسه با محیط مرطوب نه تنها باعث کاهش میزان میانگین مقاومت اولین ترک و شکست بتن می‌گردد بلکه تغییرپذیری مقاومت اولین ترک و مقاومت شکست را تعریض نموده و به عبارتی پراکندگی بیشتری را منجر می‌شود. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که حضور الیاف باعث بهبود معنادار تعداد ضربات بعد از اولین ترک در هر دو محیط عمل‌آوری می‌گردد. به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان عملکرد مؤثرتر الیاف فولادی قلاب‌دار را در تقابل با الیاف فولادی موج‌دار حتی با نسبت طول به قطر کوچک‌تر در افزایش مقاومت ضربه‌ای بتن استنباط نمود.

کلیدواژه‌ها: بتن الیافی، الیاف فولادی، مقاومت ضربه‌ای، شرایط عمل‌آوری.

۱- مقدمه

الیاف‌ها به طور کلی می‌توانند از مواد طبیعی (مانند کنف و ابریشم) و یا محصولات کارخانه‌ای (مانند شیشه و فولاد) ساخته شده باشند (Neville, ۱۹۹۵). از میان انواع الیاف‌ها در ساخت بتن، توجه عمده‌ای به استفاده از الیاف فولادی معطوف شده است. مطالعات نشان می‌دهد که حضور الیاف فولادی می‌تواند سبب بهبود عملکرد بتن مانند افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی (El-Dieb, ۲۰۰۹؛ Nili و Afroughsabet, ۲۰۱۰) و همچنین کاهش میزان جذب آب (Nili و Afroughsabet, ۲۰۱۲) شود. یکی از پارامترهای مهم مورد بررسی در بتن مسلح شده با الیاف، ارزیابی مقاومت ضربه‌ای آن است. با توجه به پتانسیل بتن الیافی جهت استفاده در محل‌هایی مانند کف‌های صنعتی،

امروزه بتن به عنوان پرکاربردترین ماده ساختمانی سهم بسیار مهمی در پیشرفت جوامع بشری دارد به نحوی که استفاده از آن در ساخت سازه‌های حیاتی مانند پل‌ها، ساختمان‌های بلند مرتبه، سدها و نیروگاه‌های هسته‌ای اجتناب‌ناپذیر است. اگرچه از مشکلات بتن می‌توان به ماهیت عموماً شکننده (Alavinia و همکاران، ۲۰۱۲) و مقاومت کششی پایین اشاره نمود. در این راستا مفهوم بتن الیافی به عنوان بتنی که از ترکیب سیمان هیدرولیکی، آب، سنگدانه و الیاف ناپیوسته تشکیل می‌شود، ارائه گردیده است (ACI 544.1R-96).

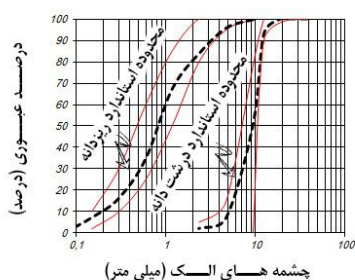
* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۱۳۹۱۱۰۸۵

اولین ترک و شکست نتیجه گرفتند. در مطالعه Wang (۲۰۱۳) با جایگزینی ۱/۵ درصد از الیاف فولادی در بتن سبک، میانگین مقاومت اولین ترک و شکست به ترتیب ۴ و ۸/۵ برابر و با جایگزینی ۲ درصدی الیاف فولادی، مقاومت اولین ترک و شکست ۱۰ و ۱۳ برابر افزایش یافته است. همچنین، Mastali و همکاران (۲۰۱۶)، با مطالعه بتن خود تراکم حاوی الیاف پلیمری بازیافتی شیشه نشان دادند که ارتباط خطی میان مقاومت ضربه ای اولین ترک و ترک نهایی وجود دارد. در مطالعه‌ای دیگر نتایج مطالعه مستعلی و Dalvand (۲۰۱۶) نشان دهنده ارتقاء سطح مقاومت ضربه‌ای و خواص مکانیکی بتن خودتراکم با افزودن الیاف بریده شده پلیمری بازیافتی کربن می‌باشد.

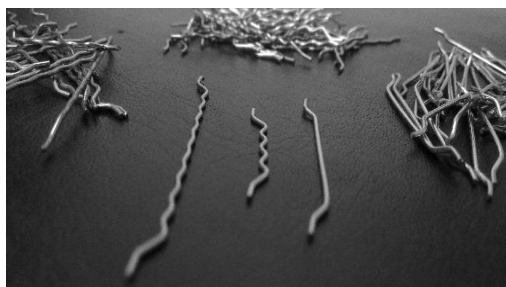
۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مصالح مصرفی

در این مطالعه از سیمان پرتلند تیپ ۲ در ساخت نمونه‌ها استفاده گردید. ماسه طبیعی به عنوان ریزدانه با جذب آب ۱/۳ و مدول نرمی ۳/۰۵ و همچنین شن با جذب آب ۰/۸ و بزرگ‌ترین دانه اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر به کار گرفته شد. نمودار دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در شکل (۱) نمایش داده شده است. از دو نوع الیاف فولادی شامل الیاف فولادی قلاب‌دار و الیاف فولادی موج‌دار با مقاومت ۱۱۴۰ MPa استفاده گردید (شکل (۲)). فوق روان‌کننده مورد استفاده بر پایه پلی‌کربوکسیلات با وزن مخصوص $1.05 \pm 0.02 \text{ gr/cm}^3$ می‌باشد.



شکل ۱- دانه‌بندی درشت‌دانه و ریزدانه



شکل ۲- الیاف‌های مورد استفاده

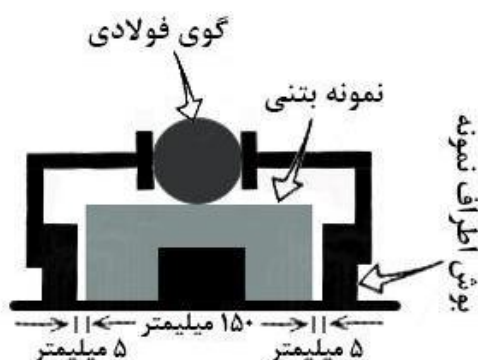
سازه‌های هیدرولیکی و سازه‌های مقاوم در برابر انفجار، ضرورت مطالعه رفتار بتن الیافی در برابر بارهای ضربه‌ای بیشتر نمایان شده است. از میان شیوه‌های متفاوت ارزیابی مقاومت ضربه‌ای بتن که توسط کمیته ACI ۵۴۴ (۱۹۸۸)، پیشنهاد شده است، ساده‌ترین آن‌ها، آزمون سقوط وزنه می‌باشد. در این روش، مقاومت ضربه‌ای بتن بر اساس تعداد ضربات لازم جهت رویت اولین ترک و شکست ارزیابی می‌گردد.

عواملی مانند طبیعت آزمون و یا شرایط ناهمگن بتن باعث گردیده است که نتایج آزمون سقوط وزنه غالباً پراکندگی بالایی داشته باشد (Rahmani و همکاران، ۲۰۱۲). لذا مطالعات گوناگونی به بررسی آماری و آزمایشگاهی مقاومت ضربه‌ای بتن الیافی با استفاده از ACI ۵۴۴ پرداخته‌اند. هدف از انجام این مطالعه ارزیابی شرایط مختلف عمل‌آوری بر مقاومت ضربه‌ای بتن حاوی الیاف فولادی قلاب‌دار و موج‌دار می‌باشد. از این رو، ۵ طرح مخلوط بتن الیافی ساخته شد و پس از قرارگیری تحت دو شرایط عمل‌آوری مرطوب و خشک، تحت آزمون سقوط وزنه قرار گرفتند. انتظار می‌رود نتایج این تحقیق بتواند ابزار مناسبی برای شناخت بهتر عملکرد بتن الیافی در برابر بارهای ضربه‌ای فراهم آورد که سبب گسترش کاربرد بتن الیافی و سودمندی از فواید مثبت آن در پروژه‌های متفاوت مهندسی گردد.

۲- پیشینه تحقیق

همان‌گونه که بیان شد، مطالعات گوناگونی به بررسی آماری و آزمایشگاهی مقاومت ضربه‌ای بتن الیافی با استفاده از ACI ۵۴۴ پرداخته‌اند. از آن جمله می‌توان به مطالعه Nikoui و همکاران (۲۰۱۵) بر روی مقاومت اولین ترک و شکست در بتن حاوی الیاف پلی‌فنیل‌سولفید^۱ و همچنین، مطالعه Song و همکاران (۲۰۰۵) بر روی مقاومت اولین ترک و شکست بتن حاوی الیاف فولادی در مقایسه با بتن حاوی ترکیب الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن اشاره نمود. در مطالعه‌ای مجزا، Song و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که بتن پر مقاومت تقریباً دارای توزیع نرمال در مقاومت‌های اولین ترک و نهایی می‌باشد، در حالی که بتن پر مقاومت حاوی الیاف فولادی دارای چنین وضعیتی نمی‌باشد. همچنین Rahmani و همکاران (۲۰۱۲) گزارش نمودند که مقاومت شکست در برابر ضربه بتن معمولی به سختی^۲ دارای توزیع نرمال است. به علاوه نتایج آنان نشان می‌دهد که مقاومت شکست بتن حاوی الیاف سلولزی تقریباً دارای یک توزیع نرمال است در حالی که این امر برای بتن با الیاف پلی‌پروپیلن صادق نیست. از طرفی، Fakharifar و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی کامپوزیت‌های سیمانی با عملکرد بالا حاوی الیاف پلی‌پروپیلن، توزیع نرمال آن را در حیطه مقاومت

فولادی به شعاع ۶۳/۵ میلی‌متر که در مرکز سطح رویی نمونه قرار گرفته است. تعداد ضرباتی که باعث رخداد اولین ترک قابل رویت می‌شوند به عنوان مقاومت اولین ترک ثبت می‌گردد، در حالی که مقاومت شکست به تعداد ضربات مورد نیاز برای لمس سه بوش از چهار بوش فلزی دستگاه ضربه توسط دیسک بتنی اطلاق می‌شود. این آزمون در هر مخلوط در سن ۲۸ روزه بر روی ۶۴ دیسک بتنی (۳۲ دیسک در محیط مرطوب و ۳۲ دیسک در محیط خشک) با قطر ۱۵ سانتی‌متر و ضخامت ۶/۴ سانتی‌متر که از نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵×۳۰cm بریده شده‌اند، انجام شد.

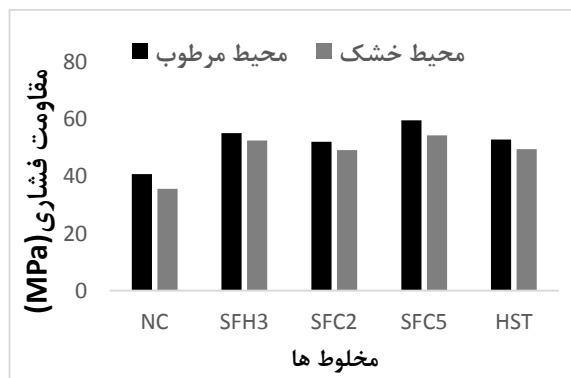


شکل ۳- محل قرارگیری نمونه بتنی در دستگاه آزمایش ضربه

۴- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

۴-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های در دو شرایط عمل‌آوری مرطوب و خشک تعیین گردید که نتایج در شکل (۴) نمایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، میزان مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها در محدوده ۳۵/۶ تا ۵۹/۶ مگاپاسکال متغیر می‌باشد. از شکل (۴) مشخص است صرف نظر از نوع عمل‌آوری، افزودن الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت فشاری بتن شده است.



شکل ۴- مقاومت فشاری مخلوط‌ها در شرایط مختلف عمل‌آوری

۳-۲- نسبت‌های مخلوط‌ها

برای رسیدن به اهداف این مطالعه در مجموع ۵ طرح مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۴ و عیار سیمان 400 kg/cm^3 طراحی و ساخته شد. این مخلوط‌ها شامل یک مخلوط مینا، ۳ مخلوط بتن حاوی الیاف فولادی به صورت مجزا و یک مخلوط حاوی ترکیب الیاف‌های فولادی می‌باشند. اولین مخلوط بتن شاهد (NC) نام دارد که در ساخت آن از هیچ‌گونه الیافی استفاده نشده است. در مخلوط دوم (SFH3) از الیاف قلاب‌دار ۳ سانتی‌متری در ساخت بتن الیافی استفاده شده است. بتن طراحی شده در مخلوط‌های سوم (SFC2) و چهارم (SFC5) به ترتیب حاوی الیاف فولادی موج‌دار ۲ و ۵ سانتی‌متری می‌باشند. در نهایت در مخلوط پنجم (HST) از ترکیب الیاف فولادی موج‌دار ۲ سانتی‌متری و الیاف فولادی قلاب‌دار ۳ سانتی‌متری استفاده شده است. میزان الیاف فولادی در تمامی مخلوط‌ها بتن الیافی به میزان kg/cm^3 ۲۲۷ در نظر گرفته شده است. این میزان از جایگزینی بر مبنای مطالعات گذشته و همچنین طرح‌های آزمایشگاهی اولیه انتخاب شده است.

برای ساخت نمونه‌های بتنی، ابتدا سنگدانه‌ها شامل شن و ماسه در بتونیر به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شدند. سپس در حدود نصف آب مصرفی به مخلوط اضافه گردید در حالی که عمل اختلاط به میزان ۱ دقیقه دیگر ادامه داشت. به منظور تأمین زمان لازم جهت جذب آب سنگ‌دانه‌ها، ۱ دقیقه به مخلوط استراحت داده شد و پس از آن سیمان به همراه آب باقی مانده و فوق‌روان‌کننده اضافه گردید. عمل اختلاط تا ۳ دقیقه دیگر جهت رسیدن به همگنی و یکنواختی کامل ادامه پیدا نمود. لازم به ذکر است در نمونه‌های بتن الیافی، به منظور اجتناب از تجمع الیاف‌ها، به تدریج و به صورت دستی الیاف‌های فولادی به مخلوط‌کن در حال دوران اضافه شدند.

۳-۳- روش انجام آزمایش

پس از اتمام آزمایش اسلامپ، نمونه‌ها در درون قالب‌های مربوطه ریخته شدند. پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج شده و تا رسیدن به سن آزمایش در محیط عمل‌آوری مورد نظر قرار گرفتند. در این مطالعه، دو محیط عمل‌آوری خشک و مرطوب در نظر گرفته شد. مقاومت فشاری بتن بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری انجام پذیرفت و از نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵×۳۰cm جهت ارزیابی مقاومت کششی (شکافت) بتن در سن ۲۸ روزه استفاده گردید. آزمون ضربه بر اساس آزمون سقوط وزنه کمیته ACI ۵۴۴ انجام گرفت. همان‌گونه که در شکل (۳) نمایش داده شده است، این آزمون متشکل است از انداختن مکرر چکشی به وزن ۴/۵۴ کیلوگرم از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متری بر روی توپ

مرطوب و خشک نشان داده شده است. جهت تجزیه و تحلیل آماری مقاومت اولین ترک، مقاومت شکست و افزایش در تعداد ضربات پس از اولین ترک^۳ (INPB)، دو شیوه آماری، شامل آزمون کولموگوروف- اسمیرنوف^۴ و آزمون کروسکال- والیس^۵ به کار گرفته شدند. توسط آزمون کولموگوروف- اسمیرنوف احتمال نرمال بودن یا نبودن مشاهدات بررسی می‌شود. در این آزمون، مقدار P^6 کوچک‌تر از ۰/۰۵ به معنی رد شدن فرضیه نرمال می‌باشد. از طرفی کاربرد آزمون کروسکال- والیس در مقایسه دو گروه یا بیشتر، از داده‌ها می‌باشد. در آزمون کروسکال- والیس، با دانستن این که مقدار P بیشتر از ۰/۰۵ است، تفاوت معنی‌داری میان گروه‌ها وجود ندارد (Rahmani و همکاران، ۲۰۱۲).

۴-۳-۱- مقاومت اولین ترک

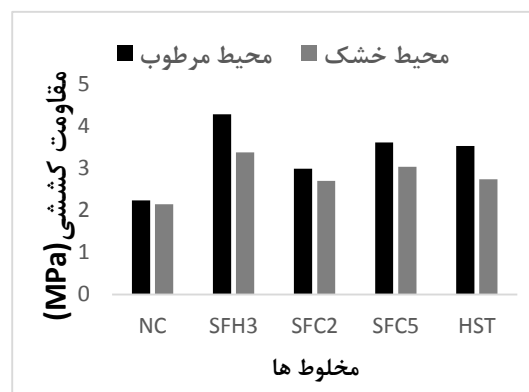
میانگین تعداد ضربات لازم برای مشاهده اولین ترک در بتن معمولی عمل‌آوری شده در محیط مرطوب در حدود ۶۶ ضربه می‌باشد. این میزان در مخلوط‌های SFH3، SFC2، SFC5 و HST به ترتیب ۳۳۹، ۹۵، ۱۴۶، ۹۶ ضربه محاسبه شده است. بر این مبنا، حضور الیاف فولادی در بتن سبب به تأخیر انداختن تعداد ضربات لازم جهت بروز اولین ترک خواهد شد. این امر بدین علت است که حضور الیاف فولادی باعث مسلح شدن بتن در سه جهت می‌گردد، که به دیسک در جذب انرژی ضربه‌ای کمک می‌کند. این امر می‌تواند نهایتاً پیدایش اولین ترک را به تعویق اندازد (Song و همکاران، ۲۰۰۵). عملکرد مطلوب الیاف فولادی در مقاومت ضربه‌ای بتن، توسط Nili و Afroughsabet (۲۰۱۰) نیز گزارش شده است.

همچنین از اطلاعات موجود در جدول (۱) نتیجه می‌گردد که بتن حاوی الیاف فولادی موج‌دار ۵ سانتی‌متری میانگین تعداد ضربات لازم برای مشاهده اولین ترک بیشتری نسبت به بتن حاوی الیاف فولادی موج‌دار ۲ سانتی‌متری دارد که می‌تواند نشان دهنده تأثیر مثبت الیاف با نسبت طول به قطر بالاتر در افزایش مقاومت ضربه‌ای بتن باشد. از طرفی می‌توان نتیجه گرفت که شکل الیاف نیز در مقاومت ضربه‌ای بتن تأثیرگذار می‌باشد به نحوی که الیاف قلاب‌دار عملکرد بهتری در افزایش مقاومت ضربه‌ای بتن نسبت به الیاف موج‌دار حتی با نسبت طول به قطر پایین‌تر دارد. روندی که در ارتباط با عملکرد الیاف فولادی در محیط مرطوب مشاهده گردید، در محیط خشک نیز برقرار است. بدین ترتیب که در محیط خشک میانگین تعداد ضربات لازم برای مشاهده اولین ترک در بتن معمولی ۴۷ ضربه می‌باشد که در مخلوط‌های SFH3، SFC2، SFC5 و HST به ۱۵۰، ۷۰، ۸۱ و ۶۸ ضربه افزایش می‌یابد.

از طرفی نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از الیاف موج-دار با نسبت طول به قطر بالاتر مقاومت فشاری بیشتری را نتیجه می‌دهد. همچنین نگهداری نمونه‌ها در محیط مرطوب مقاومت فشاری بالاتری را نسبت به نگهداری نمونه‌ها در محیط خشک نتیجه داده است. علت این موضوع را می‌توان به عدم تکمیل فرآیند هیدراتاسیون در محیط خشک مرتبط دانست.

۴-۲- مقاومت کششی

شکل (۵) نمایش دهنده مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های مختلف بتنی در هر دو شرایط عمل‌آوری مرطوب و خشک می‌باشد. بر این مبنا، کم‌ترین میزان مقاومت کششی برای نمونه شاهد و در محیط عمل‌آوری خشک به میزان ۲/۱۵ مگاپاسکال نتیجه شده است که افزودن الیاف فولادی مقاومت کششی را تا ۴/۲۹ مگاپاسکال (در محیط مرطوب) افزایش داده است. این مهم نشان دهنده این واقعیت است که افزودن الیاف سبب افزایش مقاومت کششی بتن خواهد شد. از طرفی نتایج شکل (۵) نشان می‌دهد که الیاف فولادی قلاب‌دار ۳ سانتی‌متری مقاومت کششی بالاتری را نسبت به دیگر الیاف‌ها نتیجه می‌دهد. تأثیر مثبت عمل‌آوری در محیط مرطوب در مقایسه با محیط خشک در شکل (۵) نمایان می‌باشد.



شکل ۵- مقاومت کششی مخلوط‌ها در شرایط مختلف عمل‌آوری

۴-۳- مقاومت ضربه‌ای

برای هر مخلوط، پس از تهیه ۶۴ دیسک بتنی (۳۲ دیسک در محیط مرطوب و ۳۲ دیسک در محیط خشک)، تعداد ضربات لازم برای مشاهده اولین ترک و همچنین شکست بر اساس آزمون سقوط وزنه محاسبه گردید که در جداول (۱) و (۲) میزان مشخصه‌های آماری مختلف به ترتیب برای دو محیط عمل‌آوری

6. P-value

3. Increase in the number of post-first crack blows
4. Kolmogorov-Smirnov test
5. Kruskal-Wallis test

جدول ۱- مشخصه‌های آماری نمونه‌های بتنی در محیط مرطوب

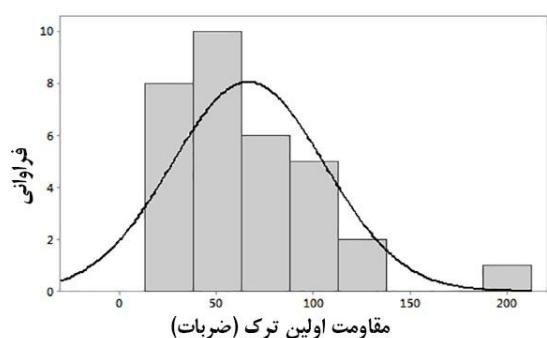
نام مخلوط	مقاومت	میانگین (ضربه)	انحراف معیار (ضربه)	ضریب تغییرات (%)	خطای استاندارد میانگین (ضربه)	۹۵٪ از فاصله اطمینان (ضربه)	مقدار P از آزمون K-S
NC	اولین ترک	۶۶	۴۰	۶۰	۷	(۷۹.۵۲)	۰/۰۹۳
	شکست	۷۲	۳۹	۵۳	۶/۸۵	(۸۵.۵۸)	۰/۰۶۸
	INPB	۶	۳	۴۶	۰/۵۱۵	(۷.۵)	<۰/۰۱
SFH3	اولین ترک	۳۳۹	۳۲۱	۹۵	۵۶/۸	(۴۵۰.۲۲۸)	<۰/۰۱
	شکست	۳۷۸	۳۲۴	۸۶	۵۷/۳	(۴۹۰.۲۶۶)	۰/۰۸۷
	INPB	۳۹	۳۳	۸۶	۵/۸۴	(۵۰.۲۷)	<۰/۰۱
SFC2	اولین ترک	۹۵	۵۶	۶۰	۹/۹۸	(۱۱۴.۷۵)	>۰/۱۵
	شکست	۱۱۵	۵۷	۴۹	۱۰	(۱۳۴.۹۵)	>۰/۱۵
	INPB	۲۰	۸	۴۱	۱/۴۵	(۲۲.۱۷)	>۰/۱۵
SFC5	اولین ترک	۱۴۶	۸۱	۵۵	۱۴/۲	(۱۷۴.۱۱۸)	<۰/۰۱
	شکست	۱۸۰	۸۱	۴۵	۱۴/۴	(۲۰۸.۱۵۲)	>۰/۱۵
	INPB	۳۴	۲۳	۶۸	۴/۱۰	(۴۲.۲۶)	۰/۰۳۱
HST	اولین ترک	۹۶	۶۴	۶۶	۱۱/۳	(۱۱۸.۷۴)	>۰/۱۵
	شکست	۱۲۳	۶۹	۵۶	۱۲/۱	(۱۴۷.۹۹)	>۰/۱۵
	INPB	۲۷	۱۶	۶۰	۲/۸۳	(۳۲.۲۱)	۰/۰۲۴

جدول ۲- مشخصه‌های آماری نمونه‌های بتنی در محیط خشک

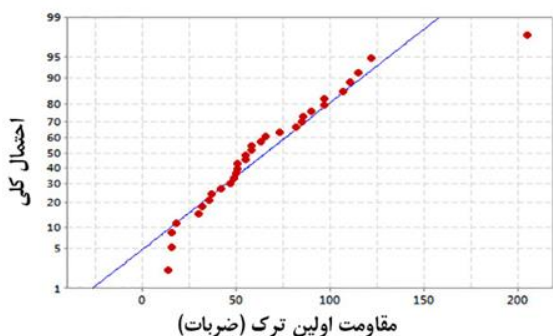
نام مخلوط	مقاومت	میانگین (ضربه)	انحراف معیار (ضربه)	ضریب تغییرات (%)	خطای استاندارد میانگین (ضربه)	۹۵٪ از فاصله اطمینان (ضربه)	مقدار P از آزمون K-S
NC	اولین ترک	۴۷	۳۶	۷۷	۶/۳۹	(۵۹/۳۴)	۰/۱۴۱
	شکست	۵۳	۳۶	۶۹	۶/۴۱	(۶۴/۴۰)	۰/۰۷۵
	INPB	۶	۲	۳۸	۰/۳۵۳	(۶/۴)	<۰/۰۱
SFH3	اولین ترک	۱۵۰	۱۹۹	۱۳۳	۳۵/۱	(۲۱۸/۸۱)	<۰/۰۱
	شکست	۱۶۱	۲۰۴	۱۲۷	۳۶/۱	(۲۳۲/۹۰)	<۰/۰۱
	INPB	۱۱	۸	۷۱	۱/۴۳	(۱۴/۸)	<۰/۰۱
SFC2	اولین ترک	۷۰	۴۷	۶۷	۸/۳۰	(۸۵/۵۳)	۰/۱۱۵
	شکست	۸۱	۴۶	۵۷	۸/۱۹	(۹۶/۶۴)	>۰/۱۵
	INPB	۱۱	۶	۴۹	۰/۹۷۱	(۱۳/۹)	<۰/۰۱
SFC5	اولین ترک	۸۱	۶۵	۸۰	۱۱/۵	(۱۰۳/۵۸)	۰/۰۹۳
	شکست	۹۶	۶۴	۶۷	۱۱/۴	(۱۱۸/۷۳)	۰/۰۲۲
	INPB	۱۵	۹	۵۶	۱/۵۰	(۱۸/۱۲)	<۰/۰۱
HST	اولین ترک	۶۸	۶۳	۹۳	۱۱/۱	(۸۹/۵۴)	<۰/۰۱
	شکست	۸۶	۶۷	۷۸	۱۱/۸	(۱۰۹/۶۲)	<۰/۰۱
	INPB	۱۹	۱۳	۷۱	۲/۳۳	(۲۵/۱۱)	۰/۰۴۸

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمون کروסקال- والیس

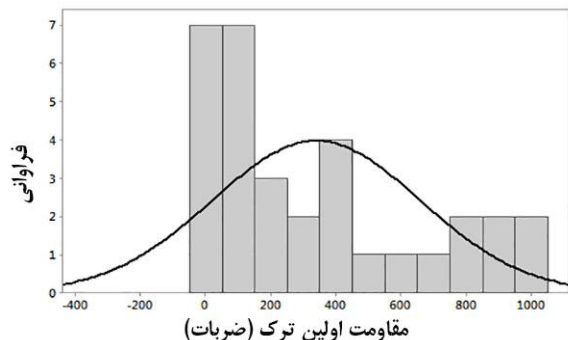
نام مخلوط	مقدار P			نسبت مقاومت اولین ترک بتن الیافی به معمولی	نسبت مقاومت شکست بتن الیافی به معمولی	نسبت INPB بتن الیافی به معمولی
	مقاومت اولین ترک	مقاومت شکست	INPB			
SFH3	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۵/۱۳۹	۵/۲۵	۶/۵
SFC2	۰/۰۳۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۱/۴۳۹	۱/۵۹۷	۳/۳۳۳
SFC5	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۲/۲۱۲	۲/۵	۵/۶۶۶
HST	۰/۰۵۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۱/۴۵۴	۱/۷۰۸	۴/۵
SFH3	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۳/۱۹۱	۳/۰۳۷	۱/۸۳۳
SFC2	۰/۰۳۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰	۱/۴۸۹	۱/۵۲۸	۱/۸۳۳
SFC5	۰/۰۲۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۱/۷۲۳	۱/۸۱۱	۲/۵
HST	۰/۳۶۸	۰/۰۶۴	۰/۰۰۰	۱/۴۴۶	۱/۶۲۲	۳/۱۶۶



شکل ۶- نمودار هیستوگرام مقاومت اولین ترک NC (مرطوب)



شکل ۷- نمودار احتمال مقاومت اولین ترک NC (مرطوب)

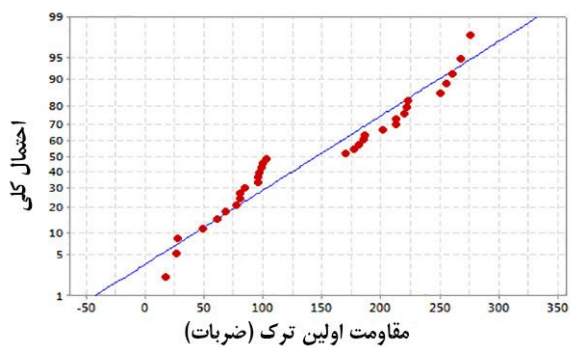


شکل ۸- نمودار هیستوگرام مقاومت اولین ترک SFH3 (مرطوب)

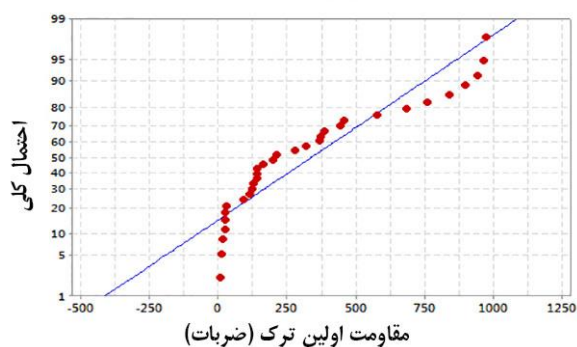
بررسی ضرایب تغییر مقاومت اولین ترک، موجود در جداول (۱) و (۲)، حاکی از آن است برای مخلوط‌های NC، SFH3، SFC2، SFC5، HST در محیط مرطوب به ترتیب مقادیر ۶۰، ۹۵، ۶۰، ۵۵، ۶۶ و در محیط خشک به ترتیب مقادیر ۷۷، ۱۳۳، ۶۷، ۸۰ و ۹۳ به دست آمد که این امر پراکندگی بیشتر داده‌های محیط خشک نسبت به محیط مرطوب را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که بیان گردید، مقادیر P کوچک‌تر از ۰/۰۵، حاصل از آزمون کولموگوروف- اسمیرنوف نشان دهنده توزیع نرمال نمی‌باشند. اشکال احتمال نرمال و هیستوگرام برای محیط مرطوب از شکل (۶) تا (۱۵) برای مخلوط‌های مختلف ترسیم شده است. از طرفی این موارد برای محیط خشک از شکل (۱۶) تا (۲۵) نمایش داده شده است. بر این مبنای و با در نظر گرفتن نتایج موجود در جداول (۱) و (۲)، تأیید می‌گردد که مقاومت اولین ترک در مخلوط‌های SFC2 و HST عمل‌آوری شده در محیط مرطوب و همچنین مخلوط‌های NC و SFC2 عمل‌آوری شده در محیط خشک تقریباً دارای توزیع نرمال می‌باشند.

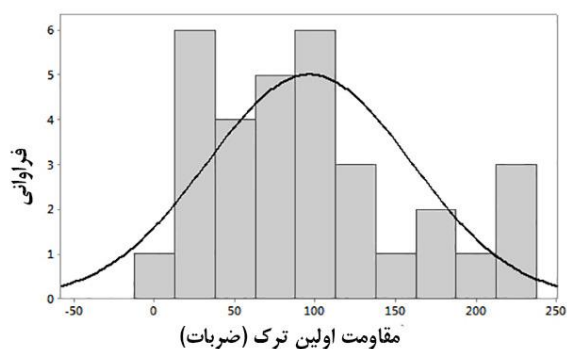
جدول (۳) نشان‌دهنده مقایسه مقاومت اولین ترک در دو محیط عمل‌آوری از طریق آزمون کروسکال- والیس نسبت به بتن معمولی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت اولین ترک در محیط مرطوب برای SFH3، SFC2، SFC5 و HST نسبت به بتن معمولی به ترتیب دارای مقادیر P برابر ۰/۰۰۰، ۰/۰۳۱، ۰/۰۰۰ و ۰/۰۵۳ می‌باشند. این امر نشان‌دهنده بهبود معنادار مقاومت اولین ترک بتن، در صورت استفاده مجزا از الیاف فولادی نسبت به بتن معمولی می‌باشد. به علاوه در محیط خشک به ترتیب مقادیر ۰/۰۰۱، ۰/۰۳۴، ۰/۰۲۴ و ۰/۳۶۸ حاصل گردید.



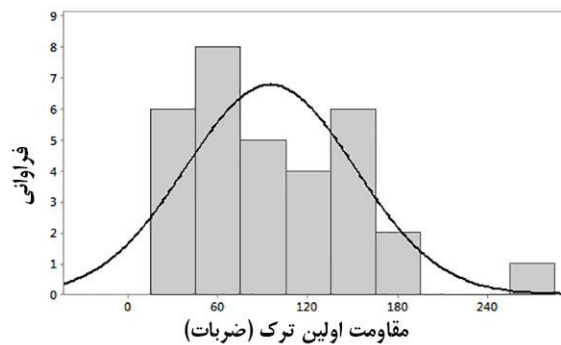
شکل ۱۳- نمودار احتمال مقاومت اولین ترک SFC5 (مرطوب)



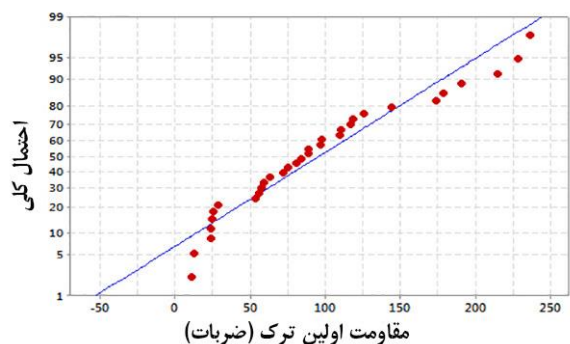
شکل ۷- نمودار احتمال مقاومت اولین ترک SFH3 (مرطوب)



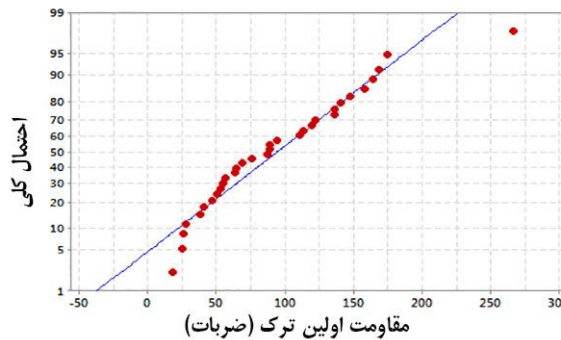
شکل ۱۴- نمودار هیستوگرام مقاومت اولین ترک HST (مرطوب)



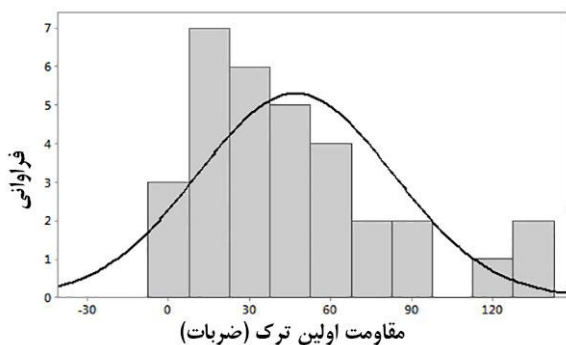
شکل ۸- نمودار هیستوگرام مقاومت اولین ترک SFC2 (مرطوب)



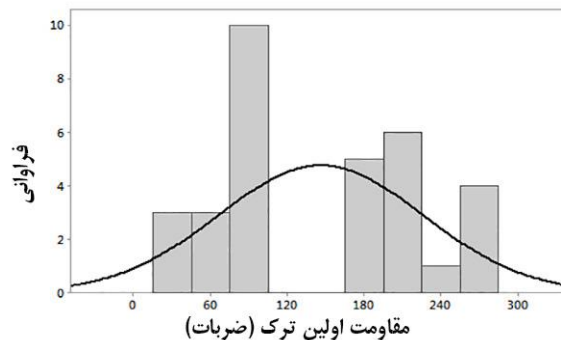
شکل ۱۵- نمودار احتمال مقاومت اولین ترک HST (مرطوب)



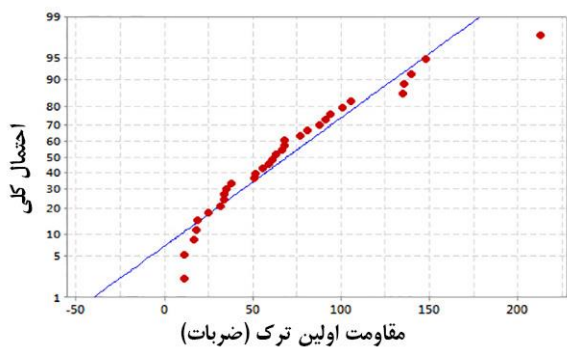
شکل ۱۱- نمودار احتمال مقاومت اولین ترک SFC2 (مرطوب)



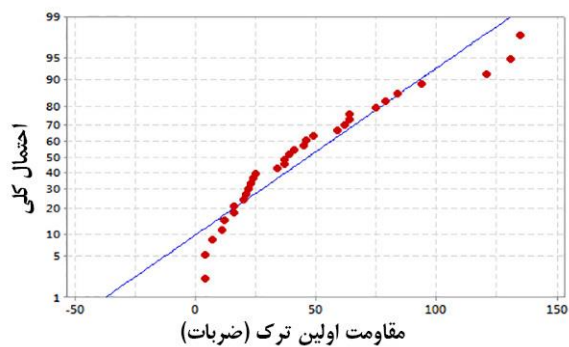
شکل ۱۶- نمودار هیستوگرام مقاومت اولین ترک NC (خشک)



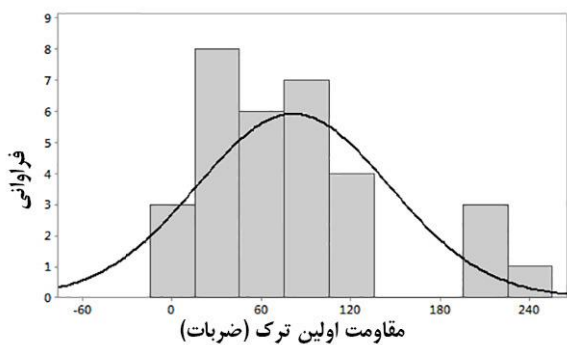
شکل ۱۲- نمودار هیستوگرام مقاومت اولین ترک SFC5 (مرطوب)



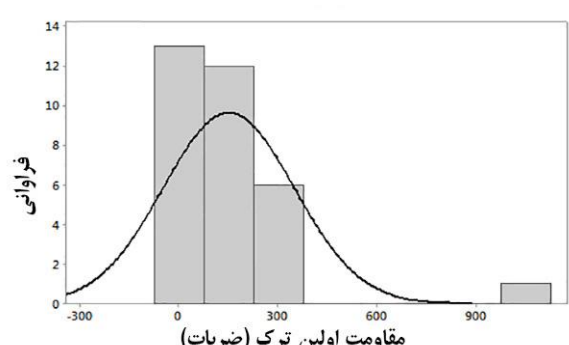
شکل ۲۱- نمودار احتمال مقاومت اولین ترک SFC2 (خشک)



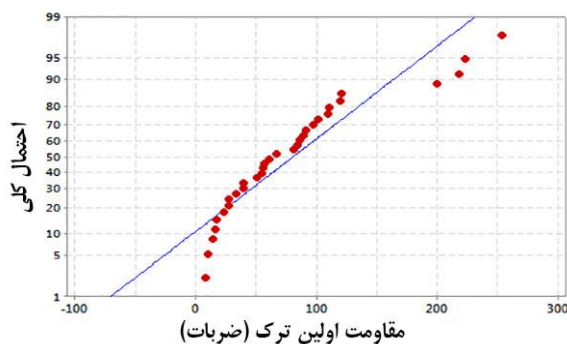
شکل ۱۷- نمودار احتمال مقاومت اولین ترک NC (خشک)



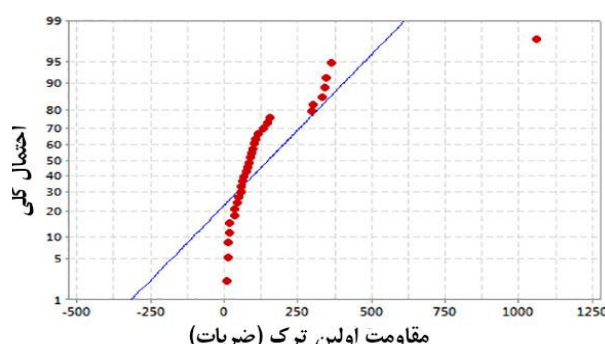
شکل ۲۲- نمودار هیستوگرام مقاومت اولین ترک SFC5 (خشک)



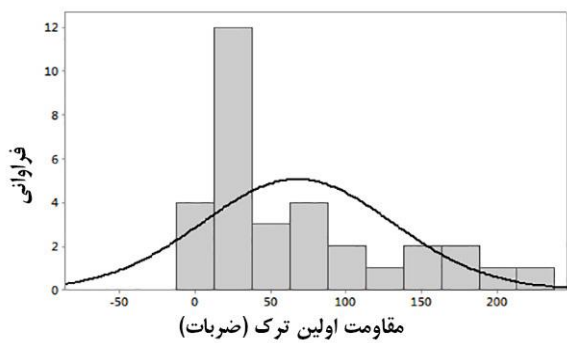
شکل ۹- نمودار هیستوگرام مقاومت اولین ترک SFH3 (خشک)



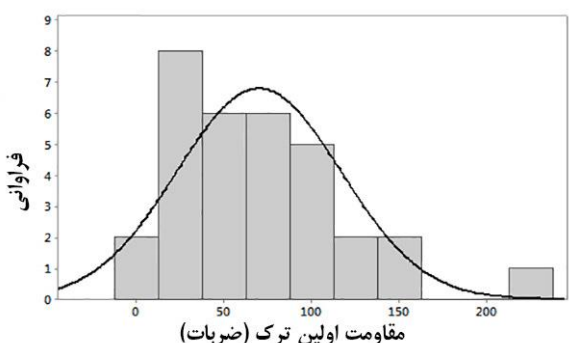
شکل ۲۳- نمودار احتمال مقاومت اولین ترک SFC5 (خشک)



شکل ۱۹- نمودار احتمال مقاومت اولین ترک SFH3 (خشک)



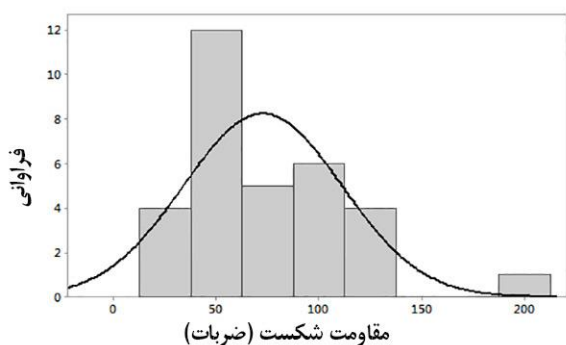
شکل ۲۴- نمودار هیستوگرام مقاومت اولین ترک HST (خشک)



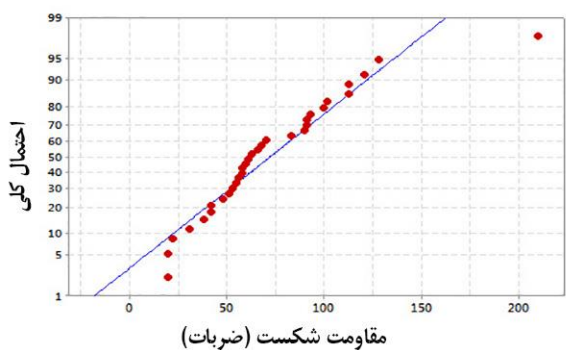
شکل ۲۰- نمودار هیستوگرام مقاومت اولین ترک SFC2 (خشک)

اسمیرنوف در جداول (۱) و (۲) حاکی از توزیع تقریباً نرمال مقاومت شکست مخلوط‌های SFC2، SFC5 و HST در محیط مرطوب است. به علاوه در محیط خشک توزیع تقریباً نرمال مخلوط SFC2 رویت گردید.

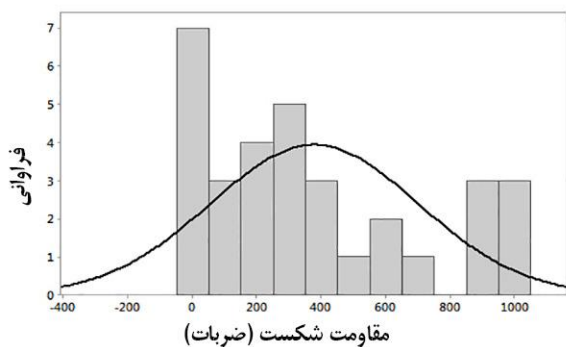
جدول (۳) مقاومت شکست در دو محیط عمل‌آوری از طریق آزمون کروسکال-والیس نسبت به بتن معمولی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت شکست در محیط مرطوب برای SFC2، SFC5، HST و SFH3 نسبت به بتن معمولی به ترتیب دارای مقادیر P برابر ۰/۰۰۰، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۰ و ۰/۰۰۱ می‌باشند. همچنین در محیط خشک مقادیر به ترتیب برابر ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۶۴ حاصل گردید.



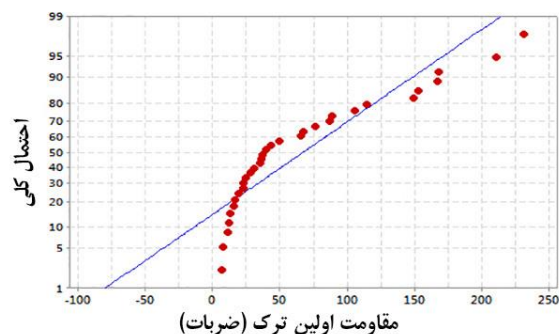
شکل ۱۰- نمودار هیستوگرام مقاومت شکست NC (مرطوب)



شکل ۲۷- نمودار احتمال مقاومت شکست NC (مرطوب)



شکل ۲۸- نمودار هیستوگرام مقاومت شکست SFH3 (مرطوب)



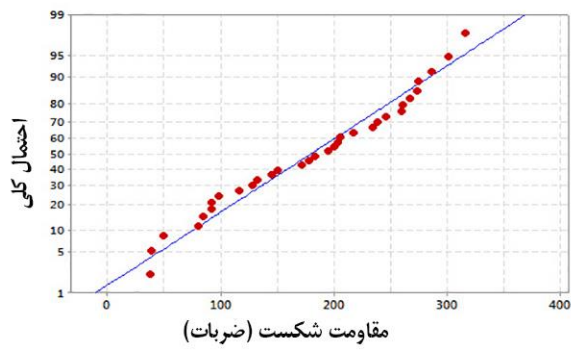
شکل ۲۵- نمودار احتمال مقاومت اولین ترک HST (خشک)

۴-۳-۲- مقاومت شکست

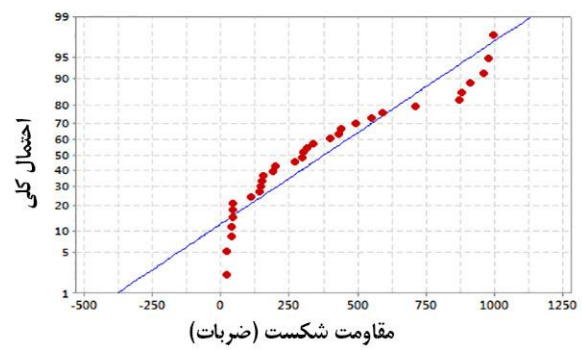
بر طبق مقادیر میانگین مقاومت ارائه شده در جداول (۱) و (۲)، در محیط مرطوب میانگین مقاومت شکست بتن معمولی ۷۲ ضربه می‌باشد. میانگین ضربات مقاومت شکست مخلوط‌های SFC2، SFC5، HST و SFH3 به ترتیب ۳۷۸، ۱۱۵، ۱۸۰ و ۱۲۳ ضربه است که نشان از بهبود مقاومت شکست بتن، با افزودن الیاف فولادی دارد. همانند آنچه در مقاومت اولین ترک مشاهده شد، میانگین ضربات لازم برای مقاومت شکست در بتن حاوی الیاف فولادی موج‌دار ۵ سانتی‌متری نسبت به بتن حاوی الیاف فولادی موج‌دار ۲ سانتی‌متری افزایش می‌یابد که دگرگاران اثبات کننده نقش مؤثر نسبت طول به قطر بالاتر در افزایش مقاومت ضربه‌ای بتن می‌باشد. از طرفی الیاف قلاب‌دار عملکرد بهتری در افزایش مقاومت شکست بتن نسبت به الیاف موج‌دار حتی با نسبت طول به قطر پایین‌تر دارد.

در محیط خشک میانگین مقاومت شکست بتن معمولی ۵۳ ضربه می‌باشد و میانگین ضربات مقاومت شکست مخلوط‌های SFC2، SFC5، HST و SFH3 به ترتیب ۱۶۱، ۸۱، ۹۶ و ۸۶ ضربه می‌باشد. بنابراین در محیط خشک هم چون محیط مرطوب افزودن الیاف فولادی به بتن باعث بهبود مقاومت شکست می‌گردد. میانگین ضربات برای رخ‌داد شکست در محیط مرطوب نسبت به محیط خشک برای بتن معمولی ۱/۳۵۸ برابر، بتن حاوی الیاف فولادی قلاب‌دار ۳ سانتی‌متری ۲/۳۴۷ برابر، موج‌دار ۲ سانتی‌متری ۱/۴۱۹ برابر، موج‌دار ۵ سانتی‌متری ۱/۸۷۵ برابر و ترکیب الیاف ۱/۴۳۰ برابر می‌باشد. همانند مقاومت اولین ترک، قیاس ضرایب تغییر مقاومت شکست در دو محیط نیز کسب مقادیر بالاتر از سوی محیط خشک نسبت به محیط مرطوب را نشان می‌دهد.

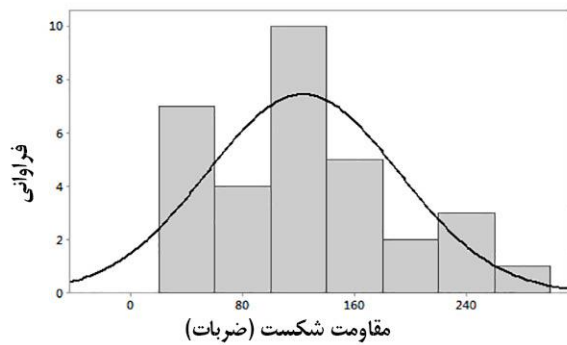
اشکال هیستوگرام و احتمال نرمال مقاومت شکست برای محیط مرطوب از شکل (۲۶) تا (۳۵) برای مخلوط‌های مختلف قابل رویت می‌باشد. همچنین شکل‌های مذکور برای مقاومت شکست در محیط خشک از شکل (۳۶) تا (۴۵) نمایش داده شده است. بررسی شکل‌ها و نتایج حاصل از آزمون کولموگوروف-



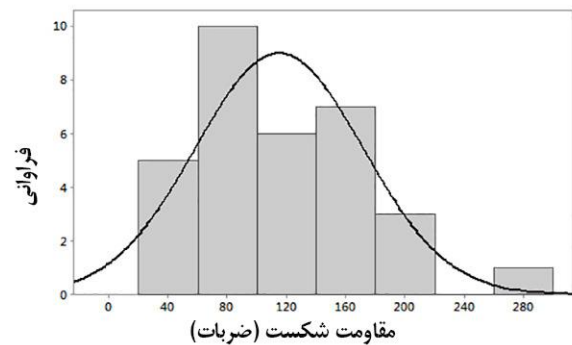
شکل ۳۳- نمودار احتمال مقاومت شکست SFC5 (مرطوب)



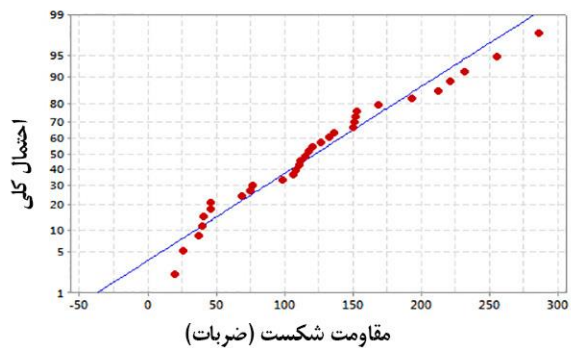
شکل ۲۹- نمودار احتمال مقاومت شکست SFH3 (مرطوب)



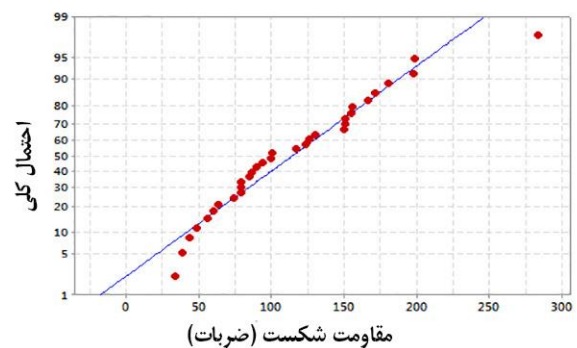
شکل ۳۴- نمودار هیستوگرام مقاومت شکست HST (مرطوب)



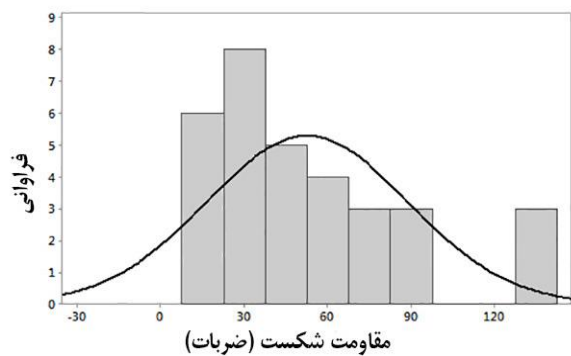
شکل ۳۰- نمودار هیستوگرام مقاومت شکست SFC2 (مرطوب)



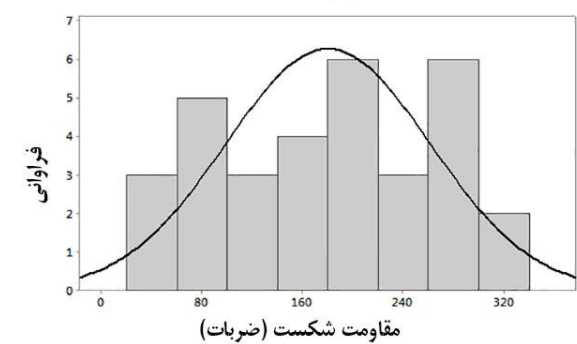
شکل ۳۵- نمودار احتمال مقاومت شکست HST (مرطوب)



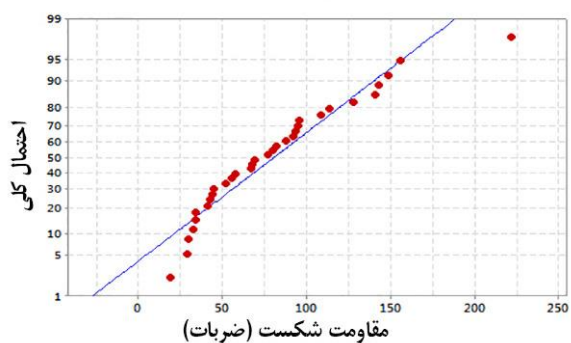
شکل ۳۱- نمودار احتمال مقاومت شکست SFC2 (مرطوب)



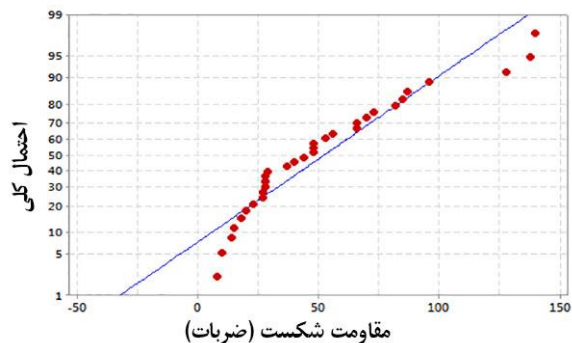
شکل ۳۶- نمودار هیستوگرام مقاومت شکست NC (خشک)



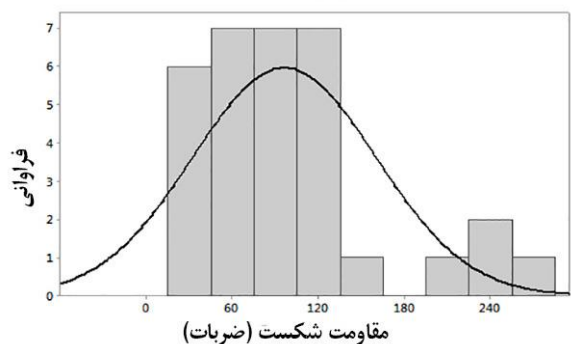
شکل ۳۲- نمودار هیستوگرام مقاومت شکست SFC5 (مرطوب)



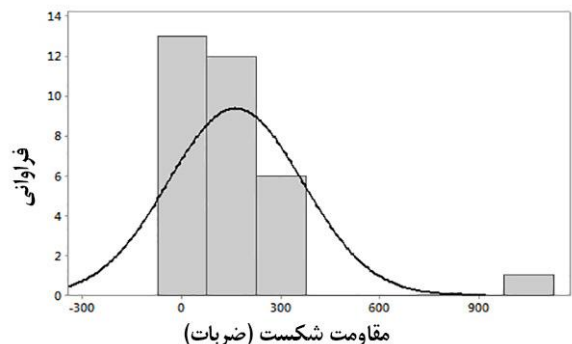
شکل ۴۱- نمودار احتمال مقاومت شکست SFC2 (خشک)



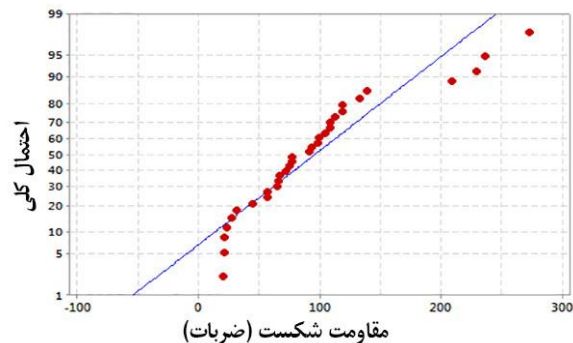
شکل ۳۷- نمودار احتمال مقاومت شکست NC (خشک)



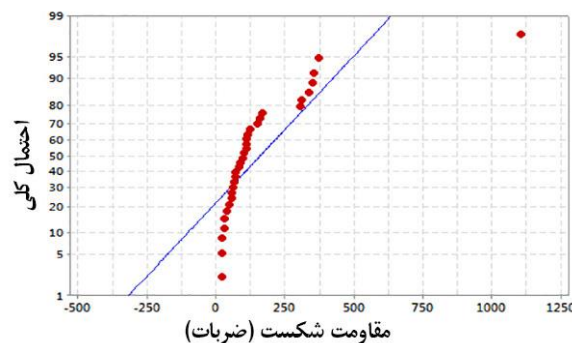
شکل ۴۲- نمودار هیستوگرام مقاومت شکست SFC5 (خشک)



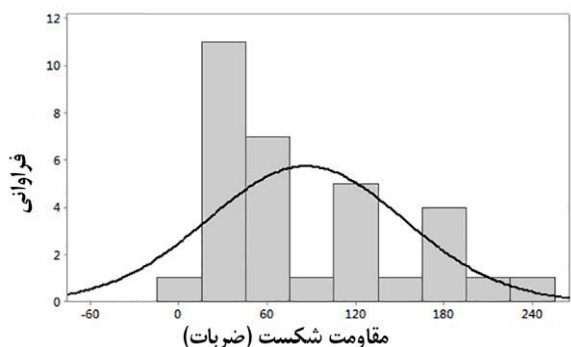
شکل ۳۸- نمودار هیستوگرام مقاومت شکست SFH3 (خشک)



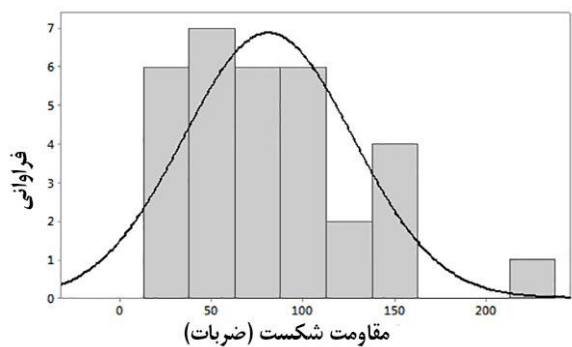
شکل ۴۳- نمودار احتمال مقاومت شکست SFC5 (خشک)



شکل ۳۹- نمودار احتمال مقاومت شکست SFH3 (خشک)



شکل ۴۴- نمودار هیستوگرام مقاومت شکست HST (خشک)



شکل ۴۰- نمودار هیستوگرام مقاومت شکست SFC2 (خشک)

و خشک در جداول (۴) و (۵) نمایش داده شده است که در آن N_{p-fail} نشان‌دهنده مقاومت شکست و N_{first} مقاومت اولین ترک می‌باشد. همان گونه که ملاحظه می‌گردد، رابطه خطی با ضریب همبستگی مناسب میان مقاومت‌های اولین ترک و شکست در نمونه‌های بتنی در هر دو محیط قابل تأیید می‌باشد.

جدول ۵- معادلات پیش‌بینی مقاومت شکست در محیط خشک

نام مخلوط	محیط	معادلات	ضریب همبستگی
NC	خشک	$N_{p-fail} = 1/0.02 N_{first} + 5/487$	۰/۹۹۸
SFH3		$N_{p-fail} = 1/0.27 N_{first} + 7/23$	۰/۹۹۹
SFC2		$N_{p-fail} = 0/980 N_{first} + 12/61$	۰/۹۹۳
SFC5		$N_{p-fail} = 0/982 N_{first} + 16/56$	۰/۹۹۶
HST		$N_{p-fail} = 1/0.38 N_{first} + 15/95$	۰/۹۸۰

۵- نتیجه‌گیری

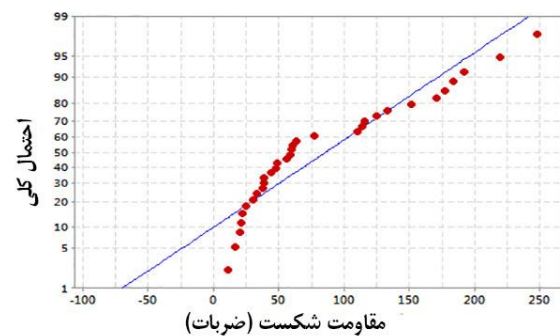
در این مطالعه تأثیر استفاده از انواع الیاف فولادی بر مقاومت ضربه‌ای بتن در شرایط مختلف عمل‌آوری به صورت آزمایشگاهی و آماری تحلیل شده است که نتایج پیشرو قابل استنباط می‌باشد. ۱- مقاومت فشاری بتن با مسلح نمودن آن به الیاف فولادی افزایش یافت. افزون بر آن عمل‌آوری نمونه‌ها در محیط مرطوب باعث افزایش سطح مقاومت بتن در مقابل بار فشاری می‌گردد. از طرفی الیاف موج‌دار ۵ سانتی‌متری با طول به قطر بالاتر نسبت به مابقی الیاف‌ها، مقاومت فشاری بالاتری برای بتن فراهم آورده است.

۲- الیاف فولادی در هر دو محیط عمل‌آوری سبب بهبود مقاومت کششی بتن می‌گردد. البته، بیش‌ترین مقاومت کششی در بتن حاوی الیاف قلاب‌دار ۳ سانتی‌متری به مقدار ۴/۲۹ مگاپاسکال نتیجه شده است.

۳- حضور الیاف در بتن، تعداد ضربات لازم برای مشاهده اولین ترک، شکست و همچنین تعداد ضربات بعد از اولین ترک را بهبود می‌بخشد. با مدنظر قرار دادن مقدار میانگین، بتن حاوی الیاف قلاب‌دار ۳ سانتی‌متری بهترین عملکرد را در بهبود مقاومت‌های اولین ترک و شکست بتن در هر دو محیط عمل‌آوری داشت.

۴- با در نظر گرفتن نسبت طول به قطر، حضور الیاف موج‌دار با نسبت طول به قطر بالاتر عملکرد بهتری در افزایش مقاومت‌های اولین ترک و شکست دارد. با این حال شکل الیاف نیز در مقاومت ضربه‌ای بتن تأثیرگذار می‌باشد به نحوی که الیاف قلاب‌دار عملکرد بهتری در افزایش مقاومت‌های اولین ترک و شکست بتن نسبت به الیاف موج‌دار حتی با نسبت طول به قطر پایین‌تر دارند.

۵- علاوه بر افزودن الیاف، عمل‌آوری مناسب می‌تواند باعث ارتقاء سطح مقاومت ضربه‌ای بتن گردد.



شکل ۴۵- نمودار احتمال مقاومت شکست HST (خشک)

۴-۳-۳- تعداد ضربات بعد از اولین ترک

مقایسه جداول (۱) و (۲) نشان می‌دهد که در محیط مرطوب و خشک میانگین تعداد ضربات بعد از اولین ترک برای بتن معمولی ۶ ضربه است. این میزان در محیط مرطوب برای مخلوط‌های SFH3، SFC2، SFC5 و HST به ترتیب ۶/۵، ۳/۳۳، ۵/۶۶ و ۴/۵ برابر بتن معمولی و در محیط خشک برای مخلوط‌های SFH3، SFC2، SFC5 و HST به ترتیب ۱/۸۳، ۱/۸۳، ۲/۵ و ۳/۱۶ برابر بتن معمولی است. این امر دگر بار اثبات‌کننده کارایی تقویت بتن توسط الیاف فولادی می‌باشد. از طرفی این اعداد نشان می‌دهد که عمل‌آوری در محیط مرطوب می‌تواند باعث بهبود تعداد ضربات بعد از اولین ترک در بتن الیافی گردد.

مقایسه INPB در دو محیط عمل‌آوری از طریق آزمون کروسکال-والیس نسبت به بتن معمولی در جدول (۳) نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بتن حاوی الیاف فولادی در هر دو محیط عمل‌آوری به طور معنادار تعداد ضربات بعد از رخداد اولین ترک را افزایش داده است و این بدین معنی است که حضور الیاف باعث بازداری از نفوذ ترک می‌گردد و تأخیر در شکست را نتیجه می‌دهد.

جدول ۴- معادلات پیش‌بینی مقاومت شکست در محیط مرطوب

نام مخلوط	محیط	معادلات	ضریب همبستگی
NC	مرطوب	$N_{p-fail} = 0/975 N_{first} + 7/981$	۰/۹۹۹
SFH3		$N_{p-fail} = 1/0.04 N_{first} + 37/11$	۰/۹۹۴
SFC2		$N_{p-fail} = 0/995 N_{first} + 20/52$	۰/۹۸۹
SFC5		$N_{p-fail} = 0/970 N_{first} + 38/40$	۰/۹۵۹
HST		$N_{p-fail} = 1/0.47 N_{first} + 22/30$	۰/۹۷۳

۴-۳-۴- پیش‌بینی مقاومت شکست

بر پایه تجزیه و تحلیل رگرسیون نتایج مقاومت ضربه، معادلات پیش‌بینی ایجاد شده برای مقاومت شکست در دو محیط مرطوب

369.
 Song (A) PS, Wu JC, Hwang S, Sheu BC, "Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel polypropylene hybrid fiber reinforced concrete", *Constr Build Mater*, 2005, 19, 1-9.
 Song (B) PS, Wu JC, Hwang S, Sheu BC, "Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength steel fiber-reinforced concrete", *Cement and Concrete Research*, 2005, 35, 393-399.
 Wang HT, Wang LC, "Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, 2013, 38, 1146-1151.

۶- نگهداری نمونه‌ها در محیط خشک نه تنها باعث کاهش میزان مقاومت اولین ترک و مقاومت شکست بتن می‌گردد بلکه تغییرپذیری مقاومت اولین ترک و مقاومت شکست را تعریف نموده و به عبارتی پراکندگی بیشتری را منجر می‌شود.
 ۷- رابطه خطی با ضریب همبستگی مناسب بین تعداد ضربات برای اولین ترک و شکست برای هر دو محیط عمل‌آوری وجود دارد. این روابط با فراهم آوردن امکان انجام تخمین برای تعداد ضربات مورد نیاز برای شکست می‌تواند اطلاعات مفیدی پیش از شکست کامل در حیطه پتانسیل مقاومت ضربه در اختیار قرار دهد.

۶- مراجع

- ACI Committee 544, 1R-96, "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete", Reapproved, 2002.
 ACI Committee 544, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete", In ACI Committee 544, 1988, 583-593.
 Alavinia A, Hedayatian M, Nili M, Afroughsabet V, "An experimental and numerical study on how steel and polypropylene fibers affect the impact resistance in fiber-reinforced concrete", *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 46, 62-73.
 El-Dieb AS, "Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra- high- strength self-compacting concrete incorporating steel fibers", *Materials and Design*, 2009, 30 (10), 4286-4292.
 Fakhari M, Dalvand A, Arezoumandi M, Sharbatdar M, Chen G, Kheyroddin A, "Mechanical properties of high performance fiber reinforced cementitious composites", *Construction and Building Materials*, 2014, 71, 510-520.
 Mastali A, Dalvand A, "The impact resistance and mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with recycled CFRP pieces", *Composites Part B*, 2016, 92, 360-376.
 Mastali A, Dalvand A, Sattarifard A, "The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fiber reinforced polymers", *Journal of Cleaner Production*, 2016, 124, 312-324.
 Neville AM, "Properties of concrete", London, Longman, 1995.
 Nikoui A, Dalvand A, Sharbatdar MK, Kheyroddin A, "Experimental and Statistical Investigation on of Synthetic Fiber Reinforced Concrete", *Transactions of Civil Engineering*, 2015, 39, 449-468.
 Nili M, Afroughsabet V, "Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete", *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37 (8), 879-886.
 Nili M, Afroughsabet V, "Property assessment of steel-fibre reinforced concrete made with silica fume", *Construction and Building Materials*, 2012, 28 (1), 664-669.
 Rahmani T, Kiani B, Shekarchi M, Safari A, "Statistical and experimental analysis on the behavior of fiber reinforced concretes subjected to drop weight test", *Construction and Building Materials*, 2012, 37, 360-

EXTENDED ABSTRACT

The Impact Resistance of Steel Fiber Reinforcement Concrete under Different Curing Conditions: Experimental and Statistical Analysis

Mohammad Mohtasham Moein^a, S. Yasin Mousavi^{b,*}, Rahmat Madandoust^c, Hamidreza Naser Saeid^a

^a Department of Civil Engineering, Alame Mohadse Noori University, Mazandaran, Iran

^b Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran

^c Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Received: 08 February 2017; Accepted: 26 August 2017

Keywords:

Fiber-reinforcement concrete, Steel fiber, Impact resistance, Curing condition.

1. Introduction

The utilization of steel fiber reinforcement concrete (SFRC) in practical applications is gained considerable attention owing to its acceptable strength (Nili & Afroughsabet, 2010; El-Dieb, 2009) and durability. Taking to account, SFRC in constructions may inevitably subjected to short duration dynamic loading, the impact resistance of SFRC which cured under different curing conditions must be well documented. To evaluate the resistance of SFRC under impact loadings, a variety of test procedures have been suggested (ACI Committee 544, 1996). In this study, the drop-weight test as recommended by ACI committee 544 (ACI Committee 544, 1996) were utilized.

2. Experimental plan

The materials used in this study were (1) Type II Portland cement, (2) river sand with water absorption of 1.3%, (3) crushed gravel with maximum size of 12.5 mm, (4) Polycarboxylic based superplasticizer and (5) steel fibers with different geometry (hooked-end and crimped fibers).

To assess the scope of this study, five concrete mixtures including reference concrete (NC) and four fiber reinforcement concrete namely, SFH3 (containing hooked-end steel fibers with a length of 3cm), SFC2 (containing crimped steel fibers with a length of 2cm), SFC5 (containing crimped steel fibers with a length of 5cm) and HST (containing combined use of hooked-end and crimped steel fibers) were produced. After casting, they were exposed to different curing conditions of water and room curing conditions. The impact resistance of each mixes was determined on the 64 concrete discs cut from 15×30 cm cylindrical specimens. Moreover, the influence of different curing conditions on the compressive and splitting tensile strengths of SFRC was also evaluated.

3. Results and discussion

Results of this study showed that compressive and splitting tensile strengths of SFRC is enhanced by the incorporation of steel fibers. The highest compressive strength was achieved for concrete mixture containing crimped steel fibers with a length of 5 cm and hooked-end steel fiber in concrete resulted in the highest splitting tensile strength. Irrespective of steel fiber geometric, the strength of concrete mixtures cured under continuous water curing was larger than those obtained for room curing condition.

The mean number of blows required to observe the first visible crack for specimens cured under continuous water curing was determined to be 66 blows which increased to 339, 95, 146 and 96 blows for SFH3, SFC2,

* Corresponding Author

E-mail addresses: ramiiinmohtasham@gmail.com (Mohammad Mohtasham Moein), y.mousavi@gu.ac.ir (S. Yasin Mousavi), r.madandoust@yahoo.com (Rahmat Madandoust), h_nasersaeed@hotmail.com (Hamidreza Naser Saeida).

SFC5 and HST, respectively. Furthermore, failure strength of NC is increased by the introduction of hooked-end steel fibers. Similar trend was also obtained for the specimens cured under room curing condition.

The frequency histogram and fitted normal curve of concrete mixtures (Figs. 1-8) and the corresponding Kolmogorov-Smirnov p-values results revealed that the first-crack of SFC2 and HST under water curing condition and NC and SFC2 under room curing is approximately normally distributed. This can also be seen for the failure strength of SFC2, SFC5 and HST under water curing condition and for SFC2 concrete mixtures under room curing conditions.

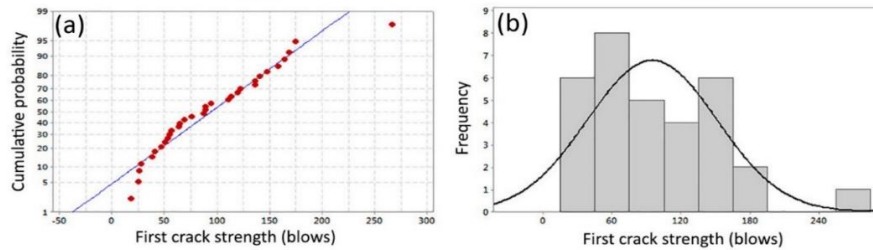


Fig. 1. First crack strength of SFC2 under water curing: a) Normal probability, b) Frequency histogram

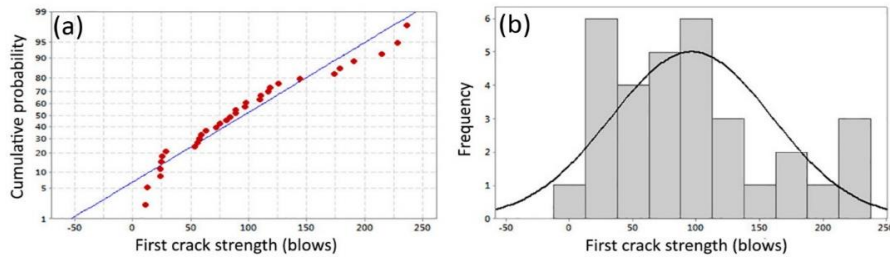


Fig. 2. First crack strength of HST under water curing: a) Normal probability, b) Frequency histogram

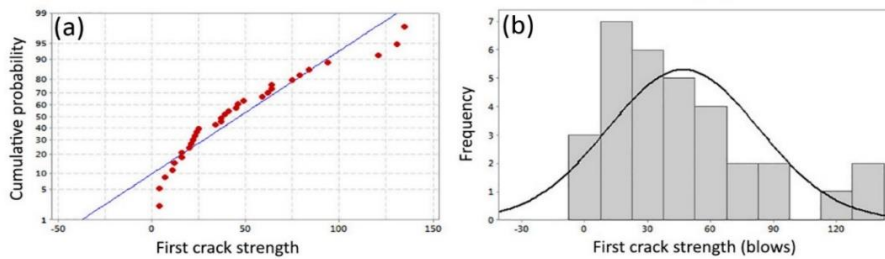


Fig. 3. First crack strength of NC under room curing: a) Normal probability, b) Frequency histogram

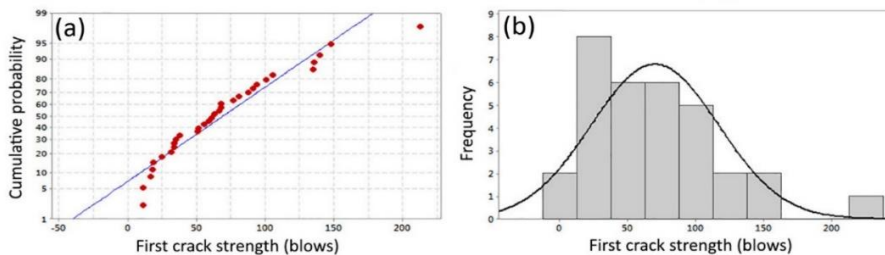


Fig. 4. First crack strength of SFC2 under room curing: a) Normal probability, b) Frequency histogram

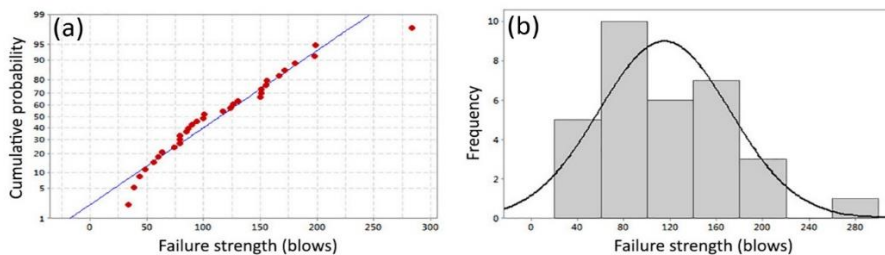


Fig. 5. Failure strength of SFC2 under water curing: a) Normal probability, b) Frequency histogram

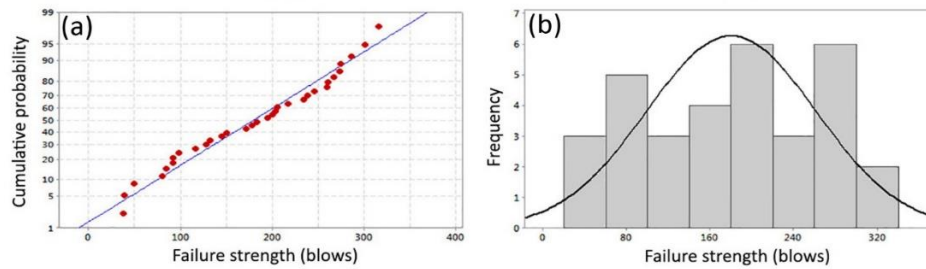


Fig. 6. Failure strength of SFC5 under water curing: a) Normal probability, b) Frequency histogram

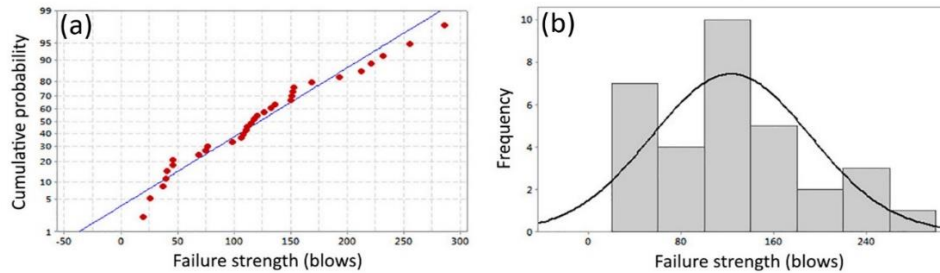


Fig. 7. Failure strength of HST under water curing: a) Normal probability, b) Frequency histogram

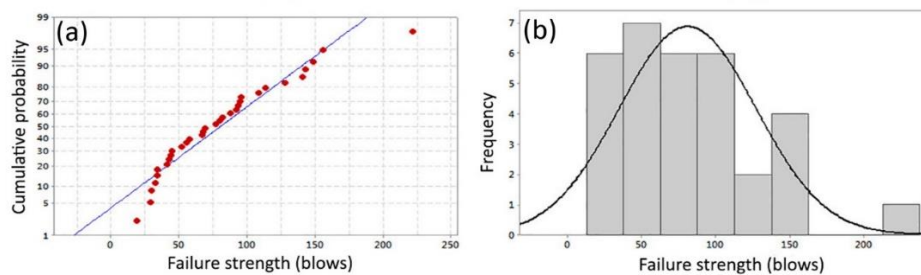


Fig. 8. Failure strength of SFC2 under room curing: a) Normal probability, b) Frequency histogram

4. Conclusions

By using steel fibers, compressive strength, splitting tensile strength and impact resistance of concrete will be increased, irrespective of curing conditions. In comparison with water cured specimens, curing concrete specimens under room condition not only reduces the impact resistance of SFRC, but also widens the first crack and failure strengths variability. As a result of this study, hook-end steel fibers are more effective than crimped steel fibers in increasing the impact resistance of SFRC, even with a lower aspect ratio.

5. References

- Steel Fibers on ACI Committee 544, "Report on Fiber Reinforced Concrete", ACI Committee 544 report 544, 1R-96, Detroit: American Concrete Institute, 1996.
- El-Dieb AS, "Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers", *Materials and Design*, 2009, 30 (10), 4286-4292.
- Nili M, Afroughsabet V, "Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete", *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37 (8), 879-886.