



بررسی تجربی و تحلیلی خواص خمشی و ضربه ای تیرهای کامپوزیتی فولادی با بتن با عملکرد بالا

حسین حاتمی^{*۱}

^۱ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۰۲

چکیده

در این تحقیق به خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت خمشی و مقاومت در برابر ضربه برای تیرهای کامپوزیت فولادی با بتن با عملکرد بالا پرداخته می‌شود. در ساخت قسمت فولادی نمونه‌ها از مقطع سپری نمره ۴ که در قسمت کششی از ورق با ضخامت ۵ میلیمتر و در دو عرض ۳۰ و ۴۰ میلیمتر به طول ۷۰ سانتیمتر استفاده می‌شود. لازم به ذکر است، بال فشاری تعدادی از نمونه‌ها بوسیله بتن با نسبت الیاف فولادی متفاوت تقویت شده است. در ساخت بتن نمونه‌ها از بتن خود متراکم با ۳ درصد الیاف فولادی متفاوت که عبارتند از ۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰ درصد استفاده گردید. نتایج آزمایش‌های ضربه نشان داد، میزان جذب انرژی و همچنین نیروی بیشینه اولیه با افزایش درصد الیاف افزایش یافته، به طوری که بیشترین جذب انرژی مربوط به تیر w4hc4sf1 است که نسبت به نمونه بدون بتن ۰/۰۹ درصد افزایش داشته است. در مورد نتایج آزمایش خمشی نیز با بیشتر شدن الیاف مقدار مقاومت بطور متناوب افزایش یافت، به طوری که تیر w4hc4sf1 بهترین عملکرد را داشته که افزایش مقاومت آن نسبت به نمونه مشابه بدون بتن برابر ۲۰۴ درصد بوده است.

کلمات کلیدی: بتن با عملکرد بالا، خمش، ضربه، کامپوزیت

Experimental and analytical investigation of bending and impact properties of steel composite beams with high-performance concrete

H. Hatami^{*۱}

^۱ Assoc. Prof., Mech. Eng., Lorestan Univ., Khorramabad, Iran

Abstract

In this research, the mechanical properties including bending strength and impact resistance for steel composite beams with high-performance concrete are discussed. In the construction of the steel part of the specimens, the shield cross-section grade 4 is used in the tensile part of the sheet with a thickness of 5 mm and two widths of 30 and 40 mm, and a length of 70 cm. It should be noted that the compression wing of some specimens is made of concrete with Different steel fibers reinforced. Self-compacting concrete with 3 percent of different steel fibers, which are 0, 0.5, and 1 percent, was used in making the concrete of the specimens. The results of the impact tests showed that the amount of energy absorption as well as the initial maximum force increased with the increase in the percentage of fibers so that the highest energy absorption is related to the w4hc4sf1 beam, which has increased by 0.09% compared to the specimen without concrete. Regarding the results of the bending test, the resistance value increased intermittently with the increase of fibers, so the w4hc4sf1 beam had the best performance, and its strength increase compared to the same specimen without concrete was equal to 204%.

Keywords: High performance concrete, bending, impact, composite.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۶۶۳۳۳۵۶۳۱۲، فکس: ۰۶۶۳۳۳۵۶۳۱۲

آدرس پست الکترونیک: h64hatami@gmail.com، hatami.h@lu.ac.ir

۱- مقدمه

بتن و فولاد دو نوع مصالحی هستند که امروزه بیشتر از سایر مصالح در ساختمان انواع بناها به کار برده می‌شوند و شاید به جرأت می‌توان گفت که بدون این دو پیشرفت جوامع بشری به شکل کنونی میسر نبود. مزایای هردو مصالح امروزه به خوبی شناخته شده است. بتن مصالحی با سختی بالا، ارزان قیمت (نسبت به سایر مصالح) و مقاومت قابل توجه در برابر آتش سوزی و ضمناً فولاد مصالحی با شکل پذیری و مقاومت بالا و وزن کم است [۱]. با این وجود استفاده از فولاد تنها در ساختن ستون‌ها بخصوص در سازه‌های بلند، غیر اقتصادی است؛ همچنین استفاده از تیرهای فولادی مدفون در بتن با حداقل پوشش تا مدت‌ها به عنوان یک تیر مرکب مورد توجه مهندسين به علت ظرفیت باربری بالای آن نسبت به تیر فولادی یا دال بتنی ساده، بوده است. امروزه سیستم‌های مرکب به صورت موفقیت آمیزی در ستون‌ها، تیرها و دال‌های با دهانه‌های متوسط و بزرگ در ساختمان‌ها و همچنین در پایه و تیرهای پل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از تیرها و ستون‌های مرکب باعث همکاری توأم بتن و فولاد در بسیاری از سیستم‌های سازه‌ای در سرتاسر جهان در حال افزایش است. ستون‌های مرکب نه تنها مزایای بسیاری در ساخت (خصوصاً سرعت و اقتصاد) دارند، بلکه باعث بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی اعضای سازه‌ای در مقایسه با اعضای بتن مسلح و فولادی تنها می‌شوند. برای مثال، سازه‌های بلند با ستون‌های فولادی معمولاً دارای تغییر شکل‌های جانبی نسبتاً بزرگ بوده و در مقابل آتش‌سوزی مقاومت پایینی دارند؛ همچنین، استفاده از بتن تنها در ستون‌های ساختمان‌های بلند، در طبقات پائین فضای بیشتری را اشغال نموده و دارای وزن نسبتاً بیشتری است و به علت تردی شکننده بودن بتن، سازه حاصل دارای شکل‌پذیری کمتری بوده و در بارهای لرزه‌ای افت مقاومت در سازه بوجود خواهد آمد. ترکیب هوشمندانه این دو مصالح، یک سیستم موثر و کارا تر از استفاده مجزا از آن‌ها را نتیجه می‌دهد. بتن خودتراکم بتنی بسیار سیال و روان و مخلوطی همگن است که بسیاری از مشکلات بتن معمولی نظیر جدایشگی، آب انداختن، جذب آب، نفوذ پذیری و ... را مرتفع نموده و علاوه بر آن بدون نیاز به هیچ لرزاننده (ویبره) داخلی یا ویبره بدنه قالب، تحت اثر وزن خود متراکم می‌شود [۲]. بتن الیافی در حقیقت نوعی کامپوزیت است که با

بکارگیری الیاف تقویت‌کننده داخل مخلوط بتن، مقاومت کششی فوق‌العاده افزایش می‌یابد. این ترکیب کامپوزیتی، یکپارچگی و پیوستگی مناسبی داشته و امکان استفاده از بتن به عنوان یک ماده شکل‌پذیر جهت تولید سطوح مقاوم پر انحنای را فراهم می‌آورد. بتن الیافی از قابلیت جذب انرژی بالایی نیز برخوردار است و تحت اثر بارهای ضربه‌ای به راحتی از هم پاشیده نمی‌شود. وجود الیاف در بتن، می‌تواند بسیاری از خصوصیات مهندسی از قبیل، مقاومت خمشی، طاقت شکست ۲، مقاومت حرارتی ۳ و مقاومت تحت بارهای ضربه‌ای و مقاومت خستگی را افزایش دهد [۳]. شاهد تاریخی این فن‌آوری، کاربرد کاه‌گل در بناهای ساختمان است. در واقع بتن الیافی نوع پیشرفته این تکنولوژی است که الیاف طبیعی و مصنوعی جدید، جانشین کاه و سیمان جانشین گل بکار رفته در کاه‌گل شده است.

بتن الیافی خواص مناسبی همچون شکل‌پذیری بالا، مقاومت فوق‌العاده، قابلیت جذب انرژی و پایداری در برابر ترک خوردن را دارا است که متناسب با آن‌ها می‌توان موارد کاربرد فراوانی برای آن یافت [۴-۶]. در زمان‌های گذشته، از الیاف جهت تقویت ملات‌های ترد و شکننده استفاده می‌شد که مشهورترین و پرطرفدارترین آن که به علت ارزانی قابل دسترسی بوده و هست، کاه است [۷]. سانگ و هوانگ در سال ۲۰۰۲ در تحقیقی با عنوان "بررسی خصوصیات مکانیکی بتن های پرمقاومت الیافی" برای بررسی خصوصیات مکانیکی بتن های الیافی و پرمقاومت نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی به روش دو نیم شدن نمونه‌های استوانه‌ای، مدول گسیختگی و شاخص طاقت، آزمایشاتی را انجام دادند [۸]. علی اصغر مونسان و همکاران در سال ۱۳۸۸ در تحقیقی با عنوان "ارزیابی خواص بتن خود متراکم حاوی خاکستر بادی و الیاف فولادی" به مطالعه بر روی مشخصات تازگی و مکانیکی بتن خود تراکم مسلح به الیاف و پوزولان خاکستر بادی پرداختند. فوق روان کننده با پایه پلی کربوکسیلات و به همراه افزودنی اصلاح کننده ویسکوزیته (لزجت) یا VMA در طرح مخلوط‌ها مورد استفاده قرار گرفت [۹]. Swam و همکاران در سال ۱۹۹۴ در مقاله‌ای تحت عنوان "بتن مسلح به الیاف" رفتار سازه‌ای بتن‌های الیافی را بررسی کردند [۱۰]. ناتاراجا و همکارانش در سال ۲۰۰۵ میلادی، مقاومت ضربه‌ای بتن مسلح شده را توسط ماشین سقوط چکش با الیاف فولادی با نسبت ظاهری الیاف

اثر الیاف است، بطوریکه با بیشتر شدن نسبت سطح الیاف مقاومت کششی بیشتری در بتن الیافی ایجاد می‌شود. یک موضوع دیگر افزایش مقاومت خمشی در الیاف با ابعاد بزرگتر است [۱۹]. در سال ۲۰۰۶ سولاری و همکاران آزمایش‌هایی را برای بررسی دقیق تر اثر الیاف بر روی مقاومت خمشی بتن الیافی ترتیب دادند. در این آزمایش‌ها با استفاده از عکس‌های اشعه ایکس پراکندگی الیاف در بتن به طور همگن در نمونه های با ابعاد بزرگ تر بررسی شده است [۲۰]. در سال ۲۰۱۴ رابی و همکاران آزمایش‌هایی را بر روی بتن الیافی با ترکیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن انجام دادند. در این آزمایش‌ها تلاش شد تا مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن الیافی مورد بررسی قرار گیرد [۲۱]. تسو-لیانگ تنگ و همکارانش سه نوع بتن مسلح شده با الیاف فولادی را با مقاومتی در حدود ۳۰ مگاپاسکال به روش‌های آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی تحت برخورد پرتابه با سرعت بالا مورد بررسی قرار دادند. در شبیه سازی‌های انجام شده، از مدل مصالح ارتجاعی-خمیری هیدرودینامیک برای مدل کردن رفتار بتن‌های الیافی استفاده شده بود. نتایج عددی بدست آمده در مولفه‌های قطر حفره در جلو و پشت نمونه و همچنین سرعت پسماند پرتابه، تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند [۲۲]. وظیفه خواه و مناف پور در سال ۱۳۹۱ در مقاله‌ای تحت عنوان " تاثیر الیاف فولادی و پروپیلن بر مقاومت کششی بتن‌های الیافی با مقاومت زمینه یکسان" با ساختن نمونه‌های استوانه‌ای در سه اندازه ۱۵۰×۳۰۰ میلی متر، ۱۰۰×۲۰۰ میلی متر و ۷۵×۱۵۰ میلی متر و همچنین تیرهای منشوری با درصد‌های الیاف‌های فولادی شامل ۰، ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ درصد و درصد‌های مختلف الیاف‌های پلی پروپیلن (PP) شامل ۰، ۰/۲ و ۰/۴ درصد و انجام آزمایش کشش برزیلی و خمش بتن پرداختند [۲۳]. فاندروال سال ۲۰۰۸ در مقاله‌ای با عنوان " بتن مسلح با الیاف ترکیبی"، آزمایشاتی را بر روی بتن مسلح شده با الیاف ترکیبی انجام داد. وی از سه نوع الیاف فولادی (الیاف بسیار کوتاه به طول ۶ میلیمتر، الیاف کوتاه به طول ۱۳ میلیمتر و الیاف بلند انتهای قلابدار به طول ۳۵ میلیمتر) استفاده کرد [۲۴]. فروغی اصل و حسین نژاد به بررسی تاثیر الیاف پروپیلنی بر خواص مکانیکی و نفوذپذیری بتن پرداختند. نتایج آنها بیانگر این است که مقاومت فشاری اولیه نمونه‌های بتن الیافی نسبت به نمونه‌های شاهد کمتر بوده، ولی با افزایش سن نمونه

(یعنی نسبت طول به قطر) برابر با ۴۰ را در دو مقاومت ۳۰ و ۵۰ مگاپاسکال بررسی کردند [۱۱]. فرنام در سال ۲۰۰۸ میلادی، یک نوع بتن خودمترکم مسلح شده با الیاف (که میزان الیاف دو درصد حجم بتن عنوان شده بود) را بوسیله آزمون سقوط چکش به وزن ۸/۵ کیلوگرم که از ارتفاع یک متری تحت وزن خود بر روی پانل‌های بتنی ساخته شده سقوط می‌کرد، مورد ارزیابی ضربه‌ای قرار داد [۱۲]. مقاومت ضربه‌ای یک نوع بتن الیافی را تحت آزمایش سقوط وزنه ۵/۵ kg و ارتفاع سقوط ۴۵۷ mm بر روی پانل‌های بتنی مسلح شده با ۱٪، ۱/۵٪ و ۲٪ الیاف (بر حسب حجم بتن) بررسی کردند [۱۳]. در سال ۱۹۳۹ یک روش برای بهبود رفتار بتن مسلح یافت. او از الیاف سیم آهنی تقریباً به طول ۱۰۰ میلیمتر و قطر ۱۰ میلیمتر که به الیاف فولادی مورد استفاده در بتن امروزی بسیار شبیه بود استفاده کرد و نتیجه گرفت که مقاومت های کششی، فشاری و برشی افزایش می یابد [۱۴]. خواص بتن با مقاومت بالا را با افزودن الیاف فولادی بررسی کردند. نتایج آزمایش نشان داد که با افزایش الیاف فولادی مقاومت کششی بصورت خطی افزایش می یابد و سرعت افزایش در ۷ روز اول بیشتر است [۱۵]. آزمایشی را جهت مقایسه رفتار دال بتنی مسلح با استفاده از الیاف فولادی و پلی پروپیلن انجام داد. نتایج آزمایش نشان می دهد که افزایش یک درصد حجمی الیاف فولادی بهترین تاثیر را در شکل پذیری دال‌ها دارد. [۱۶]. در سال ۲۰۰۳ یائو و همکاران بتن حاوی الیاف فولادی، کربنی و پروپیلن با درصد‌های مختلف را مورد آزمایش مقاومت خمشی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در هر صورت اضافه کردن الیاف، بتن را نسبت به بتن معمولی مقاوم تر و شکل پذیرتر می‌سازد که بیشترین مقاومت خمشی مربوط به الیاف فولادی است. [۱۷]. فلدمن در مقاله ای نشان داد که استفاده از الیاف فولادی علاوه بر افزایش کرنش خرابی، جذب انرژی در بتن را نیز افزایش می‌دهد. در یکی از موارد استفاده از این الیاف و یک الیاف کمکی دیگر، جذب انرژی نمونه در معرض هوا قرار گرفته تا ۴۰ درصد نسبت به نمونه بتن معمولی بیشتر شده است [۱۸]. در سال ۲۰۰۶ یوتسون و همکاران برای مشخص نمودن اثر الیاف فولادی آزمایش‌هایی را بر روی این نوع از بتن‌های الیافی انجام دادند. این آزمایش‌ها نشان داد که الیاف ریزتر مقاومت فشاری را بیشتر افزایش می دهند. همچنین نسبت سطح الیاف ریزتر پارامتر با اهمیتی در بررسی

قیف ۷ و کاهش در جریان اسلامپ و درصد پراکندگی جعبه را موجب شد [۳۱]. این محقق در مطالعه دیگری افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن‌های پر مقاومت حاوی الیاف فولادی را گزارش کرد. در این پژوهش به بررسی اثر مقادیر متفاوت الیاف فولادی بر خواص تازه و سخت شده بتن خود تراکم سبک حاوی سبکدانه‌های رس منبسط شده پرداخته شده است [۳۲].

در این تحقیق به خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت خمشی و مقاومت در برابر ضربه برای تیرهای کامپوزیت فولادی با بتن با عملکرد بالا پرداخته می‌شود. میزان جذب انرژی و همچنین نیروی بیشینه اولیه با افزایش درصد الیاف افزایش یافته است. در مورد نتایج آزمایش خمشی نیز با بیشتر شدن الیاف مقدار مقاومت بطور متناوب افزایش یافت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سنگدانه‌ها

در برنامه آزمایشگاهی این تحقیق از مصالح سنگی شکسته اطراف شهر خرم آباد بصورت ریزدانه استفاده شده است. با توجه به روش دانه بندی استفاده شده طبق استاندارد ASTM C33، تمام مصالح از الک نمره ۲۰۰ عبور داده شده و به صورت کاملاً خشک جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. این مصالح سنگی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- سنگدانه‌ها طبق استاندارد ASTM C33

۲-۲- سیمان

سیمان مورد استفاده جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از سیمان پرتلند (تیپ ۲) ساخت کارخانه دورود لرستان استفاده شده است. چگالی سیمان مورد استفاده 1200 Kg/m^3 است.

ها، نتایج برعکس می‌گردد [۲۵]. در سال ۲۰۱۰ به بررسی مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتنی حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن پرداختند. آنها برای آزمایش مقاومت فشاری از قالب‌های مکعبی به ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی متر و برای آزمایش مقاومت خمشی از قالب‌های مکعب مستطیل به ابعاد $10 \times 10 \times 50$ سانتیمتر استفاده کردند. آنها با انجام این آزمایشات به این نتیجه رسیدند که بهترین ترکیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن، ترکیب ۷۵ درصد الیاف فولادی و ۲۵ درصد الیاف پلی پروپیلن است [۲۶]. در تحقیق خود با ساخت ۱۹ طرح اختلاط بتن با الیاف فولدی و فیبر شیشه‌ای و انجام آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه‌ها در سنین ۲۸، ۱۴، ۷ روزه به این نتیجه رسیدند که الیاف فولادی و فیبر شیشه‌ای در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن می‌گردند [۲۷]. وندیوال آزمایشاتی را بر روی بتن مسلح الیافی انجام داد. وی از سه نوع الیاف فولادی (الیاف بسیار کوتاه به طول ۶ میلی‌متر، الیاف کوتاه به طول ۱۳ میلی‌متر، و الیاف بلند انتها قلاب دار به طول ۳۵ میلی‌متر) استفاده کرد [۲۸]. سانگ و همکاران آزمایشاتی را با اضافه کردن الیاف فولادی به بتن با مقاومت بالا انجام دادند. بتن مسلح شده توسط الیاف فولادی در قالب‌های استوانه‌ای 300×150 میلی‌متر رخته شدند. آزمایش‌های مقاومت ضربه ای بر روی نمونه‌های ساخته شده انجام گرفت و مهمترین نتیجه گرفته شده از کار آنها این بود که مقاومت ضربه‌ای بتن با مقاومت بالا حاوی الیاف فولادی به مقدار قابل توجهی در مقایسه با بتن با مقاومت بالا (فاقد الیاف) بهبود می‌یابد [۲۹]. هونگ و وون به بررسی رفتار خمشی کامپوزیت‌های پایه سیمانی مسلح شده با درصدهای مختلف الیاف فولادی با مقاومت بسیار بالا پرداختند. این محققان گزارش کردند که با اضافه کردن الیاف با نسبت‌های ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ درصد مقاومت خمشی به میزان ۲۰، ۳۳، ۳۷، ۴۱ و ۴۷ درصد و طاقت خمشی برای نمونه‌های با نسبت‌های حجمی ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۷ به میزان ۳۹، ۴۴ و ۵۶ درصد افزایش یافت [۳۰]. ال دیب و همکارانش جهت بررسی اثر الیاف فولادی بر خواص بتن تازه خودتراکم نسبت‌های طول به قطر متفاوت از الیاف را با سه درصد حجمی مختلف به طرح شاهد اضافه کردند. افزایش در ضریب الیاف که از حاصل ضرب درصد حجمی در نسبت طول به قطر الیاف بدست می‌آید، افزایش در زمان تخلیه

شکل سیمان مصرفی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در شکل ۲ و جدول ۱ نشان داده شده است.

شکل سیمان مصرفی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در شکل ۲ و جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات الیاف فولادی

نوع الیاف	طول (cm)	L/D	چگالی (Kg/m ³)	مدول یانگ (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
فولادی	۳/۵	۴۳/۷۵	۷۸۵۰	۲۰۰	۱۱۰۰



شکل ۳- الیاف فولادی دو سر قلاب

۲-۵- فوق روان کننده

با توجه به وجود الیاف که باعث کاهش کارایی مخلوط بتن می-گردند. جهت تامین روانی و کارایی لازم در مخلوط بتن از محلول فوق روان کننده کربوکسیلاتی با نام تجاری Dezobuild 10 استفاده شده است. پس از مخلوط کردن سیمان و مصالح جایگزین سیمان همراه با الیافها با ۹۰ درصد از آب مورد استفاده، میزان آب باقیمانده با محلول فوق روان کننده ترکیب شده و به مخلوط بتن اضافه گردید. فوق روان کننده مورد استفاده در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- محلول فوق روان کننده مورد استفاده

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده

خصوصیات شیمیایی	
SiO2	۲۱,۱٪
Al2O3	۴,۳۷٪
Fe2O3	۳,۸۸٪
MgO	۱,۵۶٪
K2O	۰,۵۲٪
Na2O	۰,۳۹٪
CaO	۶۳,۳۳٪
C3S	۵۱٪
C2S	۲۲,۷٪
C3A	۵,۱٪
C4AF	۱۱,۹٪
خصوصیات فیزیکی	
وزن مخصوص (gr/cm ³)	3.1
سطح مخصوص (cm ² /gr)	3000



شکل ۲- سیمان

۲-۳- آب

آب مورد استفاده جهت ساخت نمونه‌ها، آب شرب آزمایشگاه سازه دانشگاه لرستان است. در ساخت نمونه‌ها، ۹۰ درصد آب مصرفی پس از مخلوط کردن سنگدانه‌ها و سیمان و الیاف ترکیبی و ۱۰ درصد نیز جهت حل کردن محلول فوق روان-کننده استفاده، سپس به مخلوط بتن اضافه گردید.

۲-۴- الیاف فولادی

الیاف فولادی مورد استفاده در این تحقیق از نوع دو سر قلاب با طول ۳/۵ سانتی‌متر و قطر ۰/۸ میلی‌متر و نسبت طول به

۳- روش ساخت و نام گذاری نمونه ها

جریات ساخت و نام گذاری نمونه ها در جدول ۳ نشان داده شده است. جهت ساخت قسمت فولادی مربوط به نمونه ها ابتدا ورق های با ضخامت ۳ و ۴ سانتیمتر را به وسیله جوش سرتاسری به مقاطع سپری متصل کردیم و سپس برای ساخت مخلوط بتن پس از تعیین درصد وزنی سنگدانه مربوط به الک، وزن سیمان با توجه به طرح اختلاط، وزن الیاف، آب مورد نیاز و محلول فوق روان کننده برای هر بار ساخت تعیین و مصالح برای ساخت مخلوط هر درصد الیاف تهیه شدند. جهت ساخت مخلوط بتن ابتدا سنگدانه ها و سیمان درون میکسر ریخته شده و الیاف ترکیبی فولادی بتدریج به آن ها اضافه و پس از همگن شدن مصالح خشک ۹۰ درصد آب بتدریج درون میکسر ریخته شد و نهایتاً ۱۰ درصد آب باقی مانده پس از حل کردن محلول فوق روان کننده در آن به مخلوط اضافه گردید. پس از مخلوط شدن، بتن درون قالب های مختلف که از قبل به روغن آغشته شده بودند ریخته شد و پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان ساخت، نمونه ها از قالب ها بیرون آورده شدند. اطلاعات نمونه ها در جدول ۳ آمده است. لازم به ذکر است، از هر نمونه دو عدد مشابه ساخته شده است که یکی از آنها جهت آزمایش خمشی و دیگری جهت آزمایش ضربه بکار برده شده است.

جدول ۳- جزئیات ساخت و نام گذاری نمونه ها

نام نمونه	مشخصات	طول (cm)	سطح صفحه (mm)	عمق بتن (mm)	فیبر (%)
W3hc0sf0	T40mm	۷۰	۳۰*۵	۰	۰
W4hc0sf0	T40mm	۷۰	۴۰*۵	۰	۰
W3hc2sf0	T40mm	۷۰	۳۰*۵	۲۰	۰
W3hc4sf0	T40mm	۷۰	۳۰*۵	۴۰	۰
W4hc2sf0	T40mm	۷۰	۴۰*۵	۲۰	۰
W4hc4sf0	T40mm	۷۰	۴۰*۵	۴۰	۰
W3hc2sf0.5	T40mm	۷۰	۳۰*۵	۲۰	۰/۵
W3hc4sf0.5	T40mm	۷۰	۳۰*۵	۴۰	۰/۵
W4hc2sf0.5	T40mm	۷۰	۴۰*۵	۲۰	۰/۵
W4hc4sf0.5	T40mm	۷۰	۴۰*۵	۴۰	۰/۵
W3hc2sf1	T40mm	۷۰	۳۰*۵	۲۰	۱
W3hc4sf1	T40mm	۷۰	۳۰*۵	۴۰	۱
W4hc2sf1	T40mm	۷۰	۴۰*۵	۲۰	۱
W4hc4sf1	T40mm	۷۰	۴۰*۵	۴۰	۱

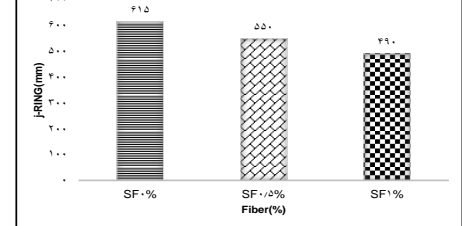
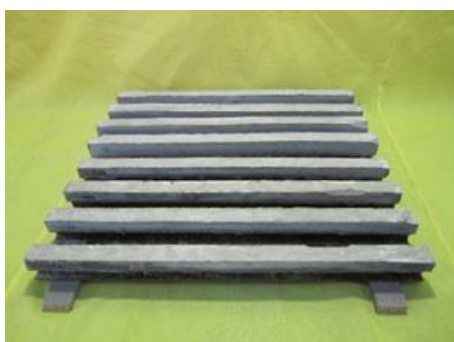
۴- نمونه های آزمایشگاهی

در این تحقیق ۲۸ نمونه ساخته و آزمایش های لازم بر روی آن ها انجام گرفته است. در ادامه خصوصیات و نحوه ساخت نمونه ها توضیح داده شده است. شکل ۵- الف نمونه های ساخته شده را نشان می دهد.

۵- نتایج آزمایش ها

۵-۱- نتایج آزمایش حلقه J

نتایج آزمایش حلقه J در شکل ۵- ب نشان داده شده است. مطابق نتایج حاصل شده بیشترین روانی مربوط به بتن بدون الیاف و کمترین روانی مربوط به بتن با ۱ درصد الیاف می باشد که افزودن ۱ درصد الیاف موجب کاهش ۲۱ درصدی روانی نسبت به نمونه مرجع (بدون الیاف) و افزودن ۰/۵ درصد الیاف موجب کاهش ۱۱ درصدی روانی نسبت به نمونه مرجع گردید.

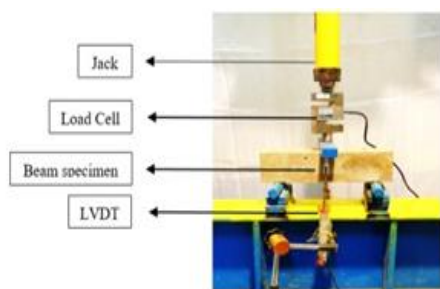


شکل ۵- الف- نمایی از نمونه های ساخته شده، ب-

نتایج آزمایش J

۵-۲- نتایج آزمایش جعبه L

در این آزمایش ارتفاع بتن در انتهای قسمت افقی (H₂) و قسمت قائم (H₁) اندازه گیری شده و نسبت بین آن ها ($\frac{H_2}{H_1}$) به عنوان نتیجه نشان داده شده است. هرچه نسبت بین این دو قسمت به ۱ نزدیک باشد، بتن ساخته شده دارای روانی بالایی است. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۶ آمده است. مطابق



شکل ۶- جزئیات آزمایش مقاومت خمشی تیرها



شکل ۷- نقش الیاف در جلوگیری از گسترش ترک‌ها در آزمایش خمشی نمونه با یک درصد الیاف

نتایج تست خمش در جدول ۴ گزارش شده‌اند.

جدول ۴- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

NO	Specimens Name	مقاومت خمشی (MPa)			میانگین	انحراف معیار (SD)
		نمون ۱۰	نمون ۲۰	نمون ۳۰		
1	SF/۰	۸,۰	۸,۵	۵,۹	۷,۵۱	۱,۱۴
		۲	۸	۴		
2	SF/۰,۵	۱۰,	۱۰,	۱۱	۱۰,۵۳	۰,۳۷
		۱	۵			
3	SF1%	۱۴,	۱۴,	۱۳,	۱۴,۰۳	۰,۴۱
		۵	۱	۵		

۴-۵- نتایج آزمایش ضربه

ماهیت بارگذاری‌های ضربه‌ای و دینامیکی به دلیل اعمال نیروی زیاد در چند میلی‌ثانیه با بارگذاری استاتیکی متفاوت است. مطابق شکل ۸ مقایسه حداکثر نیروی جذب شده تیرها نشان می‌دهد که بیشترین نیروی جذب شده مربوط به تیر w4hc4sf1 و کمترین نیروی جذب شده مربوط به تیر

نتایج این آزمایش بیشترین روانی مربوط به بتن بدون الیاف و کمترین روانی مربوط به بتن با ۱ درصد الیاف است. نتایج حاصله نشان از کاهش ۱۴ درصدی روانی در صورت اضافه کردن ۱ درصد الیاف به نمونه مرجع (بدون الیاف) و کاهش ۷ درصدی در صورت اضافه کردن ۰/۵ درصد الیاف به نمونه مرجع دارد.

۵-۳- آزمایش مقاومت خمشی تیرها

در این آزمایش مجموعاً ۱۴ تیر با استفاده از ۳ طرح اختلاط ساخته شد تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای (بار متمرکز در وسط دهانه) قرار گرفتند. فاصله تکیه‌گاه‌ها در این آزمایش ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. با استفاده از جک خمشی به مرکز دهانه تیرها نیرو وارد شده و این نیرو تدریجاً تا لحظه ایجاد گسیختگی در تیر افزایش یافت. در این آزمایش از یک Load cell ۵ تنی و یک دستگاه Data logger برای ثبت نیرو در هر ۰/۱ ثانیه استفاده شد. طبق استاندارد ASTM C293 با برداشت بیش‌ترین نیروی تحمل شده توسط نمونه و با استفاده از رابطه ۴ مقاومت خمشی تیرها بر حسب مگاپاسکال محاسبه شد.

$$\text{مقاومت خمشی} = \frac{3pl}{2bd^2} \quad (1)$$

در این رابطه P حداکثر نیروی خمشی تحمل شده توسط تیرها بر حسب تن (ton) و l و b و d طول، عرض و ارتفاع تیر بر حسب سانتی‌متر است؛ همچنین در انجام این آزمایش از دو عدد LVDT جهت ثبت خیز تیرها حین آزمایش در دو طرف مرکز دهانه تیر استفاده شد که با استفاده از آن خیز تیر در طول آزمایش تا لحظه ایجاد شکست ثبت شد. بدین ترتیب با وجود امکان رسم نمودار بار خمشی - تغییر مکان تیر، شرایط محاسبه جذب انرژی نمونه‌ها فراهم شد. شکل ۶ جزئیات قرارگیری تیرها بین تکیه‌گاه و محل اعمال نیرو و LVDT ها را نشان می‌دهد. یک نمونه از تست خمش در شکل ۷ قابل مشاهده است.

w3hc0sf0 است که به این مفهوم است که نیروی بیشینه ۱۵۰ درصد افزایش داشته است.



الف) SF0%

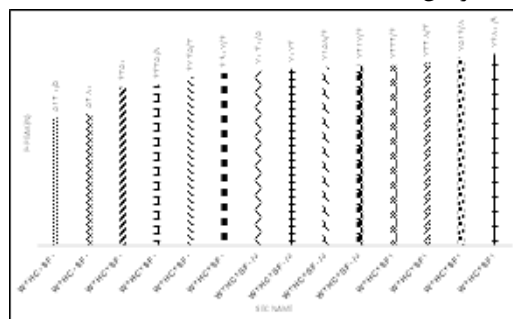


ب) SF0.5%



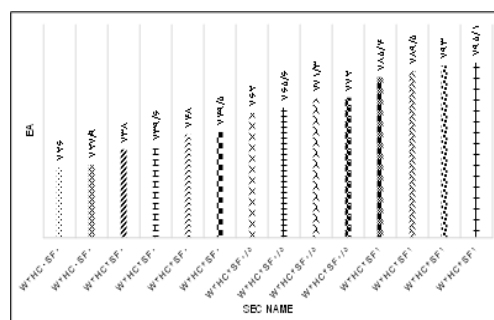
ج) SF1%

شکل ۱۱- مقایسه تاثیر درصد الیاف در جلوگیری از متلاشی شدن بتن ناحیه فشاری تحت آزمایش ضربه



شکل ۸- نمودار حداکثر نیروی جذب شده توسط تیرها تحت آزمایش ضربه

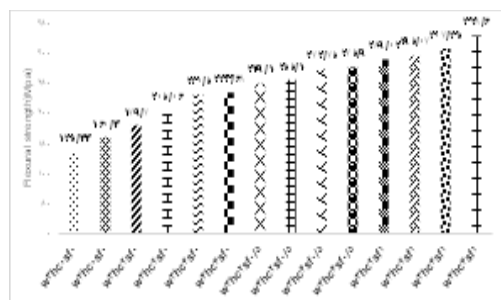
مطابق شکل ۹ بیشترین انرژی جذب شده مربوط به تیر w4hc4sf1 و کمترین انرژی جذب شده مربوط به تیر w3hc0sf0 است که نشان از افزایش ۰/۰۹ درصدی دارد.



شکل ۹- نمودار ظرفیت انرژی جذب شده توسط تیرها تحت آزمایش ضربه

۵-۵- نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای

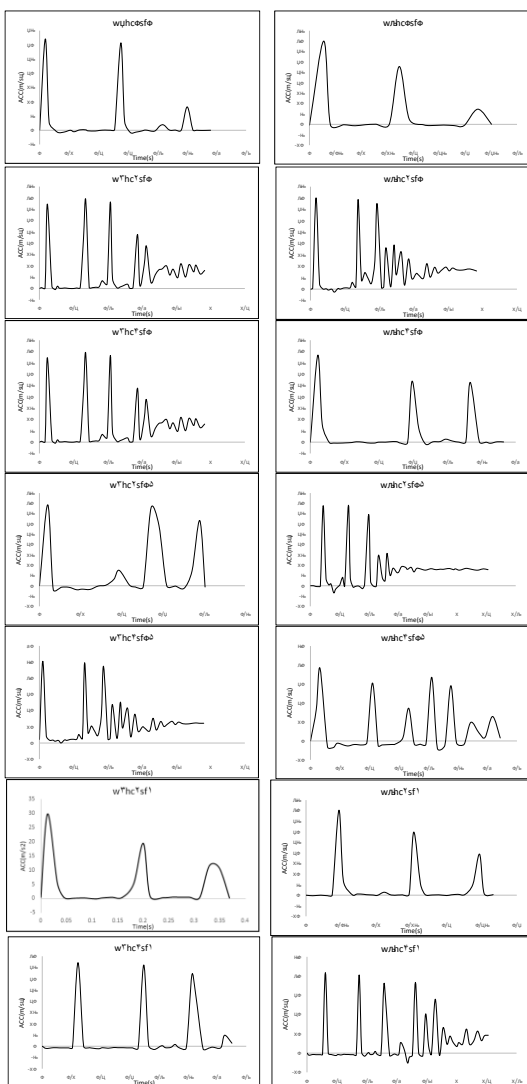
در این آزمایش روی تیرها، آزمایش خمش سه نقطه ای (اعمال یک بار متمرکز در وسط دهانه) انجام گرفت. در این آزمایش حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری برداشته شده و مقاومت هر تیر را بر حسب مگاپاسکال محاسبه گردید. نتایج حاصل از آزمایش در شکل شماره ۱۲ آورده شده است. مطابق نتایج بدست آمده بیشترین مقاومت خمشی مربوط به تیر w4c4sf1 و کمترین مقاومت خمشی مربوط تیر w3hc0sf0 است که نشان از افزایش ۲۳۵ درصدی مقاومت دارد.



شکل ۱۲- مقاومت خمشی تیرها تحت آزمایش خمش سه نقطه ای

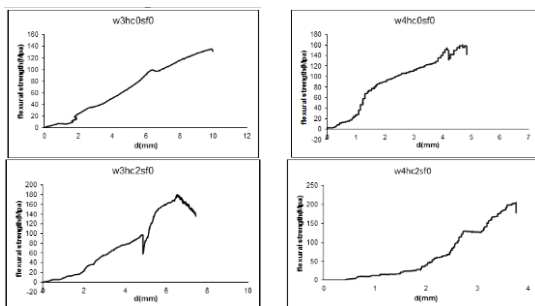


شکل ۱۰- انجام آزمایش ضربه



شکل ۱۶- منحنی‌های شتاب زمان

نمودارهای خمش جابجایی در شکل ۱۷ نشان داده شده است که برحسب نمونه‌های مختلف می‌توان رفتار خمشی نمونه‌ها را مشاهده نمود.



شکل ۱۳- آزمایش خمش بر روی تیر w3hc0sf0

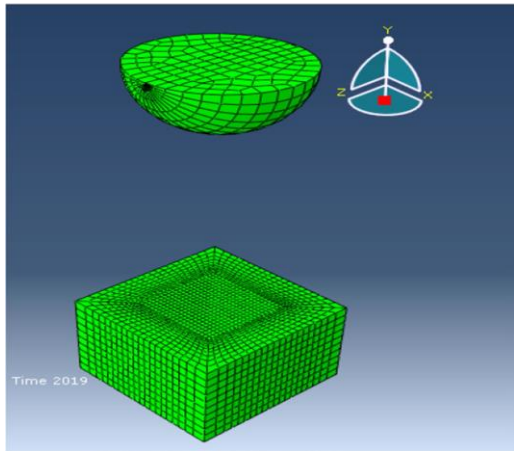


شکل ۱۴- آزمایش خمش بر روی تیر w3hc2sf0.5

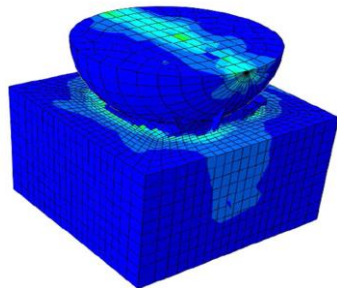
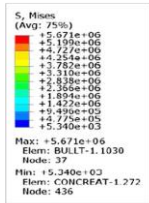


شکل ۱۵- آزمایش خمش بر روی تیر w4hc4sf

نتایج منحنی‌های شتاب زمان برای تست ضربه سقوط آزاد در شکل ۱۶ نشان داده شده است که برحسب نمونه‌های مختلف می‌توان رفتار شتاب ضربه زنده را مشاهده نمود.



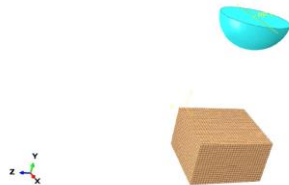
(الف)



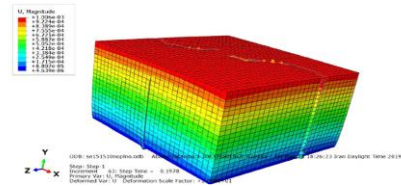
(ب)

(a) Printed using Abaqus/CAE on: Mon Jun 03 18:47:55 Iran Daylight Time 2019

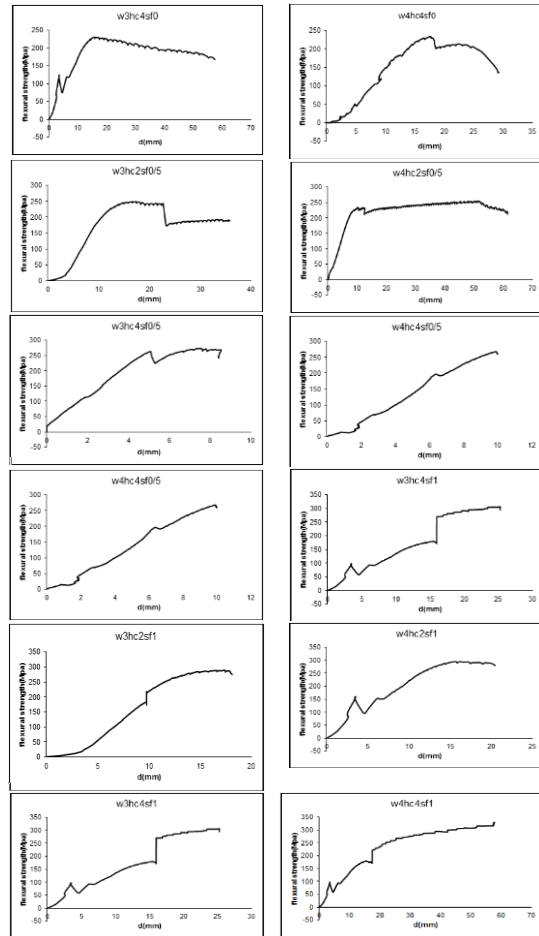
SIMULIA



(b)



(ج)

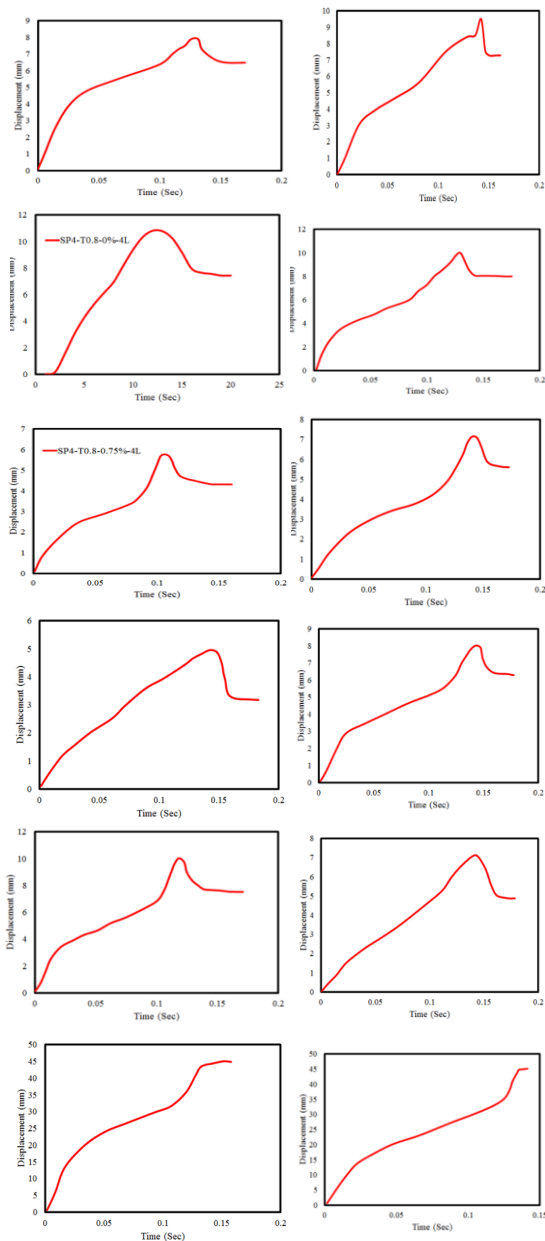


شکل ۱۷- منحنی‌های مقاومت خمشی جابجایی

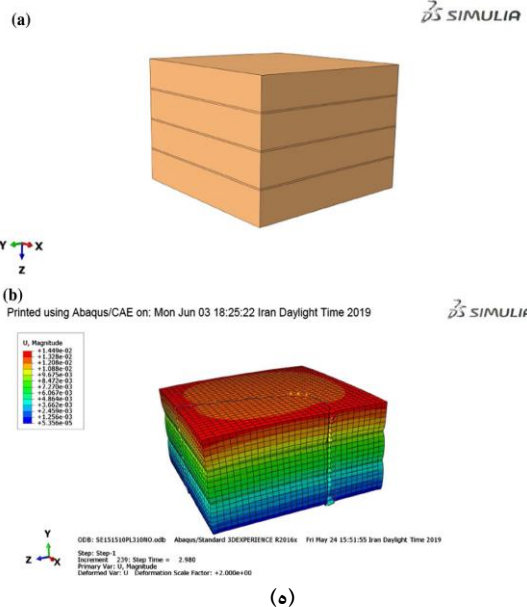
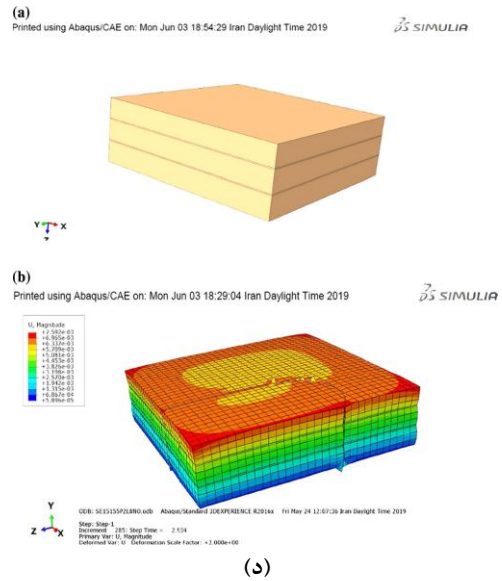
۶- مدل‌سازی عددی

در این بخش مدل‌سازی عددی روی اندرکنش سیمان و فولاد انجام شده است. با توجه به مدل‌سازی‌های انجام شده مطابق شکل ۱۸ می‌توان مشاهده کرد، نحوه ترک خوردگی در بتن در اندرکنش با فولاد دارای پیچیدگی بالایی است.

تقارن، قیود تقارنی لحاظ شده است. پس از برخورد کانتور تنش فشاری در تمامی نمونه مشاهده می‌شود (شکل ۱۸-ب). در شکل ۱۸-ج تا د، نمونه‌ها با برخورد چکش ضربه زننده دچار گسیختگی در بتن می‌شوند. البته نمونه با شرایط مرزی و اندرکنش فولاد و بتن در مدلسازی لحاظ شده است تا به تست های تجربی نزدیک تر باشد. در شکل ۱۹ تغییرات جابجایی به زمان برای نمونه‌های تست ضربه نشان داده شده است.



شکل ۱۹- منحنی‌های جابجایی زمان



شکل ۱۸- مدلسازی تست ضربه الف) مدل بخشی از نمونه و ضربه زننده ب) کانتور تنش در ابتدای ضربه ج) مشاهده ترک اولیه پس از ضربه د) لهیدگی ضربه و جدایی در نمونه های ترکیبی بتن و فولاد ه) برای ضخامت های بالا

در شکل ۱۸ ابتدا نمونه بتنی و فولادی در بخش خواص ماده بتن و فولاد تعریف شدند. نمونه ضربه زننده نیز بصورت صلب تعریف شده است. بخشی از نمونه برای متقارن سازی و کاهش حجم پردازش و ران گیری مدل شده است. در بخش

۷- نتیجه گیری

در این بخش نتایج آزمایش‌های صورت گرفته بیان می‌شود: وجود الیاف فولادی بطور کلی باعث کاهش روانی بتن می‌شود. وجود الیاف فولادی باعث افزایش جزئی مقاومت فشاری می‌گردد و هرچه درصد الیاف بالاتر می‌رود، مقاومت فشاری نیز اندکی افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که می‌توان از افزایش مقاومت آن چشم‌پوشی نمود. مطابق نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت کششی، افزودن الیاف فولادی باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقدار مقاومت شده و این افزایش بصورت متناوب با بالا رفتن درصد الیاف ادامه داشته است. دلیل افزایش مقاومت کششی در اثر افزودن الیاف فلزی ایجاد دوختگی و انسجام بهتر در بتن است. نتایج تست مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد نشان داد که با افزودن الیاف فولادی مقدار مقاومت خمشی بصورت متناوب افزایش می‌یابد و بهترین عملکرد در نمونه‌های با ۱ درصد الیاف ترکیبی مشاهده گردید. با انجام آزمایش ضربه بر تیرهای کامپوزیت ملاحظه گردید که نوع شکست در نمونه‌های فاقد الیاف، شکست ترد بوده و همزمان با افزایش مقدار الیاف نوع شکست تغییر می‌کند. از نتایج جذب انرژی تیرها در اثر آزمایش ضربه می‌توان دریافت که تیر فولادی با ۱ درصد الیاف بیشترین جذب انرژی را داشته است. در آزمایش خمش بر روی تیرهای فولادی وجود الیاف موجب کاهش ترک‌ها در کلیه نمونه‌ها شده و هرچه مقدار الیاف بیشتر باشد، مقدار ترک‌ها کم‌تر و پیوستگی بتن بیشتر می‌گردد. مطابق نتایج آزمایش خمش بر روی تیرهای فولادی افزودن الیاف موجب افزایش مقاومت خمشی می‌شود. از نتایج خمشی تیرهای فولادی نتیجه می‌گیریم که استفاده از مقطع کامپوزیت نسبت به مقطع فولادی با همان ابعاد و سطح مقطع بهینه‌تر است. با انجام آزمایش ضربه بر تیرهای کامپوزیت ملاحظه گردید که نوع شکست در نمونه‌های فاقد الیاف، شکست ترد بوده و همزمان با افزایش مقدار الیاف نوع شکست تغییر می‌کند.

از نتایج جذب انرژی تیرها در اثر آزمایش ضربه می‌توان دریافت که جذب انرژی تیر فولادی با ۱ درصد الیاف نسبت به تیر فولادی مشابه بدون بتن ۳/۳۰ درصد بیشتر است.

مراجع:

- [1] Soleymani Ashtiani M.d, Allan N. Scott, Rajesh P. Dhakal, (2013) Mechanical and fresh properties of high-strength self-compacting concrete containing class C fly ash. *Const and Build Mat*, 47, 1217–1224.
 - [2] Hossain M.M., Karim M.R., Hasan M., Hossain M.K., Zain M.F.M., (2016) Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement. A review *Const and Build Mat*, 116, 128–140.
 - [3] Khaloo A., Molaei Raisi E., Hosseini P., Tahsiri H. (2014) Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *Const and Build Mat*, 51, 179–186.
 - [4] Okamura H, Ozawa K., (1994) Self-Compactable high performance concrete in japan, *International Workshop on High Performance Concrete*, SP 169, American Concr Inst, Farmington Hills, MI, 31-44.
 - [5] Terzić A., Pezo L., Mitić V., Radojević Z., (2015) Artificial fly ash based aggregates properties influence on lightweight concrete performances. *Ceramics Int*, 41, 2714–2726.
 - [6] Madandoust R., Mohammad Ranjbar M., Ghavidel R., Fatemeh Shahabi S., (2015) Assessment of factors influencing mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete. *Mat & Des*, 83, 284–294.
 - [7] Aslani F., Nejadi S., (2013) Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression. *Comp: Part B*, 53, 121–133.
 - [8] Bindiganavile, V., and Banthia, N., (2001) Polymer and steel fiber-reinforced cementitious composites under impact loading_Part 2: Flexural toughness. *ACI Mat J*, 98, 1, 17-24.
 - [9] Yeonung J., Hyeoneun P., Yubin J., Jae-Hong J., Jae Eun O., (2015) Microstructural verification of the strength performance of ternary blended cement systems with high volumes of fly ash and GGBFS. *Const and Build Mat*, 95, 96–107.
- [۵] نیلی، م. رزم‌آرا، م. (۱۳۹۱) تاثیر خاکستر بادی و دوده سیلیسی بر میزان جداسدگی بتن‌های خود تراکم. چهارمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، مهرماه.

- [22] Teng, T.L., Club, Y. A, Chang, F.A, Shen, B.C. Cheng, D.S. (2008) Development and Validation of Numerical Model of Steel Fiber Reinforced Concrete for High Velocity Impact. *Comp Mat Sci*, 42, 90-99.
- [23] Deng, Z., and Li, J., (2007) Tension and impact behaviors of new type fiber reinforced concrete. *Comp and Concr*, 4, 19-32.
- [24] Vandewalle, L., (2008) Hybrid Fiber Reinforced Concrete, *Proceedings. Int'l Conf Concr: Const's Sust Option*, Dundee, UK, 11-22.
- [۲۵] فروغی اصل، ع. حسین نژاد، ف. (۱۳۹۲) تاثیر الیاف پلی پروپیلینی بر روی خواص مکانیکی و نفوذ پذیری بتن فلانامه تحقیقات بتن، ۶، ۱، ۱۲۵-۱۱۵.
- [26] Singh, S. P. (2010) Strength and Flexural Toughness of Concrete Reinforced with Steel-Polypropylene Hybrid Fibers. *Asian J of Civil Eng*, 11, 4, 494-507.
- [۲۷] زنگنه، ک. (۱۳۹۱) بررسی آزمایشگاهی تاثیر الیاف بر مقاومت بتن پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی بوشهر، ۲۳-۲۰.
- [28] Vandewalle, L., (2008) Hybrid Fiber Reinforced Concrete. *Proceedings, Int'l Conf Concr: Const's Sust Option*, Dundee, UK,, 11-22.
- [29] Song, P. S., Wu, J. C., Hwang, S., Sheu, B. C., (2005) Assessment of Statistical Variations in Impact Resistance of High-Strength Steel Fiber Reinforced Concrete. *Cement and Concr Res*, 35, 393-399.
- [30] Won J., Hong B., Joon C, (2012) Flexural behaviour of amorphous micro-steel fibre-reinforced cement composites. *Comp Struct*, 94, 1443-1449.
- [31] El-Dieb A,S. Reda Taha M.M., (2012) Flow characteristics and acceptance criteria of fiber reinforced self-compacted concrete (FR-SCC). *Const and Build Mat*, 27, 585-596.
- [32] El-Dieb A,S. (2009) Mechanical, durability and microstructural charecteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating Steel fiber. *Mat and Des*, 0, 4286-4292.
- [11] Nataraja M. C., Nagaraj T.S., , Basavaraja S.B., (2005) Reproportioning of steel Fibre Reinforced Concrete Mixed and their impact Resistance. *Cement Concr Res*, 35, 12, 2350-2359.
- [12] Farnam Y., (2007) Experimental and numerical study of impact behavior of composite panels based on fiber reinforced high performance cementitious materials. Thesis of master of Sci in Civil Eng, Tehran university,Iran.
- [13] Mohammadi, Y., (2006) Carkon-Azad, R., Singh, S. P., Kaushik, S. K. Compressive Stress-Strain Behavior of Small Scale Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete Cylinders. *J Adv Concr Tech*. 1, 109-121.
- [14] Beddar, M., (2008) Development of steel fiber reinforced concrete from antiquity until the present day, *proceedings Int Conf Concr: Const Sust Option*, Dundee, UK, 35-44.
- [15] Quresh L A., (2008) effect of mixing steel fibers and silica fume on properties of high strength concrete, *proceedings. Int Conf Concr: Const Sust Option*, Dundee .UK , 233-244.
- [16] Hadi M, (2008) An investigation of steel and polypropylene fiber reinforced concrete slabs, *Proceedings. Int Conf Concr Const Sust Option*”, Dundee. UK, 233-244.
- [17], Yao, W. Jie L.,Keru W., (2003) Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction, *J Cement and Concr Res*, 33, 27-30.
- [18] Feldman, D . and zheng, Z., (1993) synthetic fibers for fibre concrete composites. In high performance polymers and polymer matrix composites. Symp Held April, 13-16.
- [19] Bentur, A. Mindess, S. (1993) *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Elsevier, London, , 12-19.
- [20] sorreli, L. G. Meda, A. plizarri G. A. (2006) Bending and Uniaxial Tensile Tests on concrete Reinforced with Hybrid Steel Fibers. *J of Mat in Civil Eng*, 17, 519-52.
- [21] Ruby, S. Geethanjali, G. Varghese, C.J. Priya, P.M. (2014) Influence of Hybrid Fiber on Reinforced Concrete. *Int J of Adv Struct and GeoTech Eng*, 03, 40-43.