

Experimental investigation of the effect of steel fibers on mechanical and impact strength of self-compacting composite slabs

Ahmad Dalvand^{*1}, Amir Mohammad Amiri², Behnaz Jahangiri³

1- Assistant professor, faculty of engineering, lorestan university, khorramabad, iran

2- Assistant professor, faculty of engineering, lorestan university, khorramabad, iran

3- Master student faculty of engineering, lorestan university, khorramabad, iran

ABSTRACT

The use of self-compacting high performance composites due to its unique properties has attracted the attention of researchers. The high compressive strength and tensile strength, high flexural strength, have attracted the attention of researchers to this type of cement composites. In this research, in the form of a comprehensive experimental work, using six basic mixing designs, 24 rectangular composite slabs 300 to 400 mm, with two thicknesses of 30 and 50 mm, were built and tested under impact load. Compressive, tensile and flexural strength tests were made on each of the six mixing designs. Also, to determine the efficacy of high performance composite, slump flow, L-box, U-box and V-funnel on mix designs have been done. Steel fibers with percentages of 0, 0.5 and 1% by volume fraction, with lengths of 25 and 50 mm, were used for the construction of cementitious composites. The impact test apparatus was made from a 5.6 kilogram steel ball and a retaining system. The steel ball was raised to a height of 1.5 meters and was freed repeatedly until failure cracking in the samples have been Developed. According to the results of the experiment, It was noted that the maximum energy absorption in a slab with a thickness of 30 mm was 34.22 kJ, and in a slab with a thickness of 50 mm was 47.49 kJ. The results of this experiment shows the high effect of steel fibers on increasing the impact resistance and absorbed energy of the composite slabs.

ARTICLE INFO

Receive Date: 04 December 2018

Revise Date: 09 March 2019

Accept Date: 19 April 2019

Keywords:

Cementitious composite Impact strength

Flexural strength

Steel fibers

Tensile strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.159762.1728

*Corresponding author: Ahmad Dalvand

Email address: dalvand.a@lu.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی تاثیر الیاف فولادی بر مقاومت مکانیکی و ضربه‌ای دال های کامپوزیتی خود تراکم

احمد دالوند^{۱*}، امیر محمد امیری^۲، بهناز جهانگیری^۳

۱- استاد یار گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۲- استادیار گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

چکیده

استفاده از کامپوزیت های توانمند خود تراکم به دلیل ویژگی های منحصر به فرد آن، مورد توجه محققین قرار گرفته است. مقاومت فشاری و کششی بالا، مقاومت خمشی بالا موجب توجه بیش از پیش محققین، به این نوع از کامپوزیت های سیمانی شده است. در این تحقیق در قالب یک کار جامع آزمایشگاهی با استفاده از ۶ طرح اختلاط پایه، ۲۴ دال کامپوزیتی مستطیلی به ابعاد ۳۰۰ در ۴۰۰ میلیمتر با دو ضخامت ۳۰ و ۵۰ میلیمتر ساخته و تحت بار ضربه ای تست گردید. بر روی هر شش طرح اختلاط ساخته شده آزمایش های مقاومت فشاری، کششی و خمشی انجام گردید. همچنین به منظور تعیین کارایی کامپوزیت های توانمند، آزمایش های اسلامپ روانی، قیف V شکل، جعبه L شکل و قیف U شکل بر روی طرح اختلاط ها انجام گردید. از الیاف فولادی با درصد های ۰، ۵/۰ و ۱ درصد حجمی و با طول های ۲۵ و ۵۰ میلی متر به منظور ساخت کامپوزیت های سیمانی استفاده شد. دستگاه آزمایش ضربه از یک گوی فولادی به وزن ۵/۶ کیلوگرم و یک سیستم نگه دارنده ساخته شد. گوی فولادی تا ارتفاع ۱/۵ متر بالا برده شده و بصورت مکرر تا ایجاد گسیختگی در نمونه ها، رها گردید. مطابق با نتایج حاصل از آزمایش، ملاحظه گردید که حداکثر جذب انرژی در دال با ضخامت ۳۰ میلی متر ۳۴/۲۲ کیلوژول و در دال با ضخامت ۵۰ میلی متر ۴۷/۷۹ کیلوژول می باشد. نتایج حاصل از این آزمایش نشان دهنده تاثیر بالای الیاف فولادی در افزایش مقاومت ضربه ای و انرژی جذب شده دال ها می باشد.

کلمات کلیدی: کامپوزیت سیمانی، مقاومت ضربه‌ای، مقاومت خمشی، الیاف فولادی، مقاومت کششی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.159762.1728	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.159762.1728	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	۱۳۹۸/۰۱/۳۰	۱۳۹۸/۰۱/۳۰	۱۳۹۷/۱۲/۱۸	۱۳۹۷/۰۹/۱۳
احمد دالوند dalvand.a@lu.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های سیمانی ییافی در سال‌های اخیر شاهد پیشرفت‌های چشمگیر و زیادی بوده‌اند [۱]. عمده‌ی این پیشرفت‌ها به سبب توسعه‌ی هر چه بیشتر ملات، گونه‌های مختلف الیاف، اندرکنش ملات-الیاف، فرایند تولید کامپوزیت اجرایی می‌باشد [۲ و ۳]. علاوه بر آن می‌توان به مواردی مانند معرفی نسل جدید مواد افزودنی (فوق روان کننده‌ها) با امکان دستیابی به مقاومت‌های بالا همراه با کمترین کاهش در کارایی ملات نیز اشاره نمود. همچنین افزودن ریز پرکننده‌ها مثل دوده سیلیسی و خاکستر بادی و فهم بهتر از چگونگی تاثیر آنها بر تخلخل، مقاومت و دوام ملات نیز باعث بهبود رفتار این مصالح شده است [۳ و ۴]. این موارد همگی باعث پیشرفت‌های اساسی در ساخت و مدل‌سازی رفتار این کامپوزیت‌ها شده‌اند. امروزه مصالح بتنی به طور گسترده‌ای در سازه‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مصالح در مقایسه با سایر مصالح از وزن بیشتری در واحد هزینه برخوردار است. بتن مقاومت زیادی در برابر آتش‌سوزی داشته و میزان جذب انرژی زیادی دارد. ضعف آن تخریب‌پذیری زیاد در برابر بارهای شدید دینامیکی به دلیل عدم تحمل نیروهای کششی زیاد می‌باشد [۵]. با استفاده از الیاف در بتن، سرعت گسترش ترک‌ها کاهش می‌یابد و منجر به شکل‌پذیری آن می‌گردد. برخی از این الیاف عبارتند از: الیاف فولادی، کربنی، شیشه‌ای و پلیمری. بتن الیافی خواص مناسبی همچون شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی بالا و پایداری در برابر ترک‌خوردن را دارا می‌باشد که متناسب با آنها، می‌توان موارد کاربرد فراوانی برای آن یافت [۶ تا ۸]. در دهه‌ی ۱۹۶۰، رامولد^۱ و همکاران بررسی تاثیر الیاف فولادی بر کاهش شکنندگی بتن را در دستور کار قرار دادند [۹]. این روند با کاربرد سایر انواع الیاف ادامه یافت و در سال‌های اخیر ترکیب انواع الیاف با طول‌های مختلف در دستور کار قرار گرفت. گسترش دانش در خصوص چگونگی تاثیر الیاف بر ملات، منجر به تدوین توصیه‌هایی در مورد طراحی سازه‌ای توسط موسسه RILEM گردید [۱۰]. کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی^۲ (ECC) در دانشگاه میشیگان توسعه یافته است و به علت شکل‌گیری و گسترش منظم ترک‌های چند گانه، شکل‌پذیری کششی آن به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است. در این کامپوزیت‌های سیمانی، مقدار الیاف به کمتر از ۲ درصد کاهش یافته است. طبق تحقیقات انجام شده در سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ مقاومت کششی ۴ تا ۶ مگاپاسکال و شکل‌پذیری کششی ۳ تا ۵ درصد از این کامپوزیت‌ها مشاهده شده است [۱۱ و ۱۲]. کامپوزیت‌های مهندسی می‌توانند دارای کاربرد های وسیعی باشند. کامپوزیت سیمانی خود تراکم با استفاده در ساخت و ساز های با مقیاس وسیع و آرماتور گذاری فشرده یکی از کاربرد های این کامپوزیت ها می باشد [۱۳]. کامپوزیت های سیمانی با مقاومت اولیه بالا، به منظور استفاده در سازه هایی که نیازمند رشد سریع مقاومت اولیه می باشند از گونه های دیگر این کامپوزیت ها می باشند [۱۴]. همچنین یک گونه از کامپوزیت های سیمانی مهندسی به منظور استفاده در سازه هایی سبک، با وزن مخصوص پایین نیز وجود دارد [۱۵]. گونه ای دیگر از کامپوزیت های سیمانی مهندسی که سازگار با محیط زیست باشند، نیز ساخته شده است [۱۶]. گونه ای دیگر از کامپوزیت های سیمانی مهندسی در حال توسعه می باشد که خاصیت خود ترمیم شوندگی دارند. به عبارت دیگر این گونه از کامپوزیت ها به منظور بازبانی خصوصیات مکانیکی مصالح پس از تحمل خسارت به کار می روند [۱۷]. با توجه به استفاده از مواد جایگزین سیمان در سال های اخیر، مطالعاتی در زمینه ساخت بتن های خود تراکم فاقد سیمان انجام شده است. در این گونه از مواد، سیمان موجود در ترکیب حذف شده است [۱۸]. دال های تخت در بسیاری از موارد در سازه های صنعتی، تجاری و مسکونی مورد استفاده قرار می گیرند. با توجه توسعه استفاده از بتن های خود تراکم در سازه، در مواردی این نوع از بتن های به دلیل آرماتور گذاری فشرده در دال های استفاده می شوند [۱۹]. در تحقیقات صورت گرفته بر روی ضربه، بیشتر کارهای انجام شده در حوضه قطعات مکانیکی می باشد [۲۰]. در بیشتر مطالعات اثرات برخورد ضربه های دینامیکی بر روی قطعات صنعتی در معرض ضربه بررسی شده است. یکی از قسمت هایی از سازه که در معرض ضربه قرار دارد، دال ها می باشد. کامپوزیت های سیمانی خود تراکم الیافی به دلیل ویژگی های منحصر به فردی نظیر خود تراکم بودن، عدم نیاز به ویرنه، مقاومت کششی و خمشی مناسب در بین سایر کامپوزیت ها از جایگاه ویژه ای برخوردار می باشند. استفاده از این نوع از کامپوزیت های سیمانی در دالهایی که تحت بارهای ضربه ای قرار دارند (مانند اسکله های کانتینری، کارخانه جات فولاد، سوله های صنعتی، باند های فرود هواپیما، سوله های نظامی، انبار های مهمات و ...) می تواند موجب افزایش مقاومت ضربه ای سازه شوند. در این

¹ Romualdi

² Engineered cementitious composite

تحقیق به منظور بررسی اثرات بارهای ضربه ای بر روی رفتار دالهای ساخته شده از کامپوزیت خود تراکم، در قالب یک تحقیق جامع آزمایشگاهی مطالعاتی صورت گرفت.

۲- نیاز تحقیقاتی

امروزه از دالهای بتنی بصورت گسترده‌ای در سقف ساختمان‌های مسکونی، تجاری و ... استفاده می‌شود. این دال‌ها تحت اثر بارگذاری ضربه ای ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه و برخی دیگر از انواع بارهای ضربه‌ای قرار می‌گیرند [۲۱]. همچنین در بسیاری از موارد از دال‌های بتنی در پوشش کف و احداث بسترهای بتنی استفاده می‌گردد. دال‌های بتنی که به عنوان پوشش کف در کارخانه‌های صنعتی ایجاد می‌گردند، در بسیاری از موارد تحت بارهای ضربه ای ناشی از برخورد اجرام سنگین قرار دارند [۲۲]. ضربات وارد شده به دال‌های بتنی می‌تواند منجر به ایجاد آسیب دیدگی شدید و ترک در این گونه دال‌ها گردد. ایجاد ترک در دال‌ها موجبات کاهش عمر سازه به دلیل نفوذ مواد خورنده و سایر عوامل محیطی را فراهم می‌کند. کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی الیافی خودتراکم با دارای بودن ویژگی‌هایی نظیر مقاومت فشاری، کششی و خمشی بالا می‌توانند جایگزین مناسبی برای بتن معمولی در دال‌های بتنی تحت بارهای ضربه‌ای باشند. استفاده از الیاف فولادی با طول‌های متفاوت به منظور افزایش توزیع شدن یکنواخت الیاف، می‌تواند به عنوان یک راه کار مناسب جهت پخش الیاف در بتن مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات زیادی بر روی رفتار خمشی دال‌های بتنی صورت گرفته است. بیشتر این مطالعات در خصوص بارگذاری‌های استاتیکی می‌باشند. بررسی جایگزینی این دال‌ها با دال‌های ساخته شده با کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی خود تراکم و بررسی اثرات بارگذاری ضربه‌ای بر روی آنها ضروری به نظر می‌رسد.

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- خصوصیات مصالح

در این پژوهش از مصالح سنگی ریزدانه اطراف شهر خرم آباد استفاده شده است و تمام مصالح سنگی مورد استفاده عبوری از الک نمره ۸ می‌باشد. همچنین سیمان مورد استفاده در این تحقیق سیمان پرتلند تیپ II تولیدی کارخانه سیمان درود می‌باشد. خصوصیات سیمان مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است. آب مورد استفاده در این آزمایش، آب آشامیدنی شهری می‌باشد که ۹۰ درصد آن با ماسه و سیمان مخلوط شده و مابقی آن با محلول فوق روان‌کننده ترکیب شده است. به منظور ساخت کامپوزیت سیمانی خود تراکم از یک فوق روان‌کننده با نام تجاری Dezobuild D-10 استفاده گردید. این فوق روان‌کننده از نوع پلی‌کربوکسیلاتی می‌باشد. در این آزمایش از دونه الیاف فولادی دوسر قلاب با طول‌های ۵۰ و ۲۵ میلیمتر و با قطر ۰/۸ میلیمتر استفاده شد. در ساخت نمونه‌های این تحقیق الیاف در مرحله پایانی به مخلوط بتن اضافه شده است و تلاش گردید که الیاف به صورت یکنواختی در نمونه‌ها توزیع شوند. ابتدا ماسه و سیمان در میکسر باهم مخلوط شده و سپس ۹۰ درصد آب اضافه می‌شود. در نهایت ۱۰ درصد آب باقی‌مانده که با محلول فوق روان‌کننده مخلوط شده به ترکیب اضافه می‌گردد. الیاف فولادی نیز در مرحله آخر به مخلوط اضافه شد. خصوصیات الیاف فولادی مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ ارائه گردیده است. همچنین در شکل ۱ نمایی از الیاف مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۱: الیاف مصرفی مورد استفاده

جدول ۱. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مورد استفاده

خصوصیات شیمیایی	
SiO ₂	۲۱/۱
Al ₂ O ₃	۴/۳۷
Fe ₂ O ₃	۳/۸۸
MgO	۱/۵۶
K ₂ O	۰/۵۲
Na ₂ O	۰/۳۹
CaO	۶۳/۳۳
C ₃ S	۵۱
C ₂ S	۲۲/۷
C ₃ A	۵/۱
C ₄ AF	۱۱/۹
خصوصیات فیزیکی	
وزن مخصوص (gr/cm ³)	۳/۱
سطح مخصوص (gr/cm ²)	۳۰۰۰

جدول ۲. خصوصیات الیاف فولادی مورد استفاده

نوع الیاف	طول (mm)	L/D	چگالی (kg/m ³)	Gpa مدول ینگ	Mpa مقاومت کششی
فولادی بلند	۵۰	۶۲/۵	۷۸۵۰	۲۰۰	۱۱۰۰
فولادی کوتاه	۲۵	۶۲/۵	۷۸۵۰	۲۰۰	۱۱۰۰

۳-۲- ساخت نمونه ها

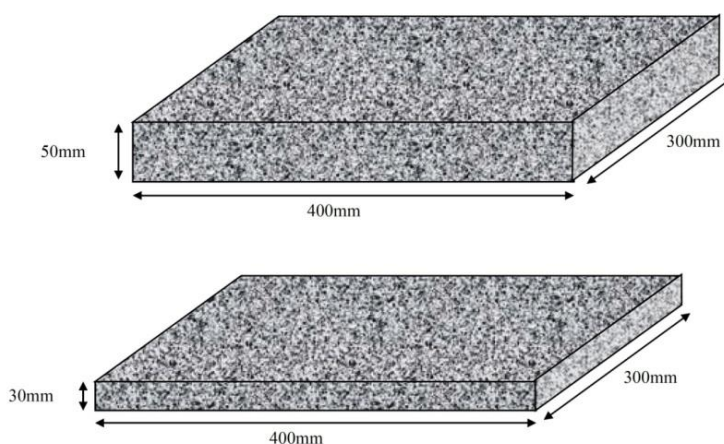
در این تحقیق ۱۸ عدد نمونه فشاری مکعبی با ضلع ۱۰۰ میلیمتر در قالب ۶ طرح اختلاط، ۱۸ عدد نمونه کششی استوانه‌ای با ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلیمتر و ۱۸ عدد نمونه تیر کوچک به ابعاد ۳۲۰×۸۰×۶۰ میلی‌متر ساخته شد. بر روی نمونه ها آزمایشات فشاری مطابق (ASTM C59)، کششی مطابق (ASTM C59) و خمشی مطابق (ASTM C59) انجام شد. همان طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، نمونه‌ها در ۶ طرح اختلاط مختلف می‌باشند. یک طرح اختلاط بدون الیاف بعنوان نمونه شاهد و ۵ طرح اختلاط دیگر دارای ترکیبی از الیاف با طول ۲۵ و ۵۰ میلیمتر می‌باشند. به منظور تعیین دقیق خصوصیات مکانیکی نمونه ها، از هر طرح اختلاط ۳ نمونه مکعبی، ۳ نمونه استوانه‌ای و ۳ نمونه خمشی ساخته شد. در ادامه به منظور تعیین و ارزیابی مقاومت ضربه ای، ۲۴ عدد دال بتنی (از هر ترکیب ۲ عدد دال) با ابعاد ۳۰۰ در ۴۰۰ میلیمتر با دو ضخامت ۳۰ و ۵۰ میلیمتر ساخته و تست گردید. بر روی این دال‌ها آزمایش ضربه گوی افتان انجام شده است. جزئیات دال‌های ساخته شده در این تحقیق نیز در جدول ۴ و شکل ۲ نشان داده شده است. دال‌ها در ۱۲ مدل متفاوت با ترکیبی از الیاف فولادی ۲۵ و ۵۰ میلیمتری ساخته شدند. بجز ۲ نمونه شاهد (Ref) که فاقد الیاف می‌باشد، ۶ نمونه دال دارای ترکیبی از الیاف فولادی ۲۵ و ۵۰ میلیمتری و ۴ نمونه دیگر دارای الیاف ۲۵ و ۵۰ میلیمتری به تنهایی می‌باشند. در تمامی نمونه های دال ها به جز نمونه مرجع، درصد الیاف موجود در دال ۱ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر، طرح اختلاط دال ها به نحوی صورت گرفته است که مجموع الیاف فولادی با طول های مختلف یک درصد ثابت (۱درصد) باشد.

جدول ۳. طرح اختلاط‌های استفاده شده در ساخت یک متر مکعب کامپوزیت سیمانی

شماره	نام طرح اختلاط	آب (kg)	سیمان (kg)	ماسه (kg)	درصد الیاف به طول ۲۵ میلی‌متر	درصد الیاف به طول ۵۰ میلی‌متر	فوق روان کننده (kg)
۱	Ref	۴۵۳	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۰	۰	۴/۸
۲	L50P1	۴۵۳	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۰	۱	۴/۸
۳	L25P1	۴۵۳	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱	۰	۴/۸
۴	L50P0.5-L25P0.5	۴۵۳	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۰/۵	۰/۵	۴/۸
۵	L50P0.75-L25P0.25	۴۵۳	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۰/۲۵	۰/۷۵	۴/۸
۶	L50P0.25-L25P0.75	۴۵۳	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۰/۷۵	۰/۲۵	۴/۸

جدول ۴. مشخصات دال‌ها به ابعاد ۴۰۰×۳۰۰ میلی‌متر

شماره	نام نمونه	عمق دال (mm)	حجم الیاف نمونه	
			حجم الیاف ۲۵mm	حجم الیاف ۵۰mm
۱	Ref-S30	۳۰	۰	۰
۲	L50P1-S30	۳۰	۰	۱
۳	L25P1-S30	۳۰	۱	۰
۴	L50P0.5-L25P0.5-S30	۳۰	۰/۵	۰/۵
۵	L50P0.25-L25P0.75-S30	۳۰	۰/۷۵	۰/۲۵
۶	L50P0.75-L25P0.25-S30	۳۰	۰/۲۵	۰/۷۵
۷	Ref-S50	۵۰	۰	۰
۸	L50P1-S50	۵۰	۰	۱
۹	L25P1-S50	۵۰	۱	۰
۱۰	L50P0.5-L25P0.5-S50	۵۰	۰/۵	۰/۵
۱۱	L50P0.25-L25P0.75-S50	۵۰	۰/۷۵	۰/۲۵
۱۲	L50P0.75-L25P0.25-S50	۵۰	۰/۲۵	۰/۷۵



شکل ۲. مشخصات نمونه‌های دال

۴- نتایج آزمایشات

۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری

به منظور تعیین مقاومت فشاری ۶ طرح اختلاط، نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر با استفاده از یک دستگاه جک بتن‌شکن به ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن، مطابق شکل ۳ تحت آزمایش قرار گرفت. استاندارد ASTM C39 برای ساخت و آزمایش نمونه‌های مکعبی مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۵ نتایج حاصل از انجام تست مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی ارائه شده است. مطابق با نتایج، طرح اختلاط L50P1 حداکثر مقاومت فشاری را در بین سایر نمونه‌ها دارد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری، بیانگر تاثیر بیشتر الیاف ۵۰ میلی‌متری بر افزایش مقاومت فشاری می‌باشد. در واقع با کاهش درصد الیاف فولادی ۲۵ میلی‌متری در نمونه‌های مکعبی، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. همان طوری که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود حداکثر تغییر مکان تا لحظه انهدام مربوط به گروه L50P1 و حداقل تغییر مکان نیز مربوط به نمونه مرجع بدون الیاف می‌باشد. همچنین تغییر مکان در لحظه شکست در نمونه‌های گروه L50P1 که دارای ۱ درصد الیاف فولادی ۵۰ میلی‌متری می‌باشد از تغییر مکان نمونه L25P1، ۴۳ درصد بیشتر است. همچنین تغییر مکان در لحظه شکست در نمونه‌ای که از طرح اختلاط L50P0.75-L25P0.25 است در مقایسه با طرح اختلاط L25P0.75، ۱ درصد بیشتر است.



شکل ۳. دستگاه جک بتن شکن به همراه نمونه فشاری بعد از آزمایش

جدول ۵: تغییر مکان و مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی

شماره	نمونه	تغییر مکان میانگین در لحظه شکست (mm)	میانگین مقاومت فشاری نمونه های مکعبی (MPa)	مقاومت فشاری معادل استوانه استاندارد (MPa)
۱	Ref	۱/۴۲	۶۸/۱	۵۸/۹۱
۲	L50P0.5-L25P0.5	۱/۸۵	۷۳/۱۱	۶۳/۲۴
۳	L50P1	۳/۰۳	۷۹/۴	۶۸/۶۸
۴	L25P1	۲/۱۲	۷۰/۱۲	۶۰/۶۵
۵	L50P0.75-L25P0.25	۲/۲۶	۷۳/۵	۶۳/۵۸
۶	L25P0.75-L50P0.25	۲/۲۴	۷۰/۴۵	۶۰/۹۴

۴-۲- آزمایش مقاومت کششی

آزمایش کشش بتن به سه روش صورت می‌گیرد که کاربردی‌ترین روش آن روش غیرمستقیم یا برزیلی است. تعیین مقاومت کششی بتن به روش دونیم کردن برای آزمون‌های استوانه‌ای قالب‌گیری شده یا مغزه‌گیری شده مطابق با ASTM C496 می‌باشد. در این پژوهش بر روی ۶ طرح اختلاط نمونه‌ی استوانه‌ای ساخته شده به ابعاد 100×200 میلی‌متر، آزمایش کششی به روش دو نیم شدن مطابق با شکل ۴ انجام شده است. در جدول ۶ نتایج آزمایش مقاومت کششی انجام شده بر روی نمونه‌ها ارائه شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، گروه L50P1 که دارای یک درصد الیاف فولادی ۵۰ میلی‌متری می‌باشد، دارای بیشترین مقاومت کششی در بین نمونه‌ها می‌باشد. همچنین مطابق نتایج ملاحظه می‌گردد که با افزایش درصد الیاف ۲۵ میلی‌متری در نمونه‌ها، مقاومت کششی کاهش می‌یابد. مطابق با نتایج آزمایش کششی، با افزایش طول الیاف میزان درگیری الیاف با کامپوزیت بیشتر شده و لذا توان تحمل نیروهای کششی در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. مطابق جدول ۶ با افزودن ۱ درصد الیاف فولادی در نمونه L50P1 مقاومت کششی نسبت به نمونه مرجع بدون الیاف ۱۷۳ درصد و نسبت به نمونه دارای ۱ درصد الیاف فولادی ۲۵ میلی‌متر (L25P1) ۲۵ درصد افزایش نشان می‌دهد. همچنین با افزایش درصد الیاف فولادی ۵۰ میلی‌متر تغییر مکان متناظر با انهدام نمونه از ۰/۴۲ میلی‌متر در نمونه L50P1 به ۸/۷۲ میلی‌متر در نمونه L25P1 رسیده است. همچنین تغییر مکان متناظر با تغییر مکان در لحظه شکست با افزایش طول الیاف افزایش می‌یابد به طوری که در نمونه L25P1 تغییر مکان از ۴/۴۷ میلی‌متر به ۸/۷۲ میلی‌متر در نمونه L50P1 رسیده است.

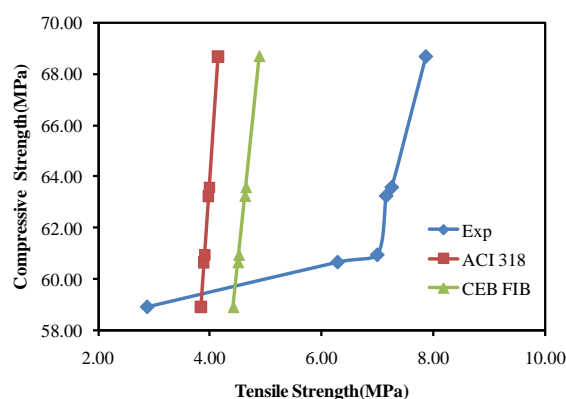


شکل ۴. نحوه انجام آزمایش تست کششی

جدول ۶: مقاومت کششی نمونه ها

مقاومت کششی طبق CEB-FIB (MPa)	مقاومت کششی طبق ACI 318 (MPa)	مقاومت کششی آزمایشگاهی (f_{SP}) (MPa)	تغییر مکان میانگین در لحظه شکست (mm)	نمونه	شماره
۴/۴۲	۳/۸۴	۲/۸۷	۰/۴۲	Ref	۱
۴/۶۳	۳/۹۸	۷/۱۵	۴/۵	L50P0.5-L25P0.5	۲
۴/۸۹	۴/۱۴	۷/۸۶	۸/۷۲	L50P1	۳
۴/۵۱	۳/۸۹	۶/۲۸	۴/۴۷	L25P1	۴
۴/۶۵	۳/۹۹	۷/۲۵	۵/۳۸	L50P0.75-L25P0.25	۵
۴/۵۲	۳/۹	۶/۹۹	۴/۴۹	L25P0.75-L50P0.25	۶

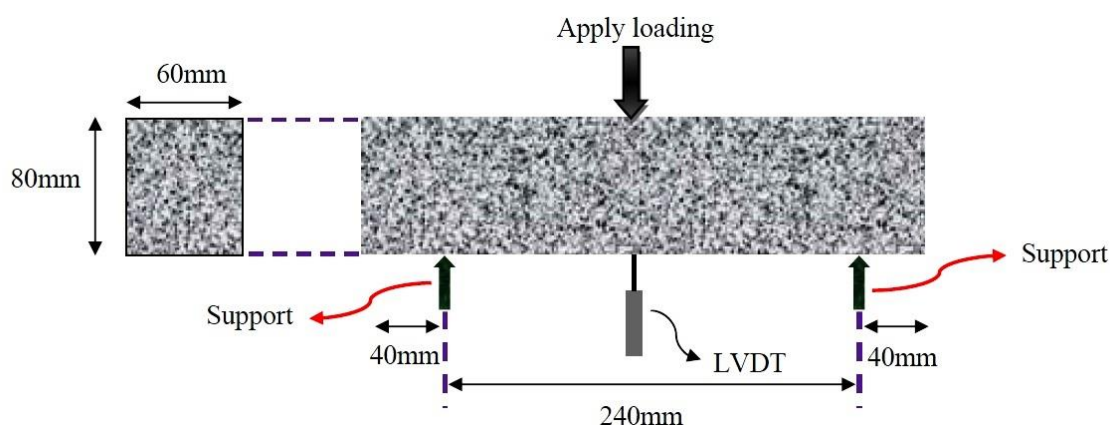
همچنین در شکل ۵ مقایسه ای بین نتایج به دست آمده از آزمایش، با مقادیر آیین نامه ای صورت گرفته است. همانطور ی که در شکل ملاحظه می شود اختلاف مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر آیین نامه ای تقریباً زیاد می باشد. دلیل این تفاوت زیاد، عدم در نظر گرفتن اثرات الیاف فولادی در روابط آیین نامه ای می باشد. کمترین اختلاف بین مقاومت کششی به دست آمده از آزمایش با مقادیر آیین نامه ای مربوط به نمونه مرجع (فاقد الیاف) می باشد.



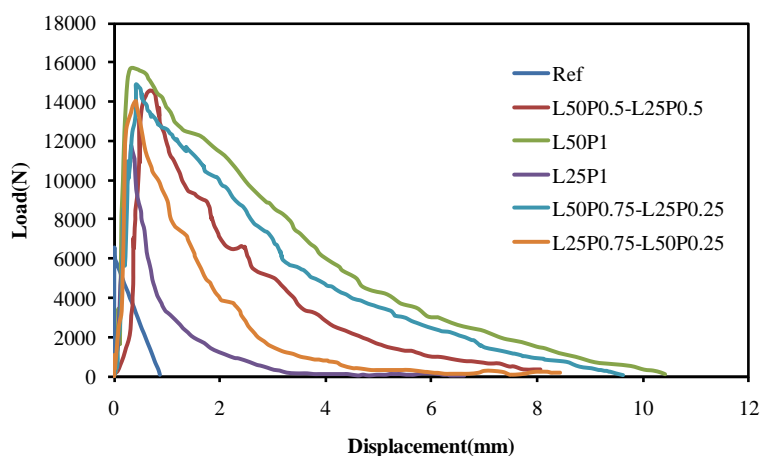
شکل ۵. مقایسه نتایج آزمایش کشش با روابط آیین نامه ای

۴-۳- آزمایش مقاومت خمشی

جهت بررسی افزودن الیاف بر روی مقاومت خمشی تیرها تعداد ۱۸ عدد نمونه تیر کوچک خمشی با ابعاد $320 \times 80 \times 60$ میلی‌متر در قالب ۶ طرح اختلاط ساخته شد. آزمایش خمش سه نقطه‌ای مطابق با ASTM C 78 مطابق با شکل ۶ بر روی نمونه‌ها انجام گردید. با استفاده از جک خمشی به مرکز دهانه تیرها نیرو وارد شده و تا لحظه ایجاد شکست این نیرو به آرامی افزایش می‌یابد. در شکل ۷ منحنی بار-تغییر مکان نمونه‌های خمشی ارائه شده است. همچنین مقادیر مقاومت خمشی حداکثر و حداقل به ترتیب مربوط به طرح اختلاط L50P1 و مرجع می‌باشد. مطابق با جدول ۷، مقدار مقاومت خمشی حداکثر و حداقل به ترتیب مربوط به طرح اختلاط L50P1 در مقایسه با طرح اختلاط L50P1 کمتر است. از طرفی مقدار مقاومت خمشی در طرح اختلاط L25P0.75-L50P0.25 در مقایسه با طرح اختلاط L50P1 کمتر است. در واقع با افزایش درصد الیاف با طول کوتاه‌تر در طرح اختلاط در مقایسه با الیاف با طول بیشتر، مقاومت خمشی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همانطوری که در جدول ۷ ملاحظه می‌گردد، مقادیر مقاومت خمشی به دست آمده از آزمایش برای نمونه مرجع که فاقد الیاف می‌باشد، اختلاف چندانی با مقادیر آیین نامه ای ندارد. از طرفی با افزایش الیاف فولادی، اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی و آیین نامه ای به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. در گروه L50P1 مقدار مقاومت خمشی $9/8$ مگا پاسکال می‌باشد که به ترتیب ۴۸، ۵۶، ۲۱، ۴۱ و ۴۷ درصد بیشتر از مقادیر محاسبه شده توسط آیین نامه‌های ACI 318-2002، ACI 318-2005، ACI 363، CEN و IS می‌باشد. در واقع استفاده از الیاف در روابط آیین نامه ای لحاظ نشده است. در شکل ۸ نحوه انهدام یک طرح اختلاط نشان داده شده است.



شکل ۶: ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی به منظور انجام آزمایش خمش سه نقطه ای



شکل ۷: منحنی بار-تغییر مکان نمونه‌های خمشی

جدول ۷: مقاومت خمشی تیرها

مقاومت خمشی (MPa)						نام گروه
IS	CEN	ACI 363	ACI 318 2005	ACI 318 2002	آزمایشگاهی	
۴/۸	۵/۱۸	۷/۲۱	۳/۹۷	۴/۷۶	۴/۱۲	Ref
۴/۹۸	۵/۴۳	۷/۴۸	۴/۱۱	۴/۹۳	۹/۱	L50P0.5-L25P0.5
۵/۱۹	۵/۷۴	۷/۷۹	۴/۲۸	۵/۱۴	۹/۸	L50P1
۴/۸۸	۵/۲۸	۷/۳۲	۴/۰۳	۴/۸۳	۷/۳۲	L25P1
۴/۹۹	۵/۴۵	۷/۵	۴/۱۲	۴/۹۴	۹/۲۹	L50P0.75-L25P0.25
۴/۸۹	۵/۳	۷/۳۴	۴/۰۴	۴/۸۴	۸/۷۷	L25P0.75-L50P0.25



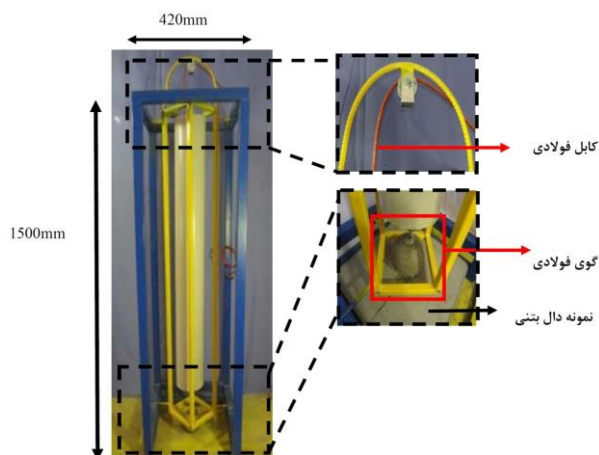
شکل ۸: نحوه انهدام تیر در دستگاه تعیین مقاومت خمشی

۵- مقاومت ضربه ای

در این تحقیق به منظور بررسی مقاومت ضربه ای دال های بتنی ساخته شده، از یک دستگاه تست کیفی (از طریق افتادن یک گوی فولادی بر سطح دال ها) استفاده شد. در این آزمایش با استفاده از دستگاه مقاومت ضربه ای ساخته شده، یک گوی فولادی به وزن ۵/۶ کیلوگرم و به قطر حدود ۱۴۰ میلیمتر به صورت مکرر بر روی نمونه ها تا ایجاد گسیختگی در آن ها ضربه می زند. در این دستگاه برای حرکت گوی در مسیری مستقیم و به منظور برخورد گوی به وسط دال، از یک سازه هدایت کننده گوی، شامل یک مکعب ساخته شده از پروفیل قوطی و یک لوله پلاستیکی با قطر ۱۵۰ میلیمتر استفاده گردید. در قسمت فوقانی دستگاه نیز یک عدد قرقره جهت بالا بردن گوی نصب شده است. در شکل ۹ جزئیات دستگاه ساخته شده به منظور انجام آزمایش ضربه، نشان داده شده است. در این آزمایش تعداد ضربات لازم برای ایجاد اولین ترک قابل رویت در نمونه، تحت عنوان مقاومت اولین ترک و همچنین تعداد ضربه برای ایجاد انهدام و گسیختگی در نمونه، تحت عنوان مقاومت نهایی ثبت گردید. معیار رسیدن به گسیختگی نهایی در این آزمایش، چند تکه شدن دال ها یا گسترش ترک ها در تماس سطح دال می باشد. در این آزمایش همچنین انرژی جذب شده توسط نمونه ها تا لحظه ی گسیختگی با استفاده از رابطه ۱ برحسب ژول محاسبه گردید.

$$= N \times W \times H E_N \quad (1)$$

در این رابطه N تعداد ضربات برای ایجاد شکست در نمونه ها، W وزن گوی فولادی مورد استفاده و H ارتفاع سقوط وزنه می باشد.



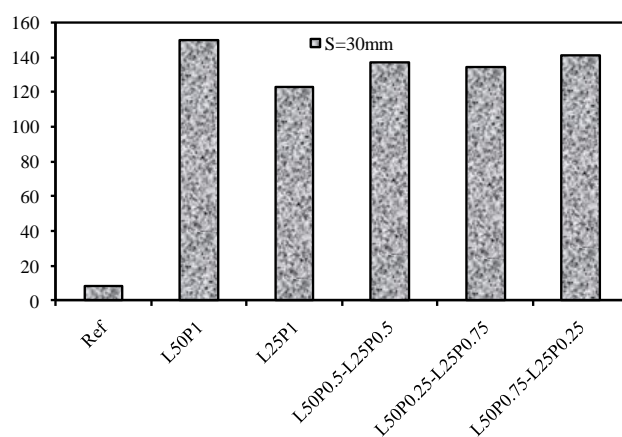
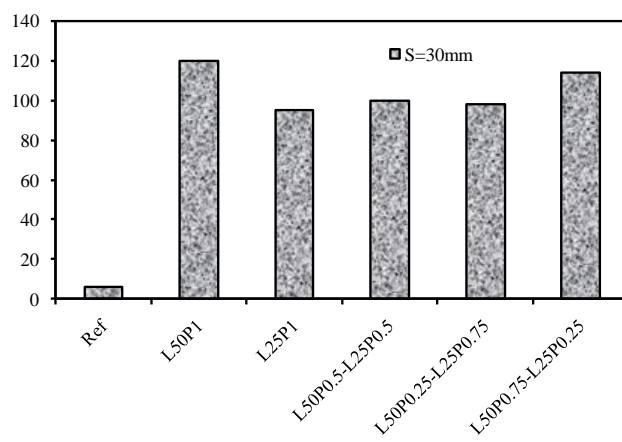
شکل ۹: نمای دستگاه ساخته شده به منظور انجام تست ضربه‌ای

۵-۱- مقاومت اولین ترک

آزمایش تعیین مقاومت ضربه‌ای بر روی ۱۲ سری دال (از هر دال ۲ عدد ساخته شد) با دوضخامت متفاوت (۳۰ و ۵۰ میلی‌متر) انجام شد. در انجام آزمایش مقاومت ضربه‌ای ناشی از برخورد وزنه افتان تعداد ضربه‌ها برای ایجاد اولین ترک قابل رویت در نمونه‌ها برداشت و به عنوان مقاومت اولین ترک نمونه‌ها در جدول ۸ ارائه شده است. همچنین در شکل ۱۰ نمودار ستونی مقاومت اولین ترک برای دو پنل کامپوزیتی به ضخامت ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر ارائه شده است. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در دال‌های با ضخامت ۳۰ میلی‌متر در ۶ طرح اختلاط برای نمونه‌ی Ref مقاومت اولین ترک ۶ می‌باشد. از طرفی با افزایش میزان الیاف در نمونه‌ها مقاومت اولین ترک به شدت افزایش می‌یابد. بیشترین و کمترین مقاومت اولین ترک در دال‌های کامپوزیتی به ضخامت ۳۰ میلی‌متر به ترتیب مربوط به نمونه Ref و L50P1 می‌باشد. این روند در دال‌های با ضخامت ۵۰ میلی‌متر نیز وجود دارد. با افزایش ضخامت پنل‌ها از ۳۰ به ۵۰ میلی‌متر، مقاومت اولین ترک در نمونه مرجع حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین حداکثر مقاومت اولین ترک در پنل‌های با ضخامت ۳۰ میلی‌متر ۱۲۰ ضربه می‌باشد که مربوط به گروه L50P1 است. در پنل‌های کامپوزیتی با ضخامت ۵۰ میلی‌متر، حداکثر مقاومت اولین ترک ۱۵۰ ضربه می‌باشد. در واقع با افزایش ضخامت از ۳۰ به ۵۰ میلی‌متر مقاومت ضربه‌ای اولین ترک در پنل‌های کامپوزیتی دارای الیاف مربوط به گروه‌های دارای ۱ درصد الیاف فولادی ۲۵ میلی‌متری می‌باشد. این مقاومت ضربه‌ای برای پنل‌های با ضخامت ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر به ترتیب ۹۵ و ۱۲۳ ضربه می‌باشد. حداکثر اختلاف بین مقاومت ضربه‌ای اولین ترک در پنل‌های کامپوزیتی دارای الیاف ۳۰ و ۵۰ میلی‌متری به ترتیب ۲۵ و ۲۸ ضربه می‌باشد. در شکل ۱۱ نمونه‌ای از پنل‌ها که دچار ترک اولیه شده است، ملاحظه می‌گردد.

جدول ۸: مقاومت اولین ترک در دال‌ها

مقاومت اولین ترک	حجم الیاف نمونه		عمق دال (mm)	نام نمونه	شماره
	حجم الیاف ۵۰mm	حجم الیاف ۲۵mm			
FC					
۶	۰	۰	۳۰	Ref-S30	۱
۱۲۰	۱	۰	۳۰	L50P1-S30	۲
۹۵	۰	۱	۳۰	L25P1-S30	۳
۱۰۰	۰/۵	۰/۵	۳۰	L50P0.5-L25P0.5-S30	۴
۹۸	۰/۲۵	۰/۷۵	۳۰	L50P0.25-L25P0.75-S30	۵
۱۱۴	۰/۷۵	۰/۲۵	۳۰	L50P0.75-L25P0.25-S30	۶
۸	۰	۰	۵۰	Ref-S50	۷
۱۵۰	۱	۰	۵۰	L50P1-S50	۸
۱۲۳	۰	۱	۵۰	L25P1-S50	۹
۱۳۷	۰/۵	۰/۵	۵۰	L50P0.5-L25P0.5-S50	۱۰
۱۳۴	۰/۲۵	۰/۷۵	۵۰	L50P0.25-L25P0.75-S50	۱۱
۱۴۱	۰/۷۵	۰/۲۵	۵۰	L50P0.75-L25P0.25-S50	۱۲



شکل ۱۰: نمودار مقاومت اولین ترک در دال ها با دوزخامت متفاوت

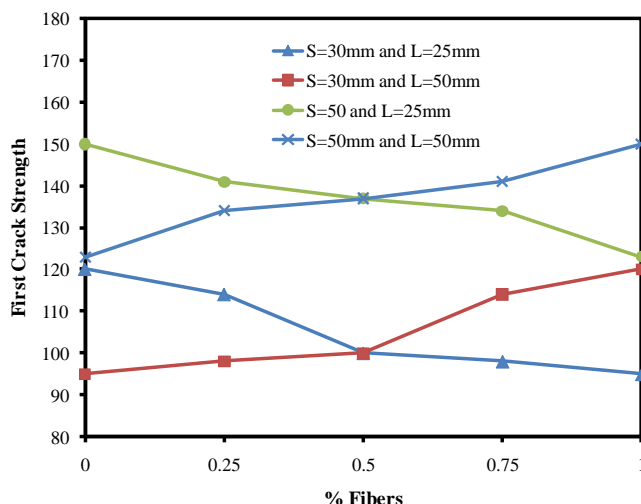


شکل ۱۱: انجام آزمایش ضربه برای تعیین مقاومت اولین ترک دال

۵-۲- تاثیر طول الیاف بر مقاومت اولیه ترک

در هر دو گروه از پنل های کامپوزیتی دارای الیاف، مطابق با شکل ۱۲، با افزایش درصد الیاف ۲۵ میلیمتر (در مقایسه با الیاف ۵۰ میلیمتر) مقاومت اولین ترک کاهش می یابد. از طرفی با افزایش درصد الیاف به طول ۵۰ میلیمتر، مقاومت اولین ترک مطابق شکل ۱۲ افزایش می یابد. همانطوری که در شکل ۱۲ ملاحظه می گردد، تغییرات مقاومت اولین ترک بر حسب تغییرات درصد الیاف، تقریباً به صورت خطی می باشد. شیب این منحنی ها با افزایش درصد الیاف ۲۵ میلیمتری به صورت نزولی و برای الیاف ۵۰ میلیمتری به صورت

صعودی می باشد. این تغییرات شیب نزولی الیاف ۲۵ میلیمتری و تغییرات شیب صعودی الیاف ۵۰ میلیمتری نشان دهنده تاثیر بیشتر الیاف ۵۰ میلیمتری بر مقاومت اولین ترک می باشد. در جدول ۹ روابط محاسبه مقادیر مقاومت اولین ترک بر حسب درصد الیاف ارائه شده است.



شکل ۱۲: تغییرات مقاومت اولین ترک بر حسب درصد الیاف

جدول ۹: روابط محاسبه مقادیر مقاومت اولین ترک بر حسب درصد الیاف

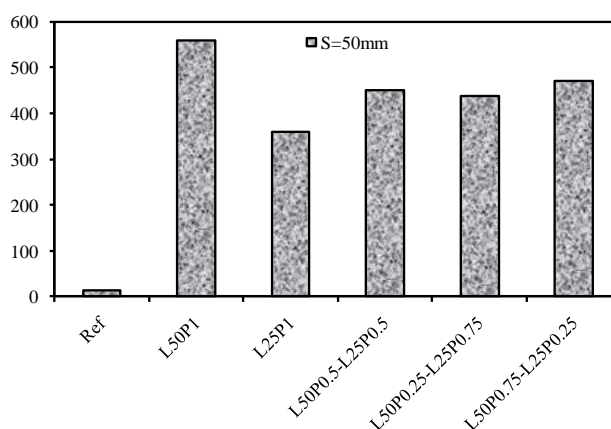
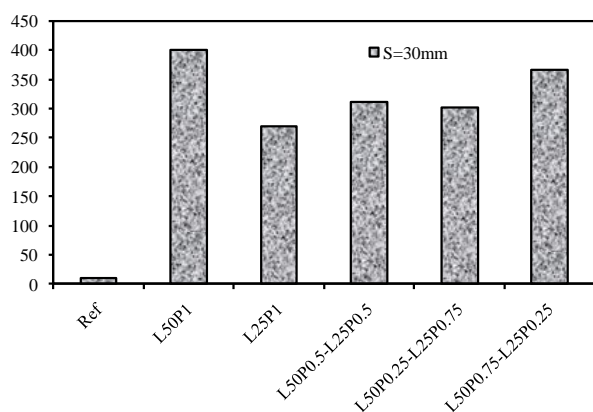
ضخامت پنل کامپوزیتی (mm)	مقاومت اولین ترک (FC)	طول الیاف (mm)
۵۰ میلیمتر	$FC = 24.4 V_f + 124.8$	۵۰
	$FC = -24.4 V_f + 149.2$	۲۵
۳۰ میلیمتر	$FC = 26.4 V_f + 92.2$	۵۰
	$FC = -26.4 V_f + 118.6$	۲۵

۳-۵- مقاومت نهایی

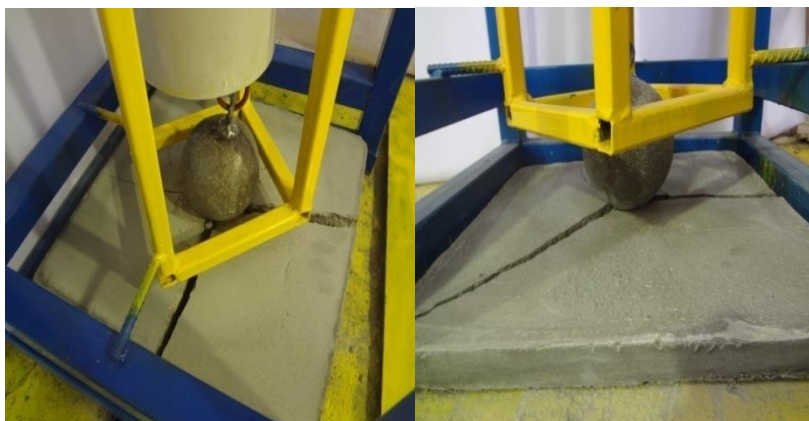
در آزمایش ضربه وزنه افتان تعداد ضربه برای ایجاد گسیختگی نهایی در نمونه‌ها ثبت و در جدول ۱۰ ارائه شده است. معیار گسیختگی نهایی در دال‌ها تبدیل آن‌ها به چند تکه یا گسترش ترک‌های ایجاد شده در تمام سطح دال می‌باشد. همانطور که در نمودار ستونی شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در نمونه‌های Ref مقاومت ضربه ای بسیار پایین می‌باشد. به عبارت دیگر در پنل‌های به ضخامت ۳۰ و ۵۰ میلیمتر، مقاومت انهدام نمونه‌های مرجع به ترتیب ۱۱ و ۱۴ ضربه می‌باشد. این مقدار مقاومت ضربه ای نمونه ای مرجع در مقایسه با سایر نمونه‌های دارای الیاف بسیار کم می‌باشد. در پنل‌های کامپوزیتی به ضخامت ۳۰ میلیمتر کمترین و بیشترین مقاومت ضربه ای به ترتیب مربوط به گروه‌های L50P1 و L25P1 با ۴۰۱ و ۲۷۰ ضربه می‌باشد. همچنین در پنل‌های گروه دوم به ضخامت ۵۰ میلیمتر کمترین و بیشترین مقاومت ضربه ای مربوط به همین دو گروه با ۳۶۰ و ۵۶۰ ضربه می‌باشد. مقاومت ضربه ای حداکثر پنل‌ها به ضخامت ۳۰ میلیمتر ۴۰۱ ضربه می‌باشد که ۳۰ درصد کمتری از حداکثر مقاومت ضربه ای پنل‌های به ضخامت ۵۰ میلیمتر است. مقادیر مقاومت نهایی نمونه در طرح اختلاط L50P0.75-L25P0.25 در مقایسه با طرح اختلاط L50P0.25-L25P0.75 بیشتر می‌باشد. مقاومت نهایی گروه L50P0.75-L25P0.25 در پنل‌های به ضخامت ۳۰ و ۵۰ میلیمتر به ترتیب ۳۶۶ و ۴۷۲ ضربه می‌باشد که نسبت به مقادیر مقاومت ضربه ای گروه L50P0.25-L25P0.75 به ترتیب ۲۲ و ۸ درصد افزایش نشان می‌دهد. در واقع با افزایش میزان الیاف فولادی با طول بیشتر مقاومت ضربه ای نهایی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در شکل ۱۴ نحوه محاسبه مقاومت انهدام نمونه‌ها نشان داده شده است.

جدول ۱۰: مقاومت نهایی نمونه ها

مقاومت اولین ترک FC	حجم الیاف نمونه		عمق دال (mm)	نام نمونه	شماره
	حجم الیاف ۵۰mm	حجم الیاف ۲۵mm			
۱۱	۰	۰	۳۰	Ref-S30	۱
۴۰۱	۱	۰	۳۰	L50P1-S30	۲
۲۷۰	۰	۱	۳۰	L25P1-S30	۳
۳۱۲	۰/۵	۰/۵	۳۰	L50P0.5-L25P0.5-S30	۴
۳۰۱	۰/۲۵	۰/۷۵	۳۰	L50P0.25-L25P0.75-S30	۵
۳۶۶	۰/۷۵	۰/۲۵	۳۰	L50P0.75-L25P0.25-S30	۶
۱۴	۰	۰	۵۰	Ref-S50	۷
۵۶۰	۱	۰	۵۰	L50P1-S50	۸
۳۶۰	۰	۱	۵۰	L25P1-S50	۹
۴۵۱	۰/۵	۰/۵	۵۰	L50P0.5-L25P0.5-S50	۱۰
۴۳۹	۰/۲۵	۰/۷۵	۵۰	L50P0.25-L25P0.75-S50	۱۱
۴۷۲	۰/۷۵	۰/۲۵	۵۰	L50P0.75-L25P0.25-S50	۱۲



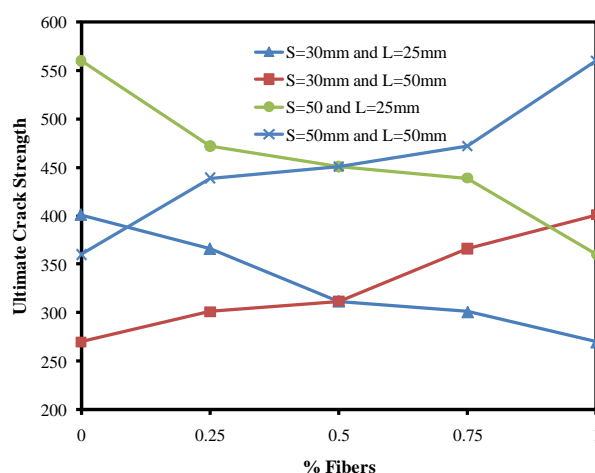
شکل ۱۳: نمودار ستونی مقاومت نهایی نمونه های کامپوزیتی



شکل ۱۴: انجام آزمایش ضربه برای تعیین مقاومت نهایی دال

۵-۴- تاثیر طول الیاف بر مقاومت نهایی

مطابق شکل ۱۵ رابطه مقاومت نهایی ضربه ای پنل های کامپوزیتی در برابر درصد الیاف فولادی تقریباً خطی دارد. مطابق با شکل ۱۷ با افزایش درصد الیاف فولادی، میزان مقاومت نهایی نمونه ها به صورت تقریباً خطی تغییر می کند. همانطور که در جدول ۱۱ ملاحظه می گردد، روابط مقاومت نهایی نمونه ها بر حسب درصد الیاف، برای الیاف ۲۵ میلیمتری با شیب نزولی و برای الیاف ۵۰ میلیمتری با شیب صعودی می باشد. این تغییرات شیب نزولی الیاف ۲۵ میلیمتری و تغییرات شیب صعودی الیاف ۵۰ میلیمتری نشان دهنده تاثیر بیشتر الیاف ۵۰ میلیمتری بر مقاومت اولین ترک می باشد. در جدول ۱۲ روابط محاسبه مقادیر مقاومت نهایی بر حسب درصد الیاف ارائه شده است.



شکل ۱۵: تغییرات مقاومت نهایی بر حسب درصد الیاف

جدول ۱۱: روابط محاسبه مقادیر مقاومت نهایی بر حسب درصد الیاف

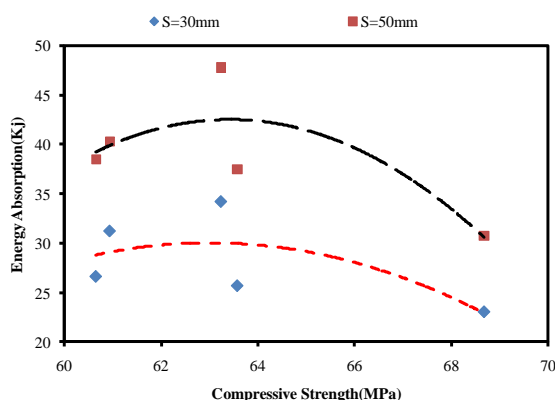
ضخامت پنل کامپوزیتی (mm)	مقاومت اولین ترک (FC)	R ²	طول الیاف (mm)
۵۰ میلیمتر	$FC = 173.2 V_f + 369.8$	۰/۹۱۰۱	۵۰
	$FC = -173.2 V_f + 543$	۰/۹۱۰۱	۲۵
۳۰ میلیمتر	$FC = 130.8 V_f + 264.6$	۰/۹۶۳۲	۵۰
	$FC = -130.8 V_f + 395.4$	۰/۹۶۳۲	۲۵

۵-۵- جذب انرژی

انرژی جذب شده تا ایجاد انهدام در نمونه ها از رابطه ۱ محاسبه شده است. انرژی جذب شده توسط نمونه ها بر حسب کیلو ژول محاسبه و در جدول ۱۲ ارائه شده است. نتایج نشان دهنده اختلاف بسیار زیاد انرژی جذب شده در دالهای دارای الیاف فولادی نسبت به دالهای بدون می باشد. علت این امر می تواند انسجام بسیار بالای ایجاد شده در دالها توسط الیاف فولادی و دوختگی ترکهای ایجاد شده توسط این الیاف باشد. از طرفی نحوه ترکیب الیاف های فولادی با طول های مختلف نیز بر روی جذب انرژی موثر می باشد. مطابق با نتایج، استفاده از الیاف فولادی ۵۰ میلیمتری مقادیر جذب انرژی نمونه ها را افزایش می دهد. حداکثر میزان انرژی جذب شده توسط نمونه ها، مربوط به دال با ضخامت ۵۰ میلیمتری و گروه L50P1 به میزان ۴۷/۷۹ کیلو ژول می باشد که ۵۶ درصد بیشتر از انرژی جذب شده توسط گروه (با ضخامت ۳۰ میلیمتر) L25P1 می باشد. کمترین میزان انرژی جذب شده در نمونه های الیافی مربوط به گروه L25P1 با ضخامت ۳۰ میلیمتر می باشد. متوسط انرژی جذب شده توسط پنل ها به ضخامت ۳۰ میلیمتر ۲۳/۶۳ کیلو ژول و برای پنل های کامپوزیتی به ضخامت ۵۰ میلیمتر ۳۲/۶۶ کیلو ژول می باشد. در واقع متوسط انرژی جذب شده توسط پنل های کامپوزیتی ۵۰ میلیمتری، ۳۸ درصد بیشتر از پنل های کامپوزیتی ۳۰ میلیمتری می باشد. همچنین در شکل ۱۳ نمودار تغییرات انرژی جذب شده نمونه های کامپوزیتی دارای الیاف فولادی بر حسب مقاومت فشاری معادل نمونه های استوانه ای استاندارد نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۳ منحنی برآزش شده روابط پیش نهادی در جدول ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می گردد، میزان خطاب حداکثر و حداقل روابط پیش نهادی با مقادیر آزمایشگاهی به ترتیب ۱۶/۱ و ۰/۱ درصد می باشد.

جدول ۱۲: انرژی جذب شده توسط نمونه های کامپوزیتی

شماره	نمونه	انرژی جذب شده به دست آمده از آزمایش (Kj)	انرژی جذب شده محاسبه شده توسط رابطه پیش نهادی	درصد خطا
۱	Ref	۰/۹۴	--	--
۲	L50P1	۳۴/۲۲	۲۹/۸۸	-۱۲/۷
۳	L25P1	۲۳/۰۳	۲۲/۷۴	-۱/۳
۴	L50P0.5-L25P0.5	۲۶/۶۳	۲۸/۶۸	۷/۷
۵	L50P0.25-L25P0.75	۲۵/۶۹	۲۹/۸۱	۱۶/۱
۶	L50P0.75-L25P0.25	۳۱/۲۴	۲۸/۹۶	-۷/۳
۷	Ref	۱/۱۹	--	--
۸	L50P1	۴۷/۷۹	۴۲/۵۹	-۱۰/۹
۹	L25P1	۳۰/۷۲	۳۰/۷	-۰/۱
۱۰	L50P0.5-L25P0.5	۳۸/۴۹	۳۹/۳۲	۲/۱
۱۱	L50P0.25-L25P0.75	۳۷/۴۷	۴۲/۵۹	۱۳/۷
۱۲	L50P0.75-L25P0.25	۴۰/۲۸	۳۹/۹۶	-۰/۸



شکل ۱۳: تغییرات میزان انرژی جذب شده توسط نمونه ها بر حسب مقاومت فشاری

جدول ۱۳: رابطه بین مقاومت فشاری نمونه ها با میزان انرژی جذب شده

ضخامت پنل کامپوزیتی (mm)	مقدار انرژی جذب شده به وسیله پنل کامپوزیتی (KJ)	R ²
۵۰ میلیمتر	$E = 27.843f_c' - 0.221(f_c')^2 - 847.07$	۰/۴۳۹۸
۳۰ میلیمتر	$E = 54.489f_c' - 0.429(f_c')^2 - 1685.2$	۰/۶۳۹۴

۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

مطابق با نتایج حاصل از انجام آزمایشات خصوصیات مکانیکی و ضربه ای بر روی نمونه های ساخته شده از کامپوزیت های سیمانی خود ترکم، نتایج زیر حاصل گردید:

۱- نتایج حاصل از آزمایشات تعیین روانی کامپوزیت سیمانی خودترکم بیانگر این بوده است، که وجود الیاف باعث کاهش روانی بتن می شود. نتایج آزمایش های روانی نشان داد، که با افزایش طول الیاف فولادی مورد استفاده، میزان روانی کامپوزیت کاهش می یابد. در واقع با استفاده از الیاف فولادی با طول کمتر، میزان روانی کامپوزیت سیمانی افزایش می یابد.

۲- مطابق با نتایج، طرح اختلاط L50P1 حداکثر مقاومت فشاری را در بین سایر نمونه ها دارد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری، بیانگر تاثیر بیشتر الیاف ۵۰ میلیمتری بر افزایش مقاومت فشاری می باشد. در واقع با کاهش درصد الیاف فولادی ۲۵ میلیمتری در نمونه های مکعبی، مقاومت فشاری افزایش می یابد.

۳- حداکثر تغییر مکان نمونه های فشاری تا لحظه انهدام مربوط به گروه L50P1 و حداقل تغییر مکان نیز مربوط به نمونه مرجع بدون الیاف می باشد. همچنین تغییر مکان در لحظه شکست در نمونه های گروه L50P1 که دارای ۱ درصد الیاف فولادی ۵۰ میلیمتری می باشد از تغییر مکان نمونه L25P1، ۴۳ درصد بیشتر است. همچنین تغییر مکان در لحظه شکست در نمونه گروه L50P0.75-L25P0.25 در مقایسه با طرح اختلاط L25P0.75، ۱ درصد بیشتر است.

۴- مطابق نتایج، با افزایش درصد الیاف با طول کوتاه تر در طرح اختلاط، در مقایسه با الیاف با طول بیشتر، مقاومت خمشی نمونه ها کاهش می یابد. مقادیر مقاومت خمشی به دست آمده از آزمایش برای نمونه مرجع که فاقد الیاف می باشد، اختلاف چندانی با مقادیر آیین نامه ای ندارد. از طرفی با افزایش الیاف فولادی، اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی و آیین نامه ای به طور چشمگیری افزایش می یابد. در گروه L50P1 مقدار مقاومت خمشی ۹/۸ مگا پاسکال می باشد که به ترتیب ۴۸، ۵۶، ۲۱، ۴۱ و ۴۷ درصد بیشتر از مقادیر محاسبه شده توسط آیین نامه های ACI 318-2002، ACI 318-2005، ACI 363، CEN، و IS می باشد.

۵- مطابق با نتایج آزمایش ضربه ای، در دال های با ضخامت ۳۰ و ۵۰ میلیمتر کمترین مقاومت ضربه ای مربوط به نمونه های فاقد الیاف می باشد. بیشترین و کمترین مقاومت اولین ترک در دال های کامپوزیتی به ضخامت ۳۰ میلیمتر به ترتیب مربوط به نمونه Ref و L50P1 می باشد. این روند در دال های با ضخامت ۵۰ میلیمتر نیز وجود دارد. با افزایش ضخامت پنل ها از ۳۰ به ۵۰ میلیمتر، مقاومت اولین ترک در نمونه مرجع حدود ۳۰ درصد افزایش می یابد. حداکثر اختلاف بین مقاومت ضربه ای اولین ترک در پنل های کامپوزیتی داری الیاف ۳۰ و ۵۰ میلیمتری به ترتیب ۲۵ و ۲۸ ضربه می باشد.

۶- نتایج نشان دهنده اختلاف بسیار زیاد انرژی جذب شده در دال های دارای الیاف فولادی نسبت به دال های بدون می باشد. علت این امر می تواند انسجام بسیار بالای ایجاد شده در دال ها توسط الیاف فولادی و دوختگی ترکهای ایجاد شده توسط این الیاف باشد. حداکثر میزان انرژی جذب شده توسط نمونه ها، مربوط به دال با ضخامت ۵۰ میلیمتری و گروه L50P1 به میزان ۴۷/۷۹ کیلو ژول می باشد که ۵۶ درصد بیشتر از انرژی جذب شده توسط گروه (با ضخامت ۳۰ میلیمتر) L25P1 می باشد. متوسط انرژی جذب شده توسط پنل های کامپوزیتی ۵۰ میلیمتری، ۳۸ درصد بیشتر از پنل های کامپوزیتی ۳۰ میلیمتری می باشد.

مراجع

- [1] N.Banthia, N. Nadakumar. (2003). Crack growth resistance of hybrid fiber cement composite. cement and concrete composite, 31, 3-9.
- [2] N.Banthia, M .Sappakittipakom. (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. Cement and Concrete Research, 39, 1366-1372.
- [3] Wild S, Sabir BB, Khatib JM. (1995). Factors influencing strength development of concrete containing silica fume. Cement Concrete Res, 25, 1567-1584.
- [4] Ozawa K, Maekawa K, Okamura H. (1996). Self-Compacting high performance concrete. Collected Papers (University of Tokyo: Department of Civil Engineering), 34, 135-149.
- [5] Okamura H. (1997). Self Compacting High-Performance Concrete. Concrete International, 31, 50-54.
- [6] Okamura H, Ozawa K. (1994). Self-Compactable high performance concrete in japan. International Workshop on High Performance Concrete, 21, 31-44.
- [7] Bartos, P.J.M, Gibbs, J.C, Zhu, W. (2001). Uniformity of in situ properties of Self-Compacting Concrete in full scale structural elements. Cement and Concrete Composites, 28, 489-501.
- [8] M. Mastali, A. Dalvand, A. Sattarifar. (2017). The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycle CFRP fiber with different and dosages. Composite part B, 112, 74-92.
- [9] Romualdi J.P. and Mandel J.A. 1964. "Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement". Journal of ACI, :657-670.
- [10] Vandewalle, L., RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Materials and structures, 2000. 33(225): p. 3-6.
- [11] Li, V.C. (1993). From micromechanics to structural engineering- the design of cementitious composites for civil engineering applications. JSCE J. of Struc. Mechanics and Earthquake Engineering, 10(2), 37-48
- [12] Fischer, G., Wang, S. and Li, V.C. (2003). Design of engineered cementitious composites for processing and workability requirements, Seventh International Symposium on Brittle Matrix Composites, Warsaw, Poland, 29- 36
- [13] Kong, H.J., Bike, S. and Li, V.C. (2003). Development of a self-compacting engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization", Journal of Cement and Concrete Composites, 25(3), 301-309
- [14] Wang, S. and Li, V.C. (2006) High early strength engineered cementitious composites, ACI Materials Journal, 103(2), pp. 97-105 .
- [15] Karihaloo, B.L., and Wang, J., 1997. Micromechanical modeling and strain hardening and tensile softening in cementitious composites. Journal of Computational Mechanics, (19), 453-462.
- [16] Lepech, M.D., Li, V.C., Robertson, R.E. and Keoleian, G.A. (2007). Design of ductile engineered cementitious composites for improved sustainability", ACI Materials Journal, 105(4), pp. 350-366 .
- [17] Li, V.C. and Yang, E.H. (2007). Self-healing in concrete materials", In Self Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science, S. van der Zwaag, ed., 161-193.
- [18] Habeeb Lateef Muttashar, Mohd Azreen Mohd Ariffin, Mohammed Noori Hussein, Mohd Warid Hussin, Shafiq Bin Ishaq, Self-compacting geopolymer concrete with spend garnet as sand replacement, Journal of Building Engineering, Volume 15, 2018, Pages 85-94.
- [19] Luca Facconi, Fausto Minelli, Giovanni Plizzari, Steel fiber reinforced self-compacting concrete thin slabs – Experimental study and verification against Model Code 2010 revisions, Engineering Structures, Volume 122, 2016, Pages 226-237.
- [20] Xiangzhao Xu, Tianbao Ma, Jianguo Ning, Failure mechanism of reinforced concrete subjected to projectile impact loading, Engineering Failure Analysis, Volume 96, 2019.
- [21] Xiangzhao Xu. Tianbao Ma .Jianguo Ning. (2019). Failure mechanism of reinforced concrete subjected to projectile impact loading. journal of Engineering Failure Analysis . Volume 96, Pages 468-483
- [22] Naaman, A.E., and Reinhardt, H.W., 2004. "High performance fiber reinforced cement composites". HPRCC-4, International RILEM Report., Materials and Structures, 36, 710-712.