



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Experimental study of the effect of dynamic loading on rectangular armed panels made of self-compacting composite fiber and lattice sheets

A. Dalvand¹, H. Hatami^{2*}, AS. Chegini³

1- Assistant Professor, Civil Engineering, Lorestan University, Khoramabad, Iran

2- Assistant Professor, Mechanical Engineering, Lorestan University, Khoramabad, Iran

3- M.Sc., Lorestan University, Khoramabad, Iran

ABSTRACT

The nature of dynamic loading is different due to the high force in a few milliseconds with static loading. The amount of energy absorption and energy loss in composite materials is a suitable measurement to evaluate the performance against impact loads. On the other hand, the use of self-compacting composites due to its unique properties has attracted the attention of researchers. High compressive and tensile strength, high flexural strength, has attracted more attention from researchers to this kind of cement composites. In this research, in the form of a comprehensive laboratory work, using four basement mixing designs, 64 rectangular composite panels were constructed in two groups of 100*100 mm with four thicknesses of 30, 45, 60 and 75 mm and tested under dynamic loading. Tensile and flexural strength tests were made on all four mixing designs. Steel fibers with percentages of 0, 0.25, 0.5 and 0.75 with length of 25 mm were used for the construction of cement composites. The drop hammer test machine with weighs 180 kg and the power of 7500 J is used. According to laboratory results, the combined use of steel and fiber reinforced steel sheets increased the energy absorption considerably. Also, the initial peak force increased and the deformation length decreased.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 December 2018

Revise Date: 01 March 2019

Accept Date: 09 March 2019

Keywords:

Cement composite
Compressive strength
Micro steel fibers
Energy absorber
Force-displacement curve

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.161505.1741

*Corresponding author: Hossein Hatami

Email address: hatami.h@lu.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی تاثیر بارگذاری دینامیکی بر پنل های مسلح مستطیلی ساخته شده با کامپوزیت سیمانی خود تراکم الیافی و ورق های مشبک

احمد دالوند^۱، حسین حاتمی^{۲*}، آرزو صیدی چگنی^۳

۱- استادیار، گروه عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۲- استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

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

چکیده

ماهیت بارگذاری های ضربه ای و دینامیکی به دلیل اعمال نیروی زیاد در چند میلی ثانیه با بارگذاری استاتیکی متفاوت می باشد. میزان جذب و استهلاک انرژی در مواد کامپوزیتی، معیاری مناسب به منظور بررسی عملکرد آنها در برابر بارهای ضربه ای می باشد. جاذب های انرژی به طور وسیعی در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد. از طرفی 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 بصورت یک کار جامع آزمایشگاهی با استفاده از ۴ طرح اختلاط پایه، ۶۴ پنل کامپوزیتی مستطیلی در دو گروه به ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰ میلیمتر با چهار ضخامت ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ میلیمتر ساخته و تحت بار ضربه ای دینامیکی تست شده اند. بر روی هر چهار طرح اختلاط ساخته شده، آزمایش های مقاومت فشاری، کششی و خمشی انجام گردید. از الیاف فولادی با درصد های ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ با طول ۲۵ میلی متر به منظور ساخت کامپوزیت های سیمانی استفاده شد. دستگاه آزمایش ضربه از چکشی به وزن ۱۸۰ کیلوگرم و توان ۷۵۰۰ ژول در این تحقیق استفاده شده است. نمونه ها با ارتفاع سقوط ۶۰۰ میلیمتر، تحت بار گذاری دینامیکی قرار گرفته اند. مطابق با نتایج آزمایشگاهی مشاهده گردید که استفاده ترکیبی از الیاف و ورق های مشبک فولادی به صورت ترکیبی، موجب افزایش میزان جذب انرژی به طور قابل ملاحظه ای شد. همچنین نیروی پیک اولیه نیز افزایش یافت و همچنین طول لهیدگی و تغییر شکل نمونه کاهش یافت.

کلمات کلیدی: کامپوزیت سیمانی، مقاومت ضربه ای، الیاف فولادی میکرو، جاذب انرژی، رفتار نیرو - جابجایی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.161505.1741	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.161505.1741	۱۴۰۰/۰۱/۳۰	۱۳۹۷/۱۲/۱۸	۱۳۹۷/۱۲/۱۸	۱۳۹۷/۱۲/۱۰	۱۳۹۷/۰۹/۲۵
				نویسنده مسئول* پست الکترونیکی:		
				حسین حاتمی h64hatami@gmail.com		

۱- مقدمه

امروزه با گسترش تکنولوژی در بخش مهندسی عمران، بسیاری از سازه های عمرانی، نظیر پل ها، سازه های بلند، ساختمان های مسکونی در معرض بارهای ضربه ای قرار دارند. خطرات ناشی از بارهای دینامیکی نظیر انفجار های تروریستی، برخورد وسایل نقلیه و انفجار گاز در محیط های بسته مسکونی و بسیاری از عوامل دیگر موجب وارد شدن کرنش زیادی به سازه ها می شود. به عنوان مثال در اثر موج ناشی از انفجار گاز نرخ کرنش به وجود آمده در بتن بسیار کم می باشد [۱]. به منظور طراحی این گونه سازه ها می بایست رفتار سازه تحت بارهای ضربه ای مورد بررسی قرار گیرد. پیشرفت تکنولوژی کامپوزیت های سیمانی الیافی در سال های اخیر چشمگیر بوده است [۱]. عمده ی این پیشرفت ها به سبب توسعه ی هر چه بیشتر ملات، گونه های مختلف الیاف، اندرکنش ملات-الیاف و فرآیند تولید کامپوزیت اجرایی می باشد [۲ و ۳]. علاوه بر آن می توان به مواردی مانند معرفی نسل جدید مواد افزودنی (فوق روان کننده ها) با امکان دستیابی به مقاومت های بالا همراه با کمترین کاهش در کارایی ملات نیز اشاره نمود. همچنین افزودن ریز پرکننده ها 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 پیشرفت های اساسی در ساخت و مدل سازی رفتار این کامپوزیت ها شده است. امروزه مصالح بتنی به طور گسترده ای در سازه های مهندسی مورد استفاده قرار می گیرد. این مصالح در مقایسه با سایر مصالح از وزن بیشتری در واحد هزینه برخوردار است. بتن مقاومت زیادی در برابر آتش سوزی داشته و میزان جذب انرژی زیادی دارد. ضعف آن تخریب پذیری زیاد در برابر بارهای شدید دینامیکی به دلیل عدم تحمل نیروهای کششی زیاد می باشد [۵]. با استفاده از الیاف در بتن، سرعت گسترش ترک ها کاهش می یابد و منجر به شکل پذیری آن می گردد. برخی از این الیاف عبارتند از: الیاف فولادی، کربنی، شیشه ای و پلیمری. بتن الیافی خواص مناسبی همچون شکل پذیری و قابلیت جذب انرژی بالا و پایداری در برابر ترک خوردن را دارا می باشد که متناسب با آنها، می توان موارد کاربرد فراوانی برای آن یافت [۶-۸]. در دهه ی ۱۹۶۰، رامودی 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 سال های اخیر ترکیب انواع الیاف با طول های مختلف در دستور کار قرار گرفت. گسترش دانش در خصوص چگونگی تاثیر الیاف بر ملات، منجر به تدوین توصیه هایی در مورد طراحی سازه ای توسط موسسه RILEM گردید [۱۰]. کامپوزیت های سیمانی مهندسی (ECC) در دانشگاه میشیگان توسعه یافته است و به علت شکل گیری و گسترش منظم ترک های چند گانه، شکل پذیری کششی آن به طور قابل ملاحظه ای بهبود یافته است. در این کامپوزیت های سیمانی، مقدار الیاف به کمتر از ۲ درصد کاهش یافته است. طبق تحقیقات انجام شده در سال های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳، مقاومت کششی کامپوزیت ها ۴ تا ۶ مگاپاسکال و شکل پذیری کششی آنها ۳ تا ۵ درصد اندازه گیری شده است [۱۱ و ۱۲]. کامپوزیت های مهندسی دارای کاربرد های وسیعی می باشند. کامپوزیت سیمانی خود تراکم در ساخت و ساز های با مقیاس وسیع و آرماتور گذاری فشرده مورد استفاده قرار می گیرند [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 هستند، 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 بازیابی خصوصیات مکانیکی مصالح، پس از تحمل خسارت کاربرد دارند [۱۷].

همچنین امروزه استفاده از سازه های جدارنازک در برنامه های کاربردی جذب انرژی در حال توسعه می باشد. به طور کلی مطالعه عملکرد این نوع سازه ها تحت شرایط بارگذاری مختلف بهبود یافته است. سازه های جدارنازک دارای ظرفیت جذب انرژی بالایی هستند به همین دلیل در صنایع مختلف به عنوان جاذب انرژی استفاده میشوند. ضربه گیرها و جاذب ها، انرژی جنبشی ناشی از برخورد را به وسیله ی فروریزش سازه و انجام کارپلاستیک هدر می دهند. این نوع ضربه گیرها برگشت ناپذیر هستند و بعد از تغییر شکل دیگر قابل استفاده نمی باشند بنابراین در طراحی این نوع جاذب ها اکثرا بر روی خواص مواد، پارامترهای هندسی و وجود و یا عدم وجود نقص در رفتار سازه به منظور دستیابی به جذب انرژی بیشتر تمرکز شده است [۱۸-۲۳]. جی.سونگ و همکاران [۲۴]، ورق های مشبک با سطح مقطع مربعی را به منظور کاهش وزن سازه معرفی کرده اند و این نوع جاذب ها را تحت نیروی فشاری مورد بررسی قرار داده اند. با توجه به

آزمایش های تجربی انجام شده، مشاهده می شود که جاذب های با الگوی پنجره ای عملکرد بهتری نسبت به جاذب های معمولی دارند و تا حد زیادی موجب کاهش نیروی بیشینه اولیه و افزایش مقدار انرژی جذب شده، می شوند. ایجاد الگوهای پنجره ای منجر به این می شود که فروریزش جاذب از محل پنجره ها آغاز شود و نیروی بیشینه اولیه را کاهش دهد. با این روش فروریزش و لهیدگی زودتر آغاز شده و نیروی ناشی از برخورد را کاهش می دهد. گراسیانو و همکارانش نخستین بار به معرفی جاذبه ای انرژی مشبک تحت بارگذاری شبه استاتیکی پرداخته اند. مطالعه های انجام شده بر روی این نوع جاذب ها نشان می دهد که مکانیزم فروریزش و ظرفیت جذب انرژی جاذب به جهت سلول ها بستگی دارد. گراسیانو و همکاران بعد از معرفی این نوع جاذب ها، مطالعاتی را به صورت تجربی و عددی به منظور بهبود ظرفیت جذب انرژی جاذب و کاهش نیروی بیشینه اولیه انجام داده اند. مطالعه های انجام شده بیشتر بر روی تعداد سلول های سطح مقطع و نوع سطح مقطع (دایره ای و مربعی)، به منظور بهبود عملکرد این نوع جاذب ها انجام شده است. رفتار جاذب های مربعی بسیار شبیه به جاذب های مشبک استوانه ای می باشد و ویژگی های جذب انرژی به طور قابل توجهی در جاذب های مربعی بهبود یافته است. استفاده از جاذب دایره ای و مربعی به صورت ترکیبی باعث می شود که با فروریزش جاذب و برهم کنش بین آنها، افزایش ظرفیت جذب انرژی ایجاد گردد [۲۵-۲۹].

استفاده از بتن و کامپوزیت های سیمانی به دلیل مزایای آنها از قبیل، مقاومت فشاری مناسب، مقاومت در برابر خوردگی، جذب انرژی بالا در برابر بارهای ضربه ای و مقرون به صرفه بودن از لحاظ هزینه رو به گسترش می باشد. در طراحی سازه ها رفتار مواد می بایست مشخص باشد. در بارگذاری های معمولی بر روی بتن از روش استاتیکی استفاده می شود. در روش استاتیکی نرخ اعمال بار بر روی نمونه ها کم می باشد. بتن و انواع کامپوزیت های سیمانی نسبت به سرعت بارگذاری اعمالی حساس می باشند [۲-۶]. استفاده از بارگذاری استاتیکی به تنهایی پاسخگوی پیش بینی رفتار بتن و کامپوزیت های سیمانی در برابر بارهای ضربه ای نمی باشد. همچنین ورق های فولادی مشبک دارای توان بالایی در جذب انرژی می باشند [۳۰-۳۳]. ترکیب ورق های مشبک فولادی و کامپوزیت های سیمانی خود تراکم الیافی می تواند به عنوان یک سیستم ترکیبی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین روی بتن های خود تراکم نیز تحقیقات خوبی اخیراً انجام شده است و خواص این نوع بتن ها نسبت به بتن های معمولی و غیر کامپوزیتی نیز بررسی گردیده است. اخیراً بیشتر تحقیقات روی بتن ها روی بتن های مسلح، همراه با الیاف و بصورت خودتراکم می باشد [۳۴-۳۸].

در این تحقیق نمونه های بتنی با درصد الیاف کار شده متنوع و لایه چینی ورق های مشبک از یک تا چهار لایه تحت بارگذاری های استاتیکی و دینامیکی قرار گرفته است تا تاثیر افزایش درصد الیاف بکار رفته در آماده سازی بتن ها و همچنین افزایش لایه های ورق های مشبک مسلح کار شده درون آنها مورد بررسی قرار بگیرد.

۲- نوآوری پژوهش

در تحقیقات صورت گرفته بر روی ضربه، بیشتر کارهای انجام شده در حوزه قطعات مکانیکی می باشد. در بیشتر مطالعات، برخورد ضربه های دینامیکی بر روی قطعات صنعتی در معرض ضربه بررسی شده است. یکی از موادی که در معرض ضربه قرار دارد، بتن می باشد. ترکیب سیمان با سنگ دانه های مختلف می تواند منجر به تولید یک ماده کامپوزیتی با مقاومت فشاری مناسب شود. بر حسب نوع سنگ دانه های مورد استفاده در این کامپوزیت، نامگذاری های مختلفی ایجاد شده است. کامپوزیت های سیمانی خود تراکم الیافی به دلیل ویژگی های منحصر به فردی نظیر خود تراکم بودن، عدم نیاز به ویبره، 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 مکان هایی که تحت بارهای ضربه ای قرار دارند (مانند اسکله های کانتینری، کارخانه های فولاد، سوله های صنعتی، باند های فرود هواپیما، سوله های نظامی، انبار های مهمات و ...) می تواند موجب افزایش مقاومت ضربه ای نمونه ها شوند. از طرفی استفاده ورق های فلزی مشبک که قابلیت جذب انرژی بالایی دارند در این نوع از کامپوزیت ها ایده ای نو می باشد. مطالعاتی که در گذشته بر روی ورق های مشبک فولادی انجام شده است، نشان از جذب انرژی بالایی این ورق های مشبک در عین سبکی آنها دارد. از طرفی ترکیب ورق های مشبک و الیاف فولادی میکرو با کامپوزیت خود تراکم الیافی ایده ای جدید می باشد. همچنین استفاده از آزمایش ضربه ای دینامیکی بر روی این نمونه ها، نتایج واقعی آزمایش ضربه بر روی این نوع از

کامپوزیت ها را نشان می دهد. بسیاری از مطالعات انجام شده بر روی بتن های کامپوزیتی تحت ضربه، مربوط به آزمایشات کیفی می باشد. در این تحقیق با استفاده از سنسور شتاب سنج با دقت میکروثانیه و دستگاه تمام خودکار DH-TM7500J که یک دستگاه صنعتی پیشرفته می باشد، خصوصیات ضربه ای به صورت دینامیکی استخراج شده و منحنی های شتاب زمان و نیرو-جابجایی بصورت دقیق مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۳- خصوصیات مصالح

به منظور ساخت کامپوزیت های سیمانی خود تراکم الیافی در این پژوهش از مصالح سنگی ریزدانه استفاده گردید. مصالح ریز دانه مورد استفاده در این تحقیق دارای قطر ریز ترا از ۲/۳۶ میلیمتر می باشند. خصوصیات سیمان مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. به منظور ساخت کامپوزیت سیمانی خود تراکم، از یک ماده اصلاح کننده ویسکوز استفاده شده است. همچنین به منظور کاهش میزان مصرف آب و افزایش کارایی کامپوزیت خود تراکم از یک فوق روان کننده با نام تجاری DezoBuild D-10 استفاده گردید. در این تحقیق از الیاف فولادی میکرو استفاده شد. خصوصیات الیاف فولادی میکرو مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است. الیاف فولادی مورد استفاده در این تحقیق به ترتیب ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد از حجم کامپوزیت سیمانی می باشند. همچنین در شکل ۱ نمایی از الیاف مورد استفاده و نحوه ترکیب آنها در میکسر نشان داده شده است. در ساخت نمونه های این تحقیق، الیاف در مرحله پایانی به مخلوط اضافه شده است و تلاش گردید که الیاف به صورت یکنواختی در نمونه ها توزیع شوند. ابتدا ماسه و سیمان در میکسر باهم مخلوط شده و سپس ۹۰ درصد آب اضافه می شود. در نهایت ۱۰ درصد آب باقی مانده که با محلول فوق روان کننده مخلوط شده به ترکیب اضافه می گردد.

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)	D(mm)	چگالی (kg/m ³)	مدول یانگ Gpa	Mpa مقاومت کششی
فولادی میکرو	۲۵ تا ۲۰	۰/۸	۷۸۵۰	۲۰۰	۱۱۰۰



شکل ۱. الیاف مصرفی مورد استفاده

۴- آماده سازی نمونه ها

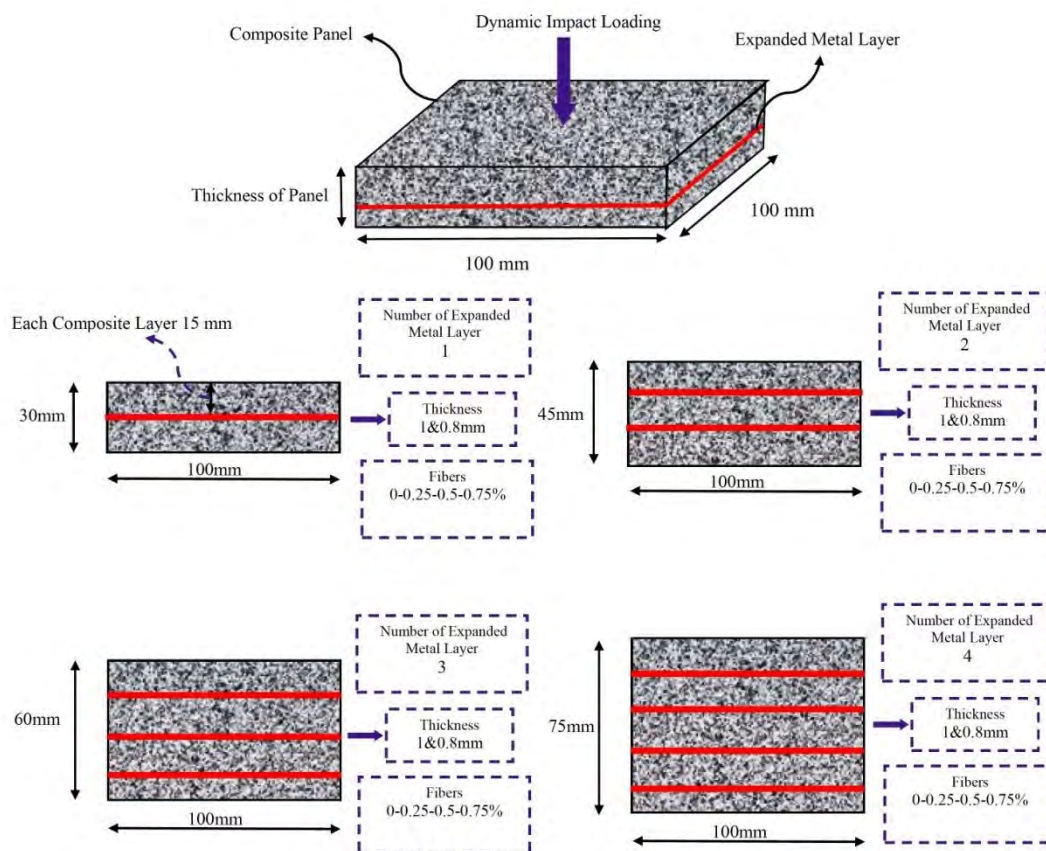
در این تحقیق از ۴ طرح اختلاط با استفاده از الیاف فولادی میکرو به منظور ساخت نمونه ها استفاده شد. الیاف فولادی با ۰،۰۱۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد مورد استفاده قرار گرفته شده است. همچنین به منظور تعیین خصوصیات مکانیکی طرح اختلاط های ساخته شده، از هر طرح اختلاط ۳ نمونه مکعبی به ضلع ۱۰۰ میلیمتر، ۳ نمونه استوانه به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر و ۳ نمونه تیر منشوری به ابعاد ۶۰×۸۰×۳۲۰ میلی متر مکعب ساخته شد. بر روی نمونه ها مکعبی، استوانه ای و منشوری به ترتیب آزمایش مقاومت فشاری مطابق ASTM C59، کششی مطابق ASTM C496 و خمشی مطابق ASTM C78 انجام شد. در جدول ۲ مشخصات طرح های اختلاط ساخته شده ارائه شده است. در ادامه به منظور تعیین و ارزیابی مقاومت ضربه ای پنل های کامپوزیتی، ۶۴ عدد دال پنل کامپوزیتی با ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰ میلی متر مربع با چهار ضخامت ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ میلیمتری در دو سری ساخته شد. پنل های دارای ضخامت ۳۰ میلیمتر تنها با یک لایه ورق مشبک فولادی مسلح شده اند. به همین ترتیب پنل های به ضخامت ۴۵، ۶۰ و ۷۵ میلیمتر به ترتیب با ۲، ۳ و ۴ لایه ورق مشبک مسلح شده اند. جزئیات پنل های کامپوزیتی ساخته شده در جدول ۳ و شکل ۲ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۳ ملاحظه می گردد، متغیر های در نظر گرفته شده به منظور ساخت پنل ها به ترتیب درصد الیاف فولادی، ضخامت ورق مشبک فولادی و تعداد لایه های ورق مشبک فولادی می باشد. ارتفاع سقوط وزنه پس از تست های اولیه و طراحی ستاپ بارگذاری ضربه ای، برای نمونه ها ۶۰۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. ضخامت ورق های مشبک فولادی ۱ و ۰/۸ میلیمتر می باشد. در شکل ۳ مراحل آماده سازی ورق ها و قرار دادن ورق های مشبک در قالب نشان داده شده است. همانطوری که در شکل ۳ ملاحظه می گردد، ابتدا ورق های فولادی مشبک به ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰ میلیمتر بریده شده، سپس در درون قالب چوبی قرار داده شدند. در نمونه های دارای چند لایه ورق فولادی مشبک، ابتدا لایه اول کامپوزیت سیمانی ریخته شده، سپس ورق مشبک فولادی قرار داده شده و در ادامه لایه کامپوزیت سیمانی بعدی ریخته شده است.

جدول ۲. طرح اختلاط های استفاده شده در ساخت یک متر مکعب کامپوزیت سیمانی

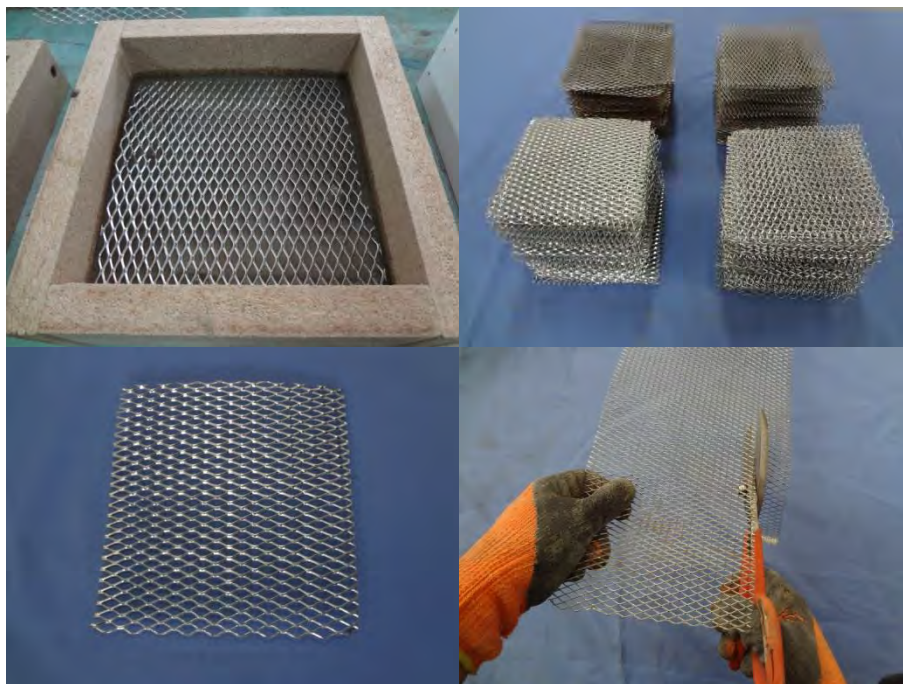
شماره	طرح اختلاط	آب (kg)	سیمان (kg)	ریز دانه (kg)	درصد الیاف فولادی	فوق روان کننده (kg)
۱	0ST	۴۵۳	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۰	۴/۸
۲	.25ST	۴۵۳	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۰/۲۵	۴/۸
۳	.5ST	۴۵۳	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۰/۵	۴/۸
۴	.75ST	۴۵۳	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۰/۷۵	۴/۸

جدول ۳. مشخصات پنل های کامپوزیتی ساخته شده

شماره نمونه	نام نمونه	تعداد ورق	ضخامت ورق (mm)	درصد الیاف	شماره نمونه	نام نمونه	تعداد ورق	ضخامت ورق (mm)	درصد الیاف
۱	SP1-T0.8-0%-1L	۱	۰/۸	۰	۱۷	SP1-T0.8-0.25%-1L	۱	۰/۸	۰/۲۵
۲	SP1-T1-0%-1L	۱	۱	۰	۱۸	SP1-T1-0.25%-1L	۱	۱	۰/۲۵
۳	SP2-T0.8-0%-2L	۲	۰/۸	۰	۱۹	SP2-T0.8-0.25%-2L	۲	۰/۸	۰/۲۵
۴	SP2-T1-0%-2L	۲	۱	۰	۲۰	SP2-T1-0.25%-2L	۲	۱	۰/۲۵
۵	SP3-T0.8-0%-3L	۳	۰/۸	۰	۲۱	SP3-T0.8-0.25%-3L	۳	۰/۸	۰/۲۵
۶	SP3-T1-0%-3L	۳	۱	۰	۲۲	SP3-T1-0.25%-3L	۳	۱	۰/۲۵
۷	SP4-T0.8-0%-4L	۴	۰/۸	۰	۲۳	SP4-T0.8-0.25%-4L	۴	۰/۸	۰/۲۵
۸	SP4-T1-0%-4L	۴	۱	۰	۲۴	SP4-T1-0.25%-4L	۴	۱	۰/۲۵
۹	SP1-T0.8-0.5%-1L	۱	۰/۸	۰/۵	۲۵	SP1-T0.8-0.75%-1L	۱	۰/۸	۰/۷۵
۱۰	SP1-T1-0.5%-1L	۱	۱	۰/۵	۲۶	SP1-T1-0.75%-1L	۱	۱	۰/۷۵
۱۱	SP2-T0.8-0.5%-2L	۲	۰/۸	۰/۵	۲۷	SP2-T0.8-0.75%-2L	۲	۰/۸	۰/۷۵
۱۲	SP2-T1-0.5%-2L	۲	۱	۰/۵	۲۸	SP2-T1-0.75%-2L	۲	۱	۰/۷۵
۱۳	SP3-T0.8-0.5%-3L	۳	۰/۸	۰/۵	۲۹	SP3-T0.8-0.75%-3L	۳	۰/۸	۰/۷۵
۱۴	SP3-T1-0.5%-3L	۳	۱	۰/۵	۳۰	SP3-T1-0.75%-3L	۳	۱	۰/۷۵
۱۵	SP4-T0.8-0.5%-4L	۴	۰/۸	۰/۵	۳۱	SP4-T0.8-0.75%-4L	۴	۰/۸	۰/۷۵
۱۶	SP4-T1-0.5%-4L	۴	۱	۰/۵	۳۲	SP4-T1-0.75%-4L	۴	۱	۰/۷۵



شکل ۲. مشخصات نمونه های کامپوزیتی



شکل ۳. مراحل آماده سازی ورق ها و قرار گیری در قالب

۵- آزمایش ضربه

در این بخش نمونه ها برای بارگذاری ضربه ای مورد بررسی قرار گرفته اند. بارگذاری ضربه ای روی نمونه های کامپوزیتی با درصد الیاف متغیر، ضخامت متغیر ورق های مشبک و تعداد لایه های متغیر ورق های مشبک می بایستی تحت بارگذاری دینامیکی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین تاثیر پارامترهایی مانند افزایش درصد الیاف بکار رفته در نمونه ها، تعداد ورق های مشبک مسلح و ضخامت ورق های مشبک می بایستی مورد بررسی قرار گیرد. از این نوع بارگذاری برای تعیین پارامترهایی مانند نیروی پیک اولیه، طول لهیدگی نمونه ها و دهانه پیک اولیه استفاده می گردد. بارگذاری ضربه ای در مواردی مانند استحکامات دیوارهای بتنی، مخازن تحت فشار، تاسیسات نظامی و سازه های در معرض انفجار تحت بررسی قرار می گیرد. به کمک نتایج حاصل از بررسی منحنی های نیرو-جابجایی، می توان نتایج مورد اطمینانی برای طراحی این نوع سازه ها استخراج نمود. از جمله اهداف این تحقیق بررسی پارامتر تعداد لایه های ورق های مشبک روی استحکام نمونه های کامپوزیتی می باشد. همچنین تاثیر درصد الیاف روی استحکام بارگذاری ضربه ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به کمک دستگاه تست ضربه سقوط آزاد ۷۵۰۰ ژول (DH-TM-7500J) نتایج تست ضربه نمونه ها مورد مقایسه قرار گرفته است. دستگاه DH-TM-7500J دارای ارتفاع سقوط ۳ متر با جرم ضربه زننده متغیر از ۱۸۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم می باشد (شکل ۸-الف). این دستگاه دارای سه سر ضربه زننده متنوع برای انواع تست های ضربه و نفوذ می باشد که در این بررسی نیاز به سر ضربه زننده نیم کروی برای مقایسه نتایج تغییر شکل نمونه ها حین ضربه می باشد (شکل ۸-ب). همچنین داده گیری و پردازش داده توسط شتاب سنج با دقت اندازه گیری میکرو ثانیه و بصورت وای فای می باشد. نتایج پس از انتقال به سیستم، توسط نرم افزاری که با زبان پایتون نوشته شده است، بصورت منحنی شتاب-زمان نمایش داده می شود. (شکل ۸-ج).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸- الف) دستگاه تست ضربه سقوط آزاد ۷۵۰۰ ژول (DH-TM-7500J) ب) سر ضربه زننده نیم کروی ج) سنسور شتاب سنج بصورت وای فای و با دقت میکروثانیه

۶- نحوه محاسبه انرژی جذب شده

ضربه زننده برای تمامی نمونه ها از ارتفاع ۶۰۰ میلیمتری رها شده است. جرم ضربه زننده ۱۸۰ کیلوگرم می باشد. لذا مقدار انرژی وارد شده به نمونه ها مطابق رابطه ۱، برابر $۱/۰۶$ کیلو ژول می باشد. این مقدار انرژی حاصل تغییر شکل نمونه ها تحت بارگذاری ضربه می باشند. مطابق جدول ۳ نمونه ها تحت بارگذاری ضربه ای قرار خواهند گرفت و منحنی های نیرو-جابجایی، پیک نیرو، طول جابجایی (لهیدگی) و مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه ها مورد مقایسه قرار می گیرند. به منظور کاهش خطای آزمایشگاهی در انجام آزمایشات ضربه ای و ترسیم منحنی نیرو-جابجایی از هر نمونه دو عدد ساخته شده است و سپس تحت بارگذاری قرار گرفته اند. نمونه

های ساخته شده به همراه نمونه های مورد آزمایش در مرحله خصوصیات مکانیکی در شرایط عمل آوری یکسان قرار داده شده اند. بعد از گذشت ۲۸ روز نمونه ها به صورت همزمان تحت آزمایش قرار گرفتند.

$$E = mgh = 180kg \times 9.81 m/s^2 \times 0.6m = 1059.48 J = 1.06kj \quad (1)$$

۷- نتایج آزمایشات

۷-۱- آزمایش مقاومت فشاری

به منظور تعیین مقاومت فشاری ۴ طرح اختلاط، نمونه های مکعبی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلیمتر با استفاده از یک دستگاه جک بتن شکن به ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن، مطابق شکل ۴ تحت آزمایش قرار گرفت. استاندارد ASTM C39 برای ساخت و آزمایش نمونه های مکعبی مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۴ نتایج حاصل از انجام تست مقاومت فشاری ۲۸ روزه بر روی نمونه های مکعبی ارائه شده است. نمونه کامپوزیت سیمانی خود تراکم بدون الیاف با ST۰ نشان داده شده است. همچنین نمونه های دارای درصد الیاف ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد به ترتیب با ST۰،۲۵، ST۰،۵ و ST۰،۷۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت فشاری مربوط به گروه ST۰،۷۵ که دارای بیشترین درصد الیاف فولادی میکرو می باشد. با افزایش درصد الیاف از ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد، مقاومت فشاری به ترتیب ۵، ۷ و ۱۲ درصد افزایش یافت. مطابق جدول ۴ افزایش میزان الیاف فولادی در نمونه های فشاری، موجب افزایش انحراف از معیار و ضریب تغییرات نمونه های مقاومت فشاری شده است. بیشترین انحراف از معیار و ضریب تغییرات مربوط به نمونه دارای ۰/۷۵ درصد الیاف فولادی میکرو می باشد. انحراف از معیار نمونه داری ۰/۷۵ درصد الیاف فولادی میکرو (ST۰،۷۵) نسبت به نمونه های دارای ۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد الیاف فولادی به ترتیب ۵۸، ۵۰ و ۳۰ درصد افزایش نشان می دهد. همچنین ضریب تغییرات نمونه داری ۰/۷۵ درصد الیاف فولادی میکرو (ST۰،۷۵) نسبت به نمونه های دارای ۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد الیاف فولادی به ترتیب ۵۳، ۴۷ و ۲۷ درصد افزایش نشان می دهد. افزودن الیاف به نمونه ها موجب می گردد تا پراکندگی بین داده ها افزایش یابد. در واقع افزودن الیاف موجب می گردد تا همگنی کامپوزیت سیمانی کاهش یابد.



شکل ۴. دستگاه جک بتن شکن به همراه تصویر نمونه فشاری بعد از آزمایش

جدول ۴- مقاومت فشاری نمونه های مکعبی

شماره	طرح اختلاط	مقاومت فشاری نمونه ها (Mpa)			میانگین	انحراف از معیار (MPa)	ضریب تغییرات (%)
		نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳			
۱	0ST	68.29	70.49	68.99	1.12	1.62	
۲	.25ST	72.50	74.05	71.41	1.33	1.83	
۳	.5ST	75.73	74.57	72.10	1.85	2.50	
۴	.75ST	80.18	77.23	74.88	2.66	3.43	

۷-۲- آزمایش مقاومت کششی

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 ۴ طرح اختلاط نمونه‌ی استوانه‌ای ساخته شده به ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر، آزمایش کششی به روش دو نیم شدن مطابق با شکل ۵ انجام شده است. در جدول ۵ نتایج آزمایش مقاومت کششی انجام شده بر روی نمونه‌ها ارائه شده است. مطابق با نتایج بیشترین مقاومت کششی مربوط به گروه ST۰,۷۵ با مقدار ۸/۱۵ مگاپاسکال می‌باشد. با افزایش درصد الیاف از ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد، مقاومت کششی نمونه‌های کامپوزیتی به ترتیب ۷۰، ۱۲۲ و ۱۷۳ درصد افزایش یافت. وجود الیاف میکرو در نمونه‌ها، موجب انسجام بیشتر کامپوزیت سیمانی و افزایش مقاومت کششی شده است. همچنین مطابق با نتایج، افزایش الیاف فولادی موجب افزایش پراکندگی داده‌ها و مقادیر انحراف از معیار شده است. انحراف از معیار نمونه داری ۰/۷۵ درصد الیاف فولادی میکرو (ST۰,۷۵) نسبت به نمونه‌های دارای ۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ با درصد الیاف فولادی به ترتیب ۸۵، ۶۶ و ۵۷ درصد، افزایش نشان می‌دهد. همچنین ضریب تغییرات نمونه داری ۰/۷۵ درصد الیاف فولادی میکرو (ST۰,۷۵) نسبت به نمونه‌های دارای ۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد الیاف فولادی به ترتیب ۶۰، ۴۵ و ۴۶ درصد افزایش نشان می‌دهد.



شکل ۵. نحوه انجام آزمایش تست کششی

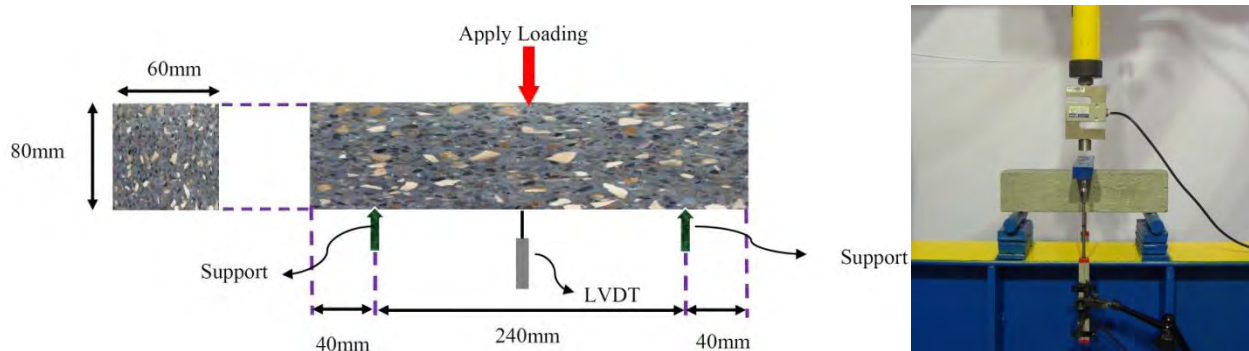
جدول ۵: مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای

شماره	طرح اختلاط	مقاومت کششی نمونه‌ها (Mpa)			میانگین	انحراف از معیار (MPa)	ضریب تغییرات (%)
		نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳			
۱	0ST	2.61	3.34	2.99	0.37	12.25	
۲	.25ST	4.71	5.38	5.09	0.34	6.64	
۳	.5ST	6.43	7.10	6.30	0.43	6.49	
۴	.75ST	9.26	7.38	7.80	0.99	12.11	

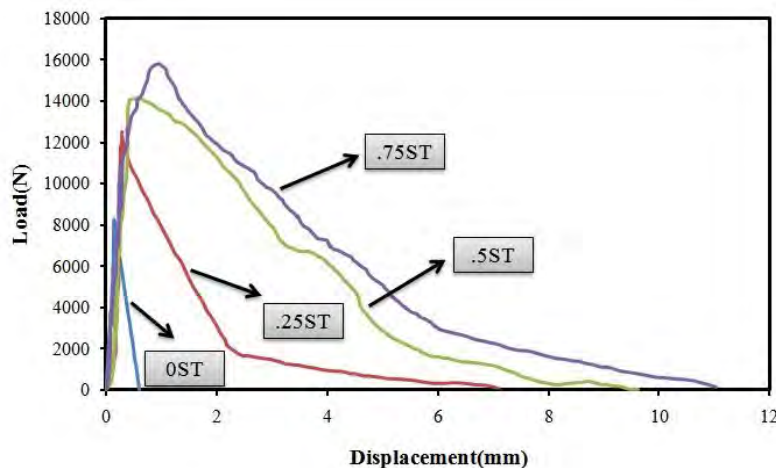
۷-۳- آزمایش مقاومت خمشی

جهت بررسی افزودن الیاف فولادی میکرو بر روی مقاومت خمشی تیرهای کامپوزیتی تعداد ۱۲ عدد نمونه تیر کوچک خمشی با ابعاد ۶۰×۸۰×۳۲۰ میلی‌متر مکعب در قالب ۴ طرح اختلاط ساخته شد. آزمایش خمشی 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 یافت. در شکل ۷ منحنی بار-تغییر مکان نمونه‌های خمشی ارائه شده است. همچنین مقادیر مقاومت خمشی محاسبه شده از نتایج

آزمایشگاهی در جدول ۶ ارائه شده است. مطابق با جدول ۶، مقدار مقاومت خمشی حداکثر و حداقل به ترتیب مربوط به طرح اختلاط ST۰,۷۵ و ST۰ می باشد. مقادیر مقاومت خمشی به دست آمده از آزمایشات، دارای ضریب تغییرات کمتری نسبت به نمونه های فشاری و کششی می باشند. همچنین مقاومت خمشی نمونه ها با افزایش درصد الیاف افزایش یافت. بیشترین مقاومت خمشی ۹/۸۶ مگاپاسکال می باشد که به ترتیب ۴۸، ۲۱ و ۱۰ درصد بیشتر از مقاومت خمشی گروه های ST۰,۲۵، ST۰,۵ و ST۰ می باشد.



شکل ۶. ابعاد نمونه های آزمایشگاهی به منظور انجام آزمایش خمشی سه نقطه ای



شکل ۷. منحنی بار - تغییر مکان نمونه های خمشی

جدول ۶. مقاومت خمشی تیرها

شماره	طرح اختلاط	مقاومت خمشی نمونه ها (Mpa)			میانگین	انحراف از معیار (MPa)	ضریب تغییرات (%)
		نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳			
۱	0ST	5.27	5.04	5.13	5.15	0.12	2.25
۲	.25ST	7.34	7.91	8.23	7.83	0.45	5.76
۳	.5ST	8.28	9.32	8.93	8.84	0.53	5.94
۴	.75ST	9.08	10.22	10.29	9.86	0.68	6.89

۷-۴- نتایج تست ضربه نمونه SP-T0.8-0%-1L

ابتدا نمونه SP1-T0.8-0%-1L که اولین نمونه تحت بارگذاری ضربه ای می باشد، مورد بررسی قرار گرفت. تمامی نتایج شامل منحنی شتاب-زمان، نیرو جابجایی و مقدار انرژی جذب شده (مساحت زیر منحنی نیرو جابجایی) مربوط به نمونه SP1-T0.8-0%-1L در شکل ۹ ارائه شده است. در ادامه نمونه SP1-T0.8-0%-1L با نمونه SP1-T1-0%-1L مورد مقایسه قرار گرفته است. هدف از این مقایسه

بررسی تاثیر افزایش ضخامت ورق روی منحنی نیرو جابجایی تحت بارگذاری ضربه ای می باشد. در شکل ۹ منحنی شتاب-زمان نمونه SP1-T0.8-0%-1L مشاهده می گردد. پس از برخورد ضربه زنده به نمونه، داده ها بصورت وای فای در سیستم انتقال می یابد. مشاهده گردید ابتدا شتاب بصورت ناگهانی تغییر جهت می دهد و از شتاب سقوط آزاد ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه به شتاب ۳۴۴ متر بر مجذور ثانیه افزایش می یابد. این برخورد جهت حرکت ضربه زنده را در عرض ۲۰ میلی ثانیه معکوس می کند که این حالت معادل دهانه پیک می باشد. لذا مشاهده می گردد که شتاب برای این تغییر جهت حرکت و سرعت با جرم ۱۸۰ کیلوگرم برای ضربه زنده، به مقدار ۳۴۴ متر بر مجذور ثانیه می رسد. پس از برخورد اولیه داده های منحنی شتاب- زمان به تدریج کاهش می یابد و به صفر میل می کند. با توجه به شکل ۹-ب مشاهده می گردد که رابطه نیرو و شتاب از قانون دوم نیوتن مطابق رابطه ۲ تبعیت می کند.

$$f = ma \quad (2)$$

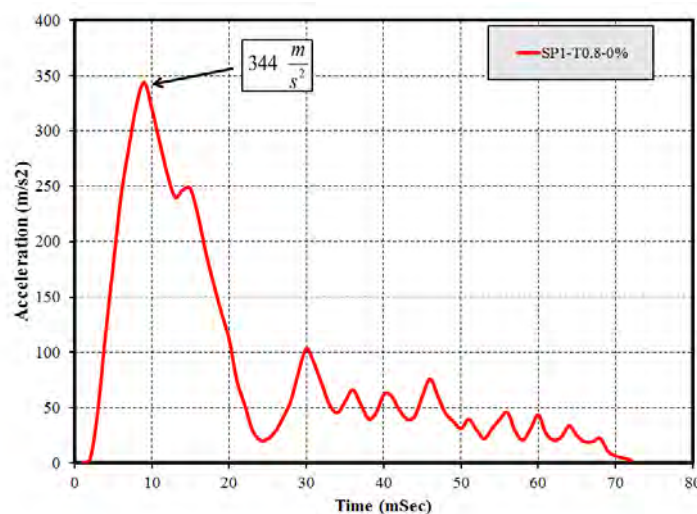
به عبارت دیگر از حاصل ضرب داده منحنی شتاب در جرم ضربه زنده مقادیر متناظر نیروی وارده به نمونه آزمایشگاهی حاصل می گردد. به منظور محاسبه منحنی نیرو- جابجایی، می بایست مقادیر جابجایی متناظر با هر داده شتاب و نیرو را محاسبه نمود. در ادامه به منظور ترسیم منحنی نیرو- جابجایی نمونه ها با استفاده از روش انتگرال گیری عددی سیمپسون، با یک بار انتگرال گیری از داده های شتاب، مقادیر سرعت بر حسب زمان محاسبه می گردد (رابطه ۳). در ادامه با انتگرال گیری عددی از داده های مربوط به سرعت- زمان، منحنی جابجایی زمان نمونه ها مطابق رابطه ۴ محاسبه گردید. منحنی نیرو جابجایی نمونه SP1-T0.8-0%-1L در شکل ۹-ب ترسیم شده است. مطابق شکل ۹-ب حداکثر نیروی پیک اولیه تا ۶۳/۴ کیلو نیوتن افزایش می یابد. این نیرو ناشی از برخورد ضربه زنده با نمونه آزمایشگاهی می باشد. با عبور نیرو از نقطه پیک در منحنی نیرو- زمان بر اثر مستهلک شدن، انرژی ناشی از برخورد ضربه زنده به مرور به سمت صفر میل می کند.

$$v = (a_2 - a_1) / (t_2 - t_1) \quad (3)$$

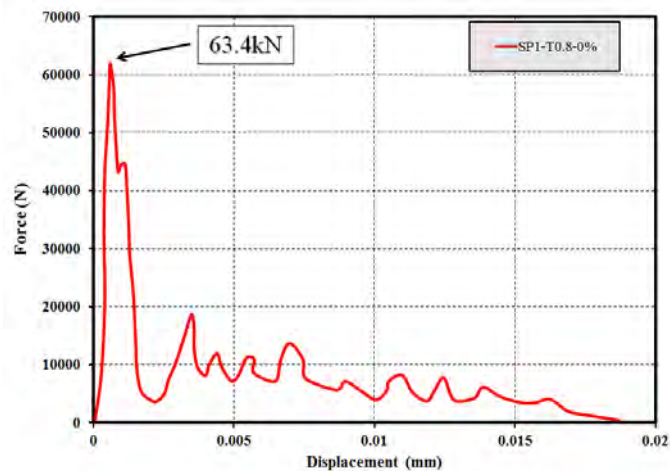
$$x = (v_2 - v_1) / (t_2 - t_1) \quad (4)$$

مساحت زیر منحنی نیرو- جابجایی، مقدار انرژی جذب شده بر حسب ژول را برای نمونه های منهدم شده را نشان می دهد. این مقدار انتقال انرژی صرف تغییر شکل نمونه می گردد. نحوه محاسبه مقدار انرژی جذب شده به کمک نرم افزار گراف، در شکل ۹-ج قابل مشاهده می باشد. در شکل ۹-ج با کمک نرم افزار گراف مقدار جذب انرژی نمونه SP1-T0.8-0%-1L برابر ۱۵۶ ژول محاسبه شده است. مقدار تغییر شکل نمونه و رشد ترک سطحی در نمونه ها، ناشی از انتقال انرژی ضربه ای به نمونه می باشد.

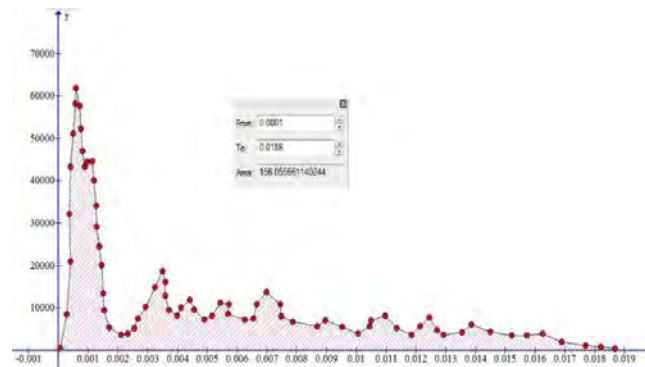
الف)



ب)



ج)

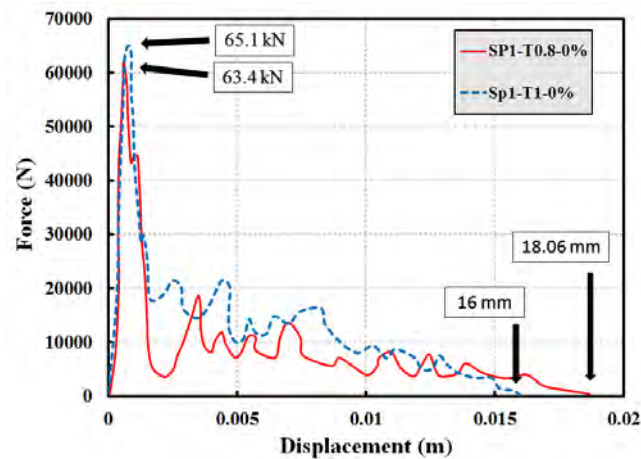


شکل ۹- الف) منحنی شتاب- زمان نمونه SP1-T0.8-0% ب) منحنی نیرو-جابجایی ج) مقدار جذب انرژی

۷-۵- تأثیر ضخامت ورق در رفتار ضربه ای نمونه ها

به منظور بررسی تأثیر ضخامت ورق های مشبک فلزی به تنهایی می بایست از نمونه های فاقد الیاف استفاده نمود. نمونه های فاقد الیاف فولادی با یک ضخامت ثابت SP1-T1-0%-1L و SP1-T0.8-0%-1L تحت بررسی قرار گرفتند. تأثیر افزایش ضخامت ورق مشبک بر رفتار منحنی نیرو جابجایی بارگذاری ضربه ای مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۱۰). ضخامت این دو نمونه ۸/۰ و ۱ میلیمتر می باشد. هر دو نمونه دارای یک لایه ورق مشبک مسلح و فاقد الیاف می باشند. مطابق نتایج با افزایش ضخامت ورق مشبک مورد استفاده در کامپوزیت سیمانی، مقدار نیروی پیک منحنی نیرو- جابجایی افزایش می یابد. همچنین طول لهیدگی نیز کاهش می یابد. مقدار نیروی پیک اولیه برای ورق ۸،۰ میلیمتری ۴،۶ کیلونیوتن می باشد که با انجام تست ضربه ای روی نمونه مشابه با ضخامت ۱ میلیمتری این نیروی پیک اولیه به ۱،۶۵ کیلونیوتن افزایش می یابد. این افزایش نیروی پیک اولیه به دلیل بکار بردن ورق مشبک مسلح با ضخامت بالاتر درون کامپوزیت می باشد. علت این افزایش تمایل کامپوزیت پس از بارگذاری ضربه ای به لهیدگی در منطقه برخورد می باشد. از طرفی افزایش ضخامت ورق مشبک فولادی موجب استحکام بیشتر نمونه تحت بارگذاری ضربه ای می گردد. در نتیجه مقدار نیروی پیک با افزایش ضخامت ورق مشبک، افزایش می یابد. مشابه همین رفتار نیز در خصوص تغییر مکان لهیدگی نمونه ها قابل بیان می باشد. لذا با افزایش ضخامت ورق ها

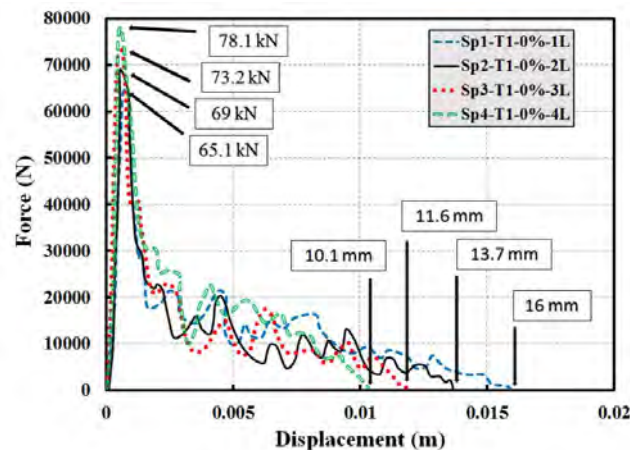
طول لهیدگی کمتری در نمونه ها ملاحظه می شود. مقدار طول لهیدگی برای نمونه با ضخامت ورق ۸،۰ میلیمتر از ۰،۶۱۸ میلیمتر به ۱۶ میلیمتر برای نمونه با ورق یک میلیمتر تک لایه کاهش می یابد. تأثیر افزایش نیروی پیک اولیه با افزایش ضخامت ورق در مقایسه دو منحنی، زیاد نمی باشد. این امر به دلیل مسلح کردن ورق درون کامپوزیت می باشد که تأثیر افزایش ضخامت با مسلح نمودن ورق درون کامپوزیت کاهش می یابد.



شکل ۱۰- تاثیر افزایش ضخامت ورق بر روی منحنی نیرو-جابجایی

۷-۶- تاثیر افزایش تعداد لایه های ورق مشبک

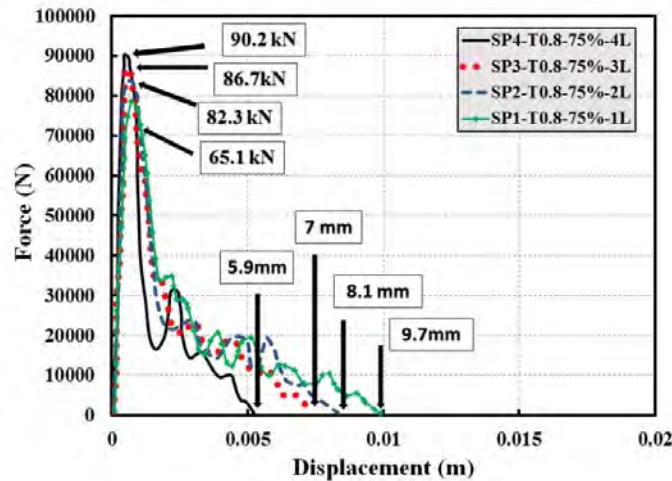
در این بخش تعداد لایه های ورق مشبک از یک لایه تا چهار لایه افزایش می یابد. تست های ضربه ای با ارتفاع یکسان و جرم ضربه زننده یکسان مطابق شکل ۱۱ و ۱۲ بر روی تمامی نمونه ها انجام شد. مطابق با اشکال ۱۱ و ۱۲ ملاحظه گردید که با افزایش تعداد لایه های درونی نمونه های کامپوزیتی، جابجایی و لهیدگی نمونه ها کاهش می یابد. همچنین نیروی پیک اولیه نیز افزایش چشمگیری دارد. در شکل ۱۱ نمونه های با ضخامت ورق یک میلیمتر و فاقد الیاف با تعداد لایه های ۱ تا ۴ لایه مورد مقایسه قرار گرفته اند. همچنین در شکل ۱۲ منحنی نیرو-جابجایی برای چهار نمونه از گروه ورق های ۰.۸ میلیمتر و با درصد الیاف ۰/۷۵ درصد مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱۱- منحنی نیرو-جابجایی نمونه ها با افزایش تعداد لایه های ورق مشبک با ضخامت ۱mm و الیاف صفر درصد

در شکل ۱۱ مشاهده می گردد که با افزایش تعداد لایه های ورق های مشبک مسلح درون نمونه ها، منحنی نیرو-جابجایی فشرده تر می گردد. نیروی پیک اولیه به ترتیب برای تک لایه تا چهارلایه از ۶۵٫۱ کیلونیوتن تا ۷۸٫۱ کیلونیوتن افزایش می یابد. لذا نمونه چهارلایه دارای نیروی پیک اولیه به مقدار ۱۳ کیلو نیوتن بیشتر از نمونه مشابه و تک لایه می باشد. همچنین طول لهیدگی نمونه پس از برخورد برای نمونه تک لایه ۱۶ میلیمتر می باشد. همچنین طول لهیدگی با افزایش تعداد لایه ها کاهش می یابد. لذا طول لهیدگی برای نمونه SP4-T1-0%-4L به ۱۰/۱ میلیمتر رسید. در شکل ۱۲ منحنی نیرو جابجایی برای چهار نمونه با تعداد ورق های یک تا چهار لایه برای ضخامت ورق مشبک ۰.۸ میلیمتر و درصد الیاف ۰/۷۵ درصد مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در شکل ۱۲ با افزایش تعداد

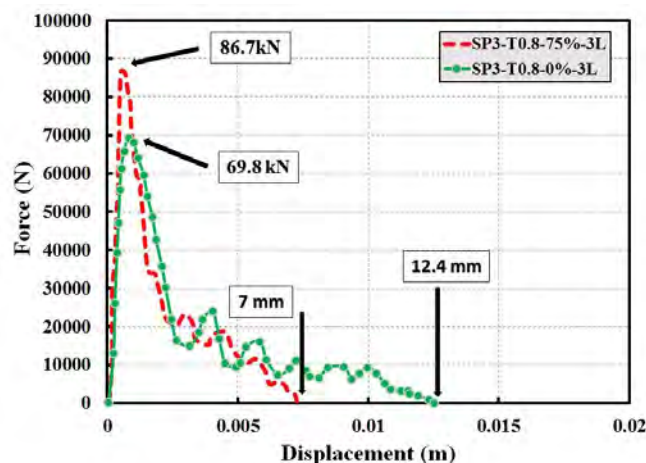
لایه ها از یک لایه تا چهار لایه مقدار نیروی پیک اولیه از ۶۵٫۱ کیلونیوتن تا ۹۰٫۲ کیلونیوتن افزایش یافته است. همچنین طول لهیدگی نمونه پس از برخورد برای نمونه تک لایه ۹٫۷ میلیمتر می باشد که این طول لهیدگی با افزایش تعداد لایه ها کاهش یافته تا برای نمونه چهار لایه به ۵٫۹ میلیمتر رسیده است.



شکل ۱۲- منحنی نیرو-جابجایی نمونه ها با افزایش تعداد لایه های ورق مشبک با ضخامت ۰٫۸mm و الیاف ۷۵ درصد

۷-۷- تاثیر افزایش درصد الیاف

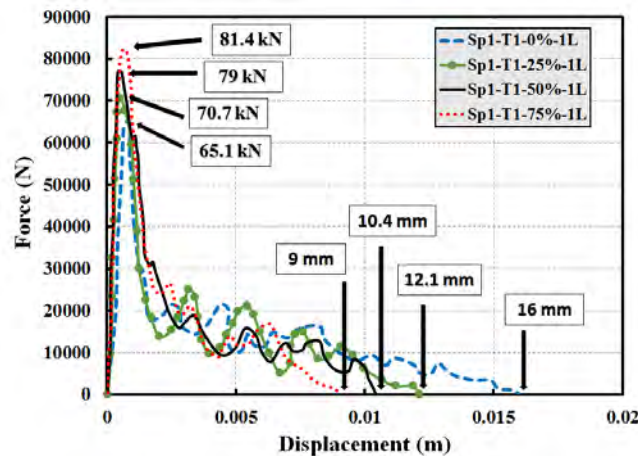
در این بخش متغیرهای تعداد لایه و ضخامت ورق به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. درصد الیاف بکار رفته در آماده سازی نمونه ها از صفر تا ۰٫۷۵ درصد افزایش داده شده است. با انجام تست های ضربه ای سقوط آزاد روی نمونه های کامپوزیتی با درصد الیاف متغییر، مشاهده گردید با افزایش درصد الیاف بکار رفته در نمونه ها، افزایش نیروی پیک اولیه بسیار زیاد می باشد. افزایش مقادیر نیروی پیک در با افزایش درصد الیاف در مقایسه با افزایش تعداد لایه های ورق های مشبک فولادی، بیشتر می باشد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- تاثیر افزایش الیاف در افزایش چشمگیر نیروی پیک اولیه، طول لهیدگی و دهانه پیک اولیه

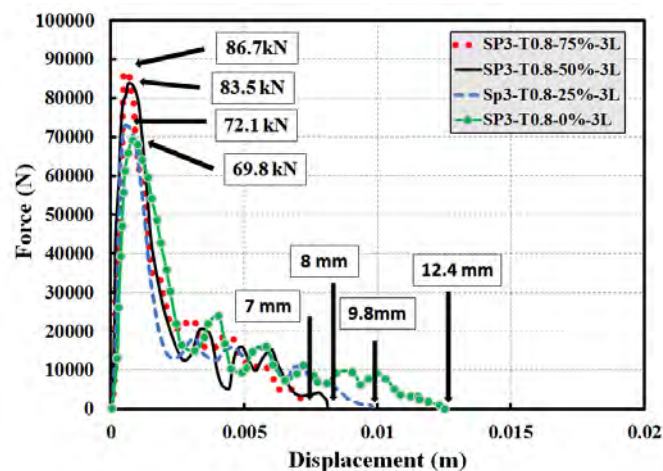
در شکل ۱۳ منحنی نیرو-جابجایی دو نمونه با سه لایه ورق مشبک مسلح ۰٫۸ میلیمتری با درصد الیاف صفر (SP3-T0.8-0%-3L) و ۰٫۷۵ (SP3-T0.8-0.75%-3L) درصد ارائه شده است. ارتفاع سقوط ضربه زنده در تمامی تست ها ۶۰۰ میلیمتر می باشد. مطابق منحنی شکل ۱۳ مشاهده می گردد که با افزایش درصد الیاف بکار رفته در نمونه ها، از ۰ به ۰٫۷۵ درصد به ترتیب نیروی پیک اولیه از ۶۹٫۸ به ۸۶٫۷ کیلونیوتن افزایش یافت. همچنین طول لهیدگی از ۱۲٫۴ میلیمتر برای نمونه با درصد الیاف صفر درصد به ۷ میلیمتر برای

نمونه مشابه با درصد الیاف ۰/۷۵ درصد کاهش یافت. به عبارت دیگر با افزایش درصد الیاف از ۰ به ۰/۷۵ درصد نیروی حداکثر ۲۴ درصد افزایش و طول لهیدگی ۴۳ درصد کاهش نشان می دهد. تاثیر افزایش درصد الیاف بر عرض دهانه نیروی پیک قابل ملاحظه می باشد. عرض دهانه این قله برای نمونه با درصد الیاف کمتر، بیشتر و با افزایش درصد الیاف عرض دهانه کاهش می یابد. به عبارت دیگر ناحیه حداکثر نیروی ناشی از ضربه در منحنی های نیرو-جابجایی، در نمونه های دارای درصد الیاف بیشتر، در بازه زمانی کمتری رخ می دهد. لذا با افزایش درصد الیاف نمونه ها سخت تر شده و حداکثر نیروی وارده به نمونه در بازه زمانی کمتری اعمال می شود. اعمال نیروی حداکثر در بازه زمانی کوتاه تر باعث به وجود آمدن صدمات بیشتری در نمونه ها می شود. در منحنی نیرو-جابجایی شکل ۱۴ تاثیر افزایش درصد الیاف برای چهار نمونه با ضخامت ورق ۱ میلیمتر ارائه شده است.



شکل ۱۴- منحنی نیرو-جابجایی نمونه ها با افزایش درصد الیاف برای ضخامت ورق مشبک ۱mm و یک لایه

نمونه های منحنی شکل ۱۴ تنها در درصد الیاف فولادی میکرو متفاوت می باشند. تمامی نمونه ها دارای یک لایه ورق فولادی مشبک به ضخامت ۱ میلیمتر می باشند. نمونه SP1-T1-0%-1L فاقد الیاف و سایر نمونه ها به ترتیب دارای ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد الیاف فولادی میکرو می باشند. مطابق نتایج مشاهده گردید، نیروی پیک اولیه برای نمونه با الیاف صفر درصد ۶۵٫۱ کیلو نیوتن و برای نمونه دارای ۰/۷۵ درصد الیاف فولادی میکرو ۸۱٫۴ کیلو نیوتن می باشد. به عبارت دیگر با افزایش درصد الیاف در این سری از نمونه ها از صفر به ۰/۷۵ درصد مقدار نیروی پیک ۲۵ درصد افزایش می یابد. همچنین طول لهیدگی نیز کاهش چشمگیری از ۱۶ میلیمتر به ۹ میلیمتر برای نمونه با درصد الیاف ۷۵ درصد داشت. در شکل ۱۵ تاثیر افزایش درصد الیاف را برای چهار نمونه دیگر با سه لایه ورق مشبک مسطح ۰٫۸ میلیمتری نشان داده شده است.



شکل ۱۵- منحنی نیرو-جابجایی نمونه ها با افزایش درصد الیاف برای ضخامت ورق مشبک ۰٫۸mm و سه لایه

مطابق شکل نتایج نشان می دهد که با افزایش درصد الیاف از صفر تا ۰/۷۵ درصد، نیروی پیک اولیه افزایش چشمگیری از ۶۹,۸ تا ۸۶,۷ کیلونیوتن داشت. همچنین طول لهیدگی نیز از ۱۲,۴ به ۷ میلیمتر کاهش یافت. مقایسه نتایج افزایش نیروی پیک و کاهش طول لهیدگی در شکل های ۱۴ و ۱۵ در مقایسه با شکل ۱۱ و ۱۲ نشان دهنده تاثیر بیشتر الیاف بر افزایش نیروی پیک و کاهش جابجایی نسبت به تعداد ورق های مشبک می باشد. در شکل ۱۱ نیروی پیک اولیه از ۶۵,۱ به ۸۱,۴ افزایش یافته است. این تاثیر چشمگیر در طول لهیدگی هم قابل مشاهده است. در شکل ۱۱ طول لهیدگی از ۱۶ میلیمتر به ۱۰,۱ میلیمتر کاهش یافته است اما در شکل ۱۴ طول لهیدگی از ۱۵ میلیمتر به ۹ میلیمتر کاهش یافته است. این کاهش چشمگیر همچنین در شکل ۱۵ محسوس تر از شکل ۱۲ می باشد. نتایج کامل حاصل از انجام آزمایش ضربه بر روی ۶۴ نمونه در قالب ۳۲ گروه با متغیرهای درصد الیاف، تعداد لایه ها و ضخامت ورق های مشبک در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج ارائه شده در قالب جدول ۷ شامل نیروی پیک اولیه و طول لهیدگی می باشد. مطابق با نتایج جدول ۷ می توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد الیاف نیروی پیک اولیه در تمامی نمونه ها (با ضخامت ورق یکسان و تعداد ورق یکسان) افزایش می یابد. همچنین طول لهیدگی کاهش می یابد. با افزایش تعداد لایه های ورق های مشبک مسلح درون نمونه ها (با درصد الیاف و ضخامت ورق های یکسان) نیروی پیک اولیه افزایش و طول لهیدگی کاهش می یابد. بیشترین جابجایی و لهیدگی برای نمونه SP1-T0.8-0%-1L، ۱۸,۶ میلیمتر می باشد. کمترین طول لهیدگی برای SP4-T1-75%-4L، ۵,۱ میلیمتر می باشد. همچنین نمونه SP4-T1-75%-4L دارای بیشترین نیروی پیک اولیه با مقدار ۹۲,۳ کیلونیوتن می باشد. کمترین نیروی پیک مربوط به نمونه SP1-T0.8-0%-1L می باشد که از طرفی دارای بیشترین طول لهیدگی است.

جدول ۷: نتایج نیروی پیک اولیه و طول لهیدگی نمونه ها تحت بارگذاری ضربه ای

شماره نمونه	نام نمونه	نیروی پیک (kN)	لهیدگی (mm)	شماره نمونه	نام نمونه	نیروی پیک (kN)	لهیدگی (mm)
۱	SP1-T0.8-0%-1L	۶۳,۴	۱۸,۰۶	۱۷	SP1-T0.8-0.25%-1L	۶۶,۳	۱۵,۲
۲	SP1-T1-0%-1L	۶۵,۱	۱۶	۱۸	SP1-T1-0.25%-1L	۷۰,۷	۱۲,۱
۳	SP2-T0.8-0%-2L	۶۵,۸	۱۵,۵	۱۹	SP2-T0.8-0.25%-2L	۶۸,۳	۱۱
۴	SP2-T1-0%-2L	۶۹	۱۳,۷	۲۰	SP2-T1-0.25%-2L	۷۱,۱	۱۰,۲
۵	SP3-T0.8-0%-3L	۶۹,۸	۱۲,۴	۲۱	SP3-T0.8-0.25%-3L	۷۲,۱	۹,۸
۶	SP3-T1-0%-3L	۷۳,۲	۱۱,۶	۲۲	SP3-T1-0.25%-3L	۷۵,۴	۹,۱
۷	SP4-T0.8-0%-4L	۷۳,۲	۱۰,۹	۲۳	SP4-T0.8-0.25%-4L	۷۶	۷,۹
۸	SP4-T1-0%-4L	۷۸,۱	۱۰,۱	۲۴	SP4-T1-0.25%-4L	۸۰,۲	۷,۳
۹	SP1-T0.8-0.5%-1L	۷۱,۲	۱۱,۹	۲۵	SP1-T0.8-0.75%-1L	۷۸,۵	۹,۷
۱۰	SP1-T1-0.5%-1L	۷۹	۱۰,۴	۲۶	SP1-T1-0.75%-1L	۸۱,۴	۹
۱۱	SP2-T0.8-0.5%-2L	۸۰,۱	۹,۵	۲۷	SP2-T0.8-0.75%-2L	۸۲,۳	۸,۱
۱۲	SP2-T1-0.5%-2L	۸۲,۳	۸,۹	۲۸	SP2-T1-0.75%-2L	۸۵,۳	۷,۵
۱۳	SP3-T0.8-0.5%-3L	۸۳,۵	۸	۲۹	SP3-T0.8-0.75%-3L	۸۶,۷	۷
۱۴	SP3-T1-0.5%-3L	۸۵,۴	۷,۱	۳۰	SP3-T1-0.75%-3L	۸۹,۲	۶,۶
۱۵	SP4-T0.8-0.5%-4L	۸۶,۱	۶,۲	۳۱	SP4-T0.8-0.75%-4L	۹۰,۲	۵,۹
۱۶	SP4-T1-0.5%-4L	۸۸,۲	۵,۳	۳۲	SP4-T1-0.75%-4L	۹۲,۳	۵,۱

در شکل ۱۶ تعدادی از نمونه ها قبل از انجام تست ضربه قابل مشاهده می باشد. در شکل ۱۷ نمونه ها پس از بارگذاری ضربه ای نشان داده شده اند. در شکل ۱۸ تعدادی از نمونه ها حین بارگذاری زیر دستگاه DH-TM-7500 J نشان داده شده است.



Sp4-T0.8-0%-4L



Sp4-T1-0%-4L



Sp4-T1-25%-4L

شکل ۱۶- تعدادی از نمونه های آماده شده برای بارگذاری ضربه ای



Sp4-T0.8-0%-4L



Sp4-T1-0%-4L



Sp4-T1-25%-4L

شکل ۱۷- تعدادی از نمونه های تست شده تحت بارگذاری ضربه ای



شکل ۱۸- نمونه های کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه ای توسط دستگاه DH-TM-7500J

۸- نتیجه گیری

در این پژوهش تست خصوصیات مکانیکی و همچنین تست ضربه ای کامپوزیت های سیمانی خود تراکم الیافی به صورت آزمایشگاهی انجام شد. در بخش خصوصیات مکانیکی آزمایش های مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی ۴ طرح اختلاط صورت گرفت. در بخش ضربه ای، آزمایش ضربه دینامیکی بر روی ۶۴ عدد نمونه مربعی (در قالب ۳۲ گروه) به ابعاد ۱۰۰ میلیمتر صورت گرفت. نمونه های مربعی دارای متغیر های درصد الیاف فولادی میکرو (از ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد)، ضخامت ورق های فولادی مشبک (۰/۸ و ۱ میلیمتر) و تعداد لایه های ورق های مشبک (۱ تا ۴ لایه) می باشند. مطابق نتایج حاصل از انجام تست های آزمایشگاهی می توان موارد زیر را بیان نمود:

- ۱- با افزایش درصد الیاف، نیروی پیک اولیه افزایش می یابد و طول لهیدگی کاهش می یابد. افزایش نیروی پیک اولیه با افزایش پارامتر درصد بکاروری الیاف، نسبت به افزایش پارامتر لایه چینی ورق های مشبک درون نمونه های کامپوزیتی چشمگیرتر می باشد. به همین ترتیب کاهش طول لهیدگی با افزایش درصد الیاف بکار رفته در نمونه ها بسیار محسوس تر از افزایش لایه چینی ورق های مشبک درون نمونه ها می باشد. بیشترین نیروی پیک اولیه و کمترین طول لهیدگی برای نمونه با چهار لایه ورق مشبک یک میلیمتری و با درصد الیاف ۰/۷۵ درصد (SP4-T1-75%-4L) می باشد.
- ۲- مطابق نتایج ملاحظه گردید، مقدار انرژی جذب شده توسط کلیه نمونه های کامپوزیتی تقریباً یکسان می باشد. به عبارت دیگر تاثیر پارامتر های متغیر نظیر درصد الیاف، ضخامت و تعداد لایه های ورق مشبک در مقدار انرژی کل جذب شده به وسیله نمونه ناچیز می باشد. متغیر های ذکر شده در این تحقیق بر روی پارامتر های نیروی پیک و طول لهیدگی موثر می باشند.
- ۳- مطابق نتایج افزایش نیروی پیک اولیه، باعث افزایش صدمه وارده به نمونه می شود. در نتیجه به منظور کاهش آسیب وارده به نمونه می بایست با حفظ مقدار کل انرژی جذب شده، نیروی پیک اولیه را کاهش داد.

مراجع

- [1] Eibl, J. Concrete. (1988). structures under impact and impulsive loading (CEB-Bulletin Information, No 187). Dubrovnik (Croatia), Comité Euro-International du Beton.
- [2] Banthia, N. Sappakittipakom, M. (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research*, 39, 1366-1372.
- [3] Wild, S. Sabir, B., Khatib, J.M. (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] Mastali, M. Dalvand, A. Sattarifard, A. (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. 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, T.C. (2000). 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. *Materials and structures*, 33(225), 3-6.
- [11] Li, V.C. (1993). From micromechanics to structural engineering- the design of cementitious composites for civil engineering applications. *Journal of Struc Mechanics and Earthquake Engineering*, 10(2), 37-48.
- [12] Fischer, G. Wang, S. 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. 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. Li, V.C. (2006). High early strength engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 103(2), 97-105 .
- [15] Karihaloo, B.L. 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. Keoleian, G.A. (2007). Design of ductile engineered cementitious composites for improved sustainability. *ACI Materials Journal*, 105(4), 350-366.
- [17] Li, V.C. 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] Ghamarian, H.R. Zarei, M.T. Abadi, (2011). Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-filled End-capped Conical Tubes, *Thin-walled Structures*, 49(10), 1312–1319.
- [19] Jones, N. (2010). Energy-absorbing effectiveness factor, *International Journal of Impact Engineering*, 37, 754–65.
- [20] Meidell, A. (2009). Computer aided materials election for circular tubes designed to resist axial crushing. *Thin-Walled Structures*, 47(8), 962–9.
- [21] Yuen, SC. Nurick, GN. (2008). energy absorbing characteristics of tubular structures with geometric and material modifications, *Apply Mechanics Review*, 61(2), 802-15.
- [22] Olabi, A.G. Morris, Hashmi, E. M.S.J. (2007), Metallic tube type energy absorbers a synopsis. *Thin-Walled Structures*, 45(7), 706–26.
- [23] Alghamdi, A. (20011), Collapsible impact energy absorbers. *Thin-Walled Structures*, 39, 189–213.
- [24] Song, Jie. Chen, Yan. Lu, Gu. (2013). Light-Weight thin-walled structures whit patterned windows under axial crushing, *International journal of Mechanical Sciences*, 66, 239-248.
- [25] Graciano, C. Martinez, G. Smith, D. (2009), Experimental investigation on the axial collapse of expanded metal tubes. *Thin-Walled Structures*, 47, 953-961.
- [26] Graciano, C. Martinez, G. Gutierrez, A. (2012). Failure mechanism of expanded metal tubes under axial crushing. *Thin-Walled Structures*, 51, 20-24.
- [27] Graciano, C. Martínez, G. Gutierrez, A. (2013). Energy absorption of axially crushed expanded metal tubes. *Thin-Walled Structures*, 71, 134-146.
- [28] Smith, D. Graciano, C. Martínez, G. (20144). Quasi-static axial compression of concentric expanded metal tubes. *Thin-Walled Structures*, 84, 170– 176.
- [29] Smith, D. Graciano, C. Martínez, G. Teixeira, P. (2014), Axial crushing of flattened expanded metal tubes. *Thin-Walled Structures*, 85, 42– 49.
- [30] Hatami, H. Shokri Rad, M. Ghodsbin Jahromi, A. (2017). A theoretical analysis of the energy absorption response of expanded metal tubes under impact loads. *International Journal of Impact Engineering*. 109, 224-239.
- [31] Nouri, M.D. Hatami, H. Jahromi, A.G. (2015). Experimental and numerical investigation of expanded metal tube absorber under axial impact loading. *Structural Engineering and Mechanics*, 54 (6), 1245-1266.
- [32] Hatami, H. Nouri, M.D. (2015). Experimental and numerical investigation of lattice-walled cylindrical shell under low axial impact velocities. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12(10), 1950-1971.
- [33] Hatami, H. Jahromi, A.G. (2017). Energy absorption performance on multilayer expanded metal tubes under axial impact, *thin-Walled Structures*, 116, 1–11.
- [34] Sharbatdar, M.K. Parsa, H. (2017). The evaluation of strengthening effect reinforced concrete structures with FRP on seismic dynamic performance of the structures. *Journal of Structural and construction engineering*, online published, In Persian.
- [35] Iranpour, A. Ebrahimpour, H. Rahgozar, R. (2017). Evaluation of bond-slip behavior in precast reinforced concrete beam-to-column connection using finite element modelling. *Journal of Structural and construction engineering*, online published, In Persian.
- [36] Farokhzad, R. divandari, h. (2017). The effect of nano-caco3 and nano-SiO2 on properties of self-compacting concrete. *Journal of Structural and construction engineering*, online published, In Persian.
- [37] Sanginabadi, Kh. Rostami, R. Habibi, N. Mostofinejad, D. Zarrebini, M. (2017). Fracture mechanics of fiber reinforced concrete: Experimental study of composition, geometry and hybridization of fibers. *Journal of Structural and construction engineering*, 5(2), 82-94, In Persian.
- [38] Gholhaki, M. Kheyroddin, A. Hajforoosh, M. (2017). The Effect of Magnetic Water and Different Pozzolanic Materials on the Fresh and Hardened Properties of Self-Compacted Concrete. *Journal of Structural and construction engineering*, 5(1), 5-19, In Persian.