

## بررسی تجربی دال‌های بتنی الیافی چند لایه با تغییر درصد الیاف در لایه‌ها در برابر بار ضربه ناشی از وزنه افتان

میثم قاسمی نقیب دهی  
دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل  
مرتضی نقی پور  
دانشیار دانشکده عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل  
محمود ربیعی  
استادیار دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

### چکیده

در این مقاله ۳ نوع دال بتنی و در مجموع ۲۱ دال به ابعاد  $5 \times 60 \times 60$  سانتی‌متر در برابر بار ضربه ناشی از وزنه افتان مورد بررسی قرار گرفته و با هم مقایسه شدند. نوع اول دال‌های بدون الیاف، نوع دوم دال‌های الیافی (فولادی، پلی پروپیلن و ترکیبی) که درصد الیاف در راستای ضخامت یکنواخت بوده و نوع سوم که درصد الیاف در لایه‌ها به صورت غیر یکنواخت و متغیر بودند ( $FG^2$ ). نتایج نشان دادند که استفاده از الیاف سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت در برابر ضربه دال‌های نوع دوم و سوم نسبت به دال‌های نوع اول می‌گردند. این مطالعه نشان داد که کارآیی دال‌های مورد آزمایش تحت تأثیر سه عامل شامل نوع الیاف، درصد الیاف و نیز موقعیت قرارگیری لایه‌ها می‌باشد. نحوه قرارگیری لایه‌ها به صورت  $FG$  به نحوی که لایه‌های بیرونی درصد الیاف بیشتر و لایه‌های درونی درصد الیاف کمتری دارند، سبب افزایش قابل ملاحظه جذب انرژی در مقایسه با دال‌های نوع دوم شده است و این در حالی است که کل الیاف مورد استفاده در دال‌های مذکور یکسان بوده است. همچنین نتایج حاصل از آزمایش اولتراسونیک نشان داد که سرعت پالس با افزایش میزان الیاف کاهش می‌یابد و سرعت پالس در نمونه‌های  $FG$  با توجه به حجم متفاوت الیاف در هر لایه متغیر است.

واژگان کلیدی: ضربه ناشی از وزنه افتان، دال‌های بتنی الیافی  $FG$ ، آزمایش اولتراسونیک.

\* نویسنده مسئول m-naghi@nit.ac.ir

## ۱- مقدمه

در این مقاله مقاومت در برابر ضربه ناشی از وزنه افتان بتن‌های مسلح الیافی FG مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا دال‌های بتنی FG با استفاده از الیاف فولاد، پلی پروپیلن و نیز ترکیب فولاد و پلی پروپیلن ساخته شده اند و در برابر وزنه افتان مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. همچنین نمونه‌هایی با درصد الیاف یکنواخت جهت مقایسه عملکرد آن‌ها در برابر بتن‌های FG ساخته شده‌اند به نحوی که میزان الیاف مورد استفاده در این نمونه‌ها و نمونه‌های FG یکسان بوده‌اند.

## ۲- روند انجام آزمایش

## ۲-۱ مصالح مورد استفاده و طرح اختلاط‌ها

مصالح مورد استفاده برای ساخت بتن با مقاومت بالا شامل سیمان پرتلند تپ ۲، ماسه سیلیسی با دو قطر متفاوت، میکروسیلیس، آب و فوق‌روان‌کننده می باشد. طرح اختلاط در جدول ۱ نشان داده شده است.

دو نوع الیاف مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است و ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها در جدول ۲ ارائه گردیده است. در این جدول  $L/D$  نسبت طول به ضخامت الیاف هست.

## ۲-۲ نحوه ساخت نمونه‌ها

ابتدا مصالح خشک شامل سیمان، میکروسیلیس و ماسه سیلیسی با دو قطر متفاوت در درون میکسر ریخته و مخلوط گردید. برای ساخت نمونه‌های با الیاف فولادی، الیاف فولادی به صورت دستی و تدریجی به مخلوط موجود در میکسر در حال چرخش اضافه گردید. سپس ۹۰ درصد آب به صورت تدریجی به مصالح در حال چرخش اضافه و ۱۰ درصد باقی‌مانده نیز ابتدا با فوق‌روان‌کننده ترکیب و سپس ترکیب حاصل نیز به صورت تدریجی به مواد درون میکسر وارد شد. سعی و تلاش بسیاری در مورد نحوه ترکیب مواد به کار گرفته شد تا از گلوله شدن و ته‌نشینی الیاف در ترکیب جلوگیری شود. در ساخت نمونه‌های بتنی پلی پروپیلنی جهت جلوگیری از گلوله شدن الیاف، الیاف‌ها در آخرین مرحله و پس از افزودن آب و ترکیب آب و روان‌کننده به مخلوط اضافه شد. ساخت نمونه با الیاف ترکیبی نیز همانند ساخت نمونه با الیاف فولادی بود با این تفاوت که الیاف پلی پروپیلن در انتها اضافه شد.

استفاده از الیاف‌های گوناگون در بتن جهت بهبود عملکرد مکانیکی آن در برابر بارهای دینامیکی از قبیل وزنه افتان، پرتابه‌های کوچک با سرعت بالا و نیز انفجار به دهه‌ها قبل برمی‌گردد. تحقیقات متعددی برای تعیین رفتار بتن‌های مسلح الیافی در برابر بارهای دینامیکی صورت پذیرفته است. کریشنا و همکاران [۱] نشان دادند که استفاده از الیاف‌های طبیعی در بتن سبب افزایش ۳ تا ۱۸ برابری مقاومت آن در برابر ضربه در مقایسه با بتن بدون الیاف می‌گردد. تحقیقات انجام شده توسط راتو و همکاران [۲] بر روی دال‌های بتنی دوطرفه مسلح شده با الیاف فولادی نیز بر این نکته تأکید دارند که افزایش کسر حجمی الیاف از ۸ به ۱۲ درصد سبب افزایش قابل ملاحظه‌ای در جذب انرژی می‌گردد. تحقیقات اونگ و همکاران [۳] نیز حکایت از جذب انرژی بیشتر دال‌های بتنی مسلح شده با الیاف فولادی با انتهای قلاب دار در مقایسه با دال‌های مسلح شده با الیاف پلی افیلین و نیز پلی وینیل الکل در برابر ضربه ناشی از پرتابه‌های با سرعت کم دارند. ژنگا و همکاران [۴] در تحقیقات خود بر روی میزان عمق نفوذ پرتابه‌ها بر روی بتن‌های مقاومت بالا بدین نتیجه دست یافتند که با افزایش مقاومت بتن، عمق نفوذ پرتابه کمتر می‌گردد. شلیور و همکاران [۵] رفتار بتن‌های مسلح الیافی با مقاومت بالا را در برابر انفجار مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که این گونه بتن‌ها در مقایسه با بتن‌های استاندارد عملکرد بهتری دارند.

FGM ها مواد کامپوزیتی جدیدی هستند که هدف از ساخت آن‌ها، دست یافتن به خواص و عملکرد موردنظر با تغییر مشخصات در راستای حجم می باشد [۶]. این مفهوم را می‌توان در بتن‌های الیافی نیز مورد استفاده قرار داد که در آن صورت به آن بتن الیافی FG گویند. دیاس و همکاران [۷] در بررسی‌های خود دریافتند که ساخت نمونه‌های بتنی با استفاده از درصد‌های متغیر در راستای ضخامت سبب کاهش میزان مورد نیاز الیاف در ساخت نمونه‌ها بدون هیچ‌گونه تغییری در مدول گسیختگی کامپوزیت می‌گردد. تحقیقات انجام شده توسط کوئک و همکاران [۸] نیز نشان از مقاومت ضربه‌ای بسیار بالاتر پانل‌های سیمانی FG در مقایسه با پانل‌های سیمانی معمولی در برابر پرتابه‌های با سرعت بالا دارند.



الف



ب

شکل ۲- قالب‌های چوبی مورد استفاده

تعداد ۲۱ دال بتنی با ابعاد ۶۰×۶۰×۵ سانتی‌متر ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در این بین ۳ دال بتنی FG با الیاف فولادی، ۳ دال بتنی FG با الیاف پلی‌پروپیلن و ۳ دال بتنی FG با الیاف ترکیبی فولاد و پلی‌پروپیلن بودند. این ۹ دال از ۵ لایه با ضخامت‌های یکسان ۱ سانتی‌متری ساخته شدند که درصد الیاف در لایه‌ها به ترتیب ۲، ۱، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بوده‌اند. در الیاف‌های ترکیبی نیمه از الیاف‌ها، الیاف فولادی و نیمه دیگر الیاف پلی‌پروپیلن بودند. جهت مقایسه با بتن‌های الیافی عادی ۳ دال بتنی با الیاف فولادی و ۳ دال بتنی با الیاف پلی‌پروپیلن و نیز ۳ دال بتنی دیگر با الیاف ترکیبی ساخته شده‌اند که درصد الیاف در آن‌ها ۱/۳ درصد بوده است. در واقع درصد الیاف به نحوی انتخاب شده است که کل الیاف مصرفی در نمونه‌های عادی و FG یکسان باشد. علاوه بر بتن‌های الیافی ذکر شده ۳ نمونه بتن بدون الیاف نیز ساخته شده‌اند. نامگذاری دال‌ها، موقعیت لایه‌ها و درصد الیاف مورد استفاده در لایه‌ها مطابق شکل ۳ می‌باشد.

### ۲-۳ مقاومت فشاری و کششی

جهت تعیین مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن‌های با الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن، ترکیب فولاد و پلی‌پروپیلن و نیز بدون الیاف از هر نوع بتن ۳ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰

قالب‌های مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. دو سمت این قالب‌ها ثابت بوده و از چوب‌هایی به ارتفاع ۵ و طول آزاد ۶۰ سانتی‌متر و دو سمت دیگر متحرک و از چوب‌هایی به ارتفاع ۱ و طول آزاد ۶۰ سانتی‌متر ساخته شده‌اند. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب‌ها خارج و به مدت ۲۸ روز در آب قرار گرفتند.

جدول ۱- طرح اختلاط بتن

سیمان (Kg/m <sup>۳</sup> )	۹۶۷	
میکروسلیس (Kg/m <sup>۳</sup> )	۲۵۱	
ماسه سیلیسی	۰.۵-۰.۹ mm	۴۰۵
	۰.۲-۰.۵ mm	۲۷۰
آب (Kg/m <sup>۳</sup> )	۳۶۵.۴	
فوق روان‌کننده (Kg/m <sup>۳</sup> )	۱۲.۱۸	



الف



ب

شکل ۱. الیاف‌های مورد استفاده: الف) فولادی ب) پلی‌پروپیلن

جدول ۲. مشخصات مکانیکی الیاف‌های مورد استفاده

الیاف	(L/D)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
فولادی (ST)	۴۵	۲۰۰	۱۱۰۰
پلی‌پروپیلن (PP)	۴۶۱	۵	۶۰۰

۳ میلی متر و ۳ نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی متر ساخته شد.

### ۳-۱ مقاومت کششی و فشاری

مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج در جدول ۳ نشان داده شده اند. همان طور که در جدول نشان داده شده است با افزایش درصد الیاف در نمونه‌های پلی پروپیلن (PP) و ترکیبی (HI) مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد و این امر در مورد نمونه‌های بتنی الیافی فولادی (ST) تا ۱ درصد الیاف صادق است ولی با افزایش درصد الیاف از ۱ به ۱/۳ و نیز ۲ درصد تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری مشاهده نمی‌گردد. با توجه به شکل ۵ افزایش درصد الیاف فولادی و پلی پروپیلن به ۱/۳ درصد نیز نه تنها سبب افزایش مقاومت کششی آن‌ها نگردید بلکه سبب اندکی کاهش گردید و این در حالی است که در نمونه‌های ترکیبی مقاومت کششی اندکی افزایش یافت.

### ۳-۲ مقاومت در برابر ضربه تحت بار افتان

تعداد ضربه مورد نیاز برای ایجاد یک حفره از بالا تا پایین نمونه و نیز کل انرژی جذب شده نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. میزان انرژی جذب شده از رابطه زیر محاسبه گردید.

ارتفاع سقوط  $X$  وزن وزنه  $X$  تعداد ضربه = انرژی جذب شده  
وزن وزنه افتان و ارتفاع سقوط به ترتیب برابر با  $9/81 \times 5$  نیوتن و  $48/4$  سانتی متر در نظر گرفته شد. با بررسی نتایج اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین تعداد ضربه‌ها در نمونه‌های مسلح شده با الیاف و نمونه‌های بدون الیاف مشاهده می‌گردد که این امر نشانگر کارآیی تسلیح الیافی بتن در بار گذاری ضربه‌ای است. همان گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است ساخت نمونه‌ها به صورت چندلایه در مقایسه با بتن های تک لایه، سبب افزایش تعداد ضربه‌ها و در نتیجه افزایش میزان جذب انرژی گردیده است اما این مسئله نیز به نوع الیاف و میزان درصد آن وابسته است به نحوی که ساخت نمونه‌های فولادی به صورت چندلایه (RSL) سبب گردیده که جذب انرژی در مقایسه با نمونه‌های بدون الیاف تا ۱۰۶ برابر افزایش یابد و این در حالی است که نمونه‌های تک لایه PP دارای بیشترین میزان جذب انرژی بعد از RSL بودند که این امر نشان دهنده تأثیر نوع الیاف و درصد مورد استفاده از آن هم در نمونه‌های تک لایه و هم در نمونه‌های چندلایه می‌باشد.

### ۲-۴ سرعت پالس اولتراسونیک (UPV)

آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک یکی از انواع آزمایشات غیرمخرب مورد استفاده جهت تعیین نقص‌های احتمالی در بتن از قبیل وجود ترک و غیریکنواختی بتن می‌باشد. سرعت بالای پالس اولتراسونیک در بتن نشان دهنده بتن با کیفیت مناسب است [۹]. محققان متعددی رابطه بین مشخصات فیزیکی (مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری و ...) و سرعت پالس را مورد بررسی قرار دادند [۱۵-۱۰]. در این تحقیق آزمایش UPV توسط دستگاه PUNDIT7 بر روی نمونه‌های مکعبی و به طریق انتشار مستقیم (با قراردادن مبدل‌ها در دو سوی مخالف نمونه‌های مکعبی) صورت پذیرفت. سرعت پالس از رابطه  $V=L/T$  تعیین گردید که  $V$  سرعت پالس بر حسب کیلومتر بر ثانیه و  $L$  فاصله بین مبدل‌ها و  $T$  زمان انتشار بر حسب میکرو ثانیه می‌باشد.

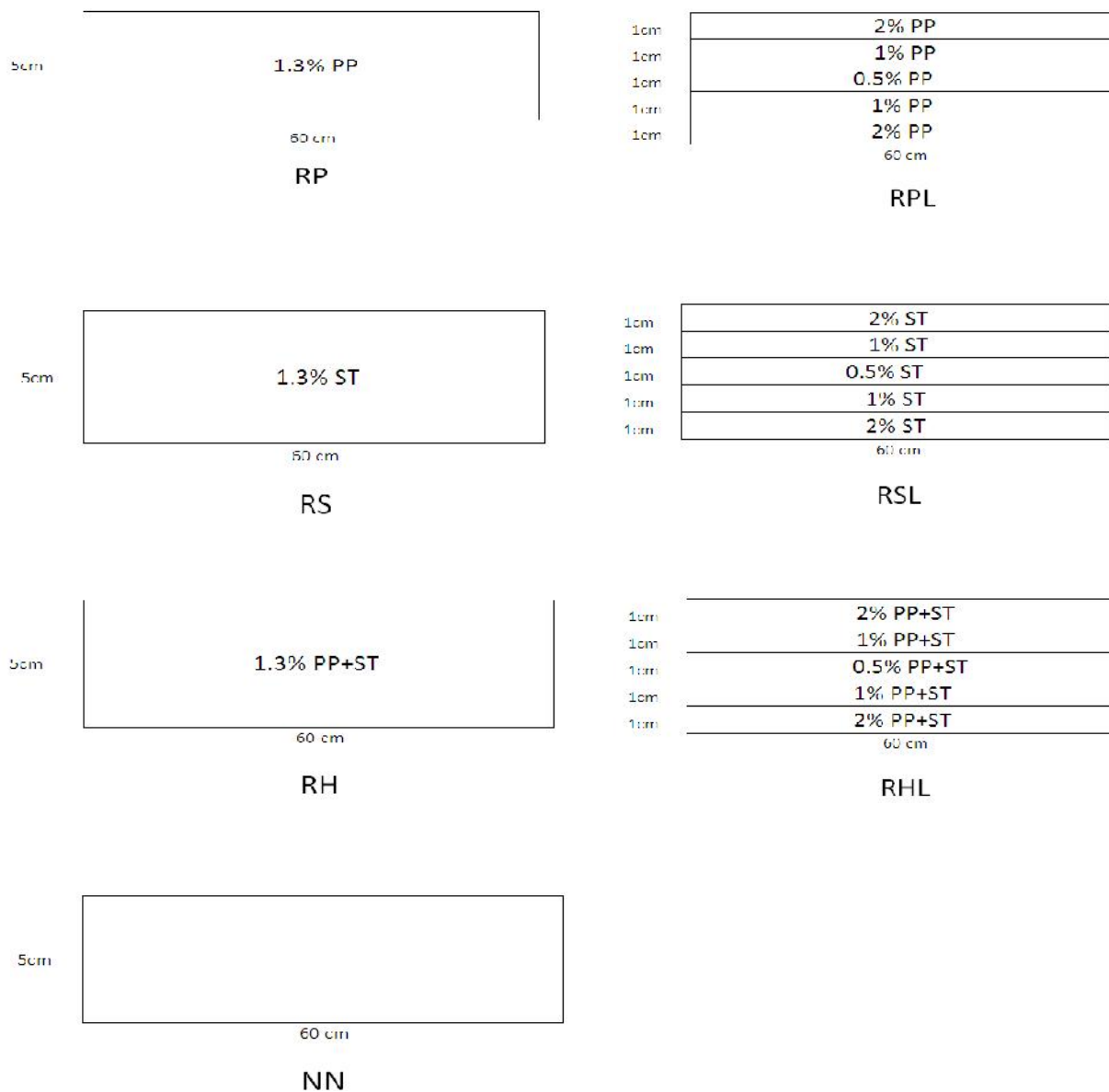
### ۲-۵ آزمایش وزنه افتان

در این مقاله، عملکرد صفحات بتنی FG تحت بار وزنه افتان مورد بررسی قرار می‌گیرد لذا همان‌طور که در شکل ۴ هم نشان داده شده است در ابتدا یک زیرسازه برای نمونه‌ها ساخته شد که این زیرسازه شامل یک پی به ابعاد  $150 \times 150 \times 300$  میلی متر، ۴ ستون به ابعاد  $300 \times 300$  میلی متر و نیز ۴ تیر که ابعاد آن‌ها  $300 \times 300$  میلی متر است، می‌باشد. از یک وزنه ۵ کیلوگرمی به عنوان وزنه افتان استفاده شده است. این وزنه ۵ کیلوگرمی به یک کابل فولادی با قطر ۴ میلی متر که از یک قرقره عبور داده شده است متصل می‌باشد. جهت اطمینان از این که وزنه دقیقاً بر وسط نمونه فرود آید، از یک قاب راهنمای فولادی مطابق شکل استفاده شده است. وزنه تا ارتفاع موردنظر (فاصله بین مرکز وزنه و مرکز نمونه‌ها برابر با  $48/4$  سانتی متر در نظر گرفته شد) بالا برده شده و سپس آزاد می‌گردد و تعداد ضربه تا گسیخته شدن نمونه‌ها ثبت گردید.

### ۳-نتایج و بحث و بررسی

Ultrasonic Pulse Velocity)

بررسی تجربی دال‌های بتنی الیافی چند ...



شکل ۳- نام‌گذاری دال‌ها و موقعیت قرارگیری لایه‌ها



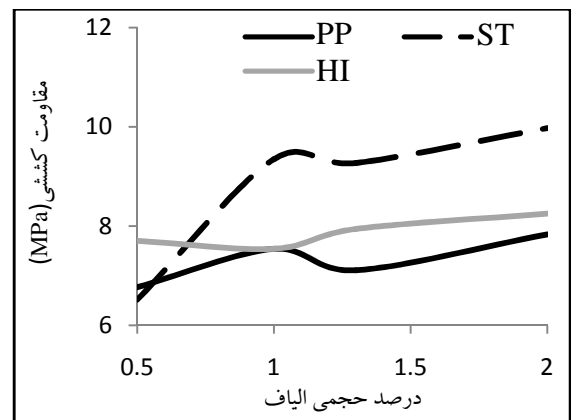
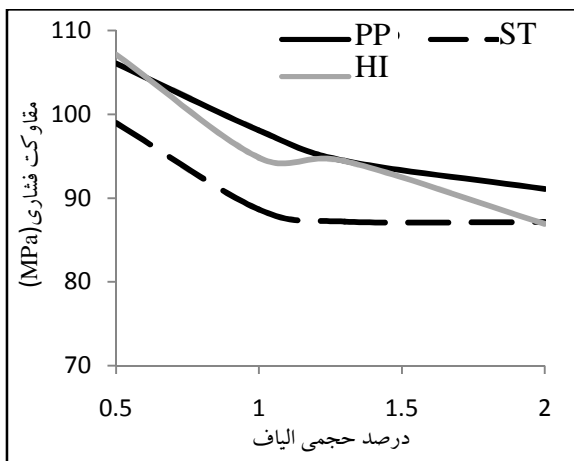
شکل ۴- آماده‌سازی آزمایش ضربه ناشی از وزنه افتان

جدول ۳- مقاومت کششی و فشاری

نمونه	مقاومت فشاری (Mpa)					مقاومت کششی (Mpa)				
	۱	۲	۳	میانگین	انحراف معیار	۱	۲	۳	میانگین	انحراف معیار
PP-۰,۵	۱۰۳,۸۰	۱۰۷,۷۰	۱۰۶,۶۰	۱۰۶,۰۳	۲,۰۱	۶,۳۲	۷,۰۱	۶,۹۶	۶,۷۶	۰,۳۸
PP-۱	۹۷,۶۱	۹۷,۹۴	۹۸,۷۰	۹۸,۰۸	۰,۵۶	۷,۱۸	۷,۷۱	۷,۷۲	۷,۵۴	۰,۳۱
PP-۱,۳	۹۳,۳۷	۹۵,۰۵	۹۴,۸۴	۹۴,۴۲	۰,۹۲	۷,۱۸	۶,۸۹	۷,۲۶	۷,۱۱	۰,۲۰
PP-۲	۹۲,۸۵	۹۳,۵۳	۸۶,۹۰	۹۱,۰۹	۳,۶۵	۸,۰۷	۷,۶۲	۷,۸۱	۷,۸۳	۰,۲۲
ST-۰,۵	۹۷,۸۲	۱۰۲,۳۰	۹۶,۷۴	۹۸,۹۵	۲,۹۵	۶,۱۱	۶,۹۹	۶,۴۳	۶,۵۱	۰,۴۴
ST-۱	۸۸,۸۴	۸۸,۴۳	۸۸,۵۹	۸۸,۶۲	۰,۲۱	۷,۹۰	۱۱,۰۰	۹,۱۳	۹,۳۴	۱,۵۶
ST-۱,۳	۸۸,۱۰	۸۸,۱۵	۸۵,۳۰	۸۷,۱۸	۴,۳۹	۸,۱۹	۱۰,۳۰	۹,۳۴	۹,۲۷	۰,۳۲
ST-۲	۸۷,۲۳	۸۹,۵۱	۸۴,۶۵	۸۷,۱۳	۲,۴۳	۱۰,۳۲	۹,۷۹	۹,۸۰	۹,۹۷	۰,۳۰
HY-۰,۵	۱۰۴,۴۰	۱۱۰,۲۰	۱۰۶,۸۰	۱۰۷,۱۳	۲,۹۱	۸,۲۲	۷,۵۷	۷,۳۱	۷,۷۰	۰,۴۷
HY-۱	۹۳,۶۶	۹۶,۳۳	۹۴,۴۵	۹۴,۸۱	۱,۳۷	۶,۹۷	۷,۹۸	۷,۶۶	۷,۵۴	۰,۵۲
HY-۱,۳	۹۳,۳۷	۹۵,۰۵	۹۴,۸۰	۹۴,۴۱	۰,۹۱	۸,۴۴	۷,۷۴	۷,۶۴	۷,۹۴	۰,۴۴
HY-۲	۸۵,۸۷	۸۶,۱۷	۸۸,۷۱	۸۶,۹۲	۱,۵۶	۸,۱۷	۸,۱۵	۸,۴۴	۸,۲۵	۰,۱۶
N	۱۲۰,۵۰	۱۱۴,۸۰	۱۰۷,۴۰	۱۱۴,۲۳	۶,۵۷	۲,۹۰	۳,۷۰	۳,۷۷	۳,۴۶	۰,۴۸

جدول ۴- تعداد ضربه تا گسیختگی

نمونه	تعداد ضربه تا گسیختگی				انحراف معیار	اثرژی جذب شده (J)
	۱	۲	۳	میانگین		
NN	۳۰	۵۳	۴۶	۴۳	۱۱,۷۹	۱۰۲۱
RS	۱۷۴۴	۲۴۳۰	۳۱۸۲	۲۴۵۲	۷۱۹,۲۵	۵۸۲۱۱
RP	۲۳۵۰	۴۳۸۲	۳۱۳۴	۳۲۸۹	۱۰۲۴,۷۹	۷۸۰۸۲
RH	۱۰۵۹	۱۷۴۱	۲۵۲۹	۱۷۷۶	۷۳۵,۶۴	۴۲۱۶۳
RSL	۵۴۶۹	۳۳۶۳	۴۸۰۳	۴۵۴۵	۱۰۷۶,۴۴	۱۰۷۸۹۹
RPL	۱۴۶۱	۲۸۷۴	۱۵۲۹	۱۹۵۵	۷۹۶,۸۹	۴۶۴۱۲
RHL	۲۵۵۲	۳۴۲۱	۳۷۵۰	۳۲۴۱	۶۱۸,۹۵	۷۶۹۴۲



شکل ۵- تأثیر الیاف بر مقاومت فشاری و کششی

این مسئله را می توان از دو دیدگاه مورد بررسی قرار داد یکی بعدی است در حالی که در نمونه های چندلایه به صورت صفحه ای می باشد. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است قرارگیری الیاف در دال های تک لایه به صورت سه پیرامونی. عملکرد الیاف در دال های تک لایه به صورت سه

بعدی است در حالی که در نمونه های چندلایه به صورت صفحه ای می باشد. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است قرارگیری الیاف به صورت سه بعدی منجر به کاهش عملکرد بتن

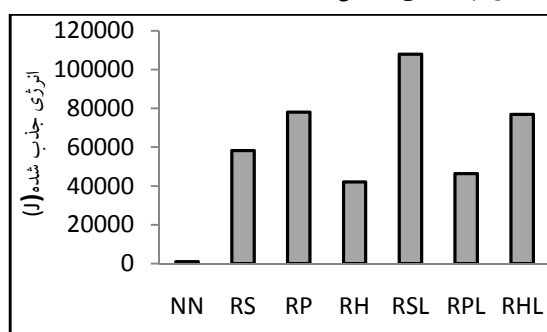
با توجه به مقاومت کششی بالا قادر به جدا شدن از ماتریس پیرامونی بودند. صحت این فرضیه در مورد یاف‌های فولادی در شکل ۸ نشان داده شده است. علاوه بر این یاف‌های PP در نمونه‌های RP با ۱/۳ درصد یاف جدا گردیده که این امر سبب ایجاد رفتار سخت شوندگی و در نتیجه ترک‌های چندگانه گردید.

به منظور تعیین اثر یاف بر روی افزایش تعداد ضربه‌ها، نحوه قرارگیری لایه‌ها با در نظر گرفتن درصد حجمی یاف و نیز نسبت مقاومت کششی به فشاری در جدول ۵ اشاره شده است. همان‌طور که در جدول نیز مشخص است استفاده از نسبت مقاومت کششی به فشاری بالاتر در لایه‌های بالایی و پایینی در دال‌های چند لایه با یاف فولادی و ترکیبی در مقایسه با نسبت مقاومت کششی به فشاری در نمونه‌های تک لایه، سبب افزایش تعداد ضربه‌ها گردیده است. همچنین نحوه قرارگیری یاف در لایه‌های بالایی و پایینی که عملکردی صفحه‌ای دارند در کنار ایجاد پیوستگی قوی بین یاف و ماتریس سبب جذب انرژی بالاتر نمونه‌های RSL و RHL در مقایسه با نمونه‌های RS و RH گردیده است. در این جدول  $F_t/F_c$  نشان‌دهنده نسبت مقاومت کششی به فشاری و  $N_{fail}/N_{failCon}$  نمایانگر تعداد ضربه تا گسیختگی نمونه‌ها نسبت به دال بدون یاف می‌باشند.

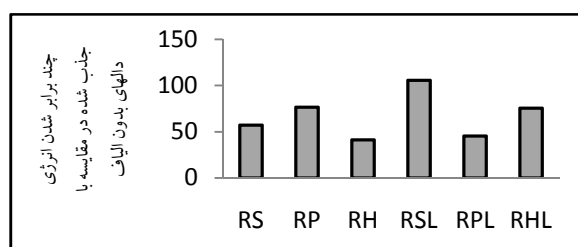
با استفاده از رگرسیون نمایی غیرخطی و در نظر گرفتن مقاومت‌های کششی و فشاری به عنوان متغیرهای جدید، روابطی به دست آمده که در جدول ۶ نشان داده شده‌اند. این روابط برای هر نوع دال به صورت مجزا ارائه شده‌اند. در روابط ارائه شده برای دال‌های چند لایه، متغیرها همان مقاومت کششی و فشاری در لایه‌ها بودند.

در روابط ارائه شده،  $f_{t2}$  مقاومت کششی در لایه دوم با ۱ درصد یاف،  $f_{tm}$  مقاومت کششی در لایه وسطی با ۰.۵ درصد یاف و  $f_{c1}$  مقاومت فشاری در لایه اول با ۲ درصد یاف می‌باشند. شکل ۹ مودهای گسیختگی دال‌ها را تحت بارگذاری ضربه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است دال‌های با جذب انرژی بیشتر در مقایسه با دال‌های با جذب انرژی کمتر، تخریب بیشتری را در حوالی حفره ایجاد شده تحت وزنه افتان شاهد هستند که این امر نیز ناشی از تعداد ضربات بالاتر می‌باشد.

گردیده و این در حالی است که عملکرد صفحه‌ای نمونه‌ها منجر به افزایش آن می‌گردد و این امر نشان‌دهنده اهمیت قرارگیری یاف بر روی رفتار کششی کامپوزیت‌هاست. همچنین چسبندگی بین یاف و ماتریس پیرامون نیز نقش تعیین‌کننده‌ای بر روی دست‌یابی به جذب انرژی بالاتر دارد. در دال‌های RSL با توجه به این که هم نحوه قرارگیری یاف به صورت صفحه‌ای بوده و هم چسبندگی قوی بین یاف و ماتریس وجود دارد، جذب انرژی بالایی در مقایسه با دیگر نمونه‌ها مشاهده می‌گردد. فرض گردیده است که پیوستگی قوی بین یاف‌های فولادی و ماتریس پیرامونی شکل گرفته است و یاف‌های فولادی

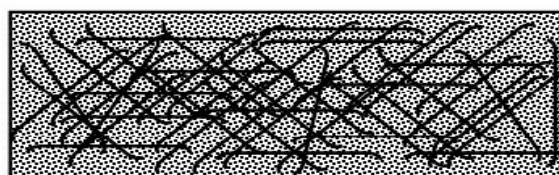


الف

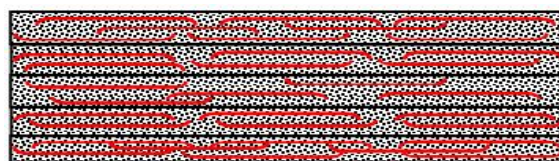


ب

شکل ۶- الف) انرژی جذب شده در دال‌ها (ب) چند برابر شدن انرژی جذب شده نسبت به دال بدون یاف



الف



ب

شکل ۷- الف) توزیع اتفاقی یاف (ب) توزیع صفحه‌ای یاف



شکل ۸- الف) تشکیل ترک‌های چندگانه در نمونه‌های RP ب) تشکیل ترک‌های موضعی ج) الیاف‌های فولادی جدا شده د) الیاف‌های ترکیبی در دال‌های RHL

جدول ۵- تأثیر نسبت مقاومت کششی به فشاری لایه‌ها در تعداد ضربه تا گسیختگی

نمونه	درصد حجمی الیاف	Ft/Fc	N <sub>fail</sub> /N <sub>fail Con</sub>	نمونه	درصد حجمی الیاف	Ft/Fc	N <sub>fail</sub> /N <sub>fail Con</sub>
RSL	۲٪	۰.۱۱۴۴۷	۱۰۵.۶۹	RS	۱.۳	۰.۱۰۸۱۹۵	۵۷.۰۲
	۱٪	۰.۱۰۵۴۲۸					
	۰.۵۰٪	۰.۰۶۵۸۲۲					
	۱٪	۰.۱۰۵۴۲۸					
	۲٪	۰.۱۱۴۴۷					
RHL	۲٪	۰.۰۹۴۹۱۵	۷۵.۳۷	RH	۱.۳	۰.۰۸۴۰۸	۴۱.۳
	۱٪	۰.۰۷۹۵۲۱					
	۰.۵۰٪	۰.۰۷۱۸۹۵					
	۱٪	۰.۰۷۹۵۲۱					
	۲٪	۰.۰۹۴۹۱۵					
RPL	۲٪	۰.۰۸۵۹۷۸	۴۵.۴۶	RP	۱.۳	۰.۰۷۵۲۷۷	۷۶.۴۸
	۱٪	۰.۰۷۶۸۴۳					
	۰.۵۰٪	۰.۰۶۳۷۸۵					
	۱٪	۰.۰۷۶۸۴۳					
	۲٪	۰.۰۸۵۹۷۸					

جدول ۶- رابطه بین تعداد ضربه لازم تا گسیختگی در دال‌ها با مقاومت فشاری و کششی

نمونه	رابطه	نوع	درصد خطا
RS	$N = (2.71^{-13.46})(f_c^{4.31})(f_t^{1.27})$	تک لایه	۰/۱
RP	$N = (2.71^{49.281})(f_c^{-130.89})(f_t^{57.118})$		۰/۲۹
RH	$N = (2.71^{-135.135})(f_c^{-29.716})(f_t^{3.39})$		۱/۱۵
RSL	$N = (2.71^{7.302})(f_{t2}^{1.88819})(f_{tm}^{-1.657})$	چند لایه FG	۲/۱۹
RPL	$N = (2.71^{51.139})(f_{c1}^{-9.519})(f_{tm}^{-0.26})$		۱/۴۸
RHL	$N = (2.71^{2.4839})(f_{tm}^{-0.5552})(f_{t2}^{3.3288})$		۰/۷۵

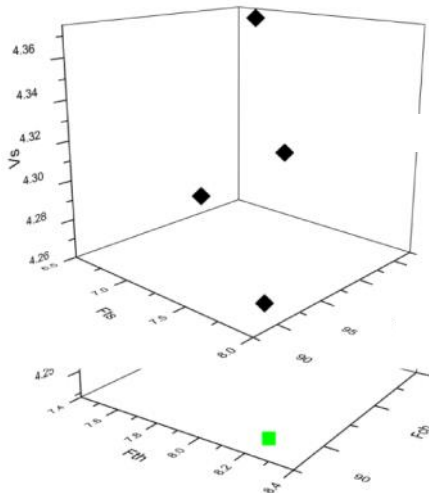
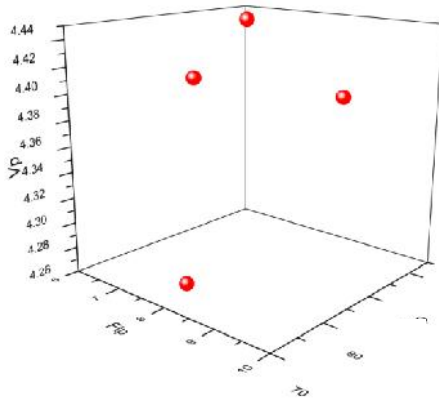




شکل ۹- مودهای گسیختگی الف) نمونه بدون یابف ب) نمونه RSL پ) نمونه RS ت) نمونه RPL ث) نمونه RP چ) نمونه RHL ح) نمونه RH

### ۳-۳- آزمایش اولتراسونیک

مورد استفاده در دال‌های مذکور یکسان بوده است. در مورد دال‌های FG با الیاف PP نیز می‌توان درصد بالای الیاف در لایه‌های بیرونی و تخلخل ایجاد شده را یکی از عوامل دانست که جذب انرژی آنها در مقایسه با دال‌های تک لایه PP کمتر بود.



شکل ۱۰- الف، ب و پ) تغییرات سرعت پالس با توجه به مقاوت فشاری و کششی به ترتیب در نمونه‌های پلی پروپیلن، فولادی و ترکیبی

۴- دال‌های بدون الیاف گسیختگی خمشی داشتند در حالی که در دال‌های مسلح شده با الیاف، گسیختگی ابتدا با پودر شدن بتن آغاز گردید و در ادامه با کاهش ضخامت به اندازه کافی و ادامه ضربات گسیختگی برشی اتفاق افتاد. در نتیجه جذب انرژی بالاتر سبب تخریب بیشتر در حوالی حفره ایجاد شده در وسط نمونه‌ها گردید.

۵- از معادلات رگرسیون نمایی غیرخطی برای دست یابی به رابطه عددی استفاده گردید. نتایج نشان داد که مقاوت‌های

سرعت پالس در نمونه‌های بتنی با استفاده از آزمایش اولتراسونیک تعیین گردید. در شکل ۱۰ تغییرات سرعت با در نظر گرفتن مقاوت فشاری و کششی نشان داده شده است. با توجه به نتایج، افزودن الیاف سبب کاهش تراکم بتن و در نتیجه افزایش تخلخل می‌گردد. سرعت پالس با افزایش تراکم و در نتیجه با افزایش مقاوت فشاری افزایش می‌یابد. این بدین معناست که در بتن‌های الیافی چندلایه FG، پالس با سرعت‌های متفاوتی از لایه‌ها عبور می‌کند به نحوی که سرعت در لایه‌های میانی بیشتر از لایه‌های بیرونی است.

### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله دال‌های بتنی FG تقویت شده با الیاف فولادی، پلی پروپیلن و ترکیبی ساخته و تحت وزنه افتان مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین آزمایش اولتراسونیک جهت بررسی تأثیر میزان الیاف بر روی سرعت پالس صورت پذیرفت. با توجه به آزمایشات انجام شده می‌توان به نتایج زیر دست یافت.

۱- تسلیح دال‌ها با هر یک از الیاف‌های فولادی، پلی پروپیلن و ترکیبی سبب افزایش قابل ملاحظه تعداد ضربه جهت گسیختگی نمونه‌ها در مقایسه با دال‌های بدون الیاف می‌گردد. این افزایش در دال‌های RP و RSL در مقایسه با دیگر دال‌ها نمود بیشتری داشت.

۲- ساخت بتن به صورت چند لایه سبب قرارگیری الیاف‌ها در هر لایه به صورت افقی و رفتار صفحه‌ای آنها می‌شود که در مقایسه با بتن‌های تک لایه که الیاف‌ها به صورت تصادفی قرار گرفته اند عملکرد بهتری را شاهد هستیم.

۳- نتایج ارائه شده نشانگر پتانسیل بالای دال‌های بتنی چندلایه FG در برابر بار ضربه ناشی از وزنه افتان می‌باشد. این مطالعه نشان داد که کارایی دال‌های مورد آزمایش تحت تأثیر سه عامل شامل نوع الیاف، درصد الیاف و نیز موقعیت قرارگیری لایه‌ها می‌باشد. نحوه قرارگیری لایه‌ها به صورت FG به نحوی که لایه‌های بیرونی درصد الیاف بیشتر و لایه‌های درونی درصد الیاف کمتری دارند، در مورد دال‌های فولادی و دال‌های با الیاف ترکیبی سبب افزایش قابل ملاحظه جذب انرژی در مقایسه با دال‌های تک لایه شده است و این در حالی است که کل الیاف

- [9]. Hwang, Chao-Lung, Bui, Le Anh-Tuan, Chen , Chun-Tsun. "Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete". *Construction and Building Materials* 25 (2011) 3768–3772
- [10]. Panzera<sup>1</sup>, T. H., Christoforo<sup>1</sup>, A. L., Cota, F. P., Borges, P. H. R., Bowen, C. R., "Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials. *Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials.*" book edited by Pavla T šinova, ISBN 978-953-307-449-8, Published: September 9, 2011
- [11]. Demirboga, R., Türkmen, I. , Karako, M.B., "Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete", *Cement and Concrete Research*, 34(2004) 2329–2336.
- [12]. Nwokoye, D.N., "Assessment of the elastic moduli of cement paste and mortar phases in concrete from pulse velocity tests", *cement and concrete research*. 4(1974) 641-655.
- [13]. Prassianakis, I. N. , Giokas, P. "Mechanical properties of old concrete using destructive and ultrasonic non-destructive testing methods", *Magazine of Concrete Research*, 55(2003). 171–176.
- [14]. Qasrawi, Y.H., "Concrete strength by combined non-destructive methods simply and reliably predicted", *Cement and Concrete Research*. 30(2000)739–746.
- [15]. Rajagopalan, P.R., Prakash, J., Naramimhan, V., "Correlation between ultrasonic pulse velocity and strength of concrete", *Indian Concrete. Journal*, 47(1973)416–418.
- فشاری و کششی پارامترهای مهمی در تعداد ضربه لازم برای گسیختگی نمونه‌های تک لایه می باشند. اما غیر از دال‌های RPL، در دال‌های FG تعداد ضربه لازم برای گسیختگی به مقاومت کششی وابسته است.
- ۶- نتایج آزمایش اولتراسونیک نشان داد که سرعت پالس با افزایش میزان الیاف کاهش می یابد. همچنین سرعت پالس در نمونه‌های FG با توجه به حجم متفاوت الیاف در هر لایه متغیر است.

## ۵- مراجع

- [1]. Ramakrishna G., Sundararajan T.. "Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: a comparative study". *Cement & Concrete Composites* 27 (2005) 547–553
- [2]. Sudarsana Rao H., Vaishali. Ghorpade G, N.V. Ramana, Gnaneswar K.. "Response of SIFCON two-way slabs under impact loading". *International Journal of Impact Engineering* 37 (2010) 452–458
- [3]. Ong K.C.G., Basheerkhan, M., Paramasivam , P.. "Resistance of fiber concrete slabs to low velocity projectile impact." *Cement & Concrete Composites* 21 (1999) 391-401
- [4]. Zhanga, M.H., Shimb, V.P.W., Lua, G., Chewa, C.W.. "Resistance of high-strength concrete to projectile impact." *International Journal of Impact Engineering* 31 (2005) 825–841
- [5]. Schleyer, Graham, Barnett, Stephanie, Millard, Steve. "Testing and analysis of ultra high performance fiber reinforced concrete panels". 45th UKELG One-Day Discussion Meeting University of Liverpool, March 2010
- [6]. Miyamoto, Y, Kaisser, WA, Rabin, BH, Kawasaki, A, Ford, RG. "Functionally graded materials: design, processing and applications". *Mater technol series*. Kluwer Academic Publisher; 1999.
- [7]. Diasa, C.M.R., Savastano, H., John, Jr. V.M., "Exploring the potential of functionally graded materials concept for the development of fiber cement." *Construction and Building Materials* 24 (2010) 140–146
- [8]. Quek, S.T., Lin, V.W.J., Maalej, M., "Development of functionally-graded cementitious panel against high-velocity small projectile impact" . *International Journal of Impact Engineering* 37 (2010) 928-941

## **Experimental Study of Layered Fiber Reinforced Concrete Slabs with Variable Percentage of Fibers in Layers Against Drop Weight Impact Load**

**M. Ghasemi Naghibdehi**

**Faculty of Civil Engineering, Babol (Noshirvani) University of Technology, Babol, Iran**

**M.Naghipour<sup>\*</sup>**

**Faculty of Mechanical Engineering, Babol (Noshirvani) University of Technology, Babol, Iran**

**M.Rabiee**

**Faculty of Mechanical Engineering, Babol (Noshirvani) University of Technology, Babol, Iran**

**( Received: 2014/6/8 - Accepted: 2015/4/29)**

### **Abstract**

In this paper, three types of concrete slabs against impact loading caused by drop weight were examined and compared. Type I, slabs without fibers, Type II slabs with uniform percentage of fibers (Steel, poly propylene and hybrid) through thickness and type III slabs with variable percentage of fibers through thickness. Results showed that usage of fibers, significantly increased impact resistance of type II and III slabs compared to type I slabs. This study indicated that the efficacy of the tested slabs influenced by three factors including fiber type, fiber percentage and the position of the layers. Functionally graded arrangement of layers such that outer layers had more percentage of fibers than inner layers, considerably increased energy absorption of type III slabs compared to Type II slabs while total amount of fibers used were the same. Also the results of the experiments showed that ultrasonic pulse velocity decreases with increasing fiber percentage and pulse velocity in functionally graded slabs is variable through the thickness due to different amount of fibers in layers.

**Keywords:** Drop Weight Impact, Functionally Graded, Fiber Reinforced Concrete Slabs

---

\* Corresponding author: m-naghi@nit.ac.ir