

نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

رفتار خمشی دال‌های چند لایه بتنی توانمند خود تراکم الیافی هیبریدی

امیرحسین صحرایی مقدم^۱، فریدون امیدی نسب^{۲*}، احمد دالوند^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

چکیده

بتن‌های الیافی نوع جدیدی از مواد کامپوزیتی در صنعت ساخت می‌باشند که به دلیل کمبود اطلاعات، شناسایی مشخصات رفتاری آنها نیازمند مطالعات آزمایشگاهی است. در این تحقیق به بررسی رفتار خمشی دال‌های یک لایه و چند لایه ساخته شده با بتن توانمند خود تراکم مسلح شده به الیاف فولادی و پلاستیکی پرداخته شده است. دال‌های ساخته شده در این تحقیق از ۱۰ مدل متفاوت می‌باشند، ۴ مدل یک لایه و ۶ مدل دارای آرایش سه لایه هستند، که نوع و حجم الیاف در لایه‌ها متغیر است. از هرمدل دو نمونه ساخته شده و در مجموع بر روی ۲۰ نمونه دال با ابعاد $40 \times 40 \times 7/5$ سانتی‌متر آزمایش خمشی سه نقطه‌ای انجام گرفت، تا اثر افزودن الیاف فولادی، پلاستیکی و نحوه چیدمان آنها بر روی رفتار خمشی دال‌ها مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد، الیاف فولادی می‌تواند رفتار خمشی دال‌ها را بطور قابل توجهی بهبود بخشد، بطوری که بعد از ایجاد اولین ترک خمشی، با ایجاد دوختگی بر روی ترک ایجاد شده و جلوگیری از گسترش آن، رفتار ترد دال‌های بتنی غیرمسلح را بهبود بخشیده و مقاومت خمشی و شکل پذیری آنها را بطور قابل توجهی افزایش داد. در صورتی که الیاف‌های پلاستیکی نسبت به الیاف‌های فولادی دارای تاثیر بسیار کمتری بودند. رفتار خمشی دال‌های سه لایه‌ای که حجم ثابتی از الیاف در آنها به گونه‌ای توزیع شده که درصد الیاف در لایه‌های بیرونی بیشتر از لایه میانی می‌باشد، نسبت به دال‌های یک لایه بهبود یافت، که علت آن می‌تواند افزایش درصد الیاف در لایه‌های بیرونی باشد، زیرا این لایه‌ها تحت تنش بیشتری نسبت به لایه میانی قرار می‌گیرند.

کلمات کلیدی: دال‌های چند لایه، بتن خود تراکم، الیاف فولادی، الیاف پلاستیکی، مقاومت خمشی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.122428.1498	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://10.22065/jsce.2018.122428.1498	۱۳۹۸/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۰۴/۱۲	۱۳۹۷/۰۴/۱۲	۱۳۹۷/۰۲/۲۳	۱۳۹۶/۱۲/۲۱
فریدون امیدی نسب omidinasab.f@lu.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

The flexural behavior of multi-layer high performance self-compacting hybrid fibers concrete slabs

A.Sahraei moghadam¹, F.Omidinasab^{2*}, A.Dalvand³

1- Master Student Civil Engineering of Lorestan University, Khoramabad, Iran
2- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khoramabad, Iran
3- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khoramabad, Iran

ABSTRACT

Fiber concretes are a new type of composite material in the manufacturing industry, due to lack of information, identification behavioral characteristics requires laboratory studies. In this research, the bending behavior one layer and multi-layer slabs made with high performance self-compacting concrete reinforced by steel and plastic fibers has been studied. The slabs made in this study differ from 10 models, 4 models one layer and 6 models with three layers make-up, in which the type and volume the fibers vary in layers. Two sample were made from each model and a total 20 slab samples with dimensions $40 \times 40 \times 7.5$ cm the three-point bending test slab were performed, in order to evaluate the effect adding steel and plastic fibers and their layout on the bending behavior of the slabs. The results showed that the steel fibers can significantly improve the bending behavior of the slabs, so that, after the first cracking crack, the cracking was done on the cracks and its extension was prevented, the creep behavior the unbleached concrete slabs They have increased their bending strength and ductility considerably. If plastic fibers were much less effective than steel fibers. The flexural behavior three-layer slabs with a fixed volume fibers distributed in such a way that the percentage fibers in the outer layers is more than the middle layer, improved compared to single-layer slabs, which can be due to an increase in the percentage fibers In the outer layers, because these layers are more tense than the middle layer.

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 March 2018
Revise Date: 13 June 2018
Accept Date: 03 July 2018

Keywords:

Multi-layer Slabs,
Self-compacting Concrete,
Steel Fiber,
Nylon Fiber,
Flexural Strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

10.22065/jsce.2018.122428.1498

*Corresponding author: Fereydoon omidinasab
Email address: omidinasab.f@lu.ac.ir

۱- مقدمه

باتوجه به اینکه بتن ماده‌ای ترد است، امروزه کاربرد بتن الیافی با نرمی بالاتر به گونه‌ای که بتواند تغییرشکل‌های بزرگی را بدون شکست تحمل نماید، مورد توجه مهندسين و محققين است. تحقیقات درباره تامین نرمی لازم در بتن با الیاف مختلف و حتی در برخی موارد حذف آرماتور، در حال انجام است [۱-۲]. بتن با مقاومت بالا (توانمند) به بتن های اطلاق می‌شود که دارای مقاومت فشاری بالاتر از ۴۲ مگاپاسکال باشند [۳]. بتن خود تراکم برای اولین بار برای دستیابی به ساختار بتن پایدار در سال ۱۹۸۸ مطرح گردید و مطالعات اولیه پیرامون بتن خود تراکم توسط Ozawa در سال ۱۹۸۹ و Okamura در سال ۱۹۹۳ در دانشگاه توکیو انجام گرفت [۴-۶]. و مطابق تعریف بارتوس [۷] بتن خود تراکم بتنی است که تحت اثر وزن خود جاری شده و بدون نیاز به هرنوع لرزاندن قالب را پر کرده و همگنی خود را حفظ کند. بتن به ماده‌ای گفته می‌شود که در فشار قوی و در کشش ضعیف و شکننده است. ضعف کششی بتن با میلگردهای رایج بهبود می‌یابد، ولی امروزه با گسترش تکنولوژی، می‌توان با الیاف‌های مختلف به اصلاح این ضعف پرداخت [۸]. امروزه در دنیا انواع بسیار متنوعی از الیاف برای کاربردهای گوناگون در بتن وجود دارد که یکی از پرکاربردترین آن‌ها، الیاف فولادی می‌باشد. الیاف فولادی دارای مدول الاستیسیته و کرنش شکست بالایی بوده که با توجه به قابلیت شکل پذیری مناسب و مقاومت کششی بالا از مناسب‌ترین نوع الیاف به حساب می‌آید. این نوع الیاف به اشکال ظاهری گوناگون (مستقیم، انتهای قلاب‌دار، دندانه‌دار و ...) جهت بهبود رفتار بتن ساخته می‌شود و از دیگر امتیازات این الیاف، اختلاط ساده با دیگر مواد مانند بتن می‌باشد [۹]. الیاف پلاستیکی نیز به عنوان یک تقویت کننده دارای یک عملکرد مثبت در کاهش و کنترل ترک‌های ایجاد شده در بتن می‌باشد، علاوه بر این، الیاف پلاستیکی می‌تواند باعث بهبود رفتار بتن در مقابل گسیختگی خمشی شود [۱۰]. پل زدن الیاف باعث یکپارچگی بتن و افزایش تغییر شکل‌های زیاد خمشی و کششی به علت دوزندگی الیاف می‌شود [۱۱-۱۲]. سوامی و همکارانش، یک تحلیل رگرسیون بر روی نتایج آزمایشات انجام شده بر روی خمیر سیمان، ملات و بتن-های الیافی انجام داده و از انواع نسبت های اختلاط و شکل هندسی الیاف استفاده نموده و ثابت‌هایی را برای محاسبه تنش نظیر اولین ترک و تنش خمشی نهایی در بتن بدست آوردند [۱۳]. اطلاعات بدست آمده نشان می‌دهند با افزودن الیاف به میزان ۰/۹ تا ۲ درصد حجمی بتن، مقاومت خمشی و کرنش به ترتیب تا ۳۰٪ و ۱۰ برابر بتن غیر مسلح می‌رسد [۱۴].

۲- نیاز تحقیقاتی

امروزه از دال‌های بتنی بصورت گسترده‌ای در سقف ساختمان‌های مسکونی، تجاری و ... استفاده می‌شود که این دال‌ها تحت اثر بارگذاری خمشی قرار می‌گیرند [۱۵]. تاکنون تحقیقات فراوانی بر روی مقاوم سازی دال‌های بتنی صورت گرفته است، که بخش غالب این تحقیقات مربوط به مقاوم سازی دال‌ها با ورق‌های FRP و یا تقویت با یک نوع الیاف فولادی، پلی پروپیلن و ... می‌باشد، و تاکنون تحقیقات بسیار کمی بر روی رفتار خمشی دال‌های بتنی چند لایه و همچنین مسلح شده به ترکیبی از چند نوع الیاف صورت گرفته است [۱۶]. بنابراین در این تحقیق رفتار خمشی دال‌های چندلایه مسلح شده به ترکیبی از دونوع الیاف فولادی و پلاستیکی بررسی می‌شود، تا اثر توزیع الیاف‌ها بصورت یکنواخت در کل حجم بتن در دال‌های یک لایه و بصورت غیریکنواخت در دال‌های چند لایه بررسی شود.

۳- ساخت نمونه‌ها

در این تحقیق در ساخت نمونه‌ها از سیمان پورتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان شهر درود استفاده شده است، مواد تشکیل دهنده و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این سیمان در جدول (۱) نشان داده شده است. در این تحقیق از الیاف‌های فولادی دوسر قلاب به طول ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۸ میلی‌متر و الیاف‌های پلاستیکی به طول ۴ سانتی‌متر و عرض ۰/۳ سانتی‌متر، نشان داده شده در شکل (۱) استفاده شده است. خصوصیات الیاف‌های فولادی و پلاستیکی مورد استفاده به ترتیب در جداول (۲ و ۳) نشان داده شده است. در ساخت نمونه‌ها از مصالح سنگی ریزدانه استفاده شده، همگی این مصالح عبوری از الک نمره ۸ می‌باشند. همچنین برای ایجاد کارایی لازم در بتن،

از فوق روان کننده‌ی کربوکسیلاتی با نام تجاری Dezobuild 10 استفاده شده است. طرح اختلاط به کار برده شده برای ساخت نمونه‌ها نیز در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات الیاف فولاد مورد استفاده

نوع الیاف	طول (cm)	L/D	چگالی (Kg/m ^۳)	مدول یانگ (GPa)
فولادی	۵	۶۲/۵	۷۸۵۰	۲۰۰

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 ^۳)	۳/۱
سطح مخصوص (cm ^۲ /gr)	۳۰۰۰

جدول ۳: مشخصات الیاف پلاستیکی مورد استفاده

نوع الیاف	طول (cm)	عرض (cm)	چگالی (kg/m ^۳)	مدول یانگ (GPa)
پلاستیکی	۴	۰/۳	۹۲۰	۲/۲

جدول ۴: طرح اختلاط مورد استفاده

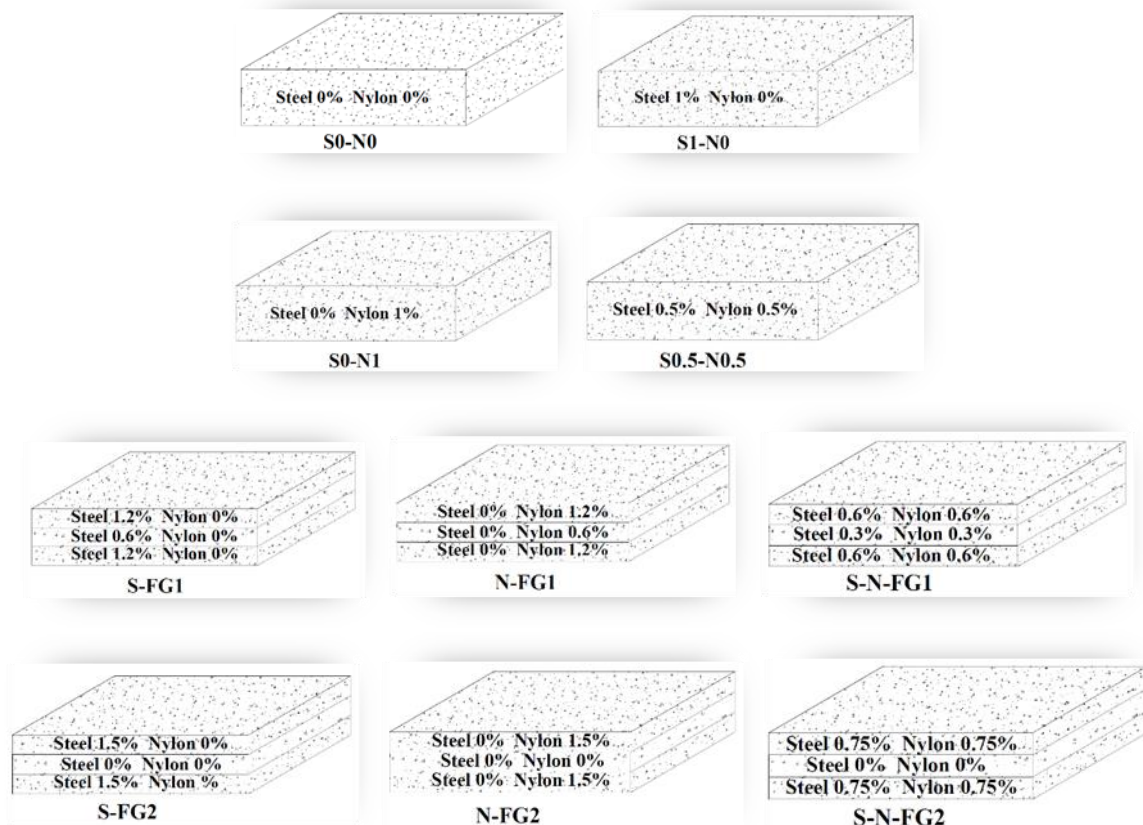
فوق روان کننده (kg/m ^۳)	آب (kg/m ^۳)	سیمان (kg/m ^۳)	ماسه (kg/m ^۳)	W/C
۴/۸	۴۵۳	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۰/۳۸



شکل ۱: الیاف فولادی و پلاستیکی مورد استفاده

در این تحقیق ۱۲ عدد نمونه فشاری مکعبی با ضلع ۱۰ سانتی‌متر، ۱۲ عدد نمونه کششی استوانه‌ای با ابعاد ۲۰×۱۰ سانتی‌متر و ۱۲ عدد نمونه تیر کوچک به ابعاد ۳۲×۸×۶ سانتی‌متر ساخته و بر روی آن‌ها آزمایشات فشاری، کششی و خمشی انجام گرفت. همانطور که در جدول (۵) نشان داده شده است، نمونه‌ها در چهار طرح اختلاط مختلف می‌باشند. یک طرح اختلاط بدون الیاف بعنوان نمونه شاهد و سه طرح اختلاط دیگر به ترتیب دارای ۱ درصد الیاف فولادی، ۱ درصد الیاف پلاستیکی و ۰/۵ درصد از هر کدام از این الیاف‌ها می‌باشند، از هر طرح اختلاط ۳ نمونه ساخته شده است. جزئیات دال‌های ساخته شده در این تحقیق نیز در شکل (۲) نشان داده شده است، دال‌ها در

۱۰ مدل متفاوت یک لایه و چند لایه (FG^۱) می‌باشند. ۴ مدل از دال‌ها دارای آرایش یک لایه و ۶ مدل دیگر دارای آرایش سه لایه می‌باشند. بجز نمونه شاهد (S0-N0) که فاقد الیاف می‌باشد، دیگر دال‌ها همگی دارای ۱ درصد الیاف هستند که تفاوت آن‌ها در نوع، حجم و چیدمان الیاف در لایه‌هاست. از هر مدل دال، ۲ نمونه ساخته و در مجموع بر روی ۲۰ عدد دال آزمایش خمش سه نقطه‌ای (اعمال یک بار متمرکز در وسط دهانه) انجام گرفته است. در شکل (۳) تصویر نمونه‌های ساخته شده نشان داده شده است.



شکل ۲: مشخصات نمونه‌های دال

جدول ۵: مشخصات نمونه‌های فشاری، کششی و خمشی

شماره	نام نمونه	درصد حجم الیاف	
		فولادی	پلاستیکی
۱	S0-N0	۰	۰
۲	S1-N0	۱	۰
۳	S0-N1	۰	۱
۴	S0.5-N0.5	۰/۵	۰/۵



شکل ۳: نمونه‌های ساخته شده

۴- روند انجام آزمایشات

۴-۱- آزمایشات بتن خود تراکم تازه

برای تعیین کارایی و خود تراکم بودن بتن مورد استفاده، بر روی بتن بدون الیاف و دارای الیاف‌های فولادی و پلاستیکی، آزمایشات اسلامپ روانی، قیف V، جعبه L و جعبه U انجام گرفت، تا از خود تراکم بودن بتن مورد استفاده اطمینان حاصل شود. در آزمایش اسلامپ روانی، میانگین دو قطر پخش شدگی بتن محاسبه و بعنوان اسلامپ روانی تعیین گردید. در آزمایش قیف V، زمان مورد نیاز برای تخلیه کامل بتن از محفظه اندازه‌گیری شد. در آزمایش جعبه L، نسبت دو ارتفاع بتن در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی جعبه و در آزمایش جعبه U نیز اختلاف ارتفاع بتن در دو طرف جعبه اندازه‌گیری شده است.

۴-۲- آزمایش خمش دال‌ها

دال‌های ساخته شده در این تحقیق از ۱۰ مدل متفاوت می‌باشند که در شکل (۱) جزئیات آن نشان داده شده است. ۴ مدل از دال‌ها دارای آرایش یک لایه و ۶ مدل دیگر دارای آرایش سه لایه (FG) می‌باشند. جز نمونه شاهد S0-N0 که فاقد الیاف می‌باشد، دیگر دال‌ها همگی دارای حجم ثابت ۱ درصد الیاف هستند، که تفاوت آن‌ها در نحوه ترکیب الیاف‌های فولادی و پلاستیکی، تغییر حجم و نوع الیاف در لایه‌های مختلف می‌باشد. از هر مدل دال دو نمونه ساخته و در مجموع بر روی ۲۰ عدد دال بتنی ساخته شده آزمایش خمش سه نقطه‌ای (اعمال یک بار متمرکز در وسط دهانه) انجام گرفت. براساس آزمایش انجام گرفته حداکثر نیروی خمشی تحمل شده توسط دال‌ها برداشت، و از طریق رابطه (۱) مقاومت خمشی دال‌ها بر حسب MPa محاسبه و باهم مقایسه شد. در این رابطه P حداکثر بار خمشی تحمل شده و L، b و d نیز به ترتیب طول عرض و ارتفاع دال می‌باشد.

$$\text{مقاومت خمشی} = \frac{rPL}{b.d^2} \quad (1)$$

بانصب LVDT در وسط دهانه‌ی دال، خیز دال در حین آزمایش تا لحظه گسیختگی اندازه‌گیری و نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ها رسم شده است. بر اساس نمودارهای رسم شده می‌توان، شکل پذیری و طاقت خمشی^۲ نمونه‌ها را باهم مقایسه کرد. شکل پذیری دال‌ها مطابق رابطه (۲) براساس نسبت تغییر مکان متناظر با نقطه تسلیم دال (Δ_y) بر تغییر مکان نهایی و متناظر با نقطه گسیختگی آن (Δ_u) تعریف، و باهم مقایسه شده است.

$$\text{شکل پذیری} = \frac{\Delta_y}{\Delta_u} \quad (2)$$

² Flexural Toughness Factor

تا قبل از سال ۲۰۰۶، محققین طاقت خمشی را برحسب استاندارد ASTM C1018 محاسبه می‌کردند، براساس این استاندارد بایستی تغییرمکان متناظر با تشکیل اولین ترک مشخص شود، لیکن به دلیل وجود مشکلاتی که در تعیین دقیق این پارامتر وجود داشت، این استاندارد بعد از سال ۲۰۰۶ منسوخ شد. در سال‌های اخیر برای تعیین طاقت خمشی از استاندارد ASTM C1609 بعنوان جایگزین استاندارد پیشین استفاده می‌شود. در این تحقیق برای تعیین طاقت خمشی از هر دو استاندارد ASTM C1018 و ASTM C1609 استفاده می‌شود، تا نتایج با استفاده از هردو روش تحلیل شده و ارزیابی با دقت بالاتری انجام شود. برای تعیین طاقت خمشی بر اساس استاندارد ASTM C1018، اندیس‌های طاقت شامل I_5 ، I_{10} ، I_{15} و I_{20} براساس نقاط مشخصه تعیین شده بر روی نمودار بار-تغییرمکان نشان داده شده در شکل (۴) و براساس رابطه (۳) تعیین می‌شوند.

$$I_5 = S_{OACD}/S_{OAB} \quad (3)$$

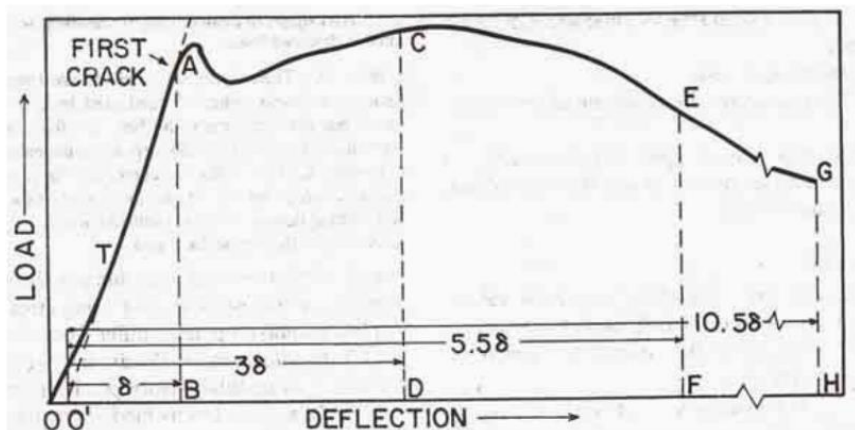
$$I_{10} = S_{OAEF}/S_{OAB}$$

$$I_{15} = S_{OAGH}/S_{OAB}$$

$$I_{20} = S_{OAMN}/S_{OAB}$$

در رابطه (۳):

- S_{OAB} ← مساحت زیر نمودار بار-تغییرمکان در جابجایی متناظر اولین ترک
- S_{OACD} ← مساحت زیر نمودار بار-تغییرمکان در جابجایی ۳ برابر جابجایی متناظر اولین ترک
- S_{OAEF} ← مساحت زیر نمودار بار-تغییرمکان در جابجایی ۵/۵ برابر جابجایی متناظر اولین ترک
- S_{OAGH} ← مساحت زیر نمودار بار-تغییرمکان در جابجایی ۱۰/۵ برابر جابجایی متناظر اولین ترک
- S_{OAMN} ← مساحت زیر نمودار بار-تغییرمکان در جابجایی ۱۵/۵ برابر جابجایی متناظر اولین ترک



شکل ۴: نمودار بار-تغییرمکان برای تعیین اندیس‌های طاقت براساس ASTM C1018 [۱۷]

برای مقایسه طاقت خمشی دال‌ها بر اساس استاندارد ASTM C1609، میزان طاقت خمشی، از سطح زیر نمودار بار-تغییرمکان تا تغییرمکان به میزان $L/150$ که در آن طول دهانه بارگذاری دال می‌باشد بدست آمده، و ضریب مقاومت خمشی مطابق رابطه (۴) محاسبه شده است.

$$R_{T,150}^D = \frac{10 \cdot T_{150}^D}{f_t b d^2} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، $R_{T,150}^D$ ضریب مقاومت خمشی، T_{150}^D میزان طاقت خمشی تا نقطه متناظر L/150 برحسب ژول (J)، f_1 مدول گسیختگی (تنش متناظر اولین ترک) برحسب MPa و b و d نیز عرض و ارتفاع نمونه برحسب mm می‌باشند.

۴-۳- آزمایشات فشاری، کششی و خمشی بر روی نمونه‌های کوچک

آزمایشات مقاومت فشاری، کششی و خمشی نیز بر روی چهار طرح اختلاط نشان داده شده در جدول (۵) انجام گرفت. طرح اختلاطها شامل یک نمونه شاهد بصورت بدون الیاف، و سه طرح اختلاط دیگر دارای ۱ درصد الیاف فولادی، ۱ درصد الیاف پلیاستیکی و ۰/۵ درصد از هر کدام از این الیافها می‌باشد. از هر طرح اختلاط سه نمونه مکعبی فشاری با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر، سه نمونه استوانه‌ای کششی با ابعاد 20×10 سانتی‌متر و ۳ نمونه تیر خمشی کوچک با ابعاد $32 \times 8 \times 6$ سانتی‌متر ساخته و آزمایش شد. آزمایش فشاری بر روی نمونه‌ها توسط جک ۲۰۰ تنی انجام و حداکثر نیروی فشاری تحمل شده توسط نمونه برداشت شد. با استفاده از رابطه (۵) مقاومت فشاری نمونه برحسب MPa محاسبه شده است، که در این رابطه P حداکثر نیروی فشاری تحمل شده و A سطح مقطع نمونه مکعبی می‌باشد.

$$\text{مقاومت فشاری} = \frac{P}{A} \quad (5)$$

آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بصورت آزمایش برزیلی (دونیم شدن) و آزمایش خمشی تیرها نیز بصورت سه نقطه‌ای (اعمال یک بار متمرکز در وسط دهانه) انجام و حداکثر نیروی کششی و خمشی تحمل شده توسط نمونه‌ها برداشت شد. مقاومت کششی و خمشی به ترتیب از طریق رابطه (۱) و رابطه (۶) بر حسب MPa محاسبه می‌شود. در رابطه (۶)، P حداکثر نیروی کششی تحمل شده و L و d نیز به ترتیب طول و قطر نمونه استوانه‌ای می‌باشد.

$$\text{مقاومت کششی} = \frac{2P}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (6)$$

۵- نتایج

۵-۱- نتایج آزمایشات بتن خود تراکم تازه

نتایج آزمایشات اسلامپ روانی، قیف V، جعبه L و جعبه U در جدول (۶) نشان داده شده است. اسلامپ روانی برای طرح اختلاط بدون الیاف، ۷۳ سانتی‌متر بدست آمد، که نشان دهنده کارایی بالا و خود تراکم بودن بتن مورد استفاده می‌باشد. افزودن ۱ درصد الیاف فولادی در طرح اختلاط S1-N0 موجب کاهش اسلامپ روانی از ۷۳ به ۶۱ سانتی‌متر شد، که نشان دهنده تاثیر منفی الیاف فولادی بر روی کارایی و خود تراکم بودن بتن می‌باشد. همچنین افزودن الیاف فولادی به مخلوط بتن با مشکل گلوله شدن مواجه می‌شود، که برای جلوگیری از این مشکل، الیاف فولادی باید در مرحله آخر به مخلوط بتن اضافه گردد. از طرفی افزودن ۱ درصد الیاف پلیاستیکی در نمونه S0-N1 اسلامپ را به ۶۹ سانتی‌متر کاهش داد، که نشان دهنده تاثیر کمتر الیاف پلیاستیکی نسبت به الیاف فولادی در کاهش کارایی بتن می‌باشد. از طرفی اختلاط الیاف پلیاستیکی با بتن به راحتی صورت می‌گیرد. نتایج دیگر آزمایشات بتن تازه نیز همگی نمایانگر تاثیر بالای الیاف فولادی و تاثیر به مراتب کمتر الیاف پلیاستیکی در کاهش کارایی بتن می‌باشند. نحوه انجام آزمایشات بتن خود تراکم تازه در شکل (۵) نشان داده شده است.

جدول ۶: نتایج آزمایشات کارایی بتن خود تراکم

طرح اختلاط	اسلامپ روانی		قیف V	جعبه L	جعبه U (H ₁ -H ₂) (cm)
	cm	(s)T ₂₀	s	(H ₁ /H ₂)	
S0-N0	۷۳	۱/۶۶	۳/۲۱	۰/۹۴	۱۲
S1-N0	۶۱	۱/۸۱	۵/۹۷	۰/۷۹	۱۸
S0-N1	۶۹	۱/۷۸	۴/۰۱	۰/۸۴	۱۴
S0.5-N0.5	۶۳	۱/۸۲	۵/۳۶	۰/۸۰	۱۷



(د)



(ج)

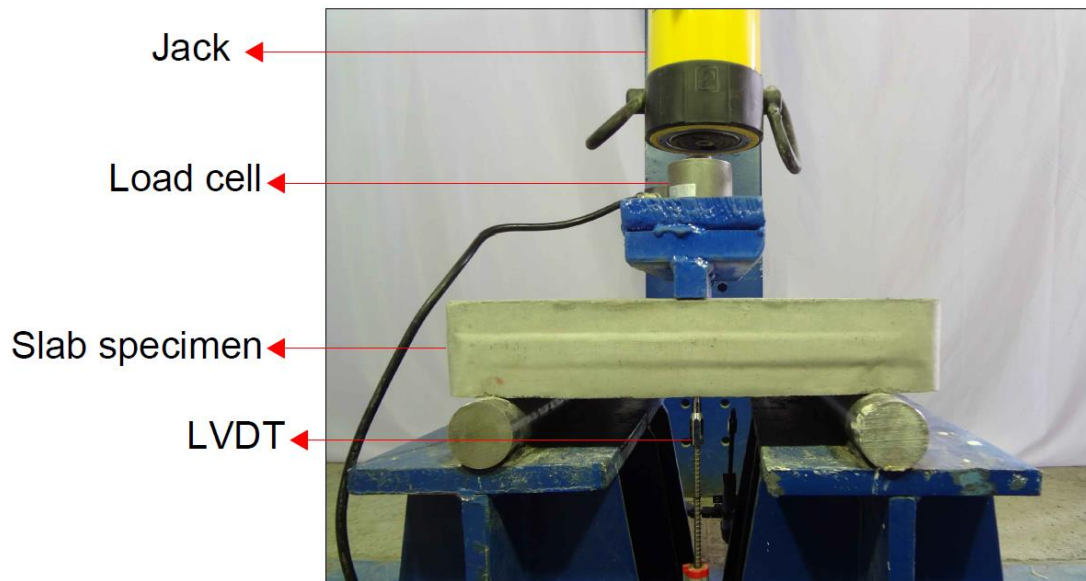


(الف)

شکل ۵: آزمایشات (الف) اسلامپ روانی (ب) قیف V (ج) جعبه L (د) جعبه U

۵-۲- نتایج آزمایش مقاومت خمشی دال‌ها

بر روی ۲۰ عدد دال بتنی با ابعاد $40 \times 40 \times 7/5$ سانتی‌متر آزمایش مقاومت خمشی انجام گرفت. ۲۰ عدد دال بتنی از ۱۰ نوع متفاوت می‌باشند که جزئیات آن در شکل (۱) نشان داده شده است. جزئیات آزمایش انجام گرفته نیز در شکل (۶) آمده است. در این آزمایش حداکثر نیروی خمشی تحمل شده توسط نمونه‌ها برداشت، و از طریق رابطه (۱) مقاومت خمشی دال‌ها بر حسب MPa محاسبه شده است.

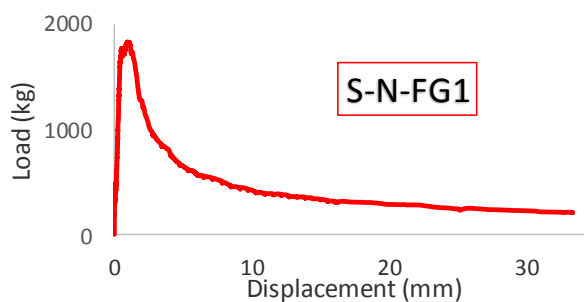
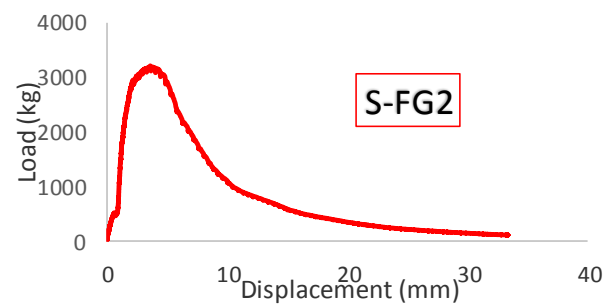
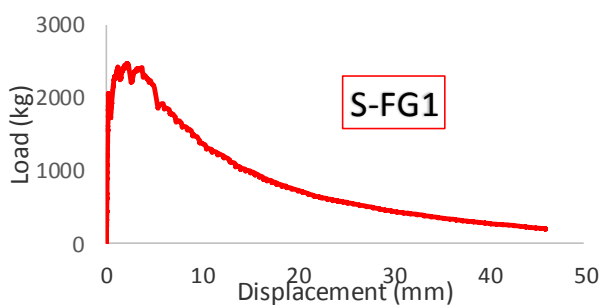
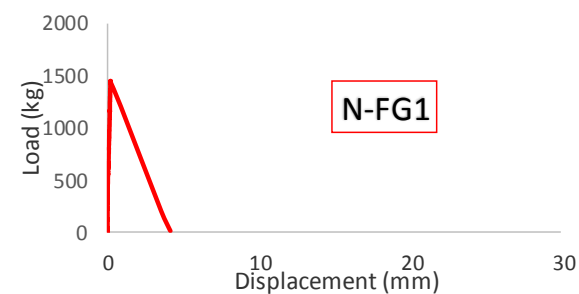
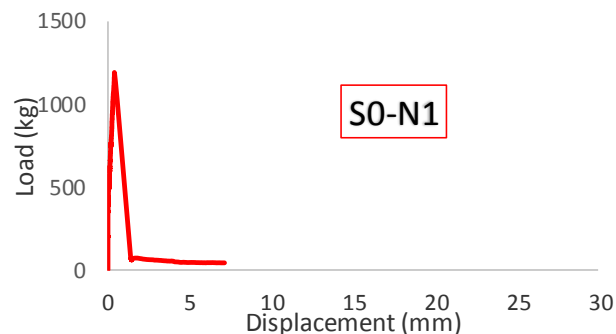
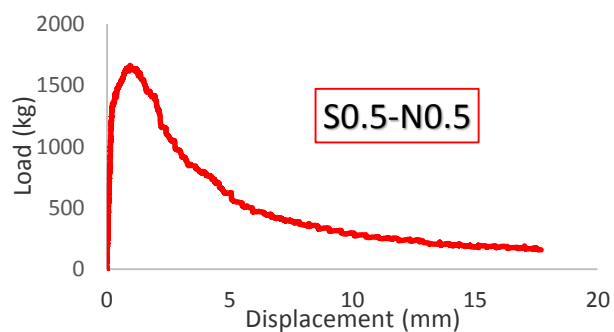
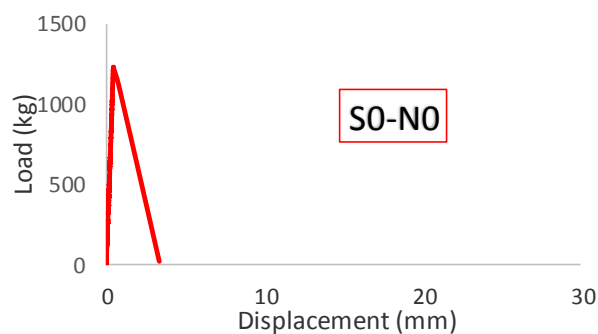
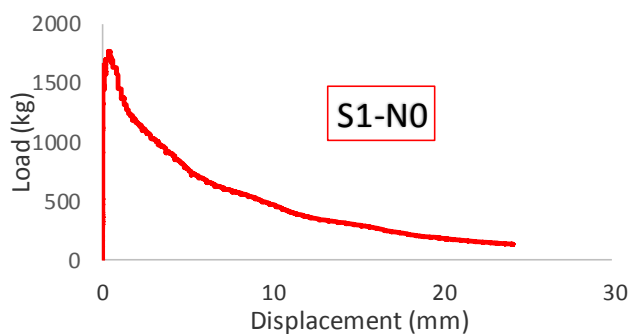


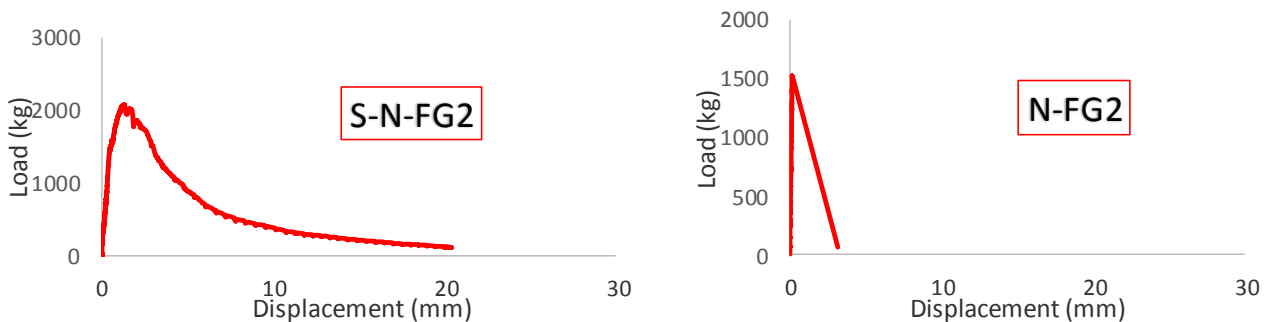
شکل ۶: جزئیات آزمایش مقاومت خمشی دال‌ها

۵-۲-۱- مقایسه مقاومت خمشی و شکل‌پذیری دال‌ها

از ۱۰ مدل دال آزمایش شده یک مدل بدون ییاف بعنوان نمونه شاهد، ۳ نمونه S1-N0، S-FG1 و S-FG2 دارای ۱ درصد ییاف فولادی بصورت یک لایه و سه لایه، ۳ نمونه S0-N1، N-FG1 و N-FG2 دارای ۱ درصد ییاف پلاستیکی بصورت یک لایه و سه لایه و ۳ نمونه S0.5-N0.5، S-N-FG1 و S-N-FG2 دارای ۰/۵ درصد ییاف فولادی و ۰/۵ درصد ییاف پلاستیکی بصورت یک لایه و سه لایه می‌باشند. به این ترتیب با انجام این آزمایش می‌توان تاثیر افزودن ییاف فولادی، پلاستیکی و ترکیبی از این دو ییاف را نسبت به نمونه بدون ییاف، و تاثیر توزیع چندلایه ییاف را نسبت به توزیع یکنواخت آن مقایسه کرد. آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها انجام و نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. در جدول (۷) نیز نتایج مربوط به مقاومت خمشی و شکل‌پذیری دال‌ها نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده‌ی افزایش مقاومت خمشی دال‌های دارای ییاف فولادی و کاهش مقاومت دال‌های دارای ییاف پلاستیکی نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. افزودن ۱ درصد ییاف فولادی در نمونه S1-N0 باعث افزایش ۴۴ درصدی و افزودن ۱ درصد ییاف پلاستیکی در نمونه S0-N1 باعث کاهش ۳ درصدی مقاومت خمشی این نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد (S0-N0) شد. از طرفی افزودن ۰/۵ درصد از هر کدام از این دو ییاف باعث افزایش ۳۵ درصدی مقاومت نمونه شده است، که این تاثیر می‌تواند بعلت حضور ییاف فولادی باشد، چون نتایج نشان می‌دهد ییاف پلاستیکی به تنهایی نمی‌تواند افزایش مقاومتی را ایجاد نماید. مقایسه مقاومت دال‌های دارای میزان ییاف برابر، اما با چیدمان متفاوت نشان دهنده موثر بودن نحوه چیدمان ییاف‌ها بر رفتار خمشی نمونه‌ها می‌باشد. بطوری که چیدمان ییاف‌ها، به گونه‌ای که حجم ییاف در لایه‌های بیرونی بیشتر از لایه‌های داخلی باشد، باعث بهبود رفتار خمشی دال‌ها می‌شود. مقاومت خمشی نمونه-

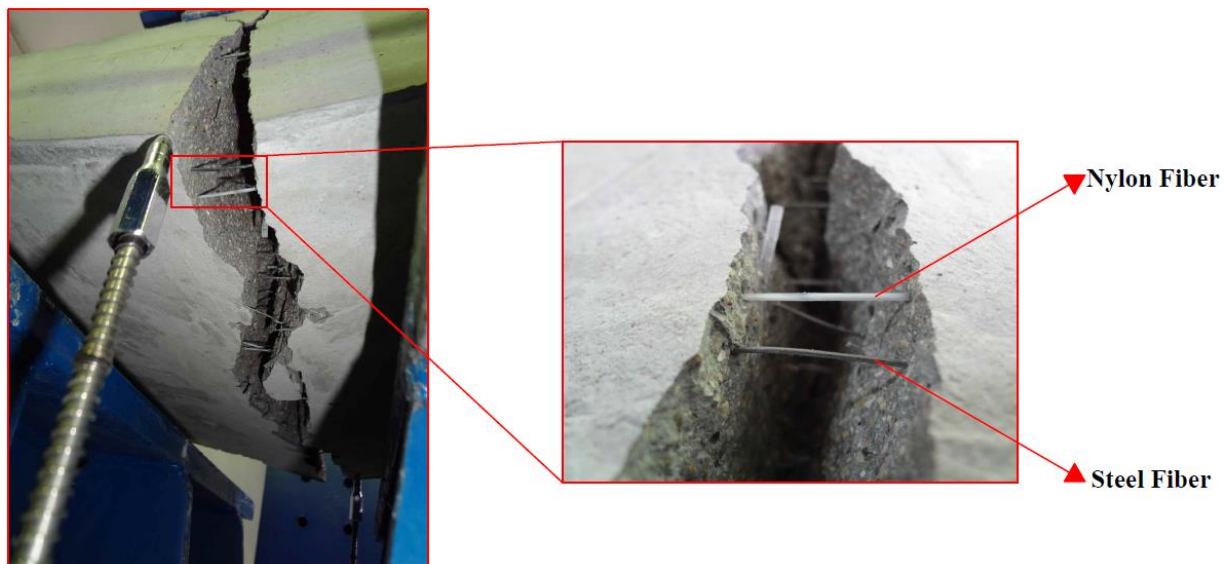
های S-FG1 و S-FG2 نسبت به نمونه S1-N0 به ترتیب ۳۹ و ۸۲ درصد افزایش یافت، در صورتی که تنها تفاوت دال‌های مذکور تغییر در چیدمان الیاف‌ها می‌باشد و میزان الیاف در آن‌ها یکسان، و برابر ۱ درصد حجمی می‌باشد. تاثیر چیدمان الیاف در دال‌های دارای الیاف پلاستیکی و ترکیبی از الیاف‌های فولادی و پلاستیکی نیز مشاهده شد، بطوری که مقاومت خمشی دال‌های N-FG1 و N-FG2 نسبت به نمونه S0-N1 به ترتیب ۲۱ و ۲۸، و مقاومت خمشی نمونه‌های S-N-FG1 و S-N-FG2 نسبت به نمونه S0.5-N0.5 به ترتیب ۱۰ و ۲۵ درصد افزایش یافت.





شکل ۷: نمودار بار-تغییر مکان دال‌ها

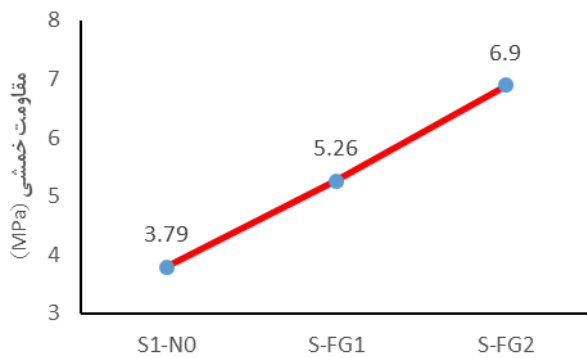
تفاوت در شکل پذیری دال‌ها در نمودارهای بار-تغییر مکان نشان داده شده در شکل (۷) قابل مشاهده است. در انجام آزمایشات مشاهده شد که دال‌های بدون الیاف فاقد شکل پذیری بوده و بعد از ایجاد اولین ترک خیلی سریع به مرحله شکست رسیده و رفتاری ترد را از خود نشان دادند. همچنین مشاهدات نشان داد، الیاف‌های فولادی می‌توانند باعث ایجاد دوختگی در ترک‌ها شده و از گسترش آن‌ها جلوگیری نمایند، که این امر موجب افزایش مقاومت و بالا رفتن شکل پذیری دال‌ها بطور قابل توجهی شده است. از طرفی الیاف‌های پلاستیکی نیز موجب افزایش شکل پذیری می‌شوند، اما اثر الیاف‌های پلاستیکی در افزایش شکل پذیری نسبت به الیاف‌های فولادی بسیار کمتر می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایشات، افزودن ۱ درصد الیاف فولادی، ۱ درصد الیاف پلاستیکی و ۰/۵ درصد از هر کدام از این الیاف‌ها شکل پذیری را نسبت به نمونه بدون الیاف به ترتیب ۲۴۲، ۳۹ و ۱۶۰ درصد افزایش می‌دهند، که نشان‌دهنده تاثیر بسیار زیاد الیاف فولادی و تاثیر کمتر الیاف پلاستیکی در افزایش شکل پذیری می‌باشد. از طرفی با مقایسه شکل پذیری دال‌های دارای میزان الیاف یکسان اما با چیدمان متفاوت، مشاهده می‌شود تغییر در چیدمان الیاف‌ها نمی‌تواند باعث تغییر قابل توجهی در شکل پذیری شود. دوختگی در ترک خمشی ایجاد شده توسط ترکیبی از الیاف‌های فولادی و پلاستیکی در شکل (۸) نشان داده شده است. در نمودارهای شکل (۹) مقایسه‌ی مقاومت خمشی دال‌های یک لایه و سه لایه و در نمودار شکل (۱۰) نیز مقایسه شکل‌پذیری نمونه‌ها نشان داده شده است.



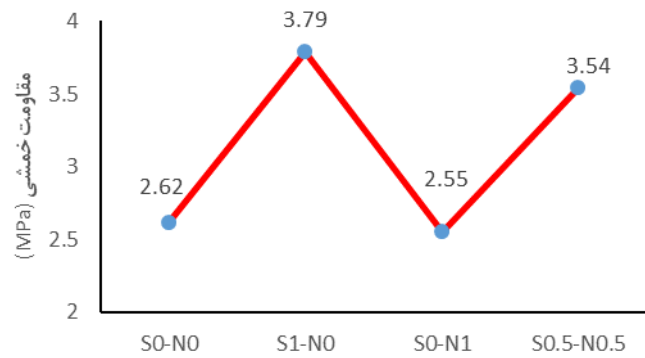
شکل ۸: دوختگی ترک خمشی توسط ترکیب الیاف‌های فولادی و پلاستیکی

جدول ۷: مقاومت خمشی و شکل پذیری دال‌ها

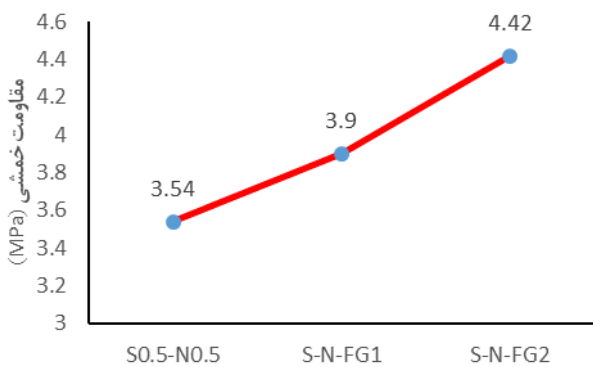
نمونه	حداکثر نیروی خمشی تحمل شده (kg)	مقاومت خمشی (MPa)	تغییر مکان نقطه تسلیم (mm) (Δ_y)	تغییر مکان نهایی (mm) (Δ_u)	شکل پذیری
S0-N0	۱۲۳۰/۶۱	۲/۶۳	۰/۴۲	۳/۲۵	۷/۳۴
S1-N0	۱۷۷۵/۸۸	۳/۷۹	۱/۰۳	۲۵/۸۷	۲۵/۱۱
S0-N1	۱۱۹۴/۱۲	۲/۵۵	۰/۶۵	۶/۶۵	۱۰/۲۳
S0.5-N0.5	۱۶۶۱/۵۶	۳/۵۴	۰/۹۴	۱۷/۹۲	۱۹/۰۶
S-FG1	۲۴۶۳/۹	۵/۲۶	۲/۱۹	۴۵/۹۹	۲۱
N-FG1	۱۴۴۵/۹۴	۳/۰۸	۰/۳۹	۳/۸۷	۹/۹۲
S-N-FG1	۱۸۲۸/۵۶	۳/۹	۱/۲	۳۳/۴۷	۲۷/۷۸
S-FG2	۳۲۳۵/۲۲	۶/۹	۱/۴۵	۳۳/۳۳	۲۳
N-FG2	۱۵۴۶/۲۸	۳/۲۶	۰/۴۲	۳/۴۸	۸/۲۹
S-N-FG2	۲۰۷۲/۵۶	۴/۴۲	۱/۳۱	۲۰/۳۷	۱۵/۵۵



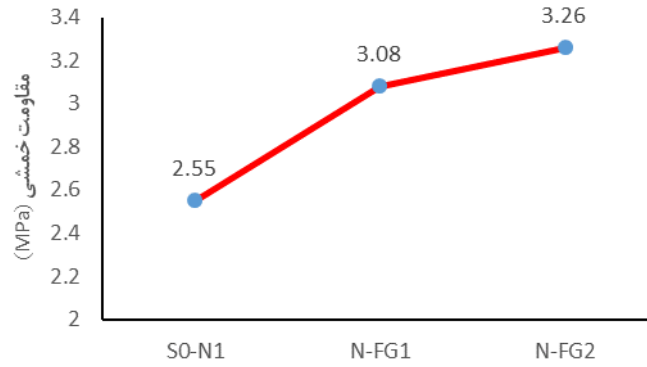
(ب)



(الف)

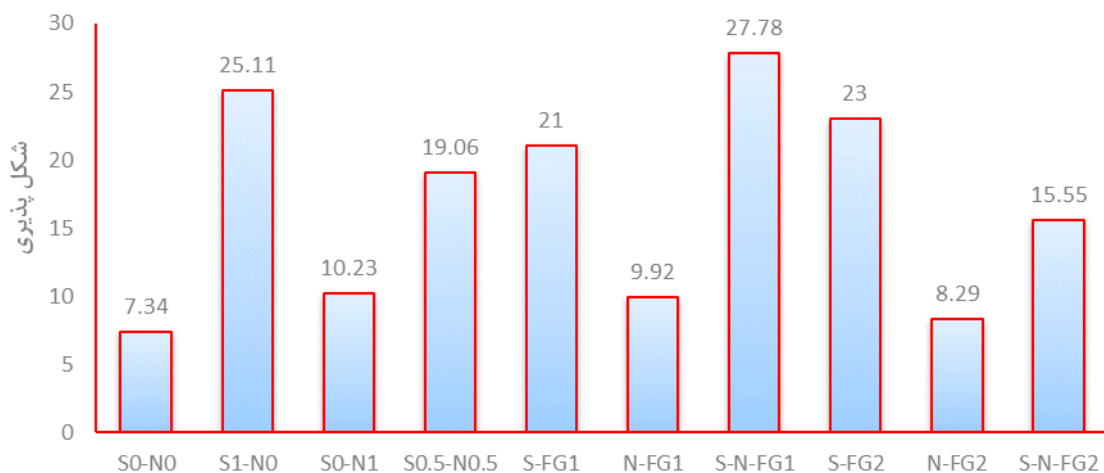


(د)



(ج)

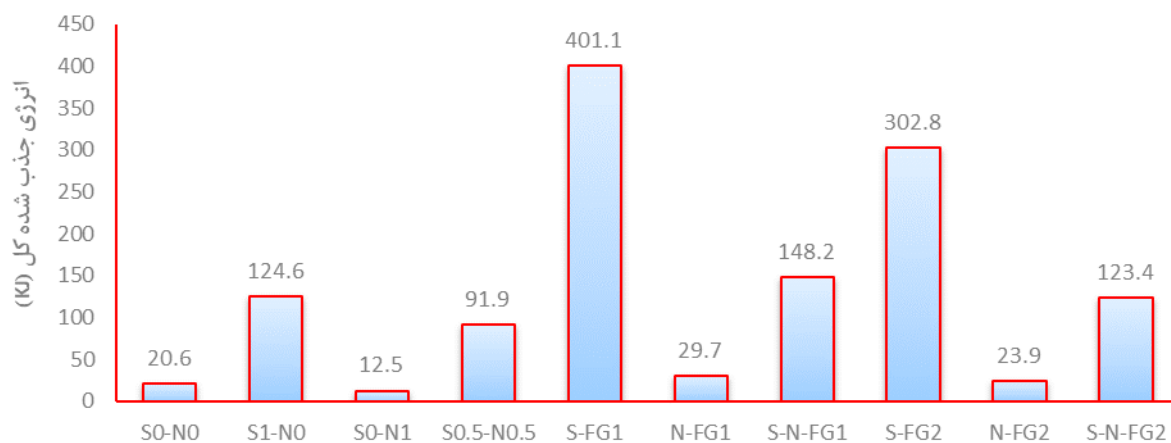
شکل ۹: مقایسه مقاومت خمشی دال‌های (الف) یک لایه (ب) دارای ۱ درصد الیاف فولادی بصورت یک لایه و سه لایه (ج) دارای ۱ درصد الیاف پلاستیکی بصورت یک لایه و سه لایه (د) دارای ۱ درصد از ترکیب الیاف فولادی و پلاستیکی بصورت یک لایه و سه لایه



شکل ۱۰: مقایسه شکل پذیری دال‌ها

۵-۲-۲- مقایسه انرژی جذب شده دال‌ها

انرژی جذب شده توسط دال‌ها تا لحظه گسیختگی، با محاسبه مساحت زیر نمودار بار-تغییر مکان بدست آمده است. این پارامتر برای ۱۰ مدل دال تحت آزمایش در نمودار شکل (۱۱) مقایسه شده است. افزودن ۱ درصد الیاف فولادی باعث افزایش انرژی جذب شده از ۲۰/۶ کیلوژول در نمونه شاهد (S0-N0) به ۱۲۴/۶ کیلوژول در نمونه S1-N0 شده است، این افزایش برای دال‌های S-FG1 و S-FG2 که دارای ۱ درصد الیاف فولادی با چیدمان سه لایه هستند به ترتیب به اعداد ۴۰۱/۱ و ۳۰۲/۸ کیلوژول رسیده است که نشان دهنده تاثیر بسیار زیاد چیدمان الیاف بر روی جذب انرژی دال‌ها می‌باشد. از طرفی افزودن ۱ درصد الیاف پلاستیکی بصورت یک لایه موجب کاهش ۸/۱ کیلوژولی انرژی جذب شده در نمونه S0-N1 نسبت به نمونه شاهد، و افزودن همین مقدار الیاف بصورت سه لایه در نمونه‌های N-FG1 و N-FG2 به ترتیب موجب افزایش ۹/۱ و ۳/۳ کیلوژولی انرژی جذب شده نسبت به نمونه شاهد شده است، که این موضوع می‌تواند دلیل دیگری بر اثر چیدمان الیاف در جذب انرژی دال‌ها باشد. در نمونه‌های هیبریدی حاوی ترکیبی از الیاف فولادی و پلاستیکی نیز شاهد افزایش چشم گیر انرژی جذب شده هستیم، بنظر می‌رسد که این تاثیر بعلت حضور الیاف فولادی می‌باشد و الیاف پلاستیکی تاثیر به مراتب کمتری در این افزایش دارد. در جدول (۸)، مدول گسیختگی، طاقت خمشی نمونه‌ها برای جابجایی معادل (L/150) و ضریب مقاومت خمشی بر اساس استاندارد ASTM C1609 محاسبه و نشان داده شده است. مشاهده می‌شود الیاف فولادی می‌تواند مدول شکست دال‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش دهد، که دلیل آن مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بالای این الیاف و پل زدن آن بر روی ترک‌های ایجاد شده در ناحیه کششی دال‌ها می‌باشد. این در صورتی است که الیاف‌های پلاستیکی نتوانسته‌اند بصورت قابل توجهی موجب افزایش مدول شکست دال‌ها شوند. در مقایسه‌ی دال‌های یک لایه و سه لایه نیز مشاهده می‌شود هر سه پارامتر مدول شکست، طاقت خمشی و ضریب مقاومت خمشی در نمونه‌های سه لایه نسبت به نمونه‌های یک لایه افزایش می‌یابد. اینگونه استنباط می‌شود که دلیل این امر، افزایش درصد الیاف در لایه‌های کناری نسبت به لایه میانی باشد، زیرا این لایه‌ها فاصله بیشتری نسبت به تارخنثی دارند و تحت تنش بیشتری نسبت به لایه میانی قرار می‌گیرند. جدول (۸) اندیس‌های طاقت طبق استاندارد ASTM C1018 نیز ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند در این استاندارد نیز الیاف‌های فولادی می‌توانند موجب افزایش اندیس‌های طاقت شوند، که این تاثیر برای الیاف‌های پلاستیکی به مراتب کمتر می‌باشد.



شکل ۱۱: مقایسه انرژی جذب شده دال‌ها

جدول ۸: محاسبه پارامترهای طاق خمشی بر اساس استانداردهای ASTM C1609 و ASTM C1018

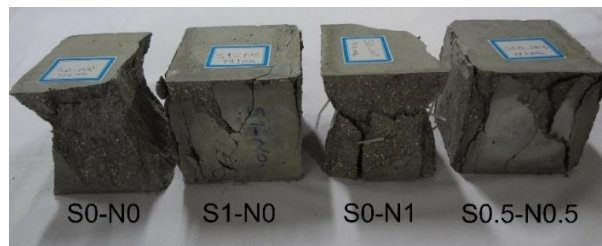
نمونه	بر اساس استاندارد ASTM C1609			بر اساس استاندارد ASTM C1018			
	مدول گسیختگی (MPa)	طاق خمشی (KJ)	ضریب مقاومت خمشی	I _o	I ₁	I ₁₅	I ₂₀
S0-N0	۲/۲۴	۶/۷	۰/۲	۳/۹۹	۶/۹۳	۱۱	۱۱
S1-N0	۲/۷۷	۳۲/۸	۰/۷۹	۴/۰۶	۷/۲۶	۱۶/۰۹	۱۹/۳۱
S0-N1	۲/۰۳	۱۰	۰/۳۳	۳/۹۸	۴/۴۵	۴/۹	۵/۲۸
S0.5-N0.5	۲/۸۸	۳۰/۵	۰/۷۱	۵/۲۷	۱۱/۳۳	۲۲/۹۴	۳۱/۸۵
S-FG1	۳/۷۳	۴۴/۹	۰/۸	۳/۹۶	۷/۸۸	۱۵/۵	۲۱/۴۴
N-FG1	۲/۴۵	۱۰/۵	۰/۲۹	۴/۸۱	۱۰/۱۳	۲۷/۹۴	۲۸/۵۴
S-N-FG1	۳/۲	۳۱/۱	۰/۶۵	۶/۲۴	۱۲/۳	۲۰/۲	۲۵/۷۶
S-FG2	۵/۱۲	۴۲/۷	۰/۵۶	۸/۷۴	۱۶/۵۹	۲۳/۱	۲۵/۹
N-FG2	۲/۵۶	۲۴/۹	۰/۶۵	۴/۶۶	۸/۹۲	۱۴/۴۱	۱۹/۶۲
S-N-FG2	۳/۵۲	۳۴/۹	۰/۶۶	۵/۳۸	۱۰/۶	۱۷	۲۰/۶۱

۵-۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر روی ۱۲ عدد نمونه مکعبی با اضلاع ۱۰ سانتی‌متر با استفاده از جک فشاری ۲۰۰ تنی انجام شده (شکل ۱۲) و مقاومت فشاری به صورت نسبت نیروی تحمل شده بر سطح تماس نمونه مطابق رابطه (۵) محاسبه گردید. مقاومت فشاری ۱۲ عدد نمونه مکعبی محاسبه و در جدول (۹) نشان داده شده است. میانگین مقاومت فشاری سه نمونه بدون الیاف ۷۴/۵ مگاپاسکال بدست آمد، که می‌تواند دلیلی بر توانمند بودن طرح اختلاط مورد استفاده باشد. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد، افزودن ۱ درصد الیاف فولادی و پلاستیکی و ۰/۵ درصد از هرکدام از این الیاف‌ها توانسته‌اند به ترتیب ۷/۷، ۲ و ۶/۴ درصد مقاومت فشاری را افزایش دهند، بنابراین الیاف‌های فولادی و پلاستیکی نتوانسته‌اند افزایش مقاومت قابل توجهی را در نمونه‌های فشاری ایجاد نمایند و این افزایش مقاومت قابل چشم پوشی است. از طرفی، افزودن الیاف فولادی باعث افزایش انسجام نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون الیاف و دارای الیاف پلاستیکی شده‌است، این موضوع در نحوه شکست فشاری نمونه‌های نشان داده شده در شکل (۱۳) قابل مشاهده است.



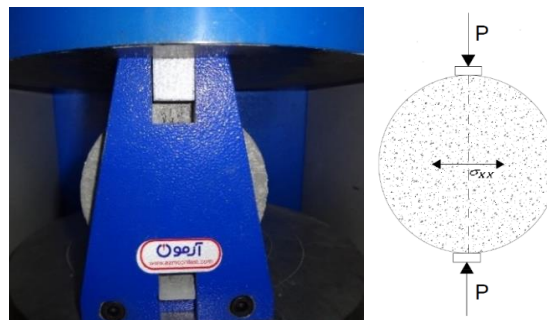
شکل ۱۲: انجام آزمایش مقاومت فشاری



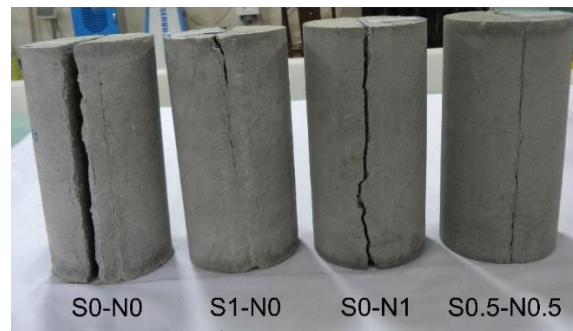
شکل ۱۳: تفاوت در نحوه شکست فشاری نمونه‌ها

۴-۵- نتایج آزمایش مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی بصورت کشش برزلی (دو نیم شدن) مطابق شکل (۱۴) بر روی ۱۲ عدد نمونه استوانه‌ای انجام، و نتایج حاصل از این آزمایش بر حسب MPa بر اساس رابطه (۶) محاسبه و در جدول (۹) نشان داده شده است. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد الیاف فولادی بیشترین تاثیر را بر روی مقاومت کششی نمونه‌ها داشته، به طوری که افزودن ۱ درصد از این الیاف موجب افزایش مقاومت ۱۴۳ درصدی در نمونه‌ها شده است. این در حالی است که افزودن ۱ درصد الیاف پلاستیکی، تنها موجب افزایش ۱۶ درصدی مقاومت کششی نمونه‌ها شده است که در مقایسه با تاثیر الیاف فولادی اندک است. الیاف فولادی و پلاستیکی از طریق دوختن ترک کششی ایجاد شده در نمونه‌ها، موجب افزایش انسجام آنها نسبت به نمونه‌های بدون الیاف شده‌اند، این موضوع در شکل (۱۵) نشان داده شده است.



شکل ۱۴: انجام آزمایش مقاومت کششی به روش برزلی

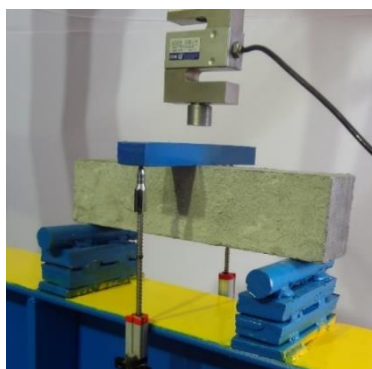


شکل ۱۵: تفاوت در نحوه شکست کششی نمونه‌ها

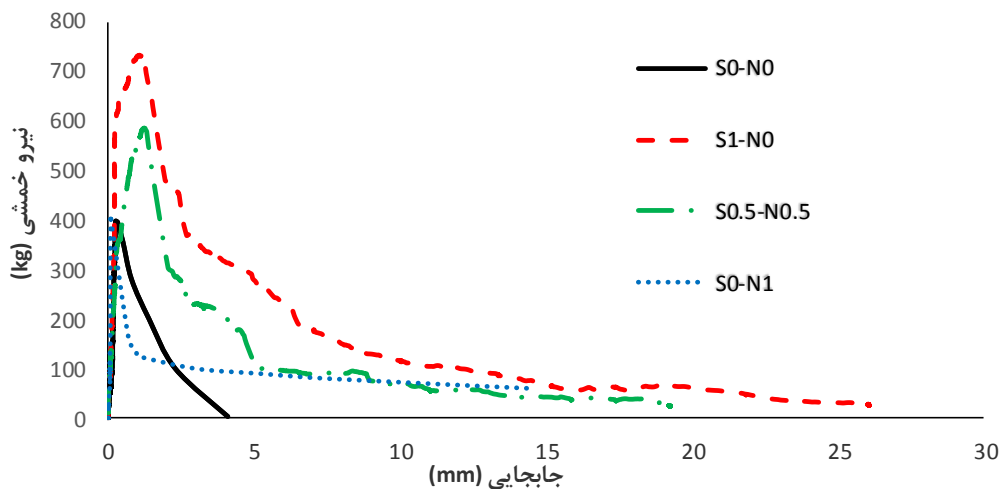
۵-۵- نتایج آزمایش مقاومت خمشی تیرها

بر روی ۱۲ عدد تیر کوچک خمشی به ابعاد $۳۲ \times ۸ \times ۶$ سانتی‌متر آزمایش خمش سه نقطه‌ای (اعمال یک بار متمرکز در وسط دهانه) انجام گرفت. نحوه انجام و نمونه‌ای از نتایج آزمایش خمشی تیرها در شکل (۱۶) نشان داده شده است. با انجام این آزمایش حداکثر بار خمشی تحمل شده توسط تیرها برداشت و با استفاده از رابطه (۱) مقاومت خمشی بر حسب MPa محاسبه شد. نتایج آزمایش خمشی تیرها در جدول (۹) نشان داده شده است، بر اساس این نتایج الیاف‌های مورد استفاده می‌توانند موجب افزایش مقاومت خمشی شوند، این افزایش برای الیاف فولادی، پلاستیکی و ترکیبی از این دو الیاف به ترتیب ۹۶، ۲۴ و ۶۵ درصد نسبت به نمونه شاهد بدست آمده است، که نشان

دهنده تاثیر بیشتر الیاف فولادی نسبت به الیاف پلاستیکی می باشد. با انجام آزمایش خمشی بر روی تیرها مشاهده شد در نمونه های بدون الیاف با ایجاد اولین ترک خمشی، بتن به سرعت در ناحیه کششی دچار شکست و فروریزش می شود، در صورتی که در نمونه های دارای الیاف فولادی و پلاستیکی بعد از ایجاد اولین ترک، نمونه از خود مقاومت نشان می دهد که دلیل آن بهبود ظرفیت کششی بتن در ناحیه ترک خورده توسط الیاف ها می باشد، و الیاف ها با ایجاد دوختگی در ترک خمشی، شکست بتن را به تاخیر انداخته و موجب افزایش شکل پذیری نمونه ها می شوند، بطوری که افزودن ۱ درصد الیاف فولادی جابجایی حداکثر در لحظه گسیختگی را از حدود ۴ میلیمتر در نمونه شاهد به حدود ۲۵ میلیمتر در نمونه S1-N0 افزایش داد. این موضوع در نمودار نیرو-جابجایی تیرها، در شکل (۱۷) دیده می شود. در نمودار شکل (۱۸) نیز درصد افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی طرح اختلاط های بکار برده شده نسبت به طرح اختلاط شاهد نشان داده شده است.



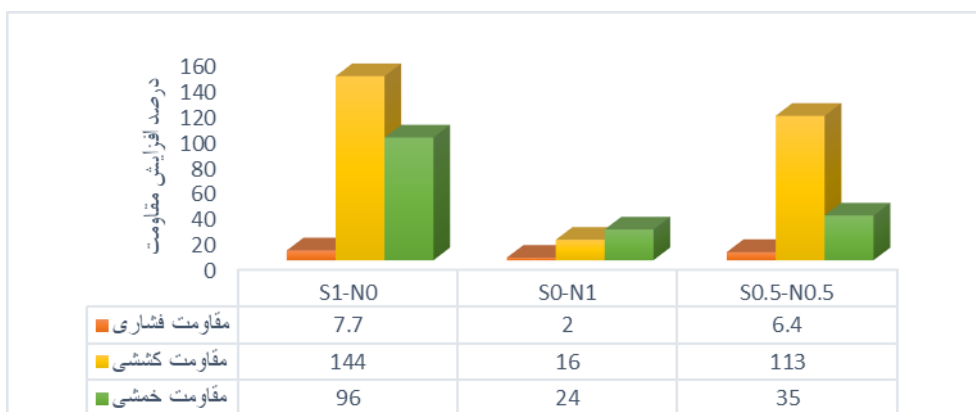
شکل ۱۶: انجام آزمایش خمشی سه نقطه ای تیرها



شکل ۱۷: نمودار بار-تغییر مکان تیرها

جدول ۹: نتایج آزمایشات فشاری، کششی و خمشی

نمونه	مقاومت فشاری (MPa)				مقاومت کششی (MPa)				مقاومت خمشی (MPa)			
	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین
S0-N0	۷۷/۳	۶۸/۷	۷۷/۶	۷۴/۵	۲/۴۵	۳/۶۹	۳/۷۹	۳/۳۱	۴/۴۲	۴/۹۸	۴/۷۱	۴/۷
S1-N0	۸۱/۳	۸۲/۶	۷۴/۱	۷۹/۳	۸/۵۳	۶/۳۷	۹/۳	۸/۰۷	۸/۶۹	۹/۸۵	۹/۱۶	۹/۲۳
S0-N1	۷۳	۷۹/۳	۷۵/۷	۷۶	۳/۹۵	۳/۶۳	۳/۹۲	۳/۸۳	۵/۵	۵/۳۱	۵	۵/۲۷
S0.5-N0.5	۸۱/۱	۸۲/۱	۷۷/۳	۸۰/۲	۷/۶۸	۶/۶۲	۶/۸۲	۷/۰۴	۶/۸۴	۹/۰۶	۷/۳۲	۷/۷۴



شکل ۱۸: درصد افزایش مقاومت نمونه‌های فشاری، کششی و خمشی در مقایسه با نمونه شاهد

۶- نتیجه گیری

براساس آزمایشات انجام گرفته، و با در نظر گرفتن این موضوع، که این نتایج منحصرًا مربوط به مواد و روش‌های بکار گرفته شده در این پژوهش می‌باشد و برای اظهار نظر قطعی نیاز به آزمایشات بیشتری در این زمینه وجود دارد، موارد زیر بعنوان نتایج این تحقیق ذکر می‌شود:

۱- در آزمایشات بتن خود تراکم تازه مشاهده شد که الیاف فولادی در کاهش کارایی بتن موثر می‌باشد و این تاثیر برای الیاف پلاستیکی به مراتب کمتر است.

۲- دال‌های بدون الیاف در آزمایش خمش بعد از ایجاد اولین ترک، رفتار تردی را از خود نشان داده و خیلی سریع گسیخته می‌شوند، در صورتی که الیاف‌های فولادی با پل زدن بر روی ترک‌های ایجاد شده در ناحیه کششی و جلوگیری از گسترش آنها، باعث بهبود رفتار خمشی دال‌ها می‌شوند، و مقاومت خمشی و شکل پذیری آنها را با به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند. تاثیر الیاف پلاستیکی در این امر بسیار کمتر از الیاف فولادی می‌باشد.

۳- با مقایسه انرژی جذب شده و پارامترهای طاق خمشی دال‌ها مشاهده شد، الیاف‌های فولادی می‌توانند در افزایش چقرمگی دال‌ها بسیار موثر باشند، در صورتی که الیاف‌های پلاستیکی در این مورد نیز نسبت به الیاف‌های فولادی تاثیر به مراتب کمتری دارند، که دلیل آن می‌تواند مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بالای الیاف فولادی نسبت به الیاف پلاستیکی باشد.

۴- نحوه چیدمان الیاف‌ها و چند لایه بودن دال‌ها در بهبود رفتار خمشی موثر می‌باشد، بطوری که در دال‌های چند لایه با درصد الیاف یکسان، نسبت به دال‌های یک لایه شاهد افزایش پارامترهای مقاومت خمشی و انرژی جذب شده هستیم، که علت آن می‌تواند افزایش درصد الیاف در لایه‌های بیرونی باشد، زیرا این لایه‌ها تحت تنش بیشتری نسبت به لایه میانی قرار می‌گیرند.

۵- افزودن الیاف‌های فولادی و پلاستیکی نمی‌تواند تاثیر زیادی بر روی مقاومت فشاری بتن داشته باشد، بطوری که این تاثیر برای هر دو نوع الیاف و همچنین ترکیبی از آن‌ها کمتر از ۱۰ درصد بدست آمد.

۶- نتایج آزمایشات کششی نشان می‌دهد، افزودن ۱ درصد الیاف فولادی می‌تواند تا حدود ۲/۵ برابر مقاومت کششی نمونه‌ها را افزایش دهد، در صورتی که افزودن ۱ درصد الیاف پلاستیکی باعث افزایش ۱۶ درصدی مقاومت کششی می‌شود، که نسبت به تاثیر الیاف فولادی اندک است.

۷- نتایج آزمایش خمشی تیرها نیز نشان از تاثیر بالای الیاف فولادی بر روی مقاومت خمشی دارد، بطوری که افزودن ۱ درصد از این الیاف باعث افزایش تقریباً ۲ برابری مقاومت خمشی شد، این افزایش برای ۱ درصد الیاف پلاستیکی ۱۶ درصد بدست آمد. همچنین الیاف‌های فولادی و پلاستیکی با ایجاد دوختگی در ترک خمشی، موجب افزایش قابل توجه شکل پذیری تیرها شدند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از آقای هیروشی ناگوچی (Hiroshi Noguchi) عضو محترم انجمن علم و تکنولوژی شیوکای ژاپن (Shizuoka Institute of Science and Technology) بخاطر راهنمایی هایشان در به نتیجه رسیدن این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را دارند.

- [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] Song, P.S, Hwang, S, Sheu, B.C. (2005). Strength properties of nylon-and_ polypropylene-fiber reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 35, 1546-1550.
- [9] M. Mastali, A. Dalvand, A. Sattarifard. (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
- [10] Zellers, B, Cruso, R. (2002). Nycon nylon fibers add to hydration efficiency of cement. *Nykon Inc*, 14, 125-139
- [11] Khayat, K.H., Roussel, Y. (1999). Testing and performance of fiber reinforced, self-consolidating Concrete. *Skarendahl A, Petersson O, editors. Proceedings of the first international RILEM symposium on self-compacting concrete. Stockholm, Sweden.*
- [12] Soroushian, P. (1986). Secondary Reinforcement Adding Cellulose Fiber. *ACI , Concrete International*.
- [13] Swami, N, Magat, P. S, Rao, C.V.S.K. (1974). Fiber Reinforced Concrete. *ACI SP-44*.
- [14] Kernchel. (1974). Fiber Reinforced Concrete. *ACI SP44*.
- [15] mahmoud Nili, and V.Afroughsabet. (2010). Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *International Journal of Impact Engineering*, 37, 541-553.
- [16] M. Mastali, A.Dalvand. (2016). Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete. *construction and building materials*, 125, 196-209
- [17] G. Xu, S. Magnani, D.J. Hannant. (1998). Durability of hybrid polypropylene-glass fiber cement corrugated sheets. *Cement and Concrete Composites*, 20, 79-84.