

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه

ارزیابی آزمایشگاهی مقاومت کششی بتن مسلح به الیاف مارپیچ

نگارنده:

امیر حسین پیوندی

استاد راهنما:

دکتر میثم جلالی

استاد مشاور:

دکتر محمد حاج صادقی

مهر ۱۴۰۰

تقدیم اثر

تقدیم به:

آن صنوبرهای سرخی که چون لاله زاده شدند

و چون شقایق ایستاده مردند

تهدنامه

اینجانب **امیرحسین پیوندی** دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی **مهندسی عمران** گرایش **سازه** دانشکده‌ی مهندسی **عمران** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی ارزیابی آزمایشگاهی مقاومت کششی بتن مسلح به الیاف مارپیچ تحت راهنمایی استاد راهنما **دکتر میثم جلالی** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج بانام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

اضافه کردن الیاف به بتن سبب بهتر شدن عملکرد شکل پذیری و مقاومت در برابر ترک خوردگی و همچنین باعث افزایش عملکرد جذب انرژی و طاقت بتن می شود. تا کنون محدوده گسترده ای از انواع الیاف برای تسلیح مصالح پایه سیمانی استفاده شده است. یکی از انواع الیافی که به تازگی مورد توجه قرار گرفته است، الیاف فلزی مارپیچ بهینه شده می باشد. هدف اصلی این تحقیق بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی مارپیچ و خواص مکانیکی کامپوزیت های تقویت شده با الیاف مارپیچ است. به این منظور، در گام اول، مجموعه ای از آزمایش های بیرون کشیدگی^۱ الیاف فلزی مارپیچ^۲ با زوایای تمایل^۳ مختلف و طول های گیرداری^۴ متفاوت، از ماتریس پایه سیمانی و تاثیر آن بر خصوصیات مکانیکی بتن الیافی انجام شد. در گام بعدی، نمونه های بتن مسلح به الیاف مارپیچ تحت آزمایش کشش مستقیم قرار گرفتند. به منظور انجام تست کشش مستقیم، فیکسچر ابداعی تست کشش مستقیم^۵ با مفصل دو جهته طراحی و ساخته شد. هدف اصلی این تحقیق بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی مارپیچ و خواص مکانیکی کامپوزیت های تقویت شده با الیاف مارپیچ است. تحقیق به سه بخش اصلی تقسیم شده است. در اولین قسمت، خواص مکانیکی ماتریس پایه سیمانی شامل مقاومت فشاری تعیین شده است. در بخش دوم، رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی مارپیچ با استفاده از آزمایش های تجربی بر روی الیاف منفرد جاسازی شده در ماتریس سیمانی ارزیابی شده است. اثر طول و زاویه شیب فیبر و مقاومت فشاری ماتریس همراه با برهم کنش این پارامترها ارزیابی شده است. برنامه آزمایشی شامل آزمایش کشش تک فیبر با پنج زاویه شیب ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و سه طول جایگذاری شده ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی متر با دو مقاومت فشاری ماتریس ۲۰ و ۳۰ مگاپاسکال است. طول و قطر الیاف فولادی مارپیچ به ترتیب ۴۰ میلی متر و ۰/۴ میلی متر و مقاومت کششی آن ها ۱۵۰۰ مگاپاسکال است. نتایج آزمایش بیرون کشیدگی نشان داد که الیاف فولادی مارپیچ رفتار سخت شدگی لغزش را در نتیجه تشکیل مفصل پلاستیکی در قسمت مارپیچی الیاف نشان می دهد. این مکانیسم مقاومت بیرون کشیدگی و جذب انرژی الیاف را افزایش داده است. در قسمت پایانی، به منظور ارزیابی رفتار کششی مواد کامپوزیت سیمانی تقویت شده با الیاف مارپیچ فولادی، رفتار کششی بتن الیافی با انجام آزمایش کشش مستقیم بر روی نمونه های دمبلی شکل بررسی شده است. در این بخش، رفتار بتن مسلح به الیاف با بررسی پارامترهای مربوطه مانند ظرفیت باربری، جذب انرژی و رفتار پس از ترک خوردگی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور مقایسه رفتار کششی کامپوزیت ها، آزمایش های کشش مستقیم روی کامپوزیت های سیمانی مسلح به ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد الیاف فولادی مارپیچ با مقاومت فشاری ماتریس ۲۵ مگاپاسکال انجام شده است. نتیجه نشان داد که کامپوزیت های سیمانی با ۰/۱۵ و ۰/۲۵ الیاف فولادی مارپیچ رفتار نرم شدگی نشان می دهند. درصد الیاف موجود در ماتریس نقش مهمی در افزایش قدرت و جذب انرژی پس از ترک خوردگی دارد.

کلمات کلیدی: بتن الیافی، الیاف مارپیچ، بیرون کشیدگی الیاف، زاویه شیب الیاف، طول جایگذاری الیاف، کشش مستقیم، سخت شدگی کرنش، نرم شدگی کرنش، فیکسچر مفصلی

¹ Pullout

² Spirally steel fiber

³ Inclination angles

⁴ Embedded length

⁵ Direct tension

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- اهمیت پژوهش	۲
۱-۳- هدف‌ها و فعالیت‌های تحقیق	۳
۱-۳-۱- ارزیابی خصوصیات ماتریس پایه سیمانی	۳
۱-۳-۲- بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ فولادی	۳
۱-۳-۳- ارزیابی رفتار کششی بتن مسلح به الیاف مارپیچ فولادی	۳
۱-۴- ضرورت انجام و اهداف پژوهش	۴
۱-۵- ساختار پایان‌نامه	۵
فصل ۲: بتن الیافی	۷
۲-۱- مقدمه	۸
۲-۲- تاریخچه بتن الیافی	۸
۲-۳- بتن الیافی	۹
۲-۴- الیاف	۱۱
۲-۴-۱- مضرات استفاده از الیاف	۱۱
۲-۴-۲- الیاف فلزی	۱۲
۲-۴-۳- الیاف شیشه	۱۳
۲-۴-۴- الیاف مصنوعی	۱۳
۲-۴-۵- الیاف طبیعی	۱۴
۲-۵- مکانیسم‌های تقویت	۱۵
۲-۶- مزایای بتن الیافی	۱۶
۲-۷- بتن مسلح به الیاف فولادی	۱۷
۲-۷-۱- خصوصیات مخلوط تازه بتن مسلح به الیاف فولادی	۱۷
۲-۷-۲- خصوصیات مکانیکی بتن مسلح به الیاف فولادی	۱۸
۲-۷-۳- کاربردهای بتن مسلح به الیاف فولادی	۱۹
۲-۸- ساختار ناحیه تماس الیاف و ماتریس	۱۹
۲-۸-۱- الیاف درشت	۲۰
۲-۸-۲- ریز الیاف	۲۰
۲-۹- تاثیر پارامترهای مختلف در مکانیک بیرون کشیدگی الیاف	۲۰
۲-۹-۲- جهت‌گیری الیاف	۲۱
۲-۹-۳- شکل الیاف	۲۲
۲-۱۰- آیین‌نامه‌ها و استانداردهای بتن الیافی	۲۷
۲-۱۰-۱- مجموعه استانداردهای ASTM	۲۷
۲-۱۰-۲- استانداردها و گزارش‌های ACI	۲۹
۲-۱۰-۳- آیین‌نامه‌های RILEM-USACE-JSCE-FIB	۲۹
۲-۱۱- مروری بر ادبیات فنی	۳۰

فصل ۳: ارزیابی مشخصات ماتریس پایه سیمانی..... ۳۵

- ۳-۱ مصالح..... ۳۶
- ۳-۱-۱ سیمان..... ۳۶
- ۳-۱-۲ سنگدانه..... ۳۷
- ۳-۲ ارزیابی طرح اختلاط..... ۳۷
- ۳-۳ طرح اختلاط و روند اختلاط..... ۳۸
- ۳-۴ ارزیابی خصوصیات مکانیکی ماتریس سیمانی..... ۳۹
- ۳-۴-۱ نحوه ساخت و آماده سازی نمونه‌ها..... ۳۹
- ۳-۴-۲ عمل‌آوری نمونه‌ها..... ۴۰
- ۳-۴-۳ مقاومت فشاری ماتریس..... ۴۰
- ۳-۴-۴ نتایج مقاومت فشاری..... ۴۱
- ۳-۵ نتیجه گیری..... ۴۱

فصل ۴: بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی از ماتریس بتنی..... ۴۳

- ۴-۱ مقدمه..... ۴۴
- ۴-۲ بررسی آزمایش بیرون کشیدگی الیاف..... ۴۶
- ۴-۲-۱ انواع آزمایش بیرون کشیدگی الیاف..... ۴۶
- ۴-۳ رفتار بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ فولادی..... ۴۹
- ۴-۴ برنامه آزمایشگاهی..... ۵۱
- ۴-۴-۱ مصالح..... ۵۱
- ۴-۴-۲ ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها..... ۵۲
- ۴-۴-۳ نحوه انجام آزمایش..... ۵۴
- ۴-۵ نتایج مجموعه‌ی آزمایش‌ها..... ۵۶
- ۴-۶ تجزیه و تحلیل نتایج..... ۶۱
- ۴-۶-۱ تأثیر مقاومت ماتریس..... ۶۱
- ۴-۶-۲ تأثیر زاویه تمایل الیاف..... ۶۲
- ۴-۶-۳ تأثیر طول جایگذاری الیاف..... ۶۳
- ۴-۷ نتیجه گیری..... ۶۵

فصل ۵: بررسی رفتار کششی مصالح مرکب سیمانی مسلح به الیاف فولادی..... ۶۷

- ۵-۱ مقدمه..... ۶۸
- ۵-۲-۱ رفتار کششی بتن الیافی..... ۶۹
- ۵-۳ برنامه آزمایشگاهی..... ۷۰
- ۵-۴-۱ آزمایش کشش مستقیم..... ۷۱
- ۵-۴-۲ پارامترهای توصیف رفتار کششی..... ۷۵
- ۵-۴-۳ چیدمان و نحوه انجام آزمایش کشش مستقیم..... ۷۵
- ۵-۴-۴ ستاپ فیکسچر..... ۷۸
- ۵-۴-۵ ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها..... ۷۸
- ۵-۴-۶ کنترل چیدمان آزمایش کشش مستقیم..... ۷۹
- ۵-۴-۷ نتایج آزمون کشش مستقیم..... ۸۰
- ۵-۴-۸ تأثیر درصد الیاف بر پارامترهای رفتار کششی..... ۸۴
- ۵-۴-۹ ترک‌خوردگی نمونه‌ها..... ۸۹

۱۰-۴-۵- نتیجه گیری بررسی رفتارکشی بتن مسلح به الیاف فولادی مارپیچ ۹۱

فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۳

۶-۱- نتیجه گیری ۹۴

۶-۱-۱- نتایج حاصل از ارزیابی خصوصیات ماتریس پایه سیمانی ۹۴

۶-۱-۲- نتایج حاصل از بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ ۹۴

۶-۱-۳- نتایج حاصل از ارزیابی رفتار کشش مستقیم ۹۵

۶-۱-۴- پیشنهادات ۹۶

فهرست تصاویر

شکل (۱-۲)	لانه خشتی تقویت شده با نی	۹
شکل (۲-۲)	بتن الیافی	۱۱
شکل (۲-۳)	مکانیزم ساخت الیاف استخراجی از ذوب فولاد	۱۲
شکل (۴-۲)	کشش بتن معمولی و بتن الیافی	۱۵
شکل (۵-۲)	نیروی محوری در برابر طول کشیدگی بتن معمولی و الیافی	۱۶
شکل (۲-۶)	آزمون بیرون کشیدگی الیاف منفرد از ماتریس پایه سیمانی	۲۱
شکل (۲-۷)	اثر زاویه ورود الیاف در مقاومت بیرون کشیدگی الیاف	۲۲
شکل (۸-۲)	رفتار بیرون کشیدگی الیاف صاف	۲۳
شکل (۹-۲)	مقایسه بیرون کشیدگی الیاف صاف با الیاف قلابدار	۲۴
شکل (۱۰-۲)	مراحل بیرون کشیدگی الیاف فولادی قلابدار	۲۵
شکل (۱۱-۲)	الیاف مارپیچ	۲۶
شکل (۱۲-۲)	بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ	۲۶
شکل (۱-۳)	مخلوط کن های بکار رفته در ساخت نمونه ها	۳۸
شکل (۲-۳)	روند طرح اختلاط	۳۹
شکل (۳-۳)	قالب های مورد استفاده برای اندازه گیری مقاومت فشاری بعد از بتن ریزی	۴۰
شکل (۱-۴)	جهت های مختلف الیاف نسبت به امتداد ترک	۴۵
شکل (۲-۴)	مکانیزم عملکرد الیاف در بتن	۴۵
شکل (۳-۴)	نمونه های تنظیمات تست خروج	۴۷
شکل (۴-۴)	نمونه های استخوان سگ و استوانه ای	۴۸
شکل (۵-۴)	انواع نمونه های تست خروج دو طرفه	۴۸
شکل (۶-۴)	نمونه تست خروج ریز الیاف	۴۹
شکل (۷-۴)	مراحل بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ فولادی	۵۰
شکل (۸-۴)	الیاف مارپیچ فولادی مورد استفاده	۵۱
شکل (۹-۴)	قرارگیری الیاف مارپیچ در قالب تست pull out	۶۶
شکل (۱۰-۴)	عمل آوری نمونه های پول اوت	۵۳
شکل (۱۱-۴)	نمونه های آزمون بیرون کشیدگی الیاف	۵۴
شکل (۱۲-۴)	هندسه نمونه ها و چیدمان آزمایش بیرون کشیدگی الیاف مستقیم و مایل	۵۵
شکل (۱۳-۴)	دستگاه آزمون بیرون کشیدگی الیاف	۵۶
شکل (۴-۱۳)	نمودارهای نیرو-لغزش نمونه های با مقاومت ۲۰ مگاپاسگال	۵۷
شکل (۱۵-۴)	نمودارهای نیرو-لغزش نمونه های با مقاومت ۳۰ مگاپاسگال	۵۸
شکل (۱۶-۴)	میانگین منحنی های بیرون کشیدگی برای ماتریس با مقاومت مختلف	۶۲
شکل (۴-۱۷)	منحنی های بیرون کشیدگی متوسط برای زوایای تمایل مختلف الیاف	۶۳
شکل (۴-۱۸)	منحنی بیرون کشیدگی متوسط طول جایگذاری متفاوت، زاویه یکسان	۶۴
شکل (۱۹-۴)	نمونه های بتنی بیرون کشیدگی الیاف بعد از انجام تست	۶۵
شکل (۱-۵)	منحنی تنش- کرنش بتن مسلح به الیاف	۶۹
شکل (۲-۵)	الیاف مارپیچ فولادی مورد استفاده	۷۰
شکل (۳-۵)	نمونه هایی از آزمایش های کششی کامپوزیت های FRC	۷۱
شکل (۴-۵)	محاسبه کرنش یا شکاف تقریبی دهانه	۷۲
شکل (۵-۵)	ترتیب وسایل اندازه گیری برای اطمینان از آزمایش های کشش مستقیم	۷۳

- شکل (۵-۶) پیکربندی تست کشش مستقیم با استفاده از نمونه های دمبل..... ۷۴
- شکل (۷-۵) هندسه و ابعاد نمونه های دمبلی شکل ۷۶
- شکل (۸-۵) قالب بکار رفته در ساخت نمونه های بتنی..... ۷۶
- شکل (۵-۹) چیدمان آزمایش کشش مستقیم..... ۷۷
- شکل (۵-۱۰) نمونه های بتن مسلح به الیاف مورد استفاده جهت ارزیابی رفتار کششی..... ۷۹
- شکل (۵-۱۱) نمودار نیرو-جابجایی بتن الیافی مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف..... ۸۱
- شکل (۵-۱۲) نحوه ترک خوردگی ماتریس پایه سیمانی مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف..... ۸۲
- شکل (۵-۱۳) نمودار تنش-کرنش بتن الیافی مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف..... ۸۳
- شکل (۵-۱۴) نحوه ترک خوردگی ماتریس پایه سیمانی مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف..... ۸۴
- شکل (۵-۱۵) تاثیر درصد حجمی الیاف بر رفتار کششی ماتریس ۸۵
- شکل (۵-۱۶) تاثیر درصد حجمی الیاف بر مقاومت نظیر اولین ترک خوردگی..... ۸۶
- شکل (۵-۱۷) تاثیر درصد حجمی الیاف بر جذب انرژی نظیر اولین ترک خوردگی..... ۸۷
- شکل (۵-۱۸) تاثیر الیاف بر مقاومت پس از ترک خوردگی ۸۸
- شکل (۵-۱۹) تاثیر الیاف بر انرژی نظیر مقاومت پس از ترک خوردگی..... ۸۹
- شکل (۵-۲۰) الگوی ترک خوردگی مصالح پایه سیمانی مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف..... ۹۰
- شکل (۵-۲۱) الگوی ترک خوردگی مصالح پایه سیمانی مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف..... ۹۰

فهرست جداول

جدول (۱-۳) ترکیبات شیمیایی سیمان.....	۳۶
جدول (۲-۳) جزئیات دانه بندی سنگدانه.....	۳۷
جدول (۳-۳) طرح اختلاط ماتریس پایه سیمانی (برای یک متر مکعب).....	۳۸
جدول (۴-۳) نتایج آزمایش مقاومت فشاری.....	۴۱
جدول (۱-۴) طرح اختلاط ماتریس پایه سیمانی (برای یک متر مکعب)(SSD).....	۵۱
جدول (۲-۴) مشخصات مکانیکی الیاف مارپیچ.....	۵۲
جدول (۳-۴) نتایج مربوط به ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی، لغزش نقطه ماکزیمم نیرو و انرژی بیرون کشیدگی ماتریس ۲۰ مگاپاسگال.....	۵۹
جدول (۴-۴) نتایج مربوط به ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی، لغزش نقطه ماکزیمم نیرو و انرژی بیرون کشیدگی ماتریس ۳۰ مگاپاسگال.....	۶۰
جدول (۱-۵) طرح اختلاط ماتریس پایه سیمانی.....	۷۰
جدول (۲-۵) مشخصات مکانیکی الیاف مارپیچ.....	۷۰
جدول (۳-۵) مشخصات نمونه ها.....	۸۰
جدول (۵-۴) نتایج آزمون کشش مستقیم بتن مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف.....	۸۱
جدول (۵-۵) نتایج آزمون کشش مستقیم بتن مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف.....	۸۳

فصل ۱: مقدمه

۱-۱- مقدمه

با توجه به این که بتن جز مصالح شکننده است، پس از ترک خوردگی مقاومت و شکل پذیری خود را از دست می دهد. وقتی مصالح شکننده از جمله بتن تحت نیروهای کششی قرار می گیرند ابتدا رفتار الاستیک از خود نشان می دهند، سپس ترک های ریز شکل می گیرند. با افزایش نیرو، این ترک های ریز به هم متصل شده و یک ترک واحد و بزرگ تشکیل گردیده و شکست ناگهانی بتن رخ می دهد. مقاومت کششی ناچیز و شکنندگی بتن دلیل در نظر نگرفتن مقاومت کششی آن در اغلب آیین نامه ها است. میلگرد یکی از روش های رایج برای کاهش و کنترل عرض ترک های ناشی از کشش مستقیم یا برش است. به منظور ایجاد شرایط ایزوتروپ (خاصیتی را ایزوتروپ می نامیم که اندازه گیری آن در هر جهت فضایی به نتیجه ای یکسان منجر شود. یعنی اگر آن خاصیت را رو به سمت خاصی از فضا اندازه گیری کنیم، همان نتیجه ای را بگیریم که همان خاصیت را رو به سمت دیگری اندازه گرفته باشیم) و کاهش ضعف شکنندگی و تردی بتن و ایجاد عمل کردی در بتن که بتواند در همه جهتها به صورت تقریباً یکسان باعث افزایش مقاومت کششی و شکل پذیری بتن شود از الیاف استفاده می شود. الیاف دارای انواع و اشکال مختلفی هستند و کاربردهای متعدد و متنوعی دارند. اضافه کردن الیاف به بتن سبب بهتر شدن عملکرد شکل پذیری و مقاومت در برابر ترک خوردگی و همچنین باعث افزایش قابلیت جذب انرژی و طاقت بتن می شود. هنگامی که ترک ها در بتن انتشار می یابند، الیاف با استفاده از مکانیزم پل زنی ترک ها^۱ از گسترش ترک ها و به هم پیوستگی آن ها جلوگیری می کند. با این وجود، به دلیل توزیع تصادفی الیاف در ماتریس، الیاف همیشه بر امتداد ترک های بوجود آمده عمود نیستند و در جهتهای مختلفی قرار می گیرند. هنگام باز شدن یک ترک در ماتریس، الیاف در زوایا و طول های مدفون مختلف تحت بار قرار می گیرند و باعث می شود در هنگام بیرون کشیده شدن^۲ این الیاف مایل از ماتریس، مکانیزم های متفاوتی رخ دهد. با توجه به این که رفتار بیرون کشیدگی الیاف تکی از ماتریس بر رفتار کلی بتن الیافی تاثیر اساسی دارد، شناخت و ارزیابی دقیق این پدیده و جزئیات آن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. به همین جهت در تحقیق حاضر به بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف منفرد ماریچ از ماتریس سیمانی و کشش مستقیم بتن مسلح به الیاف ماریچ فولادی پرداخته می شود تا خواص مکانیکی کامپوزیت های تقویت شده با الیاف ماریچ فولادی بدست آمده و مورد ارزیابی قرار گیرد.

۱-۲- اهمیت پژوهش

استفاده از الیاف مختلف در بتن برای بهبود خصوصیات آن، از جمله شکل پذیری، راه حل مناسبی است، اما هر کدام از الیاف مورد استفاده عملکرد و کارایی متفاوتی دارند، لیکن بررسی و ارزیابی رفتار بتن مسلح به الیاف ماریچ، تحت بارگذاری های کششی حائز اهمیت است. همچنین ارزیابی عملکرد بیرون کشیدگی الیاف ماریچ منفرد از بتن در هنگام گسترش ترک های ناشی از بار وارد شده و عملیات پل زنی ترک ها توسط الیاف ضروری می باشد. الیاف مورد استفاده در این پژوهش به دلیل هندسه ماریچی الیاف با ایجاد مهار مکانیکی مناسب در هنگام بیرون کشیدگی نمودارهای نیرو-لغزش اغلب رفتار مناسبی به خصوص پس از ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی از خود نشان می دهند. این تحقیق از محدود پژوهش هایی است که در خصوص بررسی جامع بیرون کشیدگی الیاف ماریچ انجام شده است. همچنین فیکسچر مورد استفاده جهت انجام آزمایش کشش مستقیم در این تحقیق با توجه به نوآوری در نحوه گیرداری به بتن و همچنین مفصل بودن در دو جهت برای اولین بار مورد ارزیابی قرار گرفته و کارآمد واقع شده است.

¹ Crack bridging mechanism

² Pullout

۳-۱- هدف‌ها و فعالیت‌های تحقیق

اهداف این پژوهش، بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ از ماتریس پایه سیمانی و ارزیابی آن در رفتار کلی مواد مرکب پایه سیمانی مسلح به الیاف مارپیچ با انجام آزمایش بیرون کشیدگی الیاف تکی از ماتریس پایه سیمانی و همچنین انجام آزمایش کشش مستقیم می‌باشد.

۱-۳-۱- ارزیابی خصوصیات ماتریس پایه سیمانی

در این بخش جهت ارزیابی و بررسی ویژگی‌های بتن قابل استفاده در ساخت نمونه‌های بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ و همچنین نمونه‌های دمبلی شکل کشش مستقیم، با انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای ساخته شده در آزمایشگاه به تعیین مقاومت فشاری بتن‌های مورد نظر پرداخته شده است. نتایج بدست آمده از این آزمایش‌ها در بخش‌های بعدی استفاده می‌شود.

۲-۳-۱- بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ فولادی

عملکرد بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ فولادی از ماتریس سیمانی با ارزیابی و بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش بیرون کشیدگی این الیاف از بتن‌های مورد نظر حاصل می‌گردد. برای انجام این آزمایش از قالب‌هایی با قابلیت جایگذاری الیاف با طول و زوایای مشخص استفاده می‌شود. سپس عملکرد قالب‌ها در ثابت نگه داشتن الیاف در موقعیت و زاویه مورد نظر بررسی می‌شود. پس از اطمینان از دقت نمونه‌ها و چیدمان آزمایش، نمونه‌های اصلی آزمایش بیرون کشیدگی با طول دفن شده و زاویه تمایل مورد نظر ساخته شده و با انجام آزمایش بیرون کشیدگی بر روی نمونه‌ها نمودار نیرو- جابه‌جایی آن‌ها بدست می‌آید و مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۳-۱- ارزیابی رفتار کششی بتن مسلح به الیاف مارپیچ فولادی

جهت ارزیابی و شناخت عملکرد کششی بتن مسلح به الیاف فولادی مارپیچ، آزمایش کشش مستقیم با استفاده از دستگاه تست کشش یونیورسال بر روی نمونه‌های دمبلی شکل^۱ انجام می‌شود. با بررسی و ارزیابی نتایج حاصله از این آزمایش‌ها می‌توان به درک بهتری از رفتار این مصالح بتنی دست یافت. در هر کدام از این آزمایش‌ها عملکرد بتن الیافی با بررسی پارامترهایی مانند ظرفیت باربری، میزان جذب انرژی و رفتار پس از ترک خوردگی ارزیابی می‌گردد. در این فصل از تحقیق، چیدمان و قرارگیری ملحقات آزمایش کشش مستقیم، ساختار و هندسه نمونه‌های کششی، سرعت بارگذاری و نحوه استخراج اطلاعات توضیح داده شده و با انجام آزمایش بر روی نمونه‌ها رفتار کششی آن‌ها ارزیابی گردیده است.

^۱ Dog-bone

۴-۱- ضرورت انجام و اهداف پژوهش

با توجه به هندسه‌ی الیاف مارپیچ و بهبود شکل‌پذیری و جذب انرژی الیاف مارپیچ نسبت به سایر الیاف‌های موجود در صنعت عمران این ضرورت ایجاد می‌شود تا به بررسی دقیق‌تر رفتار بیرون‌کشیدگی این الیاف‌ها بپردازیم. الیاف مارپیچ از دسته الیاف‌های جدیدی هستند که به تازگی، بیشتر مورد بررسی محققان واقع شده است.

جهت‌گیری الیاف مارپیچ (زاویه تمایل الیاف نسبت به ترک) در ماتریس بتنی با طول‌های تعبیه مختلف پارامترهای مهم بیرون‌کشیدگی الیاف هستند که در این تحقیق بررسی خواهند شد و با نتایج حاصل می‌توانیم به درک بهتر از بیرون‌کشیدگی الیاف مارپیچ در زمان کشش مستقیم بتن‌های مسلح به الیاف مارپیچ دست یابیم. دستیابی به اطلاعات حالت‌های جهت‌گیری مختلف الیاف مارپیچ نسبت به جهت اعمال نیرو از نظر شکل‌پذیری و مقاومت بیرون‌کشیدگی بیشتر، کارآمد خواهد بود.

لازم به ذکر است که الیاف مارپیچ مورد بررسی در این پژوهش حاصل بررسی‌های عددی انجام شده در تحقیقات پیشین است که دلیل بر صحت عملکرد این الیاف است.

در ادامه با استفاده از نتایج آزمایش بیرون‌کشیدگی الیاف مارپیچ و نتایج حاصل از کشش مستقیم نمونه‌های بتن مسلح به الیاف مارپیچ به بررسی کیفیت بتن مسلح به الیاف مارپیچ پرداخته می‌شود.

۵-۱- ساختار پایان نامه

با توجه به اهداف و وظایف شرح داده شده، این پایان نامه در ۶ فصل تدوین گردیده است. در ادامه مباحث ارائه شده در فصل‌ها توضیح داده می‌شود.

۱. در فصل اول به بیان مقدمه و کلیات این پایان نامه پرداخته می‌شود.

۲. در فصل دوم ضمن معرفی مواد مرکب پایه سیمانی مسلح به الیاف فولادی به بررسی پارامترهای موثر در مشخصات مکانیکی آن‌ها پرداخته می‌شود. در بخش نهایی این فصل نیز با مروری بر متون فنی در خصوص بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس سیمانی، این فصل به پایان می‌رسد.

۳. در فصل سوم این پایان نامه به بیان برنامه آزمایشگاهی به منظور تعیین خصوصیات ماتریس پرداخته می‌شود که در آن مقاومت فشاری ماتریس‌های سیمانی بدست آمده و رفتار آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴. در فصل چهارم با انجام آزمایشات بیرون کشیدگی بر روی الیاف مارپیچ فولادی در زوایای تمایل و طول‌های مدفون مختلف، از ماتریس سیمانی، رفتار آن‌ها بررسی گردیده و نمودارها و نتایج حاصل به طور جامع مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است.

۵. در فصل پنجم به بررسی آزمایشگاهی مشخصات مکانیکی مواد مرکب پایه سیمانی مسلح به الیاف مارپیچ پرداخته شده است. در این فصل بطور مشخص رفتار کششی مواد مرکب سیمانی مسلح به الیاف با انجام آزمون کشش مستقیم با استفاده از فیکسچر دارای مفصل دو جهته که در تحقیق حاضر ساخته شده است، بر روی نمونه‌های دمبلی شکل انجام گرفته است و در هر قسمت به تحلیل و ارزیابی نتایج پرداخته شده است.

۶. در فصل ششم به نتیجه گیری کلی تمامی آزمایش‌ها و پیشنهادهای کارآمد برای ادامه این پژوهش پرداخته می‌شود.

فصل ۲: متن الیانی

چکیده فصل

بتن از پر کاربردترین مصالح در علم مهندسی عمران است. بنابراین استفاده از بتن‌هایی با عملکرد بهتر و مقاومت بیشتر اجتناب ناپذیر می‌باشد. بتن‌های مسلح به الیاف (FRC) از جمله بتن‌های با خصوصیات مکانیکی بهبود یافته هستند. لذا این فصل یک بحث ابلأغی در مورد بتن مسلح با الیاف و مروری بر انواع FRC های تجاری موجود و نحوه عملکرد آن‌ها و ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن مسلح با الیاف ارائه می‌دهد. بخش نهایی این فصل، با مروری بر متون فنی به منظور کمک به ایجاد زمینه‌ای برای آنچه در حال حاضر در مورد FRC درک شده است و نه به عنوان گزارش تاریخی پیشین به پایان می‌رسد.

۱-۲- مقدمه

الیاف گسسته^۱ به بتن افزوده می‌شوند تا مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، سختی، استحکام، عمر خستگی، مقاومت در برابر ضربه یا سایر خصوصیات مهندسی را بهبود بخشند. الیاف از فولاد، پلاستیک، شیشه و مواد طبیعی تولید می‌شوند و در شکل‌ها و اندازه‌های مختلفی به دست می‌آیند. در بین انواع مختلف الیاف، الیاف فولادی رایج‌ترین کاربردهای ساختاری هستند و بسیاری از کاربردهای غیر ساختاری را به خود اختصاص می‌دهند [1].

خواص بتن‌الیافی^۲ بستگی به نوع، میزان و ابعاد الیاف اضافه شده و همچنین خواص ماتریس مبتنی بر سیمان و سطح اتصال فیبر و ماتریس^۳ دارد. سطح اتصال فیبر و ماتریس و همچنین هندسه‌ی فیبر، پیوند فیبر به ماتریس را کنترل می‌کند [1].

علاوه بر این، توزیع مکانی و جهت‌یابی الیاف درون بتن بر عملکرد ترک‌خوردگی و سختی مواد کامپوزیت تأثیر می‌گذارد. برای بسیاری از کاربردها، مطلوب است که الیاف به طور یکنواخت به طور تصادفی در بتن توزیع شوند. اما، ترجیحا هم تراز بودن الیاف‌ها در یک راستا می‌تواند برای برخی از کاربردها سودمند باشد، به خصوص هنگامی که جهت بارگذاری به خوبی تعریف شده باشد [1].

آزمون بیرون‌کشیدگی الیاف برای تعیین رفتار سطح اتصال فیبر و ماتریس و پارامترهای مؤثر بر عملکرد خروجی الیاف از سیستم‌های سیمانی، توسط ترکیبات مختلفی از انواع الیاف، انواع مخلوط بتن^۴، طول الیاف تعبیه شده و زوایای تمایل مختلف الیاف مورد بررسی قرار می‌گیرد [2].

۲-۲- تاریخچه بتن الیافی

بکارگیری الیاف برای مسلح نمودن مصالح ترد، از زمان‌های گذشته مورد استفاده بشریت واقع شده است. مصریان از نی و موی اسب برای تقویت آجرهای گل استفاده می‌کردند. شواهدی وجود دارد که از الیاف آذبست برای تقویت گلدان‌های سفالی در حدود ۵۰۰۰ سال پیش استفاده شده است. پروفیسور آلبرتو فاوا از دانشگاه لاپلاتا در آرژانتین به هورنرو اشاره می‌کند که یک پرنده ریز و کوچک بومی آمریکای جنوبی است. این پرنده از قبل از ظهور انسان‌ها به طرز چشم‌گیری لانه‌های خشتی تقویت شده با نی را ایجاد کرده است که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است [1].

¹ Discrete fibers

² fiber-reinforced concrete

³ fiber-matrix interface

⁴ Concrete mix



شکل ۱-۲) لانه خشتی تقویت شده با نی [1]

خانه‌ای از پوئبلو که در حدود سال ۱۵۴۰ میلادی ساخته شده و گمان می‌رود قدیمی‌ترین خانه در ایالات متحده باشد، از خشت آفتاب پخته‌ی تقویت شده با نی ساخته شده است. در زمان‌های اخیر، استفاده گسترده تجاری از الیاف آزبست در ماتریس خمیر سیمانی در سال ۱۸۹۸ میلادی آغاز شد. محصولات ساختمانی سیمان آزبست امروزه در سراسر جهان بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، در درجه اول به دلیل خطرهای سلامتی مرتبط با الیاف آزبست، انواع فیبرهای متناوب در طول دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ میلادی معرفی شدند [3].

مطالعات آزمایشگاهی و اختراعات ثبت شده مربوط به استفاده از عناصر تقویت کننده فولادی در بتن، مانند قطعه‌های سیم و تراشه‌های فلزی برای بهبود خواص بتن از سال ۱۹۱۰ میلادی آغاز شد. در اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی در ایالات متحده، نخستین تحقیق بزرگ جهت ارزیابی ویژگی‌های الیاف فولادی به عنوان تقویت کننده بتن انجام شد. از آن زمان، مقدار قابل توجهی از تحقیقات، توسعه، آزمایش و کاربرد صنعتی بتن مسلح با الیاف فولادی رخ داده است [3].

۳-۲- بتن الیافی

مصلح پایه سیمانی مسلح به الیاف (بتن الیافی) به عنوان یک مصلح مرکب^۱ با دو جزء تشکیل دهنده الیاف و ماتریس تعریف می‌شوند که منظور از ماتریس، خمیر^۲، ملات^۳، دوغاب^۴ و یا بتنی است که شامل سنگ‌دانه‌ها و تمامی مواد افزودنی است. هرچند که در این تعریف، ماتریس که به عنوان جزء اصلی بتن الیافی در نظر گرفته شده، خود یک نوع مصلح مرکب محسوب می‌شود. الیاف به عنوان دومین جزء بتن الیافی معمولاً منقطع بوده و توزیع آن در حجم بطور تصادفی است. مکانیزم پیوستگی^۵ موجود بین الیاف و

¹ Composite

² Paste

³ Mortar

⁴ Slurry

⁵ Bond

ماتریس، عملکرد این دو جزء را مرتبط کرده و یکی از پارامترهای مهم در رفتار مصالح به شمار می‌رود. با توجه به تاثیر نوع الیاف در رفتار و خصوصیات مصالح پایه سیمانی، این مصالح را می‌توان بر اساس این ویژگی دسته‌بندی نمود. الیاف گوناگونی برای مسلح سازی مصالح پایه سیمانی بکار می‌روند که می‌توان آن‌ها را به چهار گروه اصلی الیاف فولادی، الیاف شیشه، الیاف مصنوعی و الیاف طبیعی تقسیم نمود. مصالح تولید شده به کمک هر یک از این الیاف نیز با نام الیاف شناخته می‌شوند.

در واقع می‌توان گفت که بتن الیافی^۱ مخلوطی است شامل الیاف کوتاه و منقطع که در جهت‌های مختلف و بصورت تصادفی توزیع شده‌اند. کامپوزیت‌های الیافی دارای خصوصیات مکانیکی بهبود یافته‌ای نسبت به مصالح شکننده می‌باشند. استفاده از الیاف بصورت رشته‌های نازک و کوتاه که در تمام جهات در مصالح سیمانی بصورت تصادفی توزیع می‌شوند، رفتار آن‌ها را بعد از شکل‌گیری اولین ترک تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث بهبود شکل‌پذیری و مقاومت بتن می‌شود [1].

شکست بتن الیافی با گسیختگی الیاف یا بیرون کشیده شدن آن‌ها از ماتریس همراه است. در حقیقت رفتار الیاف پس از شکل‌گیری یک ترک مهم‌ترین عاملی است که رفتار بتن الیافی را تعیین می‌نماید. میزان تأثیر الیاف به عواملی چون مقاومت ماتریس، خصوصیات الیاف و کیفیت اتصال (چسبندگی) الیاف به ماتریس بستگی دارد. معمولاً مقاومت اولین ترک ماتریس با افزودن الیاف، افزایش پیدا نمی‌کند. در این موارد بیشترین تأثیر الیاف بر روی رفتار مصالح بعد از ترک‌خوردگی ماتریس است.

علاوه بر نوع الیاف، رفتار مصالح تحت تنش‌های کششی نیز یکی از خصوصیات متمایز مصالح پایه سیمانی به شمار می‌رود. نرم‌شدگی کرنشی^۲ و سخت‌شدگی کرنشی^۳ دو مشخصه در رفتار این مصالح می‌باشند. بروز و یا عدم بروز رفتار سخت‌شدگی کرنشی تحت تنش‌های کششی، این مصالح را به دو گروه مصالح مرکب پایه سیمانی مسلح به الیاف و مصالح مرکب پایه سیمانی مسلح به الیاف با عملکرد بالا تقسیم می‌کند [4].

در روش معمول، میزان الیاف اضافه شده به مخلوط بتن بستگی به خواص ماتریس پایه سیمانی و اهداف عملکرد دارد. به طور معمول، مقادیر کمتری از الیاف (به عنوان مثال، کمتر از یک درصد کسر حجمی) برای کنترل ترک خوردگی استفاده می‌شود. مقادیر بیشتری از الیاف به طور معمول برای دستیابی به پیشرفت‌های قابل توجه در مدول پارگی، سختی و مقاومت در برابر ضربه استفاده می‌شود. این کامپوزیت‌ها در روش‌های ساختمانی از قبیل بتن‌پاشی^۴ و در سازه‌هایی استفاده می‌شوند که نیاز به جذب انرژی، بهبود مقاومت در برابر لایه برداری و خستگی دارند [1].

¹ Fibre Reinforced Concrete (FRC)

² Strain-Softening

³ Strain-Hardening

⁴ shotcrete



شکل (۲-۲) بتن الیافی [4]

۲-۴- الیاف

الیاف قرن‌ها در مصالح ساختمانی استفاده شده‌اند. در سه دهه گذشته، علاقه زیادی به استفاده از الیاف در مخلوط بتن آماده، بتن پیش‌ساخته و بتن‌پاشی شده است. الیاف ساخته شده از فولاد، پلاستیک، شیشه و مواد طبیعی (مانند سلولز چوب) در اشکال، اندازه و ضخامت‌های مختلفی موجود هستند. الیاف‌ها ممکن است با سطح مقطع گرد، مسطح و پیچیده و با طول‌های معمولی ۶ میلی‌متر تا ۱۵۰ میلی‌متر باشند و دارای ضخامت‌هایی از ۰/۰۰۵ میلی‌متر تا ۰/۷۵ میلی‌متر باشند.

اگرچه اصول اصلی حاکم در سیستم‌های بتن تقویتی یکسان است، بین سیستم‌های تقویتی معمولی (مسلح با آرماتور) و الیافی تفاوت‌های بارز وجود دارد:

۱. الیاف بطور کلی به صورت تصادفی در سراسر یک مقطع مشخص توزیع می‌شوند در حالی که آرماتور تقویت کننده فقط در محل مشخص و ضروری قرار می‌گیرد.
۲. الیاف‌ها در مقایسه با آرماتورها کوتاه هستند و از هم فاصله دارند.
۳. به طور کلی دستیابی به تقویت حاصل از آرماتور در بتن با استفاده از الیاف امکان پذیر نیست.

الیاف به طور معمول در دوزهای کم حجم (اغلب کمتر از ۱٪) به بتن افزوده می‌شوند و در کاهش ترک خوردگی پلاستیک مؤثر هستند [5].

۱-۲-۴- مضرات استفاده از الیاف

الیاف به طور کلی در سراسر مقطع بتنی توزیع می‌شوند. بنابراین، بسیاری از الیاف‌ها برای مقاومت در

برابر تنش‌های کششی ناشی از بارهای اعمال شده به طور ناکارآمد قرار دارند. جهت گیری تصادفی الیاف باعث می‌شود، بسیاری از الیاف‌ها در زاویه‌هایی به غیر از ۹۰ درجه نسبت به امتداد ترک‌ها قرار می‌گیرند یا ممکن است کمتر از طول تعبیه مورد نیاز برای توسعه پیوند کافی باشند. بنابراین، تنها درصد کمی از الیاف ممکن است در مقاومت در برابر تنش کششی یا خمشی کارآمد باشد. ضریب کارایی بستگی به طول فیبر و طول بحرانی تعبیه دارد. از نظر مفهومی، تقویت با الیاف وسیله ای ناکارآمد برای بدست آوردن استحکام کامپوزیت است [5].

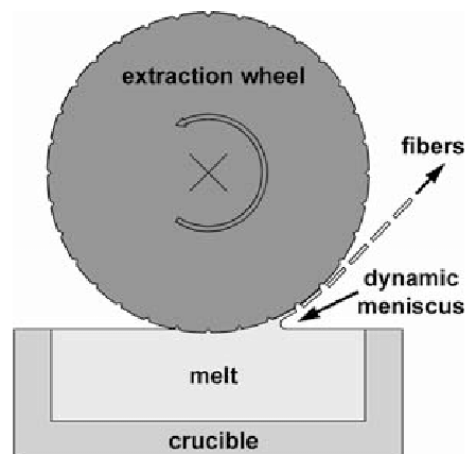
۲-۴-۲- الیاف فلزی

الیاف فلزی با طول کوتاه و گسسته از فولاد با نسبت ابعاد (نسبت طول به قطر) از حدود ۲۰ تا ۱۰۰ و با انواع مقطع و پروفیل‌های متنوع است. برخی از الیاف فولادی برای بهبود مقاومت در برابر خروج از یک ماتریس مبتنی بر سیمان، انتهای قلاب دارند.

ASTMA820، مشخصات استاندارد الیاف فولادی برای بتن الیافی را بر اساس ساخت آن‌ها به چهار

نوع مختلف طبقه بندی می‌کند:

۱. الیاف سیم کشیده شده سرد^۱، از سیم های فلزی کشیده شده ساخته می‌شوند.
۲. الیاف ورق برش خورده^۲ که از ورق های فولادی برش خورده تولید می‌شوند.
۳. الیاف استخراج شده از ذوب فولاد^۳ با یک روش نسبتاً پیچیده تولید می‌شوند که در آن چرخ چرخشی برای بلند کردن فلز مایع از سطح فلز مذاب با عمل مویرگی استفاده می‌شود. سپس فلز مذاب استخراج شده و به سرعت منجمد می‌شود، شکل (۲-۲). الیاف حاصل سطح مقطع هلال شکل دارند.



شکل (۲-۳) مکانیزم ساخت الیاف استخراجی از ذوب فولاد [5]

¹ Cold-drawn wire fiber

² Cut sheet fiber

³ Melt-extracted fiber

۴. سایر الیاف‌ها

حجم الیاف فولادی مورد استفاده در بتن معمولاً از ۰/۲۵٪ تا ۲٪ متغیر است. حجم بیش از ۲٪ عموماً باعث کاهش کارایی و پراکندگی الیاف می‌شود و به طراحی میکس ویژه یا تکنیک‌های خاص نیاز دارند [5].

۳-۴-۲- الیاف شیشه

در تحقیقات اولیه در مورد الیاف شیشه، از شیشه بوروسیلیکات^۱ (E-glass) و شیشه سودا-آهک-سیلیکا^۲ (A-glass) استفاده شد. نتایج آزمایش نشان داد که واکنش قلیایی بین الیاف شیشه E و خمیر سیمان باعث کاهش مقاومت بتن می‌شود. تحقیقات ادامه یافته منجر به الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیایی شد، (AR-glass) که دوام طولانی مدت را بهبود بخشید، اما منابع دیگر روند از بین رفتن مقاومت بتن را مشاهده کردند.

واکنش پذیری قلیایی و هیدراتاسیون سیمان، پایه و اساس دو نظریه زیر است که از بین رفتن خاصیت انعطاف پذیری و قدرت بتن الیافی شیشه‌ای را توضیح می‌دهد:

- حمله قلیایی به سطوح الیاف شیشه‌ای مقاومت کششی الیاف را کاهش می‌دهد و متعاقباً مقاومت فشاری بتن الیافی را کاهش می‌دهد.
 - هیدراتاسیون مداوم سیمان باعث نفوذ هیدروکسید کلسیم در الیاف می‌شود و در نتیجه باعث کاهش پیوستگی الیاف و ماتریس و کاهش مقاومت کششی می‌شود. اصلاحات الیاف شیشه‌ای برای بهبود دوام طولانی مدت شامل:
 - پوشش‌های شیمیایی ویژه فرموله شده برای کمک به مبارزه با فراگیری الیاف توسط هیدراتاسیون
 - بکارگیری یک دوغاب میکروسیلیس پراکنده برای پر کردن مناسب حفره‌های الیاف، در نتیجه پتانسیل نفوذ هیدروکسید کلسیم را کاهش می‌دهد.
- سیمان آلی قلیایی در ژاپن ایجاد شده است که هیچ هیدروکسید کلسیم را در طول هیدراتاسیون تولید نمی‌کند. آزمایشات ضمیمه شده با این سیمان در نمونه‌های بتونی از جنس الیاف مقاوم در برابر قلیایی، دوام طولانی مدت بیشتری نسبت به گذشته نشان داده‌اند. بزرگترین کاربرد بتن الیافی شیشه‌ای ساخت پانل‌های نمای خارجی ساختمان است [5].

۴-۴-۲- الیاف مصنوعی

الیاف مصنوعی الیاف ساخته شده توسط انسان هستند که در طی تحقیق و توسعه در صنایع پتروشیمی و نساجی تولید می‌شوند. انواع الیاف مصنوعی که در بتن سیمان پرتلند مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارتند از: آرامید، نایلون، اکریلیک، کربن، پلی‌اتیلن، پلی‌استر و پلی‌پروپیلن.

¹ borosilicate glass

² soda-lime-silica glass

الیاف مصنوعی می‌توانند انقباض پلاستیک و ترک خوردگی ناشی از فرونشست را کاهش دهند و ممکن است به تقویت بتن پس از ترک آن کمک کنند. مشکلات مرتبط با الیاف مصنوعی عبارتند از:

- پیوند کم الیاف به ماتریس.
- عملکرد بی نتیجه با استفاده‌ی کم حجم از الیاف‌های پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن، پلی‌استر و نایلون.
- مدول کم الاستیسیته برای پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن.
- هزینه بالای الیاف کربن و آرامید.

محبوب‌ترین مصنوعات از نظر شیمیایی بی‌اثر، آبگریز و سبک وزن هستند. آن‌ها به صورت استوانه‌ای مداوم تولید می‌شوند که می‌توانند به طول‌های مشخص برش داده شوند یا به صورت فیلم و نوار برش داده شوند و به صورت فیبرهای ریز سطح مقطع مستطیل شکل بگیرند.

الیاف اکریلیک به طور کلی امیدوار کننده‌ترین جایگزین برای الیاف آزیست محسوب می‌شوند. آن‌ها در تخته‌های سیمانی و تولید سقف استفاده می‌شوند، که در آن حجم فیبر تا ۳ درصد می‌تواند افزایش یابد. کامپوزیت‌های بتونی با الیاف اکریلیک دارای مقاومت و انعطاف پذیری بالایی بعد از ترک خوردگی هستند. استحکام خمشی بتن مسلح با فیبر اکریلیک برای بسیاری از کاربردهای ساختمان کافی است.

الیاف آرامید از استحکام کششی و مدول کششی بالایی برخوردار هستند. الیاف آرامید دو برابر و بیشتر از الیاف شیشه‌ای E و پنج برابر از الیاف فلزی قوی هستند. الیاف آرامید دارای مقاومت بسیار خوبی تا ۱۶۰ درجه سانتیگراد (۳۲۰ درجه فارنهایت)، پایداری بعدی تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد (۳۹۲ درجه فارنهایت)، مقاومت خستگی استاتیک و دینامیکی و مقاومت در برابر خزش هستند.

الیاف کربن در درجه اول به دلیل استحکام بالا و خاصیت مدول الاستیک و سختی آن‌ها برای کاربردهای صنعت هوا فضا توسعه یافتند. در مقایسه با اکثر الیاف مصنوعی، تولید الیاف کربن گران است و این باعث توسعه تجاری آن‌ها شده است. الیاف کربن از استحکام کششی و مدول الاستیسیته بالا برخوردار هستند. آن‌ها همچنین در مورد بیشتر مواد شیمیایی بی‌اثر هستند.

الیاف نایلون برای استفاده در پوشاک، مبلمان خانگی، صنعتی و نساجی تولید می‌شوند. در حال حاضر فقط دو نوع الیاف نایلون برای استفاده در بتن (نایلون ۶ و نایلون ۶۶) به بازار عرضه می‌شود. الیاف نایلون از نایلون پلیمر چرخانده شده و از طریق اکستروژن، کشش و گرم کردن بدست می‌آیند تا یک ساختار فیبر گرا، جهت‌دار و کریستالی تشکیل شود. برای کاربردهای بتنی، مقاومت بالا (مقاومت کششی بالا)، گرما و نخ پایدار سبک چرخیده و متعاقباً به طول‌های کوتاه‌تر برش داده می‌شود. الیاف نایلون مقاومت، سختی و تغییر شکل الاستیک خوبی از خود نشان می‌دهند. نایلون آبگریز است و رطوبت آن ۴.۵ درصد است. استفاده از آن‌ها تقاضای آب بتن را افزایش می‌دهد. در حالی که این تاثیری در هیدراتاسیون بتن یا کارایی بتن ندارد. از الیاف مصنوعی نیز در گچ و ملات استفاده می‌شود. برای این استفاده الیاف کوتاه‌تر از الیاف مصنوعی مورد استفاده در بتن هستند. معمولاً مقادیر اندکی از الیاف با مقاومت قلبایی به طول ۱۳ میلی‌متر (۱ تا ۲ اینچ) به مخلوط‌های پایه گچی اضافه می‌شوند [5].

۵-۴-۲- الیاف طبیعی

این گونه الیاف در ساخت بتن کم فشار الیافی مورد استفاده قرار می‌گیرند و گهگاهی از آن در بتن های ورق نازک دارای الیاف زیاد استفاده می‌شود.

- الیاف طبیعی فرآوری نشده

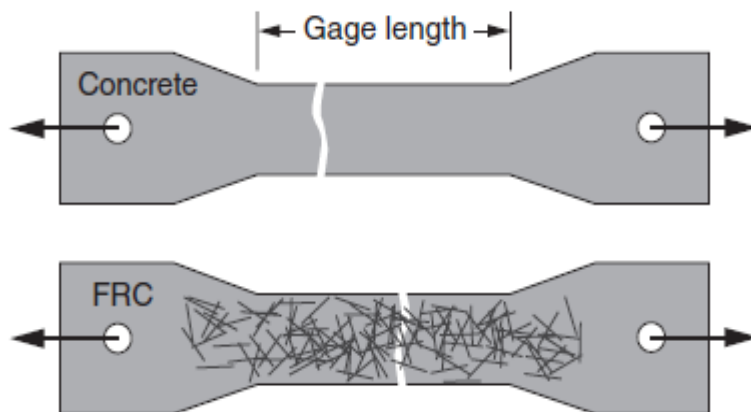
در اواخر دهه ۱۹۶۰ تحقیقات در مورد خصوصیات مهندسی الیاف طبیعی و بتن ساخته شده با این الیاف انجام شد. نتایج نشان داد که از این الیاف با موفقیت می‌توان برای ساخت ورق‌های نازک برای دیوارها و سقف‌ها استفاده کرد. الیاف طبیعی فرآوری نشده از نارگیل، سیزال، بامبو، جوت، چوب و الیاف گیاهی ساخته می‌شوند. اگرچه بتن‌های ساخته شده با الیاف طبیعی فرآوری نشده از خواص مکانیکی مناسبی برخوردار هستند، اما از نظر ماندگاری نیز دارای نقایص هستند. بسیاری از الیاف طبیعی به دلیل تغییر در میزان رطوبت الیاف، مستعد تغییر حجم هستند. تغییرات حجمی الیاف که همراه با تغییرات در میزان رطوبت الیاف است، می‌تواند به شدت بر استحکام پیوند بین الیاف و ماتریس سیمان تأثیر بگذارد.

- الیاف چوبی (الیاف طبیعی فرآوری شده)

خواص الیاف سلولز چوبی تا حد زیادی تحت تأثیر روش استخراج الیاف‌ها و فرآیندهای پالایش قرار دارد. فرآیندی که با آن چوب به یک فیبر تبدیل می‌شود، پالپ نامیده می‌شود. فرآیند کرافت بیشتر برای تولید الیاف سلولز چوب استفاده می‌شود. این فرآیند شامل پختن تراشه‌های چوبی در محلول هیدروکسید سدیم، کرینات سدیم و سولفید سدیم است. الیاف سلولزی چوب نسبت به بسیاری از الیاف ساخته شده مانند پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن، پلی‌استر، خصوصیات مکانیکی نسبتاً خوبی دارند [5].

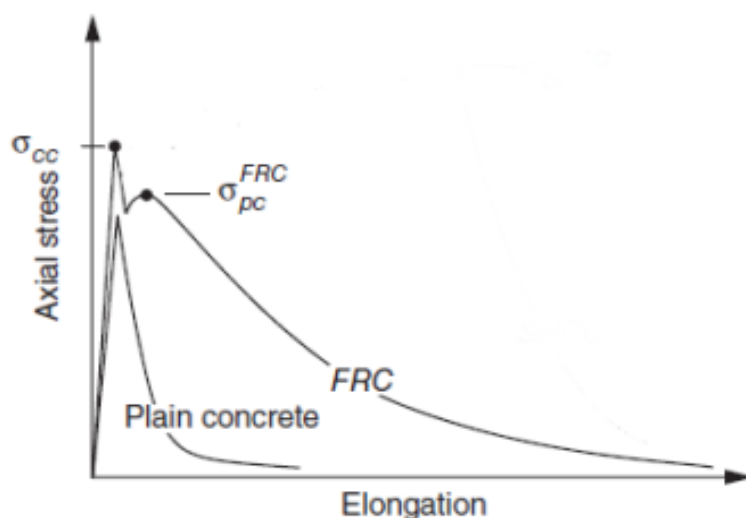
۵-۲- مکانیسم‌های تقویت

مقاومت و استحکام بتن تقویت شده با الیاف را می‌توان از طریق تست بار نمونه‌هایی در تنش اندازه گیری کرد، همانطور که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است. هر دو بتن ساده (فاقد تقویت) و تقویت شده با الیاف تقریباً به صورت خطی تا زمان اولین ترک خوردگی پاسخ می‌دهند. افزودن الیاف بسته به نوع الیاف اضافه شده، مدول الاستیک ماده کامپوزیت را افزایش داده یا کاهش می‌دهد. تأثیر مشابهی بر استحکام کششی ساخته شده است. با توجه به مقادیر اندک الیاف اضافه شده به بتن، به طور معمول تا ۲ درصد از حجم، مدول الاستیک و استحکام بتن تقویت شده با الیاف تا حد زیادی با بتن های ساده تفاوت ندارند [1].



شکل (۲-۴) کشش بتن معمولی و بتن الیافی

پس از اولین ترک خوردگی، ظرفیت بارگیری بتن ساده به سرعت کاهش می یابد (شکل ۲-۴). به همین دلیل، فرض می شود که در طراحی سازه معمولی، بتن بعد از ترک خوردگی، هیچ گونه تنشی ندارد. در مقابل، بتن مسلح با الیاف، مقاومت و شکل پذیری قابل توجهی پس از ترک را از خود نشان می دهد، زیرا الیاف با مکانیزم پل زدن (و در نتیجه انتقال بار از بتن به الیاف) در بین ترک ها قرار می گیرند. ترک تنها در صورتی شکل می گیرد و افزایش می یابد که مقاومت پس از ترک (σ_{pc})، کمتر از مقاومت اولین ترک خوردگی (σ_{cc}) باشد. کاهش تدریجی بار همراه با کشش به دلیل بیرون کشیدن الیاف است که باعث شکسته شدن ترک می شوند [1].



شکل ۲-۵) نیروی محوری در برابر طول کشیدگی بتن معمولی و الیافی

۲-۶- مزایای بتن الیافی

یکی از بزرگترین مزایای کاربرد الیاف در بتن افزایش خدمت پذیری دراز مدت سازه ها می باشد. خدمت پذیری توانایی حفظ مقاومت، یک پارچگی و عملکرد مورد انتظار در طول عمر مفید سازه می باشد. یکی از جنبه های خدمت پذیری که با افزودن الیاف بهبود می یابد، کنترل ترک ها است. ترک های عریض شکل ظاهری و قابلیت اعتماد سازه را تحت تأثیر قرار می دهد. الیاف مانع ایجاد ترک های عریض و نفوذ آب و مواد دیگر، و در نتیجه کاهش خوردگی آرماتورها می شود. با استفاده از درصد های بالاتر الیاف مقاومت کششی ماتریس افزایش پیدا می کند. در روش های متداول مسلح کردن سازه های بتنی هزینه و زمان زیادی صرف آرماتوربندی می شود، در صورتی که استفاده از بتن الیافی در اکثر موارد باعث کاهش یا حذف کامل آرماتوربندی می شود. بطور خلاصه مزایای بتن الیافی در مقایسه با بتن معمولی را می توان به شرح زیر بیان کرد:

- مقاومت در برابر تورق، سایش و هوازگی سطح.
- مقاومت زیاد در برابر تنش های خستگی.
- مقاومت بسیار بالا در برابر ضربه.
- مقاومت کششی زیاد.
- قابلیت باربری زیاد بعد از ترک خوردگی.

- مقاومت خمشی و برشی زیاد.

- شکل پذیری بسیار زیاد.

قابلیت انعطافی که بتن الیافی دارد، همانند خواص مواد پلاستیکی باعث می‌شود که بتن الیافی گسیختگی ناگهانی نداشته باشد. از آنجا که الیاف در جسم بتن بصورت سه بعدی پراکنده می‌شود، در صورت تشکیل یک ترک در جهات مختلف، الیاف اتصالی را بوجود می‌آورد و از گسترش ترک جلوگیری می‌نماید [6]

۲-۲- بتن مسلح به الیاف فولادی^۱

یکی از پرمصرف‌ترین و مناسب‌ترین نوع الیاف، الیاف فولادی است، که به دلیل شکل پذیری، تامین گیرداری در بتن، مقاومت کششی و سختی مطلوب، نظر اکثر طراحان را به خود جلب کرده است. الیاف فولادی برای مسلح کردن بتن در اشکال مختلف از نوع کوتاه و ناپيوسته و با نسبت ظاهری^۲ (نسبت طول به قطر الیاف) ۲۰ تا ۱۰۰ مورد استفاده قرار می‌گیرند. سطح مقطع آن‌ها با توجه به روش تولید و مواد خام مورد استفاده ممکن است دایره‌ای، بیضوی، مستطیلی یا هلالی باشد.

الیاف فولادی با سطح مقطع دایره‌ای دارای قطر ۰/۲۵ تا ۱ میلی‌متر و با سطح مقطع مستطیلی (ورق‌های) دارای ضخامت ۰/۱۵ تا ۰/۶۴ و عرض ۰/۲۵ تا ۲ میلی‌متر می‌باشند، علاوه بر سطح مقطع، شکل ظاهری الیاف فولادی نیز می‌تواند متفاوت باشد. ایجاد تغییر شکل در الیاف مانند مجعد کردن الیاف در تمامی طول آن، ایجاد انحنا و پهن کردن انتهای الیاف باعث افزایش مکانیزم پیوستگی الیاف می‌گردد. در مورد دال‌های متکی بر زمین و بعضی اعضای پیش ساخته که شدت بارگذاری در آن‌ها کم است درصد الیاف مورد استفاده کم می‌باشد. خصوصیات منحصر بفرد الیاف فولادی مانند مقاومت و مدول الاستیسیته نسبتاً بالا، مقاومت در برابر خوردگی در محیط‌های قلیایی و قابلیت افزایش مکانیزم پیوستگی از طریق ایجاد مهارمکانیکی، الیاف فولادی را به یکی از مناسب‌ترین و متداول‌ترین نوع الیاف تبدیل کرده است.

۱-۲-۷- خصوصیات مخلوط تازه بتن مسلح به الیاف فولادی

در بتن مسلح به الیاف فولادی نیز همانند بتن معمولی^۳، میزان تراکم، مقاومت و دیگر خصوصیات مکانیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین کارایی مخلوط باید به اندازه‌ای باشد که بتن‌ریزی^۴، تراکم^۵ و پرداخت سطح به سادگی انجام شده و همراه با توزیع یکنواخت الیاف، جداشدگی و آب انداختگی مخلوط به حداقل برسد. در بتن‌ریزی‌های متداول بطور معمول درصد حجمی الیاف بین ۰/۲۵ تا ۲ درصد (معادل ۲۰ تا ۱۶۰ کیلوگرم در متر مکعب) مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزودن الیاف به مخلوط باعث افت اسلامپ به میزان ۲۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر می‌شود [7].

علاوه بر مسائل فوق گلوله شدن الیاف^۶ در حین اضافه کردن و در مرحله ارتعاش مخلوط میبایست مورد توجه قرار گیرد. جمع شدن الیاف بلند و نازک با نسبت ظاهری بزرگتر از ۱۰۰ باعث قفل و بست دسته‌ای الیاف در یکدیگر شده که باز شدن آن بسیار دشوار است. استفاده از الیاف با نسبت ظاهری کمتر از

¹ Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)

² Aspect Ratio

³ Plain Concrete

⁴ Placement

⁵ Consolidation

⁶ Fiber Balling

۵۰ این مشکل را حل نموده ولیکن بهبود هرچه بیشتر خصوصیات مکانیکی بتن مسلح به الیاف فولادی از طریق کاربرد الیاف با نسبت ظاهری بالاتر امکان پذیر است. تمایل الیاف به گلوله شدن تابع دانه بندی، بزرگترین بعد سنگدانه، نسبت ظاهری الیاف، درصد حجمی الیاف، هندسه الیاف و روش افزودن آن‌ها به مخلوط است. با افزایش بعد سنگدانه و نسبت ظاهری، درصد حجمی کمتری از الیاف را می‌توان به مخلوط اضافه کرد [7].

۲-۷-۲- خصوصیات مکانیکی بتن مسلح به الیاف فولادی

خصوصیات مکانیکی بتن مسلح به الیاف فولادی به نوع الیاف، نسبت ظاهری آن، مقاومت ماتریس، اندازه سنگدانه‌ها، اندازه و شکل نمونه و همچنین روش ساخت و عمل‌آوری آن بستگی دارد. مکانیزم مقاوم سازی الیاف، انتقال تنش از ماتریس به الیاف از طریق سطح تماس آن‌ها می‌باشد. قبل از ترک خوردگی ماتریس، تنش‌های کششی موجود، بین الیاف و ماتریس تقسیم شده و بعد از ترک خوردگی، تمامی این تنش‌ها به الیاف منتقل می‌شود. درصد حجمی الیاف و چگونگی عملکرد آن‌ها از مهم‌ترین پارامترهای کنترل کننده خصوصیات بتن مسلح به الیاف فولادی محسوب می‌شوند. چگونگی عملکرد الیاف به مقاومت آن‌ها در برابر بیرون کشیده شدن از ماتریس بستگی دارد. بطور کلی اگر سطح مقطع الیاف ثابت در نظر گرفته شود، با افزایش طول الیاف، تاثیر آن‌ها در افزایش مقاومت بتن مسلح به الیاف فولادی بیشتر است. به ازای درصد حجمی ثابت، الیاف با سطح مقطع غیردایره‌ای و الیاف دایره‌ای با قطر کمتر، تاثیر بیشتری در بهبود خصوصیات بتن مسلح به الیاف فولادی خواهند داشت.

در صورت استفاده از الیاف مناسب، شکست عضو زمانی رخ می‌دهد که الیاف در حین بیرون کشیده شدن از ماتریس به حداکثر مقاومت خود رسیده‌اند. با ایجاد تغییر شکل در الیاف می‌توان مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن را افزایش و نسبت ظاهری را نیز کاهش داد. برای دستیابی به شکل پذیری بالا شکست عضو می‌بایست با بیرون کشیده شدن الیاف همراه باشد. این نوع شکست در مقایسه با گسیختگی الیاف تدریجی‌تر می‌باشد. از طریق درک رفتار بتن مسلح به الیاف فولادی، تغییر در مقدار و نوع الیاف می‌توان مصالحی با خصوصیات متفاوت طراحی نمود. الیاف فولادی رفتار بتن را در تمامی حالات بارگذاری تحت تاثیر قرار می‌دهند، لیکن تاثیر آن‌ها در افزایش مقاومت بتن در حالت فشار، کشش، پیچش، برش و خمش متفاوت می‌باشد. در واقع با ایجاد تغییر در خصوصیات الیاف و ماتریس می‌توان به مصالح پایه سیمانی با خصوصیات مکانیکی متفاوت دست یافت.

فشار: تحت بارهای فشاری وجود الیاف مقاومت نهایی بتن الیافی را به مقدار کمی تحت تاثیر قرار می‌دهد. با افزودن ۱/۵ درصد الیاف فولادی مقاومت فشاری تا ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. کشش مستقیم: افزایش مقاومت کششی در این حالت قابل ملاحظه است و با اضافه کردن ۱.۵ درصد الیاف فولادی می‌توان مقاومت کششی بتن را به میزان ۳۰ تا ۴۰ درصد بهبود بخشید.

برش و پیچش: با افزودن الیاف فولادی به بتن مقاومت برشی و پیچشی افزایش پیدا می‌کند. افزایش مقاومت SFRC تحت برش خالص به نحوی آزمایش مقاومت برشی و جهت گیری الیاف در ناحیه‌ی گسیختگی برشی وابسته است. با افزودن ۱ درصد الیاف فولادی می‌توان مقاومت را تا ۳۰ درصد افزایش داد. استفاده از الیاف فولادی همراه با آرماتورهای عرضی و یا به صورت جایگزین آن‌ها مزایایی به همراه خواهد داشت. با توزیع یکنواخت و تصادفی الیاف در تمام حجم بتن فواصل آن‌ها در مقایسه با آرماتورهای برشی به طور قابل ملاحظه ای کمتر خواهد شد، لذا با جلوگیری از تشکیل ترک‌های موضعی، باعث کاهش اندازه‌ی ترک‌ها می‌گردد. افزودن الیاف، مقاومت ترک خوردگی بتن و مقاومت کششی نهایی

بتن را افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه الیاف از بازشدگی ترک جلوگیری می‌کند، نیروی ناشی از قفل و بست بین سنگ‌دانه‌ها و بیرون کشیده شدن تدریجی الیاف در سطح ترک، مقاومت برشی -اصطکاکی بتن را افزایش می‌دهد. استفاده از الیاف با مقدار و هندسه‌ی مناسب، رفتار گسیختگی تیر را از حالت برشی (ناشی از ترک‌های قطری) به حالت خمشی تغییر خواهد داد.

خمش: افزایش مقاومت خمشی تیر در مقایسه با دیگر حالات بارگذاری مانند کشش و فشار، بیشتر است. این امر به دلیل رفتار شکل پذیر SFRC در وجه کششی تیر می‌باشد. این رفتار باعث تغییر توزیع تنش و کرنش در مقطع شده که در نهایت منجر به تغییر محل تار خنثی به سمت ناحیه فشاری می‌گردد. تحقیقات نشان داده است که با افزودن ۴ درصد الیاف به بتنی با سنگ‌دانه‌های ریز، مقاومت خمشی نسبت به حالت بدون الیاف بیش از دو برابر خواهد شد. در صورت استفاده از سنگ‌دانه‌های درشت درصد حجمی الیاف از نظر عملی به ۱/۵ تا ۲ درصد محدود می‌گردد. در این حالت افزایش مقاومت خمشی بیش از ۷۰ درصد نمی‌باشد [1,3,4].

۳-۷-۲- کاربردهای بتن مسلح به الیاف فولادی

بتن مسلح به الیاف فولادی را می‌توان به تنهایی یا به همراه بتن مسلح بکار برد. مواردی که می‌توان بتن الیافی را به تنهایی به کار گرفت عبارتند از [3]:

- روسازی بتنی بزرگراه‌ها، جاده‌ها و فرودگاه‌ها
 - لوله‌های بتنی
 - کف کارخانه‌ها، توقف‌گاه‌ها و سالن‌های صنعتی
 - دیواره و کف کانال‌ها
 - قطعات پیش‌ساخته
 - در ساختمان تونل‌ها یا معادن بصورت بتن‌پاشی^۱
 - سازه‌های ضد انفجار و ضد حریق
 - تثبیت شیب‌ها و ترانشه‌های سنگی و ریزشی با بتن‌پاشی
- مواردی که می‌توان الیاف فولادی را در بتن مسلح و یا پیش‌تنیده به کار برد، عبارتند از:
- شالوده ماشین‌آلات صنعتی
 - دیوارهای حفاظتی، پناهگاه‌ها و آشیانه هواپیماها
 - ساختمان راکتورهای اتمی
 - تیرهای بتنی
 - شمع‌ها

۳-۸- ساختار ناحیه تماس الیاف و ماتریس

ساختار خمیر سیمان در نواحی نزدیک الیاف و سنگ‌دانه‌ها (ITZ) کاملاً متفاوت با قسمت‌های دیگر ماتریس سیمانی است. خصوصیات این ناحیه که خود دارای ساختار غیر یکنواختی می‌باشد به نوع، جنس و

¹ Shotcrete

اندازه الیاف و خصوصیات سطح الیاف و همچنین اجزاء تشکیل دهنده ماتریس سیمانی بستگی دارد و ممکن است بین ۵۰-۱۰۰ μm ضخامت داشته باشد. ضخامت ITZ در مصالح سرامیکی و پلیمری بسیار نازک است. درحالیکه در مصالح سیمانی این ناحیه دارای ضخامت و پیچیدگی بیشتری می باشد و ناحیه نسبتاً وسیعی را در برمی گیرد [4].

بمنظور بررسی ITZ در مصالح پایه سیمانی، الیاف از نظر هندسی به دو دسته تقسیم بندی می شوند:

- الیاف درشت : قطر این الیاف به مقدار قابل ملاحظه ای بیشتر از اندازه ذرات سیمان است. الیاف درشت معمولاً از جنس فولاد و پلی پروپیلن با قطری در حدود ۰/۳ میلیمتر و بیشتر هستند. از الیاف درشت معمولاً در محدوده ۰/۵ تا ۰/۲ درصد حجمی استفاده می شود [8].
- ریز الیاف : قطر این الیاف کمتر از ذرات سیمان (کمتر از ۰/۳ میلیمتر) است. الیاف نایلون و پلی پروپیلن جزئی از این الیاف ها هستند. از ریز الیاف معمولاً در محدوده ۰/۲ تا ۲ درصد حجمی استفاده می شود [8].

۱-۸-۲- الیاف درشت

ساختار ITZ در اطراف الیاف درشت کاملاً شبیه به نواحی اطراف سنگدانه ها در بتن می باشد. نواحی اطراف الیاف شامل لایه ای با تخلخل زیاد است. تخلخل زیاد در اطراف سنگدانه ها و الیاف بدلیل تراکم ناکافی ذرات سیمان و نسبت آب به سیمان بالا در این ناحیه می باشد. این عامل با افزایش ابعاد الیاف و سنگدانه ها شدت می گیرد. استفاده از میکروسیلیس باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه در ITZ می شود. ذرات بسیار ریز میکروسیلیس تراکم این ناحیه را افزایش داده و ضخامت آن را کاهش می دهند [4].

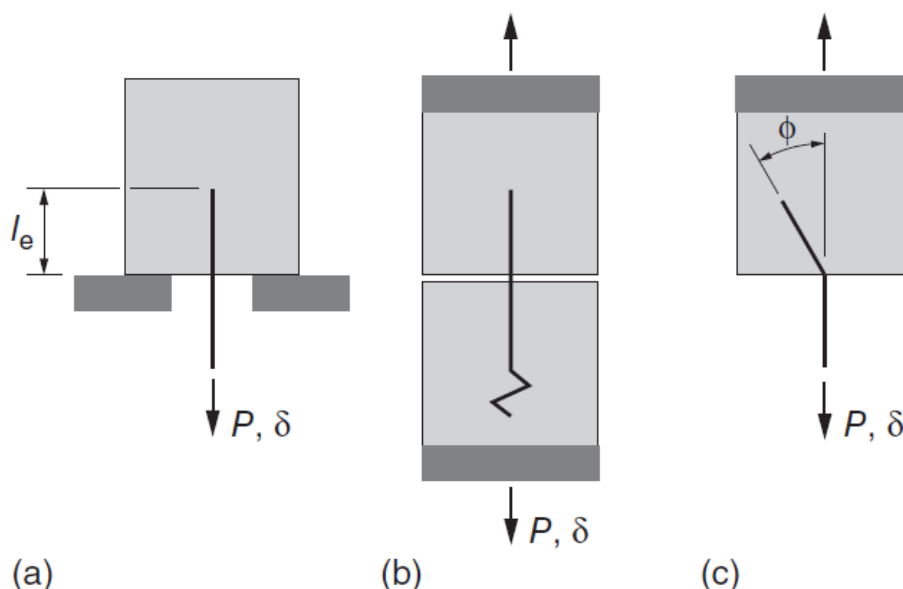
۲-۸-۲- ریز الیاف

ساختار خمیر سیمان در اطراف الیاف ریز و درشت تفاوت زیادی با هم دارد. ناحیه انتقال در اطراف الیاف ریز متراکم تر است و ساختار آن تفاوت چندانی با قسمت های دیگر ماتریس سیمانی نخواهد داشت. علت این اختلاف یکسان بودن اندازه الیاف و ذرات سیمان و در نتیجه کاهش تخلخل در اطراف الیاف می باشد. در مورد بتن های مسلح به ریز الیاف حتی بدون استفاده از میکروسیلیس هم ITZ از تراکم بالایی برخوردار است.

۹-۲- تاثیر پارامترهای مختلف در مکانیک بیرون کشیدگی الیاف

رفتار بتن مسلح با الیاف تا حد زیادی به مشخصات الیاف، ماتریس و اتصال بین الیاف و ماتریس مبتنی بر سیمان بستگی دارد. خصوصیات مکانیکی اتصال ماتریس و الیاف را می توان با استفاده از تست های خروجی الیاف های فردی ارزیابی کرد. تنظیمات متنوعی برای آزمون های بیرون کشیدگی الیاف استفاده شده است. دو پیکربندی معمولی در شکل (۲-۵) نشان داده شده است. در ابتدایی ترین حالت (a)، الیاف در جهت محور

طولی آن از ماتریس کشیده می‌شوند. بارگیری می‌تواند به طور مستقیم در انتهای آزاد فیبر یا با قرارگیری هر دو انتهای فیبر در ماتریس اعمال شود (b)، این روش هنگامی که گرفتن فیبر مشکل ساز است مفید واقع می‌شود [1].



شکل ۶-۲ (آزمون بیرون کشیدگی الیاف منفرد از ماتریس پایه سیمانی [1])

۲-۹-۲- جهت گیری الیاف

در بتن مسلح با الیاف، الیاف بطور معمول پراکنده می‌شوند، زاویه انحراف الیاف از جهت تنش‌های کششی تأثیر زیادی در مقاومت بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس دارد (شکل ۲-۵-۲). آزمایش بیرون کشیدگی الیاف نشان داده است که زاویه ورود الیاف ϕ در ماتریس از چند طریق بر مقاومت بیرون کشیدگی تأثیر می‌گذارد:

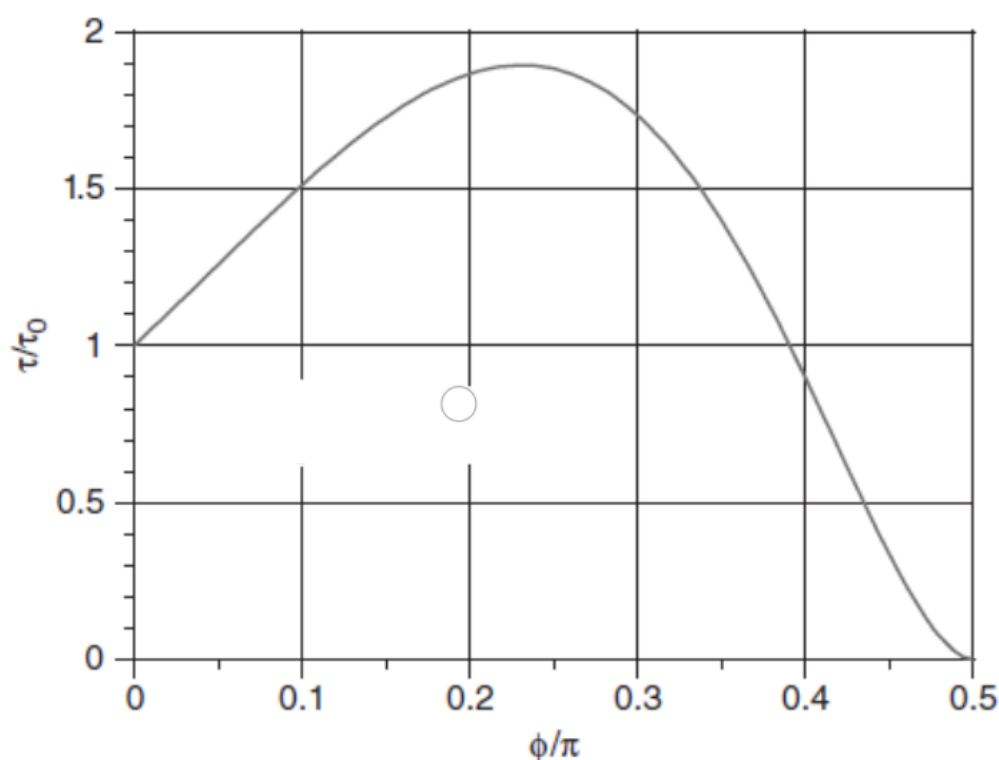
۱. با زاویه ورود غیر صفر، مقاومت اصطکاک در برابر خروج به دلیل تحمل الیاف در مقابل ماتریس (به اصطلاح اثر گرمادگی^۱) افزایش می‌یابد.

۲. زاویه ورود غیر صفر دلالت بر این دارد که الیاف تغییر شکل خمشی را تجربه می‌کند، در این حالت اگر الیاف دارای شکل پذیری زیاد و مدول الاستیسیته کم باشند به راحتی خم شده و در نتیجه مقاومت بیرون کشیدگی افزایش می‌یابد. اگر الیاف دارای مدول الاستیسیته زیاد یا الیاف با خاصیت شکنندگی مورد استفاده قرار گیرد، خمش موضعی و نیروی محوری باعث

¹ snubbing effect

تخریب ماتریس یا شکست الیاف می‌شود.

۳. برای زاویه‌های ورود شدید، تمایل به پوسته شدن ماتریس در نزدیکی نقطه ورود الیاف وجود دارد.



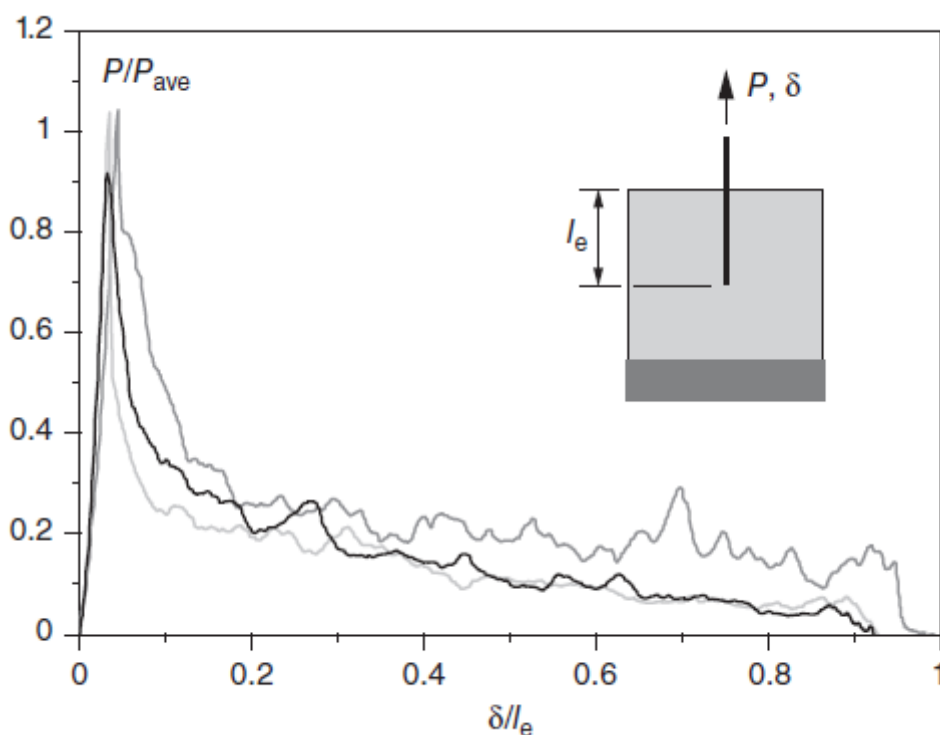
شکل ۷-۲ (اثر زاویه ورود الیاف در مقاومت بیرون کشیدگی الیاف [1])

با توجه به شکل (۲-۶) و به طور کلی زاویه های ورود معتدل (تا زاویه های حدود ۴۵ درجه) باعث افزایش استحکام و سختی بیرون کشیدگی می‌شوند در حالی که زاویه های ورود بزرگ تأثیر متضاد دارند. در شکل τ_0 مقاومت پیوستگی در حالت زاویه ورود صفر درجه می‌باشد [1].

۳-۹-۲- شکل الیاف

برای ایجاد خصوصیات مکانیکی بهتر در بتن‌های الیافی، شناخت و درک رفتار الیاف در زمان بیرون کشیده شدن از بتن حائز اهمیت است. اصطکاک و مهار مکانیکی الیاف رابطه مستقیم با مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن از ماتریس دارند. اصطکاک به کیفیت و جزئیات سطح تماس الیاف و ماتریس و خصوصیات مصالح ناحیه تماس بستگی دارد. بنابراین سطح تماس الیاف و ماتریس نقش مهمی در مقاومت بیرون کشیدگی الیاف دارد، ولی با افزایش جابه‌جایی تا حد زیادی از بین می‌رود. مهار مکانیکی ناشی از

هندسۀ الیاف و ایجاد تغییر شکل در آن است. می‌توان به الیاف انتها قلاب‌دار و مارپیچ به عنوان نمونه‌ای از الیاف تغییرشکل یافته اشاره نمود. مهار مکانیکی الیاف بعد از جدا شدن الیاف از ماتریس و اندکی جابه‌جایی فعال شده و بسته به نوع و کیفیت مهار مکانیکی تا تغییر شکل‌های زیاد مقاومت خود را حفظ می‌کند. در مورد الیاف مستقیم (بدون تغییر شکل)، فرض بر این است که خواص پیوستگی بین سطح الیاف و ماتریس در طول تعبیه شده یکنواخت هستند. شکل (۷-۲) رفتار بیرون کشیدگی الیاف صاف فولادی را نشان می‌دهد. با رسیدن نیروی بیرون کشیدگی به قدرت چسبندگی موجود بین الیاف و ماتریس جداشدگی الیاف از ماتریس آغاز می‌شود.

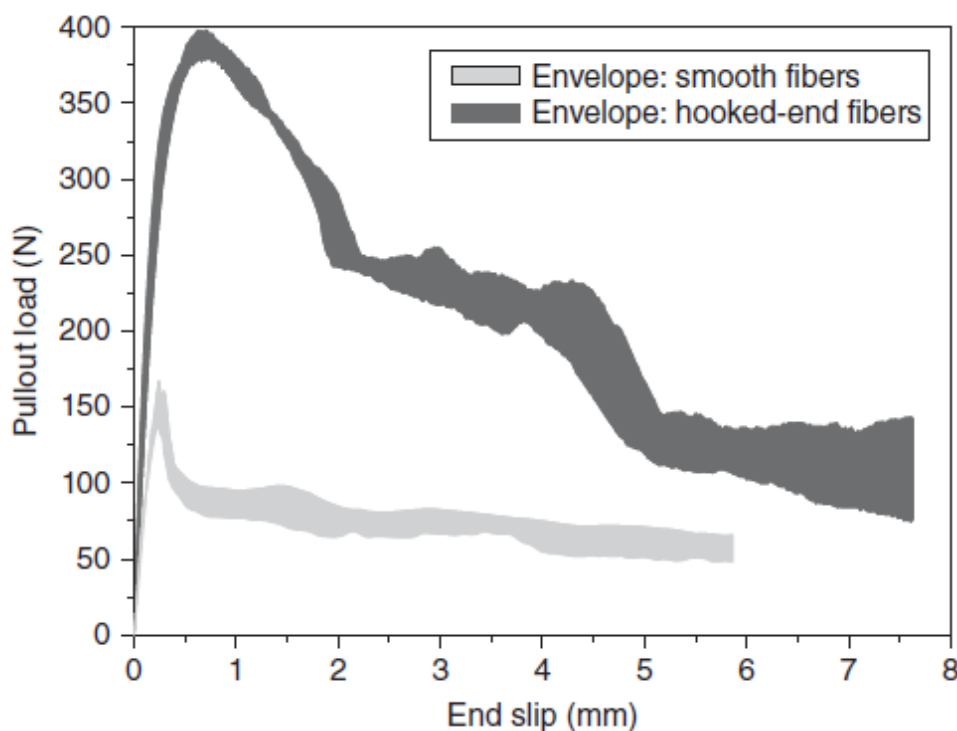


شکل ۸-۲) رفتار بیرون کشیدگی الیاف صاف [1]

در مرحله جداشدگی الیاف از ماتریس تنش برشی الاستیک در سطح تماس الیاف و ماتریس از مقاومت پیوستگی بین آن‌ها بیشتر می‌شود و ناحیه جداشدگی به تدریج تمام طول الیاف را در بر می‌گیرد. سپس با افزایش تغییر مکان، الیاف به طور کامل از ماتریس جدا شده و مقاومت بیرون کشیدگی به طور کامل توسط اصطکاک تأمین می‌شود. با افزایش جابه‌جایی، مقاومت بیرون کشیدگی الیاف فولادی که در ماتریس معمولی مدفون شده‌اند کاهش پیدا می‌کند. اما در مورد الیاف مصنوعی مقاومت ناشی از اصطکاک با لغزش الیاف افزایش می‌یابد که علت آن خراشیده شدن سطح آن‌ها روی ماتریس می‌باشد. اگر از ماتریس سیمانی با مقاومت بالا استفاده شود، افت مقاومت بیرون کشیدگی ناشی از اصطکاک کاهش می‌یابد [1].

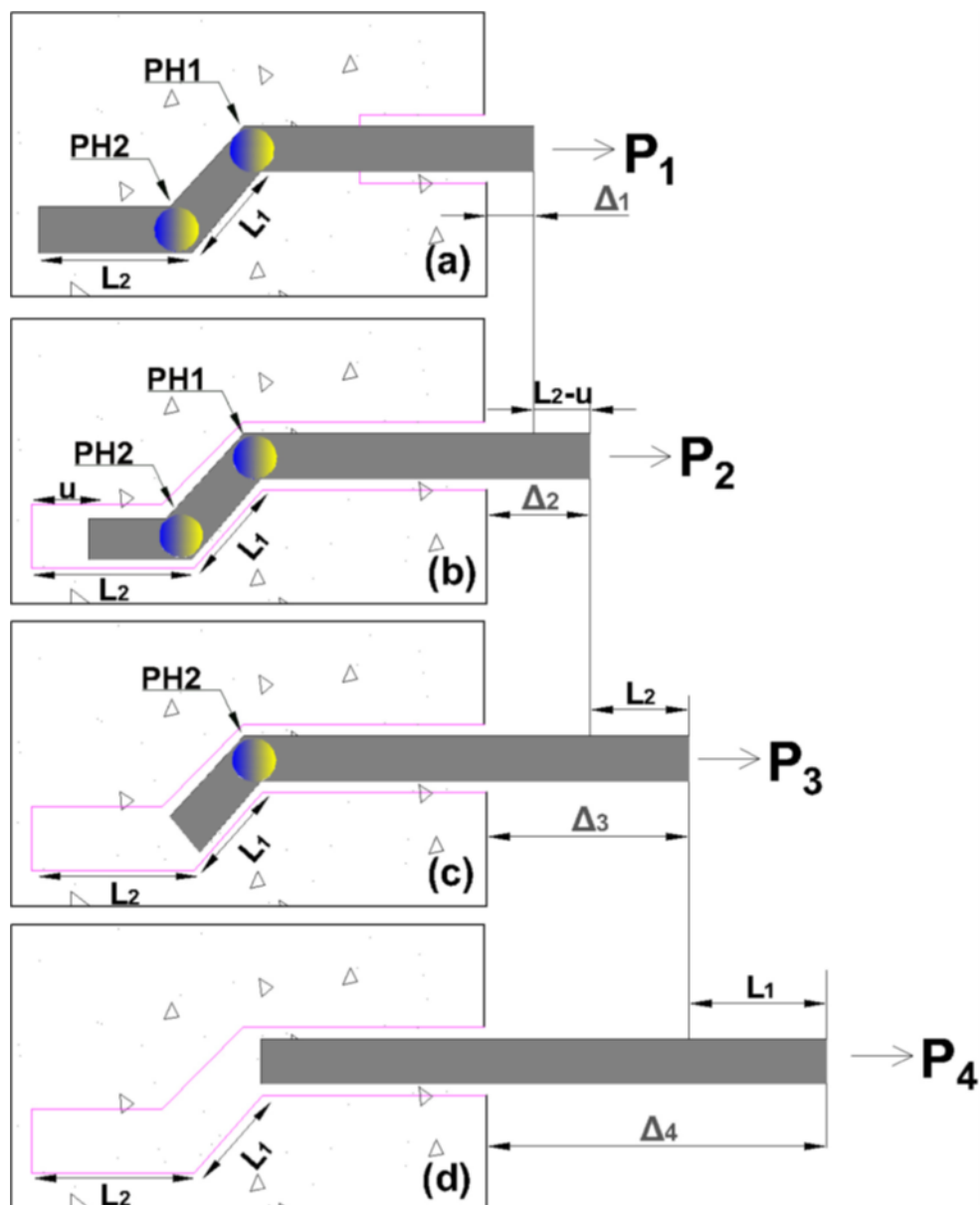
چسبندگی ایجاد شده توسط الیاف صاف برای کامپوزیت‌های سیمانی با کارایی بالا کافی نیست و به همین دلیل، بیشتر از الیاف شکل نامنظم که اجازه می‌دهد اثر لنگر مکانیکی را داشته باشند، استفاده می‌شود.

شود. این نوع الیاف برای فعال کردن تأثیر لنگر مکانیکی به جابجایی‌های بزرگ نیاز دارند و بنابراین قلاب پس از ترک خوردگی ماتریس مؤثر می‌شود. اثر لنگرگاه مکانیکی برای بهبود مقاومت، ظرفیت جذب انرژی و ایجاد ترک‌های متعدد مهم است. با توجه به شکل (۲-۶) مانند الیاف صاف، الیاف قلاب‌دار نیز با چسبندگی و اصطکاک در برابر عمل خروج مقاومت می‌کنند، اما قلاب اثر محلی در انتهای فیبر ایجاد می‌کند که باعث افزایش قدرت بیرون کشیدن و جذب انرژی می‌شود [9]



شکل ۹-۲ (مقایسه بیرون کشیدگی الیاف صاف با الیاف قلاب‌دار [1]

در مورد الیاف قلاب‌دار مرحله‌ی جداسازی الیاف از ماتریس دقیقاً همانند الیاف صاف می‌باشد. اما قبل از رسیدن به مرحله بیرون کشیدگی اصطکاکی، مرحله مهار مکانیکی قلاب انتهایی فرا می‌رسد. در این مرحله تغییر شکل و حرکت الیاف در ماتریس باعث ایجاد مفصل پلاستیک می‌شود و در حین بیرون کشیدگی الیاف این مفصل پلاستیک جابه‌جا خواهند شد. برای مثال با توجه به شکل (۲-۷) در شروع مرحله مذکور (a) دو مفصل پلاستیک (PH1, PH2) ایجاد می‌شود و بعد از مقدار مشخصی بیرون کشیدگی یک مفصل پلاستیک حذف شده و تنها یک مفصل پلاستیک (PH2) باقی می‌ماند. پس از این مرحله (C) جداسازی کامل الیاف و بیرون کشیدگی اصطکاکی ایجاد می‌شود [10]. سهم قلاب بستگی به خصوصیات فیبر، هندسه قلاب، زاویه شیب، قطر فیبر و طول قلاب (L1, L2) دارد [9]



شکل (۱۰-۲) مراحل بیرون کشیدگی الیاف فولادی قلابدار [10]

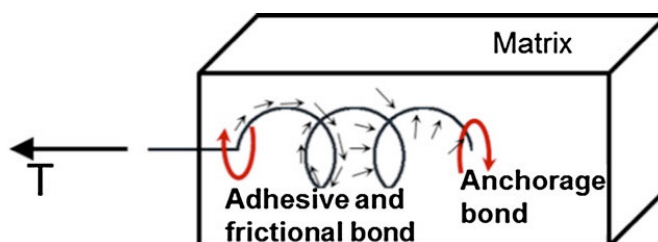
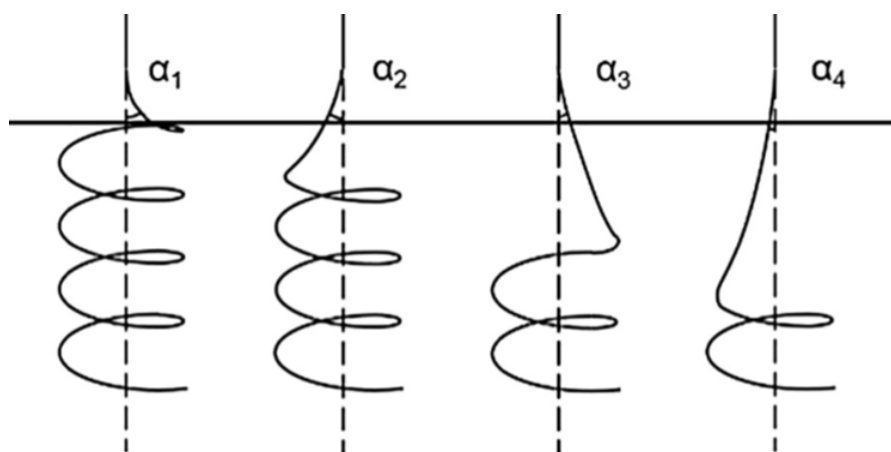
هندسه‌ها و شکل‌های مختلف الیاف فولادی برای درک و افزایش استحکام اتصال الیاف فولادی در ماتریس بتنی به شدت مورد تحقیق قرار گرفته است. این هندسه‌ها شامل شکل صاف، قلابدار، مارپیچ و ... برای مقایسه تأثیر این الیاف مختلف بر روی خواص مکانیکی بتن الیافی است. الیاف فولادی به شکل مارپیچ اخیراً برای افزایش استحکام اتصال الیاف با ماتریس بتن پیشنهاد شده است. تعدادی از مشاهدات آزمایشگاهی در سال‌های اخیر برتری هندسه مارپیچی الیاف فولادی نسبت به سایر انواع الیاف از نظر شکل پذیری، قابلیت کنترل ترک، استحکام پویا و جذب انرژی را نشان می‌دهد [11].

هندسه‌ی الیاف مارپیچ در شکل (۲-۸) نشان داده شده است. این الیاف شامل مشخصاتی چون طول الیاف، فاصله‌ی طولی دو پیچ از یکدیگر، قطر خارجی و داخلی الیاف، تعداد پیچ‌ها و ضخامت می‌باشد.



شکل (۱۱-۲) الیاف مارپیچ

بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ به عواملی چون طول دفن شدگی الیاف در ماتریس، سرعت بیرون کشیدگی الیاف، فاصله‌ی طولی دو پیچ از هم و قطر خارجی الیاف وابسته است [11].
شکل (۱۱-۲) رفتار بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ فولادی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۲-۲) بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ [11,12]

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس از پیرامون محیط مارپیچ نسبت به محور مرکزی مارپیچ اتفاق می‌افتد. با بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس و رسیدن به عمق همان‌طور که در شکل مشخص است زاویه الیاف نسبت به محور مرکزی کاهش می‌یابد. برای بیرون کشیدن فیبر در عمق ماتریس بتن، حجم زیادی از بتن بر آن غلبه دارد و در نتیجه نیروی بیرون کشیدگی افزایش می‌یابد [11]. این حالت از بیرون کشیدگی زمانی رخ خواهد داد که مقاومت الیاف بسیار بالا و بتن ضعیف عمل کند. با توجه به شکل (۱۱-۲) اگر بخواهیم بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ را در چند مرحله توضیح دهیم. در مرحله‌ی اول مانند الیاف صاف فولادی با افزایش نیروی بیرون کشیدگی تنش برشی الاستیک در سطح

تماس الیاف و ماتریس از مقاومت پیوستگی بین آن‌ها بیشتر شده و به تدریج ناحیه جداشدگی تمام طول الیاف را در بر می‌گیرد. در این مرحله مقاومت بیرون کشیدگی به کمک تنش چسبندگی ماتریس و الیاف و همچنین اصطکاک بین آن‌ها تامین می‌شود. در مرحله دوم چسبندگی بین الیاف و ماتریس از بین رفته و مقاومت بیرون کشیدگی در این مرحله ترکیبی از اصطکاک و مهار مکانیکی الیاف است. با افزایش بیرون کشیدگی، الیاف شروع به تغییر شکل دادن می‌کند. تغییر شکل الیاف در هنگام بیرون کشیدگی آن از بتن سبب ایجاد مفصل پلاستیک می‌شود و با افزایش جابه‌جایی الیاف این مفاصل پلاستیک جابه‌جا می‌شوند. اگر هر پیچ را یک مفصل در نظر بگیریم به ترتیب با بیرون کشیدگی الیاف از تعداد این مفاصل کاسته شده و در نهایت بیرون کشیدگی کامل رخ می‌دهد.

مفصل پلاستیک ایجاد شده در هنگام بیرون کشیدگی الیاف سبب افزایش مقاومت بیرون کشیدگی الیاف می‌شود. با این حال افزایش بیش از حد طول دفرم شدن الیاف و افزایش تعداد پیچ‌ها باعث مهار مکانیکی بیش از حد شده و موجب گسیختگی الیاف قبل از بیرون کشیدگی کامل آن می‌شود. لازم به ذکر است که مقاومت پیوستگی ابتدایی بین الیاف مارپیچ و ماتریس کمتر از الیاف قلاب‌دار است. به همین دلیل ساخت الیاف مارپیچ با انتهای قلاب‌دار توصیه می‌شود [11].

۱۰-۲- آیین‌نامه‌ها و استانداردهای بتن‌الیافی

در این بخش آخرین نسخه‌ی آیین‌نامه‌ها و استانداردهای مرتبط با بتن‌الیافی با عنوان و سال انتشار ذکر شده است.

۱-۱۰-۲- مجموعه استانداردهای ASTM

1. ASTM C 1116/C 1116M -15a: Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete.
2. ASTM A820 / A820M-16: Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete.
3. ASTM C39 / C39M-20: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
4. ASTM C 1609/C 1609M-19a: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading).
5. ASTM C1550 -19: Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)
6. ASTM C1765 -19: Standard Specification for Steel Fiber Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe

7. ASTM C1579-13: Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert)
8. ASTM C1666/C1666M-08(2015): Standard Specification for Alkali Resistant (AR) Glass Fiber for GFRC and Fiber-Reinforced Concrete and Cement
9. ASTM C1230-96(2015): Standard Test Method for Performing Tension Tests on Glass-Fiber Reinforced Concrete (GFRC) Bonding Pads
10. ASTM C1399/C1399M-10(2015): Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete
11. ASTM C496/C496M-17: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens
12. ASTM C995-01: Standard Test Method for Time of Flow of Fiber-Reinforced Concrete through Inverted Slump Cone (Withdrawn 2008)
13. ASTM C1818-19: Standard Specification for Synthetic Fiber Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe
14. ASTM C947-03(2016): Standard Test Method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber-Reinforced Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)
15. ASTM C948-81(2016) Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete.
16. ASTM D7357-07(2019): Standard Specification for Cellulose Fibers for Fiber-Reinforced Concrete
17. ASTM C1154-06(2016): Standard Terminology for Non-Asbestos Fiber-Reinforced Cement Products
18. ASTM C33/C33M-18: Standard Specification for Concrete Aggregates
19. ASTM C150/C150M-19a: Standard Specification for Portland cement
20. ASTM WK63419: New Test Method for Evaluating the Tensile Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Cylindrical Specimens with Double-Punch Loading).

۲-۱۰-۲- استانداردها و گزارش‌های ACI

1. ACI 544.1R-96: Report on Fiber Reinforced Concrete (Reapproved 2009)
2. ACI 544.2R-17: Report on the Measurement of Fresh State Properties and Fiber Dispersion of Fiber-Reinforced Concrete
3. ACI 544.3R-08: Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete
4. ACI 544.4R-18: Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete
5. ACI 544.5R-10: Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete
6. ACI 544.6R-15 Report on Design and Construction of Steel Fiber-Reinforced Concrete Elevated Slabs
7. ACI 544.7R-16 Report on Design and Construction of Fiber-Reinforced Precast Concrete Tunnel Segments
8. ACI 544.8R-16: Report on Indirect Method to Obtain Stress-Strain Response of Fiber-Reinforced Concrete (FRC)
9. ACI 544.9R-17: Report on Measuring Mechanical Properties of Hardened Fiber-Reinforced Concrete
10. ACI 549.5R-16 Report on Spray-up and Continuous Strand Glass Fiber Reinforced Concrete (GFRC)
11. ACI 549.3R-09 Report on Glass Fiber-Reinforced Concrete Premix (Reapproved 2017)

۲-۱۰-۳- آیین‌نامه‌های RILEM-USACE-JSCE-FIB

RILEM-fib X International Symposium on Fibre Reinforced Concrete - BEFIB2020

FRC 2018 - 3rd ACI-fib-RILEM Workshop on Fibre Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications

۱۱-۲- مروری بر ادبیات فنی

در این بخش از پایان نامه تحقیقات و مطالعات پیشین صورت گرفته در خصوص بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف فولادی از ماتریس بتنی ارائه شده است.

سال ۲۰۱۵ Facundo Isla و همکارانش مجموعه ای از آزمایشات تست بیرون کشیدگی الیاف را برای ۶ مدل مختلف الیاف فولادی (صاف و قلابدار) با زوایای تمایل مختلف (۳۰ و ۶۰ درجه) استخراج برای دو نوع ماتریس متفاوت بررسی کردند. در این مطالعه اثر لنگر قلاب، تأثیر هندسه الیاف و باریک بودن، زاویه تمایل الیاف و نوع و قدرت ماتریس مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده شده است که زاویه تمایل الیاف روی استحکام کشش الیاف (مقاومت بیرون کشیدگی) تأثیر می‌گذارد و می‌تواند منجر به شکستن الیاف شود. هدف اصلی از سلسله آزمایشات بیرون کشیدگی گزارش شده در این مقاله، به دست آوردن مجموعه کاملی از نتایج است که در آن می‌توان اثر استحکام و شکل الیاف (قطر، طول، شکل نهایی)، نوع ماتریس و تمایلات الیاف را تحلیل کرد.

نتیجه گیری زیر را می‌توان از آزمون های بیرون کشیدگی الیاف بیان کرد:

- تنوع بسیار بالایی از نیروی بیرون کشیدگی برای بعضی از الیاف ها و ماتریس های یکسان بدست آمده است.
- با توجه به اثر لنگر مکانیکی فراهم شده توسط قلاب که مقاومت در برابر بیرون کشیدگی الیاف را افزایش می‌دهد، بین پاسخ بیرون کشیدن الیاف مستقیم و الیاف قلابدار تفاوت زیادی وجود دارد. در الیاف مستقیم، افزایش طول تعبیه شده باعث افزایش مقاومت در برابر بیرون کشیدگی می‌شود. در مقابل، برای الیاف قلابدار، استحکام خروج به شدت به شکل قلاب بستگی دارد و طول تعبیه شده در مقاومت بیرون کشیدگی نقش ثانویه ای دارد.
- مقاومت بیرون کشیدگی با مقاومت ماتریس رابطه‌ی مستقیم دارد. همچنین حضور سنگ دانه درشت در ماتریس بتن بر قدرت بیرون کشیدن الیاف تأثیر می‌گذارد و از یک طرف، مقاومت پیوستگی الیاف و ماتریس را کاهش می‌دهد، زیرا باعث کاهش جمع شدن خمیر سیمان در اطراف الیاف می‌شود، از طرف دیگر، وجود دانه درشت باعث افزایش اثر لنگر مکانیکی الیاف قلابدار با توجه به ماتریس می‌شود (این اثر در مورد بتن کم مقاومت که اختلاف بین مقاومت ملات و مقاومت دانه درشت بیشتر است، شدیدتر است).
- مقاومت بیرون کشیدگی از یک ماتریس بتنی همیشه از یک ماتریس ملات سیمانی بیشتر است. به همین دلیل، بهتر است از نمونه های بتونی برای به دست آوردن پاسخ بیرون کشیدگی استفاده شود زیرا این ها بهتر نشان دهنده رفتار الیاف در FRC هستند.

- رفتار بیرون کشیدگی الیاف مایل با الیاف تراز بدون زاویه مایل متفاوت است. جابجایی مربوط به نیروی بیرون کشیدن، همیشه برای الیاف مایل نسبت به الیاف تراز بیشتر است. تفاوت این امر به دلیل خرابی ماتریس است که باعث کاهش طول تعبیه شده و اجازه می دهد چرخش فیبر باعث جابجایی اضافی بدون لغزش الیاف شود.

- گسیختگی الیاف قبل از بیرون کشیدگی کامل باعث از دست رفتن کل ظرفیت انتقال بار می شود. نتایج تجربی نشان می دهد که شکست الیاف به سطح اتصال ماتریس و الیاف بستگی دارد. این رابطه باید هنگام طراحی FRC به دقت مورد بررسی قرار گیرد تا از خرابی الیاف جلوگیری شود [9].

سال ۲۰۱۷ Yifei Hao و Hong Hao رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی با هندسه مارپیچی از ماتریس بتنی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر این، الیاف فولادی با انتهای قلاب نیز آماده شده و برای مقایسه آزمایش شدند. الیاف مارپیچی با خصوصیات هندسی مختلف مانند فاصله ی دو پیچ از هم (طول گام^۱)، طول دفن شدگی الیاف و قطر الیاف از ماتریس بتن با سرعت های مختلف بیرون کشیده شدند و بر اساس نتایج تجربی، تأثیرات متغیرهای مذکور مورد بررسی قرار گرفت. از طریق تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش، ترکیب الیاف قلاب دار و الیاف مارپیچ به عنوان یک تکنیک تقویت الیاف فولادی ترکیبی به منظور بهبود بیشتر عملکرد مواد و سازه های SFRC^۲ (بتن مسلح به الیاف مارپیچ) ارائه شد، زیرا الیاف مارپیچی دارای تغییر شکل پذیری بهتری است اما مقاومت پیوستگی اولیه بین الیاف و ماتریس نسبتاً کمتر از الیاف انتهای قلاب دار است. آزمایشات در این مطالعه اثربخشی این تکنیک در افزایش ظرفیت سازه بتن مسلح را اثبات کرده است.

ویژگی های رفتار بیرون کشیدگی الیاف مارپیچی به شرح زیر خلاصه می شود:

- به طور کلی، چندین قله (نیروی بیشینه) در نمودار نیرو-لغزش مشاهده شد. قله های متعدد، قدرت پیوند الیاف و ماتریس را در اعماق مختلف و زاویه های شیب در امتداد الیاف مارپیچ را نشان می دهد. برای ایجاد هر قله نیروی بیرون کشیدن به تدریج افزایش می یابد تا رسیدن به مقاومت ماتریس، سپس قطعه ای از ماتریس بتن از سطح بتن (اطراف الیاف) تخلیه شده و نیروی بیرون کشیدگی کاهش یافته است. این روند رو به بالا و پایین نیروی بیرون کشیدگی با توجه به لغزش یا عرض ترک در کل تست کشش ادامه یافته و در نتیجه چندین قله را نشان می دهد (هر قله بیان گر یک پیچ است).

- هنگامی که الیاف کاملاً از ماتریس بتن بیرون کشیده شدند، الیاف فولادی با شکل مارپیچ دارای ۶۰-۸۰٪ پیوند اصطکاک بالاتر از الیاف قلاب دار بود.

- در آزمایش هایی که طول جاسازی از ۱۰ میلی متر به ۲۰ میلی متر افزایش یافت، بیرون کشیدگی کامل الیاف به پارگی الیاف تغییر یافت که از ظرفیت کامل مقاومت فولاد استفاده می شود.

¹ pitch length

² Spiral steel fiber reinforced concrete

- افزایش بیشتر طول تعبیه منجر به تغییرات جزء شد. با طول تعبیه ۱۰ میلی‌متر، سرعت بیرون کشیدگی تأثیر معنی داری بر رفتار بیرون کشیدگی داشت (با افزایش سرعت از ۰.۲۵ به ۰.۲۵ مقاومت پیوستگی الیاف و ماتریس افزایش یافت)، اما با افزایش طول تعبیه این تأثیر کمتر شد (پارگی الیاف رخ داد).

- مقاومت بیرون کشیدگی الیاف در مراحل اولیه می‌تواند با افزایش فاصله‌ی دو پیچ الیاف یا کاهش قطر الیاف به طور موثر بهبود یابد [11].

سال ۲۰۱۸ Sadoon Abdallah و همکاران به بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف 5D, 4D, 3D از بتن با مقاومت عادی (NSC)، بتن با مقاومت متوسط (MSC) و بتن با مقاومت بالا (HSC) پرداختند و تمرکز آن‌ها روی عملکرد نیرو-لغزش بیرون کشیدگی الیاف برای پیش‌بینی یک مدل تحلیلی بود. الیاف‌های انتهایی قلاب 4D (خم دوپل) و 5D (خم سه گانه) به منظور افزایش ظرفیت لنگر یک سازه بتنی برای تحمل بارهای پیچیده شامل تنش، فشرده سازی و برشی طراحی شده‌اند. بر اساس تحقیقات تجربی، یک لحظه الاستیک-پلاستیک در زمان بیرون کشیدگی الیاف پیشنهاد شده است که مفصل ایجاد شده در اثر قلاب جزئی از پلاستیک است که در هنگام بیرون کشیدن هر الیاف فولادی با مقطع دایره شکل اتفاق می‌افتد. در لحظه الاستیک-پلاستیک فرض بر این است که قسمت پلاستیک ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد از ناحیه مقطع فیبر را فرا می‌گیرد.

نتایج به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- در این مطالعه، یک مدل پاسخ الاستیک-پلاستیک برای پیش‌بینی رفتار بیرون کشیدگی سه الیاف انتهایی قلاب جاسازی شده در سه بتن با مقاومت مختلف ایجاد شده است.
- بررسی دقیق تغییر شکل نشان می‌دهد که تغییر شکل و صاف کردن قلاب با افزایش مقاومت ماتریس برای همه الیاف انتهایی قلاب به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.
- این فرضیه که در لحظه الاستیک-پلاستیک، خم پلاستیکی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد مساحت فیبر را در بر می‌گیرد، به ترتیب با الیاف تعبیه شده در NSC، MSC و HSC مطابقت دارد. این مدل همچنین قادر به در نظر گرفتن یک نسبت خم پلاستیکی ۱۰۰٪ بود که در آن شرایط برای پارگی فیبر ممکن است رخ دهد.
- در هر مقایسه بین سه الیاف انتهایی قلاب، بیشترین اثر لنگر انداختن توسط قلاب الیاف 5D فراهم شده است که باعث افزایش قابل توجه مقاومت در برابر بیرون کشیدگی می‌شود [10].

در سال ۲۰۱۹ Mohammad Hajsadeghi و همکاران به بهینه سازی خواص هندسی و ماده‌ای الیاف فولادی با استفاده از مدل معتبر سه بعدی غیر خطی المان محدود (FE) پرداختند. مدل FE به عنوان یک واحد آزمایشگاهی مجازی به منظور بررسی عملکرد خروجی الیاف فولادی به اشکال مختلفی مانند الیاف فلزی انتهایی قلابدار و مارپیچ استفاده می‌شود. تجزیه و تحلیل خروجی اولیه FE حاکی از آن بود که بهینه سازی الیاف با پیکربندی مارپیچ (تنظیم خواص هندسی و ماده الیاف) می‌تواند به الیاف فولادی با کارایی بالا منجر شود. از این رو چنین الیافی برای روش بهینه سازی انتخاب می‌شود. به منظور اعتبارسنجی مجدد مدل عددی و تنظیم بیشتر پارامترهای غیرخطی آن برای تقویت شبیه سازی‌های پیش بینی شده، مجموعه‌ای از آزمایشات خروج تجربی روی چهار الیاف فولادی تغییر شکل یافته مارپیچ با خصوصیات هندسی مختلف انجام گرفت. مطالعات پارامتری گسترده‌ای بر روی مواد و خصوصیات هندسی الیاف انجام شد تا اثرات آنها بر عملکرد خروجی الیاف بررسی شود. علاوه بر این، یک معادله تجربی برای تخمین بازده الیاف و طراحی مارپیچ بهینه الیاف فولادی تغییر شکل یافته که در آن خصوصیات هندسی و ماده در نظر گرفته می‌شود، ارائه شد.

خلاصه و نتیجه گیری به شرح زیر است:

- برخلاف الیاف فولادی تغییر شکل یافته معمولی (به عنوان مثال انتهایی قلابدار)، الیاف فولادی تغییر شکل یافته مارپیچ دارای پاسخ مطلوبی پس از نیروی حداکثر بیرون کشیدگی هستند و سخت‌شدگی کرنش (مقاومت در برابر بیرون کشیدگی الیاف) اتفاق می‌افتد و در نتیجه افت نمودار نیرو-لغزش نسبت به الیاف انتهایی قلاب بسیار کمتر و جذب انرژی و شکل پذیری بیشتر است.
- با توجه به نتایج FE، در طول فرایند بیرون کشیدگی الیاف، کل طول جاسازی شده الیاف با پیکربندی‌های قلاب شده در ماتریس (منظور از قلاب پیچ های الیاف مارپیچ است که در بتن قرار می‌گیرند) به مقاومت در برابر خروج از طریق خمش و صاف شدن مکرر الیاف (مهار مکانیکی) کمک می‌کند. این بدان معناست که با بیرون کشیدن چنین الیافی از بتن طول تعبیه شده کاهش می‌یابد و مقاومت بیرون کشیدگی الیاف به طور متناسب کاهش می‌یابد (نرم‌شدگی کرنش). با این وجود، مقاومت خروج فیبرهای تغییر شکل مارپیچ عمدتاً توسط یک صاف شدن مداوم فیبر در محل خروج فیبر از ماتریس تأمین می‌شود و تا زمان برداشت کامل فیبر باعث ایجاد مقاومت مؤثر و نسبتاً یکنواخت می‌شود.
- عملکرد خروجی الیاف تغییر شکل مارپیچ با زاویه تمایل الیاف با توجه به جهت بارگذاری رابطه مثبت دارد. بدیهی است که با افزایش تعداد چرخش و یا قطر بیرونی الیاف، این زاویه افزایش می‌یابد و با افزایش طول فیبر و یا قطر کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است در دو الیاف با مشخصات یکسان اگرچه الیافی که دارای قطر بیرونی بیشتری باشد مقاومت بیرون کشیدگی بالاتری در ابتدا دارد، اما با گسیختگی و عدم خروج کامل مواجه می‌شود.
- یک مطالعه پارامتری در مورد مواد و خصوصیات هندسی فیبرها برای بررسی اثرات آنها بر عملکرد خروجی انجام شد و در نهایت یک الیاف فولادی تغییر شکل مارپیچ برای اهداف ساختاری طراحی شد. که این الیاف، الیاف مورد استفاده در پایان‌نامه حاضر می‌باشد که مشخصات آن در فصول آتی آورده شده است [13].

فصل ۳: ارزیابی مشخصات ماتریس پایه سمایی

چکیده فصل

استفاده از ماتریس سیمانی به عنوان ماتریس پایه در ساخت مصالح مسلح به الیاف (بتن الیافی) باعث ضرورت شناخت و ارزیابی خواص مکانیکی این مواد شده است. بنابراین در این فصل، با معرفی مصالح مصرفی مورد استفاده در ساخت این ماتریس‌ها، طرح اختلاط اولیه و روند دستیابی به طرح اختلاط نهایی مورد بررسی قرار گرفته و همچنین به منظور ارزیابی خصوصیات مکانیکی ماتریس پایه سیمانی، ضمن بررسی مراحل ساخت و شیوه عمل‌آوری نمونه‌ها، نحوه انجام آزمون تعیین مقاومت فشاری، با توجه به استانداردهای مربوطه ارائه گردیده است. در نهایت با انجام آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های ساخته شده بتنی، نتیجه مقاومت فشاری بتن ساخته شده با طرح اختلاط نهایی بدست آمده و ارائه گردیده است.

۱-۳- مصالح

۱-۱-۳- سیمان

سیمان در ساخت بتن از اهمیت بالای برخوردار است. با توجه به درصد بالا سیمان نسبت به مصالح دیگر و در نتیجه تولید حرارت زیاد در ساخت بتن به دلیل هیدراسیون سیمان، استفاده از سیمان تیپ II توصیه می‌شود. سازگاری نوع سیمان با افزودنی‌های به کار رفته در بتن نیز حائز اهمیت است. اثر افزودنی‌های کاهنده آب (فوق روان کننده) به طور قابل ملاحظه‌ای تابع ترکیبات سیمان است. سیمان‌هایی که مواد قلیایی کمتری دارند، مقاومت بیشتری نیز خواهند داشت زیرا وجود مواد قلیایی باعث افزایش نسبت آب به سیمان شده و کارایی مخلوط را نیز کاهش می‌دهند. با توجه به اینکه در تولید سیمان تیپ II درصد مواد قلیایی به حداقل مقدار ممکن می‌رسد، این سیمان می‌تواند انتخاب مناسبی برای ساخت بتن مقاومت بالا نیز باشد. در این پژوهش سیمان پرتلند تیپ II در کارخانه سیمان شاهرود تولید شده مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیبات شیمیایی این سیمان به کمک آزمایش جذب اتمی مواد تعیین گردیده و در جدول (۱-۳) ارائه شده است.

جدول (۱-۳) ترکیبات شیمیایی سیمان [بر اساس اعلام تولید کننده]

ترکیب شیمیایی	مقدار (درصد)
Silica(SiO_2)	۱۹/۰۳
Alumina(Al_2O_3)	۴/۴۵
Iron Oxide(Fe_2O_3)	۴/۰۲
Lime(CaO)	۶۳/۳۵
Magnesia(MgO)	۱/۵۴
Sulphuric anhydride(SO_3)	۲/۷۰
Ratio of Alumina/Iron Oxide	۱/۱۰

سیمان استفاده شده دارای وزن مخصوص ۳/۱۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. در اثر وارد آمدن فشار در طی مراحل حمل و انبار کردن، سیمان دارای کلوخه‌هایی می‌باشد. لذا به منظور بالا بردن کیفیت بتن، قبل از استفاده از الک ۵۰ عبور داده شد.

۲-۱-۳- سنگدانه

یکی از عوامل موثر در رفتار بتن دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در ساخت آن است. افزایش سایز و مساحت سنگدانه‌ها باعث کاهش تنش در سطح تماس سنگدانه و خمیر سیمان می‌شود. همچنین سنگدانه‌های ریز موجب کاهش تمرکز تنش در سطح تماس آن‌ها با ماتریس شده و منجر به مقاومت بالاتری در بتن خواهد شد. بنابراین با توجه به مقاومت مورد نظر در این تحقیق، جزئیات دانه‌بندی سنگدانه‌ها به تفکیک دو بخش درشت‌دانه و ریزدانه با توجه به استاندارد ASTM C136 به شرح جدول (۲-۳) است.

جدول (۲-۳) جزئیات دانه بندی سنگدانه

ریزدانه		درشت‌دانه	
مقدار (درصد)	بعد سنگدانه (میلی‌متر)	مقدار (درصد)	بعد سنگدانه (میلی‌متر)
-	۰ - ۰/۱۵	-	۰ - ۰/۱۵
-	۰/۱۵ - ۰/۳	-	۰/۱۵ - ۰/۳
-	۰/۳ - ۰/۶	-	۰/۳ - ۰/۶
۲	۰/۶ - ۱/۱۸	۲	۰/۶ - ۱/۱۸
۳	۱/۱۸ - ۲/۳۶	۳	۱/۱۸ - ۲/۳۶
۱۷	۲/۳۶ - ۴/۷۵	۱۷	۲/۳۶ - ۴/۷۵
۷۸	۴/۷۵ - ۹/۵	۷۸	۴/۷۵ - ۹/۵

دانه‌بندی به نحوی انتخاب شده است که علاوه بر تامین مقاومت مورد نظر و رعایت استانداردها کاربردی نیز باشد. همچنین محدودیت‌های مربوط به حداکثر بعد سنگدانه با توجه به اندازه‌ی ابعاد قالب نیز رعایت شده است. سنگدانه‌ها از نوع معدنی با وزن مخصوص ۲۱۵۰ و حداکثر بعد ۹/۵ میلی‌متر هستند.

۲-۳- ارزیابی طرح اختلاط

در ابتدا طرح اختلاط اولیه بر مبنای طرح اختلاط محققان پیشین استفاده گردید. این طرح شامل میکروسیلس و فوق‌روان کننده نیز بود. پس از ساخت یک سری نمونه پول‌اوت و انجام آزمایش بیرون-کشیدگی الیاف با توجه به نتایج حاصل و عدم بیرون کشیدگی کامل الیاف‌ها و همچنین مقاومت فشاری بالای ماتریس تصمیم بر آن شد که در ساخت نمونه‌ها میکروسیلس حذف شود. به دلیل مهار مکانیکی بالای الیاف مارپیچ و همچنین پیوستگی بسیار قوی ایجاد شده بین الیاف و ماتریس توسط میکروسیلس بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس با گسیختگی مواجه می‌شود.

در آزمایش بعدی با حذف میکروسیلس از ماتریس بتنی، بهبود کمی در بیرون کشیدگی الیاف ایجاد شد. اما همچنان با گسیختگی الیاف و عدم بیرون کشیدگی کامل همراه بود. با بررسی دقیق دستگاه بیرون-کشیدگی الیاف که سرعت آن با توجه به تحقیقات قبلی ۰/۳ میلیمتر بر دقیقه ذکر شده بود متوجه عدم صحت این سرعت شده و اصلاحات لازم انجام گردید. با بررسی دستگاه و تعویض موتور آن سرعت بارگذاری به سرعت استاتیکی ۰/۰۲۵ میلیمتر بر ثانیه کاهش یافت و به دنبال آن مشکل گسیختگی الیاف با مقاومت عادی ماتریس بتنی حل شد.

در قسمت بعد طرح اختلاط و روند دقیق اختلاط نهایی آورده شده است.

۳-۳- طرح اختلاط و روند اختلاط

در این مرحله از فعالیت آزمایشگاهی به ساخت ماتریس سیمانی با کارایی و مقاومت مورد نظر و همچنین ارزیابی خصوصیات مکانیکی آن پرداخته می‌شود. طرح اختلاط نهایی ماتریس سیمانی در جدول (۳-۳) ارائه شده است که شامل سه طرح اختلاط با مقاومت‌های متفاوت است. طرح اختلاط ۱ و ۲ مربوط به نمونه‌های آزمایش بیرون کشیدگی الیاف و طرح اختلاط شماره ۳ مربوط به نمونه‌های آزمایش کشش مستقیم است. در این طرح اختلاط، دانه‌بندی سنگدانه‌های استفاده شده در جدول (۲-۳) آورده شده است.

جدول (۳-۳) طرح اختلاط ماتریس پایه سیمانی (برای یک متر مکعب)

ماتریس	ریز دانه (kg)	درشت دانه (kg)	سیمان (kg)	آب (kg)	روان کننده (درصد وزن سیمان)	مقاومت فشاری
۱	۸۸۰	۹۸۸	۳۵۰	۱۸۸	-	۲۰
۲	۶۶۷	۷۹۲	۵۸۰	۲۵۰	-	۳۰
۳	۷۷۰	۸۸۵	۴۶۰	۲۲۰	۰.۶	۲۵

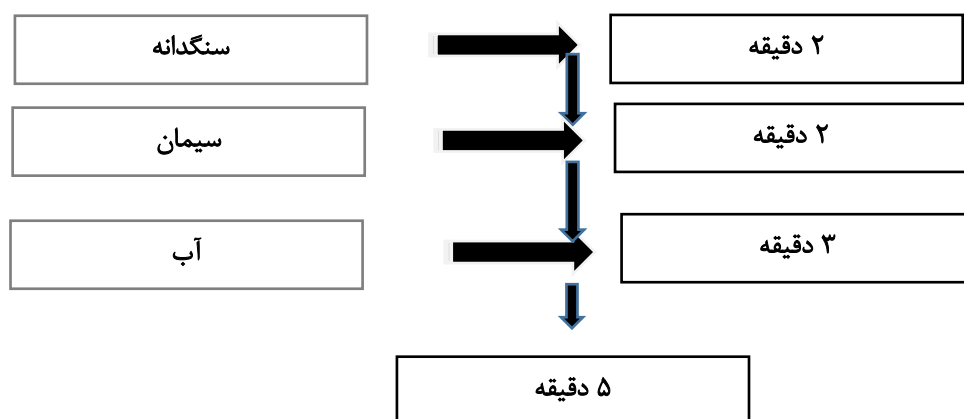
ترتیب روند اختلاط بدین صورت است که در مرحله اول سنگدانه‌ها بصورت خشک حدود ۱۲۰ ثانیه با هم مخلوط می‌شوند، سپس در مرحله دوم سیمان به آن‌ها اضافه شده و مصالح خشک در حدود ۱۲۰ ثانیه دیگر مخلوط می‌شوند. پس از اختلاط کامل مصالح خشک، در مرحله سوم آب به تدریج و در طی مدت زمان ۱۸۰ ثانیه به آن اضافه می‌شود (در صورت استفاده از روان کننده مخلوط آب و روان کننده استفاده می‌شود). با اضافه کردن آب، مخلوط حالت خمیری پیدا کرده و به کارایی مطلوب می‌رسد. در نهایت ۳۰۰ ثانیه دیگر مصالح با یکدیگر مخلوط می‌شود.

مخلوط‌کن‌های استفاده شده برای ساخت نمونه‌های بتنی در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. ساخت نمونه‌های کم حجم با مخلوط‌کن Hobart با حدود ظرفیت ۲ لیتر و نمونه‌های با حجم بالا با استفاده از مخلوط‌کن ELE با حدود ظرفیت ۱۰ لیتر ساخته شدند.



شکل (۳-۱) مخلوط‌کن‌های بکار رفته در ساخت نمونه‌ها

شکل (۳-۲) روند اختلاط را بطور خلاصه نشان می‌دهد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که این روند اختلاط برای هر دو مخلوط‌کن (ELE, Hobart) مناسب بوده و بدین ترتیب مخلوط‌های ساخته شده با حجم کم و حجم بالا مشابه خواهند بود.



شکل (۳-۲) روند طرح اختلاط

۳-۴- ارزیابی خصوصیات مکانیکی ماتریس سیمانی

در این قسمت ویژگی‌های مکانیکی ماتریس پایه سیمانی که شامل مقاومت فشاری ماتریس می‌باشد با ساخت نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای و انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری بدست می‌آید. همچنین در این بخش نحوه ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها و انجام آزمایش توضیح داده شده است.

۳-۴-۱- نحوه ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت ساخت نمونه‌های آزمایش فشاری، قالب‌های فلزی نشان داده شده در شکل (۳-۳) استفاده شده است. پیش از ریختن ماتریس در داخل قالب‌ها، سطوح داخلی قالب‌ها به روغن قالب آغشته شده است. روغن باعث جلوگیری از چسبندگی بتن و قالب و در نتیجه سهولت باز کردن قالب‌ها می‌شود. همچنین از آسیب دیدن نمونه‌ها در حین باز کردن قالب جلوگیری می‌نماید. پس از ریختن ماتریس در داخل قالب، عملیات متراکم کردن آن با بکارگیری میز لرزان و رعایت نکات استاندارد ASTM-C192 انجام می‌شود. به همین منظور بتن در قالب‌ها در ۳ مرحله و هر مرحله ۲۵ ضربه متراکم شده و سپس در حدود ۶۰ ثانیه بر روی میز لرزان قرار داده می‌شوند. سپس سطح نمونه‌ها به کمک یک سطح صاف فلزی پرداخت شده و داخل محفظه‌های پلاستیکی قرار داده می‌شوند تا از تبخیر سطحی آب آن‌ها جلوگیری شود. قالب‌ها بعد از مدت زمان ۲۰-۲۴ ساعت باز شده و نمونه‌ها پس از نام‌گذاری جهت عمل‌آوری با احتیاط در حوضچه قرار داده می‌شوند. تهیه و عمل‌آوری نمونه‌های آزمایشی بتن در آزمایشگاه طبق استاندارد ASTM C192 انجام گرفته است.



شکل ۳-۳) قالب‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری ماتریس بعد از بتن ریزی

شکل (۳-۳) قالب‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌های مکعبی مربوط به آزمایش مقاومت فشاری را بعد از بتن ریزی و عملیات پرداخت سطوح نشان می‌دهد.

۳-۴-۲- عمل‌آوری نمونه‌ها

عمل‌آوری نمونه‌ها در حوضچه‌های آب که محل نگهداری نمونه‌های بتنی هستند انجام شده است. دمای آب این حوضچه‌ها ۲۰ درجه‌ی سانتیگراد بود. نمونه‌ها به مدت ۷ روز در این حوضچه‌ها قرار گرفته و پس از عمل‌آوری برای تست آماده می‌شدند.

در دماهای بالا فرآیند هیدراسیون سیمان با سرعت بیشتری پیشرفت نموده و کریستال‌های C-H-S نیز با سرعت بیشتری تشکیل می‌گردند. همچنین افت دما نیز باعث کاهش سرعت بالا رفتن مقاومت بتن می‌شود. به همین جهت دمای آب حوضچه به صورت روزانه بررسی گردیده است.

۳-۴-۳- مقاومت فشاری ماتریس

مهم‌ترین معیار جهت تعیین کیفیت بتن، مقاومت فشاری آن می‌باشد. آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM-C39 انجام شده است. جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن مورد استفاده در این تحقیق از نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی با ابعاد نمونه‌های مکعبی $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر و ابعاد نمونه‌های استوانه‌ای 300×150 میلی‌متر استفاده شده است. برای ارزیابی مقاومت فشاری با توجه به استاندارد ASTM-C39، ۳ نمونه ساخته شده و تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته‌اند. به دلیل

پراکندگی جزئی نتایج آزمایش مقاومت فشاری، متوسط مقاومت فشاری ۳ نمونه، به عنوان مقاومت فشاری ماتریس سیمانی در نظر گرفته می‌شود. همچنین لازم به ذکر است که علاوه بر استفاده از نمونه‌های ذکر شده برای مشخص کردن مقاومت فشاری ماتریس، همراه با هر سری از نمونه‌های پول اوت یک نمونه مکعبی $100 \times 100 \times 100$ ساخته شده و مقاومت فشاری آن بدست آمده و با مقاومت حاصل از سه نمونه اولیه جهت افزایش دقت مقایسه شده است. در آزمایش مقاومت فشاری نیرو از طریق یک صفحه فلزی با سرعت مشخص به دو سطح نمونه با کنترل جابه‌جایی وارد می‌شود تا بتن مقاومت خود را از دست داده و تخریب شود. سرعت اعمال بار برای نمونه‌های فشاری ۱ میلیمتر بر دقیقه می‌باشد [14]. سرعت بارگذاری می‌بایست طوری باشد که در حدود ۲ الی ۳ دقیقه، نمونه به مقاومت نهایی خود برسد. با ثبت حداکثر نیروی وارد شده و تقسیم آن بر سطح مقطع نمونه می‌توان مقاومت فشاری ماتریس سیمانی را محاسبه نمود [14].

۴-۴-۳- نتایج مقاومت فشاری

در جدول (۴-۳) نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری ارائه شده است. رفتار نمونه‌ها ترد و شکست آن‌ها به صورت ناگهانی رخ می‌دهد. با بررسی میزان حباب‌های هوا موجود در سطوح شکسته شده، می‌توان تراکم ماتریس سیمانی را ارزیابی نمود. با توجه به نتایج حاصله، میانگین مقاومت فشاری ماتریس‌ها برای نمونه‌های آزمایش بیرون کشیدگی الیاف به ترتیب ۲۰ و ۳۰ مگاپاسکال و برای نمونه‌های آزمایش کشش مستقیم ۲۵ مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۴-۳) نتایج آزمایش مقاومت فشاری

	شماره نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت فشاری متوسط (MPa)
ماتریس بتنی C20	۱	۲۱/۷	۲۰/۶
	۲	۱۹/۹	
	۳	۲۰/۱	
ماتریس بتنی C30	۱	۳۱/۲	۳۰/۸
	۲	۳۰/۳	
	۳	۳۱/۰	
ماتریس بتنی C25	۱	۲۵/۲	۲۵/۵
	۲	۲۶/۴	
	۳	۲۴/۸	

۵-۳- نتیجه گیری

در این فصل، ضمن بررسی و شناخت مصالح بکار برده شده در ساخت بتن، سه طرح اختلاط نهایی ارزیابی و تعیین گردید. طرح اختلاط‌های استفاده شده در این تحقیق در جدول (۳-۳) آورده شده است. همچنین مراحل ساخت و شیوه عمل‌آوری نمونه‌ها، نحوه انجام و چیدمان آزمون‌های تعیین مقاومت فشاری با توجه به استانداردهای ASTM ارائه گردید و در انتها با انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های ساخته شده بتنی، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های ماتریس ساخته شده با طرح اختلاط نهایی بدست آمد.

فصل ۴: بررسی رفتار سیرون کشیدگی

الیا ف فولادی از ماتریس بتنی

چکیده فصل

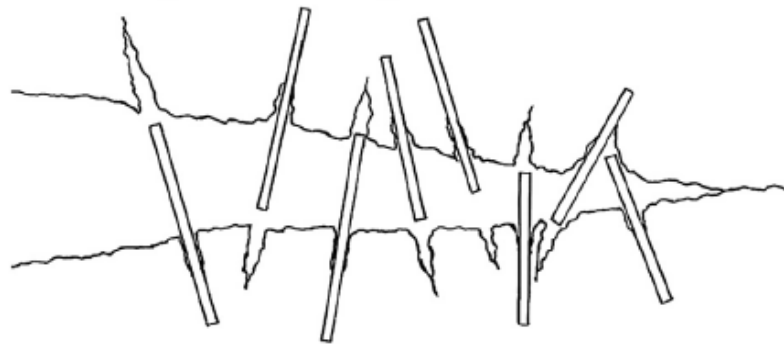
در این فصل مجموعه‌ای از آزمایش‌های بیرون کشیدگی الیاف، متشکل از یک نوع الیاف فولادی مارپیچ با زوایای تمایل مختلف ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه و با طول‌های جایگذاری مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰ میلیمتر استخراج شده از انواع مختلف ماتریس بتنی با مقاومت‌های متفاوت ۲۰ و ۳۰ مگاپاسکال ارائه شده است. اثر لنگر ناشی از مارپیچ الیاف و تأثیر هندسه الیاف، زاویه الیاف و طول جایگذاری الیاف، نوع و قدرت ماتریس بررسی و ارائه شده است. با انجام آزمایش‌های بیرون کشیدگی و بررسی نتایج نشان داده شد که زاویه الیاف، طول مدفون الیاف و مقاومت بتن روی مقاومت بیرون کشیدگی فیبرها تأثیر می‌گذارد. تأثیر زاویه تمایل الیاف نسبت به امتداد بارگذاری، طول جایگذاری الیاف و مقاومت ماتریس بر روی پاسخ بیرون کشیدگی شامل؛ ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی، جابه‌جایی مربوط به نقطه نیروی بیشینه، انرژی بیرون کشیدگی و میزان موثر بودن الیاف در هر حالت مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱-۴- مقدمه

با توجه به آخرین پیشرفت‌های فن آوری در بتن سازه، می‌توان بتن‌های با مقاومت بالایی بدست آورد اما به عنوان یک همتای دیگر، مواد شکننده‌تر می‌شوند. افزودن الیاف در بتن، قابلیت انعطاف پذیری مواد را بهبود می‌بخشد و فیبرها انتشار ترک‌ها را به تأخیر می‌اندازند. اگر الیاف کافی به بتن اضافه شود و به طور یکنواخت توزیع شوند، آن‌ها از انسجام ترک‌های ریز جلوگیری می‌کنند که قدرت ظاهری ماتریس را بهبود می‌بخشد. مهم‌ترین تفاوت در رفتار مکانیکی بتن مسلح به الیاف (FRC) با توجه به بتن ساده در تنش بدست می‌آید. پیشرفت‌ها عمدتاً مربوط به فرآیند انتقال بار از ماتریس به الیاف از طریق ترک‌ها است، شکل (۴-۱). بیرون کشیدگی الیاف مهم‌ترین مکانیزم موثر در مقاومت بالای FRC است. در حین کشیدن الیاف، نیروهایی که سعی در جلوگیری از لغزش الیاف (بیرون کشیدگی الیاف) دارند، ایجاد می‌شوند. در مورد الیاف صاف، این نیروها با چسبندگی و اصطکاک در رابط فیبر و ماتریس سرچشمه می‌گیرند. اگر الیاف مستقیم تغییر شکل پیدا کنند یا از فرآیندهای ویژه‌ای برای تولید هندسه‌های خاص مانند الیاف قلاب‌دار یا مارپیچ استفاده شود، یک جزء مکانیکی اضافی به عنوان نتیجه‌ی اثر لنگر انداخته شده توسط هندسه الیاف بدست می‌آید. بسته به هندسه فیبر، بار را می‌توان از ماتریس به الیاف با یا بدون لغزش منتقل کرد. با این وجود، لغزش فیبر همیشه مطلوب است زیرا باعث بهبود شکل پذیری و مقاومت FRC می‌شود.

الیاف فولادی رفتار سختی الاستوپلاستیکی را تا قبل از پارگی تولید می‌کنند. در الیاف صاف در بیشتر موارد به جای گسیختگی، الیاف پس از این‌که چسبندگی خود را با ماتریس از دست می‌دهند از ماتریس خارج می‌شوند. در طی فرآیند خروج ترکیبی از جداسازی و لغزش در رابط فیبر/ماتریس صورت می‌گیرد. بنابراین، هرچه الیاف طولانی‌تر باشند، مقاومت بیرون کشیدگی نیز بیشتر است. در نتیجه افزایش کاربردها، مطالعات تجربی بسیاری برای بررسی ویژگی‌های FRC و تدوین توصیه‌های طراحی جدید انجام شده است. طراحی مرتبط با پارامترهای زیادی از قبیل نوع، هندسه و محتوای الیاف، استحکام چسبندگی، مقاومت الیاف و ماتریس، توزیع و جهت گیری الیاف است.

از تست‌های بیرون کشیدگی الیاف برای مطالعه مکانیسم لنگر الیاف در یک ماتریس سیمانی استفاده می‌شود. نمونه‌های مورد استفاده برای این آزمایش‌ها معمولاً دو طرفه است. نمونه‌هایی که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از سگ استخوان، نیمه سگ استخوان، منشوری، مکعب و استوانه‌ای. هر نوع نمونه دارای سیستم گرفتن خاص است. آزمایش‌های بیرون کشیدگی الیاف از بتن معمولاً با نرخ بارگذاری کم انجام می‌شود.

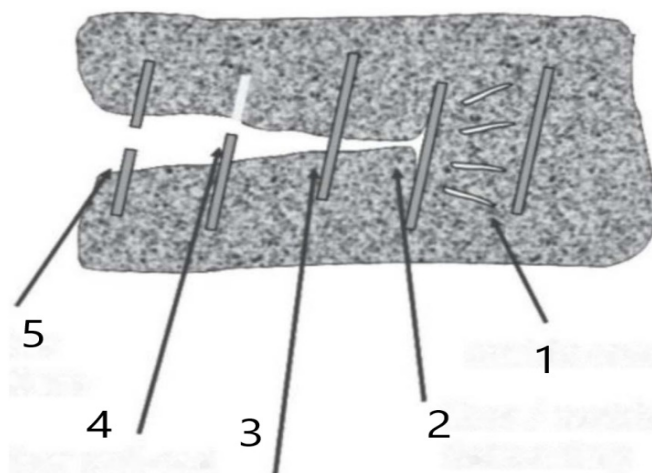


شکل ۱-۴ (جهت‌های مختلف الیاف نسبت به امتداد ترک [15])

تصمیم‌گیری در مورد نوع، ماده، اندازه، هندسه و دوز الیاف به کاربرد و همچنین قرار گرفتن در معرض نوع محیط بستگی دارد. در نهایت، عملکرد FRC باید با استفاده از روش‌های آزمون استاندارد برای برنامه‌ای که از آن استفاده می‌شود، ارزیابی شود. الیاف به عنوان تقویت‌کننده می‌تواند پاسخ پس از ترک خوردگی بتن را از شکننده به شکل‌پذیر تحت انواع مختلف بارها از جمله فشاری، برشی، خمشی و یا بارهای ضربه‌ای تغییر دهد [16].

مراحل درگیر در شکست FRC بصورت شماتیک در شکل (۴-۲) نشان داده شده است و به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱. ترک خوردگی در ماتریس سیمانی.
۲. جداسازی و لغزش بین الیاف و ماتریس (بیرون کشیده شدن الیاف).
۳. پل زدن ترک‌ها به کمک الیاف.
۴. لغزش اصطکاکی، تغییر شکل لنگرگاه و در نهایت بیرون کشیدگی کامل الیاف.
۵. پارگی الیاف و عدم بیرون کشیدگی آن (در صورتی که بیرون کشیدگی الیاف اتفاق نیافتد).



شکل ۲-۴ (مکانیزم عملکرد الیاف در بتن [16])

مطالعات متعددی در خصوص رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی مارپیچ در سال‌های اخیر توسط محققین ارائه شده است. با این وجود، در مقایسه با رفتار بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ فولادی هم‌راستا با بار، مطالعاتی بر روی رفتار بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ زاویه‌دار انجام نشده است. بنابراین انجام مطالعات آزمایشگاهی دقیق در این خصوص مورد نیاز می‌باشد. لذا در این مطالعه در راستای انجام این هدف، آزمایش بیرون کشیدگی بر روی الیاف مارپیچ با زوایای تمایل ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه و با طول‌های تعبیه شده ۱۰، ۱۵، ۲۰ میلی‌متر انجام گرفته است و اثر زاویه تمایل الیاف و طول مدفون بر روی پاسخ بیرون کشیدگی^۱ از جمله؛ ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی لغزش مربوط به نقطه ماکزیمم نیرو، انرژی بیرون کشیدگی، میزان موثر بودن الیاف^۲ و همچنین کنده شدگی ماتریس^۳ در هر حالت مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲-۴- بررسی آزمایش بیرون کشیدگی الیاف

آزمون بیرون کشیدگی الیاف برای تعیین رفتار سطح اتصال فیبر و ماتریس و پارامترهای مؤثر بر عملکرد خروجی الیاف از ماتریس‌های سیمانی، توسط ترکیبات مختلفی از انواع الیاف (تا به امروز روی فولاد، شیشه، الیاف پلیمری و اخیراً روی الیاف طبیعی انجام شده است)، انواع مخلوط بتن، طول الیاف تعبیه شده و زوایای تمایل مختلف الیاف مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش‌های مبتنی بر بیرون کشیدگی الیاف با استفاده از تجزیه و تحلیل بار کششی و مدل‌های المان محدود توسعه یافته‌اند و برای آزمایش‌های تجربی در خصوص پاسخ‌های بار در مقابل لغزش سیستم‌های ماتریس-الیاف استفاده شده است [2].

چهار عامل اصلی بر پیوند بین الیاف و ماتریس تأثیر می‌گذارد:

۱. چسبندگی فیزیکی و شیمیایی.
۲. مؤلفه مکانیکی پیوند، مانند الیاف تغییر شکل یافته، خرد شده و قلاب‌دار.
۳. اصطکاک.
۴. گیر کردن دو الیاف به یکدیگر.

۱-۲-۴- انواع آزمایش بیرون کشیدگی الیاف

اگرچه هیچ کدام از استانداردهای ASTM یا EN برای روش‌های آزمایش بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس‌های سیمانی برای تعیین مقاومت پیوستگی بین الیاف و ماتریس دستورالعمل مشخصی وجود ندارد، ادبیاتی وجود دارد که مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را شرح می‌دهد و جزییاتی از قبیل اینکه چگونه شرایط بارگذاری می‌تواند به شدت بر نتایج آزمایش تأثیر بگذارد بررسی می‌شود [2].

آزمایش بیرون کشیدگی الیاف بر اساس نوع الیاف مورد استفاده (الیاف درشت، ریز الیاف) به دو بخش تقسیم می‌شود که در ادامه توضیح داده می‌شود [2].

¹ Pull-out response

² Fiber efficiency

³ Matrix spalling

۱-۱-۲-۴- الیاف درشت^۱

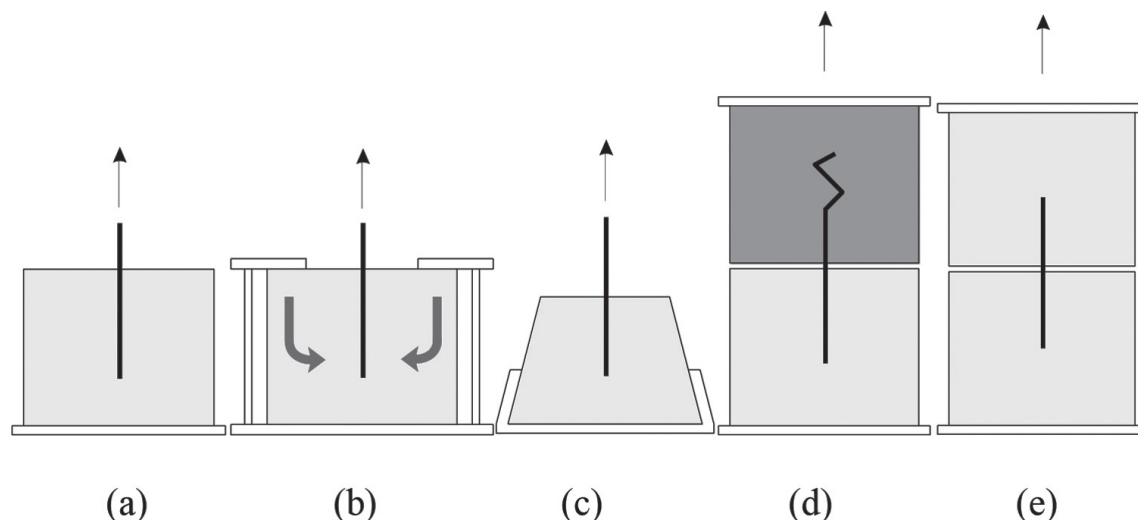
دو گروه عمده تنظیمات آزمایش بیرون کشیدگی برای الیاف درشت از تحقیقات تجربی ناشی می‌شوند. با توجه به شکل (۳-۴) آزمایش‌های خروج الیاف را می‌توان در نمونه‌های یک طرفه (a,b,c) یا نمونه‌های دو طرفه (d,e) و با استفاده از یک الیاف یا یک رشته الیاف انجام داد [2].

استفاده از یک‌دسته الیاف برای تست خروج در نمونه‌های دو طرفه به چند دلیل مورد استفاده واقع می‌شود که در موارد زیر توضیح داده شده است:

۱. با توجه به این‌که بیرون کشیدگی یک الیاف از ماتریس بتنی به دلیل نیروی خروج بسیار کم نیازمند دستگاهی با دقت اندازه‌گیری بالا می‌باشد، در صورت عدم وجود تجهیزات دقیق آزمایشگاهی می‌توان از یک رشته الیاف برای انجام آزمایش بیرون کشیدگی استفاده کرد و رفتار خروج الیاف با استفاده از میانگین نسبت به یک الیاف بررسی می‌شود.

۲. در نتایج بیرون کشیدگی تک الیاف پراکندگی زیادی وجود دارد که موجب ساخت تعداد بالای نمونه می‌شود، با استفاده از رشته الیاف‌ها می‌توان از تعداد نمونه‌ها کاسته و با استفاده از میانگین الیاف‌ها رفتار خروج بررسی شود.

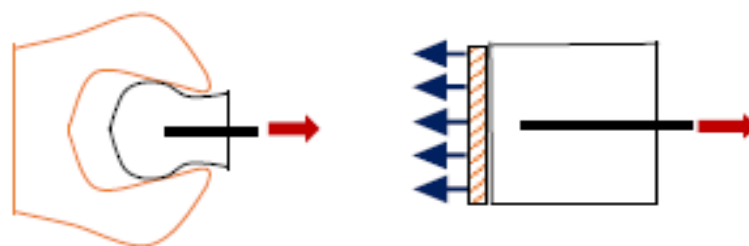
۳. در آزمایش‌های دو نمونه‌ای دو طرفه (e) به دلیل عدم ایجاد گرفتگی مناسب در انتهای آزاد الیاف نیز، از این روش استفاده می‌شود [16].



شکل (۳-۴) نمونه‌های تنظیمات تست خروج [2]

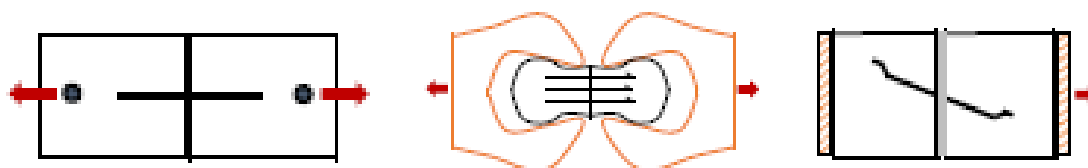
با توجه به شکل (۳-۴) طیف گسترده‌ای از اندازه، شکل و سرعت بارگذاری برای این نمونه‌ها استفاده شده است. متداول‌ترین اشکال با توجه به شکل (۴-۴) به صورت استوانه‌ای، منشوری و استخوان‌سگ هستند. سرعت بارگذاری برای این نمونه‌ها می‌تواند از ۰/۵ تا ۱۰ میلی‌متر در دقیقه برای نرخ شبه استاتیک باشد.

¹ Macro fibers



شکل ۴-۴ (نمونه‌های استخوان سگ و استوانه‌ای [17])

نمونه‌های دو طرفه نخستین بار توسط Naaman ارائه شده است [19]. در نمونه‌های دو طرفه یک سمت الیاف با طول کوتاه‌تر نسبت به سمت دیگر در بتن تعبیه می‌شود. این تضمین می‌کند که خروج از نیمه مورد نظر رخ دهد. نمونه‌های دو طرفه نیز دارای اشکال مختلفی هستند که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. بارگذاری نمونه‌های دو طرفه می‌تواند از یک یا دو سمت باشد. همچنین برای تست خروج الیاف دسته‌ای نیز از این نمونه‌ها استفاده می‌شود. سرعت بارگذاری برای این نمونه‌ها اغلب 0.6 میلی‌متر بر دقیقه برای نرخ استاتیکی در نظر گرفته می‌شود.



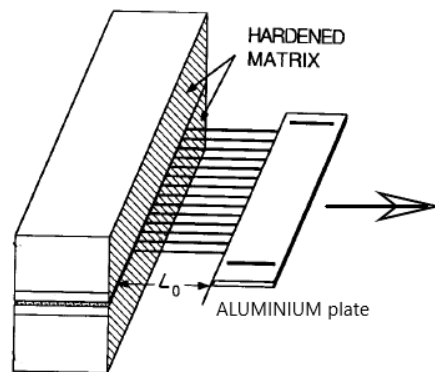
شکل ۴-۵ (انواع نمونه‌های تست خروج دو طرفه [17])

۴-۲-۱-۲- ریز الیاف^۱

استفاده روزافزون از ریز الیاف در محصولات مبتنی بر سیمان باعث شده است که تکنیک‌هایی برای اندازه‌گیری مقاومت پیوستگی بین الیاف و ماتریس در الیاف با قطر بسیار کوچک و اغلب شکننده تولید شود. بیشترین اندازه‌گیری مقاومت پیوستگی ریز الیاف‌ها با استفاده از ماتریس خمیر سیمانی یا دوغاب انجام شده است. اگرچه اندازه‌گیری پیوند الیاف-ماتریس به طور مستقیم دشوار است، یک روش دقیق و غیرمستقیم برای محاسبه استحکام باند ماتریس و الیاف نخستین بار توسط وانگ و همکاران در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است. این روش برای الیاف بسیار شکننده مانند الیاف کربن توصیه نمی‌شود [2].

در این روش، الیاف بصورت مداوم و متعدد اما جدا از هم روی یک قاب سوار می‌شوند. مواد ماتریس مبتنی بر سیمان بیش‌تر طول الیاف را در بر می‌گیرند. نمونه‌ها در دستگاه تست سوار شده و سپس یک پایه آلومینیومی در انتهای الیاف بدون ماتریس تمام الیاف‌ها را گرفته و سپس آزمایش بیرون کشیدگی انجام می‌شود [2]. شکل (۴-۶) جزییات تست خروج الیاف را که توسط وانگ ارائه شده است نشان می‌دهد.

¹ Micro fibers



شکل (۴-۶) نمونه تست خروج ریز الیاف [20]

۳-۴- رفتار بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ فولادی

الیاف فولادی به شکل مارپیچ اخیراً برای افزایش استحکام اتصال الیاف با ماتریس بتن پیشنهاد شده است. تعدادی از مشاهدات آزمایشگاهی در سال‌های اخیر برتری هندسه مارپیچی الیاف فولادی نسبت به سایر انواع الیاف از نظر شکل پذیری، قابلیت کنترل ترک، مقاومت و جذب انرژی را نشان می‌دهد. بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ به عواملی چون طول دفن‌شدگی الیاف در ماتریس، سرعت بیرون کشیدگی الیاف، فاصله‌ی طولی دو پیچ از هم، قطر خارجی الیاف، قطر الیاف، زاویه الیاف نسبت به راستای ترک یا سطح ماتریس وابسته است.

سه مکانیزم رفتاری مختلف در حین بیرون کشیده شدن الیاف مارپیچ فولادی بوجود می‌آید:

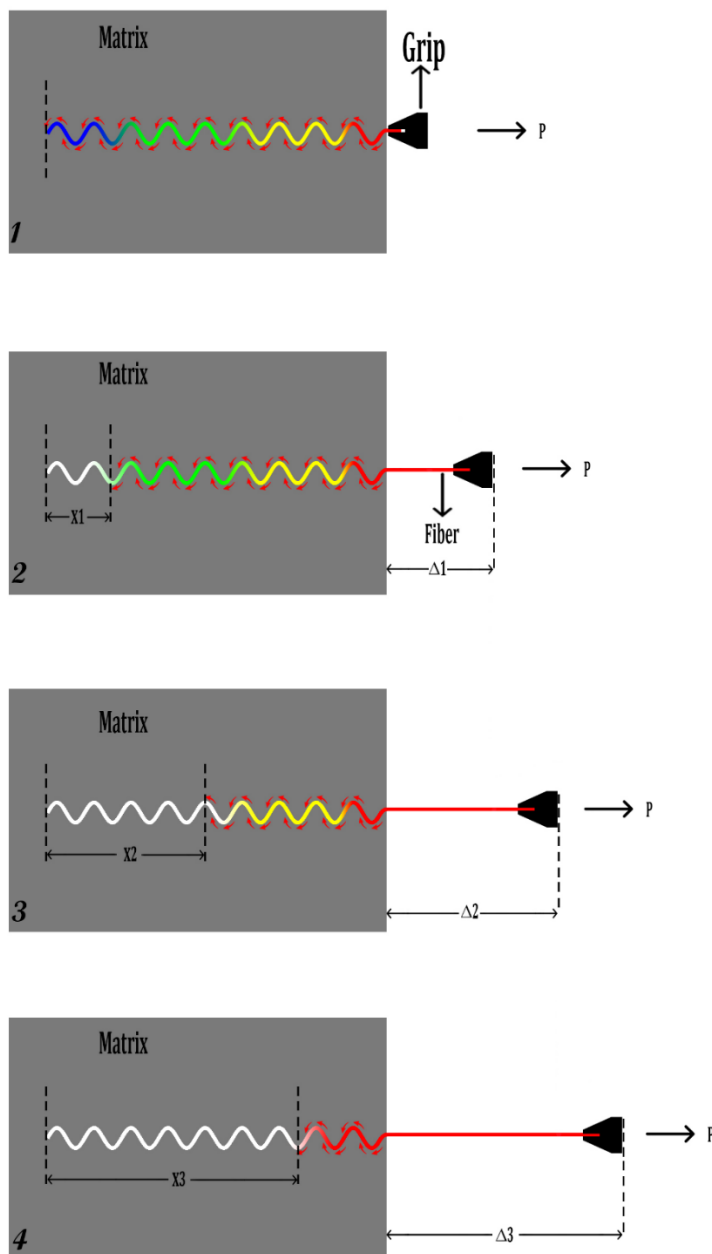
۱. چسبندگی برشی الاستیک موجود بین الیاف و ماتریس در سطح مشترک آن‌ها.
۲. اصطکاک موجود بین الیاف و ماتریس با عنوان چسبندگی برشی اصطکاکی که امکان جابه‌جایی نسبی در سطح مشترک الیاف و ماتریس را فراهم آورده و زمانی اتفاق می‌افتد که چسبندگی اولیه از بین برود.
۳. مهار مکانیکی ناشی از پیچ‌های الیاف که سبب ایجاد نقاط محلی انتقال نیرو بین الیاف و ماتریس می‌گردد.

بیرون کشیدگی الیاف فولادی مارپیچ به این صورت است که؛ در فاز ابتدایی و پس از اعمال نیروی بیرون کشیدگی به الیاف توسط فک گیرنده‌ی الیاف، به تدریج پیوستگی بین الیاف و ماتریس از بین رفته و الیاف از ماتریس اطراف خود جدا می‌شود. این جداسازی از انتهای آزاد الیاف آغاز شده و به سمت انتهای مدفون آن پیش می‌رود، شکل (۴-۷). این روند ادامه می‌یابد تا جایی که الیاف به طور کامل چسبندگی خود با ماتریس را از دست داده و شروع به حرکت در داخل بتن می‌کند. در این مرحله مقاومت بیرون کشیدگی توسط اصطکاک الیاف با ماتریس و مهار مکانیکی الیاف تامین می‌شود.

هم‌زمان با پیچش الیاف در ماتریس و بیرون کشیدگی آن، مقاومت بیرون کشیدگی حاصل از مهار مکانیکی توسط یک صاف شدن مداوم الیاف در محل خروج الیاف از ماتریس تامین می‌شود و تا زمان بیرون کشیدگی کامل الیاف اصطکاک و مفاصل پلاستیک در طول الیاف باعث ایجاد مقاومت مؤثر و نسبتاً یکنواخت در برابر بیرون کشیدگی الیاف می‌شوند.

همچنین در طول فرایند بیرون کشیدگی الیاف، کل طول جاسازی شده الیاف با پیکربندی‌های قلاب شده در ماتریس به مقاومت در برابر خروج از طریق اصطکاک کمک می‌کند.

با توجه به شکل (۷-۴) در هر مرحله طول الیاف خارج شده از ماتریس بتنی (Δ) تقریباً ۱/۵ برابر طول خارج شده‌ی الیاف در حالت مارپیچ (x) است که علت آن صاف شدن الیاف و افزایش طول آن می‌باشد.



شکل (۷-۴) مراحل بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ فولادی

۴-۴- برنامه آزمایشگاهی

در این بخش از تحقیق جهت بررسی عملکرد بیرون کشیدگی الیاف فولادی مارپیچ مایل از ماتریس پایه سیمانی، از نمونه‌های بیرون کشیدگی استوانه‌ای شکل با قطر و ارتفاع یکسان (50×50 میلی‌متر) با زاویه تمایل الیاف شامل ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه و طول جایگذاری الیاف شامل ۱۰، ۱۵، ۲۰ میلی‌متر، با دو مقاومت متفاوت ماتریس ۲۰ و ۳۰ مگاپاسکال ساخته شد (از هر حالت ۶ نمونه و جمعاً ۱۸۰ نمونه). پس از انجام آزمون بیرون کشیدگی، نتایجی چون مقدار نیروی بیشینه مورد نیاز برای بیرون کشیدن الیاف از ماتریس، جابه‌جایی آن در هر لحظه و نمودارهای نیرو-لغزش برای هر کدام از نمونه‌ها بدست آمد. در ادامه به جزئیات برنامه آزمایشگاهی انجام شده پرداخته می‌شود.

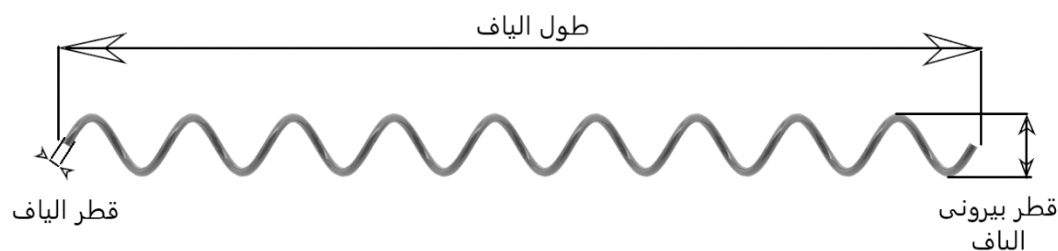
۴-۴-۱- مصالح

مصالح مورد استفاده برای ماتریس پایه سیمانی در این بخش همانند ترکیب استفاده شده در بخش ۳-۱ می‌باشد. جدول (۴-۱) طرح اختلاط ماتریس پایه سیمانی را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری ماتریس‌های استفاده شده به ترتیب برابر با ۲۰ و ۳۰ مگاپاسکال برای ماتریس نوع ۱ و ۲ می‌باشد. الیاف بکار برده شده در ساخت نمونه‌ها از جنس فولاد و با هندسه مارپیچ می‌باشد.

جدول (۴-۱) طرح اختلاط ماتریس پایه سیمانی (برای یک متر مکعب) (SSD)

آب	سیمان	درشت دانه	ریزدانه	نوع ماتریس
۱۸۸.۳	۳۵۰	۹۸۸	۸۸۰	۱
۲۵۰	۵۸۰	۷۹۲	۶۶۷	۲

در شکل (۴-۷) هندسه‌ی الیاف مارپیچ استفاده شده در این پژوهش و در جدول (۴-۲) مشخصات مکانیکی این الیاف ارائه شده است. الیاف مورد استفاده در این تحقیق در کشور چین توسط حاج‌صادقی و همکاران ساخته و به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی و بهینه شده است [13].



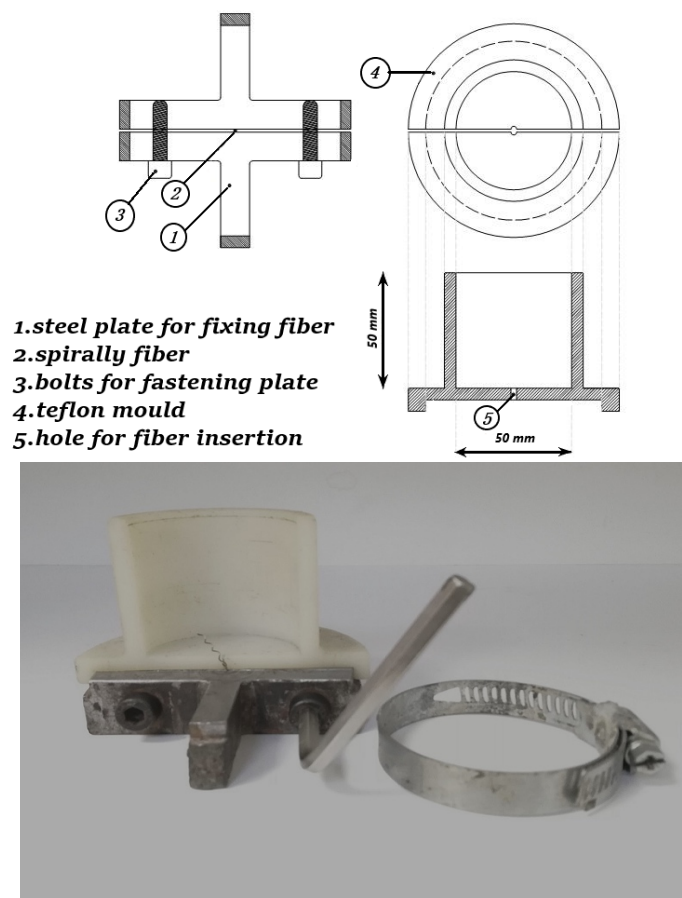
شکل ۴-۸) الیاف مارپیچ فولادی مورد استفاده

جدول (۴-۲) مشخصات مکانیکی الیاف مارپیچ

قطر الیاف (mm)	طول الیاف (mm)	مقاومت کششی (MPa)	تعداد پیچ	قطر بیرونی الیاف (mm)
۰/۴	۴۰	۱۵۰۰	۹	۱/۴۲

۴-۴-۲- ساخت و عمل آوری نمونه ها

برای قرارگیری الیاف در ماتریس با زاویه و طول مشخص، گیره‌هایی فلزی به شکل صلیب برای نگه‌داشتن الیاف در موقعیت درست استفاده شده است. شکل (۴-۹) ابعاد و مشخصات قالب استوانه‌ای و اجزای مربوط به آن را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مراحل قرار گیری الیاف در قالب به این صورت است که در ابتدا الیاف در مکانیزم فلزی صلیبی شکل (قسمت ۱ در شکل (۴-۹)) با رعایت زاویه مورد نظر قرار گرفته و طول مورد نظر برای قرار گیری در بتن بیرون از آن باقی می‌ماند. پس از آن پیچ‌های صلیب فلزی (قسمت ۳) بسته می‌شود، در مرحله بعد نیمی از قالب پلی‌اتیلن (قسمت ۴) روی قسمت صلیبی قرار می‌گیرد، در این مرحله مجدداً از دقت زاویه و طول مورد نظر الیاف اطمینان حاصل می‌شود سپس نیمه‌ی دیگر قالب استوانه‌ای روی فلز صلیبی قرار گرفته و در نهایت با قرار گیری الیاف در سوراخ بین دو نیمه‌ی قالب (قسمت ۵) دو نیمه به واسطه یک بست فلزی به هم چسبیده و قالب آماده‌ی بتن ریزی می‌شود.



شکل (۴-۹) قرارگیری الیاف مارپیچ در قالب تست pullout

نمونه‌های بیرون کشیدگی با استفاده از مصالح مورد نیاز و مخلوط کن Hobart ساخته شدند و روند اختلاط مصالح همانند بخش ۳-۳ که برای ساخت نمونه‌های بتنی جهت تعیین مقاومت فشاری انجام گرفت می‌باشد. روند اختلاط این گونه بود که در ابتدا سنگ‌دانه‌ها بصورت خشک به مدت ۱۲۰ ثانیه با یکدیگر مخلوط شدند، سپس سیمان به آن اضافه شد و مصالح خشک در حدود ۱۲۰ ثانیه دیگر بطور کامل مخلوط گردیدند. آب مورد نیاز اختلاط، به تدریج در طی مدت زمان ۱۸۰ ثانیه به آن اضافه گردید. با اضافه کردن آب، مخلوط حالت خمیری پیدا کرد و سپس ۳۰۰ ثانیه دیگر در انتها مصالح با یکدیگر مخلوط شدند و کارایی مخلوط به مقدار مورد نیاز رسید. جهت جلوگیری از جابجایی الیاف در داخل قالب، مخلوط به آرامی و با دقت فراوان به داخل قالب‌ها ریخته می‌شود. سپس عملیات متراکم کردن ماتریس در سه مرحله برای هر قالب انجام شد، به این صورت که در هر مرحله یک سوم بتن در قالب ریخته شده و ۱۵ الی ۳۰ ثانیه روی میز لرزان با قدرت نسبتاً ضعیف جهت تراکم بتن قرار داده شده است. (زمان‌بندی قرار گیری قالب حاوی بتن روی میز لرزان با استفاده از آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش بدست آمده است، ۱۵ ثانیه برای بتن با مقاومت ۲۰ مگاپاسگال و ۳۰ ثانیه برای بتن با مقاومت ۳۰ مگاپاسگال استفاده شده است). جهت جلوگیری از تبخیر سطحی نمونه‌ها و ایجاد ترک‌های انقباضی، پس از پرداخت سطح بتن موجود در قالب، قالب‌ها داخل پوشش‌های پلاستیکی قرار داده می‌شوند و بعد از مدت زمان ۲۰-۲۴ ساعت باز شده و نمونه‌ها به مدت ۷ روز داخل حوضچه آب با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد مطابق شکل (۴-۱۰) قرار گرفتند.



شکل (۴-۱۰) عمل‌آوری نمونه‌های پول اوت

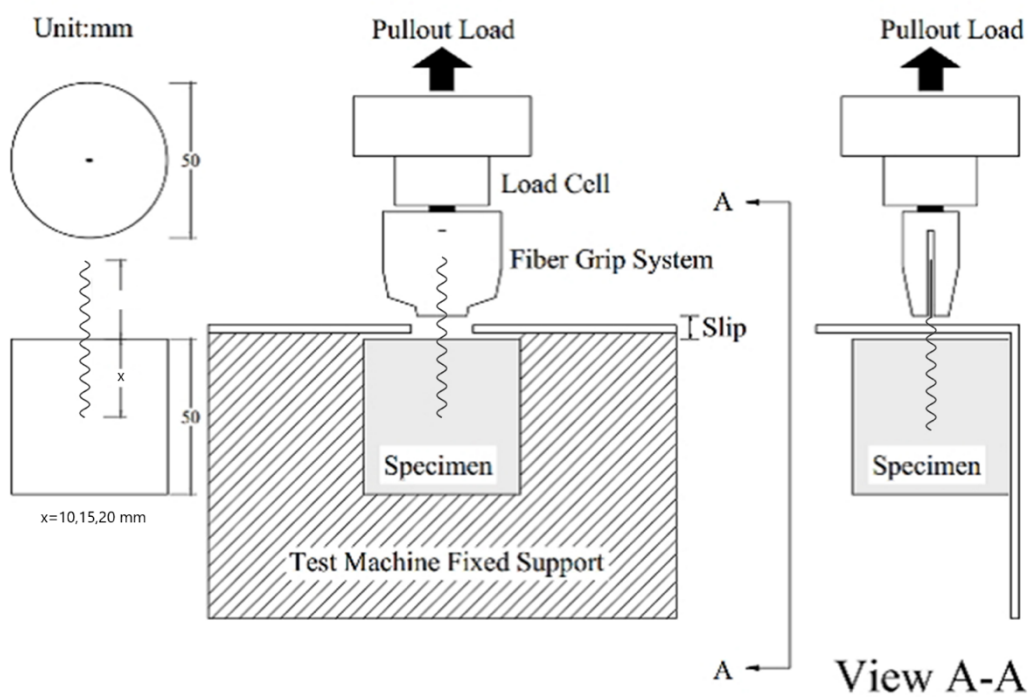
همانطور که مشاهده می‌گردد، در مراحل مختلف آماده سازی نمونه‌ها راستای اولیه قرارگیری الیاف در ماتریس تغییر نکرده و نمونه‌های ساخته شده از دقت کافی برخوردار هستند. شکل (۴-۱۱) نمونه‌های آماده شده برای انجام آزمایش بیرون کشیدگی الیاف را نشان می‌دهد.

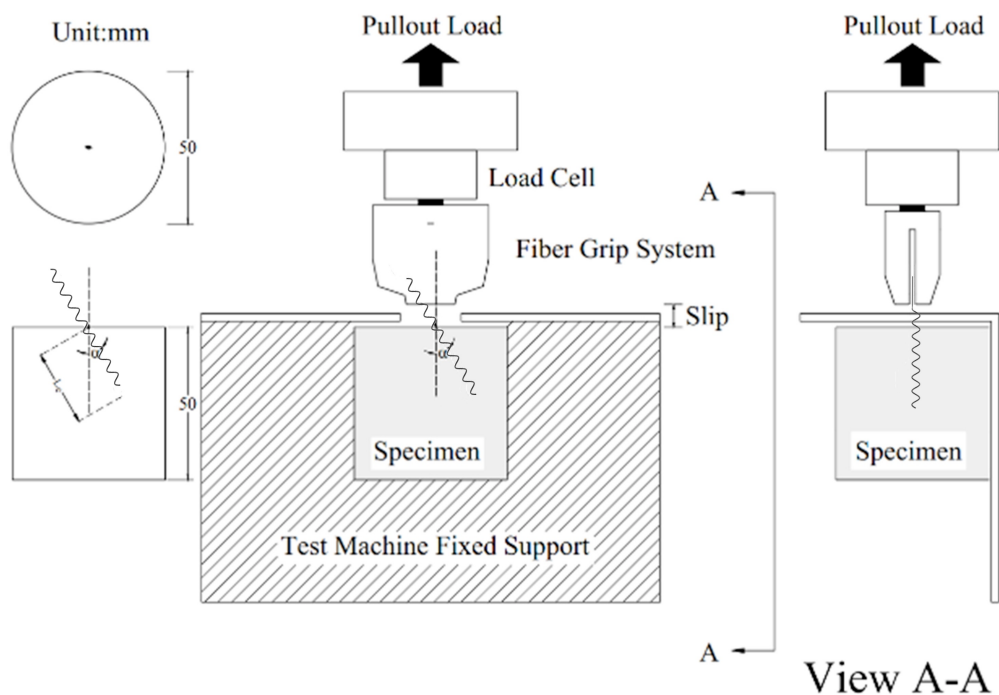


شکل ۱۱-۴ (نمونه‌های آزمون بیرون کشیدگی الیاف

۳-۴-۴- نحوه انجام آزمایش

شکل (۴-۱۲) هندسه و چیدمان نمونه و دستگاه تست بیرون کشیدگی را برای انجام آزمون بیرون کشیدگی الیاف نشان می‌دهد. قسمت اول الیاف مستقیم و قسمت دوم الیاف مایل را نشان می‌دهد. این مکانیزم شبیه‌سازی عملکرد دوخت ترک بتن توسط الیاف و بیرون کشیدگی الیاف در هنگام بازشدگی ترک در بتن است.

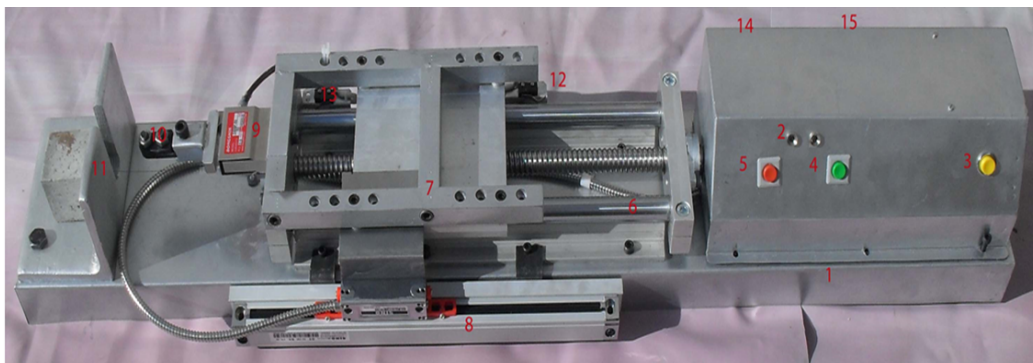




شکل ۴-۱۲) هندسه نمونه‌ها و چیدمان آزمایش بیرون کشیدگی الیاف مستقیم و مایل

آزمایش بیرون کشیدگی الیاف از نمونه‌های بتنی، بوسیله یک دستگاه که قادر به اعمال نیروی فشاری و کششی است و به صورت افقی طراحی شده است صورت پذیرفت. شکل (۴-۱۲) این دستگاه و قسمت‌های مختلف آن را نشان داده است. این دستگاه شامل یک موتور DC با سرعت دوران سه دور در دقیقه می‌باشد که به وسیله‌ی تجهیزات دیگر به جک متصل شده است. جک مورد نظر به وسیله‌ی یک گیره‌ی متصل به آن الیاف را گرفته و بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس بتنی صورت می‌گیرد. دستگاه مجهز به یک نیروسنج با ظرفیت ۱۰۰۰ نیوتن بوده که بارگذاری نمونه‌ها را بصورت کنترل تغییر مکان و با سرعت ۰/۰۲۵ میلی‌متر در ثانیه انجام می‌دهد.

جهت اعمال نیروی کششی، انتهای آزاد فیبر در داخل گیره‌ی دستگاه (قسمت ۱۰ در شکل) قرار می‌گیرد. جهت کاهش خطای ناشی از افزایش طول الیاف در ثبت لغزش، گیره‌ی دستگاه طوری طراحی گردیده که تا حد امکان نزدیک به سطح نمونه باشد. لازم به توضیح است که در ترسیم نمودارهای نیرو-لغزش به منظور حذف کامل خطای ناشی از تغییر طول الاستیک الیاف، این مقدار در هر لحظه، محاسبه شده و از مقدار جابه‌جایی ثبت شده کم می‌گردد، که البته در مقایسه با لغزش ناشی از بیرون کشیدگی خود الیاف بسیار ناچیز می‌باشد.



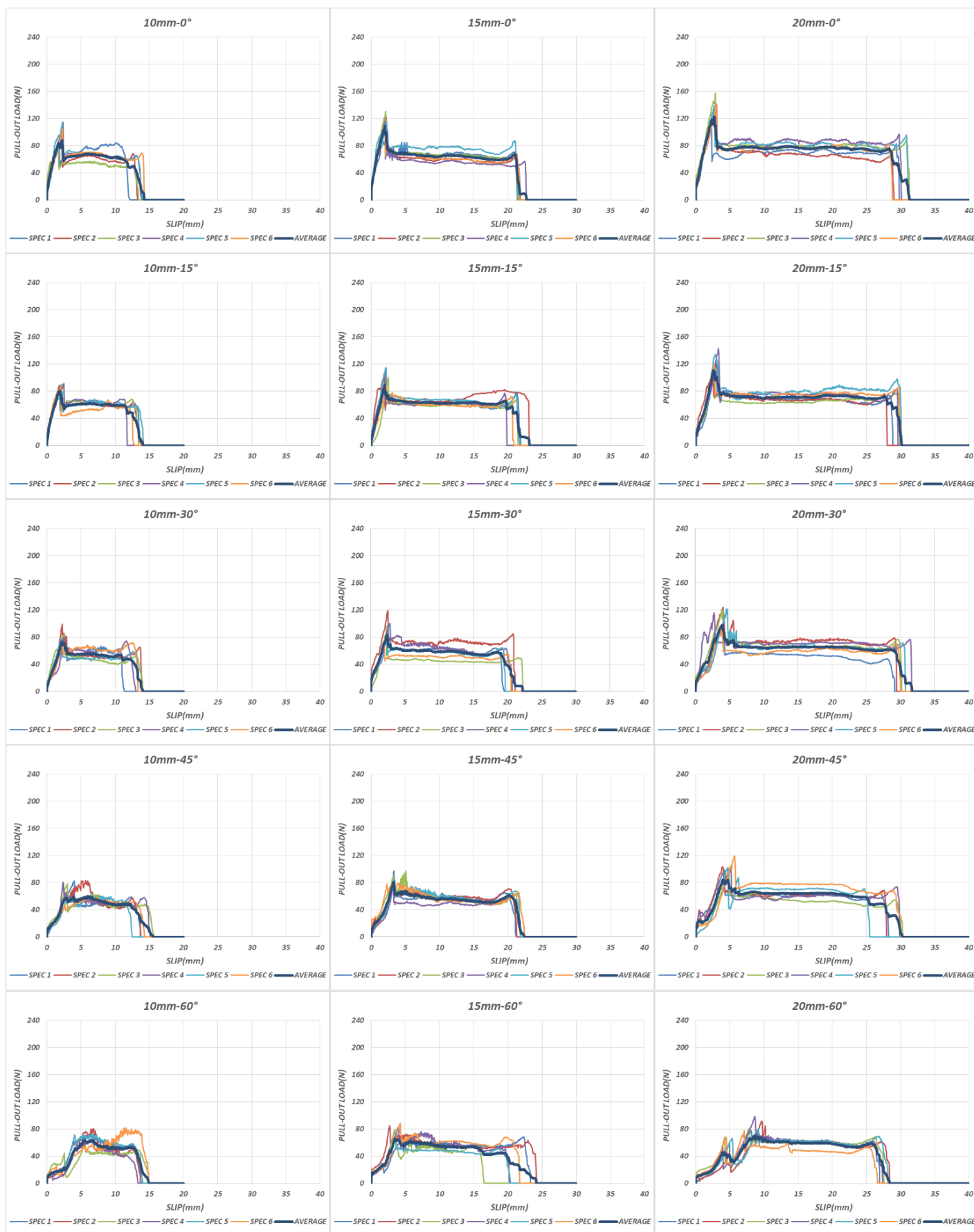
شکل (۴-۱۳) دستگاه آزمون بیرون کشیدگی الیاف

نیروی اعمال شده توسط دستگاه در هر لحظه با استفاده از نیروسنج نصب شده بین گیره‌ی نگه‌دارنده الیاف و جک دستگاه اندازه‌گیری می‌شود و برای ثبت جابه‌جایی ناشی از بیرون کشیدگی الیاف از درون ماتریس از تغییر مکان سنج تعبیه شده در درون دستگاه استفاده می‌شود. برای هر کدام از سری آزمایش‌ها تعداد ۶ نمونه یکسان ساخته شد و تمام نمونه‌ها به طور کامل تحت بارگذاری قرار گرفتند. با توجه به پیکره‌بندی در نظر گرفته شده برای انجام آزمون بیرون کشیدگی الیاف منفرد با استفاده از مدفون کردن تک الیاف در درون ماتریس با طول مدفون و زاویه تمایل دلخواه امکان ثبت کامل و شبیه‌سازی رفتار واقعی بیرون کشیده شدن الیاف در حین رشد ترک در یک ماده مرکب فراهم می‌شود.

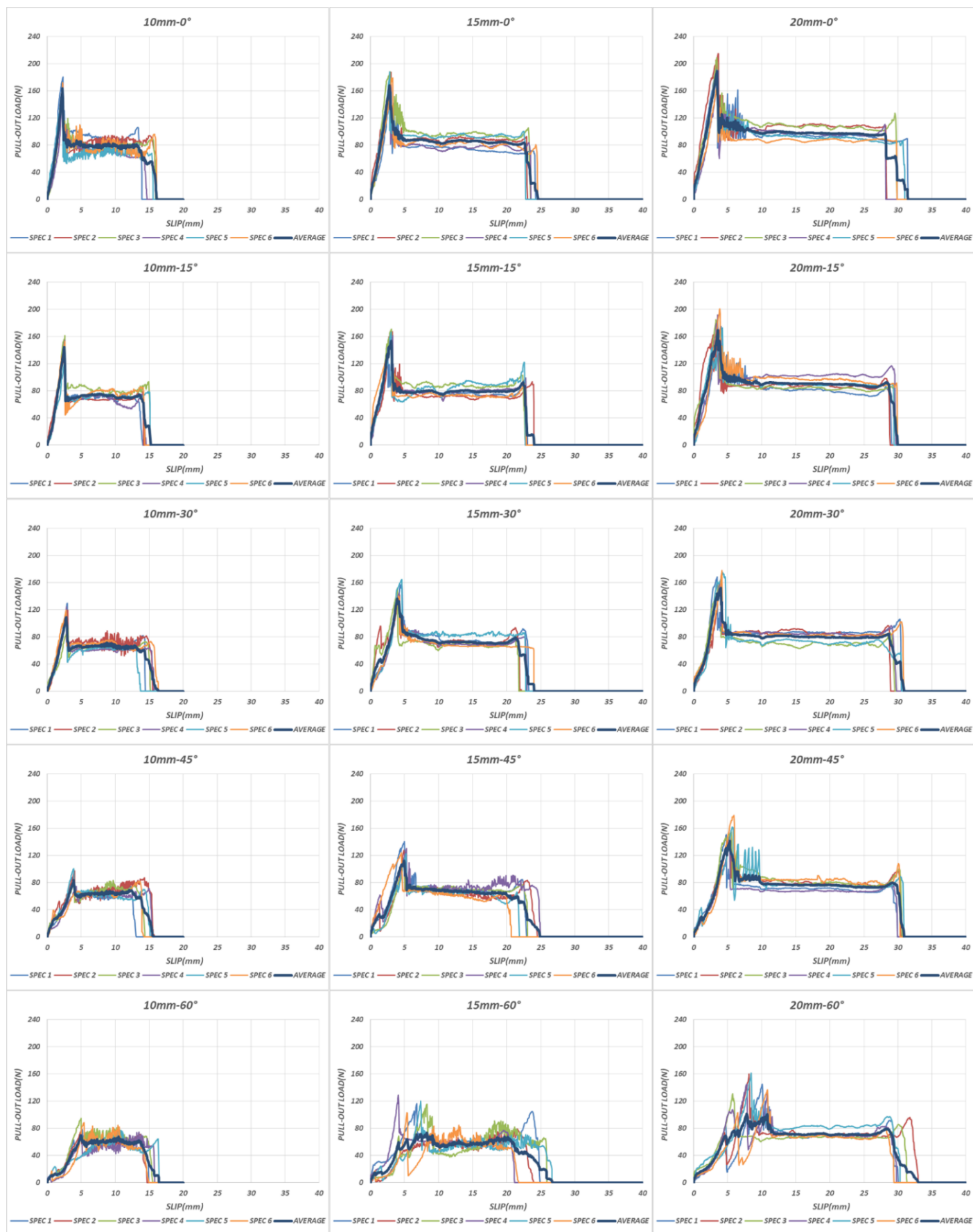
۵-۲- نتایج مجموعه‌ی آزمایش‌ها

نمودارهای نیرو- جابه‌جایی بدست آمده از نتایج آزمون بیرون کشیدگی الیاف برای نمونه‌های ساخته شده با مقاومت ۲۰ مگاپاسگال و ۳۰ مگاپاسگال به ترتیب در شکل (۴-۱۵) و (۴-۱۶) نشان داده شده است، که هر کدام شامل ۱۵ نمودار است. این نمودارها با توجه به طول جایگذاری الیاف (۱۰، ۱۵، ۲۰ میلی‌متر) و زاویه تمایل الیاف نسبت به امتداد عمود (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه) از هم متمایز شده‌اند. در هر یک از حالت‌ها ۶ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج بدست آمده برای نیروی بیرون کشیدگی بیشینه، مقدار لغزش متناظر با نیروی بیشینه، سطح زیر نمودار بیرون کشیدگی الیاف (انرژی بیرون کشیدگی) و نسبت ماکزیمم تنش بدست آمده در الیاف بر تنش نهایی آن‌ها (موثر بودن الیاف^۱) برای هر کدام از نمونه‌ها به همراه مقادیر متوسط آن‌ها در هر حالت محاسبه شده و در جدول (۴-۳) و (۴-۴) به ترتیب برای ماتریس مقاومت ۲۰ مگاپاسگال و ۳۰ مگاپاسگال نشان داده شده است. در این قسمت، با تحلیل و بررسی این نمودارها و مشاهدات مربوط به رفتار نمونه‌ها در روند بارگذاری، تاثیر زاویه تمایل الیاف نسبت به امتداد بارگذاری و طول مدفون الیاف و مقاومت ماتریس، بر روی پاسخ بیرون کشیدگی شامل؛ ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی، لغزش مربوط به نقطه ماکزیمم نیرو، انرژی بیرون کشیدگی و میزان موثر بودن الیاف در هر حالت مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

¹ Fiber Efficiency



شکل ۱۴-۴) نمودارهای نیرو-لغزش نمونه‌های با مقاومت ۲۰ مگاپاسکال



شکل ۱۵-۴ (نمودارهای نیرو-لغزش نمونه‌های با مقاومت ۳۰ مگاپاسگال

جدول (۳-۴) نتایج مربوط به ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی، لغزش نقطه ماکزیمم نیرو و انرژی بیرون کشیدگی ماتریس ۲۰ مگا پاسگال

Compressive Strength (Mpa)	Embedded Length (mm)	Inclination Angle (deg.)	Specimen Number	Failure Mode	Peak Load (N)	Avg. Peak Load (N)	Avg. Peak Load (N) in chart	Peak Slip (mm)	Avg. Peak Slip (mm)	Avg. Peak Slip (mm) in chart	Pull-out Energy (N.mm)	Avg. Pull-out Energy (N.mm)	efficiency (-)	Avg. efficiency (-)
20	10	0°	1	Pull-out	88.115	101.8	88.074	1.8	2	1.9	837.79	836.55	0.47	0.54
			2	Pull-out	105.36			2.2			777.5		0.56	
			3	Pull-out	81.671			1.65			697.03		0.43	
			4	Pull-out	114.51			2.4			876.63		0.61	
			5	Pull-out	115.01			2.3			907.47		0.61	
			6	Pull-out	106.12			2.25			922.88		0.56	
		15°	1	Pull-out	89.108	87.15	80.614	1.85	2.1167	2.1	779.04	760.76	0.47	0.46
			2	Pull-out	87.934			1.8			750.32		0.47	
			3	Pull-out	90.431			2.2			796.8		0.48	
			4	Pull-out	91.767			2.5			739.18		0.49	
			5	Pull-out	78.517			2.3			821.55		0.42	
			6	Pull-out	85.142			2.05			677.69		0.45	
		30°	1	Pull-out	80.725	82.058	73.327	2.9	2.4667	2.25	650.53	700.25	0.43	0.43
			2	Pull-out	99.219			2.25			725.82		0.53	
			3	Pull-out	85.21			2.6			663.73		0.45	
			4	Pull-out	78.668			2.55			671.6		0.41	
			5	Pull-out	78.407			2.2			655.29		0.42	
			6	Pull-out	70.117			2.3			764.56		0.37	
		45°	1	Pull-out	82.772	74.379	65.601	4	4.1417	6	625.72	661.53	0.44	0.4
			2	Pull-out	83.013			5.7			681.78		0.44	
			3	Pull-out	77.785			3			728.65		0.41	
			4	Pull-out	80.832			2.4			716.96		0.43	
			5	Pull-out	62.427			3.15			574.43		0.33	
			6	Pull-out	59.447			6.6			641.66		0.31	
		60°	1	Pull-out	73.423	71.824	63.745	6.4	7.19	6.5	665.68	623.55	0.39	0.38
			2	Pull-out	80.097			6.5			598.12		0.42	
			3	Pull-out	59.461			5.55			555.24		0.31	
			4	Pull-out	63.854			6.5			498.27		0.34	
			5	Pull-out	72.265			6.6			695.03		0.38	
			6	Pull-out	81.848			11.6			728.98		0.43	
	15	0°	1	Pull-out	102.96	115.77	108.82	2.4	2.166	2	1428.6	1409.6	0.55	0.61
			2	Pull-out	122.37			2.2			1321.9		0.65	
			3	Pull-out	130.89			2.15			1442.7		0.69	
			4	Pull-out	113.03			2			1296		0.6	
			5	Pull-out	115.71			2.25			1627.1		0.61	
			6	Pull-out	109.65			2			1341.1		0.58	
		15°	1	Pull-out	109.4382	100.768	89.028	2	2.225	1.95	1340.172	1341.654	0.58	0.53
			2	Pull-out	104.5197			1.9			1626.8		0.55	
			3	Pull-out	100.4969			3			1229.694		0.53	
			4	Pull-out	86.585			2.05			1187.938		0.46	
			5	Pull-out	115.1324			2.15			1421.352		0.61	
			6	Pull-out	88.438			2.25			1243.97		0.47	
		30°	1	Pull-out	100.25	93.374	83.194	2.75	2.408	2.5	1137.3	1179.4	0.53	0.49
			2	Pull-out	119.12			2.5			1507.3		0.63	
			3	Pull-out	96.554			2.45			1029.5		0.51	
			4	Pull-out	95.787			2.55			1272.1		0.5	
			5	Pull-out	74.283			2.25			1102.8		0.39	
			6	Pull-out	74.258			1.95			1027.7		0.39	
		45°	1	Pull-out	97.223	85.223	80.36	3.37	3.77	3.3	1138.5	1166.3	0.51	0.45
			2	Pull-out	77.276			3.35			1198.7		0.4	
			3	Pull-out	97.038			5.1			1188.8		0.51	
			4	Pull-out	77.961			3.3			1001.9		0.41	
			5	Pull-out	83.142			3.45			1221.7		0.44	
			6	Pull-out	78.696			4.05			1248.3		0.42	
		60°	1	Pull-out	68.721	77.824	65.406	4.6	3.758	3.5	1201.5	1073.6	0.36	0.41
			2	Pull-out	84.898			2.7			1312.7		0.45	
			3	Pull-out	78.601			3.5			763.02		0.42	
			4	Pull-out	81.706			4			1066		0.43	
			5	Pull-out	64.915			3.55			885.57		0.34	
			6	Pull-out	88.102			4.2			1212.9		0.47	
	20	0°	1	Pull-out	115.52	138.54	122.64	2.3	2.775	2.7	2059.9	2295.5	0.61	0.73
			2	Pull-out	141.44			3.05			1963		0.75	
			3	Pull-out	157.24			2.9			2501.1		0.83	
			4	Pull-out	137.44			2.7			2551.8		0.73	
			5	Pull-out	139.26			2.7			2505.1		0.74	
			6	Pull-out	140.35			3			2192.3		0.74	
		15°	1	Pull-out	120.93	125.07	110.82	3.05	2.9	2.6	1935.9	2097.5	0.64	0.66
			2	Pull-out	115.13			2.6			1901.9		0.61	
			3	Pull-out	118.26			2.8			1938.6		0.63	
			4	Pull-out	142.69			3.35			2196.8		0.76	
			5	Pull-out	133.78			2.9			2386.5		0.7	
			6	Pull-out	119.66			2.7			2225.6		0.63	
		30°	1	Pull-out	103.13	113.18	98.116	4.2	3.94	4	1494.2	1922	0.55	0.6
			2	Pull-out	123.7			4.05			2103.7		0.66	
			3	Pull-out	120.72			4			2021		0.64	
			4	Pull-out	115.89			2.75			2224.6		0.61	
			5	Pull-out	121.26			4.7			1968.1		0.64	
			6	Pull-out	94.374			3.95			1720.3		0.5	
		45°	1	Pull-out	98.781	104.02	84.452	4.15	4.47	4.05	1649.4	1715.1	0.52	0.55
			2	Pull-out	102.16			4			1690.6		0.54	
			3	Pull-out	101.38			4.85			1544.4		0.54	
			4	Pull-out	100.91			5.05			1747.9		0.53	
			5	Pull-out	101.4			4.65			1608.1		0.54	
			6	Pull-out	119.51			5.75			2050.4		0.63	

جدول (۴-۴) نتایج مربوط به ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی، لغزش نقطه ماکزیمم نیرو و انرژی بیرون کشیدگی ماتریس ۳۰ مگاپاسگال

Compressive Strength (Mpa)	Embedded Length (mm)	Inclination Angle (deg.)	Specimen Number	Failure Mode	Peak Load (N)	Avg. Peak Load (N)	Avg. Peak Load (N) in chart	Peak Slip (mm)	Avg. Peak Slip (mm)	Avg. Peak Slip (mm) in chart	Pull-out Energy (N.mm)	Avg. Pull-out Energy (N.mm)	efficiency (-)	Avg. efficiency (-)
30	10	0°	1	Pull-out	180.23	166.43	163.58	2.3	2.29	2.25	1282.4	1199.7	0.96	0.88
			2	Pull-out	158.84			2.35			1289.3		0.84	
			3	Pull-out	160.7			2.3			1255		0.85	
			4	Pull-out	170.44			2.3			1015		0.9	
			5	Pull-out	156.54			2.25			1095.5		0.83	
			6	Pull-out	171.86			2.25			1260.9		0.91	
		15°	1	Pull-out	150.89	148.04	144.19	2.5	2.55	2.5	950.49	1027.5	0.8	0.78
			2	Pull-out	145.4			2.55			972.14		0.77	
			3	Pull-out	161.03			2.6			1205.4		0.85	
			4	Pull-out	153.97			2.55			948.63		0.82	
			5	Pull-out	123.88			2.55			1033.8		0.66	
			6	Pull-out	153.1			2.6			1054.4		0.81	
		30°	1	Pull-out	129.5	115.94	108.77	2.95	2.92	2.8	956.89	950.19	0.69	0.61
			2	Pull-out	119.17			3			1057.3		0.63	
			3	Pull-out	92.748			3.1			907.42		0.49	
			4	Pull-out	124.54			2.8			926.46		0.66	
			5	Pull-out	110.09			2.9			788.11		0.58	
			6	Pull-out	119.6			2.75			1064.9		0.63	
		45°	1	Pull-out	96.283	88.946	83.252	4	5.62	3.9	708.51	835.02	0.51	0.47
			2	Pull-out	97.472			4			988.92		0.52	
			3	Pull-out	83.235			3.9			841.65		0.44	
			4	Pull-out	74.234			4.3			827.35		0.39	
			5	Pull-out	100.35			3.9			852.48		0.53	
			6	Pull-out	82.101			13.6			791.22		0.43	
		60°	1	Pull-out	78.002	81.558	69.462	5.15	7.441	4.95	738.28	741.93	0.41	0.43
			2	Pull-out	77.099			5			718.12		0.4	
			3	Pull-out	94.814			4.95			871.25		0.5	
			4	Pull-out	74.102			13.5			703.29		0.39	
			5	Pull-out	77.313			10.65			740.41		0.41	
			6	Pull-out	88.02			5.4			680.2		0.47	
	15	0°	1	Pull-out	165.34	178.66	168.12	3.05	2.983	2.8	1812.1	2023	0.88	0.95
			2	Pull-out	187.14			3			2072.9		0.99	
			3	Pull-out	187.74			2.9			2285.8		1	
			4	Pull-out	165.11			2.85			1840.6		0.87	
			5	Pull-out	187.84			2.8			2116.2		1	
			6	Pull-out	178.79			3.3			2010.1		0.95	
		15°	1	Pull-out	149.2149	161.21	153.597	2.5	3.033	3.05	1750.671	1848.13	0.79	0.85
			2	Pull-out	167.1197			3.2			1800.71		0.89	
			3	Pull-out	170.5061			3.1			2016.154		0.9	
			4	Pull-out	161.1186			3.25			1844.003		0.85	
			5	Pull-out	166.342			3.05			1919.139		0.88	
			6	Pull-out	152.9561			3.1			1758.096		0.81	
		30°	1	Pull-out	157.04	150	136	4.6	4.29	3.95	1750.2	1667.9	0.83	0.79
			2	Pull-out	141.86			4.25			1652.8		0.75	
			3	Pull-out	151.42			3.95			1541		0.8	
			4	Pull-out	144.83			4.2			1605.3		0.77	
			5	Pull-out	164.58			4.6			1836.1		0.87	
			6	Pull-out	140.28			4.15			1622		0.74	
		45°	1	Pull-out	140.13	127.09	111.79	5	4.99	4.95	1589.7	1482.5	0.74	0.67
			2	Pull-out	127.45			4.9			1474.2		0.68	
			3	Pull-out	118.75			5			1463.5		0.63	
			4	Pull-out	130.41			5.3			1757.5		0.69	
			5	Pull-out	122.23			5.2			1286.3		0.65	
			6	Pull-out	123.56			4.55			1323.7		0.65	
		60°	1	Pull-out	116.19	110.33	73.255	6.8	8.925	8.3	1535.3	1269.6	0.62	0.58
			2	Pull-out	78.974			21.6			1164		0.42	
			3	Pull-out	115.68			8.3			1380.4		0.61	
			4	Pull-out	128.8			4.1			1223.1		0.68	
			5	Pull-out	119.7			7.4			1306.8		0.63	
			6	Pull-out	102.64			5.35			1008		0.54	
	20	0°	1	Pull-out	204.75	194.81	188.53	3.45	3.508	3.45	3029.5	2935.7	1.08	1.03
			2	Pull-out	214.68			3.65			3059.9		1.14	
			3	Pull-out	208.89			3.4			3275		1.11	
			4	Pull-out	189.57			3.6			2756.2		1	
			5	Pull-out	180.16			3.45			2883.8		0.95	
			6	Pull-out	170.83			3.5			2609.8		0.91	
		15°	1	Pull-out	174.71	183.37	169.4	4	3.825	3.55	2424.7	2682.8	0.93	0.98
			2	Pull-out	169.41			3.8			2612.4		0.9	
			3	Pull-out	191.65			3.55			2574.6		1.01	
			4	Pull-out	191.55			3.55			2935.9		1.01	
			5	Pull-out	172.67			4.2			2680.4		0.92	
			6	Pull-out	200.26			3.85			2868.8		1.1	
		30°	1	Pull-out	168.38	170.67	151.86	3.45	4	4	2623.4	2402.4	0.89	0.9
			2	Pull-out	172.44			4.1			2381.9		0.91	
			3	Pull-out	164.19			4			2134		0.87	
			4	Pull-out	166.67			4			2486.1		0.88	
			5	Pull-out	174.63			4.3			2252.2		0.93	
			6	Pull-out	177.68			4.15			2536.7		0.94	
		45°	1	Pull-out	150.18	157.53	141.32	4.8	5.433	5.3	2099.2	2309.1	0.8	0.84
			2	Pull-out	152.71			5.35			2395.8		0.81	
			3	Pull-out	154.76			5.55			2510.5		0.82	
			4	Pull-out	147.07			5.3			1989.6		0.78	
			5	Pull-out	161.69			5.65			2397.4		0.86	
			6	Pull-out	178.79			5.95			2462.3		0.95	
	60°	1	Pull-out	145.03	146.31	101.56	10.1	8.516	7.8	1970.1	2063.9	0.77	0.77	
2		Pull-out	160.07	8.15			2212.4			0.85				
3		Pull-out	130.52	5.75			2021			0.69				
4		Pull-out	144.87	7.8			2067.2			0.77				
5		Pull-out	161.1	8.45			2315.1			0.85				
6		Pull-out	126.29	10.85			1797.7			0.72				

۶-۴- تجزیه و تحلیل نتایج

نتایج به دست آمده برای آزمون‌های مختلف انجام شده در این بخش تحلیل و مقایسه می‌شود. همزمان با نتایج به دست آمده توسط محققان دیگر، تنوع بالایی از نتایج تجربی بدست آمده برای نمونه‌های مشابه مشاهده شده است. این پراکندگی در نتایج تجربی را می‌توان به تغییرپذیری خصوصیات ماتریس و تغییرپذیری مشاهده شده در هندسه قلاب برای همان نوع الیاف و همچنین نوع آزمایش بیرون کشیدگی الیاف نسبت داد.

بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ به عواملی چون طول دفن‌شدگی الیاف در ماتریس، سرعت بیرون کشیدگی الیاف، فاصله‌ی طولی دو پیچ از هم، قطر خارجی الیاف، قطر الیاف، زاویه الیاف نسبت به راستای ترک یا سطح ماتریس وابسته است. شکل منحنی بیرون کشیدگی و مقاومت بیرون کشیدگی نیز به قطر فیبر و بافت سطح آن و همچنین به قدرت ماتریس بستگی دارد.

سه مکانیزم رفتاری مختلف در حین بیرون کشیده شدن الیاف مارپیچ فولادی بوجود می‌آید:

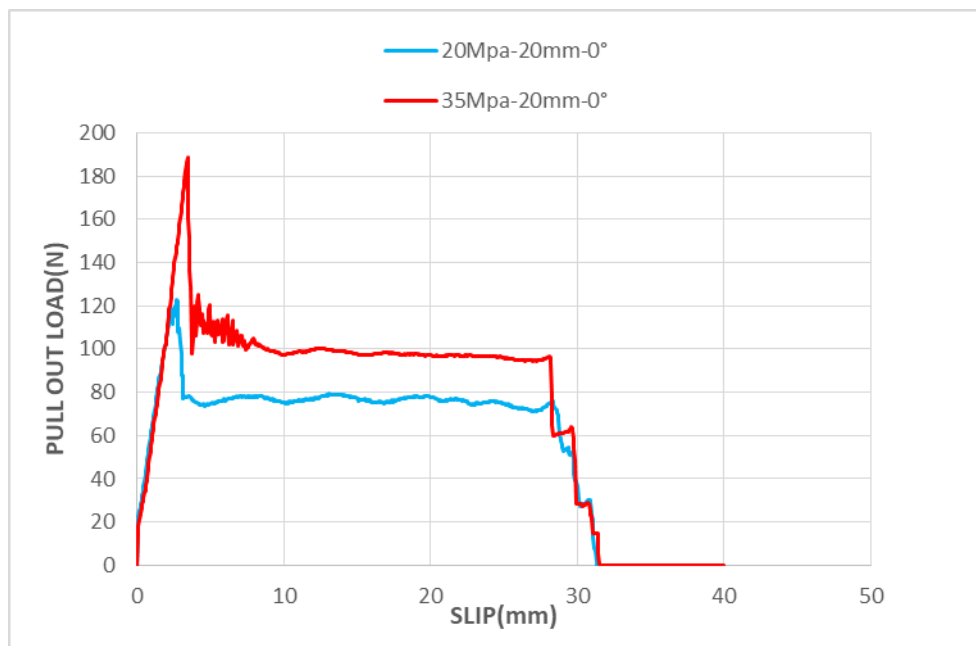
۱. چسبندگی برشی الاستیک موجود بین الیاف و ماتریس در سطح مشترک آن‌ها.
۲. اصطکاک موجود بین الیاف و ماتریس با عنوان چسبندگی برشی اصطکاکی که امکان جابه‌جایی نسبی در سطح مشترک الیاف و ماتریس را فراهم آورده و زمانی اتفاق می‌افتد که چسبندگی اولیه از بین برود.
۳. مهار مکانیکی ناشی از پیچ‌های الیاف که سبب ایجاد نقاط محلی انتقال نیرو بین الیاف و ماتریس می‌شود.

۱-۶-۴- تأثیر مقاومت ماتریس

میانگین منحنی‌های بیرون کشیدگی مربوط به الیاف مارپیچ استخراج شده از ماتریس C20 و C30 برای مقایسه در شکل (۴-۱۷) ارائه شده است. پاسخ اولیه، تا ۲ میلی‌متر جابجایی، برای هر دو نوع ماتریس مشابه است اما برای جابجایی‌های بیشتر منحنی مربوط به ماتریس با مقاومت بیشتر مقاومت بیرون کشیدگی باقیمانده بالاتری نسبت به ماتریس با مقاومت کمتر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که الیاف استخراج شده از ماتریس با مقاومت بیشتر ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی بیشتری دارند. به طور کلی با افزایش مقاومت از ۲۰ به ۳۰ مگاپاسگال ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی ۴۹/۸ درصد افزایش می‌یابد.

با افزایش مقاومت ماتریس، مقاومت بیرون کشیدگی الیاف نیز افزایش می‌یابد و می‌تواند موجب شکست فیبر شود. علاوه بر این، هنگامی که استحکام ماتریس افزایش می‌یابد، سختی ماتریس نیز باعث می‌شود که الیاف تغییر شکل بیشتری پیدا کنند تا بتوانند لغزش کنند و خارج شوند.

(نوسانات نمودار در جابه‌جایی‌های پس از ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی مربوط به ماتریس C30 نشان دهنده تغییر شکل‌های ناشی از افزایش مقاومت ماتریس است، که در ماتریس C20 این نوسانات دیده نمی‌شود).



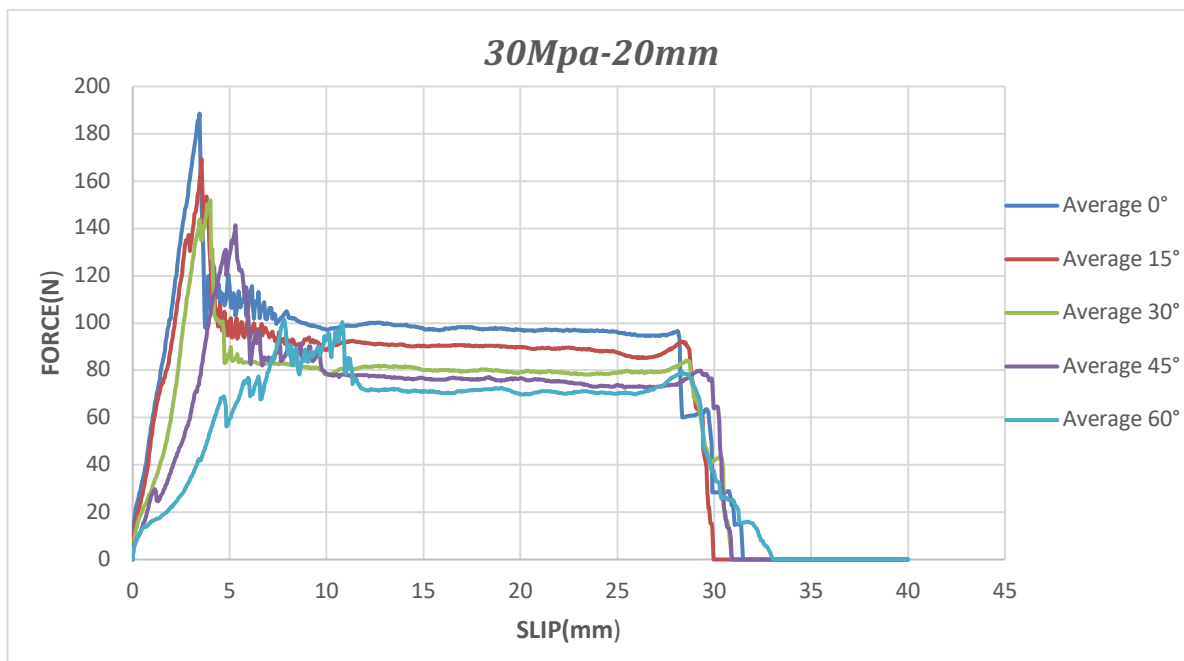
شکل ۱۶-۴) میانگین منحنی‌های بیرون کشیدگی برای ماتریس با مقاومت مختلف

با توجه به جداول (۳-۴) و (۴-۴) و همچنین شکل بالا ملاحظه می‌شود که در ماتریس C30 جابه‌جایی مرتبط با ماکزیمم نیرو نسبت به ماتریس C20 بیشتر است. افت ناگهانی نمودار بیرون کشیدگی پس از ماکزیمم نیرو به دلیل از بین رفتن پیوستگی بین بتن و الیاف به طور کامل است. بنابراین هرچه مقاومت بتن بیشتر باشد اتصال ماتریس و الیاف افزایش یافته و قطع پیوستگی بتن و الیاف دیرتر رخ می‌دهد و در نتیجه نمودار بیرون کشیدگی بعد از ماکزیمم نیرو افت کمتری دارد، همچنین در موارد خاص نیروی بیرون کشیدگی پس از افت ناچیز افزایش می‌یابد (سخت شدگی لغزش).

با محاسبه سطح زیر نمودار بیرون کشیدگی الیاف (نیرو-لغزش) انرژی بیرون کشیدگی بدست می‌آید. با مقایسه مقادیر انرژی بیرون کشیدگی مربوط به دو ماتریس C20 و C30 طبق جداول (۳-۴) و (۴-۴) و همچنین شکل (۱۷-۴) مشاهده می‌شود که با افزایش مقاومت ماتریس، انرژی بیرون کشیدگی افزایش می‌یابد. به طور کلی با افزایش مقاومت از ۲۰ مگاپاسگال به ۳۰ مگاپاسگال انرژی بیرون کشیدگی ۳۲/۷ درصد افزایش یافته است. همچنین با افزایش مقاومت ماتریس میزان موثر بودن الیاف طبق جداول مذکور افزایش می‌یابد.

۲-۶-۴- تاثیر زاویه تمایل الیاف

میانگین منحنی‌های بیرون کشیدگی برای زوایای مختلف الیاف با طول تعبیه شده ۲۰ میلیمتر مربوط به ماتریس C30 در شکل (۱۸-۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۷-۴) منحنی‌های بیرون کشیدگی متوسط برای زوایای تمایل مختلف الیاف.

با بررسی نمودارهای بیرون کشیدگی الیاف در زوایای تمایل مختلف (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه) و همچنین بررسی طول‌های جایگذاری متفاوت الیاف با توجه به شکل (۴-۱۸) و همچنین جداول (۴-۳) و (۴-۴) و مقایسه آن‌ها مشاهده می‌گردد که به طور کلی هرچه زاویه تمایل الیاف نسبت به امتداد بارگذاری افزایش یابد، ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی^۱ کاهش و لغزش مربوط به آن افزایش می‌یابد. به طوری که با افزایش زاویه از ۰-۱۵، ۳۰-۴۵، ۴۵-۶۰ درجه به ترتیب ۱۱/۲، ۱۱، ۱۳/۸، ۱۱/۳ درصد، نیروی ماکزیمم کاهش یافته است.

به دلیل خردشدگی موضعی ماتریس و کنده شدن آن در زوایای تمایل بالاتر در نقطه خروج الیاف، طول مدفون الیاف کاهش یافته و باعث افت مقدار نیروی ماکزیمم می‌گردد، همچنین مقادیر لغزش در بار ماکزیمم افزایش می‌یابد.

با افزایش زاویه تمایل الیاف، به دلیل غالب شدن اصطکاک موضعی در نقطه خروج الیاف بر روند بیرون کشیدگی و به تعویق افتادن اثر مهاری ناشی از مارپیچ الیاف، شیب بخش صعودی نمودار بیرون کشیدگی پیش از نقطه بیشینه کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه مقادیر لغزش پیش از نقطه بیشینه بسیار کم است تاثیر تنش اصطکاکی بر روی بیرون کشیدگی الیاف مایل پیش از نقطه بیشینه ناچیز می‌باشد. همچنین انرژی بیرون کشیدگی کامل الیاف با افزایش زاویه تمایل الیاف، صرف نظر از مقدار طول مدفون به طور کلی با توجه به کاهش سطح زیر نمودار نیرو-لغزش کاهش می‌یابد.

۳-۶-۴- تاثیر طول جایگذاری الیاف

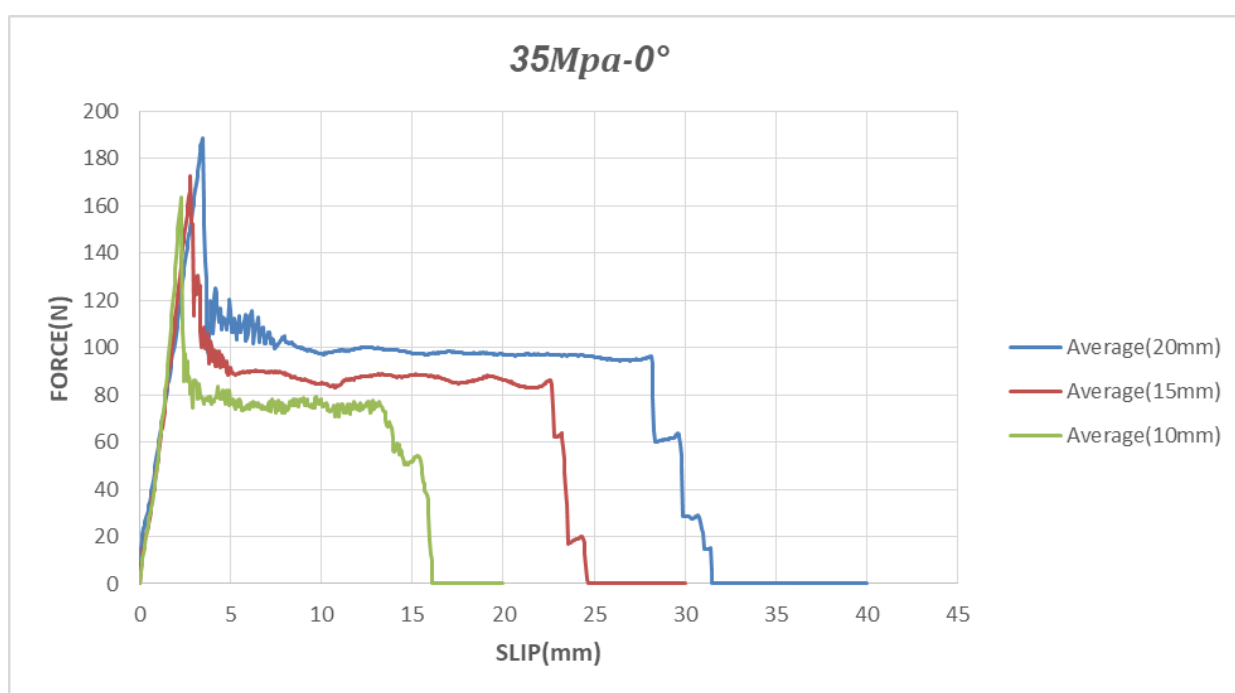
میانگین منحنی‌های بیرون کشیدگی برای طول جایگذاری مختلف الیاف با زاویه تمایل ۰ درجه مربوط به ماتریس C30 در شکل (۴-۱۹) نشان داده شده است. با مقایسه و بررسی نمودارهای بیرون کشیدگی الیاف

1 Peak load

مشاهده می‌شود که در زوایای تمایل یکسان با افزایش طول جایگذاری الیاف، نیروی بیرون کشیدگی بیشینه افزایش می‌یابد. به طور کلی با افزایش طول مهاری از ۱۰ به ۱۵ و ۱۵ به ۲۰ میلیمتر ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی به ترتیب ۱۷/۹٪ و ۱۸/۱٪ افزایش یافته است. با افزایش طول جایگذاری الیاف پیوستگی بین الیاف و ماتریس بیشتر شده و نیروی بیشتری برای از بین بردن این پیوستگی صرف خواهد شد، علاوه بر این اثر مهار مکانیکی ناشی از مارپیچ الیاف افزایش یافته و در نتیجه نیروی بیرون کشیدگی ماکزیمم افزایش خواهد یافت.

افزایش لغزش مربوط به ماکزیمم نیرو در برابر افزایش طول مدفون الیاف، عمدتاً مربوط به صاف شدن الیاف در محل خروج الیاف از ماتریس در زمان بیرون کشیدگی می‌باشد. به طور کلی با افزایش طول مهاری از ۱۰ به ۱۵ و ۱۵ به ۲۰ میلیمتر لغزش مربوط به ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی به ترتیب ۱۱/۱٪ و ۱۵٪ افزایش یافته است.

با توجه به شکل (۴-۱۹) و همچنین نتایج مربوط به کلیه نمونه‌ها با افزایش طول مدفون الیاف انرژی بیرون کشیدگی کامل الیاف با توجه به افزایش سطح زیر نمودار نیرو-لغزش صرف نظر از زاویه تمایل الیاف افزایش می‌یابد. به طور کلی با افزایش طول مهاری از ۱۰ به ۱۵ و ۱۵ به ۲۰ میلیمتر انرژی بیرون کشیدگی الیاف به ترتیب ۷۳/۷٪ و ۵۱٪ افزایش یافته است.

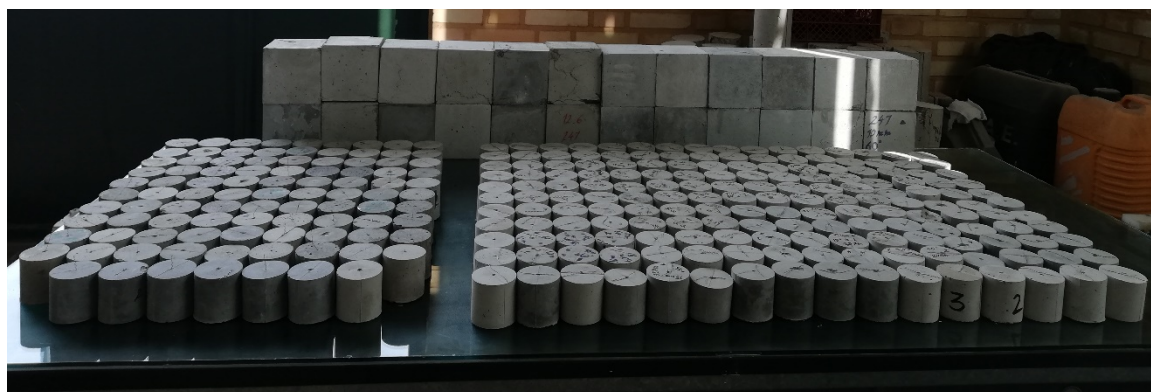
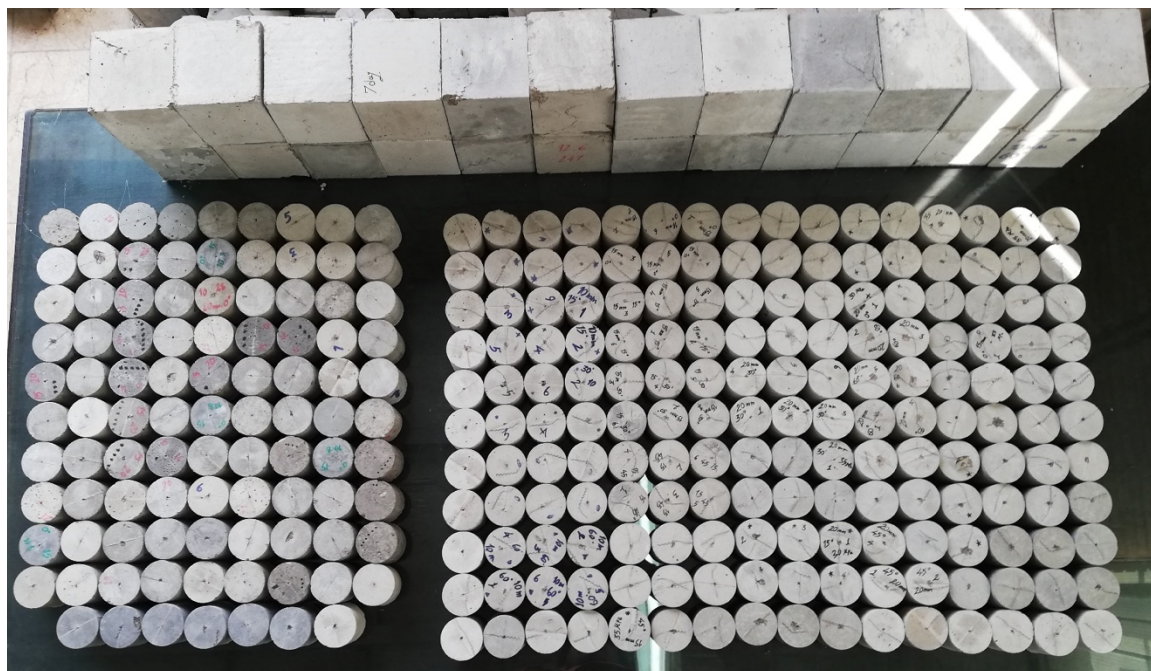


شکل (۴-۱۸) منحنی‌های بیرون کشیدگی متوسط برای طول جایگذاری متفاوت الیاف با زاویه یکسان

برای تعیین ظرفیت کششی استفاده شده الیاف در زوایای تمایل مختلف و طول‌های مدفون متفاوت نسبت σ_{max}/f_u در هر حالت بدست آمده که در آن مقدار ماکزیمم تنش بوجود آمده در الیاف با در نظر گرفتن نسبت ماکزیمم نیروی اعمال شده در روند بیرون کشیدگی به سطح مقطع الیاف و f_u تنش نهایی

الیاف می‌باشد که مقادیر آن در جداول (۳-۴) و (۴-۴) نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، ظرفیت کششی استفاده شده الیاف (میزان مؤثر بودن الیاف) در زوایای ثابت با افزایش طول مدفون اضافه می‌گردد (بجز مواردی که در الیاف گسیختگی رخ دهد). همچنین در طول‌های مدفون ثابت با افزایش زاویه تمایل این مقدار کاهش می‌یابد.

در شکل (۴-۲۰) نمونه‌های بیرون کشیدگی الیاف بعد از انجام آزمایش نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۹) نمونه‌های بتنی بیرون کشیدگی الیاف بعد از انجام تست

۴-۷- نتیجه گیری

نتیجه گیری زیر را می‌توان از آزمون های بیرون کشیدگی الیاف بیان کرد:

- تنوع زیادی از نیروی بیرون کشیدگی برای بعضی از الیاف‌ها و ماتریس‌های یکسان بدست آمده است.
- با توجه به اثر لنگر مکانیکی فراهم شده توسط مارپیچ الیاف که مقاومت در برابر بیرون کشیدگی الیاف را افزایش می‌دهد، بین پاسخ بیرون کشیدن الیاف مستقیم و الیاف مارپیچ تفاوت زیادی وجود دارد. در الیاف مستقیم، افزایش طول تعبیه شده باعث افزایش مقاومت در برابر بیرون کشیدگی می‌شود. در مقابل، برای الیاف مارپیچ، استحکام خروج به شدت به شکل و مشخصات الیاف بستگی دارد و طول تعبیه شده در مقاومت بیرون کشیدگی نقش ثانویه‌ای دارد.
- مقاومت بیرون کشیدگی با مقاومت ماتریس رابطه‌ی مستقیم دارد.
- رفتار بیرون کشیدگی الیاف مایل با الیاف تراز بدون زاویه متفاوت است. جابجایی مربوط به نیروی بیرون کشیدگی، همیشه برای الیاف مایل نسبت به الیاف تراز بیشتر است. تفاوت این امر به دلیل خرابی ماتریس است که باعث کاهش طول تعبیه شده و اجازه می‌دهد چرخش فیبر باعث جابجایی اضافی بدون لغزش الیاف شود.
- گسیختگی الیاف قبل از بیرون کشیدگی کامل باعث از دست رفتن کل ظرفیت انتقال بار می‌شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد که شکست الیاف به سطح اتصال ماتریس و الیاف بستگی دارد. این رابطه باید هنگام طراحی FRC به دقت مورد بررسی قرار گیرد تا از خرابی الیاف جلوگیری شود.
- در خصوص جذب انرژی بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ، الیاف با زاویه تمایل صفر درجه نسبت به الیاف مایل انرژی بیشتری جذب می‌نمایند و انرژی بیرون کشیدگی با افزایش زاویه تمایل کاهش می‌یابد.
- مشاهده گردید که در بیرون کشیدگی الیاف فولادی مارپیچ از بتن در زوایای تمایل بالاتر بدلیل خردشدگی موضعی ماتریس و کنده شدگی آن در نقطه خروج الیاف کاهش می‌یابد.
- مشاهده گردید، ظرفیت کششی استفاده شده الیاف (مؤثر بودن الیاف)، با افزایش طول مدفون، در زوایای ثابت افزایش می‌یابد، مگر در جایی که در الیاف گسیختگی رخ دهد، همچنین با افزایش زاویه تمایل این مقدار کاهش می‌یابد.
- الیاف مارپیچ ظرفیت جذب انرژی و رفتار مناسبی پس از نیروی حداکثر نشان دادند. اگرچه رفتار سخت شونده مشاهده نشد اما حفظ نیرو در تغییر مکان‌های قابل ملاحظه و رفتار نرم شوندگی بسیار جزئی نشان دهنده رفتار بیرون کشیدگی مناسب این الیاف می‌باشد.

فصل ۵: بررسی رفتار کششی مصالح مرکب سیمانی مسلح به الیاف

فولادی

چکیده فصل

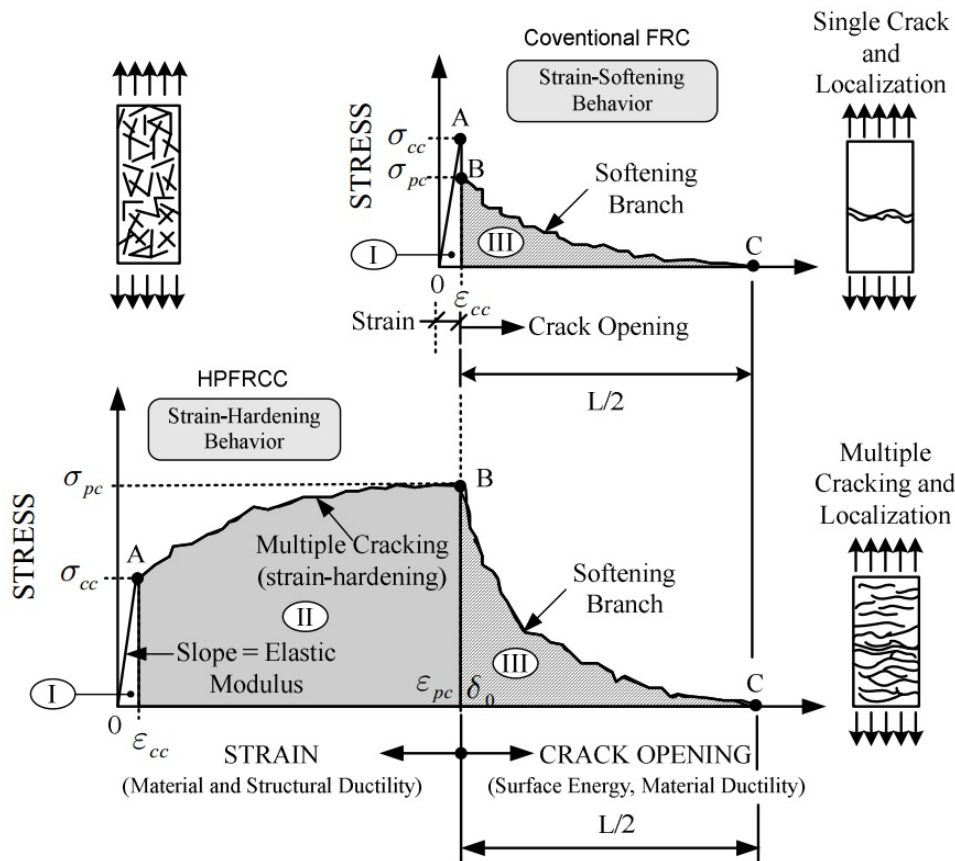
در این فصل جهت بررسی و درک رفتار کششی بتن مسلح به الیاف، آزمایش کشش مستقیم بر روی نمونه‌های بتن الیافی دمبلی شکل با درصد‌های حجمی مختلف الیاف (۰/۱۵٪، ۰/۲۵٪) صورت گرفته است. برای انجام آزمون کششی یک روش جدید آزمایش کشش مستقیم برای اعمال کشش بر روی نمونه دمبلی شکل از طریق صفحات فولادی چسبیده به پهلوی در انتهای نمونه، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های کششی بتن مسلح با الیاف (FRC) توسعه داده شده است. روند انجام آزمون کشش مستقیم، شامل چیدمان، هندسه و ابعاد نمونه، سرعت بارگذاری تست و همچنین نحوه خروج اطلاعات تعیین شده و پس از انجام آزمایش بر روی نمونه‌های مختلف بتن الیافی، رفتار کششی آن‌ها شامل ظرفیت باربری، میزان جذب انرژی و نحوه ترک خوردگی ارزیابی و بررسی شده است.

۱-۵- مقدمه

بتن به دلیل هزینه کم، استحکام بالا، دوام خوب و سهولت کاربرد، به طور گسترده‌ای در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، ادامه شهرنشینی و نوسازی زیرساخت‌ها در حال حاضر خواستار ساخت و سازهای پیشرفته‌تر و مصالح ساختمانی با عملکرد همه جانبه از نظر استحکام، شکل پذیری و دوام هستند. در این راستا، تلاش‌های مختلفی برای توسعه مواد مبتنی بر سیمان از طریق افزایش چگالی ذرات، افزودن الیاف و استفاده از نانو مواد انجام شده است. در بین این تلاش‌ها، افزودن الیاف برای تشکیل بتن مسلح با الیاف (FRC) ثابت شده است که قابل توجه ترین روش برای بهبود عملکرد کلی در شرایط مختلف بارگذاری، مانند بارهای غالب برشی، بارهای ترکیبی برشی و خمشی، بارهای پیچشی، بارهای چرخه ای، بارهای ضربه‌ای و انفجاری و حتی آتش سوزی است. یک خاصیت مهم الیاف اضافه شده به بتن این است که با ایجاد چندین ترک خوردگی کوچک و سخت شدن کرنش از ایجاد ترک‌های بزرگ‌تر جلوگیری کند. چنین رفتار کششی تغییر یافته‌ای بسیار مطلوب است زیرا تشکیل چند ترک کوچک، به جای ترک‌های بزرگ جدا شده، تغییر شکل و جذب انرژی را افزایش می‌دهد و نفوذ رطوبت، اکسیژن، دی اکسید کربن و مواد شیمیایی خطرناک را کاهش می‌دهد. در بین انواع مختلف الیاف، الیاف فولادی، که نسبتاً ارزان هستند و دارای استحکام و مدول کششی بالایی هستند، معمولاً برای بهبود کنترل ترک و افزایش مقاومت در برابر ضربه، شکل پذیری و چقرمگی در برابر ضربه استفاده می‌شود. به طور کلی، الیاف فولادی مختلف تأثیرات متفاوتی بر رفتار کششی-کرنش بتن مسلح با الیاف فولادی (SFRC) دارند. محققان مختلف از روش‌های مختلف آزمایش کشش مستقیم برای اندازه‌گیری خواص تنش کششی FRC استفاده می‌کنند. در نتیجه، نتایج آزمایش منتشر شده در ادبیات اغلب به طور مستقیم قابل مقایسه نیستند. در حقیقت، در برخی از روش‌های آزمایش کشش مستقیم، غلظت تنش کششی در بتن رخ می‌دهد و بنابراین نتایج آزمایش این روش‌های آزمایشی ممکن است قابل اعتماد نباشد. از این رو، هنوز تحقیقات بیشتری برای توسعه روش آزمایش تنش کششی بهتر مورد نیاز است که بتن تحت تأثیر غلظت استرس قرار نگیرد و ممکن است برای استانداردسازی آینده در نظر گرفته شود. در این تحقیق، یک روش جدید آزمایش تنش مستقیم با طراحی مجدد تنظیمات آزمایش به منظور به حداقل رساندن غلظت تنش، توسعه یافته است. با استفاده از روش جدید آزمایش، نمونه‌های بتن مسلح به الیاف فولادی مارپیچ برای ارزیابی تأثیر ویژگی‌های الیاف و حجم الیاف بر رفتار کششی شامل اولین مقاومت ترک خوردگی، مقاومت پس از ترک خوردگی، درجه سخت شدن کرنش و ظرفیت کشش بدست می‌آید.

۵-۲- رفتار کششی بتن الیافی

بتن‌های الیافی بر اساس دو رفتار سخت شدگی و نرم شدگی کرنشی به دو نوع تقسیم می‌شوند. رفتار سخت‌شدگی کرنشی^۱ و نرم‌شدگی کرنشی^۲ تحت اعمال تنش‌های کششی رخ می‌دهند و به عنوان معیاری برای دسته‌بندی بتن‌های الیاف تحت تنش‌های کششی مستقیم در نظر گرفته می‌شوند. شکل (۵-۱) منحنی تنش-کرنش دو نوع بتن الیافی را که تحت نیروی کششی مستقیم قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱) منحنی تنش-کرنش بتن مسلح به الیاف [21]

مفهوم رفتار سخت شدگی و نرم شدگی کرنشی در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. بر اساس این دو رفتار، بتن مسلح به الیاف را می‌توان به دو دسته بتن الیافی متداول (دارای رفتار نرم شدگی کرنشی) و بتن الیافی با عملکرد بالا (دارای رفتار سخت شدگی کرنشی) تقسیم نمود. رفتار سخت شدگی کرنشی نسبت به رفتار نرم شدگی کرنشی تحت بارهای کششی عملکرد مناسب‌تری دارند و باعث جذب انرژی بیشتری می‌شوند که در نتیجه آن، بتن الیافی شکل‌پذیرتر خواهد شد. هنگامی رفتار سخت شدگی کرنشی به دست می‌آید که مقاومت مصالح بعد از ترک‌خوردگی از مقاومت اولین ترک در بتن بیشتر باشد. در غیر این صورت و در حالتی که مقاومت ایجاد اولین ترک در بتن از مقاومت کششی مصالح بعد از ترک خوردگی بیشتر باشد رفتار نرم شدگی کرنشی را تحت تنش‌های کششی بروز می‌دهد. رفتار سخت شدگی کرنشی همراه با تعداد زیادی از ترک‌های ریز ایجاد می‌شود در حالی که در

¹ Post-cracking strength

² First-cracking strength

رفتار نرم شدگی کرنش یک ترک واحد رخ می‌دهد. اگرچه در رفتار نرم‌شدگی، مقاومت بتن بعد از ترک-خوردگی نسبت به مقاومت نظیر اولین ترک کاهش می‌یابد، اما این رفتار نیز در مقایسه با بتن معمولی بسیار مطلوب است. زیرا در این حالت بتن رفتاری با شکل‌پذیری بالاتر از خود بروز می‌دهد و سطح زیر نمودار تنش-کرنش که به عنوان معیاری برای شکل‌پذیری مصالح در نظر گرفته می‌شود افزایش می‌یابد در نتیجه سبب بهبود شکل‌پذیری بتن می‌گردد.

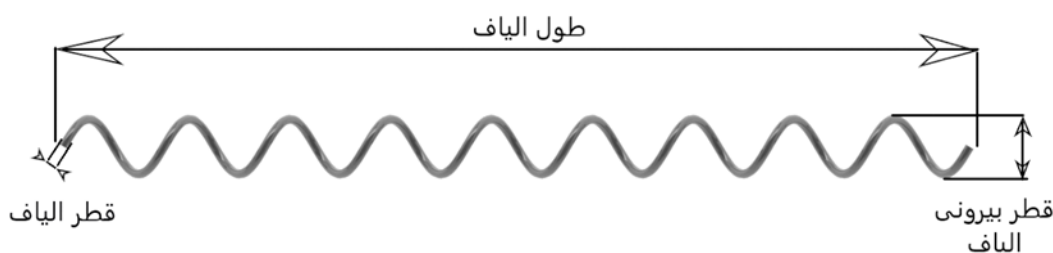
۳-۵- برنامه آزمایشگاهی

در این بخش تأثیر الیاف در بهبود عملکرد بتن به کمک انجام آزمایش کشش مستقیم ارزیابی می‌شود. جهت بررسی و ارزیابی بتن‌های مسلح به الیاف فولادی مارپیچ تحت تنش‌های کششی مستقیم در ابتدا درصدهای مختلف الیاف به ماتریس‌های پایه سیمانی با مقاومت مختلف اضافه شده و نمونه‌های کشش مستقیم دمبلی شکل با استفاده از قالب‌های تهیه شده ساخته می‌شوند. سپس نمونه‌های ساخته شده عمل-آوری می‌شوند و در انتها با انجام آزمایش کشش مستقیم بر روی نمونه‌ها به نتایج قابل قبولی دست می‌یابیم. طرح اختلاط بتن مورد استفاده در آزمایش کشش مستقیم در جدول (۵-۱) ارائه شده است. مقاومت فشاری این ماتریس برابر با ۲۵ مگاپاسکال می‌باشد. الیاف مورد استفاده در ساخت این بتن الیافی از جنس فولادی و نوع مارپیچ می‌باشد. که با دو درصد حجمی مختلف (%/۱۵ ، %/۲۵) مورد استفاده قرار گرفته که در مجموع منجر به ساخت ۶ نمونه گردیده است.

جدول (۵-۱) طرح اختلاط ماتریس پایه سیمانی

آب	سیمان	درشت دانه	ریزدانه	نوع ماتریس
۲۲۰	۴۶۰	۸۸۵	۷۷۰	۳

در شکل (۵-۲) هندسه‌ی الیاف مارپیچ استفاده شده در این پژوهش و در جدول (۵-۲) مشخصات مکانیکی این الیاف ارائه شده است.



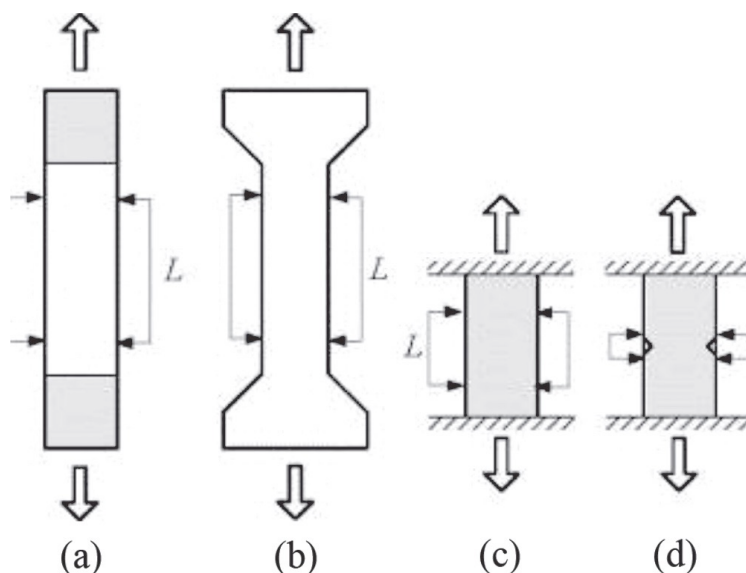
شکل (۵-۲) الیاف مارپیچ فولادی مورد استفاده

جدول (۵-۲) مشخصات مکانیکی الیاف مارپیچ

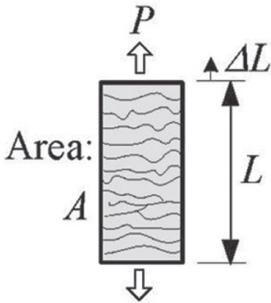
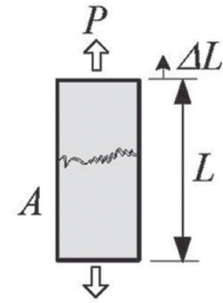
قطر بیرونی الیاف (mm)	تعداد پیچ	مقاومت کششی (MPa)	طول الیاف (mm)	قطر الیاف (mm)
۱/۴۲	۹	۱۵۰۰	۴۰	۰/۴

۴-۵- آزمایش کشش مستقیم

آزمون کشش مستقیم به روش‌های متفاوتی انجام پذیر است. شکل (۳-۵) یک مورد از نمونه‌هایی را که برای آزمایش کشش مستقیم استفاده شده اند نشان می‌دهد. نمونه نشان داده شده در قسمت (a) برای ورق‌ها و صفحات نازک مناسب است. در چنین نمونه‌ای، انتهای آن با صفحات نازک آلومینیومی متصل شده به سطح آن‌ها ارائه می‌شود تا آسیب فک‌های گیره‌های کششی به حداقل برسد. نمونه دمبلی شکل قسمت (b) با مقطعی با انتهای زنگوله دار مشخص می‌شود تا اطمینان حاصل شود که خرابی در قسمت میانی رخ می‌دهد، در نتیجه اجازه می‌دهد فشارهای $\Delta L / L$ در طول L اندازه گیری شود. نمونه موجود در قسمت a (c) می‌تواند منشوری یا استوانه ای باشد که انتهای آن به صفحه های بارگیری فولاد صلب وصل شده باشد. قسمت (d) از شکل یک منشور کششی شکاف دار یا استوانه ای را نشان می‌دهد که برای ارزیابی تنش در برابر بازشدگی ترک ، $\sigma-w$ ، تحت بارگذاری کششی استفاده می‌شود. در این حالت می‌توان دهانه ترک را از جابجایی اندازه گیری شده ΔL بدست آورد و همانطور که در سمت راست شکل (۴-۵) نشان داده شده از کرنش الاستیک صرف نظر کرد [2].



شکل (۳-۵) نمونه هایی از آزمایش های کششی کامپوزیت های FRC [2]

Strain Hardening Composite	Strain Softening Composite
 Area: A Strain: $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$	 Crack Width: $w = \Delta L - L \frac{P}{A} \approx \Delta L$

شکل (۴-۵) محاسبه کرنش یا شکاف تقریبی دهانه [2]

نمونه های آزمایشی ارائه شده در قسمت (a)، (b) و (c) از شکل (۳-۵) برای بتن های الیافی سخت کننده کرنش، که در آن ترک های متعددی قبل از ایجاد یک ترک ناپایدار واحد انتظار می رود، مناسب هستند. از آن جا که هیچ آزمون استاندارد برای FRC ساخته نشده است، تحقیقات موجود درباره این موضوع، اندازه های بسیار متنوعی را نشان می دهد. از آنجا که اثرات اندازه قابل توجه است، هم بستگی بین تحقیقات مختلف نمی تواند به درستی باشد. تا زمانی که یک آزمون استاندارد ایجاد نشود، از چهار توصیه زیر می توان به عنوان راهنما برای اندازه نمونه استفاده کرد [2]:

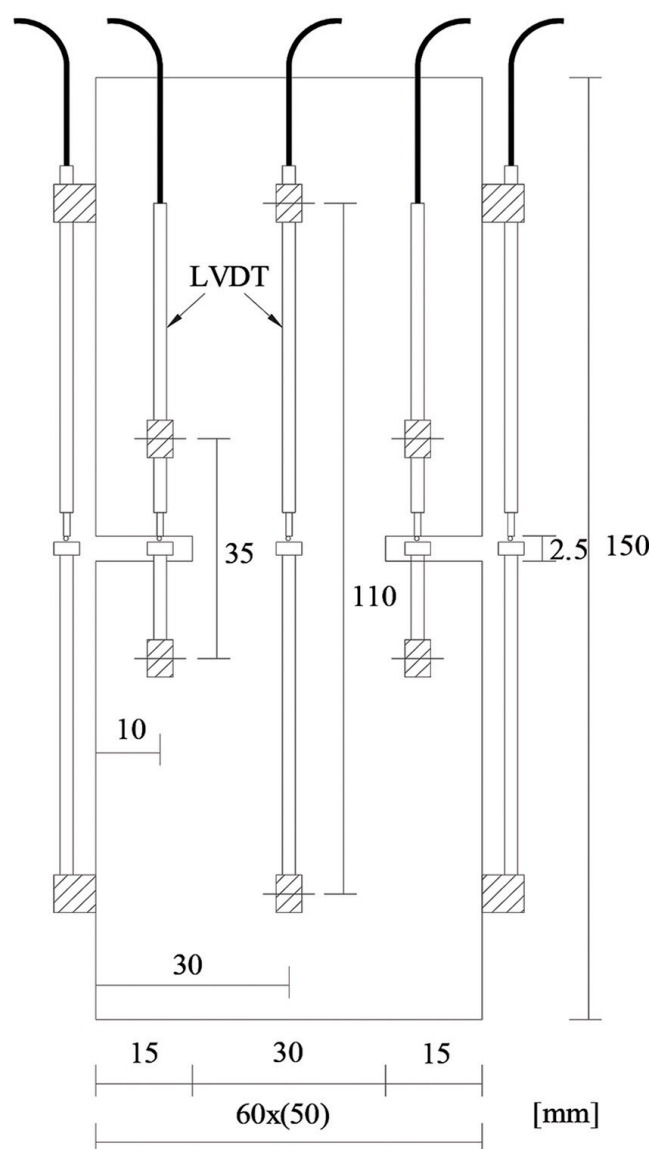
(۱) از منشورهای مقطع مربع یا مدور، با ضلع یا قطر برابر با حداقل ۲ اینچ (۵۰ میلی متر)، سه برابر طول الیاف، شش برابر اندازه حداکثر سنگدانه، هر دو یا هر کدام بزرگتر است استفاده کنید.

(۲) طول سنج برای اندازه گیری کرنش باید حداقل دو تا سه برابر حداقل اندازه (ضلع یا قطر) منشور کششی باشد.

(۳) برای آزمایش هایی که شامل ورق های نازک است، قسمت نمونه می تواند مستطیل شکل باشد، در حالی که ضلع طولانی حداقل معیارهای فوق را برآورده می کند و ضلع کوچکتر برابر ضخامت ورق است.

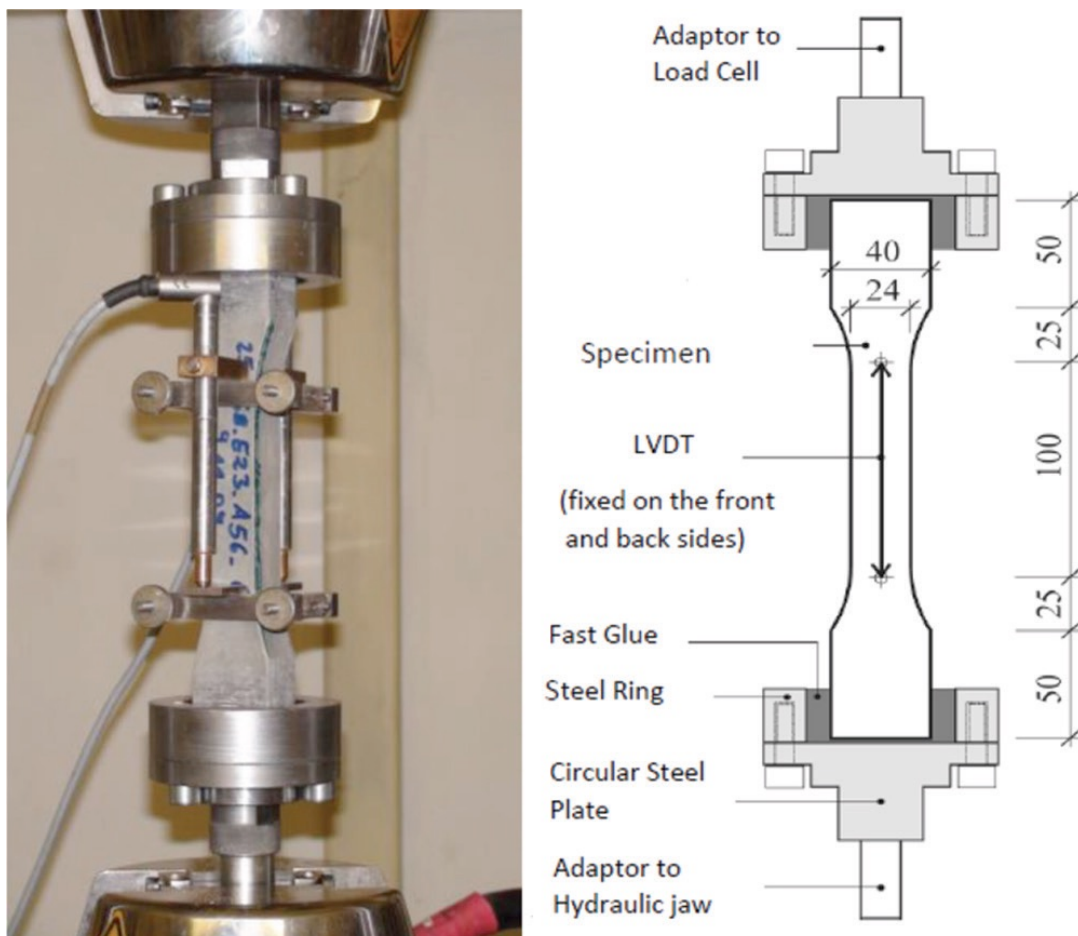
(۴) منشورهای کششی با انتهای مخروطی یا مخصوصاً بسته شده اغلب برای آزمایش کشش مستقیم استفاده می شوند و اگر به درستی انجام شوند، باید به نتایج واقعی منجر شوند.

برای اطمینان از آزمایش های کشش مستقیم، سیگنال کنترل تجهیزات آزمایش سروو باید میانگین سیگنال LVDT ها باشد که در گوشه های نمونه های منشوری، نزدیک سطح شکستگی شکاف کنترل شده قرار دارد (شکل (۵-۵)). فرض بر این است که یک فرایند باز شدن ترک غیر یکنواخت سه بعدی می تواند در ترک مهم رخ دهد، در نتیجه در نمونه های استوانه ای، سه LVDT در اطراف نمونه قرار می گیرد و زاویه های ۱۲۰ درجه بین LVDT های متوالی حفظ می شود.



شکل (۵-۵) ترتیب وسایل اندازه گیری برای اطمینان از آزمایش های کشش مستقیم

شکل (۵-۶) یک آزمایش نمونه دمبلی را نشان می دهد. به منظور ارزیابی دقیق رفتار کششی بتن، در قسمت میانی ارتفاع نمونه بتنی سطح مقطع کاهش می یابد تا تمرکز تنش کششی در این قسمت قرار گیرد و خرابی نمونه در ناحیه با سطح مقطع کاهش یافته رخ دهد.



شکل ۶-۵) پیکربندی برای تست کشش مستقیم با سرعت کم با استفاده از نمونه های دمبل [2].

به کمک این روش می توان علاوه بر ارزیابی مقاومت کششی، رفتار ترک خوردگی مصالح را نیز به خوبی ارزیابی نمود. زیرا ارتفاع مقطع کاهش یافته زیاد بوده (در حدود ۱۰۰ میلیمتر) و در صورت بروز رفتار سخت شدگی نمونه می تواند دچار ترک خوردگی های متعددی در این ناحیه شود. نقطه ضعف این روش عدم قطعیت موجود در ایجاد ترک در طول سطح مقطع کاهش یافته است [2]. در صورتیکه ترک خوردگی خارج از این طول رخ دهد، نتایج آزمایش صحت نداشته و آزمایش می بایست مجدداً تکرار گردد. وجود تمرکز تنش در لبه های نمونه باعث می گردد که تنش های کششی در این نقاط افزایش یافته و ترک خوردگی در لبه ها یا ابتدای مقطع کاهش یافته رخ دهد. به منظور اطمینان از درستی نتایج، چیدمان آزمایش باید از دقت بالایی برخوردار باشد. همچنین انتقال نیروی کششی به نمونه باید به کمک مکانیزم مفصلی و با دقت بسیار زیاد انجام شود. استفاده از مفصل در انتقال نیروی کششی به دلیل حذف لنگر خمشی ناشی از عدم تعادل در انتقال نیرو به نمونه است. این اتفاق بخصوص در مورد نمونه های دمبلی شکل می بایست مورد توجه بیشتری قرار گیرد. با توجه به توضیحات ارائه شده، در تحقیق حاضر از نمونه های دمبلی شکل جهت انجام آزمایش کشش مستقیم و ارزیابی رفتار کشش بتن الیافی استفاده می گردد. با استفاده از این روش، می توان علاوه بر تعیین، رفتار کششی بتن الیافی، الگوی ترک خوردگی مصالح را نیز مورد بررسی قرار داد.

۲-۴-۵- پارامترهای توصیف رفتار کششی

رفتار کششی مصالح پایه سیمانی به دو دسته سخت شدگی کرنشی و نرم شدگی کرنشی تقسیم می‌شود. در این تحقیق سه پارامتر تنش، کرنش و میزان جذب انرژی (سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان) به عنوان پارامترهای اصلی توصیف کننده رفتار کششی در نظر گرفته می‌شوند. روابط زیر بیان کننده این پارامترها می‌باشند.

- 1) $\sigma_t = T/A$
- 2) $\varepsilon_t = \Delta L_g/L_g$
- 3) $G = \sigma d\varepsilon$

در روابط بالا T نیروی کششی، A سطح مقطع نمونه در ناحیه کاهش یافته، σ_t تنش کششی، ΔL_g تغییر طول نمونه در طول مورد اندازه‌گیری (طول مبنا^۱)، L_g طول اولیه نمونه و G سطح زیر نمودار تنش-کرنش است. نقطه‌ی نظیر ایجاد اولین ترک به رفتار کششی مصالح وابسته است. در صورت بروز رفتار نرم‌شدگی (شکل ۵-۱)، حداکثر مقاومت کششی مصالح که تقریباً همان مقاومت کششی ماتریس است، به عنوان مقاومت نظیر ایجاد اولین ترک در نظر گرفته می‌شود. این کمیت با σ_{cc} نشان داده شده و کرنش و مقدار جذب انرژی نظیر این نقطه به ترتیب با ε_{cc} و G_{cc} نشان داده می‌شوند. در صورتی که مصالح دارای رفتار سخت‌شدگی باشند، نقطه نظیر تغییر شیب منحنی به عنوان مقاومت نظیر ایجاد اولین ترک در نظر گرفته می‌شود. حداکثر تنش موجود در مصالح پس از ترک‌خوردگی به عنوان مقاومت پس از ترک‌خوردگی در نظر گرفته می‌شود. این کمیت با σ_{pc} نشان داده شده و کرنش و مقدار جذب انرژی تا این نقطه را نیز به ترتیب با ε_{pc} و G_{pc} نشان داده می‌شود. با توجه به توضیحات فوق شش پارامتر به عنوان پارامترهای مورد نیاز جهت ارزیابی رفتار کششی بتن الیافی در نظر گرفته خواهد شد.

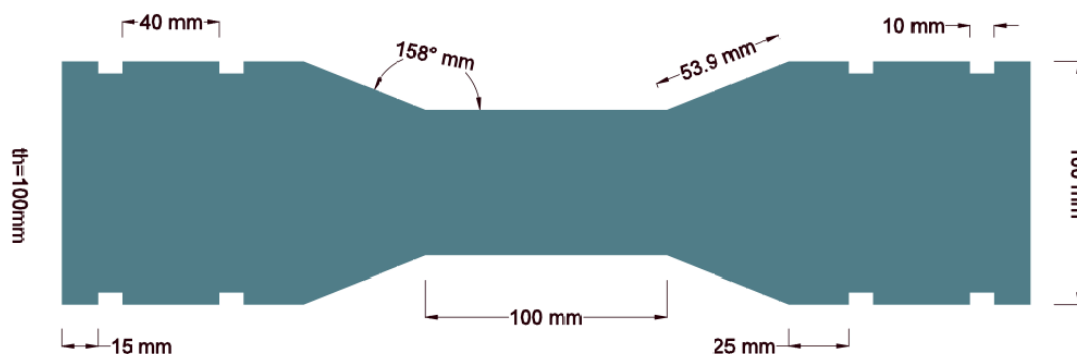
۳-۴-۵- چیدمان و نحوه انجام آزمایش کشش مستقیم

جهت بررسی رفتار کششی در تحقیق حاضر از نمونه‌های بتنی دمبلی شکل استفاده شده است. شکل (۵-۷) جزئیات نمونه‌های آزمایش کشش مستقیم را نشان می‌دهد. ابعاد نمونه‌های دمبلی بر اساس محدودیت‌های قرارگیری نمونه به همراه تنظیمات کشش در دستگاه تست کشش یونیورسال و همچنین بررسی تست‌های انجام شده توسط سایر محققین بدست آمده است. علاوه بر این در طراحی ابعاد نمونه‌ها سعی شده است که طول نمونه در ناحیه با مقطع کاهش یافته به حداکثر مقدار ممکن خود برسد تا با فاصله گرفتن از فک‌های کششی، اثرات تمرکز تنش کاهش یابد و ناحیه‌ای با توزیع تنش‌های کششی یکنواخت در قسمت میانی نمونه با مقطع کاهش یافته تشکیل شود.

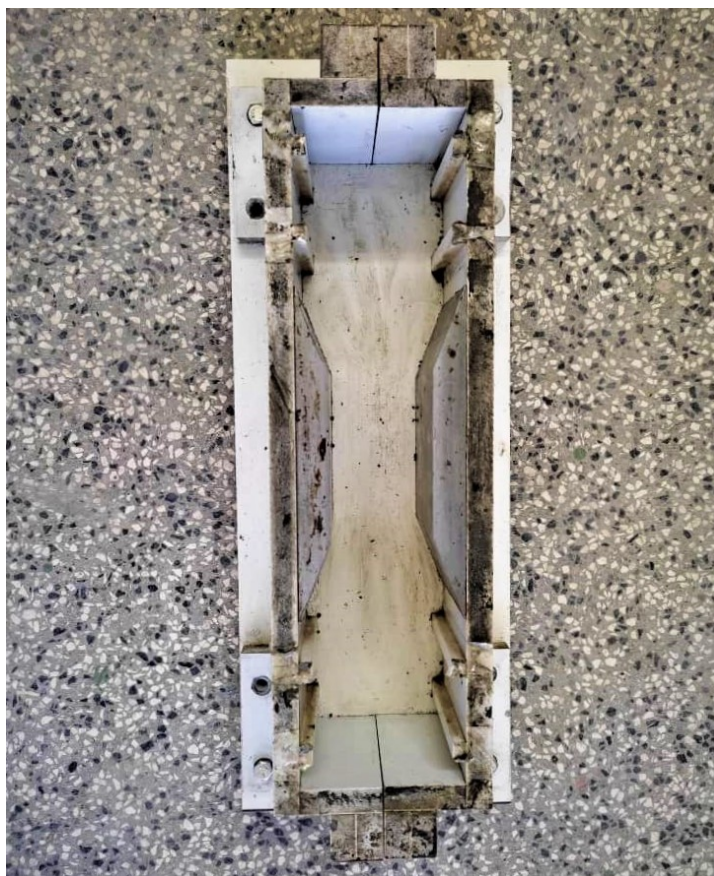
قالب مورد نیاز جهت ساخت نمونه‌های بتنی به کمک PVC و فلز با استفاده از تجهیزات نجاری و برش CNC و تراشکاری ساخته شده است. به منظور دقت بیشتر قالب به خصوص در قسمت زاویه‌دار قالب

¹ Gauge length

از قطعات فلزی برش خورده توسط CNC استفاده شده و همچنین برای سبک بودن و کاهش هزینه و همچنین بهره برداری بیشتر، در ساخت دیواره‌ها و کف قالب از PVC استفاده شده است. دقت ساخت نمونه‌های بتنی تست کشش مستقیم باعث ثبات و کاهش پراکندگی نتایج آزمایش‌ها می‌شود. قالب استفاده شده در ساخت نمونه‌های بتنی در شکل (۵-۸) نشان داده شده است.

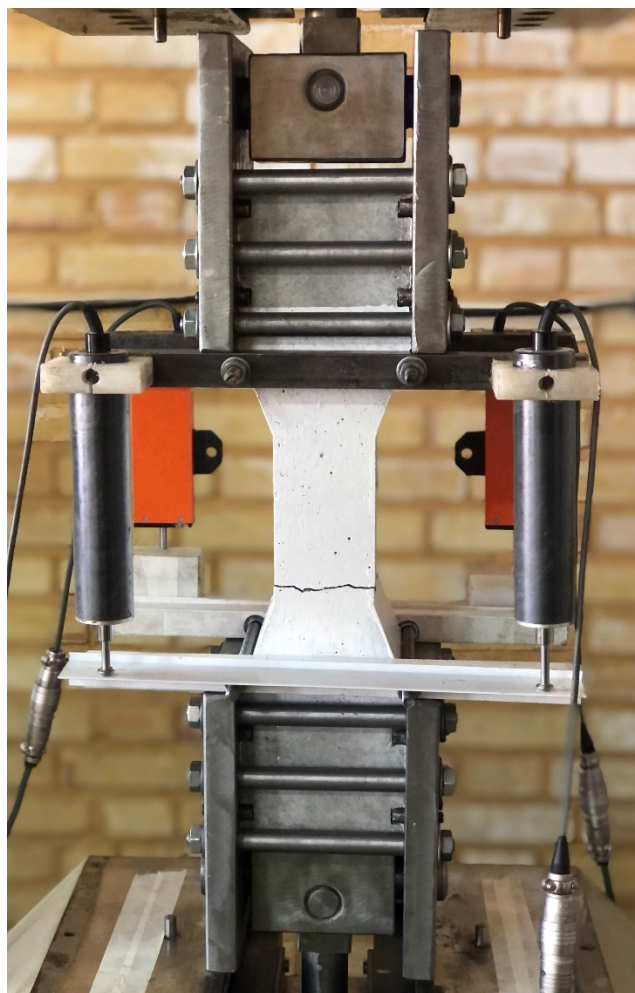


شکل (۵-۷) هندسه و ابعاد نمونه‌های دمبلی شکل



شکل (۵-۸) قالب بکار رفته در ساخت نمونه‌های بتنی

شکل (۵-۹) سیستم گیرنده نمونه‌های کشش مستقیم را نشان می‌دهد. با توجه به شکل برای ثبت جابه‌جایی‌های حاصل از کشش و تغییر طول نمونه‌های بتنی، چهار تغییرمکان‌سنج در چهار گوشه نمونه توسط تنظیمات فلزی بکار گرفته شده است. طول مبنا که در آن تغییر طول‌ها اندازه‌گیری می‌شود، ۱۵۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. میانگین تغییر طول‌های بدست آمده توسط چهار تغییرمکان‌سنج، به عنوان تغییر شکل نهایی نمونه در نظر گرفته شده و در ترسیم نمودارها این مقدار مورد استفاده قرار می‌گیرد.



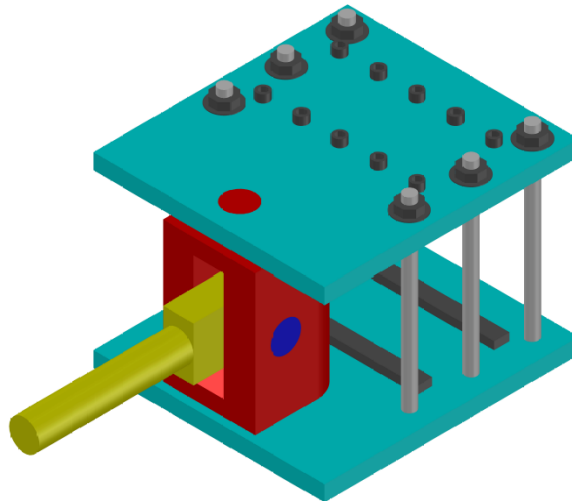
شکل (۵-۹) چیدمان آزمایش کشش مستقیم

اندازه‌گیری نیروی کششی اعمال شده به نمونه‌های دمبلی توسط نیروسنج متصل به دستگاه که در فک پایینی آن قرار گرفته شده انجام می‌شود. برای ثبت اطلاعات تغییرمکان‌سنج‌ها از دستگاه ثبت داده‌ها^۱ استفاده شده است. در این دستگاه داده‌ها با فرکانس ۱ هرتز در حین آزمایش ثبت می‌شوند. بارگذاری نمونه‌ها به وسیله جک هیدرولیکی و به صورت کنترل تغییرمکان به نمونه اعمال شده است. بارگذاری به روش کنترل تغییرمکان این امکان را فراهم می‌سازد که بتوان بخش نزولی نمودار که مربوط به رفتار نرم‌شدگی است را ثبت نمود. نحوه‌ی انتخاب سرعت بارگذاری به گونه‌ای است که بتواند شرایط بارگذاری استاتیکی را در نمونه ایجاد نماید. از این‌رو بارگذاری طوری اعمال گردیده که نرخ افزایش کرنش در نمونه ۰/۰۰۰۱ در هر ثانیه باشد.

^۱ Data logger

۴-۴-۵- ستاپ فیکسچر

فیکسچر به کار رفته برای انجام آزمایش‌های کشش مستقیم از دستاوردهای مختص این پژوهش است. برای ساخت این فیکسچر از فولاد ST52 که داری مقاومت کافی برای انجام تمامی آزمایش‌های کشش مستقیم بتن الیافی می‌باشد، استفاده شده است.



شکل (۱۰-۵) فیکسچر به کار رفته برای انجام آزمایش کشش مستقیم

همان‌طور که در شکل (۵-۱۰) نشان داده شده است بتن توسط دو صفحه‌ی فولادی با ایجاد اصطکاک بسیار بالا که توسط پیچ‌های بین دو صفحه ایجاد می‌شود محکم شده است و شیارهای ایجاد شده در بتن و برآمدگی روی دو صفحه مانع از جدایی احتمالی بتن از فیکسچر خواهند شد و در نتیجه یک چسبندگی و گیرداری مناسب بین بتن و فیکسچر ایجاد می‌شود.

قابلیت حائز اهمیت این فیکسچر عملکرد مفصلی آن در دو جهت عمود بر هم است که باعث ایجاد یک مفصل دایروی خواهد شد. در نتیجه عملکرد مفصلی، به هنگام اعمال نیروی کششی به فیکسچر نیروی کشش خالص بدون هیچ‌گونه ممان به نمونه‌ی بتنی اعمال خواهد شد. این ویژگی برای اولین بار ارائه می‌شود.

۵-۴-۵- ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایش کشش مستقیم با استفاده از مخلوط کن ELE ساخته شده است. طرح اختلاط مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های کششی مطابق بخش ۳-۳ در نظر گرفته شده است. بنابراین ترتیب مراحل اختلاط مصالح بدین صورت است که همانند بخش ۳-۳ ابتدا سنگ‌دانه‌ها، سیمان، آب و روان‌کننده برای دستیابی ماتریس به کارایی مناسب با یکدیگر مخلوط شده و در انتها الیاف به تدریج به آن اضافه می‌گردد. افزودن الیاف در ماتریس سیمانی باید به نحوی باشد که الیاف در آن به صورت یکنواخت توزیع گردد.

پیش از ریختن ماتریس به داخل قالب، سطوح داخلی قالب‌ها به روغن قالب آغشته می‌شود. روغن قالب سبب عدم چسبندگی قالب و نمونه بتنی شده و باز کردن قالب‌ها راحت می‌شود و همچنین از آسیب دیدن نمونه‌ها در حین بازکردن قالب جلوگیری می‌کند. ریختن مخلوط به داخل قالب‌ها به نحوی انجام

می‌گردد که این توزیع یکنواخت و تصادفی حفظ گردد. پس از ریختن مخلوط در داخل قالب، عملیات متراکم کردن آن با استفاده از میز لرزان انجام می‌شود. به همین منظور قالب‌ها در حدود ۳۰۰ ثانیه بر روی میز لرزان قرار داده می‌شوند. سپس سطح نمونه‌ها پرداخت شده و برای جلوگیری از تبخیر سطحی روی قالب‌ها با استفاده از پوشش‌های پلاستیکی پوشانده می‌شود. قالب‌ها بعد از مدت زمان ۲۰-۲۴ ساعت باز شده و نمونه‌ها به مدت ۷ روز داخل حوضچه آب قرار می‌گیرند. از قالب‌های نشان داده شده در شکل (۵-۸) برای ساخت نمونه‌ها، استفاده شده است. اندازه‌گیری ابعاد مختلف نمونه‌ها نشان از دقت بالای قالب‌های ساخته شده دارد. ابعاد تمامی نمونه‌ها با ابعاد در نظر گرفته شده، مطابقت می‌نمود. با توجه به درصد‌های الیاف بکار رفته در ماتریس، مجموعاً ۶ نمونه بتنی ساخته شده که ماتریس بتنی مسلح به الیاف با درصد‌های حجمی ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد می‌باشند. شکل (۵-۱۰) کل نمونه‌های بتنی ساخته شده جهت ارزیابی رفتار کششی بتن الیافی را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۱) نمونه‌های بتن مسلح به الیاف مورد استفاده جهت ارزیابی رفتار کششی

۶-۴-۵- کنترل چیدمان آزمایش کشش مستقیم

از مهم‌ترین عوامل در انجام آزمایش کشش مستقیم، ایجاد شرایط تنش کششی محوری و یکنواخت در نمونه‌ها است، بنابراین باید تمامی ابعاد قطعات و ملحقاتی که برای اعمال نیروی کششی، ثابت نگه داشتن نمونه و تغییر مکان‌سنج‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، دقت بالایی داشته باشد. علاوه بر این کلیه ملحقات آزمون به همراه نمونه می‌بایست در راستای قائم هم محور گردند. بدین طریق می‌توان از عدم ایجاد لنگر خمشی در حین آزمون اطمینان حاصل نمود. لازم بذکر است که کلیه تمهیدات لحاظ شده فوق صرفاً تا قبل

از ترک خوردگی نمونه معتبر می‌باشد و با ایجاد اولین ترک و گسترش آن در بخشی از مقطع، هم‌محوری نمونه از بین رفته و بروز لنگر خمشی در این شرایط اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. به منظور کنترل دقت چیدمان آزمایش و اطمینان از برقراری شرایط هم‌محوری در نمونه و ملحقات آزمون، می‌توان با توجه به عدم وجود ترک در مراحل اولیه بارگذاری و به کمک تغییر مکان ثبت شده توسط هر کدام از تغییر مکان‌سنج‌ها این مهم را کنترل نمود. در صورتیکه تغییر مکان ثبت شده توسط تغییر مکان‌سنج-ها، اختلاف داشته باشد، شرایط هم‌محوری در نمونه برقرار نبوده و بدلیل ایجاد لنگر خمشی در نمونه مصالح تحت تنش کششی محوری خالص قرار نخواهند گرفت.

۵-۴-۷- نتایج آزمون کشش مستقیم

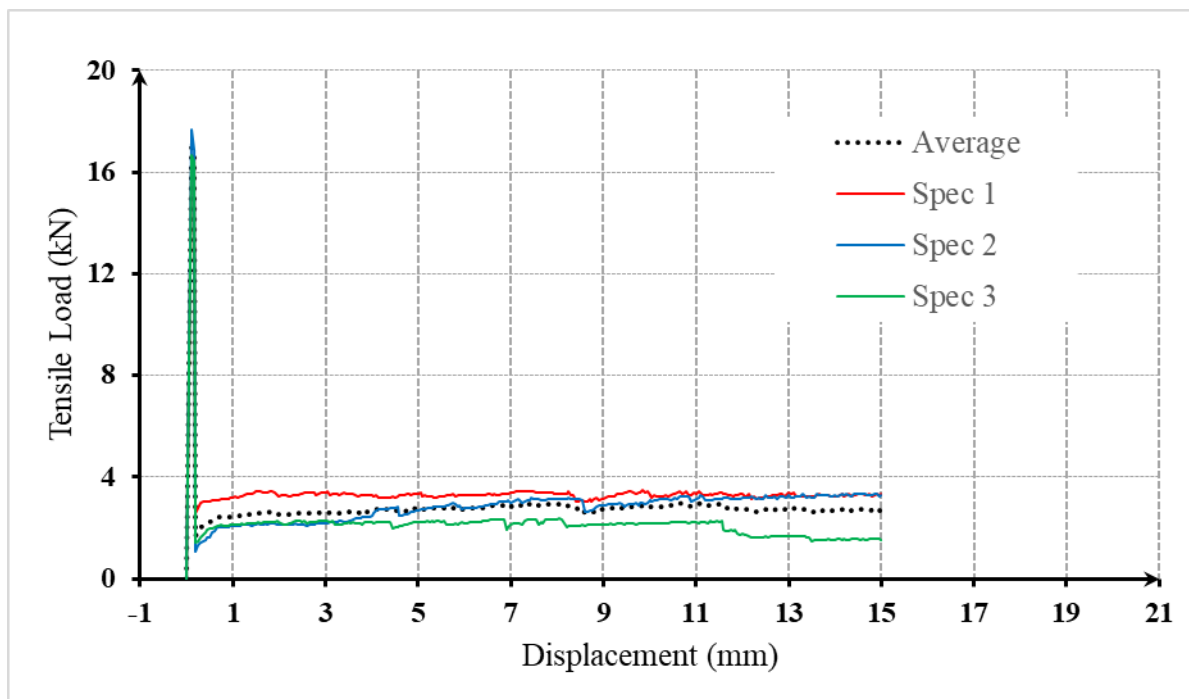
به طور کلی برای بررسی رفتار بتن مسلح به الیاف تحت نیروی کششی جمعا ۶ نمونه بتن الیافی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌ها بر اساس مقاومت ماتریس و همچنین میزان درصد الیاف به کار رفته در آن‌ها نام‌گذاری شدند. اطلاعات نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمایش کشش مستقیم در جدول (۳-۵) ارائه شده است. نمونه‌ها با دو درصد حجمی مختلف الیاف شامل ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد ساخته شدند. به ازای هر درصد حجمی سه نمونه یکسان ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند.

جدول (۳-۵) مشخصات نمونه‌ها

درصد حجمی الیاف	نوع الیاف	نوع ماتریس	تعداد نمونه‌ها	نوع نمونه‌ها	نام نمونه‌ها
۰/۱۵	Spirally	Mortar	۳	Dog-bone	FRC-0.15%
۰/۲۵	Spirally	Mortar	۳	Dog-bone	FRC-0.25%

۵-۴-۷-۲- ارزیابی رفتار کششی ماتریس پایه سیمانی مسلح به الیاف

نمودار نیرو-جاب‌جایی و نیرو-تغییر طول نمونه‌های بتن الیافی مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف در شکل (۵-۱۱) نشان داده شده است که در آن، محور افقی نمودار از دو قسمت تشکیل شده، قسمت اول کرنش بوجود آمده در نمونه پیش از ترک خوردگی و قسمت دوم آن نشان دهنده بازشدگی عرض ترک پس از ترک خوردگی و افت نیروی بیشینه است.



شکل (۵-۱۲) نمودار نیرو-جابجایی بتن الیافی مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف

باز شدگی عرض ترک پس از ایجاد اولین ترک خوردگی شروع می‌شود، بنابراین مفهوم کرنش تنها تا پیش از ترک خوردگی معتبر می‌باشد. تمامی نمونه‌های مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف، رفتار نرم‌شدگی کرنشی تحت تنش‌های کششی را بروز داده‌اند. در هیچ یک از این نمونه‌ها ترک خوردگی‌های متعدد مشاهده نگردید. در ابتدا با شروع بارگذاری بر روی نمونه‌های بتن الیافی، رفتار این مصالح بصورت الاستیک خطی بود و این روند تا قبل از رسیدن به مقاومت نظیر ایجاد اولین ترک ادامه داشت. به محض ایجاد اولین ترک، مقاومت مصالح، به یکباره افت کرد و عمل دوخت بتن توسط الیاف (قرار گیری الیاف بین دو سطح ترک خورده بتن و انتقال نیرو بین این دو سطح) باعث شد که مصالح ظرفیت باربری خود را از دست ندهند و همچنان قادر به تحمل تنش‌های کششی باشند. ظرفیت باربری این مصالح تقریباً تا زمان بیرون کشیدگی کامل تمامی الیاف‌های مارپیچ ادامه داشت.

جدول (۵-۴) نتایج آزمون کشش مستقیم بتن مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف

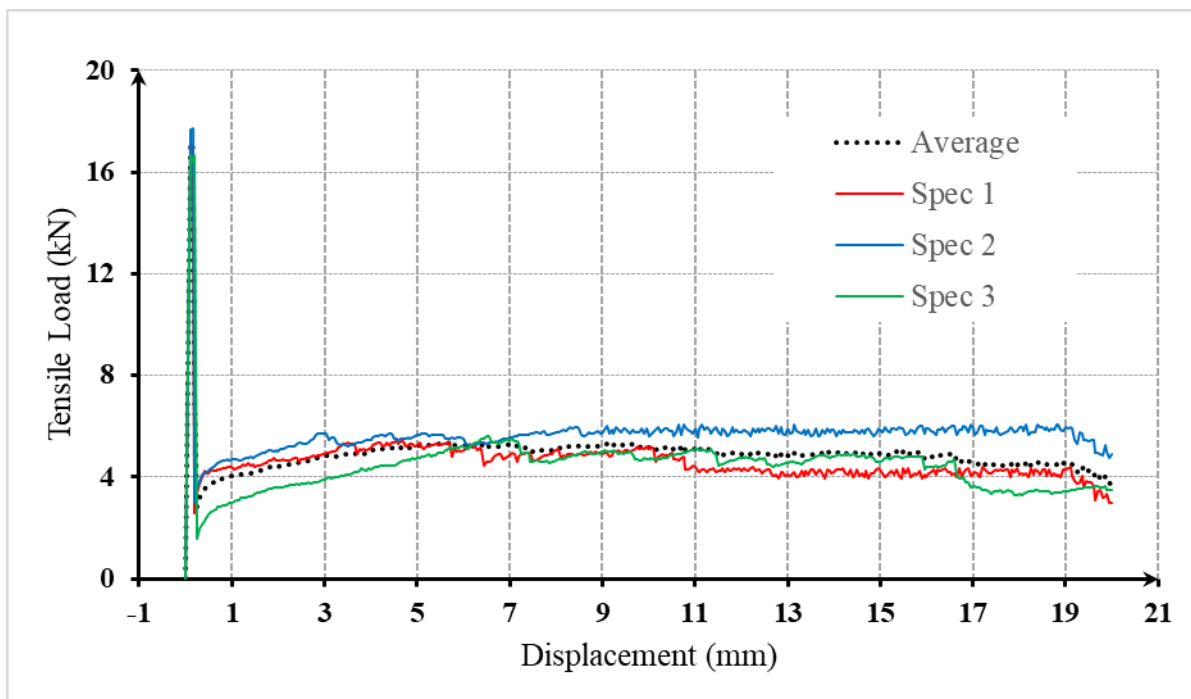
Fiber type	V_F (%)	Specimen	σ_{cc} (M_{pa})	σ_{pc} (M_{pa})	G_{cc} (N.mm)	G_{pc} (N.mm)	Crack Location
spirally	0.15	1	2.776	0.58	2144.952	48554.2	in reduced section
		2	2.942	0.56	2194.255	41362.61	in reduced section
		3	2.775	0.39	2105.125	30324.56	in reduced section
AVERAGE			2.831	0.51	2148.111	40080.46	

در جدول (۴-۵) نتایج بدست آمده از آزمایش کشش مستقیم نمونه‌های مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف آورده شده است. با توجه به تعاریف قبلی، چنانچه مقاومت پس از ترک‌خوردگی بتن الیافی از مقاومت نظیر ایجاد اولین ترک بیشتر باشد، مصالح دارای رفتار سخت‌شدگی کرنش هستند. بنابراین، نتایج نشان دهنده بروز رفتار نرم‌شدگی کرنش در این مصالح هستند. مقاومت نظیر ایجاد اولین ترک در این مصالح بطور متوسط ۲/۸۳۱ مگاپاسکال و مقاومت پس از ترک‌خوردگی ۰/۵۱ مگاپاسکال است. شکل (۵-۱۲) نمونه مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف در ابتدای آزمایش قبل از ترک‌خوردگی و پس از ایجاد ترک را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۳) نحوه ترک‌خوردگی ماتریس پایه سیمانی مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف

شکل (۵-۱۳) نمودار تنش-کرنش ماتریس پایه سیمانی مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف را نشان می‌دهد.



شکل (۱۴-۵) نمودار تنش-کرنش بتن الیافی مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف

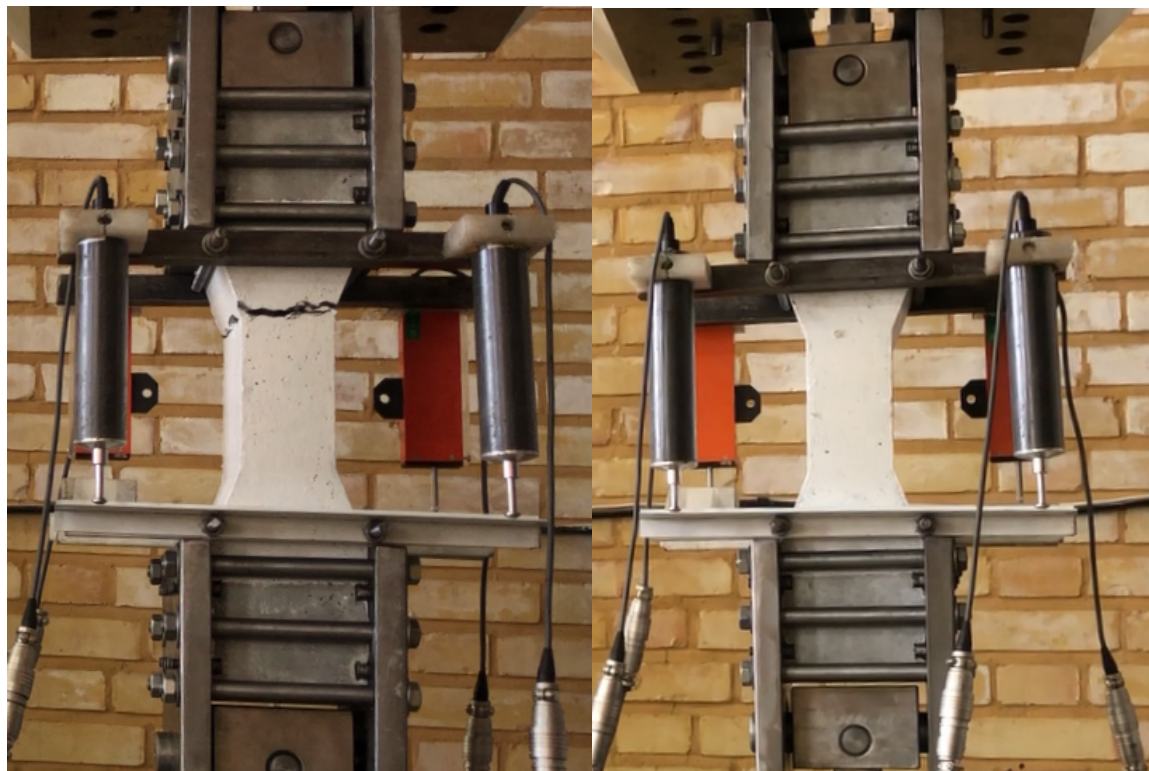
شکل (۱۳-۵) نمودار تنش-کرنش بتن الیافی مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصله و شکل (۱۳-۵) ملاحظه می‌شود که نمونه‌های مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف تحت تنش‌های کششی رفتار نرم‌شدگی کرنش را نشان داده‌اند. همچنین با توجه به اینکه در تمامی نمونه‌ها یک ترک اصلی و تعدادی ریز ترک ایجاد شده است می‌توان به نتیجه دست یافت که نمونه‌های با ۰/۲۵ درصد الیاف نیز دچار رفتار نرم‌شدگی کرنش شده‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که رفتار مصالح مسلح شده با ۰/۲۵ درصد الیاف همانند رفتار مصالح مسلح شده با ۰/۱۵ درصد الیاف می‌باشد. به عبارت دیگر افزایش ۰/۱ درصدی الیاف باعث تغییر رفتار کلی مصالح نمی‌شود ولیکن این افزایش درصد الیاف، باعث بهبود رفتار پس از ترک خوردگی مصالح می‌گردد.

جدول (۵-۵) نتایج آزمون کشش مستقیم بتن مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف

<i>Fiber type</i>	<i>V_F</i> (%)	<i>Specimen</i>	<i>σ_{cc}</i> (<i>M_{pa}</i>)	<i>σ_{pc}</i> (<i>M_{pa}</i>)	<i>G_{cc}</i> (<i>N.mm</i>)	<i>G_{pc}</i> (<i>N.mm</i>)	<i>Crack Location</i>
<i>spirally</i>	<i>0.25</i>	<i>1</i>	<i>2.858</i>	<i>0.91</i>	<i>2177.508</i>	<i>69445.52</i>	<i>in reduced section</i>
		<i>2</i>	<i>2.954</i>	<i>1.01</i>	<i>2287.997</i>	<i>81934.85</i>	<i>in reduced section</i>
		<i>3</i>	<i>2.781</i>	<i>0.94</i>	<i>2943.672</i>	<i>66394.35</i>	<i>in reduced section</i>
<i>AVERAGE</i>			<i>2.864</i>	<i>0.95</i>	<i>2573.64</i>	<i>72743.04</i>	

جدول (۵-۵) نتایج آزمایش کشش مستقیم بتن مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف را نشان می‌دهد. مقاومت

نظیر ایجاد اولین ترک در ماتریس مسلح شده با ۰/۲۵ درصد الیاف ۲/۸۶۴ مگاپاسکال و مقاومت پس از ترک خوردگی ۰/۹۵ مگاپاسکال می‌باشد.



شکل (۵-۱۵) نحوه ترک خوردگی ماتریس پایه سیمانی مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف

نحوه ترک خوردگی بتن مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف تحت تنش کششی در شکل (۵-۱۴) نشان داده شده است. با توجه به این که گسیخته شدن این مصالح از طریق ایجاد یک ترک اصلی و باز شدگی همان ترک بوده می‌توان این الگوی ترک خوردگی را ناشی از بروز رفتار نرم‌شدگی و کم بودن درصد الیاف دانست. لازم به ذکر است که در تمامی نمونه‌ها ترک ایجاد شده در طول مبنا (نزدیکی مرز طول مبنا) بوده است. بنابراین تغییر طول ایجاد شده بعد از ترک خوردگی (بازشدگی عرض ترک مربوطه) توسط تغییر مکان - سنج‌ها ثبت شده و نتایج تغییر مکان‌های ثبت شده برای این نمونه‌ها معتبر می‌باشد.

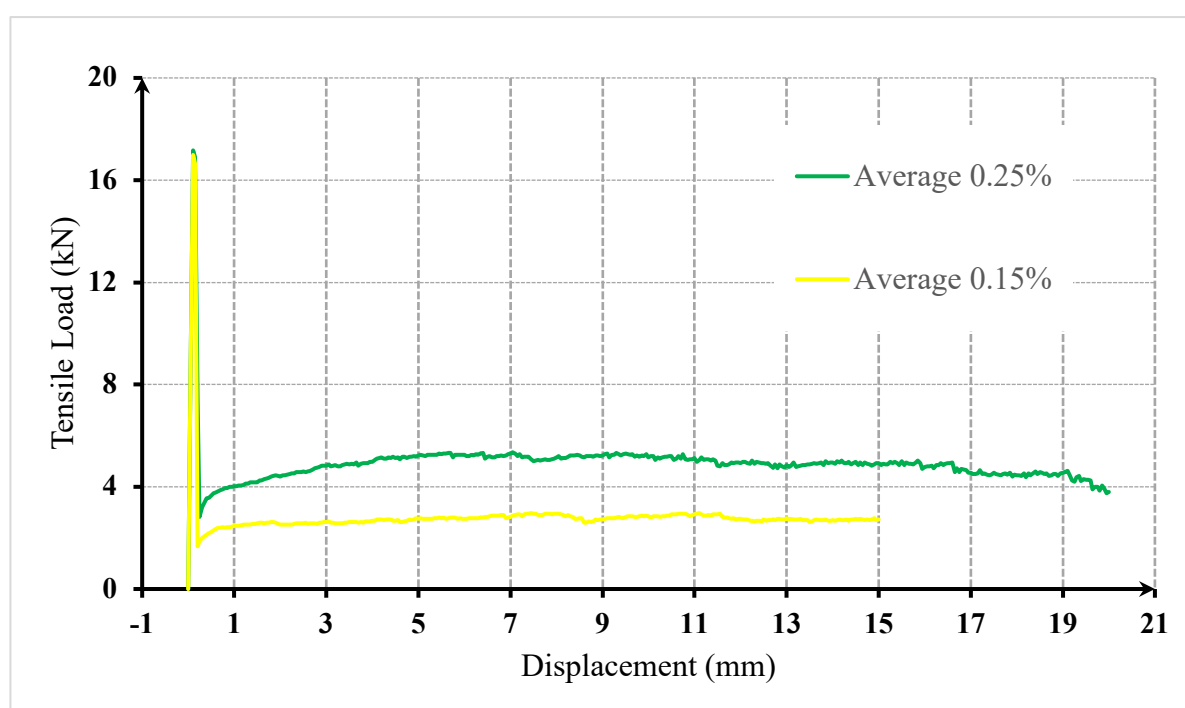
۸-۴-۵- تاثیر درصد الیاف بر پارامترهای رفتار کششی

رفتار کششی ماتریس پایه سیمانی مسلح شده با درصدهای مختلف الیاف مارپیچ به کمک آزمایش کشش مستقیم ارزیابی شده و نتایج آن در بخش قبل ارائه گردید. در این بخش به منظور درک بهتر تأثیر درصدهای متفاوت الیاف بر رفتار کششی مصالح مرکب پایه سیمانی، پارامترهای مربوط به رفتار کششی این

مصالح مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۵-۱۵) رفتار کششی ماتریس‌های پایه سیمانی مسلح به ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد الیاف را نشان می‌دهد.

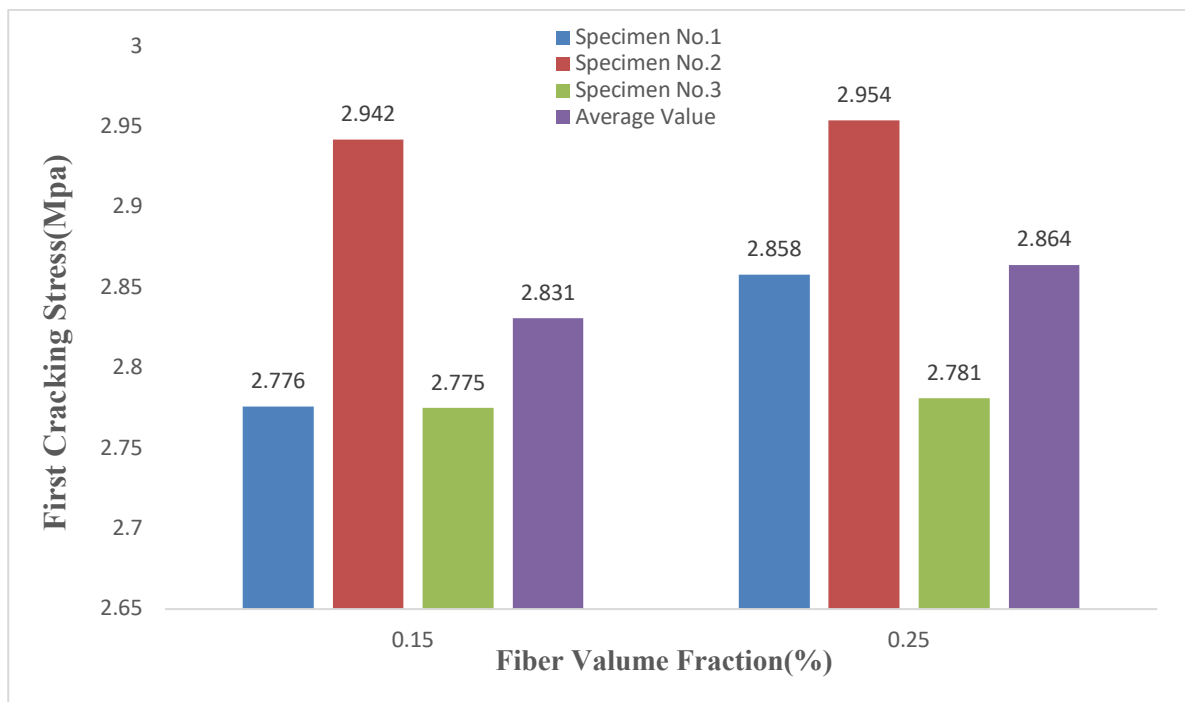
همانطور که در شکل (۵-۱۵) می‌توان مشاهده کرد، ماتریس‌های مسلح شده به ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد الیاف، رفتار نرم‌شدگی کرنشی را بروز داده‌اند و اضافه کردن درصدهای مختلف الیاف باعث تغییر رفتار کلی مصالح نگردیده است.

لازم به ذکر است که رفتار مصالح پس از ترک‌خوردگی تابع نوع الیاف بکار برده شده می‌باشد و نتیجه گیری فوق را نمی‌توان به هر نوع الیاف فولادی دیگری تعمیم داد. با توجه به رفتار کششی نمونه‌ها، می‌توان گفت که بیشترین درصد الیاف بکار برده شده در این آزمایشات (۰/۲۵ درصد) برای بروز رفتار سخت‌شدگی کرنشی کافی نبوده است و در صورت لزوم می‌بایست درصد الیاف را افزایش داد.



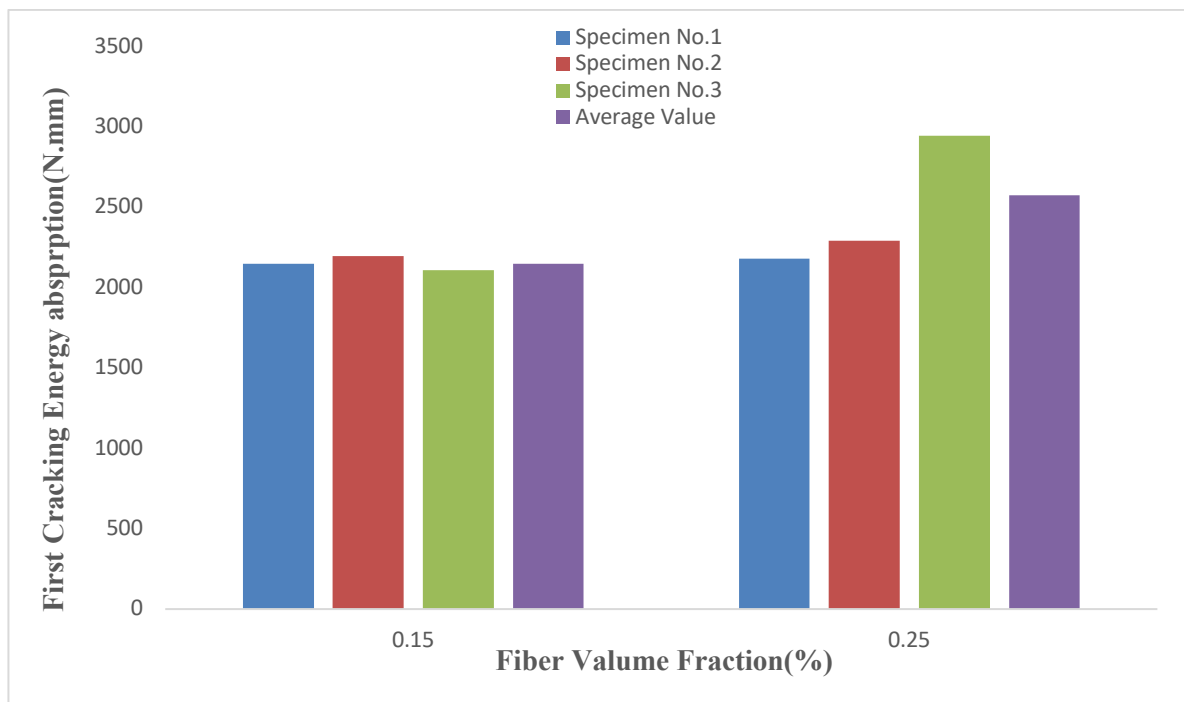
شکل (۵-۱۶) تاثیر درصد حجمی الیاف بر رفتار کششی ماتریس

با توجه به شکل (۵-۱۵) می‌توان دریافت که هرچند رفتار نمونه‌های دارای ۰/۲۵ درصد الیاف نیز نرم‌شدگی کرنشی بوده ولیکن مقاومت پس از ترک‌خوردگی آن افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با نمونه‌های دارای ۰/۱۵ درصد الیاف داشته است. نکته دیگری که می‌توان به آن اشاره نمود، تغییر رفتار مصالح دارای الیاف در مقایسه با ماتریس بدون الیاف است. ماتریس بدون الیاف پس از ترک‌خوردگی هیچگونه مقاومتی نداشته و با تشکیل اولین ترک مقاومت خود را بطور کامل از دست داده و گسیخته می‌شود. درحالی‌که در ماتریس‌های دارای الیاف، مصالح ظرفیت باربری خود را پس از ترک‌خوردگی از دست نمی‌دهند. این امر حتی در ماتریس مسلح شده با ۰/۱۵ درصد الیاف نیز مشهود است. به عبارت دیگر مهم‌ترین تأثیر الیاف را می‌توان القاء شکل‌پذیری به ماتریس سیمانی ترد و شکننده دانست.



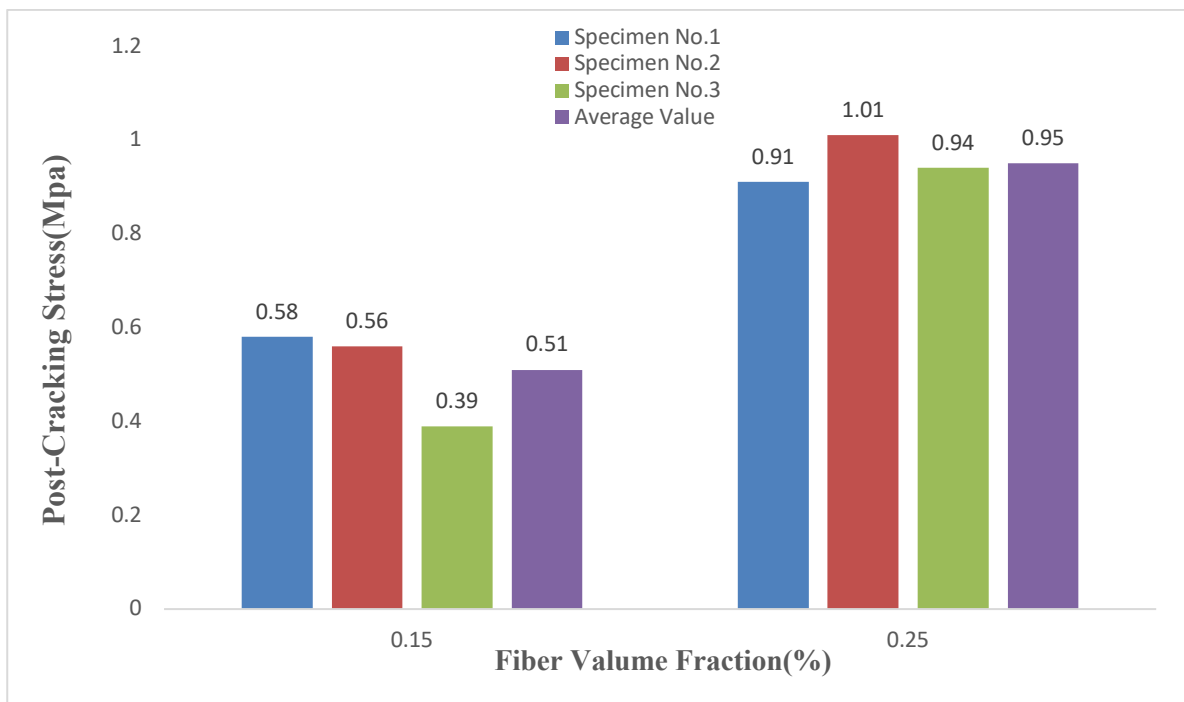
شکل ۱۷-۵) تاثیر درصد حجمی الیاف بر مقاومت نظیر اولین ترک خوردگی

شکل (۵-۱۶) تاثیر درصد حجمی الیاف بر مقاومت نظیر ایجاد اولین ترک در ماتریس را نشان می‌دهد. نمودار فوق مقادیر مقاومت نظیر اولین ترک خوردگی را در تمامی نمونه‌های مورد آزمایش قرار گرفته نشان می‌دهد. علاوه بر این مقادیر متوسط این پارامتر با استفاده از نتایج نمونه‌ها محاسبه و ترسیم شده است. تاثیر اضافه کردن الیاف بر مقاومت نظیر ایجاد اولین ترک در ماتریس برای نمونه‌های مسلح به ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد الیاف در حدود ۱/۱ درصد می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که مقاومت نظیر اولین ترک خوردگی، به طور مستقیم تابع درصد الیاف نبوده، لیکن اضافه کردن الیاف باعث بهبود نسبی مقدار مقاومت نظیر ایجاد اولین ترک در ماتریس می‌گردد.



شکل ۱۸-۵) تاثیر درصد حجمی الیاف بر جذب انرژی نظیر اولین ترک خوردگی

اثرگذاری درصد حجمی الیاف بر انرژی نظیر ایجاد اولین ترک در بتن الیافی در شکل (۵-۱۷) نشان داده شده است. با توجه به دانسته های قبلی انتظار می رود که درصد حجمی الیاف تأثیر زیادی بر رفتار و خصوصیات قبل از ترک خوردگی ماتریس نداشته باشند. لیکن، افزایش جذب انرژی نظیر ترک خوردگی در نمونه های ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد را می توان به افزایش مقادیر تنش نظیر اولین ترک خوردگی مربوط دانست. ولیکن با توجه به پراکندگی نتایج مربوط به تنش نظیر اولین ترک خوردگی، بروز برخی پراکندگی ها در نتایج مقادیر جذب انرژی طبیعی می باشد.

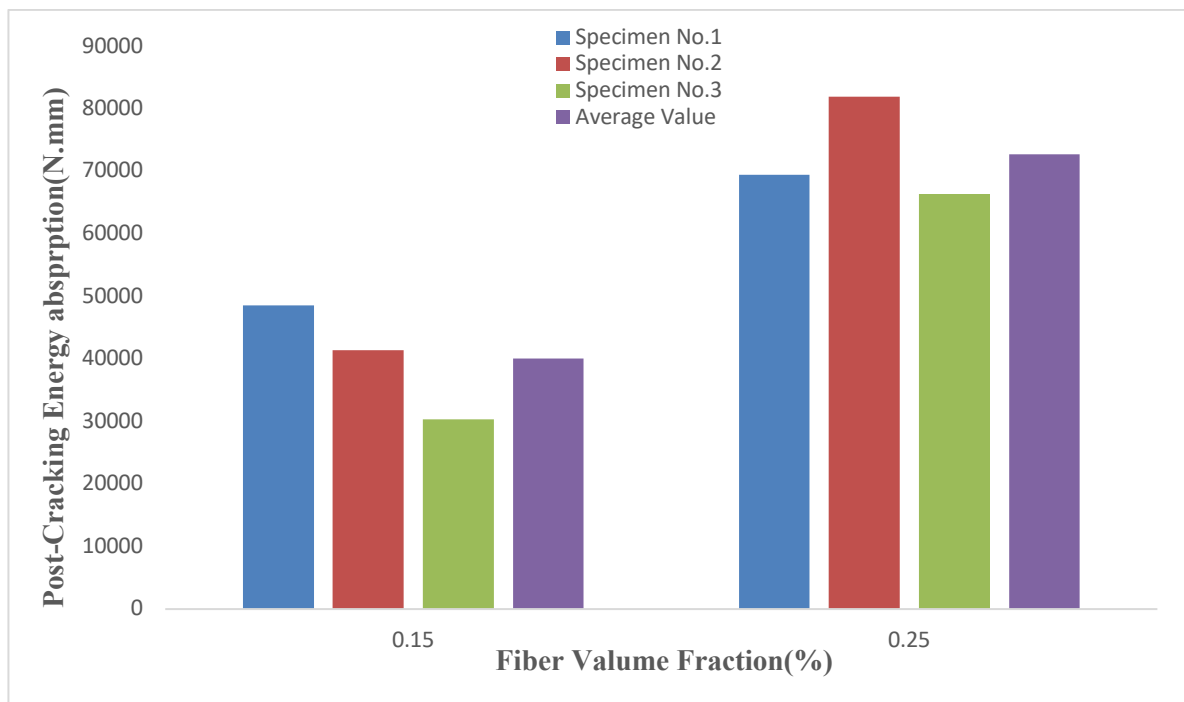


شکل (۱۹-۵) تاثیر الیاف بر مقاومت پس از ترک خوردگی

تأثیر درصد حجمی مختلف الیاف بر مقاومت پس از ترک خوردگی در شکل (۵-۱۸) نشان داده شده است. با توجه به اینکه درصد الیاف موجود در ماتریس بیشترین نقش را در افزایش مقاومت پس از ترک خوردگی دارد، بنابراین مقاومت پس از ترک خوردگی با افزایش درصد الیاف موجود در ماتریس، افزایش می‌یابد. روند این افزایش در شکل (۵-۱۸) نشان داده شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌گردد که مقاومت نظیر پس از ترک خوردگی در نمونه‌های مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف به میزان ۸۶/۲ درصد نسبت به نمونه‌های مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف افزایش یافته است.

درصد حجمی الیاف به تعداد الیاف موجود در سطح بتن وابسته است. افزایش تعداد الیاف باعث انتقال نیروی بیشتری بین دو سطح ترک خورده بتن می‌شود و در نتیجه باعث افزایش مقاومت پس از ترک خوردگی بتن می‌شود. مقاومت پس از ترک خوردگی می‌تواند تا اندازه‌ای افزایش یابد که باعث بروز رفتار سخت‌شدگی در مصالح بتنی شود. بروز رفتار سخت‌شدگی کرنش علاوه بر افزایش مقاومت پس از ترک خوردگی، در مقاصد طراحی، باعث افزایش میزان شکل‌پذیری مصالح نیز می‌شود. علاوه بر این پارامترهای مربوط به الیاف استفاده شده در ماتریس، با توجه به مکانیزم بیرون کشیده شدن آن، تأثیر زیادی بر مقاومت پس از ترک خوردگی خواهد داشت.

شکل (۵-۱۹) نشان دهنده تأثیر درصدهای حجمی مختلف الیاف بر انرژی نظیر مقاومت پس از ترک خوردگی است. در ماتریس‌های مسلح به ۰/۲۵ درصد در مقایسه با ماتریس مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف مقدار انرژی به میزان ۸۱/۵ درصد افزایش پیدا کرده است. سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی بعنوان میزان جذب انرژی تعریف می‌گردد. تنش نظیر مقاومت پس از ترک خوردگی در ماتریس مسلح به ۰/۲۵ الیاف، بیشتر از ماتریس دارای ۰/۱۵ الیاف هستند. در نتیجه سطح زیر نمودار و مقدار جذب انرژی نظیر مقاومت پس از ترک خوردگی ماتریس افزایش می‌یابد.



شکل ۲۰-۵) تاثیر الیاف بر انرژی نظیر مقاومت پس از ترک خوردگی

۹-۴-۵- ترک خوردگی نمونه‌ها

جهت ارزیابی ترک خوردگی نمونه‌های کششی بتن مسلح به درصد‌های مختلف الیاف، پارامترهایی چون تعداد ترک‌ها، عرض ترک‌ها و فاصله آن‌ها از یکدیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در خصوص ترک خوردگی نمونه‌های ماتریس مسلح به الیاف می‌توان گفت که هرچه تعداد ترک‌ها بیشتر و فاصله آن‌ها از هم‌دیگر کمتر باشد، جذب انرژی مصالح و شکل‌پذیری آن‌ها بیشتر است. بهترین حالت الگوی ترک خوردگی در بتن مسلح به الیاف مربوط به حالتی است که در آن ترک خوردگی‌های متعدد در فواصل بسیار کم رخ داده و نمونه رفتار سخت‌شدگی کرنشی از خود نشان دهد، این شرایط در حالتی بروز می‌کند که انرژی لازم برای ایجاد ترک جدید از انرژی لازم برای بازشدگی ترک موجود بیشتر می‌باشد، که در این حالت، تمایل ماتریس به ترک خوردگی‌های متعدد می‌باشد. این شرایط معمولاً در حالتی رخ می‌دهد که در هنگام بازشدگی ترک الیاف در نیرویی نزدیک به مقاومت گسیختگی خود از ماتریس بیرون کشیده شوند. از طرف دیگر اضافه کردن درصد‌های مختلف الیاف باعث تغییر الگوی ترک خوردگی مصالح می‌گردد و در صورت کافی بودن درصد الیاف و مناسب بودن مشخصات ماتریس ممکن است رفتار مصالح از نرم‌شدگی کرنشی به سخت‌شدگی کرنشی تغییر پیدا کند. در شکل‌های (۲۰-۵) و (۲۱-۵) به ترتیب نحوه ترک خوردگی نمونه‌های مسلح به ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد الیاف نشان داده شده است.



شکل (۵-۲۱) الگوی ترک خوردگی مصالح پایه سیمانی مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف



شکل (۵-۲۲) الگوی ترک خوردگی مصالح پایه سیمانی مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف

همانطور که در شکل (۵-۲۱) و (۵-۲۲) مشاهده می شود الگوی ترک خوردگی در نمونه های مسلح به ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد الیاف مشابه هم دیگر بوده و یک ترک اصلی و تعدادی ریز ترک در اطراف آن رخ داده و شکست نمونه نیز با باز شدگی این ترک ادامه یافته است. بررسی نمودارهای تنش- کرنش و تنش- باز شدگی عرض ترک مربوط به این نمونه ها رفتار نرم شدگی کرنشی را برای این نمونه ها نشان می دهد. با این وجود

اضافه کردن درصد الیاف باعث بهبود رفتار پس از ترک خوردگی مصالح از نظر میزان مقاومت و جذب انرژی در تغییر مکان های مشخص شده و باعث بهبود شکل پذیری مصالح می گردد.

۱۰-۴-۵- نتیجه گیری بررسی رفتار کششی بتن مسلح به الیاف فولادی مارپیچ

در این بخش با استفاده از آزمایش کشش مستقیم رفتار کششی ماتریس پایه سیمانی مسلح به الیاف بررسی شده و نتایج حاصله در ادامه مطرح گردیده است. با بکارگیری آزمایش کشش مستقیم می توان رفتار کششی ماتریس های پایه سیمانی مسلح به الیاف را در مراحل مختلف بارگذاری شامل قبل و پس از ترک خوردگی بررسی نمود. استفاده از نمونه های دمبلی شکل این امکان را فراهم می سازد که علاوه بر ثبت منحنی نیرو-تغییر مکان بتوان الگوی ترک خوردگی مصالح را نیز ارزیابی نمود. با توجه به اطلاعات بدست آمده از ارزیابی آزمایشگاهی رفتار کششی ماتریس های پایه سیمانی مسلح به درصدهای حجمی متفاوت الیاف، نتایج ذیل قابل استخراج است:

- با انجام آزمایش کشش مستقیم به کمک نمونه های دمبلی شکل، رفتار کششی بتن در مراحل مختلف بارگذاری به طور کامل ارزیابی می شود.
- چیدمان و قرارگیری ستاپ آزمایش کشش مستقیم دارای دقت بالایی بودند و امکان ارزیابی الگوی ترک خوردگی مصالح را فراهم کردند.
- بتن های مسلح به ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد الیاف دارای رفتار نرم شدگی کرنشی بودند.
- اضافه کردن الیاف به ماتریس تاثیر چندانی بر خصوصیات قبل از ترک خوردگی ماتریس چون مقاومت ندارد.
- الگوی ترک خوردگی در بتن با حجم الیاف ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد مشابه هم بود و یک ترک اصلی در آنها رخ داد.
- مقاومت نظیر ایجاد اولین ترک در ماتریس با افزایش حجم الیاف از ۰/۱۵ به ۰/۲۵ درصد الیاف در حدود ۱/۱ درصد افزایش می یابد. در نتیجه مقاومت نظیر اولین ترک خوردگی، به طور مستقیم تابع درصد الیاف نیست، با این حال اضافه کردن الیاف باعث افزایش نسبی مقدار مقاومت نظیر ایجاد اولین ترک در ماتریس می شود.
- در نمونه های مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف مقاومت نظیر پس از ترک خوردگی (پس از نیروی بیشینه) به میزان ۸۶/۲ درصد نسبت به نمونه مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف افزایش یافته است. درصد الیاف موجود در ماتریس نقش مهمی را در افزایش قدرت و جذب انرژی پس از ترک خوردگی ایفا می کند.

فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۶- نتیجه گیری

هدف کلی این تحقیق، بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ از بتن و مطالعه رفتار کششی بتن مسلح به الیاف مارپیچ بود که بدین ترتیب سه هدف اصلی به شرح زیر تعیین گردید:

۱. ارزیابی خصوصیات ماتریس پایه سیمانی
۲. بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ
۳. ارزیابی رفتار کششی کامپوزیت پایه سیمانی مسلح به الیاف مارپیچ

در ادامه با بیان خلاصه‌ای از کارهای انجام شده در هر قسمت به نتایج حاصل اشاره می‌گردد.

۱-۶-۱- نتایج حاصل از ارزیابی خصوصیات ماتریس پایه سیمانی

برای بررسی و ارزیابی ویژگی‌های ماتریس پایه سیمانی، آزمایش مربوط به تعیین مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای انجام شد و مقادیر مقاومت فشاری برای سه ماتریس ۱و۲و۳ به ترتیب برابر با ۲۰/۶، ۳۰/۸ و ۲۵/۵ مگاپاسکال بدست آمد.

۲-۱-۶- نتایج حاصل از بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ

در این بخش آزمایش بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ فولادی از بتن‌های با مقاومت ۲۰ و ۳۰ مگاپاسکال با زوایای تمایل الیاف ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه در طول‌های مدفون الیاف ۱۰، ۱۵، ۳۰ میلیمتر نمودارهای نیرو- جابه‌جایی برای تمامی نمونه‌ها بدست آمد و با بررسی و تحلیل آن‌ها نتایج زیر بدست آمد:

- تنوع زیادی از نیروی بیرون کشیدگی برای بعضی از الیاف و ماتریس‌های یکسان بدست آمده است.
- با توجه به اثر لنگر مکانیکی فراهم شده توسط مارپیچ الیاف که مقاومت در برابر بیرون کشیدگی الیاف را افزایش می‌دهد، بین پاسخ بیرون کشیدن الیاف مستقیم و الیاف مارپیچ تفاوت زیادی وجود دارد. در الیاف مستقیم، افزایش طول تعبیه شده باعث افزایش مقاومت در برابر بیرون کشیدگی می‌شود. در مقابل، برای الیاف مارپیچ، استحکام خروج به شدت به شکل و مشخصات الیاف بستگی دارد و طول تعبیه شده در مقاومت بیرون کشیدگی نقش ثانویه‌ای دارد.
- مقاومت بیرون کشیدگی با مقاومت ماتریس رابطه‌ی مستقیم دارد.
- رفتار بیرون کشیدگی الیاف مایل با الیاف تراز بدون زاویه متفاوت است. جابجایی مربوط به نیروی بیرون کشیدگی، همیشه برای الیاف مایل نسبت به الیاف تراز بیشتر است. تفاوت این امر به دلیل خرابی

ماتریس است که باعث کاهش طول تعبیه شده و اجازه می‌دهد چرخش فیبر باعث جابجایی اضافی بدون لغزش الیاف شود.

- گسیختگی الیاف قبل از بیرون کشیدگی کامل باعث از دست رفتن کل ظرفیت انتقال بار می‌شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد که شکست الیاف به سطح اتصال ماتریس و الیاف بستگی دارد. این رابطه باید هنگام طراحی FRC به دقت مورد بررسی قرار گیرد تا از خرابی الیاف جلوگیری شود.

- در خصوص جذب انرژی بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ، الیاف با زاویه تمایل صفر درجه نسبت به الیاف مایل مقدار انرژی بیشتری جذب می‌نمایند و مقدار انرژی بیرون کشیدگی با افزایش زاویه تمایل کاهش می‌یابد.

- در بیرون کشیدگی الیاف فولادی از ماتریس مشاهده گردید که در زوایای تمایل بالاتر به دلیل خردشدگی موضعی ماتریس و کنده شدگی آن در نقطه خروج الیاف مقدار نیروی ماکزیمم کاهش می‌یابد.

- مشاهده گردید، ظرفیت کششی استفاده شده الیاف (مؤثر بودن الیاف)، با افزایش طول مدفون، در زوایای ثابت اضافه می‌گردد، مگر در جایی که در الیاف گسیختگی رخ دهد، همچنین با افزایش زاویه تمایل این مقدار کاهش می‌یابد.

- الیاف مارپیچ ظرفیت جذب انرژی و رفتار مناسبی پس از نیروی حداکثر نشان دادند. اگرچه رفتار سخت شونده مشاهده نشد اما حفظ نیرو در تغییر مکان‌های قابل ملاحظه و رفتار نرم شوندگی بسیار جزئی نشان دهنده رفتار بیرون کشیدگی مناسب این الیاف می‌باشد.

۳-۱-۶- نتایج حاصل از ارزیابی رفتار کشش مستقیم

در این بخش آزمون کشش مستقیم بر روی نمونه‌های بتنی مسلح به دو درصد حجمی متفاوت (۰/۱۵ و ۰/۲۵) الیاف فولادی مارپیچ انجام شد. با توجه به اطلاعات کسب شده از ارزیابی آزمایشگاهی رفتار کششی ماتریس‌های پایه سیمانی مسلح به درصد‌های حجمی متفاوت الیاف، نتایج زیر بدست آمد:

- با انجام آزمایش کشش مستقیم به کمک نمونه‌های دمبلی شکل، رفتار کششی بتن در مراحل مختلف بارگذاری به طور کامل ارزیابی می‌شود.
- چیدمان و قرارگیری ستاپ آزمایش کشش مستقیم دارای دقت بالایی بودند و امکان ارزیابی الگوی ترک خوردگی مصالح را فراهم کردند.
- ماتریس‌های پایه سیمانی مسلح به ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد الیاف دارای رفتار کلی نرم‌شدگی

- کرنشی بودند.
- اضافه کردن الیاف به ماتریس تاثیر چندانی بر خصوصیات قبل از ترک خوردگی ماتریس چون مقاومت ندارد.
- الگوی ترک خوردگی در بتن با حجم الیاف ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد مشابه هم بود و یک ترک اصلی در آن‌ها رخ داد.
- مقاومت نظیر ایجاد اولین ترک در ماتریس با افزایش حجم الیاف از ۰/۱۵ به ۰/۲۵ درصد الیاف در حدود ۱/۱ درصد افزایش می‌یابد. در نتیجه مقاومت نظیر اولین ترک خوردگی، به طور مستقیم تابع درصد الیاف نیست، با این حال اضافه کردن الیاف باعث افزایش نسبی مقدار مقاومت نظیر ایجاد اولین ترک در ماتریس می‌شود.
- در نمونه‌های مسلح به ۰/۲۵ درصد الیاف مقاومت نظیر پس از ترک خوردگی (پس از نیروی بیشینه) به میزان ۸۶/۲ درصد نسبت به نمونه مسلح به ۰/۱۵ درصد الیاف افزایش یافته است. درصد الیاف موجود در ماتریس نقش مهمی را در افزایش قدرت و جذب انرژی پس از ترک خوردگی ایفا می‌کند.

۴-۱-۶- پیشنهادات

- بررسی رابطه تحلیلی میان بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ از بتن و رفتار کششی بتن مسلح به الیاف مارپیچ
- مطالعه بر روی رفتار بیرون کشیدگی الیاف مارپیچ در شرایط مختلف بارگذاری با سرعت‌های متفاوت.
- بهینه سازی الیاف مارپیچ و مطالعه بر روی رفتار بیرون کشیدگی آن از ماتریس‌های با مقاومت بالا
- بررسی تکمیلی کشش مستقیم بتن مسلح به الیاف مارپیچ در مقاومت‌های بالاتر

مراجع

- [1] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2017). Concrete microstructure, properties and materials.
- [2] ACI Committee 544.9R. (2017). Report on Measuring Mechanical Properties of Hardened Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute.
- [3] ACI Committee 544.1R. (2009). Report on Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute.
- [4] Singh, H. (2016). Steel fiber reinforced concrete: behavior, modelling and design. Springer.
- [5] Kosmatka, S. H., & Wilson, M. L. Design And Control Of Concrete Mix. Pca
- [6] ACI Committee 544.5R. (2010). Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete. American Concrete Institute.
- [7] ACI Committee 544.2R. (2017). Report on the Measurement of Fresh State Properties and Fiber Dispersion of Fiber-Reinforced Concrete. American Concrete Institute.
- [8] ACI Committee 544.3R. (2008). Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete. American Concrete Institute.
- [9] Isla, F., Ruano, G., & Luccioni, B. (2015). Analysis of steel fibers pull-out. Experimental study. Construction and Building Materials, 100, 183-193.
- [10] Abdallah, S., Fan, M., & Rees, D. W. (2018). Predicting pull-out behaviour of 4D/5D hooked end fibres embedded in normal-high strength concrete. Engineering Structures, 172, 967-980.
- [11] Hao, Y., & Hao, H. (2017). Pull-out behaviour of spiral-shaped steel fibres from normal-strength concrete matrix. Construction and Building Materials, 139, 34-44.
- [12] Hao, Y., Hao, H., & Chen, G. (2016). Experimental investigation of the behaviour of spiral steel fibre reinforced concrete beams subjected to drop-weight impact loads. Materials and Structures, 49(1-2), 353-370.
- [13] Hajsadeghi, M., & Chin, C. S. (2019). Geometrical and material optimisation of

deformed steel fibres: Spirally deformed fibres. *Engineering Structures*, 199, 109636.

[14] ASTM C39 / C39M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020

[15] Opelt, C. V., Becker, D., Lepienski, C. M., & Coelho, L. A. (2015). Reinforcement and toughening mechanisms in polymer nanocomposites–carbon nanotubes and aluminum oxide. *Composites Part B: Engineering*, 75, 119-126.

[16] Lee, Y., Kang, S. T., & Kim, J. K. (2010). Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2030-2041.

[17] Abbas, Y. M., & Khan, M. I. (2016). Fiber–matrix interactions in fiber-reinforced concrete: a review. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4), 1183-1198.

[18] Hajsadeghi, M., Jalali, M., Chin, C., Zirakian, T., & Bahrebar, M. (2021). Flexural Performance of Fibre Reinforced Concrete with an Optimised Spirally Deformed Steel Fibre. *International Journal of Engineering*, 34(6), 1390-1397.

[19] Naaman, A. E., & Shah, S. P. (1976). Pull-out mechanism in steel fiber-reinforced concrete. *Journal of the Structural Division*, 102(8), 1537-1548.

[20] Wang, Y., Backer, S., & Li, V. C. (1988). A special technique for determining the critical length of fibre pull-out from a cement matrix. *Journal of materials science letters*, 7(8), 842-844.

[21] Naaman, A. E. (2003). Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. *Journal of advanced concrete technology*, 1(3), 241-252.

Abstract

The main objective of this research is to investigate the pull-out behavior of spirally steel fibers and mechanical properties of fiber reinforced composites. The research is divided into three parts. In the first, mechanical properties of cementitious matrix including compressive strength have been determined .

In the second part, pull-out behavior of spirally steel fiber has been evaluated by means of experimental tests on single fiber embedded in cementitious matrix. The effect of fiber embedded length and angle of inclination and Matrix compressive strength are evaluated together with the interaction of these parameters. The experimental program involved single fiber pull-out test of five inclination angle and three embedded length. The studied inclination angles were 0, 15, 30, 45 and 60 degrees. The embedded lengths were 10, 15 and 20 mm. Compressive strength of matrix was 20 and 30 Mpa. The length and diameter of spirally steel fibers were 40 mm and 0.4 mm, respectively and their tensile strength was 1500 Mpa. The pull-out results indicated that the spirally steel fiber exhibits slip-hardening behavior as a result of plastic hinge formation in spirally part of fiber. This mechanism increases bond strength and pull-out energy of fiber .

In the final part, In order to evaluate the tensile behavior of cementitious composite base materials reinforced with helical fibers, the tensile behavior of fibrous concrete has been investigated by performing direct tensile test on dumbbell-shaped samples. In this section, the behavior of fiber reinforced concrete is evaluated by examining the relevant parameters such as bearing capacity, energy absorption and post-cracking behavior. In order to compare different tensile behavior of composites, Direct traction tests performed on cementitious composites reinforced with 0.15% and 0.25% spirally steel fibers with Compressive strength 25 Mpa. The result showed that cementitious composites with 0.15% and 0.25% spirally steel fibers exhibit deflection-softening behavior. The percentage of fibers in the matrix plays an important role in increasing the strength and energy absorption after cracking.

Keywords: Spirally Steel fiber, pull-out, inclination angle, Direct traction, deflection-softening



**Shahrood University of
Technology**

Faculty of Civil Engineering

M.Sc.(M.A. or Ph.D.) Thesis in Civil-Structural Engineering

Experimental study of tensile strength of concrete reinforced with spiral fibers

By: Amir Hosein Peyvandi

Supervisor:
Dr. Meysam Jalali

Advisor:
Dr. Mohammad Haj Sadeghi

October . 2021