

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد سازه

بررسی اثر نرخ بارگذاری بر مشخصات مکانیکی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با عملکرد بالا

نگارنده: سلیمان نوری پور

استاد راهنما

دکتر فرشید جندقی علایی

مهر ۱۴۰۰

شماره: ۱۷۳، ۱۴۰۰/۴
تاریخ: ۱۳، ۹، ۱۴۰۰
ویرایش:

باسمه تعالی

فرم های ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی های ۹۴ به بعد



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳): صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سلیمان نوری پور شماره دانشجویی ۹۶۳۶۱۶۴ رشته مهندسی عمران گرایش سازه تحت عنوان بررسی اثر نرخ بارگذاری بر مشخصات مکانیکی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با عملکرد بالا که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید بشرح ذیل اعلام می گردد:

☒ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
☐ نظری	☐ عملی
نوع تحقیق:	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر فرشید جندقی علایی	دانشیار	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر فرنوش باسلیقه	استادیار	
استاد ممتحن اول	دکتر جلیل شفایی	استادیار	
استاد ممتحن دوم	دکتر میثم جلالی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده مهندسی عمران

دکتر رضا نادری

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

دانشگاه صنعتی شاهرود

تقدیم بہ پدر و مادرم، آنان کہ مهرشان
در قاموس سخن نمی‌کند.

سپاسگزاری...

حال که مراحل این پایان نامه روبه اتمام نهاده، لازم می دانم تا از تمام عزیزانی که در این راه ایجاب رایاری رساندند، مراتب اتنان و قدردانی را داشته باشم. با سپاس بی کران از استاد فرزانه، جناب دکتر فرشید جنتی علایی که رهنمون های ارزشمندشان چراغ راه بنده بود و این پرورش میون حمایت و پشتیبانی های ایشان است.

همچنین از آقایان منصور جامعی و داود فاضلی به واسطه ی مساعدت بی دریغشان سپاسگزارم، و موفقیت و سلامت ایشان در مراحل مختلف زندگی را از خداوند متعال خواستارم.

در انتها از تمامی دوستان عزیزم که به اشکال مختلف در طول مدت انجام این تحقیق رایاری رساندند، تشکر و قدردانی می نمایم.

تعهد نامه

اینجانب **سلیمان نوری پور** دانشجوی کارشناسی ارشد رشته **سازه مهندسی عمران** دانشگاه شاهرود، نویسنده پایان نامه با عنوان **بررسی اثر نرخ بارگذاری بر مشخصات مکانیکی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با عملکرد بالا**، تحت راهنمایی دکتر **فرشید جندقی** علایی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های دیگر پژوهش گران، به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب این پایان نامه، تا کنون توسط خود، یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارایه نشده است.
- حقوق معنوی این اثر، به دانشگاه صنعتی شاهرود تعلق دارد، و مقالات مستخرج با نام “ دانشگاه صنعتی شاهرود “ یا “ Shahrood University of Technology “ به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند، در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در تمام مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در تمام مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته (یا استفاده شده است)، اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

سلیمان نوری پور

مهر ۱۴۰۰

مالکیت نتایج و حق نشر

- تمام 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 این پایان‌نامه بدون ذکر منبع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

یکی از راهکارهای غلبه بر رفتار تردشکن بتن، افزودن الیاف به آن و تولید بتن الیافی است. در دهه‌های اخیر بهبود چشمگیر رفتار بتن‌های الیافی به‌واسطه‌ی مجموعه‌ای از پیشرفت‌ها در حوزه‌های مختلف ماتریس، الیاف، پیوند بین الیاف و ماتریس، فرآیند تولید و درک بهتر مکانیسم‌های اساسی کنترل کننده رقم خورده است. امروزه بتن‌های مسلح به الیاف قابلیت جذب انرژی بالایی دارند، که علاقه به بررسی رفتار آن‌ها در نرخ‌های بارگذاری بالاتر از محدوده‌ی استاتیکی را تشدید می‌کند. هدف این تحقیق بررسی اثر نرخ بارگذاری بر رفتار بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس و ارتباط آن با رفتار خمشی بتن‌های مسلح به الیاف است. به این منظور عملکرد بیرون کشیدگی سه نوع الیاف قلابدار با نسبت ظاهری ۹۲، ۷۰ و ۵۰ به وسیله‌ی یک چیدمان نوآورانه تحت بارگذاری با سه نرخ کرنش $\dot{\epsilon} = 1E - 5$ ، $\dot{\epsilon} = 1E - 3$ و $\dot{\epsilon} = 3E - 2$ در محدوده‌ی متناظر با نرخ کرنش استاتیکی تا لرزه‌ای آزمایش شد. همچنین عملکرد خمشی تیرهای مسلح به یک درصد حجمی الیاف مطابق ASTM C1609 تحت بارگذاری در محدوده نرخ کرنش مشابه قرار گرفت. از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای محاسبه تغییرمکان وسط دهانه و مشاهده‌ی نحوه‌ی توزیع و گسترش ترک در میدان کرنش دوبعدی استفاده شد. نتایج آزمون بیرون کشیدگی افزایش بیشینه تنش کششی ایجاد شده در الیاف، مقاومت پیوند بین الیاف و ماتریس و کار انجام شده برای بیرون کشیدگی الیاف با افزایش نرخ بارگذاری را نشان داد. مقاومت پیوند به ازای واحد سطح برای الیاف با نسبت ظاهری ۹۲ بیش از دو برابر الیاف با نسبت ظاهری ۵۰ در تمام نرخ‌های بارگذاری می‌باشد. از طرفی ظرفیت باربری، طاقت و مقاومت خمشی معادل برای ارزیابی رفتار خمشی با تغییرات نرخ بارگذاری محاسبه شد. با افزایش نرخ کرنش ظرفیت باربری ۲۶ درصد افزایش یافت و میزان حساسیت به نرخ بارگذاری پارامترهای طاقت و مقاومت خمشی معادل، با افزایش تغییرمکان وسط دهانه کاهش یافت. بر اساس نظریه‌ی مصالح مرکب، می‌توان ظرفیت باربری خمشی بتن‌های مسلح به الیاف را با تغییرات نرخ بارگذاری را بر پایه‌ی مقاومت پیوند بین الیاف و ماتریس، ضریب افزایش دینامیکی و همچنین پارامترهای مربوط به الیاف به طور موثری پیش‌بینی نمود.

کلمات کلیدی: نرخ بارگذاری، بتن الیافی، مقاومت پیوند، رفتار خمشی، ضریب افزایش
دینامیکی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱.

۲.

۳.

فهرست مطالب

ش	فهرست تصاویر
ذ	فهرست جداول
۱	۱ مقدمه و کلیات
۲	۱.۱ مقدمه
۳	۲.۱ ضرورت و اهمیت پژوهش
۳	۳.۱ اهداف و فعالیت‌ها
۴	۴.۱ ساختار پایان‌نامه
۵	۲ پیشینه موضوع
۶	۱.۲ مقدمه
۶	۲.۲ مصالح مرکب پایه سیمانی مسلح به الیاف
۷	۱.۲.۲ ماتریس سیمانی
۸	۲.۲.۲ الیاف
۹	۳.۲.۲ ناحیه تماس الیاف و ماتریس
۱۳	۳.۲ ارزیابی رفتار کششی و خمشی
۱۶	۱.۳.۲ کشش مستقیم
۱۶	۲.۳.۲ کشش غیرمستقیم
۱۷	۳.۳.۲ رفتار خمشی

۴.۲	نرخ بارگذاری	۲۲
۵.۲	ماشین‌های انجام آزمایشات نرخ بارگذاری	۲۳
۱.۵.۲	روش‌های مبتنی بر فشار هیدرولیکی	۲۴
۲.۵.۲	روش‌های مبتنی بر انرژی پتانسیل	۲۴
۳.۵.۲	روش‌های مبتنی بر انرژی جنبشی	۲۴
۶.۲	مروری بر ادبیات فنی	۲۵
۱.۶.۲	تاثیر نرخ بارگذاری بر ملات سیمانی و بتن	۲۵
۲.۶.۲	تاثیر نرخ بارگذاری بر مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف	۲۷
۳.۶.۲	اثر سرعت بارگذاری بر رفتار بیرون کشیدگی الیاف	۲۹
۳	فعالیت‌های آزمایشگاهی	۳۵
۱.۳	مقدمه	۳۶
۲.۳	مصالح	۳۷
۱.۲.۳	سیمان	۳۷
۲.۲.۳	سنگدانه	۳۸
۳.۲.۳	آب	۳۹
۴.۲.۳	میکروسیلیس	۳۹
۵.۲.۳	فوق روان‌کننده	۴۰
۶.۲.۳	الیاف	۴۱
۳.۳	طرح اختلاط و روند اختلاط	۴۲
۴.۳	قالب‌گیری و عمل‌آوری	۴۴
۵.۳	ارزیابی طرح اختلاط ماتریس پایه	۴۶
۶.۳	محاسبات نرخ کرنش و سرعت بارگذاری در تعیین خصوصیات مکانیکی	۴۷
۱.۶.۳	بارگذاری فشاری و کشش مستقیم	۴۸
۲.۶.۳	نرخ کرنش برای خمش سه و چهار نقطه‌ای	۴۸
۳.۶.۳	سرعت بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس	۵۰

۵۱	بررسی رفتار سطح تماس و بیرون کشیدگی تک الیاف	۷.۳
۵۴	ماشین‌های انجام آزمایش Pull-Out	۱.۷.۳
۵۶	ارزیابی رفتار خمشی	۸.۳
۵۷	ماشین و ابزار دقیق	۹.۳
۵۸	سری دستگاه یونیورسال Toni Technik	۱.۹.۳
۵۸	جابجایی سنج	۲.۹.۳
۵۹	داده بردار یا Data Logger	۳.۹.۳
۵۹	همبستگی تصاویر دیجیتال	۱۰.۳
۶۱	روش انجام آزمایش	۱.۱۰.۳
۶۲	پردازش اولیه	۲.۱۰.۳
۶۳	روند همبستگی تصاویر دیجیتال	۳.۱۰.۳

۶۷	نتایج آزمایشات	۴
۶۸	مقدمه	۱.۴
۶۹	ارزیابی رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی قلابدار	۲.۴
۷۷	تأثیرات بر بیشینه نیروی بیرون کشیدگی و تنش کششی الیاف	۱.۲.۴
۸۰	تأثیرات بر میزان استفاده شده از ظرفیت الیاف	۲.۲.۴
۸۱	تأثیرات بر مقاومت پیوند بیشینه	۳.۲.۴
۸۳	تأثیرات بر کار (انرژی) بیرون کشیدگی	۴.۲.۴
۸۴	تأثیرات بر مقاومت پیوند معادل	۵.۲.۴
۸۵	تأثیرات بر کار ویژه	۶.۲.۴
۸۶	ارزیابی رفتار خمشی	۳.۴
۸۸	تأثیر نرخ کرنش بر تنش خمشی	۱.۳.۴
۹۰	تأثیر نرخ کرنش بر طاقت	۲.۳.۴
۹۱	ارزیابی میدان کرنش	۳.۳.۴
۹۳	نسبت مقاومت خمشی معادل	۴.۳.۴

۴.۴ ارتباط بیرون کشیدگی الیاف منفرد و رفتار خمشی با افزایش نرخ بارگذاری ۹۴

۵ نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۹

۱.۵ نتیجه گیری ۱۰۰

۱.۱.۵ نتایج رفتار بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس پایه سیمانی ۱۰۰

۲.۱.۵ نتایج ارزیابی تاثیر نرخ کرنش بر رفتار خمشی مصالح پایه سیمانی ۱۰۱

۳.۱.۵ نتایج بررسی رابطه بین بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس سیمانی

با رفتار خمشی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف ۱۰۲

۲.۵ پیشنهادات ۱۰۳

مراجع ۱۰۵

آ میانگین گیری نمودار ۱۱۱

فهرست تصاویر

۷	۱.۲	بتن الیافی به عنوان یک ماده مرکب با دوجز اصلی [۳]
۹	۲.۲	انواع الیاف فولادی
۱۱	۳.۲	انسجام ذرات در اطراف سنگدانه یا الیاف [۵]
	۴.۲	مقایسه شماتیک منحنی تنش- کرنش تحت بارگذاری کششی (الف) FRC:
۱۴		(ب) HPFRCC [۶]
۱۵	۵.۲	دسته بندی کلی بتن های الیافی بر اساس رفتار خمشی و کششی [۸]
۱۸	۶.۲	چیدمان آزمون EN14651 [۹]
۱۹	۷.۲	نمودار تیپ مقاومت- بازشدگی ترک براساس EN 14651 [۹]
۲۰	۸.۲	هندسه نمونه و چیدمان آزمون ASTM C1550 [۱۱]
۲۰	۹.۲	نمونه منحنی نیرو- تغییر مکان آزمون ASTM C1550 [۱۱]
۲۲	۱۰.۲	چیدمان آزمون بر اساس ASTM C1609/C1609M [۱۲]
	۱۱.۲	منحنی بار - تغییر مکان (الف): رفتار نرم شدگی، (ب): رفتار سخت شدگی
۲۳		[۱۲]
۲۴	۱۲.۲	دسته بندی تجهیزات و اطلاعات آزمایشات بر اساس محدوده نرخ کرنش [۱۳]
۲۵	۱۳.۲	ماشین های انجام آزمایشات در نرخ کرنش های متفاوت
۲۷	۱۴.۲	نمونه ای از داده های تاثیر نرخ بارگذاری بر رفتار بتن (رأس ۱۹۹۶) [۱۸]
	۱۵.۲	اثر نرخ کرنش بر مدول گسیختگی بتن های الیافی (الف): با تغییر نسبت
۲۸		ظاهری (ب): با تغییر در مقاومت ماتریس [۲۰]

۱۶.۲	اثر نرخ بارگذاری بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن مسلح به
۲۹	الیاف فولادی [۲۱]
۱۷.۲	(الف): نمونه بیرون کشیدگی الیاف به صورت گروهی (ب): حساسیت
۳۰	بیرون کشیدگی الیاف به سرعت بارگذاری [۲۴]
۳۲	شکل الگوی ترک در بارگذاری (الف): شبه استاتیکی و (ب): ضربه ای [۲۷]
۳۷	۱.۳ برنامه آزمایشگاهی
۳۸	۲.۳ مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان
۴۱	۳.۳ الیاف های استفاده شده
۴۲	۴.۳ هندسه سه الیاف
۵.۳	مخلوط کن های مورد استفاده (الف) بتونیر با ظرفیت ۲۴۰ لیتر (ب)
۴۴	مخلوط کن هوبارت
۴۵	۶.۳ جای گذاری الیاف در قالب
۷.۳	نحوه عمل آوری (الف): عمل آوری اولیه (ب): عمل آوری در تانک آب
۴۶	(ج): نمونه های آماده آزمایش
۴۹	۸.۳ مکانیزم ایجاد کشش در آزمایش خمش چهار نقطه ای و کشش مستقیم
۵۱	۹.۳ سرعت بیرون کشیدگی الیاف متناظر با نرخ کرنش
۱۰.۳	پیکر بندی طراحی شده برای آزمون بیرون کشیدگی تک الیاف (الف):
	اجزای پیکربندی آزمون بیرون کشیدگی (ب): شماتیک سرهم شده از
۵۳	پیکربندی آزمایش بیرون کشیدگی
۵۴	۱۱.۳ دستگاه بیرون کشنده الیاف از ماتریس
۵۵	۱۲.۳ دستگاه بیرون کشنده الیاف از ماتریس
۵۷	۱۳.۳ مقاومت خمشی معادل
۵۸	۱۴.۳ دستگاه سه گانه یونیورسال
۵۹	۱۵.۳ جابجایی سنج های استفاده شده
۶۰	۱۶.۳ داده بردار (TDS-150)

۶۲	چیدمان اندازه گیری به روش DIC+LVDT	۱۷.۳
۶۴	محیط اصلی Ncorr	۱۸.۳
۶۵	مقایسه نتایج دو روش DIC و LVDT	۱۹.۳
۶۹	نمونه بیرون کشیدگی بسته شده به دستگاه یونیورسال	۱.۴
۷۱	منحنی نیرو- لغزش رفتار رفتار بیرون کشیدگی الیاف منفرد	۲.۴
۷۲	منحنی میانگین گیری شده نیرو- لغزش سری P50-0.1	۳.۴
	نمودار متوسط نیرو- لغزش بیرون کشیدگی تک الیاف با نسبت ظاهری	۴.۴
۷۳	(الف): $l/d=50$ (ب): $l/d=70$ (ج): $l/d=92$	
۷۴	منحنی تیپ رفتاری الیاف قلابدار	۵.۴
	(الف) نمونه های بیرون کشیدگی بعد آزمایش (ب): حالت بیرون کشیدگی	۶.۴
۷۸	کامل (ج): حالت کنده شدگی الیاف	
	(الف): بیشینه نیروی بیرون کشیدگی الیاف (ب): بیشینه تنش کششی	۷.۴
۷۹	الیاف (ج): حساسیت الیاف به نرخ بارگذاری	
	(الف): ظرفیت استفاده شده از مقاومت کششی هر الیاف (ب): درصد استفاده شده از ظرفیت مقاومت کششی الیاف بر پایه ی مقاومت کششی	۸.۴
۸۱	الیاف H 50	
	تاثیر افزایش نسبت ظاهری و نرخ بارگذاری بر (الف): مقاومت پیوند بیشینه (ب): مقاومت پیوند بیشینه ویژه (ج): مقاومت پیوند بیشینه	۹.۴
۸۲	ویژه بر پایه الیاف H 50	
	اثر افزایش نرخ بارگذاری و نسبت ظاهری بر کار انجام شده الیاف در آزمایش بیرون کشیدگی (الف): کار بیرون کشیدگی کامل الیاف (ب):	۱۰.۴
۸۳	ضریب افزایش دینامیکی	
۸۴	مقاومت پیوند معادل	۱۱.۴
	اثر نرخ بارگذاری و نسبت ظاهری الیاف بر (الف): انرژی بیرون کشیدگی	۱۲.۴
۸۵	(ب): ضریب بزرگنمایی دینامیکی	

۸۶	۱۳.۴	آزمایش خمش چهار نقطه‌ای (الف): نمای روبرویی (ب): نمای پشتی .
	۱۴.۴	منحنی نیرو- تغییرمکان رفتار ابتدایی (راست) و کلی (چپ) تیرهای
۸۷		خمشی تغییرات بارگذاری
۸۸	۱۵.۴	نمونه‌های خمشی پس از آزمایش
	۱۶.۴	(الف): ظرفیت باربری خمشی در نقاط مورد ارزیابی ASTM C1609
۹۰		(ب): حساسیت ظرفیت باربری خمشی به نرخ بارگذاری
	۱۷.۴	(الف): تغییرات طاقت با افزایش نرخ بارگذاری (ب): حساسیت طاقت
۹۱		به نرخ بارگذاری
۹۲	۱۸.۴	تغییرات توزیع ترک با تغییرات نرخ کرنش
۹۴	۱۹.۴	تغییرات نسبت مقاومت خمشی معادل با افزایش نرخ کرنش
۹۵	۲۰.۴	مقایسه مقاومت پیوند بیشینه و بیشینه مقاومت خمشی

فهرست جداول

۳۹	دانه بندی سنگدانه‌ها	۱.۳
۴۰	ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس	۲.۳
۴۲	مشخصات الیاف	۳.۳
۴۳	طرح اختلاط	۴.۳
۴۷	نتایج آزمون مقاومت فشاری	۵.۳
۷۲	خلاصه داده‌های خروجی دستگاه برای سری P 50-0.1	۱.۴
۷۶	نتایج رفتار الیاف در بیشینه نیروی بیرون کشیدگی تک الیاف	۲.۴
۷۷	نتایج بیرون کشیدگی تک الیاف	۳.۴
۸۹	خلاصه نتایج آزمایش خمش چهار نقطه‌ای	۴.۴
۹۳	نسب مقاومت خمشی معادل	۵.۴
۹۷	نتایج پیش بینی شده و آزمایشگاهی برای یک درصد حجمی الیاف قلابدار	۶.۴
۱۱۳	نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 50-10	۱.آ
۱۱۴	نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 50-300	۲.آ
۱۱۵	نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 70-0.1	۳.آ
۱۱۶	نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 70-10	۴.آ
۱۱۷	نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 70-300	۵.آ
۱۱۸	نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 92-0.1	۶.آ
۱۱۹	نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 92-10	۷.آ

۸.آ	نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 92-300	۱۲۰
۹.آ	خلاصه نتایج آزمایش خمش چهار نقطه‌ای با نرخ کرنش $1E-5$ 1/s	۱۲۱
۱۰.آ	خلاصه نتایج آزمایش خمش چهانقطه‌ای با نرخ کرنش $1E-3$ 1/s	۱۲۲
۱۱.آ	خلاصه نتایج آزمایش خمش چهانقطه‌ای با نرخ کرنش $3E-2$ 1/s	۱۲۳

فصل ۱

مقدمه و کلیات

۱.۱ مقدمه

امروزه با گذشت بیش از ۱۷۰ سال از پیدایش سیمان، بتن به پرکاربردترین مصالح ساختمانی تبدیل شده است. از یک طرف خواص مقاومتی، دوام و اشتعال ناپذیری و از سوی دیگر تولید این ماده مرکب از مواد ارزان و در دسترس، موجب علاقه‌مندی به استفاده از این ماده شده است. در ضمن آن که تحقیقات در زمینه افزودنی‌های مختلف و پیشرفت علم در جهت مرتفع نمودن ضعف‌های بتن از جمله تردی و مقاومت کششی پایین، موجب تحولات و پیشرفت‌های شگرف بتن از جمله تولید بتن‌هایی با مقاومت و عملکرد بالا شده است.

اخیراً نیاز به بهبود مقاومت سازه‌های مهم در مقابل شرایط بارگذاری لرزه‌ای، ضربه‌ای و حتی انفجاری بیش از پیش حس می‌شود. مصالح مورد نیاز برای ساخت چنین سازه‌هایی باید ویژگی‌های استاتیکی و دینامیکی داشته باشند. مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با عملکرد بالا^۱ به واسطه‌ی شکل‌پذیری، دوام و ظرفیت جذب انرژی بالا در قیاس با بتن غیرمسلح و یا بتن‌های مسلح به الیاف معمولی، پتانسیل ایفای نقش در بهبود مقاومت سازه‌های بسیاری در برابر شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیکی را دارند. از این قبیل سازه‌ها می‌توان سازه‌های حمل و نقل، سازه‌های ساحلی، جان‌پناه‌ها و سکوها‌ی پرتاب هوایی را نام برد.

اصطلاح (عملکرد بالا) به واسطه‌ی رفتار سخت‌شدگی کرنشی و به تبع آن افزایش مقاومت، طاقت، ظرفیت جذب انرژی و سختی اطلاق می‌شود. بیشتر مطالعات این رفتار بهینه از مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف، در شرایط بارگذاری شبه استاتیکی صورت گرفته است. در صورتی که به نظر می‌رسد رفتار الیاف، ماتریس سیمانی و پیوند بین این دو به نرخ بارگذاری حساس باشد. شناخت رفتار این مصالح تحت نرخ بارگذاری‌های مختلف از این جهت ضرورت دارد که شناخت رفتار و کسب اطلاعات در جهت استفاده موفق از مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با عملکرد بالا در سازه‌های تحت بارگذاری دینامیکی خواهد بود.

¹ High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC)

۲.۱ ضرورت و اهمیت پژوهش

اگر چه مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با عملکرد بالا راهکاری موثر در بهبود تردی، دوام و ظرفیت جذب انرژی المان‌های سازه‌ای در شرایط بارگذاری استاتیکی می‌باشند، اما عملکرد آن‌ها تحت بارگذاری دینامیکی چندان شناخته شده نیست. در واقع روشن نیست که آیا مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با عملکرد بالا، رفتار سخت‌شدگی را در نرخ‌های کرنشی بالاتر نیز حفظ می‌کنند یا خیر؟ در این پژوهش اطلاعات مورد نیازی در این موضوع تهیه شده است.

۳.۱ اهداف و فعالیت‌ها

هدف کلی این پژوهش بررسی اثر نرخ بارگذاری در محدوده شبه استاتیکی و لرزه‌ای بر مقاومت، طاقت و ظرفیت جذب انرژی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف، با تمرکز بر تاثیر رفتار سطح پیوند و بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس می‌باشد. به این منظور ارزیابی‌های آزمایشگاهی در مراحل زیر شکل گرفت.

۱. ارزیابی طرح اختلاط و شرایط آزمایشگاهی انجام آزمایش با افزایش نرخ بارگذاری بر

روی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف

۲. ارزیابی و مقایسه تأثیر نرخ بارگذاری بر روی خواص پیوند الیاف فولادی قلابدار با

تغییرات در نسبت ظاهری، تعبیه شده در ماتریس پایه سیمانی

۳. بررسی اثر نرخ بارگذاری بر رفتار تیرهای خمشی تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای و ارزیابی

میدان کرنش و روند گسترش ترک با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال

۴. بررسی رابطه بین رفتار بیرون کشیدگی الیاف و رفتار خمشی تیرهای تحت نرخ بارگذاری

در محدوده استاتیکی تا لرزه‌ای

۴.۱ ساختار پایان نامه

باتوجه به اهداف این پژوهش، نگارش پایان نامه در پنج فصل به شرح زیر انجام گرفته است: در فصل اول این پایان نامه به بیان کلیات موضوع، اهمیت و ضرورت پژوهش پرداخته شده است.

در فصل دوم ضمن معرفی بتن الیافی، یک نگاه کلی به آزمایشات و استانداردهای انجام آزمایش برای ارزیابی خصوصیات مکانیکی بتن های الیافی شده است. در نهایت تاثیر نرخ بارگذاری بر خصوصیات مصالح پایه سیمانی و رفتار پیوند الیاف و ماتریس در تحقیقات پیشین مرور شده است.

در فصل سوم برنامه ی آزمایشگاهی شامل مصالح مورد استفاده، نحوه ی ساخت آزمون ها، شرایط عمل آوری و ارزیابی طرح اختلاط مورد استفاده پرداخته شده است. در ادامه محاسبات نرخ کرنش برای مقاطع تحت بارگذاری خمشی آورده شده و به نحوه ی ارتباط نرخ کرنش و سرعت بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس پرداخته شده است. در نهایت در این فصل روش همبستگی تصاویر دیجیتال به عنوان جایگزین ابزار دقیق تماسی ارزیابی شده است.

در فصل چهارم نتایج آزمایشات بیرون کشیدگی بروی الیاف فولادی با سه نسبت ظاهری مختلف تحت تغییرات در نرخ بیرون کشیدگی با ارزیابی منحنی نیرو - لغزش تشریح شده است. همچنین به ارزیابی تاثیر نرخ کرنش بر رفتار تحت تیرهای خمشی مسلح به یک درصد حجمی الیاف پرداخته شده است. تلاش شده ارتباط بین رفتار سطح پیوند و ظرفیت باربری تیرهای خمشی با تغییرات در نرخ بارگذاری، به عنوان بخشی از عملکرد سخت شدگی این مصالح به طور موثر پیش بینی شود.

در فصل پنجم نتایج به دست آمده از این تحقیق بیان شده، و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

فصل ۲

پیشینه موضوع

۱.۲ مقدمه

استفاده از الیاف در جهت مسلح نمودن مصالح ترد، از دیرباز رایج بوده است. کاه و موی اسب از جمله قدیمی‌ترین الیاف مورد استفاده توسط بشر هستند. استفاده از الیاف پنبه نسوز^۱ در ماتریس سیمانی از سال ۱۸۹۸ شروع شد و بدلیل مضر بودن این الیاف برای سلامتی انسان، انواع دیگر الیاف در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ استفاده شدند. در همین حال مطالعات آزمایشگاهی به منظور کاربرد الیاف فولادی در بهبود خصوصیات بتن از سال ۱۹۱۰ آغاز شد. تاکنون تحقیقات وسیعی بروی بتن در این زمینه انجام شده است. اولین تلاش‌ها به این منظور بروی استفاده از الیاف شیشه^۲ انجام شد، که به دلیل دوام کم این الیاف در محیط قلیایی ماتریس پایه سیمانی موفقیت‌آمیز نبود. در ادامه، الیاف شیشه مقاوم در برابر محیط‌های قلیایی، تولید و در تسلیح بتن بکار برده شد. استفاده از الیاف مصنوعی^۳ پلی پروپیلن^۴ و نایلون^۵ برای مسلح سازی بتن، همانند الیاف فلزی و شیشه موفقیت آمیز نبود. هرچند درک بهتر مفهوم مسلح سازی به وسیله الیاف، روش‌های جدید تولید الیاف تأثیر مثبت الیاف مصنوعی و طبیعی در تسلیح بتن را اثبات کرده است [۱ و ۲].

۲.۲ مصالح مرکب پایه سیمانی مسلح به الیاف

بتن‌های الیافی یا مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف، در قالب مصالح مرکب^۶ با دو جز تشکیل دهنده الیاف و ماتریس تعریف می‌شوند. در واقع ماتریس خمیر^۷، ملات^۸، دوغاب^۹، و یا غالباً بتنی پایه سیمانی دارد و شامل سنگدانه، آب و مواد افزودنی است. البته در این تعریف خود بتن به عنوان جز اصلی بتن الیافی، در واقع یک ماده مرکب می‌باشد. دیگر جز این ماده مرکب

^۱Asbestos Fibers

^۲Glass Fibers

^۳Synthetic Fibers

^۴Polypropylene

^۵Nylon

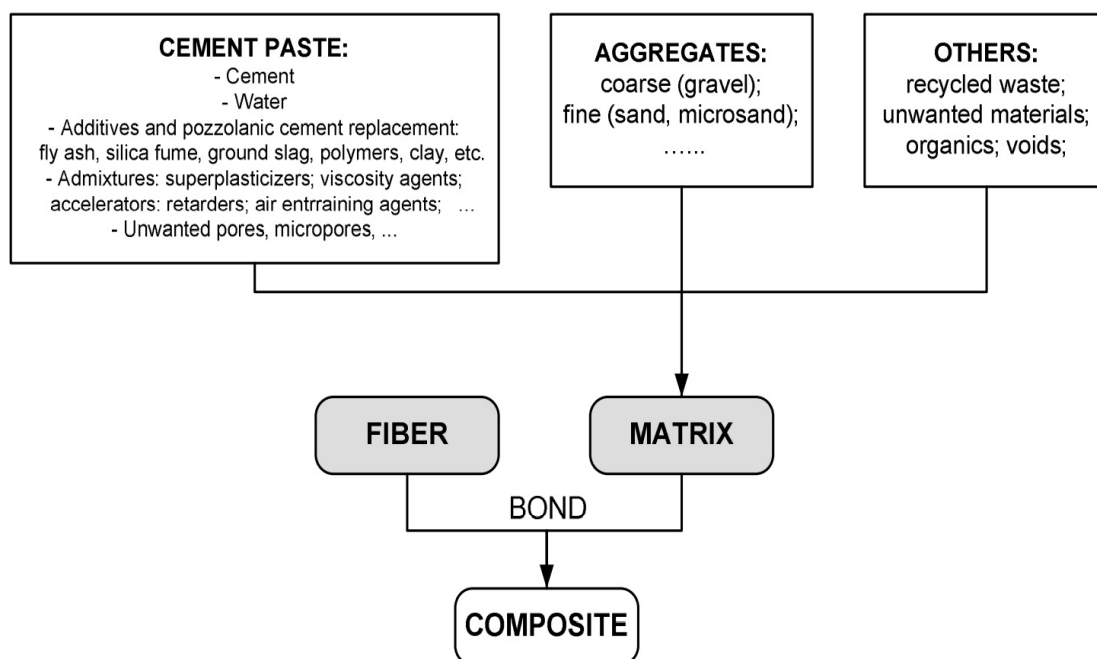
^۶Composite

^۷Paste

^۸Mortar

^۹Slurry

الیاف منقطع با توزیع تصادفی در حجم می‌باشد. پیوند^۱ بین الیاف و ماتریس پایه سیمانی، مکانیزم پیوستگی و عملکرد بین این دو جز را به عنوان پارامتر بسیار مهم در رفتار این مصالح فراهم می‌کند. تصویر ۱.۲ اجزای اصلی بتن الیافی را نمایش می‌دهد.



شکل ۱.۲: بتن الیافی به عنوان یک ماده مرکب با دوجز اصلی [۲]

۱.۲.۲ ماتریس سیمانی

با پیشرفت تکنولوژی بتن، امروزه بتن‌هایی با مقاومت فشاری ۱۰۰ تا ۱۵۰ مگاپاسکال به راحتی تولید و در پل سازی و ساختمان‌های بلند مرتبه مورد استفاده قرار می‌گیرند. با افزایش مقاومت فشاری، رفتار بتن بسیار ترد شده و مقاومت کششی آن به نسبت کاسته می‌شود. بتن با مقاومت بالا به عنوان مصالحی شکننده، بعد از ترک خوردگی مقاومت و شکل پذیری خود را از دست می‌دهد. زمانی که مصالح شکننده تحت کشش قرار می‌گیرند ابتدا رفتار الاستیک از خود نشان می‌دهند، سپس ترک‌های ریز تشکیل می‌شوند. با افزایش بار این ترک‌های ریز به هم متصل شده و یک ترک موضعی تشکیل می‌دهند و در نهایت شکست ناگهانی رخ می‌دهد. مقاومت کششی بسیار پایین و شکنندگی نسبتاً زیاد بتن باعث شده تا در آیین‌نامه‌های طراحی

¹Bond

مقاومت کششی برای بتن منظور نگردد و مقاومت برشی نیز به اندازه معینی محدود شود. استفاده از میلگرد یکی از روش‌های رایج برای کاهش و کنترل عرض ترک‌های حاصل از کشش مستقیم یا برش است. اما از آن‌جا که میلگرد در واقع بخش کمی از مقطع را تشکیل می‌دهد، تصور اینکه مقطع بتن ایزوتروپ و هموزن باشد، چندان صحیح نخواهد بود. به منظور ایجاد شرایط ایزوتروپ و کاهش ضعف شکنندگی و تردی بتن و ایجاد سیستمی که بتواند در تمام جهات بطور یکنواخت سبب افزایش شکل‌پذیری شود و مقاومت کششی را نیز حفظ کند، استفاده از رشته‌های نازک و کوتاه به نام الیاف که بصورت تصادفی در تمام جهات در بتن توزیع شده‌اند، روش مناسبی به نظر می‌رسد.

۲.۲.۲ الیاف

بسیاری از خصوصیات مکانیکی، فیزیکی و دوام بتن مسلح به الیاف تحت تأثیر مستقیم مقدار، نوع، پیوستگی و ماهیت گیرداری الیاف مورد استفاده می‌باشد. خواص دیگری که به واسطه الیاف منحنی تنش - کرنش را تحت تأثیر قرار می‌دهند شامل: پیشینه مقاومت، ظرفیت کرنشی، کرنش معادل اولین ترک، مدول الاستیک، عرض ترک، دوام، نفوذ پذیری، جذب انرژی کل، عمر خستگی، هدایت حرارتی، و ویژگی‌های انقباض، خزش و البته باید توجه داشت که این خواص به اینجا محدود نمی‌گردد. در یک طبقه بندی انواع الیاف شامل:

۱. الیاف فولادی: شامل الیاف فولاد ضد زنگ، فولاد آلیاژی یا فولاد کربن است. الیاف فولادی بسته به شکل ظاهری (ساده^۴، قلابدار^۵، مجعد^۶، مارپیچ^۷، تابیده^۸ و ...)، سطح مقطع و نسبت ظاهری به انواع مختلفی دسته بندی می‌شوند. در شکل ۲.۲ یک نوع دسته بندی الیاف فولادی به تصویر کشیده شده است.

۲. الیاف شیشه‌ای: شامل الیاف شیشه‌ای مقام در برابر حملات قلیایی^۱

⁴Straight

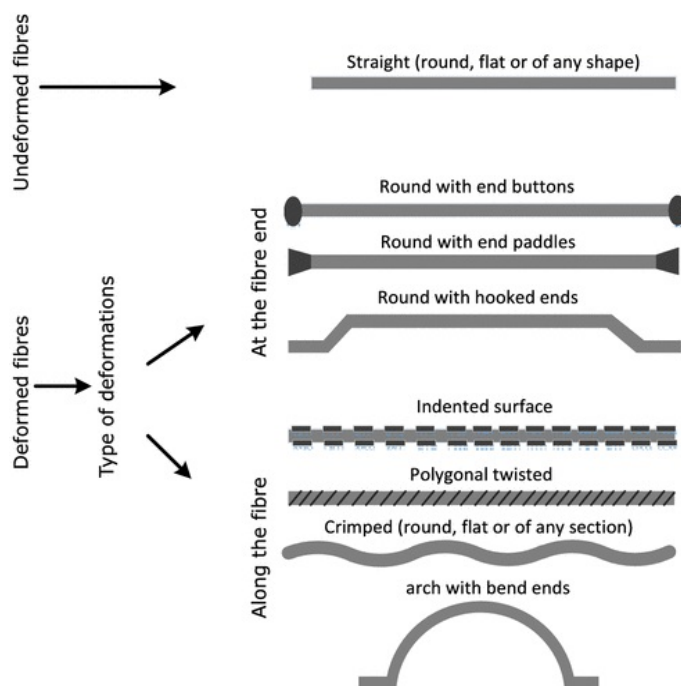
⁵Hooked

⁶Crimped

⁷Spiral

⁸Twisted

¹Alkali-Resistant (AR)



شکل ۲.۲: انواع الیاف فولادی

۳. الیاف مصنوعی: هر الیافی که بتوان شواهد مستندی مبنی بر تأیید مقاومت آنها در برابر خرابی هنگام تماس با رطوبت و مواد قلیایی موجود در خمیر سیمان در طول عمر مفید پیش بینی شده تولید کرد.

از قبیل پلی الفین‌ها (پلی پروپیلن^۱ و پلی اتیلن^۲)، نایلون و کربن

۴. الیاف طبیعی: این نوع الیاف بیشتر جهت بیان تاریخچه پیدایش بتن الیافی مطرح می‌باشد. یک نمونه امروزی از این الیاف الیاف سلولزی^۳ می‌باشد [۴].

۳.۲.۲ ناحیه تماس الیاف و ماتریس

ساختار خمیر سیمان در ناحیه تماس^۲ الیاف و ماتریس (ناحیه نزدیک الیاف یا سنگدانه و ماتریس) یا ITZ کاملاً متفاوت با قسمت‌های دیگر ماتریس سیمانی است. خصوصیات این ناحیه که خود دارای ساختار غیر یکنواختی می‌باشد، به نوع، جنس و اندازه الیاف و خصوصیات سطح الیاف و همچنین اجزاء تشکیل دهنده‌ی ماتریس سیمانی بسته است و ممکن است

^۱Polypropylene

^۲Polypropylene and Polyethylene

^۳Cellulose fiber

^۲Interfacial Transition Zone(ITZ)

بین ۵۰ تا ۱۰۰ میکرومتر ضخامت داشته باشد. ضخامت ITZ در مصالح سرامیکی و پلیمری بسیار نازک است. درحالی که در مصالح سیمانی این ناحیه دارای ضخامت و پیچیدگی بیشتری می باشد و ناحیه نسبتاً وسیعی (در حدود ۲۵ تا ۳۵ درصد حجم خمیر سیمان) را در برمی گیرد. به منظور بررسی ITZ در مصالح پایه سیمانی، الیاف از نظر هندسی به سه دسته تقسیم بندی می شوند:

۱. درشت الیاف^۱: با قطر بسیار بزرگتر از ذرات سیمان (حدود ۱۰-۲۰ میکرومتر)، که عموماً الیاف فولادی و پلی پروپیلن ها با قطری حدود ۱/۰ تا ۱ میلی متر هستند.

۲. ریزالیاف^۲: قطری هم اندازه یا کمتر از ذرات سیمان دارند. بسیاری از الیاف ساخته شده از قبیل شیشه، کربن و پلی اتیلن با قطر حدود ۵ تا ۴۰ میکرومتر از این قبیل اند.

۳. دسته الیاف^۳: این نوع الیاف بصورت دسته ای از چند ریزالیاف مصنوعی است. تعداد الیاف موجود در یک رشته ممکن است به چند صد یا چند هزار عدد برسد. بعد از اختلاط در ماتریس سیمانی ممکن است این الیاف از هم جدا شده یا به صورت رشته ای باقی بمانند. الیاف رشته ای معمولاً از جنس شیشه می باشند و در بعضی موارد الیاف کربن، آرامید و پلی پروپیلن هم بصورت رشته ای استفاده می گردد.

ریزساختار^۴ ITZ در اطراف درشت الیاف کاملاً به آنچه در اطراف سنگدانه های بتن مشاهده می شود، مشابه است. نواحی اطراف الیاف لایه ای از ذرات CH_2 ^۵ با تخلخل زیاد است. این تخلخل زیاد در اطراف سنگدانه ها و الیاف به دلیل تراکم ناکافی ذرات سیمان و نسبت آب به سیمان بالا در این ناحیه می باشد که با افزایش ابعاد الیاف و سنگدانه ها شدت می گیرد و دلیل اصلی آن پدیده ای با نام اثر دیوار و حصار^۶ است.

تعریف ۱.۲.۲. اثر دیوار و حصار: مطابق شکل ۳.۲، این پدیده بیانگر این واقعیت است که ذرات در مجاورت یک سطح (سنگدانه، الیاف و...) نسبت به توده، انسجام کمتر و آزادی

¹Macro fibers

²Micro fibers

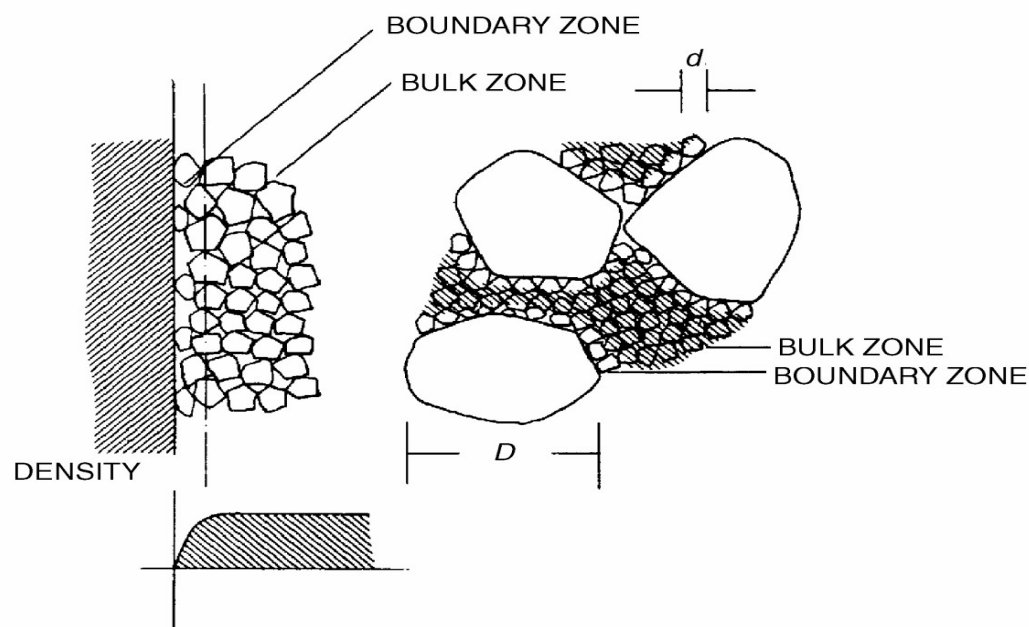
³Bundled fibers

⁴Microstructure

⁵Calcium Hydroxide

⁶Wall effect and Barrier effect

بیشتری دارند و این که در مناطق باریک بین ذرات بزرگ جایی برای ذرات کوچک وجود ندارد.



شکل ۳.۲: انسجام ذرات در اطراف سنگدانه یا الیاف [۵]

مشاهدات آزمایشگاهی نشان می دهد که جداسدگی الیاف و ماتریس دقیقاً در سطح تماس آنها ایجاد نمی شود و نمی توان آن را با تخریب برشی ساده در سطح تماس توصیف کرد، بلکه ریزترک های زیادی به همراه تغییر شکل برشی قابل ملاحظه در ناحیه نسبتاً وسیعی به ضخامت ۴۰ تا ۷۰ میکرومتر در اطراف الیاف ایجاد می شود [۶].

با توجه به این موضوع، بدیهی است که ساختار خمیر سیمان در اطراف الیاف ریز و درشت تفاوت بسیاری دارد. ناحیه انتقال در اطراف الیاف ریز متراکم تر بوده و ساختار آن تفاوت چندانی با قسمت های دیگر ماتریس سیمانی نخواهد داشت. یکسان بودن اندازه الیاف و ذرات سیمان و در پی آن، از بین رفتن اثر دیواره و حصار و کاهش تخلخل در اطراف الیاف، دلیل این یکنواختی می باشد.

در پی شناخت ویژگی های ITZ و تاثیرات آن بر بتن، تحقیقات بسیاری در جهت اصلاح ماهیت آن برای بهبود عملکرد سطح پیوند انجام شده است. پرکاربردترین راهکار، استفاده

از میکروسیلیس است. سیلیکا فیوم^۱ یا میکروسیلیس براساس تعریف ACI 116، سیلیس غیربلوری بسیار ریز تولید شده در کوره‌های قوس الکتریکی، به عنوان مثال محصول جانبی تولید سیلیکون اساسی یا آلیاژهای حاوی سیلیسیم، می‌باشد [۷].

ذرات میکروسیلیس تقریباً صدمبرابر ریزتر از ذرات سیمان می‌باشند. پودر میکروسیلیس ذرات بسیار ریز با ساختار غیرکریستالی و آمورف است که اندازه ذرات آن در حدود ۰/۱-۰/۲ میکرومتر می‌باشد. میکروسیلیس در ابتدا به عنوان ماده جایگزین سیمان مشاهده می‌شد، اما در حال حاضر مهم‌ترین دلیل استفاده از آن تولید بتن با عملکرد بالا می‌باشد. میکروسیلیس دامنه رنگی از خاکستری روشن تا خاکستری تیره دارد. از آنجا که SiO_2 بی رنگ است، رنگ توسط اجزای غیرسیلیسی تعیین می‌شود که به طور معمول شامل اکسیدکربن و آهن هستند. به طور کلی، هرچه میزان کربن بیشتر باشد، میکروسیلیس تیره‌تر می‌شود از این رو بتن تازه^۲ و سخت شده^۳ حاوی میکروسیلیس معمولاً تیره‌تر از بتن معمولی است. از دیگر تاثیرات میکروسیلیس بر بتن تازه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. نیاز به آب^۴، که با توجه به سطح تماس بالای میکروسیلیس افزایش می‌یابد.

۲. کارایی^۵، بتن دارای سیلیکافیوم چسبنده‌تر از بتن ساده است و تمایل کمتری به جداسازی دارد.

۳. آب افتادگی^۶ بتن با افزودن میکروسیلیس بطور چشمگیری کاهش می‌یابد.

اثر اولیه میکروسیلیس کاهش تخلخل ناحیه انتقال بین خمیر سیمان و سنگدانه (و الیاف) است که پیوند ضعیف در اکثر بتن‌ها می‌باشد. همچنین منافذ موجود در توده خمیر سیمان را بهبود می‌بخشد. نتیجه نهایی، افزایش مقاومت بتن و کاهش نفوذ پذیری آن است. ناحیه انتقال معمولاً به عنوان لایه‌ای با ضخامت حدود ۵۰ میکرومتر در اطراف ذرات سنگدانه تعریف می‌شود، که عموماً مقاومت این ناحیه کمتر از توده خمیر سیمان است. مطابق شکل (۳.۲)

¹Silica fume

²Fresh concrete

³Hardened concrete

⁴Water Demand

⁵Workability

⁶Bleeding

ناحیه انتقال به دلیل تجمع آب افتادگی در اطراف ذرات سنگدانه و مشکل انسجام ذرات جامد نزدیک یک سطح (Wall effect and Barrier effect)، فضای خالی بیشتری دارد و CH در این ناحیه نسبتاً بیشتر از قسمت‌های دیگر شکل می‌گیرد.

میکروسیلیس یک پوزولان بسیار واکنش پذیر در هیدراتاسیون خمیر سیمان است که با CH واکنش نشان داده و تشکیل هیدرات سلیکات کلسیم CSH می‌دهد، آب افتادگی بتن را کاهش می‌دهد و باعث انسجام پیکربندی ذرات می‌شود [۵]. غالب تأثیرات بر خصوصیات مکانیکی، مربوط به بهبود مقاومت پیوند بین خمیر سیمان و سنگدانه است. با بهبود خواص این ناحیه توسط میکروسیلیس، تأثیر کیفیت و مقاومت سنگدانه بر خصوصیات مکانیکی بتن حاوی میکروسیلیس اهمیت بیشتری می‌یابد. استفاده از میکروسیلیس باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه در ITZ می‌شود. ذرات بسیار ریز میکروسیلیس تراکم این ناحیه را افزایش داده و ضخامت آن را کاهش می‌دهند. افزودن میکروسیلیس باعث بهبود مقاومت پیوستگی الیاف و ماتریس سیمانی تا ۳۵ درصد می‌شود. استفاده از مواد پلیمری مانند اکریلیک و PVA^۱، که قابل حل در آب می‌باشند باعث بهبود اتصال الیاف و ماتریس تا ۱۰۰ درصد می‌شود [۵، ۶].

۳.۲ ارزیابی رفتار کششی و خمشی

در سال‌های اخیر با ایجاد تغییرات در خصوصیات ماتریس، الیاف و سطح تماس آنها و همچنین روش‌های ساخت و تولید این مصالح، افزایش چشمگیری در مقاومت، شکل‌پذیری و کارایی آنها صورت گرفته است. بتن‌های مسلح به الیاف براساس پاسخ آنها به بارگذاری کششی و خمشی دسته بندی می‌گردند.

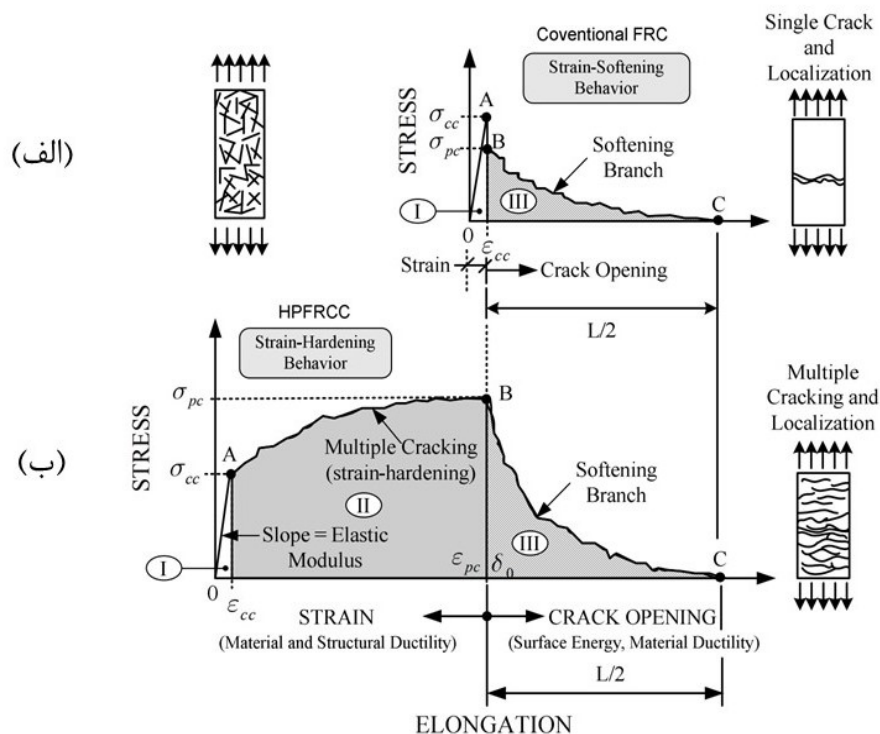
Reinhardt و Naaman در سال ۱۹۹۶ برای اولین بار رویکرد اصلی برای اطلاق عملکرد بالا^۲ به مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف را ارزیابی شکل منحنی تنش- کرنش این مصالح تحت بارگذاری کشش مستقیم عنوان کردند. اگر منحنی تنش کرنش این مصالح رفتار سخت‌شدگی کرنشی^۳ (یا شبه سخت‌شدگی کرنشی) نشان دهد، آن‌گاه این مصالح در دسته‌بندی بتن‌های

^۱Poly Vinyl Alcohol

^۲High Performance

^۳Strain Hardening

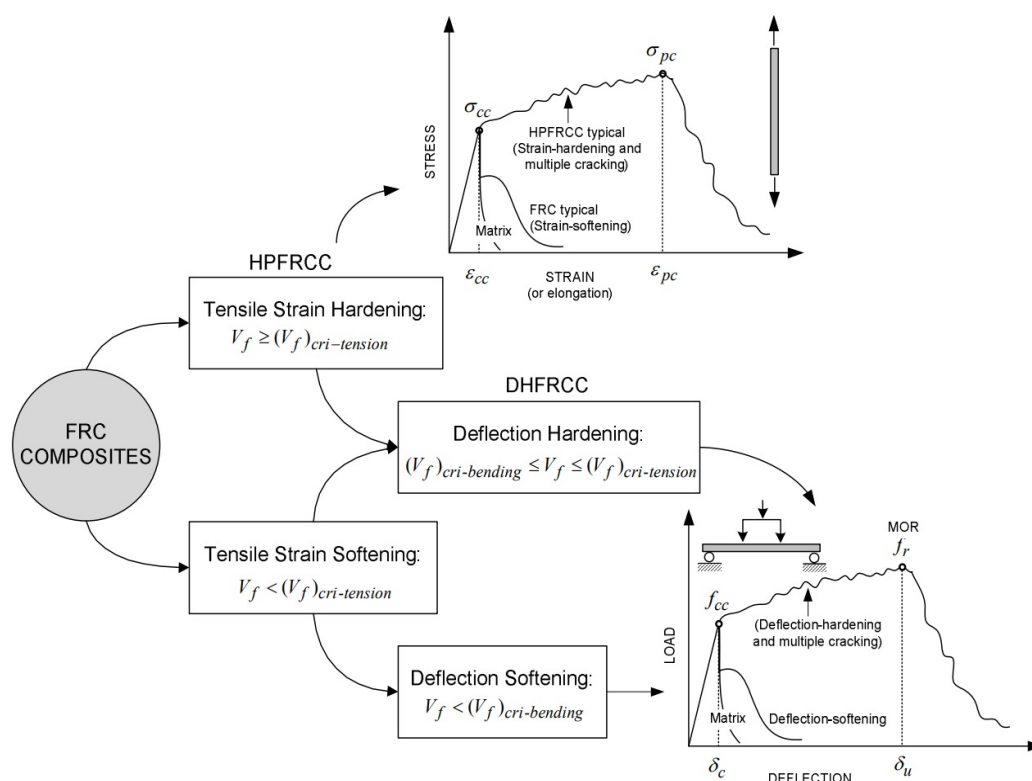
الیافی با عملکرد بالا قرار خواهند گرفت. مطابق شکل ۴.۲ تفاوت بتن الیافی معمولی با بتن ساده در افزایش شکل پذیری با افزایش نامحسوس مقاومت کششی (نرم‌شدگی کرنشی^۱) این مصالح است. در حالی که بتن الیافی با عملکرد بالا تحت بارگذاری کششی توام با افزایش شکل پذیری با افزایش مقاومت کششی نسبت به بتن ساده نیز همراه است. این افزایش شکل پذیری توام با افزایش مقاومت همان ناحیه سخت‌شدگی کرنشی در منحنی تنش-کرنش تحت بارگذاری کششی است [۶].



شکل ۴.۲: مقایسه شماتیک منحنی تنش-کرنش تحت بارگذاری کششی (الف): FRC (ب): HPFRCC [۶]

در ادامه بحث دسته‌بندی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف و در سال ۲۰۰۳ Naaman، یک دسته‌بندی کلی برای بتن‌های الیافی مطابق شکل ۵.۲ ارائه شد. در واقع این دسته‌بندی قابلیت در برگیری تمام بتن‌های مسلح به الیاف را دارد [۸].

¹Strain Softening



شکل ۵.۲: دسته‌بندی کلی بتن‌های الیافی بر اساس رفتار خمشی و کششی [۸]

دستیابی به ظرفیت کششی قابل پیش‌بینی و غیرقابل چشم‌پوشی در مراحل پساترک خوردگی^۱ از ویژگی‌ها و اهداف پیدایش بتن مسلح به الیاف است، بنابراین شناخت تجربی رفتار کششی پس از ترک خوردن و تعریف پارامترهایی برای توصیف مناسب این مصالح از منظر طراحی از اهمیت بالایی برخوردار است، از این رو آزمایش‌های کششی تجربی (مستقیم یا غیرمستقیم) بسیاری استفاده شده است. چندین سازمان فنی مانند انجمن مواد و آزمون آمریکا^۲، موسسه بتن ژاپن^۳ و اتحادیه بین‌المللی آزمایشگاه‌ها و متخصصان در ساخت مواد، سیستم‌ها و سازه‌ها^۴ آزمایش‌های خمشی را برای شبیه‌سازی خصوصیات کامپوزیت‌های پایه سیمانی در کشش توسعه داده‌اند و البته چنین آزمایشاتی برای توصیف پاسخ کششی واقعی کافی نیستند. تاکنون هیچ استاندارد آزمون کششی برای این مصالح معرفی نشده است. با این حال، وجود یک آزمون که امکان اندازه‌گیری خصوصیات کلیدی این مصالح را دارا باشد

^۱Post-cracking

^۲American Society for Testing and Materials (ASTM)

^۳JCI

^۴RILEM

بسیار مورد نیاز است. این آزمون باید قابلیت ثبت توزیع ترک، فاصله و عرض ترک تا حد نهایی تنش یا آخرین ترک خوردگی را دارا باشد. آزمایشات ارزیابی رفتار کششی بتن های الیافی به دو دسته کلی مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می گردند. در این ادامه ضمن بررسی کلی این آزمایشات، چیدمان و جزئیات آزمون خمش چهار نقطه ای مطابق استاندارد ASTM C1609 مورد استفاده در این تحقیق، آورده شده است.

۱.۳.۲ کشش مستقیم

انجمن بتن آمریکا^۱ تا زمانی که یک آزمون استاندارد توسعه نیافته است، در جهت همگرایی و کاهش تاثیر ابعاد^۲ در نتایج آزمون های کششی توصیه می کند در ساخت نمونه ها موارد زیر رعایت گردد:

- نمونه های استوانه ای و منشوری با قاعده مربعی با قطر یا عرض حداقل: ۵۰ میلی متر، سه برابر طول الیاف، شش برابر قطر بزرگترین سنگدانه (هرکدام بزرگتر است).
- طول مبنای^۳ برای ارزیابی کرنش باید دو تا سه برابر حداقل مقادیر مورد قبل باشد.
- چنانچه آزمون برای مقاطع جدار نازک صورت پذیرد ضلع بزرگتر معیار پذیرش در موارد بالا می باشد.
- منشورهای کششی دارای باریک شدگی یا بصورت ویژه صلب شده، در صورت اجرای صحیح، می توانند منجر به نتایج قابل اتکا شوند [۹].

۲.۳.۲ کشش غیرمستقیم

گرچه آزمون های کشش مستقیم مناسب ترین روش تعیین مقاومت کششی و تعیین تنش ها در قبال کرنش و بازشدگی ترک ها می باشد، ولی اجرای دقیق و تحلیل نتایج آن پیچیده و دشوار است. در جهت غلبه بر این دشواری های ذاتی روش های جایگزین معرفی شده اند، که در گروه

¹ACI

²Size Effect

³Gauge Length

روش‌های غیرمستقیم قرار می‌گیرند. رویکرد کلی این روش‌ها مشابه با آزمون جداسازی برزلی می‌باشد که با اعمال بار فشاری به دوطرف یک نمونه استوانه یک حالت تنش کششی عرضی یکنواخت تقریباً در امتداد صفحه قطری و در راستای بارهای اعمال شده ایجاد می‌شود که با رسیدن مقاومت کششی ماده منجر به خرابی نمونه می‌شود، ازین قبیل آزمون‌ها که برای ارزیابی خواص کششی مصالح بتنی مسلح به الیاف انجام می‌پذیرند موارد زیر را می‌توان نام برد:

- آزمون جداسازی با گوه^۱

- آزمون جداسازی گوه دوطرفه^۲

- آزمون بارسلونا^۳

باید توجه داشت که استفاده از آزمون مقاومت کششی دوتیم شدگی^۴ بر اساس ASTM 496 (آزمون برزلی) برای بررسی غیرمستقیم رفتار کششی مصالح بتنی مسلح به الیاف توصیه نمی‌شود [۹].

۳.۳.۲ رفتار خمشی

همانطور که پیش‌تر گفته شد، با توجه به مشکلات اجرای آزمایش کشش مستقیم چندین استاندارد، جایگزینی آزمایش‌های خمشی برای ارزیابی رفتار کششی FRC را پیشنهاد می‌کنند. تعیین مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف ترجیحاً با روش بارگذاری نقطه سوم^۵ (خمشی سه نقطه‌ای) مطابق استانداردهای ASTM C78/C78M و ASTM C1609/C1609M و یا از روش بارگذاری وسط دهانه^۶ (خمشی چهار نقطه‌ای) مطابق با استاندارد ASTM C293/ C293M صورت می‌پذیرد. ASTM C1609/C1609M علاوه بر مقاومت خمشی، طاقت و رفتار بار-تغییرمکان ($P - \Delta$) بعد از شکست و ترک ماتریس را نیز ارزیابی می‌نماید. طاقت نمونه

¹Wedge Splitting Test(WST)

²Double Edge Wedge Splitting Test(DEWS)

³Double punch-Barcelona test

⁴Brazilian splitting test

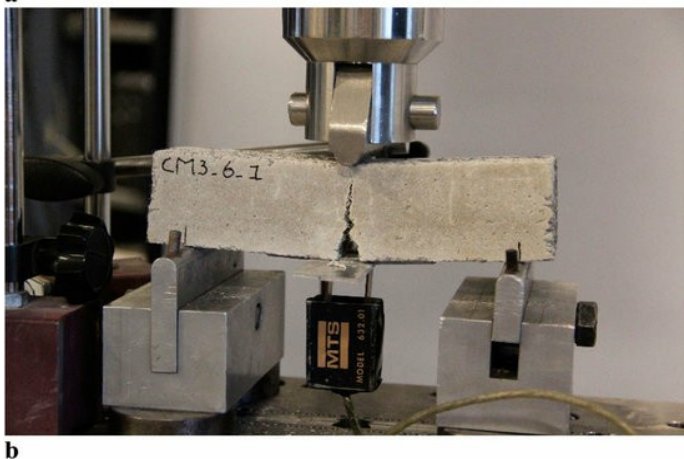
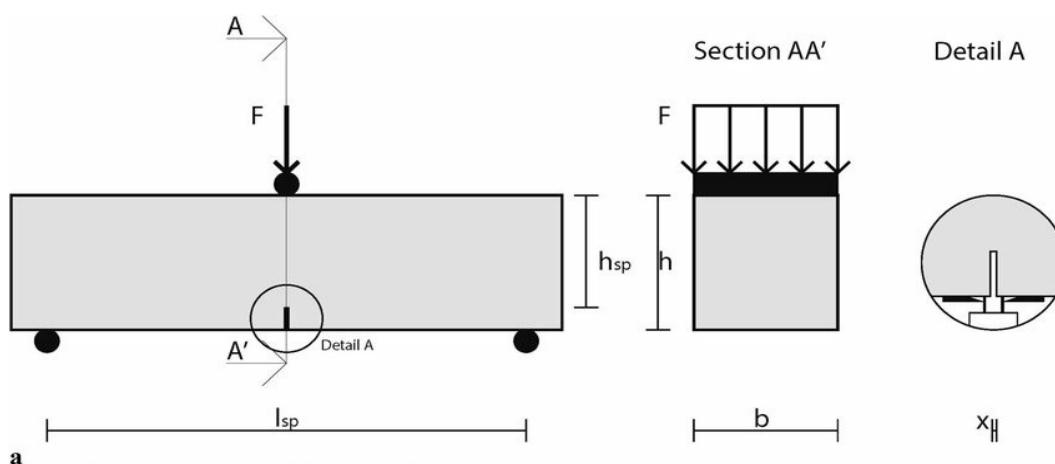
⁵Third-point loading

⁶Center-point loading

توسط ناحیه زیر منحنی بار-تغییرمکان نشان داده می شود، تحلیل نتایج این منحنی متاثر از هندسه نمونه، چیدمان آزمایش و نرخ بارگذاری می باشد. این بخش آزمایشات خمشی را که عموماً مورد استفاده قرار می گیرند، جمع بندی می کند. به طور خاص هندسه نمونه، چیدمان، شرایط بارگذاری، تجزیه و تحلیل داده های هر استاندارد ذکر شده است.

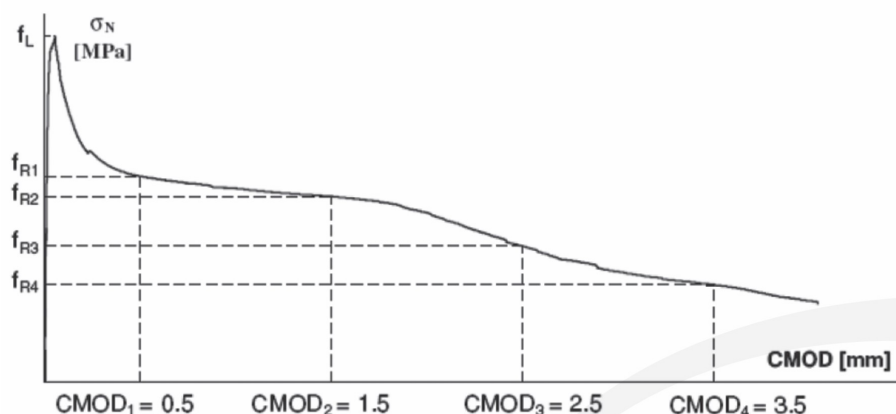
EN 14651

یک استاندارد اروپایی برای ارزیابی رفتار خمشی تیرهای پایه سیمانی مسلح به الیاف تا طول ۶۰ میلی متر و ابعاد $150 \times 150 \times 550$ میلی متر (دهانه خالص ۵۰۰ میلی متر)، که دارای یک شکاف به عمق ۲۵ میلی متر در میانه بخش تحتانی دهانه و با بارگذاری در نقطه وسط دهانه (سه نقطه ای) مطابق شکل ۶.۲ می باشد. این آزمون بصورت کنترل تغییر مکان و با اندازه



شکل ۶.۲: چیدمان آزمون EN14651 [۹]

گیری بازشدگی دهانه شکاف^۱ به وسیله یک Clip Gauge انجام می‌پذیرد. از نتایج آزمون حد نهایی مقاومت و مقاومت کششی خمشی باقیمانده مربوط به چهار مقدار مختلف بازشدگی ترک مطابق شکل ۷.۲ محاسبه می‌شود [۹]. در برخی آیین نامه‌ها این روش یک آزمون استاندارد



شکل ۷.۲: نمودار تیپ مقاومت-بازشدگی ترک براساس EN 14651 [۹]

برای طبقه‌بندی بتن‌های مسلح به الیاف، با تعیین نسبت تنش معادل بازشدگی دهانه ترک ۲/۵ میلی‌متر به ۵/۰ میلی‌متر ($\frac{f_{R3}}{f_{R1}}$) معرفی شده است [۱۰].

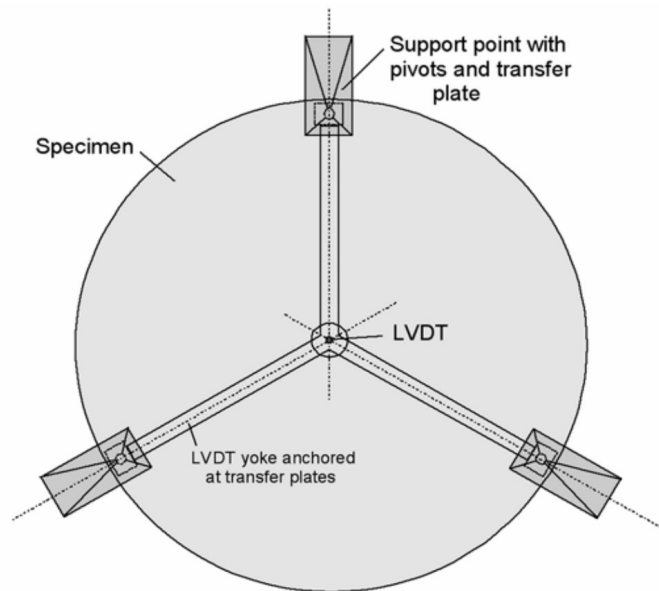
ارزیابی رفتار سخت شدگی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف از طریق این آزمون، به دلیل وجود ترک تعمیدی اعمال شده در زمان ساخت که در واقع مانع ترک خوردگی متعدد نمونه است، امکان ندارد. از طرفی این آزمون قابلیت ارزیابی خاصیت جذب انرژی بتن‌های الیافی را نیز ندارد.

ASTM C1550

روشی برای اندازه‌گیری مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف با استفاده از یک نمونه به شکل صفحه گرد را توصیف می‌کند، که در مرکز بارگیری می‌شود، درحالی‌که بروی سه تکیه‌گاه بطور منظم قرار دارد. ایده اصلی حاکم بر مفهوم این آزمون و تفاوت کلیدی آن با دیگر آزمایشات خمشی آن است که به دلیل وقوع بازتوزیع تنش، مناطق شکستگی بزرگ درگیر سوء پراکندگی نتایج تجربی به طور قابل ملاحظه‌ای از نتایج آزمایشات خمشی تیر کمتر است. در این روش

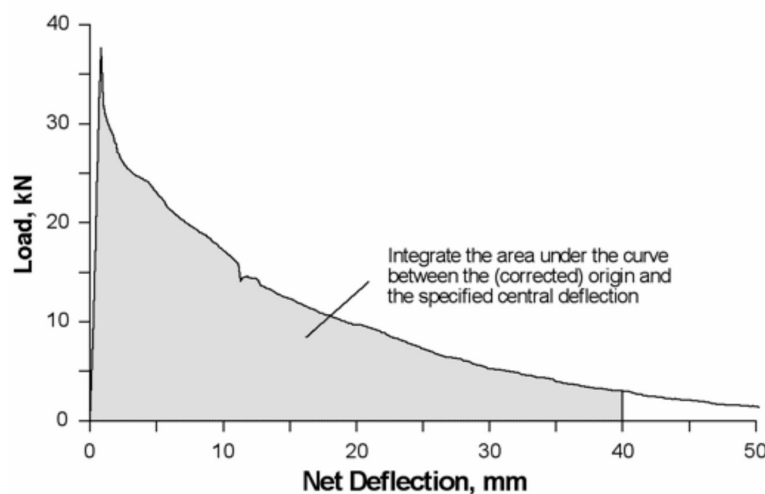
^۱Crack Mouth Opening Displacement (CMOD)

صفحات دایره‌ای با ضخامت ۷۵ میلی‌متر و قطر ۸۰۰ میلی‌متر (استوانه با ارتفاع کم) مطابق شکل ۸.۲ بصورت کنترل تغییر مکان با سرعت 1 ± 4 میلی‌متر بر دقیقه، تا تغییر مکان حداقل ۴۵ میلی‌متر آزمایش می‌شوند.



شکل ۸.۲: هندسه نمونه و چیدمان آزمون ASTM C1550 [۱۱]

مطابق شکل (۹.۲) عملکرد نمونه های آزمایش شده با این روش از نظر انرژی جذب شده از شروع بارگیری تا مقادیر انتخاب شده از تغییر مکان یا نشست مرکزی (بطور متداول جذب انرژی تا تغییر مکان ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر) بصورت کمی سنجیده می‌شوند [۱۱].



شکل ۹.۲: نمونه منحنی نیرو- تغییر مکان آزمون ASTM C1550 [۱۱]

ASTM C 1609/C 1609M

این استاندارد که جایگزین استاندارد ASTM C1018 شده است، متداول ترین آزمون برای ارزیابی خصوصیات خمشی بتن های مسلح به الیاف است. استاندارد ASTM C1609 انرژی معادل سطح زیر منحنی بار- تغییر مکان تا تغییر مکان معادل $1/150$ طول خالص دهانه تیر را به عنوان معیار برآورد طاقت بتن های مسلح به الیاف ارزیابی می نماید. بسته به حداکثر بعد سنگدانه و طول الیاف، دو اندازه برای نمونه ها معرفی شده است:

● $100 \times 100 \times 350$ (میلی متر)

● $150 \times 150 \times 500$ (میلی متر)

نمونه بزرگتر برای موارد حاوی الیاف 50 تا 75 میلی متر توصیه می گردد.

در این آزمون سیستم بارگذاری و تکیه گاهی نمونه باید قادر به بارگذاری نقطه سوم بر روی نمونه بدون ایجاد نیروی خروج از مرکز و پیچش باشد و غلطک های تکیه گاه ها باید قابلیت چرخش بروی محور خود را دارا باشند. تیرها باید در حالی که سطح پرداخت شده در کنار است (نود درجه چرخش نسبت به سطح پرداخت)، مورد آزمایش قرار گیرند. به این ترتیب یک سطح صاف برای اعمال بار نیز وجود دارد. شکل (۱۰.۲) یک نمونه چیدمان این آزمایش مطابق با استاندارد را نشان می دهد.

برای نمونه با ابعاد $100 \times 100 \times 350$ میلی متر بارگذاری بصورت کنترل تغییر مکان می تواند برابر $1/100$ میلی متر بر دقیقه تا انتهای آزمایش (قبل و بعد از تغییر مکان معادل $\frac{1}{600}$ دهانه) به نمونه اعمال شود و جابجایی معادل نقطه وسط دهانه توسط دو کرنش سنج متصل به دو طرف تیر اندازه گیری می شود. در نهایت منحنی بار - تغییر مکان تیر تا $\delta = \frac{l}{150}$ همانند دو منحنی نمونه آورده شده (برای رفتار نرم شدگی و سخت شدگی تغییر مکانی) در شکل ۱۱.۲ مطابق این استاندارد ثبت می گردد.

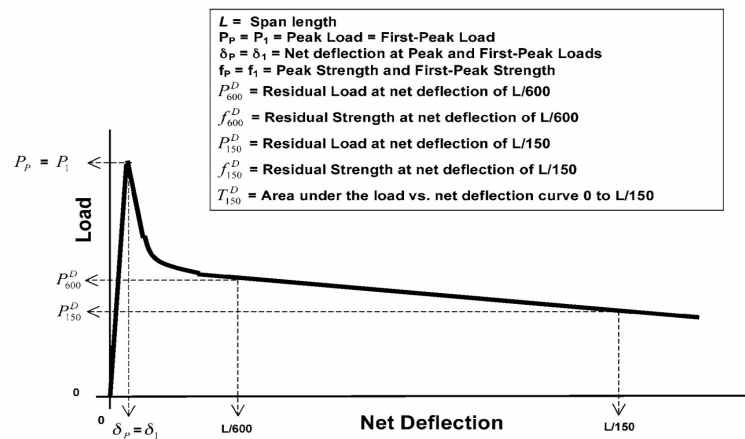


شکل ۱۰.۲: چیدمان آزمون بر اساس *ASTM C1609/C1609M* [۱۲]

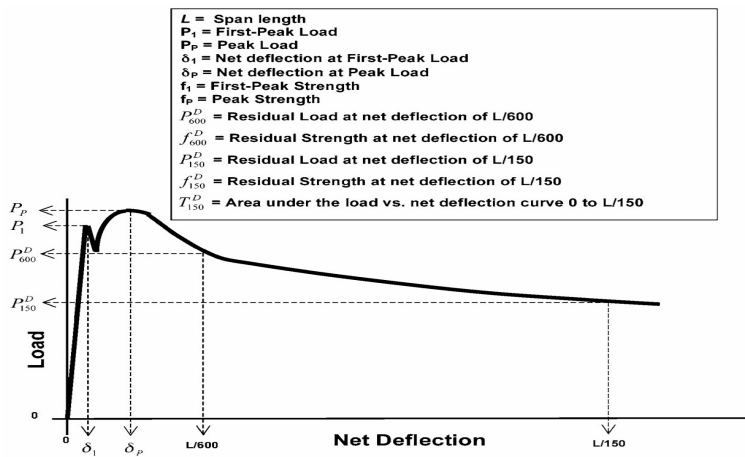
۴.۲ نرخ بارگذاری

مصالح پایه سیمانی به دلایل مختلفی از جمله موج‌های انفجار، پرتابه‌ها، زمین لرزه‌ها، ترافیک با سرعت بالا و ارتعاشات ماشین آلات تحت بار دینامیکی قرار می‌گیرند. استفاده از خصوصیات مکانیکی مرتبط با نرخ کرنشی که المان‌های سازه‌ای تحت آن قرار دارند ضروری است. به دلیل تردی ذاتی و مقاومت کششی کم اکثر عناصر پایه سیمانی، بارگذاری دینامیکی می‌تواند باعث آسیب شدید و ترک خوردگی شود.

رفتار مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با عملکرد بالا تحت بارگذاری استاتیکی، از جمله شکل‌پذیری بالا، ظرفیت جذب انرژی مطلوب و دوام مناسب، علاقه به بررسی و تحقیق رفتار این مصالح تحت بارگذاری در شرایط لرزه‌ای و ضربه‌ای و انفجاری را افزایش می‌دهد. گرچه رفتار کششی مطلوب این مصالح در بارگذاری شبه استاتیکی به وفور محک زده و اثبات شده است، با این حال داده‌ها و اطلاعات تحت بارگذاری‌های دینامیکی محدود است. درک رفتار این مصالح تحت شرایط بارگذاری متفاوت، برای استخراج معادلات سازه‌ای، مدل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی عناصر محدود بسیار مهم است. شکل ۱۲.۲ یک دسته‌بندی و نمای کلی از



(الف)



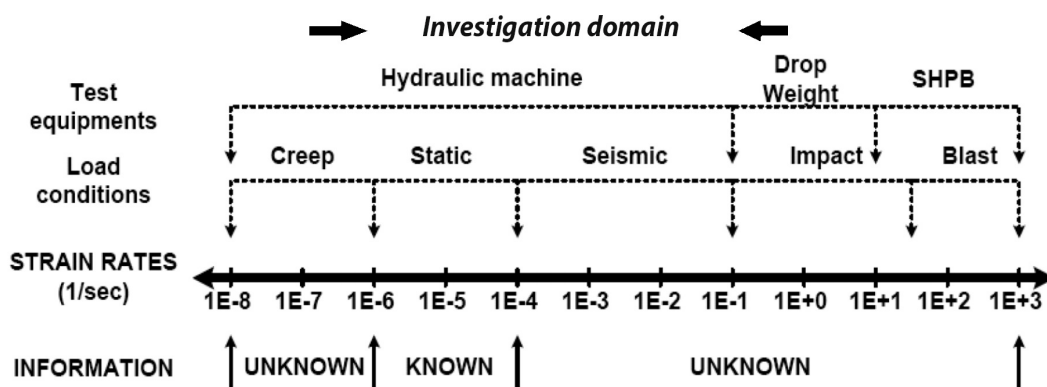
(ب)

شکل ۱۱.۲: منحنی بار - تغییرمکان (الف): رفتار نرم‌شدگی، (ب): رفتار سخت‌شدگی [۱۲]

حدود بارگذاری (خزش، استاتیکی، لرزه‌ای، ضربه‌ای و انفجاری) در کنار تجهیزات مورد نیاز برای ارزیابی رفتار در هر محدوده ارائه می‌دهد.

۵.۲ ماشین‌های انجام آزمایشات نرخ بارگذاری

ماشین‌های انجام آزمایشات با تغییرات در نرخ کرنش را می‌توان براساس ماهیت بارگذاری در یکی از دسته‌های زیر قرار داد.



شکل ۱۲.۲: دسته بندی تجهیزات و اطلاعات آزمایشات بر اساس محدوده نرخ کرنش [۱۳]

۱.۵.۲ روش‌های مبتنی بر فشار هیدرولیکی

عموماً دستگاه‌های یونیورسال با قابیت بارگذاری با سرعت بالا (1000 تا 2000 میلی‌متر بر دقیقه) را شامل می‌شود. از این ماشین‌ها می‌توان در بارگذاری در محدوده‌ی نرخ کرنش‌های پایین تا متوسط (استاتیکی و لرزه‌ای) بهره برد.

۲.۵.۲ روش‌های مبتنی بر انرژی پتانسیل

دستگاه‌های برپایه بارگذاری انرژی پتانسیل را شامل می‌شود. از این ماشین‌ها جهت بارگذاری در محدوده‌ی نرخ کرنش ضربه‌ای استفاده می‌شود. ماشین‌های انجام آزمون شاریپی^۱ و روش‌های مبتنی بر سقوط یک وزنه^۲ بروی نمونه با وزن و ارتفاع سقوط معین، مثال‌هایی از این دسته هستند.

۳.۵.۲ روش‌های مبتنی بر انرژی جنبشی

از این روش‌ها جهت شبیه سازی نرخ کرنش‌های بسیار بالا ($\dot{\epsilon} = 1000 \frac{1}{s}$) استفاده می‌شود. آزمون میله فشاری هاپکینسون^۳ متداول‌ترین روش انجام آزمایش در این محدوده از نرخ بارگذاری

^۱Charpy impact test

^۲Drop Weight

^۳Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)

می‌باشد.

در شکل ۱۳.۲ نمونه‌ای از هر کدام از ماشین‌ها انجام آزمایش با نرخ کرنش‌های متفاوت نشان داده شده است. باید به این نکته توجه داشت که با افزایش نرخ بارگذاری، محاسبات



شکل ۱۳.۲: ماشین‌های انجام آزمایشات در نرخ کرنش‌های متفاوت

نرخ کرنش پیچیده‌تر می‌شود. از این رو آزمایشات در محدوده‌های نرخ کرنش انجام و گزارش می‌شود.

۶.۲ مروری بر ادبیات فنی

در این بخش تاریخچه نرخ بارگذاری و تاثیرات آن بر مصالح پایه سیمانی مرور شده و در ادامه تحقیقات انجام شده جهت ارزیابی رفتار بتن‌های الیافی با تغییرات نرخ کرنش مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۱.۶.۲ تاثیر نرخ بارگذاری بر ملات سیمانی و بتن

در حالت کلی رفتار بتن و ملات سیمانی تا قبل از یک ناحیه تحول (در این ناحیه تغییرات در مقاومت کششی و یا فشاری مشهود است) در پاسخ به نرخ کرنش تقریباً غیر حساس است.

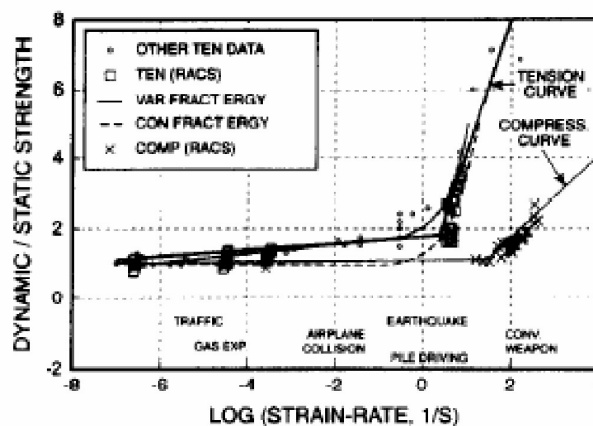
³Transition

سال ۱۹۸۹ رآس و تدسکو اثر نرخ بارگذاری بر رفتار کششی ملات سیمانی و بتن را بررسی کردند. نتایج نشان می‌داد مقاومت کششی ملات سیمانی در نرخ‌های بارگذاری در حدود $\dot{\epsilon} = 10 \sim 100 \frac{1}{sec}$ تا ۱/۵ برابر مقاومت کششی در شرایط بارگذاری با نرخ شبه‌استاتیکی است، این مقدار برای بتن در حدود ۴ تا ۶ برابر مقاومت کششی بتن در شرایط بارگذاری شبه‌استاتیکی گزارش شد [۱۴]. چهار سال بعد در ۱۹۹۳ این دو محقق بروز تاثیرات نرخ بارگذاری بر مقاومت کششی در نرخ‌های بارگذاری $\dot{\epsilon} = 1 \frac{1}{sec}$ و بالاتر را گزارش دادند. آزمایشات انجام شده بوسیله‌ی میله فشار هاپکینسون، به طور دقیق تر ناحیه تحول تاثیر نرخ بارگذاری بر رفتار کششی و فشاری را به ترتیب برابر $\dot{\epsilon} = 5 \frac{1}{sec}$ و $\dot{\epsilon} = 60 \frac{1}{sec}$ نشان داد. در این تحقیق حساسیت بیشتر رفتار کششی نسبت به رفتار فشاری به افزایش نرخ بارگذاری، گزارش شد [۱۵].

سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۵ بیشهوف و پیری تاثیر نرخ بارگذاری بر رفتار فشاری را با انجام آزمایشات در محدوده‌ی استاتیکی ($\dot{\epsilon} = 6.6 \sim 7.2 \times 10^{-6} \frac{1}{sec}$) به وسیله‌ی ماشین هیدرولیکی و در محدوده‌ی ضربه‌ای ($\dot{\epsilon} = 5.2 \sim 9 \times 10^{-6} \frac{1}{sec}$) با سقوط چکش^۱ ارزیابی کردند. به واسطه آزمایشات انجام شده توسط آنها، تاثیر نرخ کرنش بر مقاومت فشاری، کرنش محوری در بیشینه مقاومت، اتلاف انرژی و مدول الاستیسته بررسی شد. مقاومت فشاری بارگذاری ضربه‌ای ۵۰ ~ ۶۰٪ افزایش یافت و کرنش محوری در بیشینه مقاومت افزایشی ۳۶ ~ ۱۴٪ داشت. همینطور ظرفیت اتلاف انرژی تا شکست نمونه افزایشی در حدود ۶۴٪ تا ۱۱۸٪ در نرخ کرنش بالا را نشان داد. با این حال گزارش شد که مدول الاستیسته به نرخ بارگذاری حساسیت نشان نمی‌دهد [۱۶، ۱۷].

رآس همچنین در سال ۱۹۹۶ تاثیر رطوبت و نرخ کرنش بر مقاومت بتن را بررسی نمود. یافته‌های او حاکی از آن بود که بتن مرطوب نسبت به بتن خشک برای تمام نرخ‌های کرنش (بیشتر و کمتر از ناحیه تحول) با افزایش مقاومت چشمگیر همراه است. درحالی که مقاومت استاتیکی بتن مرطوب در مقایسه با بتن خشک کاهش می‌یافت. در شکل ۱۴.۲ نمونه ای از داده‌های تاثیر نرخ کرنش بر بتن آمده است [۱۸].

^۱Drop hammer



شکل ۱۴.۲: نمونه‌ای از داده‌های تاثیر نرخ بارگذاری بر رفتار بتن (رأس ۱۹۹۶) [۱۸]

ضریب افزایش دینامیکی (DIF)^۱ یا نسبت مقاومت دینامیکی به مقاومت استاتیکی، توسط مالور و کرافورد در سال ۱۹۹۸ گزارش شد. آنها گزارش دادند که ضریب افزایش دینامیکی بتن می‌تواند مقادیر بیشتر از ۲ در فشار و بیشتر از ۶ در کشش برای نرخ کرنش‌های بسیار بالا ($\dot{\epsilon} = 1000 \frac{1}{sec}$) را داشته باشد. در گزارش آن‌ها تایید شد که ضریب افزایش دینامیکی یک تابع دو خطی از نرخ کرنش است [۱۹].

۲.۶.۲ تاثیر نرخ بارگذاری بر مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف

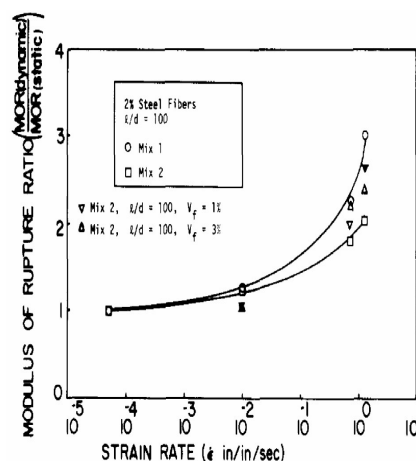
استفاده از الیاف در بتن به عنوان یک راهکار برای افزایش شکل پذیری و اتلاف انرژی مرسوم است. تحقیقات بسیاری همانند آنچه در ادامه مورد بحث قرار گرفته، پاسخ بتن‌های الیافی به بارهای دینامیکی را ارزیابی کرده‌اند.

نعمان و گوپالاراتنام در سال ۱۹۸۳، به ارزیابی خواص ضربه‌ای بتن‌های الیافی در خمش پرداختند. آزمایش خمش سه نقطه‌ای با چهار سرعت بارگذاری مختلف $4.23 \times 10^{-3} \frac{cm}{sec}$, $0.826 \frac{cm}{sec}$, $70 \frac{cm}{sec}$ و $100 \frac{cm}{sec}$ انجام شد. آزمایشات با دو سرعت بارگذاری بالاتر به وسیله یک دستگاه سقوط وزنه انجام گرفت. در این آزمایش برای هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی، جهت جلوگیری از تاثیر ابعاد^۲ از نمونه‌هایی با ابعاد و هندسه آزمایش مشابه استفاده شد. بر اساس نتایج آزمایش که در شکل ۱۵.۲ نشان داده شده، درصد حجمی و نسبت ظاهری بیشتر الیاف حساسیت

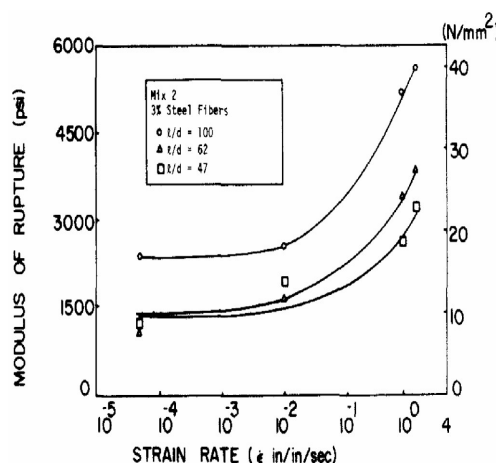
^۱Dynamic Increase Factors (DIF)

^۲Size effect

بالتر به نرخ بارگذاری را موجب شد. همچنین کامپوزیت‌های با ماتریس ضعیف‌تر حساسیت به سرعت بارگذاری بیشتری نسبت به کامپوزیت‌های با ماتریس قوی‌تر نشان دادند.



(ب)



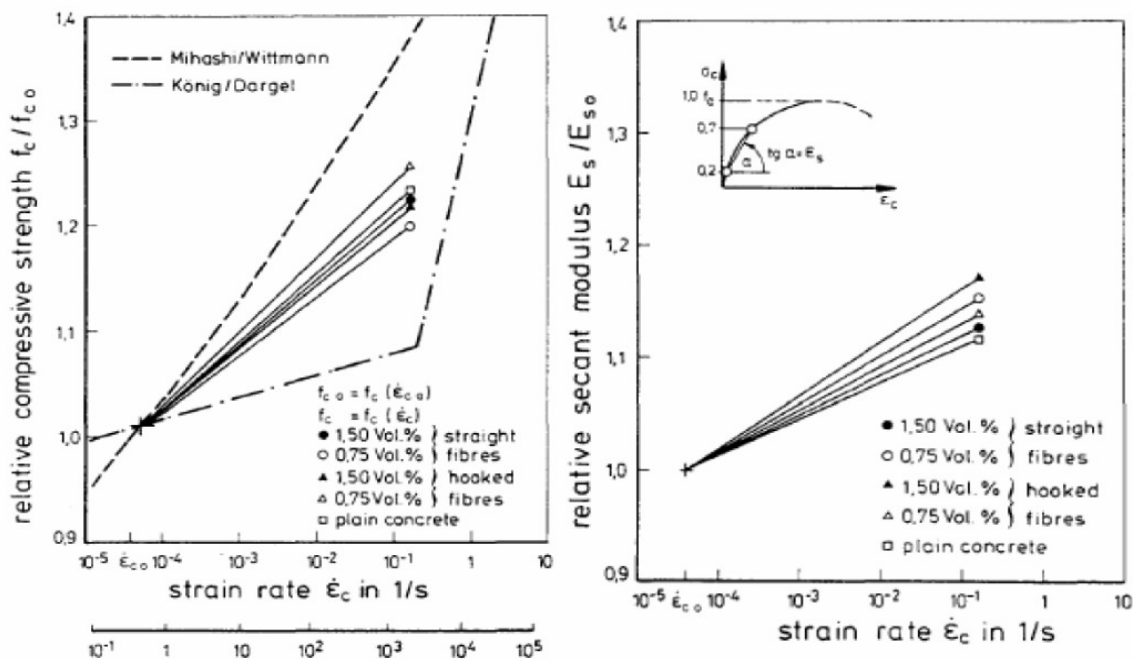
(الف)

شکل ۱۵.۲: اثر نرخ کرنش بر مدول گسیختگی بتن‌های الیافی (الف): با تغییر نسبت ظاهری (ب): با تغییر در مقاومت ماتریس [۲۰]

رستاسی و هارتووچ در سال ۱۹۸۵ با انجام آزمایشات فشاری، تاثیر نرخ‌های بالای بارگذاری بروی رفتار مقاومت فشاری و تغییر شکل محوری بتن مسلح الیافی را بررسی کردند. نتایج مطابق شکل ۱۶.۲ افزایش ۲۰ درصدی مقاومت دینامیکی ($\frac{\dot{\epsilon}_{dynamic}}{\dot{\epsilon}_{static}} \approx 10^4$) نسبت به مقاومت استاتیکی را نشان داد، همینطور کرنش نهایی دینامیکی ۱۰ تا ۲۰ درصد نسبت به حالت استاتیکی افزایش داشت [۲۱].

نعمان و نمپور در سال ۱۹۸۵ اثر نرخ بارگذاری بر ویژگی‌های کششی بتن الیافی را بررسی کردند. مقاومت پیش از ترک خوردگی بتن مسلح الیافی، کرنش معادل بیشترین تنش و مقاومت بعد از ترک خوردگی، همگی با افزایش نرخ بارگذاری افزایش یافتند. طبق مشاهدات آنها تغییر مکان معادل شکست نمونه با افزایش نرخ بارگذاری بروی بتن مسلح الیافی کاهش پیدا کرد [۲۲].

در سال ۲۰۱۶ اوتمان و همکاران، حساسیت بتن‌های الیافی به نرخ بارگذاری را مورد تحقیق قرار دادند. برررسی آزمایشگاهی آن‌ها مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی تحت بارگذاری استاتیکی و ضربه‌ای در بر می‌گرفت. به‌طور خاص نسبت مقاومت خمشی نرخ



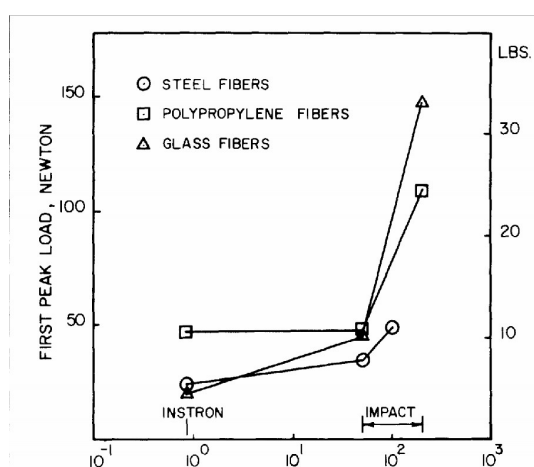
شکل ۱۶.۲: اثر نرخ بارگذاری بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن مسلح به الیاف فولادی [۲۱]

کرنش $\epsilon = 1E - 4 \frac{1}{s}$ به $\epsilon = 1E - 6 \frac{1}{s}$ بتن مسلح به الیاف و بتن غیر مسلح برابر $1/23$ و $1/5$ گزارش شد. همچنین آن‌ها گزارش دادند درحالت کلی با افزایش مقاومت ماتریس، حساسیت به نرخ کرنش کاهش می‌یابد [۲۳].

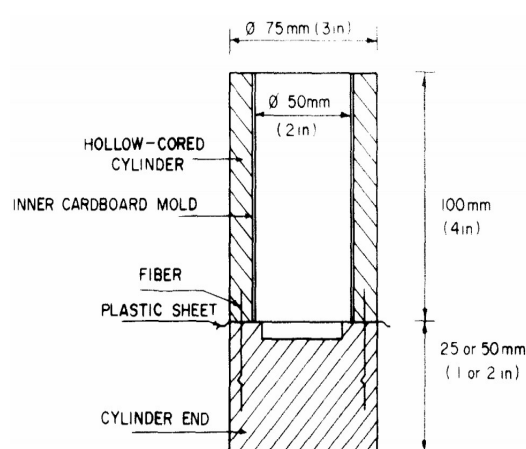
۳.۶.۲ اثر سرعت بارگذاری بر رفتار بیرون کشیدگی الیاف

رفتار کششی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف به تعداد زیادی متغیر از جمله خواص الیاف و ماتریس سیمانی و چسبندگی در سطح مشترک الیاف و ماتریس وابسته است. رفتار پیوند بین الیاف و ماتریس، پارامتر کلیدی در تعیین عملکرد بتن‌های مسلح به الیاف می‌باشد. از این رو تحقیق بروی بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس پایه برای درک بهتر رفتار کششی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف انجام می‌پذیرد. اگرچه الیاف‌های تغییر شکل یافته شامل الیاف قلابدار به طور کلی نسبت به نرخ بارگذاری حساسیت نشان می‌دهند، اما میزان این حساسیت در تحقیقات متفاوت است. در این بخش تحقیقات صورت گرفته برای ارزیابی پاسخ رفتار پیوند به سرعت بارگذاری مرور و بررسی شده است.

گوکوز و نعمان سال ۱۹۸۱ تاثیر ترخ کرنش بر رفتار بیرون کشیدگی الیاف‌ها از ملات سیمانی را آزمایش کردند. آزمایش آنها بروی سه نوع الیاف فلزی صاف، شیشه و پلی پروپیلن در شرایط استاتیکی ($V = 4.2 \times 10^{-3} \frac{cm}{sec}$) و بارگذاری با سرعت بالا ($V = 4.2 \times 300 \frac{cm}{sec}$) انجام گرفت. مطابق شکل ۱۷.۲ یک روش ویژه‌ی آزمایشگاهی که به آنها اجازه می‌داد تا گروه الیاف را از ماتریس بیرون بکشند، استفاده شد. الیاف شیشه‌ای عموماً در تمام سرعت‌های بارگذاری شکسته شدند و الیاف فولادی عموماً حالت خود را تا پایان بیرون کشیده شدن در تمام سرعت‌ها حفظ کردند. در همین حال الیاف‌های پروپیلن رفتاری ترکیبی که قویاً به سرعت بارگذاری وابسته بود از خود نشان دادند. نتیجه این تحقیق حساسیت بالای الیاف پروپیلن به سرعت بارگذاری و عدم حساسیت الیاف فولادی را نشان داد که به خاطر اثرات اصطکاکی رفتار بعد از بیشیه بارگذاری به سرعت بارگذاری حساس نیست. بدین معنی که اصطکاک بین الیاف فولادی (از نوع صاف) و ماتریس به نرخ بارگذاری حساس نبود [۲۴].



(ب)



(الف)

شکل ۱۷.۲: (الف): نمونه بیرون کشیدگی الیاف به صورت گروهی (ب): حساسیت بیرون کشیدگی الیاف به سرعت بارگذاری [۲۴]

در سال ۱۹۹۱ بانتیا و تروتیه مطالعاتی بروی مقاومت بیرون کشیدگی الیاف فولادی تغییر شکل یافته مدفون در ماتریس پایه سیمانی انجام دادند. آزمایش استاتیکی ($V = 8.46 \times 10^{-4} \frac{cm}{sec}$) با ماشین آزمایش هیدرولیکی (Instron) و پاسخ بیرون کشیدگی دینامیکی ($V =$

(150 $\frac{cm}{sec}$) با استفاده از ماشین آزمایش ضربه آونگی^۱، اندازه گیری شد. براساس نتایج الیاف فولادی تغییر شکل یافته مدفون در ماتریس سیمانی عموماً بارهای بیشتری را در شرایط ضربه‌ای به نسبت بیرون کشیده شدن استاتیکی تحمل می کنند و همینطور انرژی بیرون کشیده شدن الیاف در حالت ضربه ای بیشتر است.

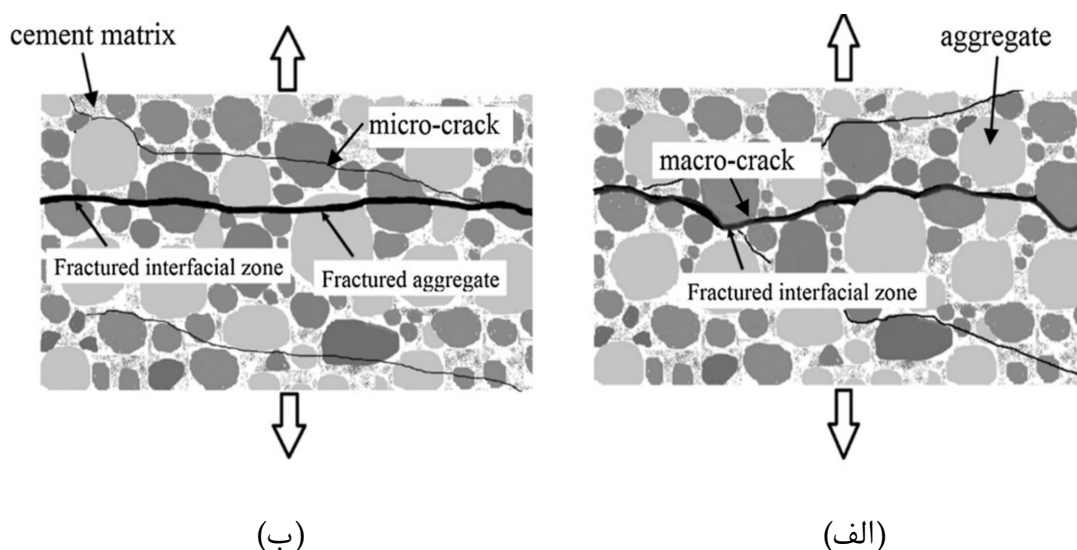
در سال ۲۰۱۰ ابولبده و همکاران، مکانیزم نیرو - لغزش را برای چهار نوع الیاف فولادی مدفون در بتن با مقاومت بالا با تغییرات سرعت بارگذاری بررسی کردند. هدف از این تحقیق ارائه‌ی نتایج تجربی برای پیوند بین الیاف و ماتریس و همچنین ارزیابی تاثیر نرخ بارگذاری بر رفتار بیرون کشیدگی الیاف بود. نتایج در قالب پارامترهای بیشینه نیرو و کار بیرون کشیدگی یا همان انرژی اتلاف شده توسط سطح پیوند ارزیابی شد. ارزیابی این نتایج نشان می‌داد که افزایش نرخ بارگذاری از ۰/۰۲۱ میلی‌متر بر ثانیه به ۲۵/۴ میلی‌متر بر ثانیه (به ترتیب برای حالت استاتیکی و لرزه‌ای)، باعث افزایش بیشینه نیرو و کار انجام‌شده برای تمامی الیاف‌های تغییرشکل یافته^۲ (قلابداری، دوسرپهن و تابیده) می‌شود. در حالی که تغییر در سرعت بارگذاری بروی رفتار الیاف صاف بی‌تاثیر است [۲۵].

ژو و همکاران در سال ۲۰۱۶، به بررسی اثر نرخ بارگذاری بر رفتار بیرون کشیدگی الیاف‌های با مقاومت بالا در بتن فوق توانمند پرداختند. آزمایشات با سرعت بارگذاری در محدوده‌ی استاتیکی تا لرزه‌ای برابر ۰/۰۲۵-۲۵ میلی‌متر بر ثانیه، بر روی چهار الیاف با شکل ظاهری مختلف و مقاومت کششی در محدوده‌ی ۲۶۰۰ تا ۳۱۰۰ مگاپاسکال که در ماتریسی با مقاومت ۱۹۴ مگاپاسکال مدفون شده بودند، صورت گرفت. براساس نتایج، الیاف نیمه قلابدار بیشترین حساسیت به نرخ بارگذاری را بالاتر از الیاف تابیده و الیاف صاف با قطر کم و الیاف صاف ساخته شده از الیاف قلابدار دارد. در بیشترین سرعت بارگذاری (لرزه‌ای) این مقاومت ۱/۲۸ برابر پایین ترین سرعت بارگذاری (استاتیکی)، برای الیاف نیمه قلابدار می‌باشد. بیشترین انرژی بیرون کشیدگی و مقاومت پیوند را به ترتیب الیاف تابیده، نیمه قلابدار، صاف با قطر کم و الیاف بدون قلاب، نشان داد. ضریب تاثیر دینامیکی این دو پارامتر به ترتیب ۱/۴۳، ۱/۲۴، ۰/۳ و ۰/۹۵ می‌باشد [۲۶].

^۱Charpy type pendulum impact tester

^۲Deformed Fiber

در سال ۲۰۱۶ تای و همکاران، رفتار بیرون کشیدگی سه نوع الیاف (صاف، قلابدار و پیچیده) مدفون در ماتریس فوق توانمند تحت بارگذاری با سرعت‌های ۱۸/۰، ۱۸، ۱/۸، ۰/۱۸، و ۱۸۰ میلی‌متر بر دقیقه را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حساسیت به سرعت بیرون کشیدگی الیاف‌ها، مخصوصاً در سرعت‌های بالاتر را نشان داد. مطابق نتایج، حساسیت به سرعت بارگذاری برای الیاف قلابدار بیشتر از دو نوع دیگر الیاف است. به‌علاوه در این تحقیق از اطلاعات تصاویر میکروسکوپ الکترونی^۱ برای توصیف نحوه‌ی تاثیر نرخ بارگذاری بر رفتار بیرون کشیدگی استفاده شد. مطابق شکل ۱۸.۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داد که در بارگذاری شبه‌استاتیک، شکست اصولاً در ناحیه سطحی بین ماسه سیلیسی و ماتریس رخ داده است. درحالی‌که در سرعت‌های بالاتر، ترک‌ها به جای پیچیدن در اطراف ماسه سیلیسی از طریق سنگدانه کوارتز با مقاومت بیشتر منتشر می‌شوند. فرض بر این قرار داده شد که این الگوی ترک‌خوردگی باعث افزایش مقاومت مواد در نرخ کرنش‌های بالا است [۲۷].



شکل ۱۸.۲: شکل الگوی ترک در بارگذاری (الف): شبه‌استاتیکی و (ب): ضربه‌ای [۲۷]

کائو و همکاران، سال ۲۰۱۹ رفتار بیرون کشیدگی تک الیاف از درون ماتریس فوق توانمند در حدود سرعت بارگذاری ۵ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه را مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش از الیاف قلابدار با قطر ۳۷۵/۰ و طول ۳۰ میلی‌متر و ماتریس فوق توانمند با مقاومت ۱۵۶ مگاپاسکال استفاده شد. نتایج این پژوهش حساسیت به سرعت را برای نوع مهار و

¹Scanning Electron Microscope (SEM)

اصطکاک بین صفحه الیاف و ماتریس در خلال بیرون کشیده شدن الیاف، نشان داد. در این تحقیق نیز حساسیت انرژی بیرون کشیدگی به نرخ بارگذاری بیشتر از مقاومت پیشینه بود. در نهایت برای بیشترین نیروی بیرون کشیدگی الیاف قلابدار در این محدوده بارگذاری یک مدل تحلیلی ارائه شد [۲۸].

فصل ۳

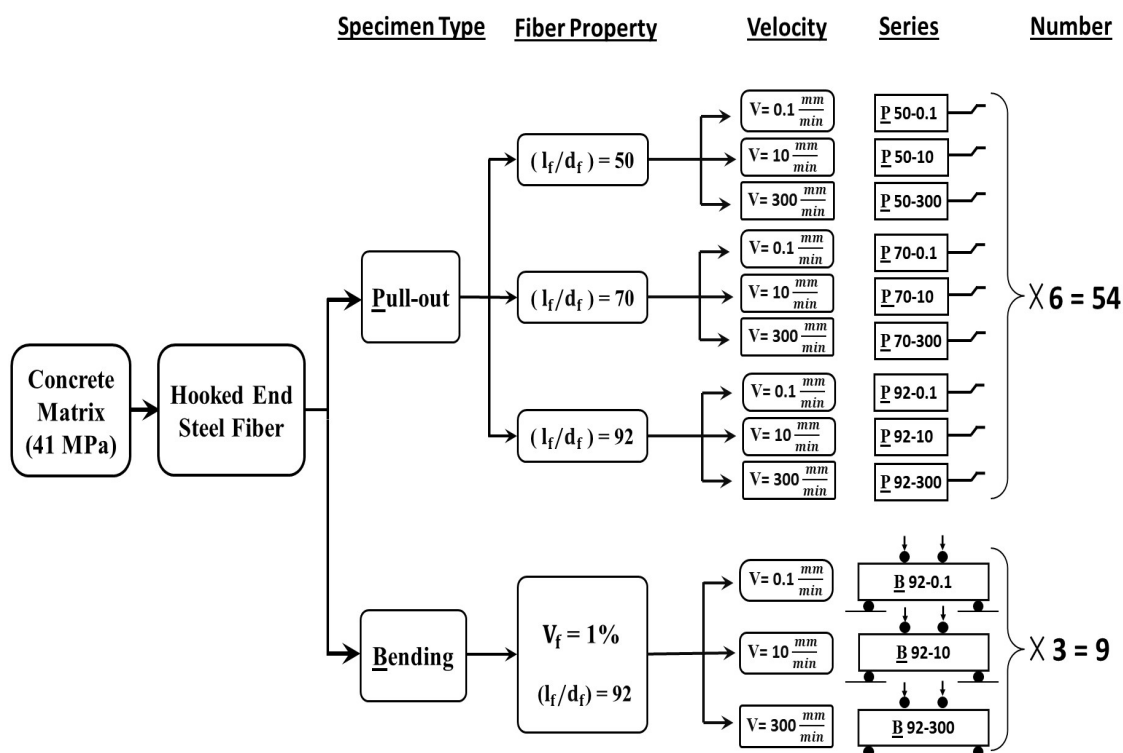
فعالیت‌های آزمایشگاهی

۱.۳ مقدمه

گسترش کاربرد مصالح مرکب پایه سیمانی مسلح به الیاف، ارزیابی و شناخت خواص مکانیکی ماتریس پایه این مصالح، نحوه‌ی تاثیر الیاف، واکنش و پاسخ آن‌ها به شرایط محیطی و بارگذاری را الزامی می‌سازد. در این فصل مشخصات مصالح و مواد به کار گرفته شده، روش ساخت و بررسی‌های آزمایشگاهی مورد تشریح می‌گردد. ابتدا مصالح استفاده شده و خصوصیات آنها بررسی می‌شود، سپس طرح اختلاط، نحوه ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها جهت ارزیابی خصوصیات مکانیکی ارزیابی می‌شود. به منظور ارزیابی خواص مکانیکی و اثر افزایش نرخ کرنش در محدوده شبه‌استاتیکی تا لرزه‌ای، پس از ارزیابی مقاومت فشاری ماتریس، با اضافه کردن الیاف فولادی قلابدار ۹ سری بیرون کشیدگی الیاف فولادی (هر سری شامل ۶ نمونه) با ۳ نسبت ظاهری ۵۰، ۷۰ و ۹۲ جهت بارگذاری با ۳ سرعت متفاوت و ۳ سری تیر خمشی (هر سری شامل ۳ نمونه) مسلح به یک درصد حجمی الیاف با نسبت ظاهری ۹۲ به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۳۵۰ (عرض × ارتفاع × طول) ساخته شد. دلیل استفاده از الیاف با نسبت ظاهری ۹۲ در ساخت نمونه‌ها را می‌توان انتظار رفتار مطلوب‌تر این الیاف در قیاس با الیاف‌های با نسبت ظاهری کمتر در جنبه‌های فنی و اقتصادی و همچنین جلوگیری از افزایش متغیرهایی چون درصد حجمی الیاف به جهت دستیابی به رفتار سخت شدگی تغییر مکانی عنوان کرد.

در ادامه یک پیکربندی جدید برای انجام آزمون بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس با دستگاه‌های یونیورسال، طراحی و ساخته شد. این پیکربندی امکان اعمال نیروی کششی خالص و جلوگیری از لغزش‌های احتمالی در خلال آزمایش را فراهم می‌کند. همچنین شرایط استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال به عنوان جایگزین ابزار دقیق تماسی مرسوم، در اندازه‌گیری میدان جابجایی مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفت. با کمک روش همبستگی تصاویر دیجیتال علاوه بر اندازه‌گیری میدان جابجایی می‌توان نحوه توزیع کرنش و تشکیل الگوی ترک را ارزیابی نمود.

شکل ۱.۳ نمای کلی برنامه آزمایشگاهی را برای این پژوهش نشان می‌دهد.



شکل ۱.۳: برنامه آزمایشگاهی

۲.۳ مصالح

در این بخش جزییات مصالح استفاده شده در ساخت بتن مسلح به الیاف فولادی با عملکرد بالا معرفی می‌گردد.

۱.۲.۳ سیمان

بتن الیافی با عملکرد بالا حاوی درصد بالاتری سیمان به نسبت بتن معمولی است، از این رو حرارت بالاتری نیز تولید می‌نماید که استفاده از سیمان تیپ II توصیه می‌گردد. در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ II تولید شده توسط کارخانه سیمان شاهرود استفاده شده که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن با توجه به گزارش کارخانه مربوطه، به شرح شکل ۲.۳ می‌باشد.

با توجه به فشارهای اعمالی به کیسه‌های سیمان در حین جابجایی و انبار، پودر سیمان حاوی کلوخه‌هایی بود، لذا تمام سیمان مصرفی از الک شماره ۵۰ عبور داده شد. وزن مخصوص سیمان ۱۶/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است.

PHYSICAL SPECIFICATION						CHEMICAL SPECIFICATION					
NO.	Test	Result	Factory standard	ISIRI 389	Test Method	NO.	Component	Result (%)	Factory standard	ISIRI 389	Test Method
1	Fineness by Blaine (cm ² /gr)	3155	Min 2900	Min 2800	390	1	SiO ₂	21.11	Min 20.5	Min 20	1692
2	Autoclave expansion	0.046	Max 0.6	Max 0.8	391	2	Al ₂ O ₃	4.48	Max 5	Max 6	
3	Setting time					3	Fe ₂ O ₃	3.91	Max 5	Max 6	
3-1	Initial Time (min)	135	Min 70	Min 45	392	4	CaO	63.36	-	-	
3-2	Final time (hr)	3:20	Max 5	Max 6	392	5	MgO	1.37	Max 2.5	Max 5	
4	Compressive Strength (Kg/cm ²)					6	SO ₃	2.58	Max 2.9	Max 3	
4-1	1 Day	-	-	-	393	7	Na ₂ O	0.43	-	-	1695
4-2	2 Day	-	-	-	393	8	K ₂ O	0.48	-	-	
4-3	3 Days	240	Min 170	Min 100	393	9	L.O.I	2.42	Max 2.9	Max 3	1692
4-4	7 Days	340	Min 250	Min 175	393	10	IR	0.41	Max 0.7	Max 0.75	
4-5	28 Days	435	Min 350	Min 315	393	11	F.CaO	1.23	-	-	
5	Heat of hydration (cal/gr)					12	C ₃ S	52.8	-	-	
5-1	3 Days	-	-	-	394	13	C ₂ S	21.0	-	-	
5-2	28 Day	-	-	-	394	14	C ₃ A≤8	5.3	-	-	

شکل ۲.۳: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان

۲.۲.۳ سنگدانه

در این تحقیق به مانند بسیاری از مطالعات پیشین از سنگدانه‌های کوارتز استفاده شد، این امر به دلیل سازگاری این سنگدانه‌ها با خمیر سیمان است. ضمن اینکه کوارتز نیز همانند میکروسیلیس دارای درصد بالایی سیلیس است. دانه بندی سنگدانه ها در رفتار بتن تعیین کننده است، با افزایش مساحت سنگدانه‌ها می‌توان تنش در سطح تماس سنگدانه و خمیر سیمانی را کاهش داد و در نهایت به مقاومت بالاتری دست یافت. از سنگدانه‌های کوارتز با حداکثر ابعاد ۵ میلی‌متر مطابق جزییات دانه بندی جدول ۱.۳ و با وزن مخصوص سنگدانه ها ۲/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شد [۱].

جدول ۱.۳: دانه بندی سنگدانه‌ها

مقدار (%)	بعد سنگدانه (mm)	شماره سنگدانه
15	0 – 0.3	1
21.5	0.3 – 1	2
19.5	1 – 2	3
16	2 – 3	4
28	3 – 5	5

۳.۲.۳ آب

در این تحقیق از آب شرب شهر شاهرود استفاده شد، که کلیه الزامات آب مصرفی در بتن را برآورده می‌نماید. PH برابر ۷/۶۵ و غلظت یون کلرید آن حدود ۱۲۶/۰ درصد گزارش شده است.

۴.۲.۳ میکروسیلیس

میکروسیلیس یک افزودنی معدنی است که به دلیل قطر بسیار کم ذرات و مقادیر فراوان سیلیکا یک ماده با فعالیت پوزولانی شدید می باشد، میکروسیلیس به خودی خود چسبنده نیست، اما در اثر ترکیب با آهک و در مجاورت آب به ماده‌ای با خاصیت چسبندگی تبدیل می‌گردد. میکروسیلیس دارای ۸۵ تا ۹۸ درصد سیلیس است، ذرات این ماده عمدتاً کروی و به شکل کریستال بوده و در حدود یک صدم ذرات سیمان هستند. بطور معمول میزان مصرف میکروسیلیس در بتن ۵ تا ۳۰ درصد وزن سیمان می‌باشد. گفتنی است که میکروسیلیس باید حداقل حاوی ۸۵ درصد سیلیکون دی‌اکسید (SiO_2) باشد [۲۹].

میکروسیلیس استفاده شده در این تحقیق محصول شرکت نامیکاران قزوین است، که ترکیبات شیمیایی آن به کمک آزمایش جذب اتمی مواد تعیین شده و در جدول ۲.۳ ارائه شده

جدول ۲.۳: ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس

ترکیب شیمیایی	مقدار (%)
Silica (SiO_2)	87.97
Alumina (Al_2O_3)	0.27
IronOxide (Fe_2O_3)	1.57
Lime (CaO)	1.30
Magnesia (MgO)	3.81

است.

با وجود ریزدانه بودن میکروسیلیس، همانند سیمان کلوخه‌های غیرقابل اختلاط نیز در آن وجود داشت، از این رو قبل مصرف از الک شماره ۱۰۰ عبور داده شد. وزن مخصوص میکروسیلیس ۲/۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد [۲].

۵.۲.۳ فوق روان کننده

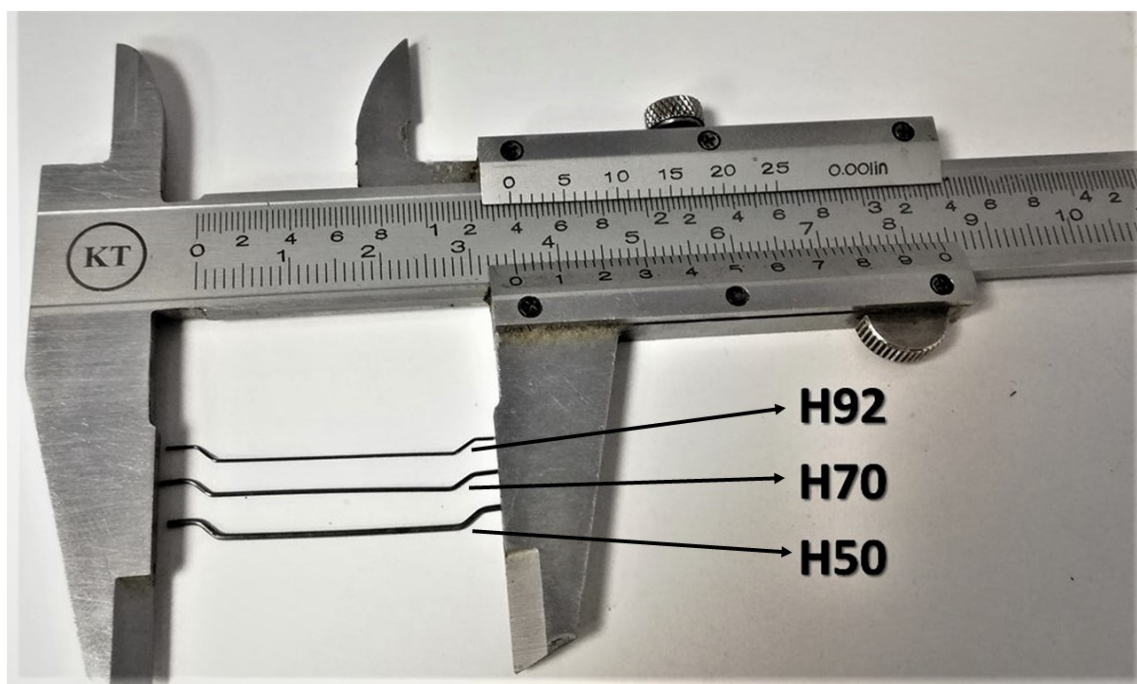
فوق روان کننده‌ها^۱ موادی آلی یا ترکیبی از مواد آلی و معدنی هستند. این مواد جذب ذرات سیمان شده و به آنها بار منفی می‌دهند که سبب دفع شدن این ذرات از یکدیگر می‌شود. بار منفی به واسطه‌ی تشکیل پوسته‌های منظم از مولکول‌های آب دور هر ذره، باعث جداشدگی ذرات و در نتیجه افزایش کارایی مخلوط می‌شود. یکی از کاربردهای فوق روان کننده‌ها تولید بتن با مقاومت بالا است. زیرا برای دستیابی به مقاومت بالا می‌بایست نسبت آب به سیمان را تا حد امکان کاهش داد. با کاهش این نسبت، کارایی مخلوط نیز کاهش می‌یابد. با استفاده از فوق روان کننده مناسب می‌توان آب مورد نیاز را بدون افت کارایی کاهش داده که این امر افزایش مقاومت را به دنبال خواهد داشت. در این تحقیق فوق روان کننده، PCE محصول شرکت وندشیمی بکار برده شده است. PCE مایعی قهوه‌ای رنگ با پایه شیمیایی دیسپرسیون

¹Superplasticizer

پلیمری و نمک کربوکسیلیک است. وزن مخصوص آن $1/03$ کیلوگرم بر لیتر و مقدار مصرف آن $1/2 - 0/2$ درصد وزنی سیمان توصیه شده است.

۶.۲.۳ الیاف

باتوجه به ثبات عملکرد، کاربردهای سازه‌ای و لرزه‌ای، دسترسی مطلوب و همچنین به منظور بررسی تاثیر نسبت ظاهری بر رفتار بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس سیمانی، مطابق با تصویر ۳.۳ در این تحقیق از سه الیاف فولادی قلابدار با طول یکسان و ضخامت متفاوت استفاده شده است. در ساخت نمونه‌های خمشی تنها از الیاف H92 (الیاف قلابدار با نسبت ظاهری

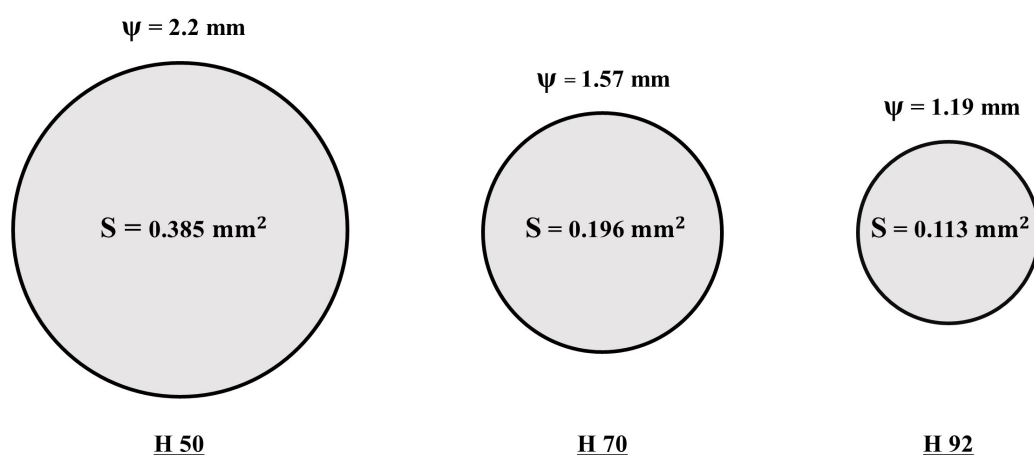


شکل ۳.۳: الیاف‌های استفاده شده

(۹۲) و نمونه‌های بیرون کشیدگی از سه الیاف H92، H70، H50 استفاده شد. مشخصات و هندسه مقطع سه الیاف تولید شده در صنایع مفتولی عرفان به ترتیب در جدول ۳.۳ و شکل ۴.۳ آورده شده است.

جدول ۳.۳: مشخصات الیاف

مشخصات الیاف	H92	H70	H50
مهار مکانیکی	قلابدار	قلابدار	قلابدار
قطر (mm)	0.38	0.50	0.70
طول (mm)	35	35	35
نسبت ظاهری	92	70	50
وزن مخصوص (Kg/m^3)	7850	7850	7850
مقاومت کششی (MPa)	> 2700	> 2480	> 2360
مدول الاستیسیته (GPa)	200	200	200



شکل ۴.۳: هندسه سه الیاف

۳.۳ طرح اختلاط و روند اختلاط

طرح اختلاط استفاده شده در این پژوهش بر اساس تحقیقات پیشین انتخاب شده با این تفاوت که باتوجه به درصد و ابعاد کمتر الیاف استفاده شده در این تحقیق، میزان روان کننده استفاده

شده به نصف تقلیل یافته است. جزییات طرح اختلاط در جدول ۴.۳ آورده شده است [۲] و [۱]. روند اختلاط بدین ترتیب است که ابتدا سنگدانه‌ها همراه با میکروسیلیس بصورت خشک

جدول ۴.۳: طرح اختلاط

مصلح	مقدار (kg/m^3)	نسبت وزنی
سیمان	719.44	1
سنگدانه	1136	1.58
آب	333.75	0.46
میکروسیلیس	71.94	0.1
فوق روان کننده	2.38	0.003

و در حدود ۲ دقیقه با یکدیگر مخلوط می‌شوند. چسبیدن ذرات میکروسیلیس به سنگدانه‌ها باعث بهبود توزیع یکنواخت آن در مخلوط نهایی می‌گردد. بعد از اختلاط کامل سنگدانه‌ها و میکروسیلیس، سیمان به آنها اضافه شده و مصالح خشک در حدود ۲ دقیقه دیگر به‌طور کامل مخلوط می‌شوند. سپس ۷۰ درصد آب مورد نیاز اختلاط، که از قبل با فوق روان کننده مخلوط شده، به آرامی و در مدت ۵ دقیقه به مصالح خشک اضافه می‌گردد. به کمک این روش توزیع فوق روان کننده در مخلوط یکنواخت‌تر و عملکرد بهتری در افزایش کارایی بتن خواهد داشت. با اضافه کردن این محلول، مخلوط حالت خمیری پیدا کرده ولیکن کارایی آن برای اضافه کردن الیاف مناسب نیست. با افزودن ۳۰ درصد آب باقیمانده در طی مدت زمان ۲ دقیقه، کارایی لازم برای افزودن الیاف به‌دست خواهد آمد، در آخر الیاف توزین شده از روی یک شبکه توری (به منظور تفکیک الیاف و توزیع متوازن در ماتریس) به مخلوط اضافه می‌گردد، افزودن الیاف به مخلوط حدود ۱ دقیقه طول می‌کشد. دلیل طولانی بودن مدت زمان افزودن آب و فوق روان کننده این است که با افزایش زمان اختلاط، تاثیر فوق روان کننده افزایش می‌یابد. با توجه به بالا بودن حجم مصالح خمیری (سیمان و میکروسیلیس)، افزایش زمان اختلاط باعث کاهش یکنواختی و جداشدگی ذرات نمی‌شود. ذکر این نکته حائز اهمیت است که این

روند اختلاط برای هر دو مخلوط‌کن Hobart ۲ لیتری و بتونیر ۲۴۰ لیتری مناسب بوده و بدین ترتیب مخلوط‌های ساخته شده با حجم کم و حجم بالا روند اختلاط یکسانی خواهند داشت. شکل ۵.۳ مخلوط‌کن‌های استفاده شده در ساخت نمونه‌ها را نشان می‌دهد. برای ساخت نمونه‌های با حجم کم (بیرون کشیدگی تک الیاف) از مخلوط‌کن هوبارت^۱ و جهت ساخت نمونه‌های با حجم بالا (تیرها و نمونه‌های استوانه‌ای) از بتونیر ۲۴۰ لیتر استفاده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۵.۳: مخلوط‌کن‌های مورد استفاده (الف) بتونیر با ظرفیت ۲۴۰ لیتر (ب) مخلوط‌کن هوبارت

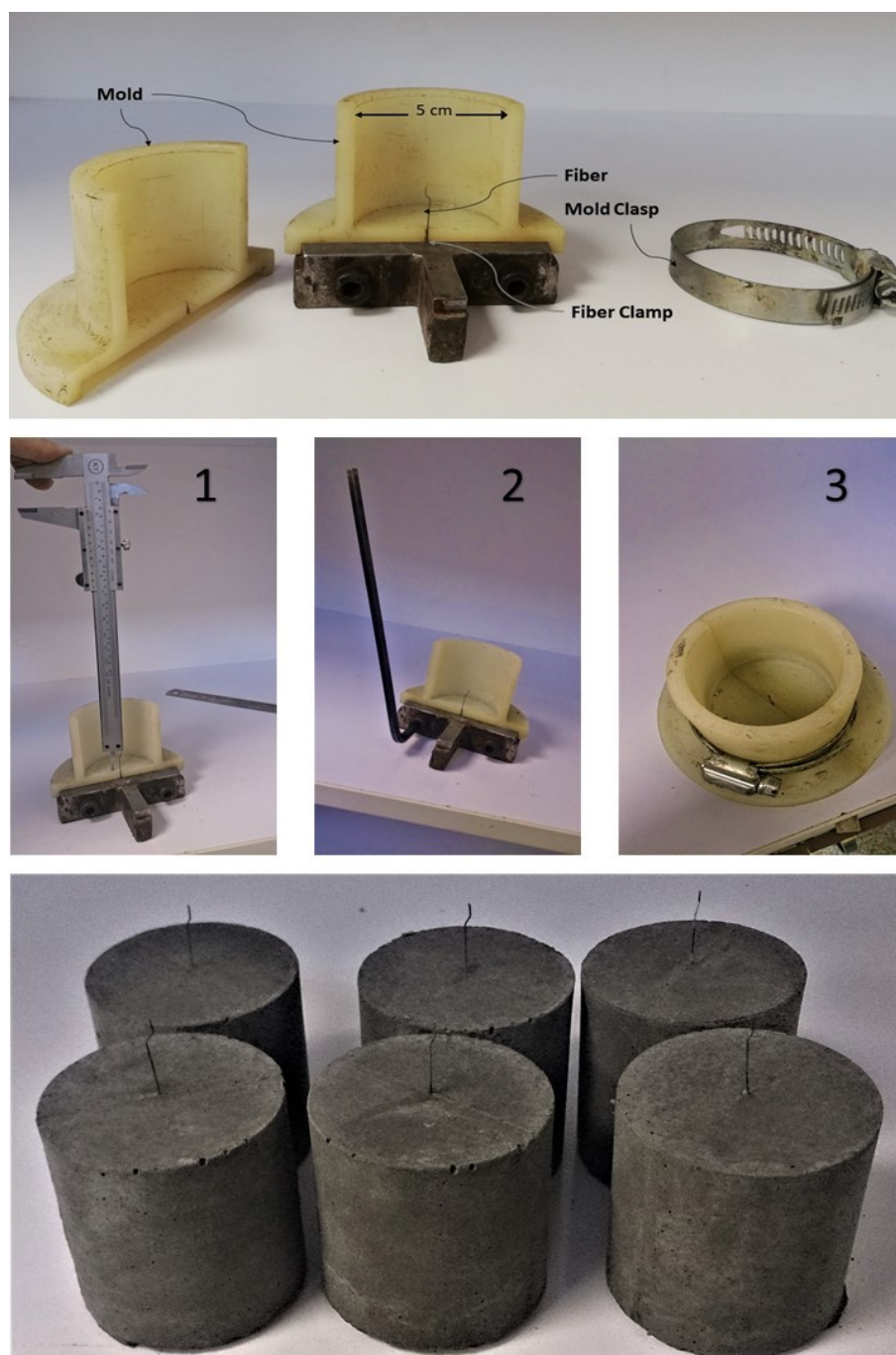
۴.۳ قالب‌گیری و عمل‌آوری

برای ساخت نمونه‌ها پیش از ریختن بتن به داخل قالب، ابتدا سطوح داخلی تمام قالب‌ها به روغن رهاساز قالب^۲ (روغن قالب) آغشته می‌گردد، در این تحقیق از رهاساز قالب شرکت وند شیمی استفاده شده است. درون قالب نمونه‌های بیرون کشیدگی تک الیاف، نصف طول الیاف (۱۷/۵ میلی‌متر) با زاویه نود درجه نسبت به سطح نهایی نمونه ثابت می‌شود. شکل ۶.۳ روند جای‌گذاری الیاف در کنار جزییات قالب و یک سری نمونه بیرون کشیدگی ساخته شده را نمایش می‌دهد.

پس از آماده‌سازی قالب‌ها، بتن تازه درون قالب ریخته می‌شود و با استفاده از میز لرزان

¹Hobart

²Release Agent



شکل ۶.۳: جای گذاری الیاف در قالب

تراکم و حباب زدایی به مدت ۱ دقیقه برای نمونه‌های خمشی و استوانه‌ای، در یک لایه (برای جلوگیری از تغییر جهت الیاف یا صفحات بدون الیاف)، و در دولایه برای نمونه‌های بیرون کشیدگی انجام می‌پذیرد. سپس سطح نمونه‌ها بوسیله یک مال^۱ پرداخت می‌شود و مطابق با تصویر ۷.۳ (الف) جهت پیش‌گیری از تبخیر و اتلاف آب از بتن گیرش نیافته، با

¹Scoope

یک صفحه غیرجاذب، غیرواکنش گر (ورق پلاستیکی نفوذناپذیر و بادوام) پوشانیده می‌شوند. قالب نمونه‌ها بعد از یک روز باز می‌شود و نمونه‌ها پس از نام‌گذاری تا سن بیست و هشت



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۷.۳: نحوه عمل آوری (الف): عمل آوری اولیه (ب): عمل آوری در تانک آب (ج): نمونه‌های آماده آزمایش

روزگی درون تانک آب با دمای معمول (۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد) جهت عمل آوری^۱ مطابق تصویر ۷.۳ (ب) نگهداری می‌شوند. تصویر ۷.۳ (ج) یک سری نمونه خمشی و بیرون کشیدگی با الیاف با نسبت ظاهری ۹۲ (همراه با نمونه‌های شاهد مقاومت فشاری) را نشان می‌دهد.

۵.۳ ارزیابی طرح اختلاط ماتریس پایه

مهم‌ترین معیار برای تعیین کیفیت بتن، مقاومت فشاری آن است. روش آزمون مقاومت فشاری استاندارد ASTM C39 که جهت تعیین مقاومت فشاری بتن معمولی استفاده می‌شود، برای بتن‌های الیافی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمونه‌های این آزمون باید استوانه‌هایی با ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ یا ۲۰۰×۱۰۰ (قطر×ارتفاع) باشند.

در این تحقیق برای آزمون مقاومت فشاری، براساس استاندارد ASTM C39 از نمونه‌های استوانه‌ای ۲۰۰×۱۰۰ استفاده شده است. بار اعمالی به صورت نیرو-کنترل^۲ با نرخ ۲۵/۰

^۱Curing

^۲ Force-Control

مگاپاسکال برثانیه (۲ کیلونیوتن بر ثانیه برای نمونه‌های با قطر ۱۰ سانتی‌متر) به نمونه‌ها اعمال می‌گردد. مقاومت فشاری نمونه با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (۱.۳)$$

در رابطه فوق، $f'_c (MPa)$ مقاومت فشاری بتن، $P(N)$ حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه، $A(mm^2)$ سطح مقطع نمونه بتنی می‌باشد. پس از محاسبه مقاومت فشاری برای همه نمونه‌ها، متوسط مقاومت آن‌ها به عنوان مقاومت فشاری بتن در نظر گرفته می‌شود [۳۰ و ۳۱].

جدول ۵.۳: نتایج آزمون مقاومت فشاری

ضریب تغییرات	مقاومت متوسط (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	بیشینه نیرو (kN)	شماره نمونه
		41.9	329.2	C 1
		37.2	292.2	C 2
6%	41.3	44.7	351.1	C 3
		40.4	317.3	C 4
		42.5	333.7	C 5

۶.۳ محاسبات نرخ کرنش و سرعت بارگذاری در تعیین

خصوصیات مکانیکی

در این بخش محاسبات نرخ کرنش برای خصوصیات مکانیکی بتن‌های مسلح به الیاف شرح داده شده است.

۱.۶.۳ بارگذاری فشاری و کشش مستقیم

در بارگذاری فشاری و کشش مستقیم مقدار نرخ کرنش ایجاد شده در نمونه از رابطه‌ی ۱.۳ تعیین می‌گردد.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V}{L} \quad (1.3)$$

در این رابطه V سرعت بارگذاری (فشاری یا کششی) برحسب میلی‌متر بر ثانیه و L طول مورد سنجش (مبنا) نمونه تحت بارگذاری، برحسب میلی‌متر می‌باشد.

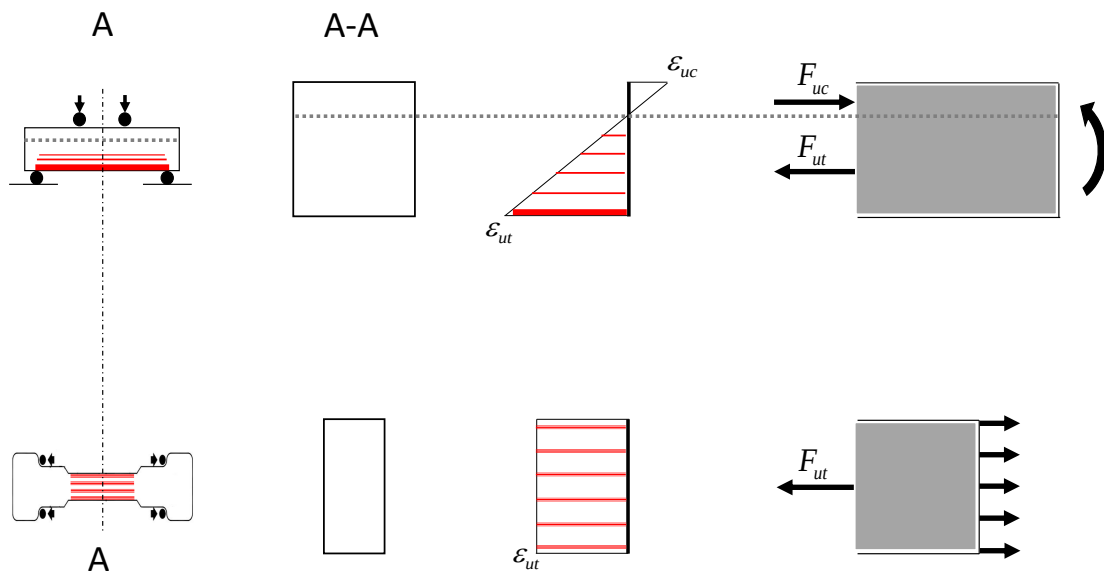
۲.۶.۳ نرخ کرنش برای خمشی سه و چهار نقطه‌ای

مطابق تصویر ۸.۳ و با توجه به توزیع تنش و کرنش در یک مقطع، محاسبه بیشترین کرنش ایجاد شده در مقاطع خمشی تحت بارگذاری سه و یا چهار نقطه‌ای، برای تغییرمکان‌های کوچک از رابطه ۲.۳ که توسط Land ارائه شده، محاسبه می‌گردد.

$$\varepsilon_{max} = \frac{2h(N+2)y}{(L-a)(L+a(N+1))} \quad (2.3)$$

در رابطه بالا:

- h : ارتفاع نمونه
- L : طول نمونه (فاصله نقاط خارجی)
- y : میزان جابجایی نقطه بارگذاری
- N : مولفه مربوط به خزش که برای مصالح با رفتار تغییرمکان الاستیک^۱، برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود.
- a : فاصله بین دهانه بارگذاری (نقاط داخلی) می‌باشد، که در بارگذاری وسط دهانه خمشی سه نقطه‌ای ($a = 0$)، در نظر گرفته خواهد شد [۳۲].



شکل ۸.۳: مکانیزم ایجاد کشش در آزمایش خمش چهارنقطه‌ای و کشش مستقیم

از مشتق رابطه نسبت به زمان، نرخ کرنش بارگذاری خمشی سه و چهار نقطه‌ای به شکل رابطه ۳.۳ و ۴.۳ حاصل می‌شود:

۱. بارگذاری سه نقطه‌ای

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{6hV}{L^2} \quad (3.3)$$

۲. بارگذاری چهار نقطه‌ای

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{6hV}{(L-a)(L+2a)} \quad (4.3)$$

در این روابط V سرعت بارگذاری نمونه خمشی است، که برای ایجاد نرخ کرنش مورد نظر باید به نمونه اعمال گردد. به عنوان مثال برای ایجاد نرخ کرنش معادل حد بالای بارگذاری لرزه‌ای در این تحقیق ($\dot{\varepsilon} = 3 \times 10^{-2} \frac{1}{s}$) سرعت بارگذاری برای نمونه خمش چهار نقطه‌ای با طول دهانه ۳۰۰ میلی‌متر، عرض، ارتفاع و فاصله نقاط داخلی ۱۰۰ میلی‌متر، به شکل زیر محاسبه می‌گردد.

¹Elastically-deflected

(۵.۳)

$$V = \frac{\dot{\epsilon}(L-a)(L+2a)}{6h} = \frac{0.03 \times (300-100) \times (300 + (2 \times 100))}{6 \times (100)} = 5 \frac{mm}{s} = 300 \frac{mm}{min}$$

رابطه ۴.۳ را می‌توان برای نمونه خمشی تحت بارگذاری چهارنقطه‌ای با طول دهانه ۳۰۰ میلی‌متر، ارتفاع و فاصله بین دهانه بارگذاری ۱۰۰ میلی‌متر به شکل ساده شده‌ی رابطه ۶.۳ نوشت.

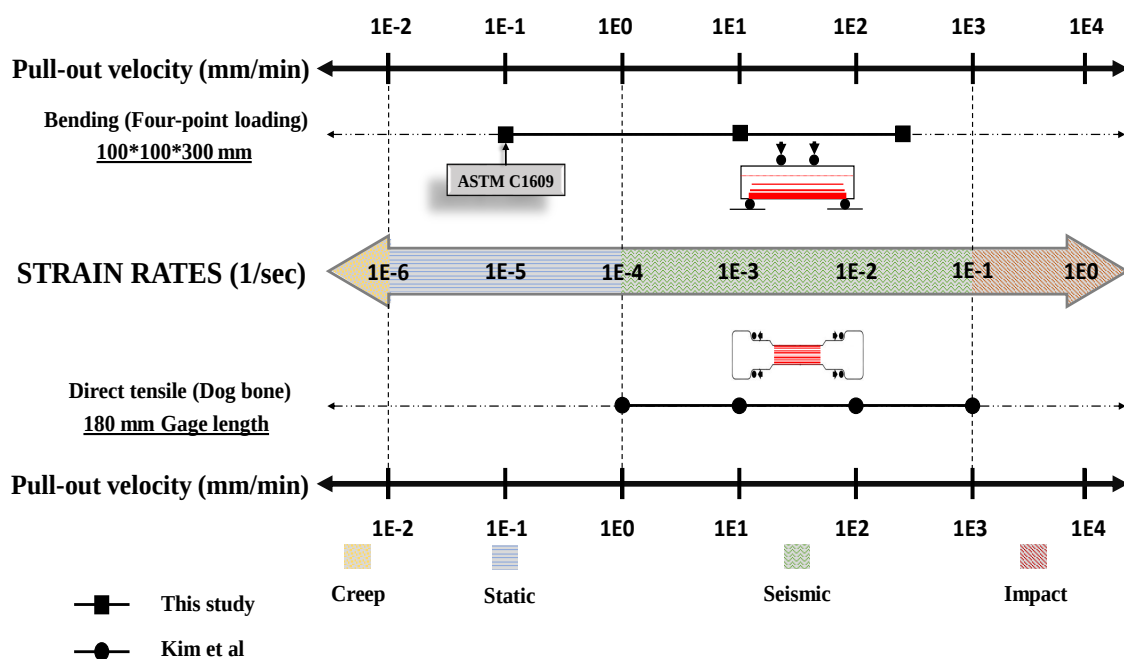
$$\dot{\epsilon} = 0.006V \quad (۶.۳)$$

۳.۶.۳ سرعت بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس

بررسی اثر نرخ بارگذاری^۱ بر رفتار بیرون کشیدگی تک الیاف، زمینه را برای درک بهتر اثر نرخ کرنش بر خواص کششی کامپوزیت‌های پایه سیمانی تقویت شده با الیاف فراهم می‌کند. مطابق شکل ۹.۳ در آزمون بیرون کشیدگی تک الیاف برای ایجاد شرایط معادل نرخ کرنش با فرض رفتار یکپارچه کامپوزیت، سرعت ایجاد شده در صفحات یا تارهای تیر خمشی (از جمله الیاف مدفون) به الیاف اعمال می‌شود. به این ترتیب در یک مقطع تحت کشش خالص همانند آزمون کشش مستقیم سرعت بیرون کشیدگی الیاف در واقع همان سرعت اعمالی به کل کامپوزیت می‌باشد.

در حالی که برای یک مقطع تحت خمش، با توجه به تغییرات خطی کرنش در ارتفاع مقطع و به تبع آن تغییرات نرخ کرنش و سرعت بیرون کشیده شدن الیاف در صفحات (تارها)، سرعت بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس معادل بیشینه کرنش ایجاد شده در مقطع خمشی یا همان دورترین صفحه به نقطه (ها) بارگذاری در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال برای ایجاد شرایط بارگذاری لرزه‌ای معادل $\dot{\epsilon} = 0.03 \frac{1}{s}$ و با توجه به رابطه ۴.۳ الیاف با سرعت ۵ میلی‌متر بر ثانیه (۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه) از نمونه به بیرون کشیده می‌شود.

^۱Loading Rate



شکل ۹.۳: سرعت بیرون کشیدگی الیاف متناظر با نرخ کرنش

۷.۳ بررسی رفتار سطح تماس و بیرون کشیدگی الیاف^۱

مشخصات و رفتار سطح تماس الیاف و ماتریس پایه سیمانی بر خصوصیات مکانیکی بتن مسلح به الیاف فولادی بسیار موثر است. آزمون بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس با مطالعه متغیرهایی نظیر نوع الیاف و ماتریس، طول و زاویه مدفون الیاف که بر رفتار بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس سیمانی تأثیر می‌گذارند، رفتار سطح مشترک الیاف و بتن را مطالعه می‌نماید. چهار عامل اصلی پیوند بین الیاف و ماتریس عبارت‌اند از:

۱. چسبندگی فیزیکی و شیمیایی

۲. مولفه‌های مکانیکی پیوستگی یا نوع مهار مکانیکی (صاف، مجعد، قلابدار و...)

۳. اصطکاک

۴. بهم پیچیدگی الیافها^۲

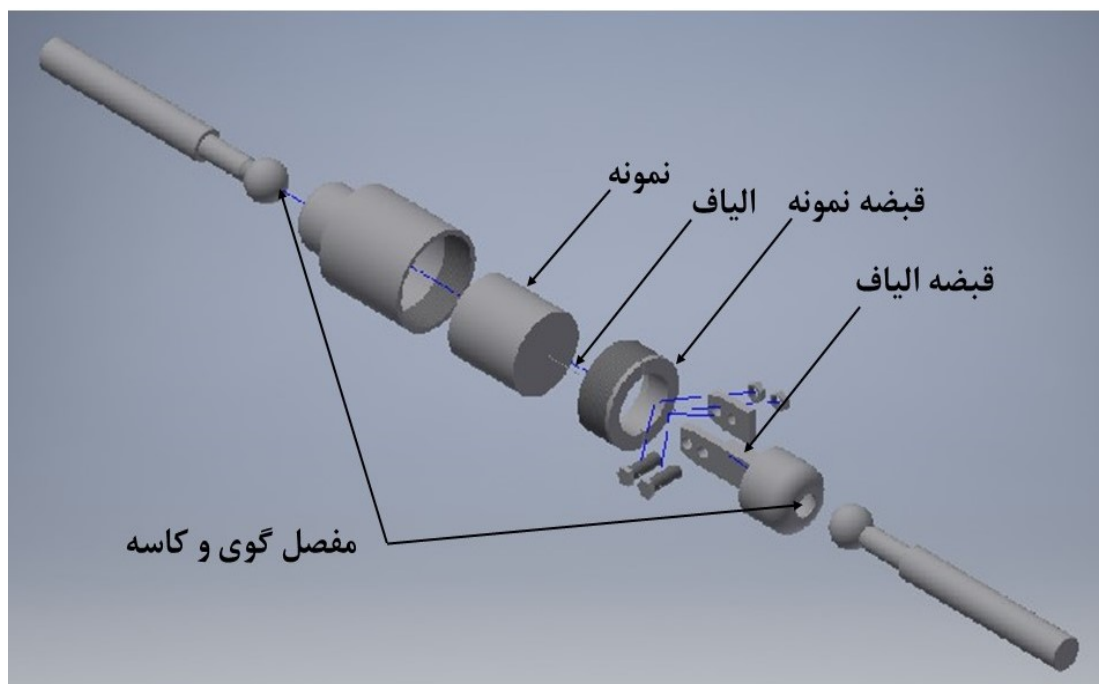
^۱Pull-Out

^۲fiber-to-fiber interlock

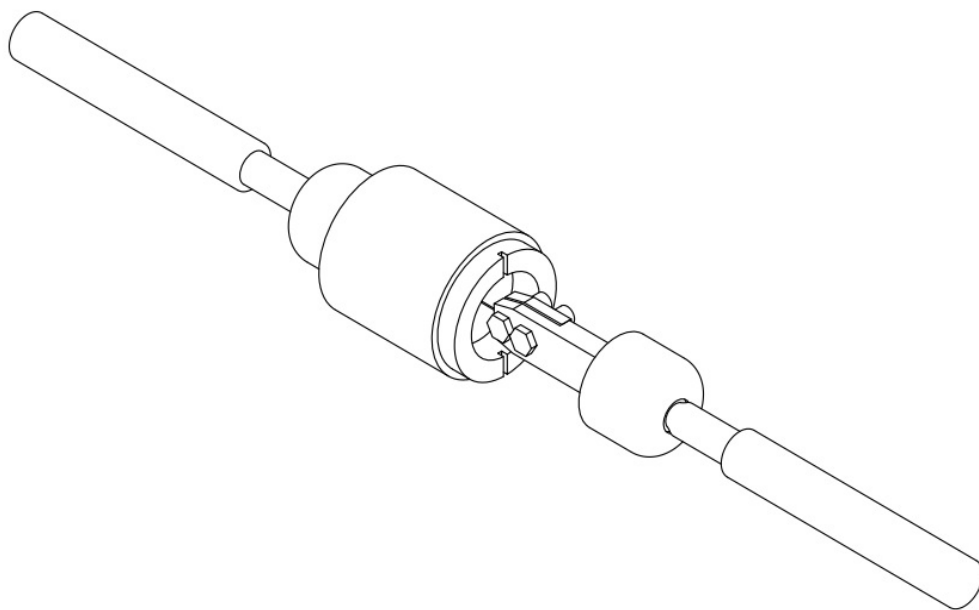
سه عامل ابتدایی با آزمون بیرون کشیدگی الیاف قابل ارزیابی هستند. اگرچه برای تعیین مقاومت پیوستگی بین الیاف و ماتریس سیمانی هیچ استاندارد (ASTM، EN و ...) آزمایش بیرون کشیدگی تک الیاف از ماتریس سیمانی وجود ندارد، با بررسی تحقیقات پیشین در کنار روش‌هایی که نحوه انجام آزمایش را توضیح می‌دهد، می‌توان به تأثیرات بسیار زیاد شرایط بارگیری و چیدمان آزمایش بر نتایج پی‌برد. این آزمون با نمونه‌های یک یا دو طرفه با استفاده از یک یا مجموعه الیاف مدفون شده صورت می‌پذیرد. اکثر نمونه‌های مورد ارزیابی این آزمون به شکل استوانه، منشور و یا دمبلی شکل هستند. از نظر مفهومی تفاوت غالب چیدمان‌ها در روش استخراج الیاف از ماتریس، چگونگی حفظ نمونه در زمان آزمایش و موقعیت الیاف در زمان ساخت می‌باشد. در نهایت هدف از انجام این آزمون اندازه‌گیری نیروی لازم برای بیرون کشیدگی یا شکست الیاف و رسم کامل منحنی نیرو-لغزش^۱ می‌باشد [۹].

باتوجه به موارد ذکر شده، مطابق شکل ۱۰.۳ یک پیکربندی جدید برای انجام آزمایش بیرون کشیدگی با دستگاه‌های یونیورسال طراحی گردید. هدف اعمال نیروی کششی خالص با ایجاد درجات آزادی (جز در جهت عمودی) و همینطور جلوگیری از لغزش نمونه در خلال آزمایش می‌باشد. به گونه‌ای که اطمینان حاصل شود تمام نیرو بصورت کشش مستقیم به الیاف وارد شده و جابجایی اندازه‌گیری شده تماماً مربوط به لغزش عمودی الیاف از درون ماتریس می‌باشد. این پیکره متشکل از قبضه^۲ نگه‌دارنده (قبضه نگهداری نمونه و قبضه نگهداری الیاف) و دوسر مفصل^۳ است که مستقیماً به دستگاه متصل می‌شود. در این پیکربندی نمونه استوانه‌ای بیرون کشیدگی درون یک لوله که انتهای آن بسته است قرار می‌گیرد، سپس به وسیله یک مهره که نقش قبضه‌ی نمونه را ایفا می‌کند، کاملاً ثابت می‌شود. از طرف دیگر یک گیره الیاف را محکم حفظ می‌نماید و دوسر نمونه به وسیله‌ی دو دستک با مکانیزم گوی و کاسه (به این منظور از سبک فرمان خودرو در دوطرف استفاده شده است) به ماشین آزمون کشش متصل می‌شوند.

¹Slip²Grip³Hinge



(الف)



(ب)

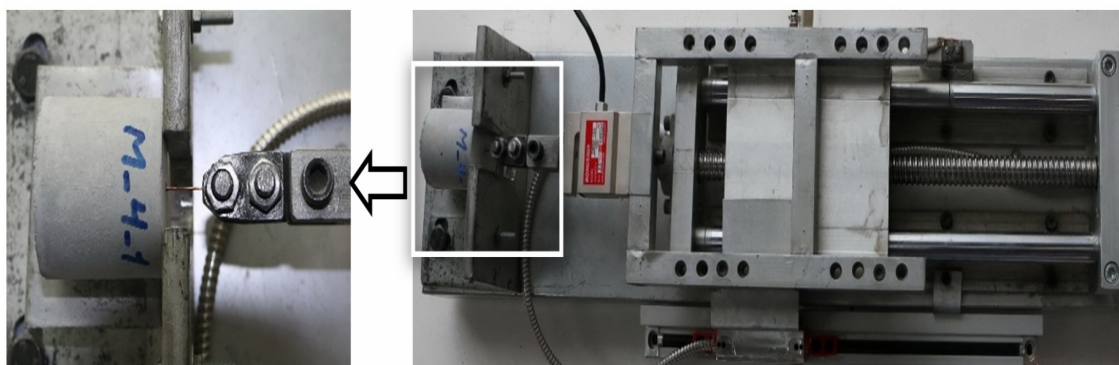
شکل ۱۰.۳: پیکربندی طراحی شده برای آزمون بیرون کشیدگی تک الیاف (الف): اجزای پیکربندی آزمون بیرون کشیدگی (ب): شماتیک سرهم شده از پیکربندی آزمایش بیرون کشیدگی

۱.۷.۳ ماشین‌های انجام آزمایش Pull-Out

دستگاه بیرون کشنده الیاف از ماتریس

با استفاده از علم میکرو مکانیک، رفتار الیاف در ماتریس مدل سازی شده و با کمک رفتار بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس، خصوصیات مکانیکی کامپوزیت پیش بینی شود. دستگاه بیرون کشنده الیاف از ماتریس امکان بررسی رفتار الیاف در هنگام خروج از ماتریس را فراهم می‌سازد.

برای انجام آزمون بیرون کشیدگی بر روی نمونه‌ها، ابتدا دستگاه ساخته شده توسط محققان دانشگاه صنعتی شاهرود که در شکل ۱۱.۳ نشان داده شده، استفاده شد. این دستگاه مجهز به یک نیروسنج^۱ با ظرفیت ۱۰۰۰ نیوتن بوده که بارگذاری نمونه‌ها را بصورت کنترل تغییر مکان و با سرعت ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه با دقت مناسب انجام می‌دهد. به منظور اعمال نیروی کششی، انتهای آزاد الیاف در درون فک نگهدارنده دستگاه قرار می‌گیرد و برای کاهش خطای ناشی از افزایش طول الیاف در ثبت لغزش، فاصله بین فک دستگاه طوری طراحی شده است که تا حد امکان نزدیک به سطح نمونه باشد. بار اعمال شده توسط دستگاه در هر لحظه با استفاده از



شکل ۱۱.۳: دستگاه بیرون کشنده الیاف از ماتریس

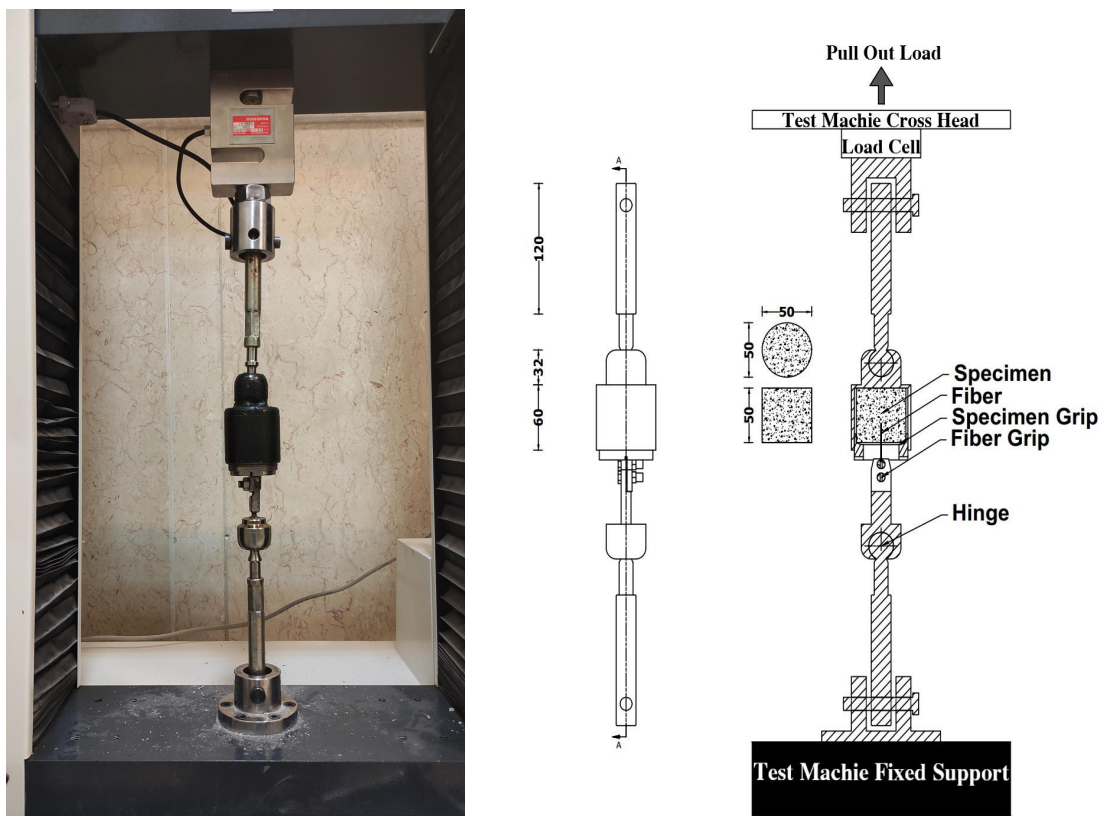
نیروسنج نصب شده بین فک نگهدارنده الیاف و قسمت جلویی دستگاه اندازه‌گیری می‌شود و برای ثبت لغزش ناشی از بیرون کشیده شدن الیاف از درون ماتریس از تغییر مکان سنج تعبیه شده در درون دستگاه بیرون کشنده الیاف استفاده می‌شود.

¹Load cell

این دستگاه امکان تغییر در سرعت بارگذاری را ندارد، از این رو فقط در آزمایشات اولیه و در شرایط بارگذاری شبه استاتیکی برای ارزیابی رفتار پیوند بین الیاف و ماتریس و قیاس با تحقیقات پیشین مورد استفاده قرار گرفت.

دستگاه یونیورسال سنتام STM50

ماشین سنتام مدل STM50 (واقع در آزمایشگاه شماره یک دانشگاه لرستان) با ظرفیت پنج تن و سرعت بارگذاری در محدوده $0/001 - 1000$ میلی متر بر دقیقه، برای انجام تست‌های بیرون کشیدگی الیاف با کمک پیکربندی مطابق تصویر ۱۲.۳ مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱۲.۳: دستگاه بیرون کشنده الیاف از ماتریس

به کمک پیکربندی طراحی شده برای انجام آزمون بیرون کشیدگی الیاف منفرد با مدفون کردن تک الیاف در درون ماتریس با عمق و زاویه متفاوت امکان ثبت کامل و شبیه سازی رفتار واقعی بیرون کشیده شدن الیاف در حین رشد ترک در یک ماده مرکب فراهم می‌گردد.

۸.۳ ارزیابی رفتار خمشی

به منظور ارزیابی رفتار خمشی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف فولادی، در این پژوهش آزمایشات مطابق ASTM C1609/M1609-12 انجام شده است. این استاندارد اندازه‌گیری میزان اتلاف انرژی (طاقت) بتن‌های الیافی تا نقطه معادل $\frac{1}{150}$ طول دهانه را توصیه می‌کند. همچنین در این استاندارد مقدار پارامترهای نیرو (P)، تنش (f) و تغییرمکان (δ) در نقاط معادل اولین ترک خوردگی (LOP)، $\frac{1}{600}$ طول دهانه و بیشینه نیروی وارده (MOR) ارزیابی می‌شود. از رابطه ۱.۳ برای محاسبه تنش در هر نقطه و همین‌طور محاسبه مدول گسسیختگی^۱ استفاده می‌شود:

$$f = \frac{P.L}{b.d^2} \quad (۱.۳)$$

• f : مقاومت بر حسب مگاپاسکال

• P : نیرو بر حسب نیوتن

• L : طول دهانه بر حسب میلی‌متر

• b : عرض نمونه بر حسب میلی‌متر

• d : ارتفاع نمونه بر حسب میلی‌متر است.

همچنین از رابطه ۲.۳ برای محاسبه نسبت مقاومت خمشی معادل^۲ تغییرمکان $1/150^\circ$ طول دهانه استفاده می‌شود [۱۲].

$$R_{T,150}^D = \frac{150.T_{150}^D}{f_1.b.d^2}.100\% \quad (۲.۳)$$

• $R_{T,150}^D$: نسبت مقاومت خمشی معادل تغییرمکان $1/150^\circ$ طول دهانه

• T_{150}^D : طاقت یا سطح زیر منحنی تا تغییرمکان معادل $1/150^\circ$ طول دهانه

• $f_1(f_{LOP})$: تنش خمشی در نقطه شکل‌گیری اولین ترک می‌باشد.

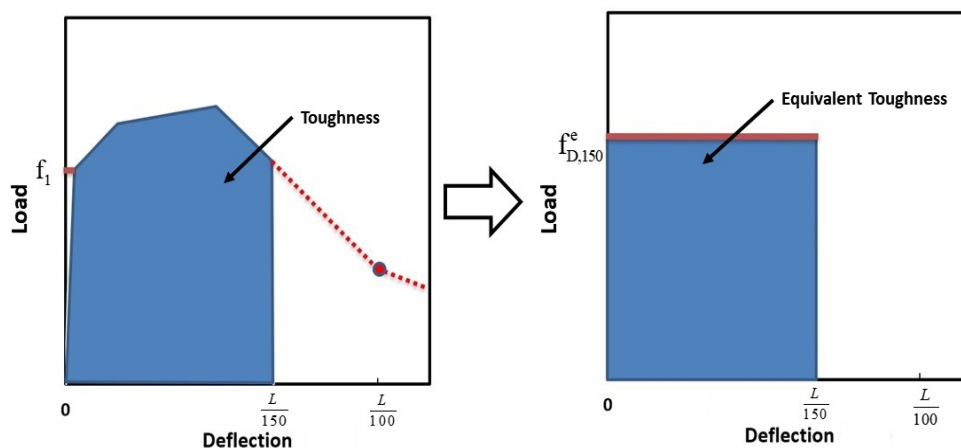
^۱Modulus Of Rupture

^۲Equivalent flexural strength ratio

در واقع با توجه به شکل ۱۳.۳ این نسبت از تقسیم مقاومت خمشی معادل نقطه $1/150$ دهانه بر مقاومت خمشی ایجاد اولین ترک در تیر خمشی محاسبه می‌گردد. در حالت کلی برای محاسبه مقاومت خمشی معادل هر نسبت طول دهانه به تغییر مکان میانه دهانه ($xxx = \frac{L}{\delta}$) از رابطه ۳.۳ استفاده می‌گردد.

$$f_{e,xxx}^D = \frac{xxx.T_{xxx}^D}{b.d^2} \quad (3.3)$$

در این رابطه T_{xxx}^D بیانگر طاقت معادل نسبت طول دهانه به تغییر مکان میانه دهانه (مثلاً 150° یا 100°) می‌باشد.



شکل ۱۳.۳: مقاومت خمشی معادل

۹.۳ ماشین و ابزار دقیق

در این بخش جزییات دستگاه‌های انجام آزمایشات خمش، فشار و تجهیزات ابزار دقیق شامل جابجایی سنج‌ها و دیتالاگر شرح داده می‌شود. از تجهیزات ابزار دقیق معرفی شده در این بخش تنها به جهت انجام آزمایش مطابق شرایط استاندارد و یا همان نرخ بارگذاری شبه‌استاتیکی استفاده شده است.

۱.۹.۳ سری دستگاه یونیورسال Toni Technik

به منظور انجام آزمایش‌های فشاری و خمشی از دستگاه یونیورسال سه‌گانه Toni Technik آزمایشگاه سازه و زلزله‌ی دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شد. این مجموعه در شکل ۱۴.۳ نشان داده شده است. ظرفیت دستگاه‌ها در کشش، فشار و خمش به ترتیب برابر ۶۰ تن، ۳۰۰ تن و ۱۵ تن می‌باشد. بیشینه سرعت جک خمشی ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه (۵ میلی‌متر بر ثانیه) است. به همین دلیل بیشینه نرخ کرنش استفاده شده در این تحقیق، به $(\dot{\epsilon} = 3 \times 10^{-2} \frac{1}{s})$ محدود می‌گردد.



شکل ۱۴.۳: دستگاه سه‌گانه یونیورسال

۲.۹.۳ جابجایی سنج

از جابجایی سنج یا LVDT^۱ برای اندازه‌گیری تغییر مکان‌های خطی استفاده می‌شود. در این پژوهش از دو مدل جابجایی سنج مطابق تصویر ۱۵.۳ با مشخصات زیر استفاده شده است:

۱. CDP-50، با دقت ۰/۰۵ میلی‌متر و حداکثر ظرفیت برابر ۵۰ میلی‌متر در انجام آزمون با شرایط بارگذاری شبه استاتیکی مورد استفاده قرار گرفته است.

^۱Linear Variable Displacement Transducer or Linear Variable Differential Transformer

۲. HS10، با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر و حداکثر ظرفیت ۱۰ میلی‌متر در صحت سنجی نتایج همبستگی تصویر استفاده شده است.



شکل ۱۵.۳: جابجایی سنج‌های استفاده شده

۳.۹.۳ داده بردار یا Data Logger

وسیله‌ای الکترونیکی است که داده‌هایی را که به وسیله‌ی حسگرهای تعبیه شده در دستگاه یا ابزار و حسگر خارجی تأمین می‌شوند را در طول زمان و یا در رابطه با مکان ذخیره می‌نماید. برای ثبت و ذخیره‌سازی داده‌های جابجایی سنج‌ها (حسگر خارجی) از این ابزار استفاده می‌شود. در این تحقیق از Data Logger مدل TDS-150 مطابق تصویر ۱۶.۳ استفاده شد. با توجه به نرخ ثبت داده $1Hz$ (یک داده در هر ثانیه) این دستگاه، تنها در شرایط بارگذاری شبه استاتیکی امکان بهره‌گیری از داده بردار وجود دارد.

۱۰.۳ همبستگی تصاویر دیجیتال

در تکنیک‌های معمول اندازه‌گیری کرنش (همانند بخش قبل)، یک کرنش سنج تغییرات خطی یک نقطه را محاسبه می‌نماید. در چنین شرایطی نیاز به استفاده از چندین کرنش سنج برای



شکل ۱۶.۳: داده بردار (TDS-150)

اندازه‌گیری میدان‌های کرنش بزرگتر می‌باشد. با افزایش نرخ کرنش، پیچیدگی استفاده از ابزار دقیق تماسی در اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها افزایش می‌یابد تا آن‌جا که در نرخ کرنش‌های بسیار زیاد امکان استفاده از این ابزار اندازه‌گیری وجود ندارد.

با استفاده روز افزون از پردازش تصویر در زمینه‌های مختلف و توسعه ابزارهای آن مانند دوربین‌های دیجیتال و اسکنرها، این روش وارد حوزه مهندسی عمران نیز شده و مهندسان این حوزه از آن استفاده می‌کنند. به عنوان مثال، یکی از ابزارهای مورد استفاده در پایش سلامت سازه، پردازش تصویر است [۳۳]. همبستگی تصویر دیجیتال^۱ (DIC) یک روش قوی، غیر تماسی و غیر مخرب است که در آن تصاویر دیجیتالی از سطح نمونه آزمایش با استفاده از دوربین با وضوح بالا ثبت می‌شود. در ادامه، این تصاویر به وسیله یک ابزار پردازشی همبسته و تجزیه و تحلیل می‌شوند تا شکل سطح، اندازه‌گیری‌های خطی، تغییر شکل‌ها و کرنش‌های درون صفحه تحت تأثیر نیروها و تنش‌ها بدست آید [۳۴]. همان‌طور که بیان شد از روش همبستگی تصاویر دیجیتال می‌توان در تحلیل میدان‌های کرنش با نرخ بالا بهره برد. از دیگر

^۱Digital Image Correlation

قابلیت‌های این روش می‌توان به امکان تجزیه تحلیل پیشرفت ترک و ارزیابی کامل هندسه ترک بدون اندازه‌گیری‌های پیچیده اشاره کرد. دقت نتایج به‌دست آمده در این روش عمدتاً به دو پارامتر یعنی وضوح تصاویر گرفته شده و کیفیت الگوی لکه‌های موجود در نمونه بستگی دارد. وضوح تصویر نیز به کیفیت سنسور دوربین، وضوح تصویر، نویز ایجاد شده در ناحیه‌ی مورد سنجش، نور و فاصله دوربین و سوژه بستگی دارد.

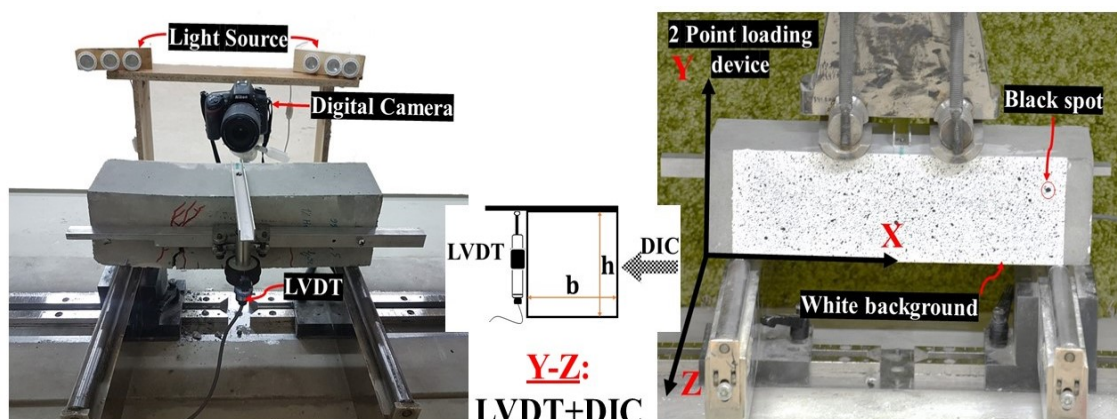
در این تحقیق برای برداشت اطلاعات میدان جابجایی تیرهای خمشی در دو نرخ بالای بارگذاری، همبستگی تصاویر دیجیتال به‌عنوان جایگزین برداشت اطلاعات با ابزار دقیق تماسی (جابجایی‌سنج و داده بردار) استفاده شده است. در این بخش نشان داده شده است که با استفاده از دوربین DSLR و برنامه Ncorr (2D MATLAB) می‌توان مقادیر دقیق جابجای میدان کرنش را برای تیر مسلح به الیاف مشخص کرد. Ncorr یک نرم افزار باکیفیت بالا و منعطف، به‌صورت متن باز^۱ در حوزه همبستگی تصاویر دیجیتال است.

۱.۱۰.۳ روش انجام آزمایش

همبستگی تصویر دیجیتال (DIC)، یک روش بینایی رایانه‌ای است که اخیراً توسعه یافته و امکان اندازه‌گیری تغییر شکل و انتشار دقیق ترک‌ها را فراهم می‌کند. با مقایسه تصاویر بعدی نمونه تغییر شکل یافته با تصویر اولیه، می‌توان مراحل مختلف انتشار ترک‌ها را در طول روند بارگذاری بدون دخالت در فرآیند شکستگی، کنترل کرد. برای به دست آوردن تصویر دیجیتالی و نتیجه تجزیه و تحلیل بهتر، آماده سازی چیدمان خاصی لازم است. تصویر ۱۷.۳ چیدمان انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

مطابق ASTM C1609 یک نمونه تیر خمشی به ابعاد $100 \times 100 \times 350$ با طول دهانه خالص ۳۰۰ میلی‌متر تحت بارگذاری با سرعت ۱/۰ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفت. یک سطح نمونه خمشی ابتدا با استفاده از رنگ سفید در یک لایه بسیار نازک رنگ آمیزی شد و سپس نقاط سیاه تصادفی روی سطح سفید پاشیده شد. و برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از پردازش میدان کرنش به روش همبستگی تصاویر دیجیتال، از روش برداشت داده به‌وسیله‌ی کرنش‌سنج با

^۱Open-source



Y-X Back:
LVDT measurement

Y-X Front:
DIC measurement

شکل ۱۷.۳: چیدمان اندازه گیری به روش LVDT+DIC

دقت بالا (LVDT(HS 10) که به Data logger متصل است، با شرایط و چیدمان مطابق استاندارد استفاده شد. دوربین توسط سه پایه ثابت و هم زمان با شروع آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، ضبط تصاویر (فیلم برداری) آغاز گردید. برای ثبت تصاویر دوربین (Nikon D7100)¹ DSLR با قابلیت ضبط فیلم تا ۶۰ فریم بر ثانیه استفاده گردید و جهت فراهم آوردن شرایط نوری مناسب پس از چندین مرحله آزمون و خطا مطابق تصویر ۱۷.۳ از یک سیستم نورپردازی با قابلیت تغییرات دستی میزان فاصله و شدت نور، استفاده شد. با توجه به تاثیر بسیار ثبات شرایط نور محیط و زمان کلی آزمایش چهار نقطه‌ای، برداشت تصاویر در تاریکی هوا انجام شد. به این ترتیب تغییرات نور روز بی‌اثر می‌شود.

۲.۱۰.۳ پردازش اولیه

پس از اتمام آزمایش، پیش از شروع پردازش اصلی یک مرحله پیش پردازش بروی تصاویر انجام می‌گیرد، که شامل مراحل زیر است:

۱. استخراج یک فریم (تصویر) در ثانیه (معادل 1HZ و متناسب با نرخ برداشت داده از دیتالاگر) تا تغییر شکل برابر ۵/۰ میلی متر ($\frac{1}{600}$ دهانه) و از این نقطه تا پایان آزمایش هر ده ثانیه یک فریم (0.1HZ) استخراج گردید.

¹Digital Single-Lens Reflex

۲. برش^۱ تصاویر و حذف حاشیه‌های پیرامونی به گونه‌ای که تنها محدوده‌ی مورد ارزیابی در طی یارگذاری باقی ماند.

۳. نام‌گذاری تصاویر در یک فرمت منظم و یکپارچه به شکل $(Name_#.ext)$ که در آن # شماره فریم و $.ext$ فرمت یا پسوند تصاویر است که می‌تواند $.png$, $.tif$, $.jpg$ و $.bmp$ باشد. در این ارزیابی تصاویر به شکل $(Validation_00.tif \sim Validation_665.tif)$ نام‌گذاری شدند.

۴. همگام‌سازی^۲ تصاویر (فریم‌ها) با داده‌ی خروجی از نیروسنج و دیتالاگر (LVDT) به منظور هماهنگ‌سازی داده‌ها ضمن آنکه سعی شد، شروع ضبط و برداشت داده‌ها یکسان باشد، اولین تصویر برداشت شده، همزمان با شروع تغییر مکان جک بارگذاری (با توجه به شروع صدای جک بارگذاری) استخراج شد.

در ادامه تمام تصاویر نمونه خمشی برای محاسبه توزیع کرنش و بررسی شکل‌گیری و انتشار ترک‌ها به N_{corr} وارد می‌گردند.

۳.۱۰.۳ روند همبستگی تصاویر دیجیتال

همبستگی تصاویر دیجیتال با استفاده از جعبه ابزار پردازش تصویر MATLAB R2017b به همراه N_{corr} (یک برنامه منبع باز دوبعدی) انجام شد. الگوریتم مورد استفاده در این تحقیق توسط بلبر و همکاران توسعه یافته است [۳۴]. تصویر ۱۸.۳ منوی اصلی برنامه را نشان می‌دهد. مراحل اصلی همبستگی تصاویر دیجیتال در ادامه تشریح شده است.

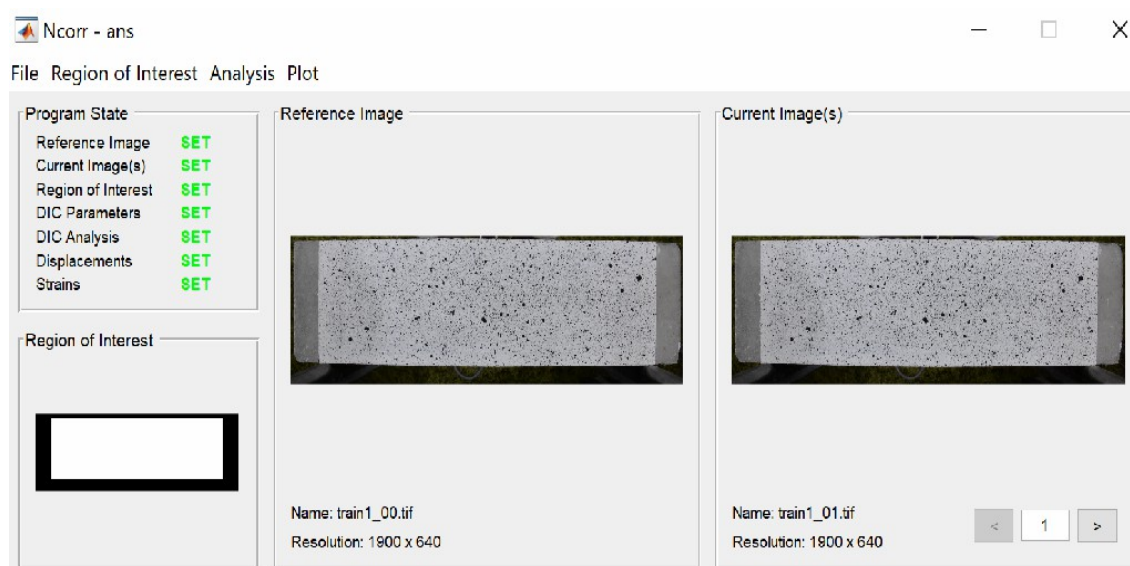
۱. انتخاب ROI:

ROI^۳ بخشی از تصویر است که عنصر مورد نظر در آن قرار دارد. کل طول عنصر باید در ROI باشد. به عنوان مثال، برای اندازه‌گیری تغییر مکان یا خیز یک تیر، نقطه شروع و انتهای آن تیر باید در قاب تصویر باشد و این تیر ROI است. پس از حذف پرسپکتیو

¹Crop

²Synchrononization

³Region Of Intrest (ROI)



شکل ۱۸.۳: محیط اصلی Ncorr

کل تصویر، ROI را می‌توان با برش و چرخش تصویر مشخص کرد. اگر فقط عنصر مورد نظر در قاب تصویر باشد، این مرحله حذف می‌شود.

۲. پیش پردازش تصاویر:

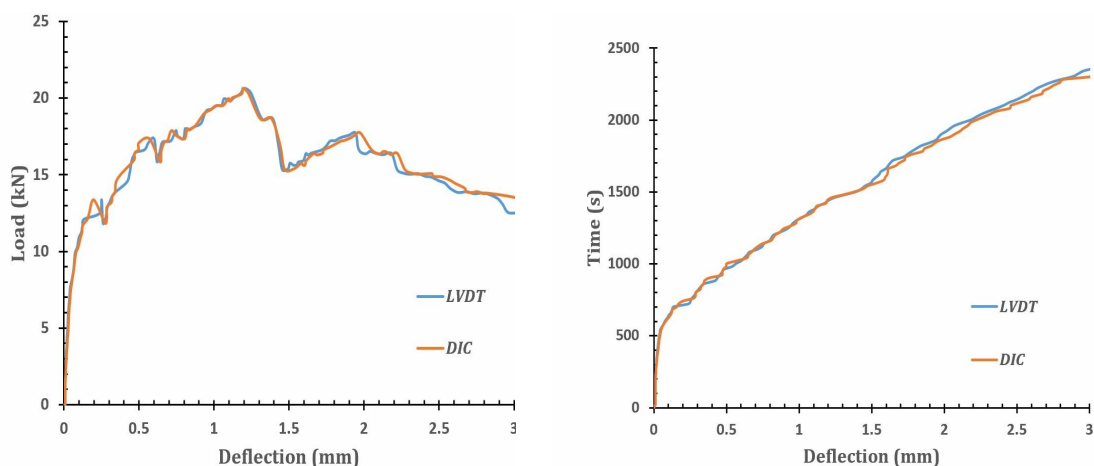
پس از انتخاب ROI، عملیات پیش پردازش کیفیت تصویر را افزایش می‌دهد. این عملیات شامل افزایش کنتراست، صاف یا شارپ کردن تصویر براساس کیفیت آن با استفاده از فیلترهای فضایی و ... است. اگر جزئیات زیادی در تصویر وجود دارد، بهتر است ROI را صاف کنید تا در مرحله بعدی پردازش تشخیص لبه اضافی کاهش یابد (این روش توصیه می‌شود). برای این منظور، از فیلتر متوسط با اندازه‌های مختلف برای صاف کردن ROI استفاده می‌شود.

۳. قطعه بندی تصاویر:

قطعه بندی تصویر، فرآیند تقسیم تصویر به قطعات یا بخش‌های کوچک‌تر است. این تقسیم اغلب بر اساس مشخصات پیکسل‌های تصویر است. به عنوان مثال، یکی از راه‌های یافتن مناطق در تصویر، جستجوی ناپیوستگی‌های ناگهانی در مقادیر پیکسل است که معمولاً لبه‌ها را نشان می‌دهد. این لبه‌ها می‌توانند مناطق را تعریف کنند. مرزها و لبه‌های منطقه از نزدیک با هم مرتبط هستند زیرا در مرزهای منطقه غالباً یک

شدت تغییر شکل وجود دارد. تکنیک های تشخیص لبه به عنوان پایه دیگری از تکنیک تقسیم بندی استفاده شده است، و برای شناسایی لبه های تصویر استفاده می شود.

در نهایت با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای هر یک از تصاویر میدان جابجایی، توزیع کرنش و شکل گیری و انتشار ترک در صفحه دوبعدی محاسبه و نمایش داده می شود. برای صحت سنجی نتایج این روش، تغییر مکان نقطه وسط بالای دهانه برای هر تصویر (نقطه معادل اندازه گیری LVDT) ثبت و با اندازه گیری LVDT مقایسه شده است. نتایج صحت سنجی در شکل ۱۹.۳ در قالب منحنی های زمان - جابجایی و نیرو - جابجایی آورده شده است. با توجه به دقت بالای اندازه گیری و نزدیکی نتایج بدست آمده از دو روش استفاده



(ب) نیرو - جابجایی

(الف) زمان - جابجایی

شکل ۱۹.۳: مقایسه نتایج دو روش LVDT و DIC

شده، از روش همبستگی تصاویر دیجیتال می توان به عنوان جایگزین مناسب برای روش های معمول اندازه گیری تغییر مکان آزمایشات تیرهای خمشی استفاده کرد. از این روش علاوه بر اندازه گیری جابجایی نقطه وسط بالای دهانه، برای مشاهده شکل گیری و انتشار ترک ها و محاسبه توزیع کرنش در کل نمونه استفاده شد.

فصل ۴

نتایج آزمایشات

۱.۴ مقدمه

افزودن الیاف به ماتریس‌های پایه سیمانی علاوه بر بهبود شکل‌پذیری و مقاومت در برابر ترک خوردگی، باعث افزایش قابلیت جذب انرژی و طاق‌این مصالح مرکب در مقایسه با ماتریس‌های پایه سیمانی بدون الیاف می‌گردد. در زمان گسترش ترک‌ها در ماتریس‌های پایه سیمانی، الیاف با استفاده از مکانیزم پل زنی ترک‌ها^۱ مانع از گسترش سریع یک یا چند ترک و بهم پیوستگی آن‌ها می‌شود.

از آنجا که مبنای صحت‌سنجی و کنترل مدل‌های تحلیلی توسعه یافته توسط محققان در خصوص بیرون کشیدگی الیاف تحت شرایط بارگذاری دینامیکی، استفاده از نتایج بدست آمده از آزمایشات الیاف در شرایط واقعی است، لذا انجام مطالعات تجربی دقیق در این خصوص نیاز است. همچنین با توجه به رفتار پیچیده الیاف در روند بیرون کشیدگی، به دلیل وجود رفتارهای غیرخطی و ترکیب مکانیزم‌های متفاوت در شرایط مختلف بارگذاری و محیطی، لزوم انجام آزمایشات و بررسی جزئی‌تر نتایج آن در این خصوص ضروری می‌باشد. در راستای انجام این هدف، آزمایش بیرون کشیدگی با سه سرعت متفاوت ۱/۰، ۱۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه بر روی سه الیاف فولادی قلابدار با نسبت ظاهری ۹۲، ۷۰ و ۵۰ انجام گرفته است و اثر نرخ بارگذاری و نسبت ظاهری بر رفتار بیرون کشیدگی در قالب بررسی پارامترهای نظیر بیشترین نیروی بیرون کشیدگی، لغزش معادل بیشترین نیروی بیرون کشیدگی، نسبت بیشترین تنش بیرون کشیدگی به مقاومت کششی الیاف، کار انجام شده و ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی برای هر سری محاسبه شده است.

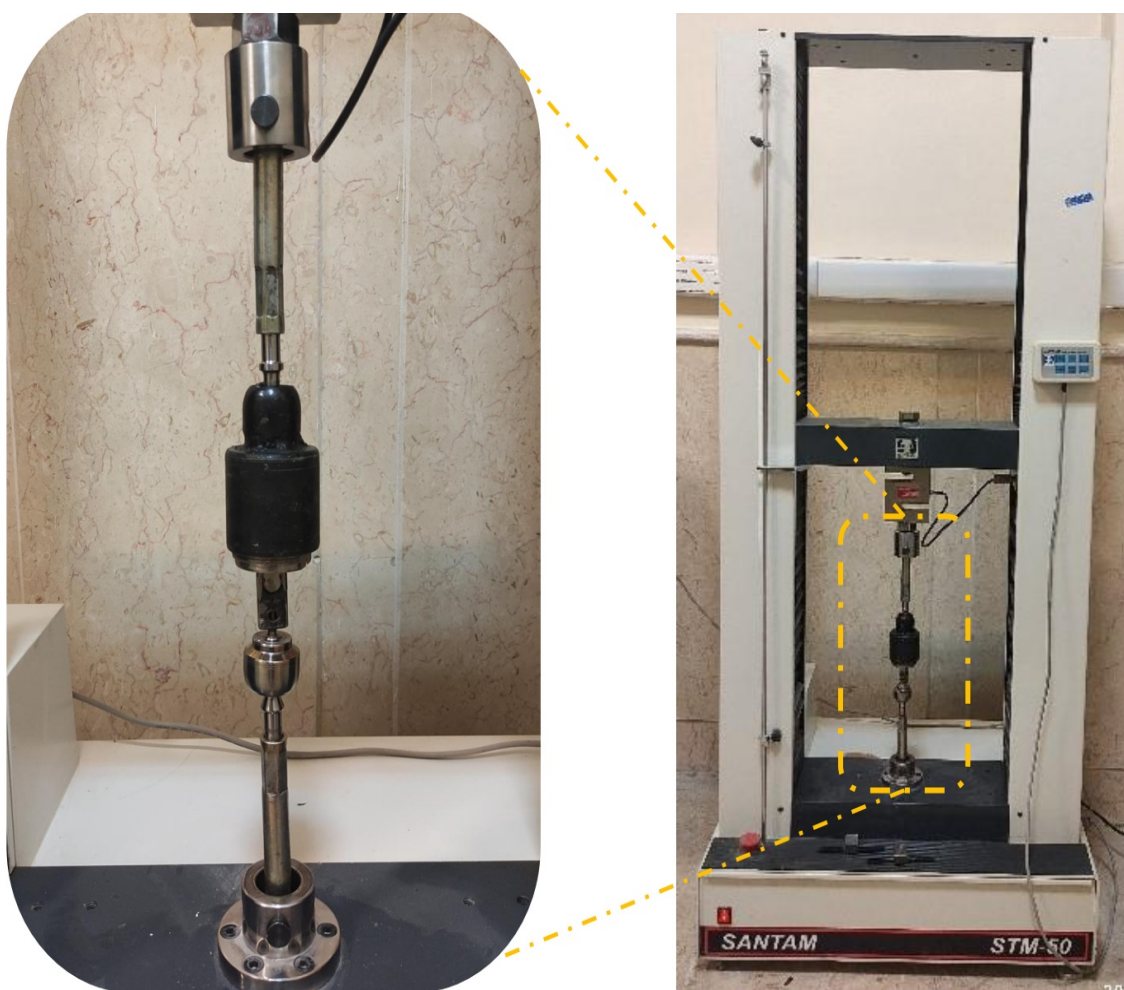
در ادامه تیرهای خمشی مسلح به یک درصد حجمی الیاف قلابدار با نسبت ظاهری ۹۲ در سه نرخ بارگذاری مورد آزمایش قرار گرفت. و رابطه‌ی بین رفتار بیرون کشیدگی و خمشی ارزیابی شده است. نام‌گذاری سری‌ها از سه بخش که به ترتیب نمایانگر نوع نمونه (P برای نمونه‌های بیرون کشیدگی و B برای نمونه‌های خمشی)، نسبت ظاهری الیاف استفاده شده و سرعت بارگذاری (معادل نرخ کرنش) در حین آزمایش تشکیل یافته است. به این طریق

¹Crack bridging mechanism

”P 50-0.1” به سری نمونه‌های بیرون کشیدگی حاوی الیاف با نسبت ظاهری ۵۰ که تحت بارگذاری با سرعت ۱/۰ قرار گرفته، اطلاق می‌شود.

۲.۴ ارزیابی رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی قلابدار

آزمایشات به وسیله ماشین تست یونیورسال Santam STM-50 آزمایشگاه شماره یک دانشگاه لرستان و چیدمان طراحی شده مطابق تصویر ۱.۴ در سه سرعت بارگذاری ۱/۰، ۱۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه با نیروسنج ۵۰ کیلو نیوتنی تا بیرون کشیدگی کامل (یا شکست) الیاف با فرض تغییر شکل الاستیک ناچیز الیاف و گیره‌های فولادی انجام شد. مبنای اندازه گیری لغزش الیاف، جابجایی عمودی قبضه مهار الیاف و نمونه بوده است. این آزمایش بر روی ۹



شکل ۱.۴: نمونه بیرون کشیدگی بسته شده به دستگاه یونیورسال

سری نمونه که هر سری شامل شش آزمون (جمعاً ۵۴ آزمون) بعد از سن ۲۸ روزگی با شرایط ساخت و عمل‌آوری مطابق فصل پیش انجام شد.

نتایج به دست آمده از آزمون بیرون کشیدگی الیاف منفرد در قالب ۹ نمودار نیرو - لغزش متمایز برای هر سری با الیاف قلابدار تا عمق مدفون برابر نصف طول الیاف (۵/۱۷ میلی‌متر)، در شکل ۲.۴، نمایش داده شده است. با توجه به تعداد آزمون‌های هر سری (شش آزمون)، فقط جهت مقایسه روشن‌تر نتایج سری‌های آزمایش بیرون کشیدگی از منحنی‌های نیرو-لغزش هر سری میانگین‌گیری شده است. البته باید اذعان داشت که میانگین‌گیری منحنی‌ها همیشه به عنوان یک روش منطقی و اصولی جواب‌های قابل اعتمادی به دست نمی‌دهد. ارزیابی جزئیات روش میانگین‌گیری از نمودارها در پیوست آمده است.

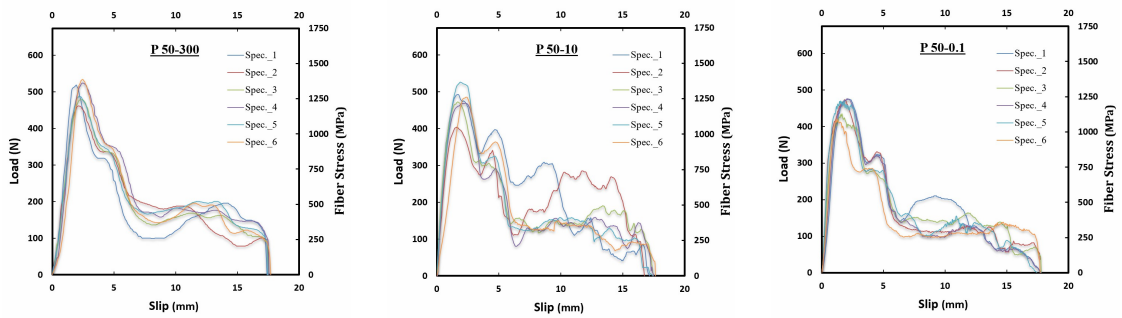
در جدول ۱.۴ به عنوان نمونه داده‌های سری P 50-0.1 و نحوه‌ی محاسبه میانگین و ضریب تغییرات^۱، به عنوان مبنای محاسبه تمام پارامترها آورده شده است. همچنین شکل ۳.۴ مثال میانگین‌گیری از منحنی‌های نیرو-لغزش این سری را نشان می‌دهد. این روند برای تمام سری‌ها تکرار شده است و جزئیات اطلاعات هر سری در کنار منحنی نیرو-لغزش متوسط مربوطه در پیوست آمده است. با این حال به این نکته تاکید می‌گردد که در محاسبه تمامی پارامترهای آزمون بیرون کشیدگی برای هر سری از میانگین داده‌های خروجی دستگاه سنام استفاده شده است. از این رو نمودارهای میانگین تنها به جهت مقایسه بهتر نتایج سری‌های مختلف ارایه شده است.

با مشاهده نمودارهای متوسط شکل ۴.۴ می‌توان پی برد که در این محدوده بارگذاری الیاف قلابدار (در تایید تحقیقات پیشین) به نرخ بارگذاری حساس است [۲۶ و ۲۸]. جهت بررسی دقیق‌تر رفتار بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس، این روند در منحنی شکل (۵.۴) به چند بخش تقسیم شده است:

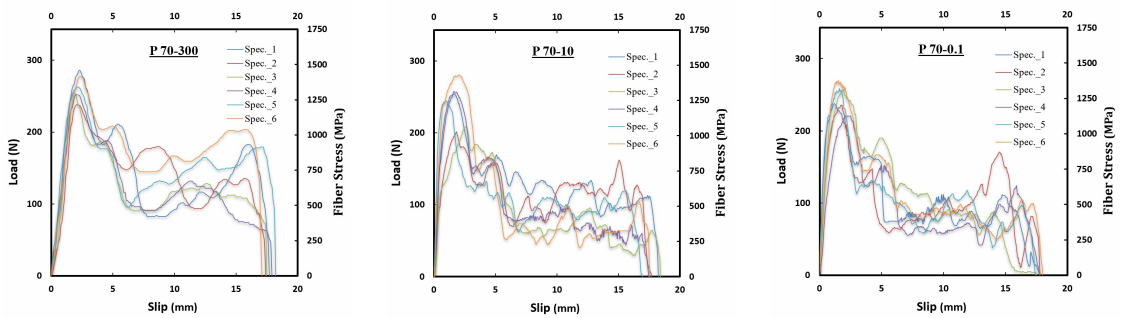
۱. بخش O-A: پاسخ منحنی تا نقطه A، که همان شروع جداشدگی^۲ پیوند الیاف و ماتریس تقریباً خطی است. تغییر شیب منحنی در این نقطه بیانگر اتمام رفتار الاستیک خطی و چسبندگی برشی الاستیک بین الیاف و ماتریس سیمانی است.

^۱Coeffication of Variation

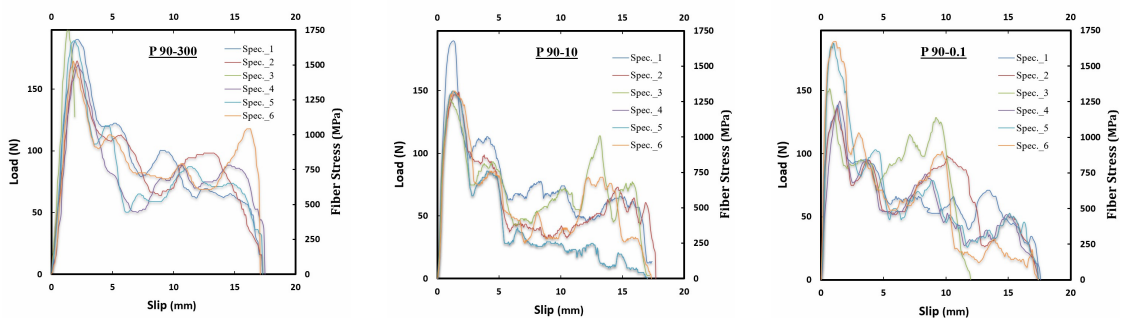
^۲Debonding



V=300mm/min, l/d=50 (ج) V=10mm/min, l/d=50 (ب) V=0.1mm/min, l/d=50 (الف)



V=300mm/min, l/d=70 (و) V=10mm/min, l/d=70 (ه) V=0.1mm/min, l/d=70 (د)

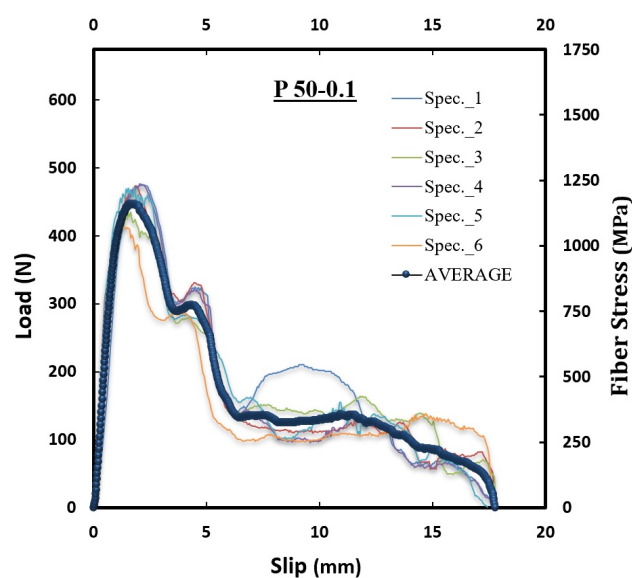


V=300mm/min, l/d=92 (ط) V=10mm/min, l/d=92 (ح) V=0.1mm/min, l/d=92 (ز)

شکل ۲.۴: منحنی نیرو- لغزش رفتار رفتار بیرون کشیدگی الیاف منفرد

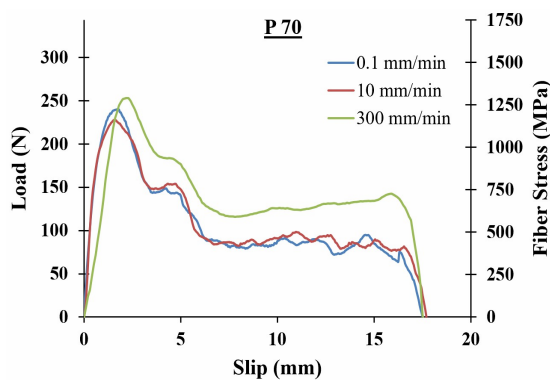
جدول ۱.۴: خلاصه داده‌های خروجی دستگاه برای سری P 50-0.1

Notation	Peak Load	Peak Slip	Peak Work	Total Work
	N	mm	N.mm	N.mm
Spec._1	475.8	2	647	3382
Spec._2	472.7	1.8	623	3169
Spec._3	434.5	1.5	437	2945
Spec._4	477.0	2	626	3007
Spec._5	472.1	1.6	522	3178
Spec._6	425.0	1.4	352	2847
CV(%)	4.6	13.6	20.4	5.7
Average	459.5	1.7	535	3088

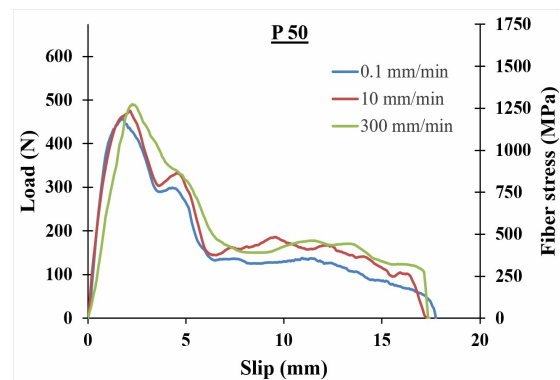


شکل ۳.۴: منحنی میانگین‌گیری شده نیرو- لغزش سری P50-0.1

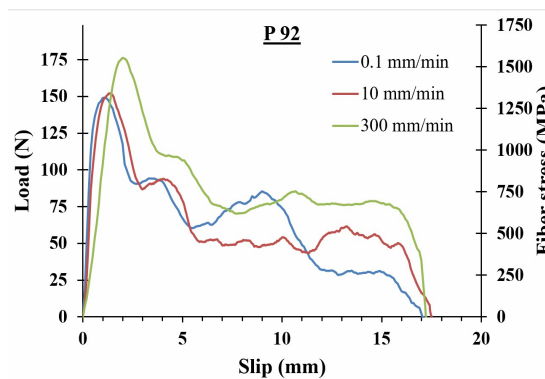
۲. بخش A-B: جداشدگی توأم با افزایش نیروی بیرون کشیدگی ادامه می‌یابد با تکمیل جداشدگی الیاف و ماتریس، مشارکت مکانیزم قلاب گیردار با مفصل پلاستیک شدن دو



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۴.۴: نمودار متوسط نیرو - لغزش بیرون کشیدگی تک الیاف با نسبت ظاهری (الف):

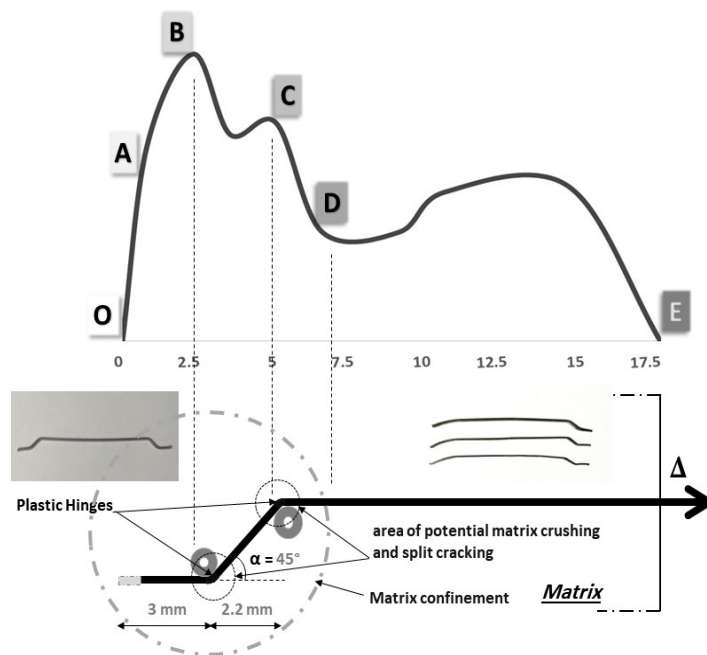
1/d=50 (ب): 1/d=70 (ج): 1/d=92

نقطه شروع می شود و تا رسیدن نیروی بیرون کشیدگی به بیشترین میزان ادامه می یابد.

۳. بخش B-C: با اتمام یک نقطه پلاستیک مرحله پس از بیشینه نیرو آغاز می شود و بسته به شعاع غلطک خمشی مجازی ایجاد شده در نقاط مفصل پلاستیک میزان متغیری در قله اول و دوم منحنی نیرو لغزش ایجاد می شود. بعضاً به دلیل تخریب زیاد ناحیه ی مهار^۱ یا تراکم نامناسب ذرات این مرحله با نقش ناچیز در منحنی ظاهر می گردد. در این مرحله یک مفصل پلاستیک و اصطکاک، مکانیزم فعال می باشند.

۴. بخش C-D: نقطه C در واقع پایان تاثیر مکانیزم گیردار الیاف قلابدار با تمام شدن

¹Anchor



شکل ۵.۴: منحنی تیپ رفتاری الیاف قلابدار

دومین مفصل پلاستیک با تخریب ناحیه محصورشدگی^۱ قلاب انتهایی (توسط ماتریس پیرامون)، همراه است. از این نقطه به بعد پاسخ منحنی تنها به رفتار اصطکاکی الیاف ثبت می‌گردد.

۵. بخش D-E: باید توجه داشت که با اتمام مکانیزم گیرداری الیاف شکل ظاهری انتهایی قلابدار به یک انحنا تغییر می‌یابد و با ورود این انحنا به بخش پایانی تونل که بواسطه شکل صاف الیاف در ابتدای آزمایش تنها در قسمت پیوند دچار تخریب شده، خیز و افت در نیروی بیرون کشیدگی مشاهده می‌شود.

با توجه به اهداف این پژوهش و ارزیابی کلی رفتار بیرون کشیدگی الیاف، نتایج آزمایش بیرون کشیدگی در قالب پارامترهایی زیر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است:

۱. **بیشینه تنش کششی ایجاد شده در الیاف:** در واقع اتلاف انرژی مناسب بتن مسلح به الیاف پس از ایجاد ترک مستلزم بیرون کشیده شدن الیاف بدون گسیختگی است. به این منظور بیشینه تنش کششی ایجاد شده در الیاف (σ_{max}) بواسطه نیروی بیرون کشیدگی، می‌بایست کمتر از مقاومت کششی الیاف باشد. به این ترتیب بیشینه تنش

¹confinement

کشی یک عامل کلیدی در انتخاب الیاف مناسب برای ماتریس می‌باشد. این پارامتر از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\sigma_{max} = \frac{P_{max}}{A_f} \quad (۱.۴)$$

در این رابطه P_{max} بیشترین نیروی بیرون کشیدگی، A_f سطح مقطع الیاف ($= \pi \times d_f^2 / 4$) و d_f قطر الیاف است.

۲. میزان استفاده شده از ظرفیت کششی الیاف (بهره وری الیاف): برای تمامی سری‌ها نسبت بیشینه تنش کششی ایجاد شده در الیاف به مقاومت کششی الیاف (σ_{max}) محاسبه شده است. به کمک این پارامتر میزان استفاده شده از ظرفیت مصالح (الیاف فولادی) ارزیابی می‌گردد.

۳. مقاومت پیوند بیشینه^۱: مقاومت پیوند بین الیاف و ماتریس بر اساس بیشترین نیروی اعمالی و طول مدفون اولیه از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۳۵].

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{\pi d_f l_e} \quad (۲.۴)$$

در این رابطه τ_{max} بیشینه مقاومت پیوند و l_e طول مدفون الیاف است.

۴. کار بیرون کشیدگی الیاف: کار (یا انرژی) بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس در واقع از محاسبه سطح زیر منحنی نیرو - لغزش تا لحظه صفر شدن نیرو از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$W_p = \int_{s=0}^{s=l_e} P(s) ds \quad (۳.۴)$$

همچنین کار ویژه ($Work^*$)، کار انجام شده در واحد سطح (mm^2) می‌باشد که از تقسیم کار بیرون کشیدگی بر سطح مقطع هر الیاف محاسبه می‌گردد. به کمک کار ویژه می‌توان عملکرد هر الیاف را با در نظر گرفتن سطح مقطع نظیر آن ارزیابی کرد.

¹Maximum bond strength

۵. **مقاومت پیوند معادل^۱:** با فرض توزیع یکنواخت تنش برشی در طول مدفون الیاف مقاومت پیوند معادل برپایه کار بیرون کشیدگی به طریق زیر محاسبه می‌گردد.

$$\tau_{eq} = \frac{2W_p}{\pi d_f l_e^2} \quad (4.4)$$

مقاومت پیوند معادل با ظرفیت کرنشی و رفتار ترک خوردگی متعدد در مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف مرتبط است، در حالی که مقاومت پیوند بیشینه با حداکثر مقاومت کششی این مصالح ارتباط نزدیکی دارد [۳۵].

پارامترهای مورد ارزیابی بسته به ماهیت آن‌ها برای دو نقطه بیشینه نیرو و پایان بیرون کشیدگی در جداول ۲.۴ و ۳.۴، دسته بندی شده‌اند. ضریب افزایش دینامیکی (DIF) متناظر هر پارامتر،

جدول ۲.۴: نتایج رفتار الیاف در بیشینه نیروی بیرون کشیدگی تک الیاف

Notation	Maximum Pull-out Load				
	Load	$\frac{\sigma_{max}}{f}$	τ_{max}	DIF	Slip
	N	%	MPa	—	mm
P 50-0.1	459.5	50.6	11.94	1.00	1.7
P 50-10	477.1	52.5	12.40	1.04	1.9
P 50-300	486.4	53.6	12.64	1.06	2.2
P 70-0.1	247.3	50.8	8.99	1.00	1.6
P 70-10	244.8	50.3	8.91	0.99	1.7
P 70-300	261.5	53.7	9.64	1.06	2.1
P 92-0.1	157.7	51.5	7.55	1.00	1.1
P 92-10	158.9	51.9	7.61	1.01	1.3
P 92-300	182.3	59.5	8.73	1.16	1.9

¹Equivalent bond strength

نسبت رفتار دینامیکی (10mm/min و 300mm/min) به رفتار استاتیکی (0.1mm/min) را نشان می‌دهند. باتوجه به رابطه خطی بین بیشینه نیروی بیرون کشیدگی، تنش کششی ایجاد شده در الیاف، میزان استفاده شده از ظرفیت کششی الیاف و مقاومت پیوند بیشینه، ضریب افزایش دینامیکی برای این پارامترها یکسان است. به دلیل مشابه این ضریب برای پارامترهای کار بیرون کشیدگی، کار ویژه و مقاومت پیوند معادل یکسان محاسبه می‌گردد.

جدول ۳.۴: نتایج بیرون کشیدگی تک الیاف

Notation	Completed Pull-out			
	Work	τ_{eq}	Work*	DIF
	$N.mm$	MPa	$\frac{J}{mm^2}$	—
P 50-0.1	3088	9.10	7.965	1.00
P 50-10	3578	10.54	9.223	1.16
P 50-300	3723	10.97	9.678	1.21
P 70-0.1	1895	7.88	9.652	1.00
P 70-10	1971	8.20	10.042	1.04
P 70-300	2549	10.60	12.986	1.35
P 92-0.1	1152	6.30	10.159	1.00
P 92-10	1190	6.51	10.492	1.03
P 92-300	1534	8.39	13.531	1.33

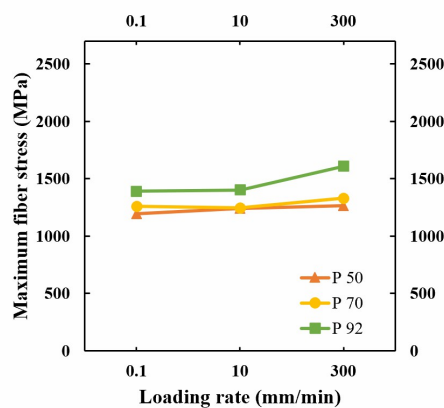
۱.۲.۴ تاثیرات بر بیشینه نیروی بیرون کشیدگی و تنش کششی

الیاف

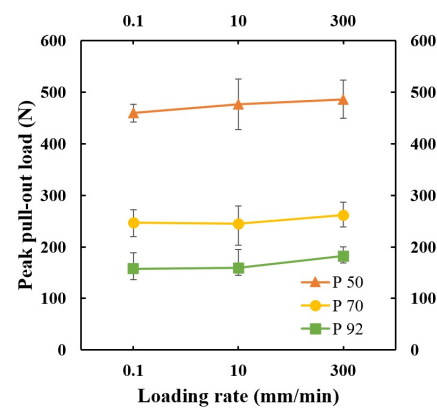
برای نمونه‌های آزمون بیرون کشیدگی ممکن است یکی از دو حالت کلی بیرون کشیدگی کامل (بعضاً توام با کنده‌شدگی ماتریس) یا گسیختگی الیاف رخ دهد. در این پژوهش بیرون کشیدگی

شکل ۶.۴: (الف) نمونه‌های بیرون کشیدگی بعد آزمایش (ب): حالت بیرون کشیدگی کامل (ج): حالت کنده‌شدگی الیاف

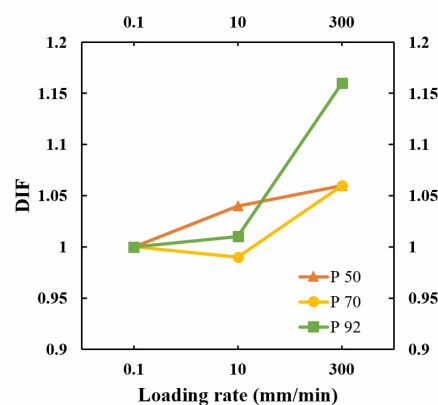
حداکثر تنش کششی الیاف یک پارامتر مهم برای پیش بینی حالت بیرون کشیدگی الیاف (بیرون کشیدگی کامل یا گسیختگی) است، که بر پایه بیشینه نیروی وارد شده و سطح مقطع الیاف محاسبه می‌شود. بر اساس نتایج و مطابق تصویر ۷.۴ (ب) و جدول ۲.۴، الیاف H92 بیشترین تنش کششی را در هر سه نرخ بارگذاری از خود نشان داد. پس از آن به ترتیب الیاف H70 و H50 بیشترین تنش کششی را داشتند. بیشترین تنش کششی ایجاد شده، به ترتیب برابر ۱۳۹۱، ۱۲۶۰ و ۱۱۹۴ در نرخ بارگذاری استاتیکی و ۱۶۰۸، ۱۳۳۲ و ۱۲۶۴ در بالاترین نرخ بارگذاری لرزه‌ای برای سه الیاف H92، H70 و H50 بود.



(ب)



(الف)



(ج)

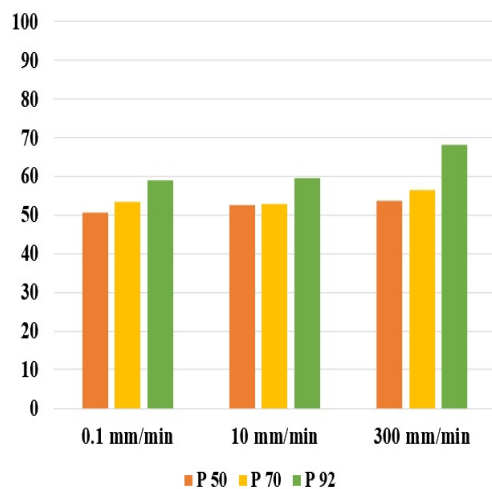
شکل ۷.۴: (الف): بیشینه نیروی بیرون کشیدگی الیاف (ب): بیشینه تنش کششی الیاف (ج): حساسیت الیاف به نرخ بارگذاری

بیشینه تنش کششی الیاف H92، ۱۱ و ۱۶ درصد در حالت بارگذاری استاتیکی و ۲۱ و ۲۷ درصد در حالت بارگذاری لرزه‌ای از دو الیاف H70 و H50 بیشتر بود. با توجه به تنش کششی بالاتر الیاف H92 در شرایط بارگذاری استاتیکی تا لرزه‌ای و شرایط مهاری (قلابدار) یکسان سه الیاف می‌توان نتیجه گرفت که افزایش نسبت ظاهری الیاف باعث بهبود عملکرد بیرون کشیدگی الیاف فولادی از ماتریس پایه سیمانی و به دنبال آن ارتقاء پتانسیل رفتار کششی در مصالح پایه سیمانی با عملکرد بالا می‌شود. در شکل ۷.۴ (ج) و جدول ۲.۴ ضریب افزایش دینامیکی (DIF) برای بیشینه تنش کششی (بیشینه نیروی بیرون کشیدگی) آورده شده است. در بین الیاف‌های با سه نسبت ظاهری مختلف استفاده شده، سری P 92 بیشترین حساسیت به نرخ بارگذاری را با ضریب افزایش دینامیکی ۱/۱۶ در نرخ بارگذاری 300 mm/min نشان داد. این مقدار برای دو سری P 70 و P 50 یکسان و برابر ۱/۰۶ بود.

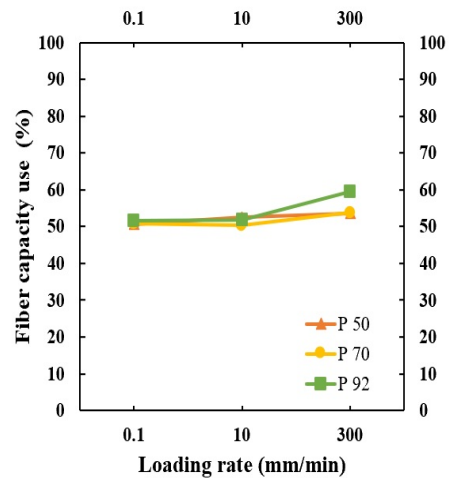
۲.۲.۴ تاثیرات بر میزان استفاده شده از ظرفیت الیاف

نسبت ظرفیت استفاده شده، با تقسیم بیشینه تنش کششی ایجاد شده در الیاف (σ_{max}) بر مقاومت کششی الیاف (f) تعریف می‌گردد و نمایانگر بازدهی و بهره‌وری الیاف است [۳۶]. مطابق تصویر ۸.۴ (الف) و جدول ۲.۴ ظرفیت استفاده شده از الیاف با افزایش نسبت ظاهری الیاف، افزایش یافته است. این پارامتر به نرخ بارگذاری حساس بوده و حساسیت آن با افزایش نسبت ظاهری الیاف تشدید می‌گردد.

سری P 92 با ۵/۵۹ درصد در بالاترین نرخ بارگذاری لرزه‌ای، بیشترین ظرفیت استفاده شده را نشان دادند. با وجود مقاومت کششی متفاوت سه الیاف H92، H70 و H50 ($2700 < 2480$ MPa)، در هر سه نرخ بارگذاری الیاف H 92 بیشترین ظرفیت استفاده شده را داشت. جهت بررسی دقیق‌تر تاثیر نسبت ظاهری الیاف بر این پارامتر، بیشینه تنش کششی ایجاد شده در تمام الیاف‌ها بر مقاومت بیشینه الیاف H 50 (2360 MPa) تقسیم شده است. به منظور بررسی تاثیر تغییرات نسبت ظاهری، مقایسه ظرفیت استفاده شده سه الیاف بر پایه مقاومت الیاف H 50 در شکل ۸.۴ (ب) نمایش داده شده است. با توجه به وابستگی ظرفیت استفاده شده الیاف (σ_{max}/f) به بیشینه تنش کششی الیاف، حساسیت این پارامتر به نرخ بارگذاری در تصویر



(ب)



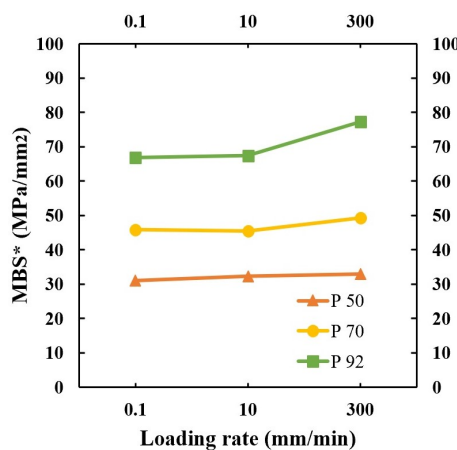
(الف)

شکل ۸.۴: (الف): ظرفیت استفاده شده از مقاومت کششی هر الیاف (ب): درصد استفاده شده از ظرفیت مقاومت کششی الیاف بر پایه‌ی مقاومت کششی الیاف H 50

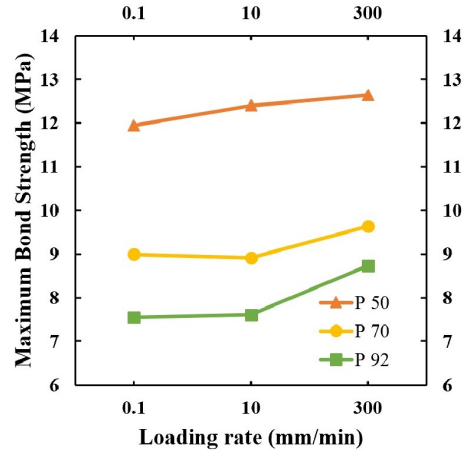
۷.۴ (ج) نمایش داده شده است.

۳.۲.۴ تاثیرات بر مقاومت پیوند بیشینه

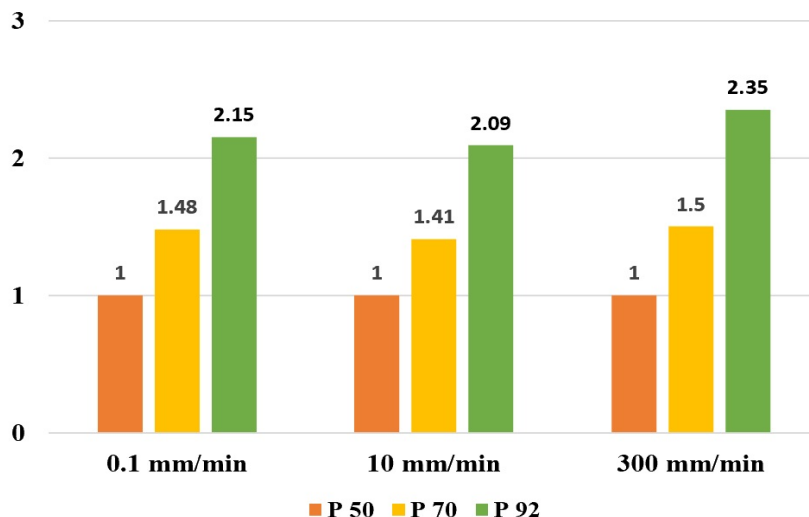
از آن جا که مقاومت پیوند بیشینه براساس بیشینه نیروی بیرون کشیدگی محاسبه می شود، مقاومت در برابر بیرون کشیدگی الیاف با هندسه های مختلف بر اساس این پارامتر ارزیابی می گردد. از طرفی با توجه به وقوع بیشینه نیروی بیرون کشیدگی در لغزش های مختلف، مقاومت پیوند بیشینه انجام مقایسه و تجزیه و تحلیل بین سری های مختلف را تسهیل می کند. اساس محاسبه این پارامتر بیشینه نیروی بیرون کشیدگی و عمق مدفون الیاف می باشد. مقادیر مقاومت پیوند بیشینه و ضرایب افزایش دینامیکی مربوط به آن در جدول ۷.۴ آمده است. شکل ۹.۴ تاثیر نرخ بارگذاری بر مقاومت پیوند بیشینه سری های با هر سه نسبت ظاهری نشان می دهد. در هر سه نرخ بارگذاری الیاف H 50 رفتار قوی تر در سطح پیوند داشتند. با توجه به تاثیر بالای مهار مکانیکی الیاف های تغییر شکل یافته بر مقاومت پیوند بیشینه و همچنین هندسه (محیط و مساحت) مقطع سه الیاف مطابق تصویر ۴.۳ مقاومت سطح پیوند بیشینه در



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۹.۴: تاثیر افزایش نسبت ظاهری و نرخ بارگذاری بر (الف): مقاومت پیوند بیشینه (ب):

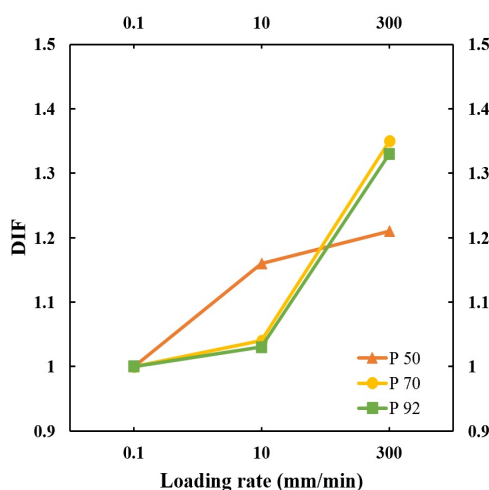
مقاومت پیوند بیشینه ویژه (ج): مقاومت پیوند بیشینه ویژه بر پایه الیاف H 50

تناسب با سطح مقطع بیشتر الیاف در مفاصل پلاستیک خمشی، افزایش می‌یابد [۲۶]. ارزیابی رفتار بیرون کشیدگی هر الیاف با توجه به سطح مقطع (عامل تعیین کننده در وزن الیاف)، در کنار مساحت بیرونی الیاف به جهت ارزیابی و مقایسه بین چند الیاف ضروری است. چنین ارزیابی به انتخاب یک الیاف با رفتار بهینه و اقتصادی کمک خواهد کرد. با تعریف مقاومت پیوند بیشینه به ازای واحد سطح الیاف (MBS^*) حاصل از تقسیم مقاومت پیوند بیشینه بر سطح مقطع الیاف می‌توان مقاومت پیوند بیشینه به ازای واحد سطح را محاسبه نمود. به کمک

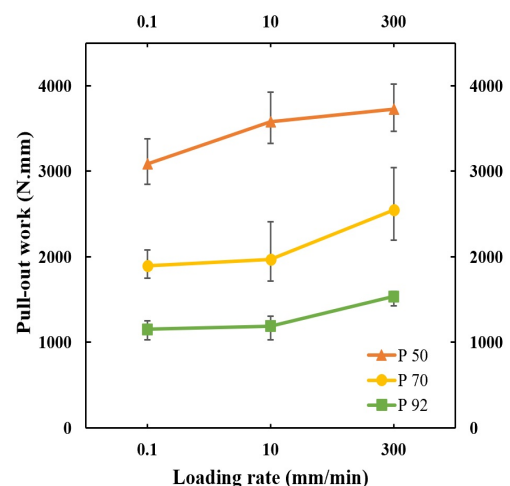
این پارامتر عملکرد بهینه و اقتصادی سری‌های P 92 در هر سه نرخ بارگذاری در تصویر ۹.۴ (ب) مشهود است. با توجه به تصویر ۹.۴ (ج) نسبت مقاومت پیوند بیشینه ویژه سری‌های P 92 و P 70 به نسبت مقاومت پیوند بیشینه ویژه سری P 50 به ترتیب ۲/۳۵ و ۱/۵۰ در بالاترین نرخ بارگذاری لرزه‌ای و ۲/۱۵ و ۱/۴۸ در نرخ بارگذاری استاتیکی می‌باشد، که نمایانگر تاثیر بسیار نسبت ظاهری الیاف بر این پارامتر است. از آنجا که مقاومت پیوند بیشینه (و ویژه) با تنش کششی بیشینه متناسب است، حساسیت به نرخ بارگذاری یکسان این پارامترها نیز در شکل ۷.۴ (ج) به تصویر کشیده شده است.

۴.۲.۴ تاثیرات بر کار (انرژی) بیرون کشیدگی

کار بیرون کشیدگی از محاسبه مساحت هندسی زیر نمودار نیرو - لغزش به دست می‌آید. مقدار کار بیرون کشیدگی برای هر سری الیاف در سه نرخ بارگذاری آزمایش شده در جدول ۳.۴ و همچنین تصویر ۱۰.۴ آورده شده است. انرژی بیرون کشیدگی بالاتر برای الیاف H 50



(ب)



(الف)

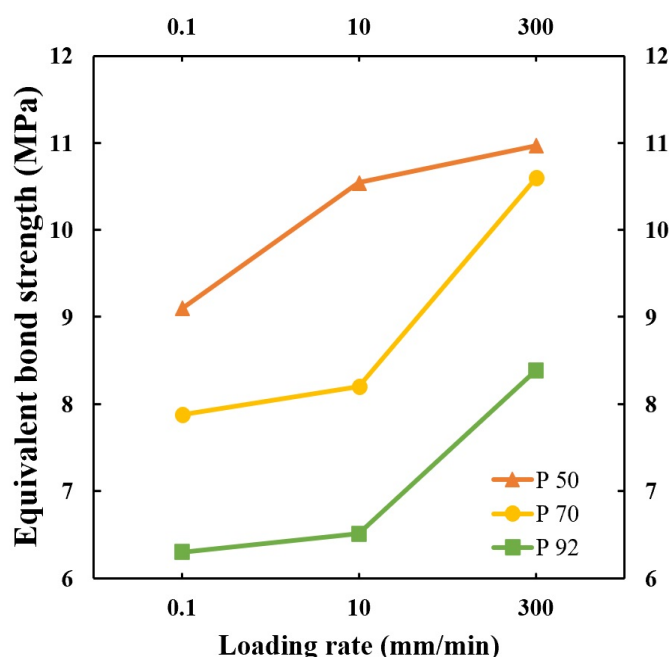
شکل ۱۰.۴: اثر افزایش نرخ بارگذاری و نسبت ظاهری بر کار انجام شده الیاف در آزمایش بیرون کشیدگی (الف): کار بیرون کشیدگی کامل الیاف (ب): ضریب افزایش دینامیکی

در پی نیروی بیرون کشیدگی بیشتر این الیاف حاصل شده است. با مشاهده نتایج جدول ۳.۴ می‌توان به تاثیر بیشتر نرخ بارگذاری بر انرژی بیرون کشیدگی در مقایسه با بیشینه نیروی

بیرون کشیدگی پی برد [۱۳، ۲۶ و ۲۸]. اثر اینرسی تشکیل میکرو ترک (ریز ترک) به طور بالقوه پیوند ماتریس – الیاف را نه تنها در شروع بیرون کشیدگی الیاف، بلکه در حین بیرون کشیدن نیز افزایش می دهد. این امر حساسیت به نرخ بارگذاری انرژی بیرون کشیدگی را تشدید می نماید. سری P 50 با کار بیرون کشیدگی برابر ۳۰۸۸ نیوتن میلی متر ($10^{-3} J$) در نرخ بارگذاری استاتیکی و ۳۷۲۳ نیوتن میلی متر در نرخ بارگذاری لرزه ای بیشترین کار انجام شده (انرژی تلف شده) و با ضریب افزایش دینامیکی برابر ۱/۲۱ در نرخ لرزه ای کمترین حساسیت به نرخ بارگذاری را نشان دادند. سری P 70 با ضریب افزایش دینامیکی ۱/۳۵ در نرخ بارگذاری لرزه ای بیشترین حساسیت به نرخ بارگذاری را داشت.

۵.۲.۴ تاثیرات بر مقاومت پیوند معادل

مقاومت پیوند معادل همانند مقاومت پیوند بیشینه یک پارامتر در جهت ارزیابی رفتار پیوند الیاف – ماتریس است که بر اساس کار انجام شده و عمق مدفون الیاف محاسبه می گردد [۳۵]. رفتار پیوند سری های آزمایش شده و پاسخ آنها به نرخ بارگذاری در جدول ۳.۴ و شکل ۱۱.۴ آورده شده است. مقاومت پیوند سری P 50 به ترتیب ۱۵ و ۴۴ درصد از سرهای P و P 70

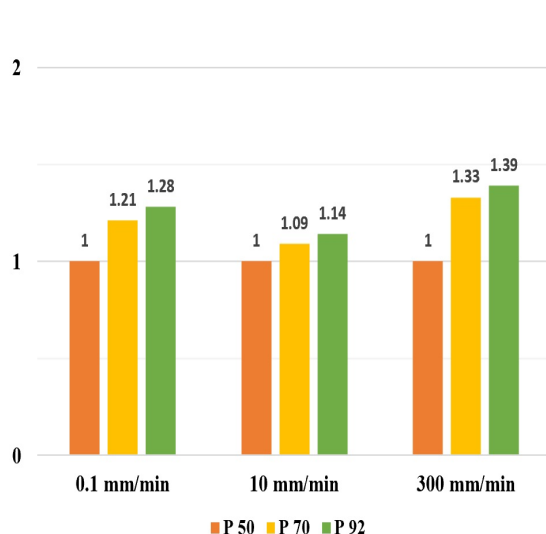


شکل ۱۱.۴: مقاومت پیوند معادل

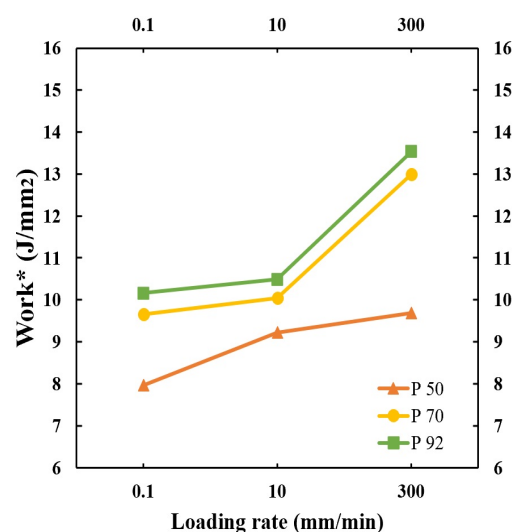
۹۲ در نرخ بارگذاری استاتیکی بیشتر است. این مقادیر با افزایش نرخ بارگذاری (در محدوده‌ی لرزه‌ای) به ۳ و ۳۰ درصد کاهش پیدا کردند. با توجه به نسبت مقاومت پیوند معادل و کار بیرون کشیدگی حساسیت به نرخ بارگذاری این پارامتر مطابق شکل ۱۰.۴ (ب) می‌باشد.

۶.۲.۴ تاثیرات بر کار ویژه

با توجه به چگالی یکسان الیاف‌های استفاده شده، کار ویژه می‌تواند منعکس کننده انرژی ویژه یا کار انجام شده به ازای واحد جرم ($\frac{J}{kg}$) باشد. مطابق تصویر ۱۲.۴ و جدول ۳.۴ می‌توان عملکرد بالاتر سری‌های با نسبت ظاهری بیشتر، با در نظر گرفتن سطح مقطع الیاف در کار بیرون کشیدگی الیاف را مشاهده کرد. با هدف ارزیابی تاثیر نسبت ظاهری، عملکرد سه الیاف



(ب)



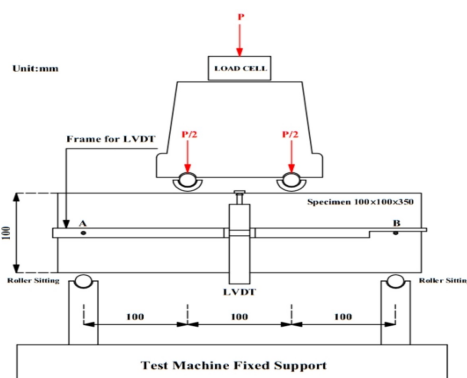
(الف)

شکل ۱۲.۴: اثر نرخ بارگذاری و نسبت ظاهری الیاف بر (الف): انرژی بیرون کشیدگی (ب): ضریب بزرگنمایی دینامیکی

بر پایه سری P 50، در تصویر ۱۲.۴ (ب) مقایسه شده است. کار ویژه سری (P 92) ۱/۲۸ و ۱/۳۹ برابر سری پایه در نرخ بارگذاری استاتیکی و لرزه‌ای می‌باشد.

۳.۴ ارزیابی رفتار خمشی

مقصود اصلی انجام آزمایشات بیرون کشیدگی الیاف، گمانه‌زنی در مورد رفتار کششی و یا خمشی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف است. از این رو تاثیر نرخ بارگذاری بر رفتار تیرهای خمشی مسلح به ۱% (حجمی) الیاف قلابدار با نسبت ظاهری $\frac{l}{d} = 92$ مورد آزمایش قرار گرفت. در شکل ۱۳.۴ هندسه چیدمان آزمایش و نمونه‌های آزمایش آورده شده است. نمونه‌ها، تیرهای با ابعاد $350 \times 100 \times 100$ مطابق استاندارد ASTM C 1609/C 1609M تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. پیش از آزمایش تیرها ۹۰ درجه نسبت به سطح قالب گیری به منظور کاهش اثرات قالب گیری چرخانده می‌شوند. مطابق تصویر ۱۷.۳ در نمونه‌های تحت نرخ بارگذاری شبه‌استاتیکی (B 92-0.1) از LVDT نیز در قاب پشتی علاوه بر برداشت تصاویر به وسیله دوربین در قاب جلویی (به عنوان معیار اندازه‌گیری در تمام سری‌ها) استفاده شده است. بارگذاری به



(ب)

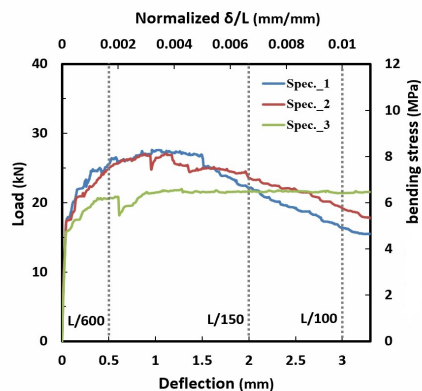


(الف)

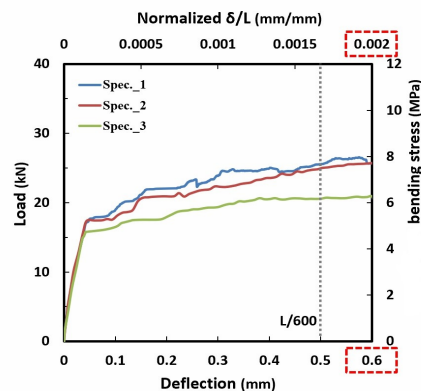
شکل ۱۳.۴: آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای (الف): نمای روبرویی (ب): نمای پشتی

وسیله ماشین آزمایش تست خمشی سری Zwick با ظرفیت ۱۵۰ کیلونیوتن به صورت کنترل – تغییر مکان انجام گرفت.

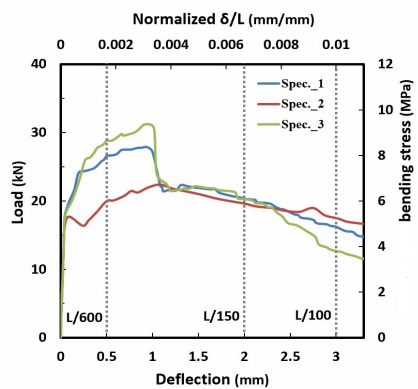
منحنی های نیرو – تغییر مکان رفتار خمشی تیرهای تحت آزمایش با سه نرخ بارگذاری در تصویر ۱۴.۴ نمایش داده شده است. پارامترهای مورد ارزیابی مطابق با استاندارد ASTM C1609 در جدول خلاصه شده است. ارزیابی طاق را تا نقاط معادل $1/600$ و $1/150$ توصیه می‌کند. با این وجود این دو نقطه به طور کلی رفتار مصالح پایه سیمانی را با



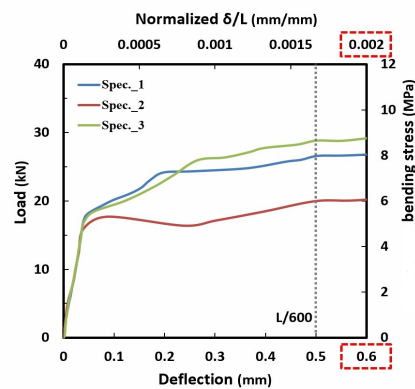
(ب) $V=0.1$ mm/min



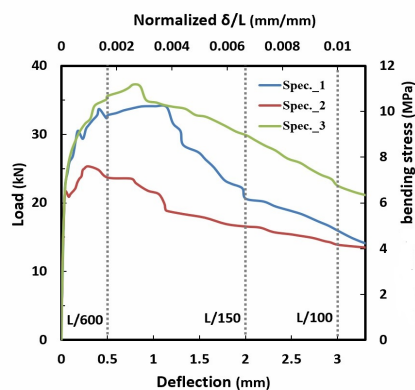
(الف) بزرگنمایی رفتار اولیه



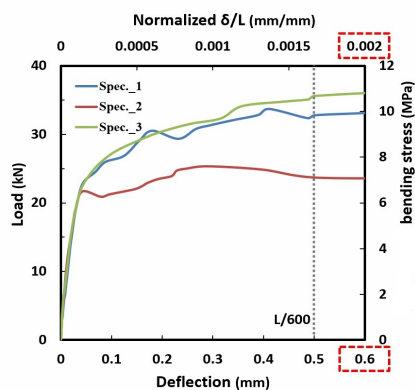
(د) $V=10$ mm/min



(ج) بزرگنمایی رفتار اولیه



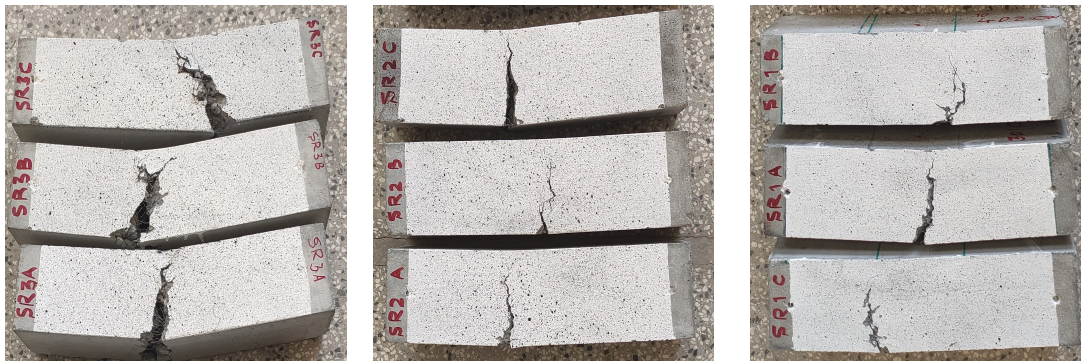
(و) $V=300$ mm/min



(ه) بزرگنمایی رفتار اولیه

شکل ۱۴.۴: منحنی نیرو- تغییر مکان رفتار ابتدایی (راست) و کلی (چپ) تیرهای خمشی تغییرات

بارگذاری



شکل ۱۵.۴: نمونه‌های خمشی پس از آزمایش

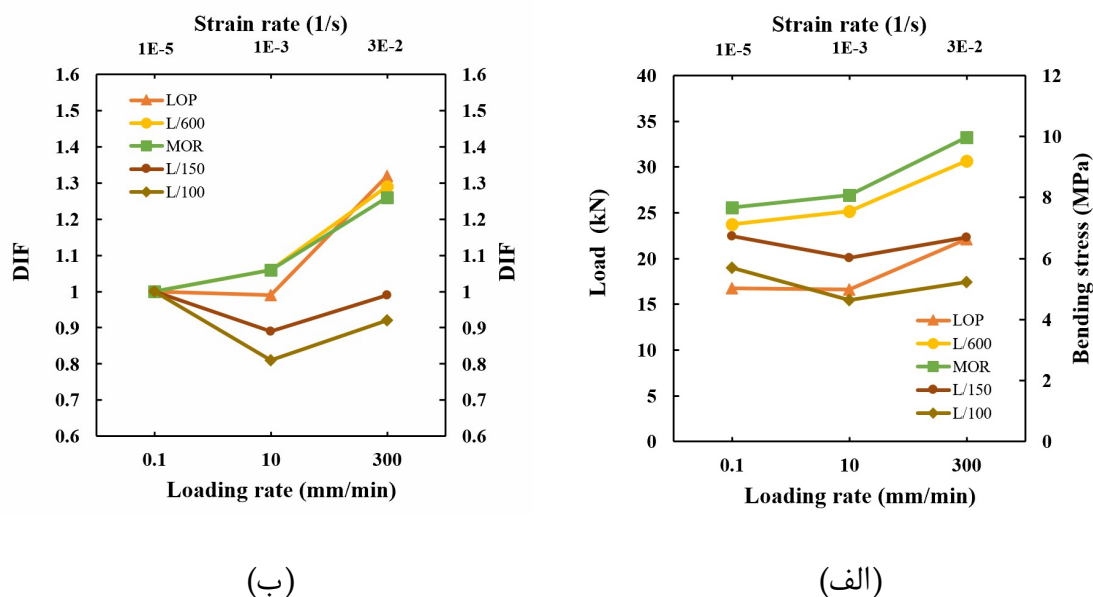
توجه به تفاوت عملکرد انواع الیاف بیان نمی‌کنند. از این رو در این تحقیق نیز به جهت ارزیابی رفتار نرم‌شدگی تیرهای خمشی نتایج تا تغییر مکان معادل $1/100$ طول دهانه ادامه یافت [۳۵]. در جدول ۴.۴ خلاصه نتایج آزمون تیرهای خمشی برای سه سری با تغییرات نرخ کرنش آورده شده است. تصاویر نمونه‌ها بعد از آزمایش در شکل ۱۵.۴ نمایش داده شده است. در تمام نمونه‌ها رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی با افزایش ظرفیت باربری پس از ایجاد اولین ترک بروز داد. همساز با تحقیق پیشین و مطابق نتایج، افزایش مقاومت خمشی با افزایش نرخ کرنش به روشنی نمایان است [۲۳].

۱.۳.۴ تاثیر نرخ کرنش بر تنش خمشی

مقاومت خمشی در نرخ کرنش‌های $\dot{\epsilon} = 3 \times 10^{-2}$ ، $\dot{\epsilon} = 10^{-3}$ و $\dot{\epsilon} = 10^{-5}$ به ترتیب برابر $32/238$ ، $26/983$ و $25/564$ می‌باشد. در شکل ۱۶.۴ تغییرات تنش خمشی در نقاط مورد ارزیابی استاندارد ASTM C1609 با افزایش نرخ کرنش نمایش داده شده است. نکته‌ی قابل تامل در شکل ۱۶.۴ کاهش حساسیت ظرفیت باربری خمشی به نرخ کرنش با افزایش تغییر مکان وسط دهانه است. به گونه‌ای که ضریب افزایش دینامیکی (DIF) در نرخ کرنش $\dot{\epsilon} = 3 \times 10^{-2}$ از $1/32$ در تغییر مکان معادل اولین ترک خوردگی (LOP) به $99/0$ در تغییر مکان معادل نقطه $1/150$ طول دهانه (۲ میلی‌متر)، کاهش می‌یابد. در ادامه با افزایش تغییر مکان تا نقطه $1/100$ طول دهانه (۳ میلی‌متر)، ضریب افزایش دینامیکی با ادامه‌ی روند نزولی به $92/0$ تقلیل یافت.

جدول ۴.۴: خلاصه نتایج آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

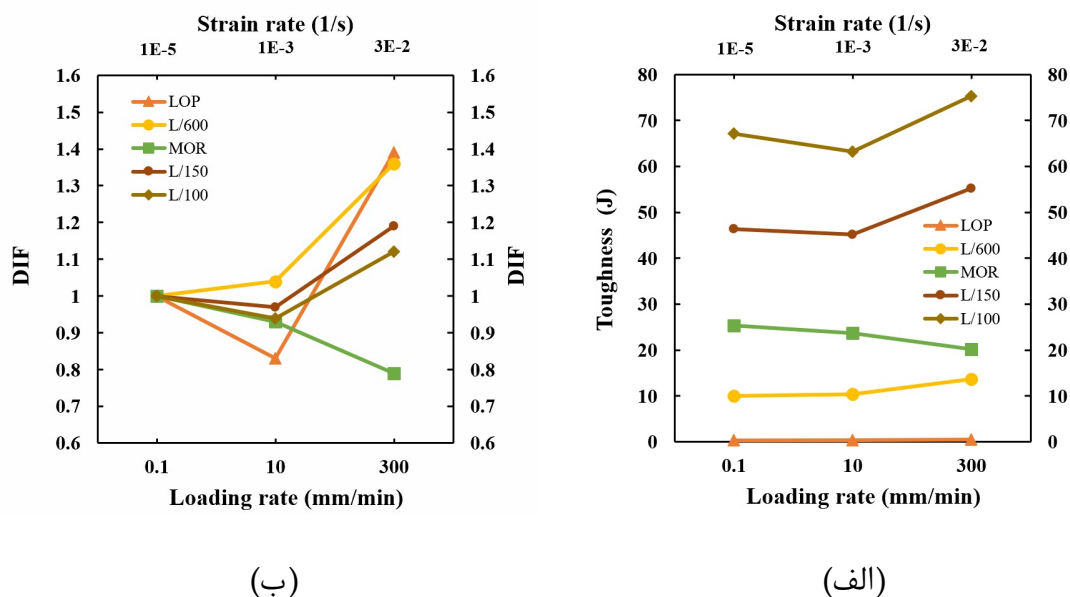
Unit		B 92-0.1		B 92-10		B 92-300	
		0.1 $\frac{mm}{min}$	DIF	10 $\frac{mm}{min}$	DIF	300 $\frac{mm}{min}$	DIF
LOP	$P \quad KN$	16.728	1.00	16.650	0.99	22.138	1.32
	$f \quad MPa$	5.02	1.00	4.99	0.99	6.64	1.32
	$\delta \quad mm$	0.043	1.00	0.041	0.95	0.042	0.98
	$T \quad J$	0.421	1.00	0.350	0.83	0.587	1.39
$d_{0.5}$	$P \quad KN$	23.735	1.00	25.161	1.06	30.684	1.29
	$f \quad MPa$	7.12	1.00	7.55	1.06	9.21	1.29
	$\delta \quad mm$	0.500	1.00	0.500	—	0.500	—
	$T \quad J$	10.067	1.00	10.450	1.04	13.656	1.36
MOR	$P \quad KN$	25.564	1.00	26..983	1.06	32.238	1.26
	$f \quad MPa$	7.67	1.00	8.09	1.06	9.67	1.26
	$\delta \quad mm$	1.136	1.00	1.026	0.88	0.669	0.59
	$T \quad J$	25.400	1.00	23.710	0/93	20.168	0.79
d_2	$P \quad KN$	22.471	1.00	20.076	0.89	22.332	0.99
	$f \quad MPa$	6.74	1.00	6.02	0.89	6.70	0.99
	$\delta \quad mm$	2.000	1.00	2.000	—	2.000	—
	$T \quad J$	46.395	1.00	45.188	0.97	55.289	1.19
d_3	$P \quad KN$	18.996	1.00	15.460	0.81	17.429	0.92
	$f \quad MPa$	5.70	1.00	4.64	0.81	5.23	0.92
	$\delta \quad mm$	3.000	1.00	3.000	—	3.000	—
	$T \quad J$	67.205	1.00	63.214	0.94	75.307	1.12



شکل ۱۶.۴: (الف): ظرفیت باربری خمشی در نقاط مورد ارزیابی ASTM C1609 (ب): حساسیت ظرفیت باربری خمشی به نرخ بارگذاری

۲.۳.۴ تاثیر نرخ کرنش بر طاقت

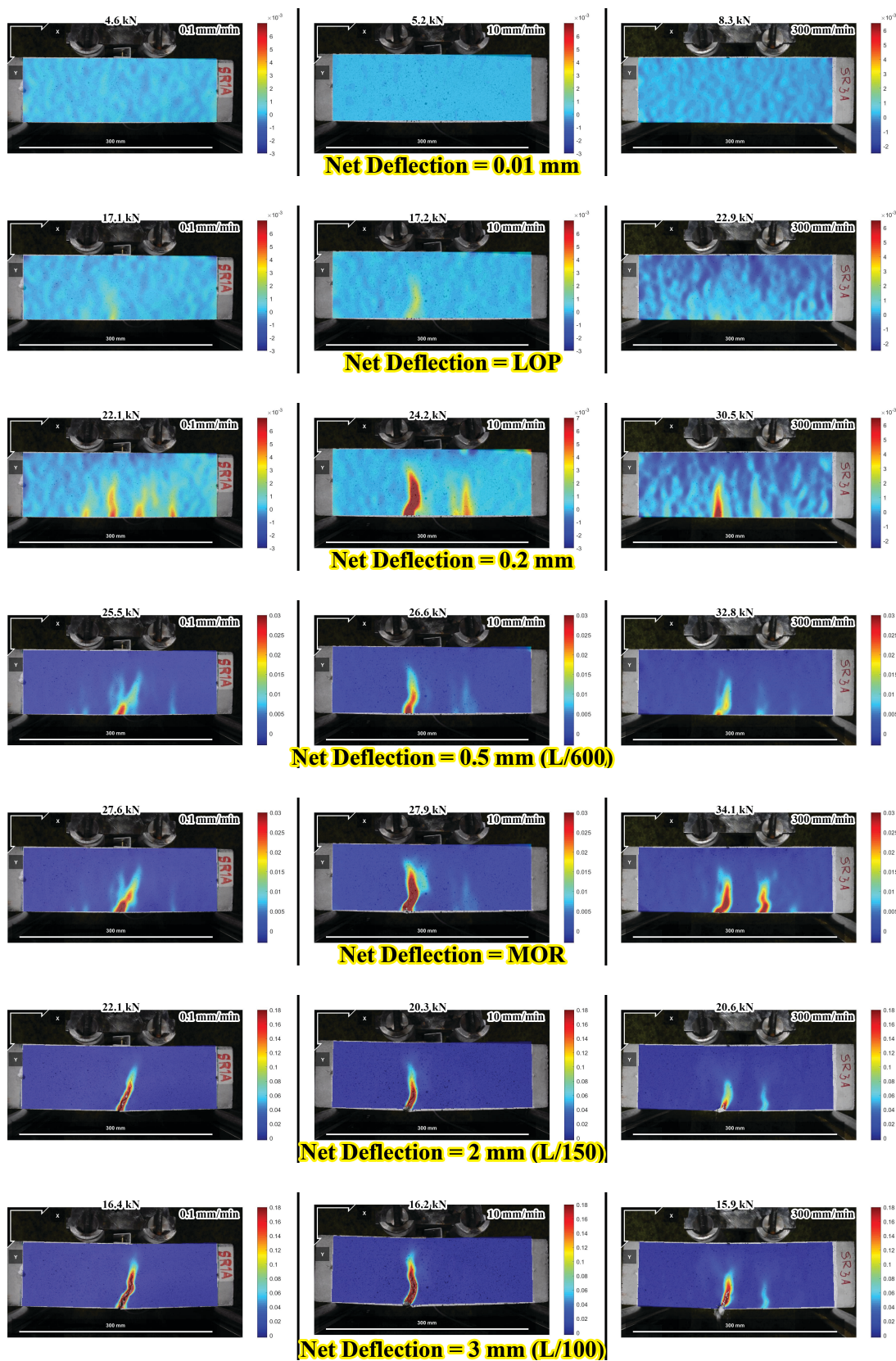
در شکل ۱۷.۴ تغییرات طاقت در تمامی نقاط مورد ارزیابی ASTM C1609 نشان داده شده است. حساسیت طاقت (سطح زیر منحنی نیرو - تغییر مکان) نیز در روند مشابه با تغییرات تنش خمشی، با افزایش تغییر مکان وسط دهانه کاهش می‌یابد. تنها اختلاف حساسیت طاقت به نسبت تنش خمشی مربوط به نقطه معادل بیشینه نیرو (MOR) است. دلیل این امر به تغییر مکان معادل نقطه بیشینه نیرو با افزایش نرخ کرنش باز می‌گردد. تغییر مکان بیشینه نیروی تحمل شده برای نمونه تحت نرخ کرنش $\dot{\epsilon} = 10^{-5}$ و $\dot{\epsilon} = 3 \times 10^{-2}$ به ترتیب برابر ۱/۱۳۶ و ۰/۶۶۹ میلی‌متر می‌باشد. مطابق تصویر ۱۷.۴ و جدول ۴.۴ انرژی اتلاف شده (طاقت) در قیاس تنش خمشی حساسیت بیشتری به نرخ بارگذاری دارد. این حساسیت بیشتر در بیرون کشیدگی الیاف نیز نمایان است.



شکل ۱۷.۴: (الف): تغییرات طاق با افزایش نرخ بارگذاری (ب): حساسیت طاق به نرخ بارگذاری

۳.۳.۴ ارزیابی میدان کرنش

از تکنیک همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC) برای مشاهده شکل گیری و انتشار ترک ها و توزیع کرنش در کل نمونه استفاده شد. شکل ۱۸.۴ توزیع کرنش دو بعدی در سطح نمونه خمشی تحت بارگذاری چهار نقطه ای در وسط دهانه را در ابتدای بارگذاری، ایجاد اولین ترک معادل گسیختگی ماتریس و در ادامه شروع ترک خوردگی متعدد در قسمت تحتانی تحت کشش را نشان می دهد. مقایسه توزیع کرنش در سطح نمونه های خمشی با افزایش نرخ کرنش نشان می دهد که با افزایش نرخ کرنش، شروع باز شدگی ترک در میدان کرنش بر ایجاد ریز ترک متعدد تقدم می یابد. با توجه به شکل ۱۸.۴ مشاهده می شود که در تغییر مکان یکسان (۲/۰ میلی متر)، در حالی که نمونه تحت نرخ کرنش استاتیکی تعدد ترک خوردگی را تجربه می کند، باز شدگی ترک در نمونه تحت بیشترین نرخ کرنش شروع شده است. به عبارت دیگر با افزایش نرخ کرنش فاصله تغییر مکانی بین ایجاد ریز ترک های متعدد و باز شدگی ترک کاهش یافته است. با افزایش تغییر مکان میانه دهانه تا بیشینه نیروی وارده این روند ادامه می یابد. با مشاهده کلی توزیع کرنش در تمامی نمونه ها، می توان تمایل به ایجاد ریز ترک های کمتر و تعدد باز شدگی بیشتر ترک با افزایش نرخ کرنش در نمونه ها را یافت. به این ترتیب نمونه های



شکل ۱۸.۴: تغییرات توزیع ترک با تغییرات نرخ کرنش

تحت بارگذاری با نرخ کرنش کمتر در ابتدای آزمایش ریزترک‌های بیشتر دارند و با پیشروی در طول آزمایش بازشدگی برای کمترین نسبت (در حدود یک ریزترک) از این ترک‌ها رخ می‌دهد. از دیگر سو در نمونه‌های تحت بارگذاری با نرخ کرنش بالاتر، ریزترک کمتری مشاهده شده و نسبت بیشتری از این ریزترک‌ها (دو یا سه ریزترک) بازشدگی ترک را تجربه می‌کنند.

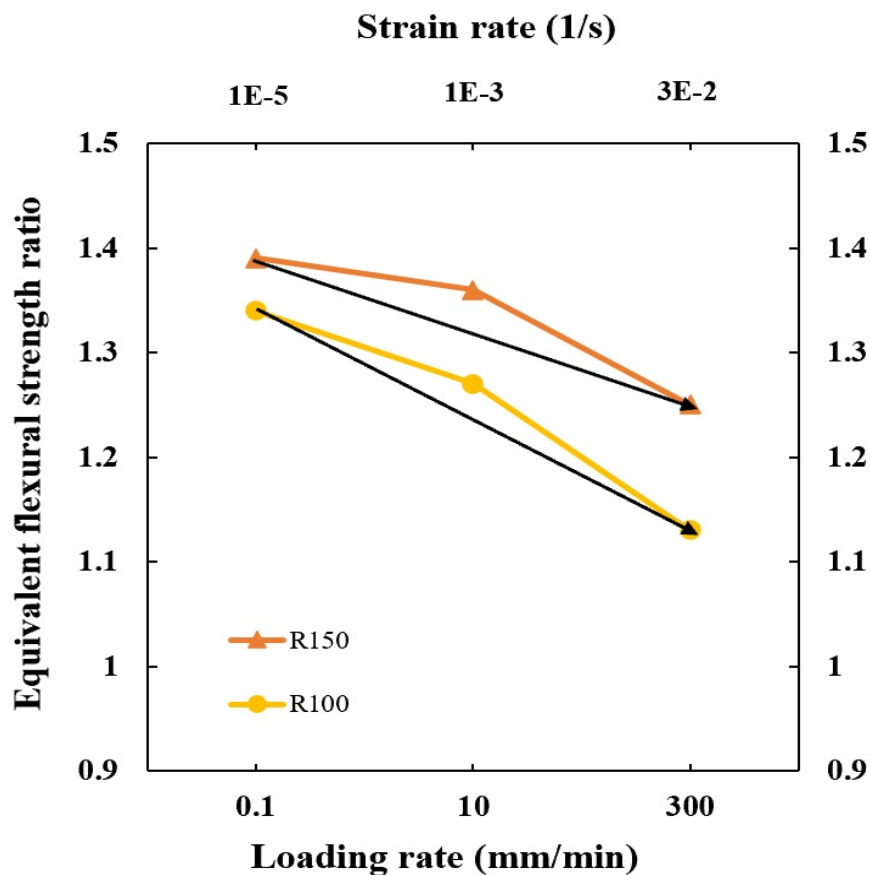
۴.۳.۴ نسبت مقاومت خمشی معادل

با استفاده از مقاومت خمشی معادل در نقاط 1/100 طول دهانه و 1/150 طول دهانه ($f_{e,xxx}^D$)، نسبت مقاومت خمشی معادل ($R_{T,xxx}^D$) از رابطه ۱۳.۳ محاسبه و در جدول ۵.۴ ارائه شده است.

جدول ۵.۴: نسب مقاومت خمشی معادل

	B 92-0.1	B 92-10	B 92-300
f_{LOP}	5.02	4.99	6.64
$f_{e,150}^D$	6.96	6.78	8.29
$f_{e,100}^D$	6.72	6.32	7.53
$R_{T,150}^D$	1.39	1.36	1.25
$R_{T,100}^D$	1.34	1.27	1.13

در شکل ۱۹.۴ تغییرات نسبت مقاومت خمشی معادل تغییر مکان‌های ۱/۱۵۰ و ۱/۱۰۰ طول دهانه با افزایش نرخ کرنش نشان داده شده است. کاهش نسبت مقاومت خمشی معادل و همچنین حساسیت مقاومت خمشی با افزایش تغییر مکان، به روشنی کاهش شکل‌پذیری بتن مسلح به الیاف با افزایش نرخ بارگذاری را مشخص می‌نماید.



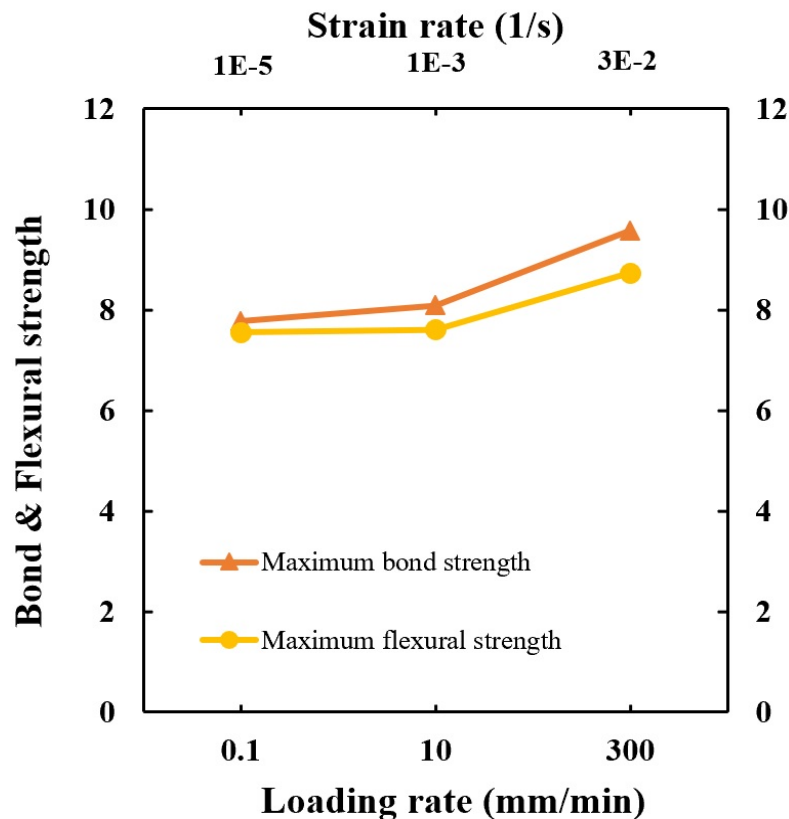
شکل ۱۹.۴: تغییرات نسبت مقاومت خمشی معادل با افزایش نرخ کرنش

۴.۴ ارتباط بیرون کشیدگی الیاف منفرد و رفتار خمشی با افزایش نرخ بارگذاری

در تصویر ۲۰.۴ مقاومت پیوند بیشنه بیرون کشیدگی الیاف و مقاومت خمشی ماتریس مقایسه شده است. در این تصویر تغییرات هم سو و متناسب با ضریب افزایش دینامیکی، نشانگر ارتباط محسوس بین رفتار سطح پیوند و مقاومت خمشی و همچنین تاثیر مستقیم ضریب افزایش دینامیکی DIF بر بیشینه مقاومت خمشی است.

براساس فرضیه کامپوزیت^۱ و با مشخص بودن مقاومت خمشی ماتریس، تنش پیوند (تنش برشی) در سطح مشترک الیاف و درصد حجمی الیاف استفاده شده، تنش خمشی اولین ترک

^۱ Composite theory



شکل ۲۰.۴: مقایسه مقاومت پیوند بیشینه و بیشینه مقاومت خمشی

در یک تیر تحت بارگذاری خمشی را می‌توان از رابطه ۱.۴ پیش‌بینی کرد [۳ و ۳۷].

$$\sigma_{cc}^f = \sigma_{fm}(1 - V_f) + \alpha \cdot \tau \cdot V_f \frac{l}{d} \quad (1.4)$$

در این رابطه:

- σ_{cc}^f : تنش خمشی معادل ایجاد اولین ترک در مقطع
- σ_{fm} : تنش خمشی ماتریس
- τ : مقاومت پیوند بیشینه الیاف (از آزمایش بیرون کشیدگی)
- α : پارامتری متشکل از حاصل ضرب چندین عامل، Naaman سهم توزیع پیوند بین ماتریس و الیاف در شکل‌گیری ترک، تأثیرات جهت‌گیری الیاف در ماتریس ترک نخورده و در ادامه تحقیقاتش کاهش مقاومت پیوند در اثر اعمال بار خارجی معمول یا شعاعی به سطح مشترک الیاف و ماتریس را سه مضرب این پارامتر می‌داند.

از طرفی رابطه ۲.۴ برای محاسبه درصد حجمی الیاف جهت دستیابی به رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی ارایه شده است [۳].

$$V_f \geq (V_f)_{\text{cri-tention}} = \frac{\frac{1}{k}}{\frac{1}{k} + \frac{\tau}{\sigma_{fm}} \frac{l}{d} (\lambda - \frac{1}{k} \alpha)} \quad (2.4)$$

$$\lambda k \tau V_f \frac{l}{d} \geq \sigma_{fm} (1 - V_f) + \alpha \tau V_f \frac{l}{d} \quad (3.4)$$

بر این اساس، رابطه ۳.۴ را می‌توان برای مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی ارایه کرد. با مقایسه روابط ۳.۴ و ۱.۴، بیشینه مقاومت پس از ترک خوردگی تحت بارگذاری خمشی از رابطه ۴.۴ پیش‌بینی می‌گردد.

$$\sigma_{pc}^f = \lambda k \tau V_f \frac{l}{d} \quad (4.4)$$

در رابطه بالا:

- σ_{pc}^f بیشینه مقاومت پس از ترک خوردگی (MOR)
- k ضریب بزرگتر از یک و بیان‌کننده نسبت رفتار خمشی به رفتار تحت کشش مستقیم است. این ضریب در پاسخ به رفتار کشش مستقیم برابر یک در نظر گرفته می‌شود.
- λ حاصل ضرایب متعددی است که در ذیل به آن پرداخته شده است.

Naaman مقدار متوسط یا قابل فرض از نسبت الیاف‌های کوتاه‌تر (نسبت به نصف عمق مدفون) در محل شکل‌گیری ترک، تاثیر جهت‌گیری الیاف بر مقاومت پیوند بین الیاف و ماتریس در فضای سه بعدی، اثر بیرون کشیدگی گروهی الیاف و تاثیر ناچیز مقاومت پیوند بیرون کشیدگی الیاف‌هایی با زاویه تمایل بیش از ۶۰ درجه را عوامل تعیین‌کننده بر مقدار λ در نظر گرفته است [۳]. با توجه به مطالعات پیشین $k = 2/5$ و $\lambda = 0/4$ در نظر گرفته شده است [۳، ۳۷ و ۳۸]. با توجه به نتایج آزمایشات بیرون کشیدگی الیاف در این پژوهش، مقاومت سطح پیوند الیاف و ماتریس به نرخ بارگذاری حساس است. از این رو ضریب افزایش دینامیکی با تغییر نرخ بارگذاری نیز به عنوان یک عامل تاثیرگذار بر رفتار سطح پیوند در رابطه ۴.۴ مشارکت داده

شده است. مقاومت پیوند بیشینه برای الیاف با نسبت ظاهری ۹۲ برابر ۷/۵۵ مگاپاسکال و ضریب افزایش دینامیکی در سه سرعت بیرون کشیدگی به ترتیب برابر ۱، ۱/۰۱ و ۱/۱۶ می باشد. از رابطه ۵.۴ برای پیش بینی بیشینه مقاومت خمشی با تغییرات در نرخ بارگذاری استفاده شده است.

$$\sigma_{pc}^f = DIF_{\tau} \cdot \lambda \cdot k \cdot \tau_{Max} \cdot V_f \frac{l}{d} \quad (5.4)$$

جدول ۶.۴ مقادیر پیش بینی شده و نتایج آزمایشگاهی برای تیرهای تحت بارگذاری خمشی با تغییرات نرخ کرنش نشان می دهد.

جدول ۶.۴: نتایج پیش بینی شده و آزمایشگاهی برای یک درصد حجمی الیاف قلابدار

Method	B 92-0.1	B 92-10	B 92-300
Predicted value (MPa)	6.95	7.02	8.06
Experimental value (MPa)	7.67	8.09	9.67
Predicted /experimental	0.91	0.87	0.83

فصل ۵

نتیجه گیری و پیشنهادات

۱.۵ نتیجه گیری

با توجه به اهداف تعیین شده در فصل اول برای این پژوهش، نتایج در سه دسته کلی به شرح زیر ارائه می گردد:

۱. ارزیابی رفتار بیرون کشیدگی الیاف با تغییرات سرعت بارگذاری و نسبت ظاهری الیاف
۲. ارزیابی تاثیر نرخ کرنش بر رفتار خمشی تیرهای مسلح به یک درصد حجمی الیاف مطابق استاندارد ASTM C1609
۳. بررسی رابطه بین بیرون کشیدگی تک الیاف و رفتار خمشی

در ادامه خلاصه نتایج این پژوهش ذکر می شود.

۱.۱.۵ نتایج رفتار بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس پایه سیمانی

جهت ارزیابی رفتار بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس با طراحی یک چیدمان جدید، سه نوع الیاف فولادی قلابدار با نسبت ظاهری ۵۰، ۷۰ و ۹۲ تحت بارگذاری با سرعت ۱/۰، ۱۰ و ۳۰۰ میلی متر بر دقیقه، متناظر با نرخ کرنش در محدوده استاتیکی تا لرزه ای قرار گرفتند. با تعریف و محاسبه پارامترهای توصیف کننده رفتار منحنی های نیرو - لغزش در محدوده آزمایشات بیرون کشیدگی انجام شده در این پژوهش، نتایج به شرح زیر حاصل شد:

- حداکثر تنش کششی الیاف با نسبت ظاهری ۹۲ به ترتیب ۱۱ و ۱۶ درصد از الیاف های با نسبت ظاهری ۷۰ و ۵۰ بیشتر می باشد. این مقادیر برای بیشترین سرعت بارگذاری به ۲۱ و ۲۷ درصد افزایش می یابد. به عبارتی حداکثر تنش کششی ایجاد شده در الیاف با سرعت بارگذاری و نسبت ظاهری الیاف رابطه مستقیم دارد.
- میزان استفاده شده از ظرفیت کششی الیاف با افزایش نسبت ظاهری افزایش می یابد. این پارامتر نیز به نرخ بارگذاری حساس است و حساسیت آن با افزایش نسبت ظاهری الیاف تشدید می گردد.

- الیاف با نسبت ظاهری ۵۰ بیشترین مقاومت پیوند بیشینه را دارد. ولیکن با مقایسه مقدار مقاومت پیوند بیشینه در ازای واحد سطح (MBS^*) برای هر الیاف، عملکرد مناسب الیاف با نسبت ظاهری بیشتر مشهود است. تا جایی که مقاومت پیوند بیشینه به ازای واحد سطح برای الیاف H 92، ۲/۱۵ برابر الیاف H 50 در نرخ بارگذاری استاتیکی و ۲/۳۵ برابر در نرخ بارگذاری لرزه‌ای می‌باشد.
- مقدار کار به ازای واحد سطح (کار ویژه)، الیاف H 92، ۱/۲۸ و ۱/۳۹ برابر الیاف H 50 در نرخ بارگذاری استاتیکی و لرزه‌ای می‌باشد. ضمن این که عملکرد الیاف H70 و H92 برای پارامتر کار ویژه نزدیک است.
- حساسیت کار انجام شده الیاف H70 و H92 به افزایش نرخ بارگذاری تقریباً یکسان است.
- برای تمامی پارامترهای مورد ارزیابی، دو الیاف با نسبت ظاهری بالاتر به مقدار ناچیز به نرخ بارگذاری میانه حساسیت نشان دادند. حساسیت الیاف با کمترین نسبت ظاهری تحت نرخ بارگذاری میانه، تقریباً متعادل است.

۲.۱.۵ نتایج ارزیابی تاثیر نرخ کرنش بر رفتار خمشی مصالح پایه

سیمانی

جهت ارزیابی تاثیر نرخ کرنش بر رفتار خمشی، سه سری تیر مسلح به یک درصد الیاف فولادی قلابدار با نسبت ظاهری ۹۲ مطابق استاندارد ASTM C1609 تحت بارگذاری با سرعت‌های ۱/۰، ۱۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، متناظر با نرخ کرنش استاتیکی تا لرزه‌ای قرار گرفت. از تکنیک همبستگی تصاویر دیجیتال نیز برای اندازه‌گیری تغییر مکان نقطه وسط دهانه و همچنین ارزیابی میدان کرنش استفاده شد. نتایج آزمایشات به شرح زیر می‌باشد:

- با افزایش نرخ کرنش از $\dot{\epsilon} = 1E - 5$ به $\dot{\epsilon} = 3E - 2$ (برابر مقاومت خمشی معادل اولین ترک‌خوردگی، ظرفیت باربری خمشی، طاقت ارزیابی شده تا تغییر مکان معادل ۱/۱۵۰ طول دهانه و طاقت ارزیابی شده تا تغییر مکان معادل ۱/۱۰۰ طول دهانه به ترتیب ۳۲، ۲۶، ۱۹ و ۱۲ درصد افزایش یافتند.

- در حالت کلی با افزایش تغییرمکان نقطه وسط دهانه، حساسیت مقاومت خمشی به نرخ بارگذاری کاهش می‌یابد. تا آن‌جا که ضریب افزایش دینامیکی نرخ کرنش $\dot{\epsilon} = 3E - 2$ از مقدار $1/32$ برای مقاومت معادل اولین ترک‌خوردگی به $92/0$ برای مقاومت معادل تغییرمکان $1/100$ طول دهانه کاهش یافت. به تبع این کاهش مقاومت، با افزایش تغییرمکان نقطه وسط دهانه، حساسیت طاقت به نرخ بارگذاری نیز کاهش می‌یابد. ضریب افزایش دینامیکی برای ارزیابی نرخ کرنش $\dot{\epsilon} = 3E - 2$ از مقدار $1/39$ برای تغییرمکان معادل اولین ترک‌خوردگی به $1/12$ در تغییرمکان $1/100$ طول دهانه کاهش یافت.
- ارزیابی میدان کرنش از روش همبستگی تصاویر دیجیتال با افزایش نرخ بارگذاری، تمایل به شکل‌گیری ریزترک کمتر و افزایش تعداد بازشدگی ترک را نشان می‌دهد. از سوی دیگر با افزایش نرخ بارگذاری، بازشدگی ترک در تغییرمکان‌های کوچک‌تر و با تعداد بیشتر رخ داد.
- با افزایش تغییرمکان وسط دهانه در طول بارگذاری، حساسیت نسبت مقاومت خمشی معادل به نرخ بارگذاری کاهش یافت.

۳.۱.۵ نتایج بررسی رابطه بین بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس

سیمانی با رفتار خمشی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف

- حساسیت انرژی تلف‌شده (کار انجام‌شده) نسبت به افزایش نرخ بارگذاری برای هر دو آزمایش بیرون کشیدگی تک الیاف و مقاومت خمشی، بیشتر از حساسیت ظرفیت باربری مشاهده شد.
- ظرفیت باربری خمشی بتن‌های مسلح به الیاف تحت بارگذاری با نرخ کرنش‌های متفاوت را می‌توان با دقت مناسبی با استفاده از مقاومت پیوند بین ماتریس و الیاف و پارامترهای الیاف بر اساس نظریه کامپوزیت پیش بینی کرد.

۲.۵ پیشنهادات

با توجه به مطالعات انجام شده در این پژوهش، موضوعات زیر جهت انجام تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود:

- بررسی رفتار مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف تحت بارگذاری چرخه‌ای
- بررسی رابطه بین رفتار تحت بارگذاری خمشی و کشش مستقیم بتن‌های مسلح به الیاف با تغییرات نرخ کرنش و نسبت ابعاد
- بررسی رفتار ریزساختار ناحیه‌ی پیوند بین الیاف و ماتریس با تغییرات نرخ بارگذاری و شکل هندسی الیاف

مراجع

[۱] ضیغمی ا، (۱۳۹۴)، رساله دکتری: ” بررسی رابطه میان بیرون کشیدگی الیاف منفرد با مشخصات مکانیکی مصالح پایه سیمانی توانمند مسلح با الیاف”، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۲] جامعی م، (۱۳۹۱)، پایان نامه ارشد: ” دستیابی به مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با مقاومت کششی و شکل پذیری بالا”، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[3] Shi, Caijun and Mo, Yi-Lung (2008), "High-performance construction materials: science and applications", Vol. 1, World scientific, pp. 111–133

[4] American Society of Testing and Materials, **2016**, "Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete", **ASTM A 820/A 820M-16**.

[5] ACI 234 Committee, **2006** "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete", **ACI 234-06**.

[6] Naaman A.E. and H.W.Reinhardt, (1996), "**High performance fiber reinforced cement composites 2**", RILEM Pb. 31, E. and FN Spon, England, pp 1-23, pp 150-157.

[7] ACI 116 Committee, **2000** "Cement and Concrete Terminology", **ACI 116R-00**.

-
- [8] Naaman, Antoine E and Reinhardt, Hans Wolfgang, (2003), "**PRO 30: 4th International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC 4)**", RILEM Publications.
- [9] ACI 544 Committee, **2017** "Report on Measuring Mechanical Properties of Hardened Fiber Reinforced Concrete", **ACI 544.9R-17**.
- [10] fib Bulletin 65, "Fib model code for concrete structures 2010" Ernst Sohn, Berlin, Germany, 434 pp.
- [11] American Society of Testing and Materials, **2012**, "Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel))", **ASTM C1550-12a**.
- [12] American Society of Testing and Materials, **2012**, "Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)", **ASTM C 1609/C 1609M-12**.
- [13] Kim, Dong-Joo and Naaman, Antoine E and El-Tawil, Sherif, **2009**, "High performance fiber reinforced cement composites with innovative slip hardening twisted steel fibers" **International Journal of Concrete Structures and Materials**, vol.3, NO.2, pp119-126.
- [14] Ross, C Allen and Tedesco, JW and others, **1989**, "Split-Hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression" **Materials Journal**, vol.86, NO.5, pp475-481.
- [15] Tedesco, Joseph W and Ross, C Allen, **1993**, "Experimental and numerical analysis of high strain rate splitting-tensile tests" **Materials Journal**, vol.90, NO.2, pp162-169.

- [16] Bischoff, P H and Perry, SH, **1991**, "Compressive behaviour of concrete at high strain rates" **Materials and structures**, vol.24, NO.6, pp425-450.

- [17] Bischoff, Peter H and Perry, Simon H, **1995**, "Impact behavior of plain concrete loaded in uniaxial compression" **Journal of engineering mechanics**, vol.121, NO.6, pp685-693.

- [18] Ross, C Allen and Jerome, David M and Tedesco, Joseph W and Hughes, Mary L, **1996**, "Moisture and strain rate effects on concrete strength" **Materials Journal**, vol.93, NO.3, pp293-300.

- [19] Malvar, L Javier and Crawford, John E, **1998**, "Dynamic increase factors for concrete" **Naval Facilities Engineering Service Center Port hueneme CA**.

- [20] Naaman, Antoine E and Gopalaratnam, VS, **1983**, "Impact properties of steel fibre reinforced concrete in bending" **International journal of cement composites and lightweight concrete**, vol.5, NO.4, pp225-233.

- [21] Naaman, Antoine E and Gopalaratnam, VS, **1985**, "Compressive strength and deformation of steel fibre reinforced concrete under high rate of strain" **International journal of cement composites and lightweight concrete**, vol.7, NO.1, pp21-28.

- [22] Nammur, George G and Naaman, Antoine E, **1985**, "Strain rate effects on tensile properties of fiber reinforced concrete" **MRS Online Proceedings Library (OPL)**, vol.64.

- [23] Othman, Hesham and Marzouk, H, **2016**, "Strain rate sensitivity of fiber-reinforced cementitious composites" **ACI Mater. J**, vol.113, no.2.

-
- [24] Gokoz, Ulker N and Naaman, Antoine E, **1981**, "Effect of strain-rate on the pull-out behaviour of fibres in mortar" **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, vol.3, NO.3, pp187-202.
- [25] Abu-Lebdeh, Taher and Hamoush, Sameer and Zornig, Brian, **2010**, "Rate effect on pullout behavior of steel fibers embedded in very-high strength concrete" **American Journal of Engineering and Applied Sciences**, vol.3, NO.2.
- [26] Xu, Man and Hallinan, Bryan and Wille, Kay, **2016**, "Effect of loading rates on pullout behavior of high strength steel fibers embedded in ultra-high performance concrete" **Cement and Concrete Composites**, vol.70, pp98-109.
- [27] Tai, Yuh-Shiou and El-Tawil, Sherif and Chung, Ta-Hsiang, **2016**, "Performance of deformed steel fibers embedded in ultra-high performance concrete subjected to various pullout rates" **Cement and Concrete Research**, vol.89, pp 1-13.
- [28] Cao, YYY and Yu, QL and Brouwers, HJH and Chen, Wei, **2019**, "Predicting the rate effects on hooked-end fiber pullout performance from Ultra-High Performance Concrete (UHPC)" **Cement and Concrete Research**, vol.120, pp164-175.
- [29] American Society of Testing and Materials, **2009**, "Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures", **ASTM C 1240 – 05**.
- [30] American Society of Testing and Materials, **2016**, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", **ASTM C 39/C 39M-16b**.
- [31] American Society of Testing and Materials, **2014**, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression", **ASTM C 469/C 469M-14**.

- [32] Land, Peter L, **1979**, "Strain rates for three-and four-point flexure tests" **JMatS**, vol.14, NO.11, pp2760-2761.
- [33] Farhang, Seyyed Hamed and Rezaifar, Omid and Sharbatdar, Mohammad Kazem and Ahmadyfard, Alireza, **2021**, "Rapid Estimation Method for Vertical Deflection Measurement of Building Components Based on Image Processing Techniques" **Journal of Performance of Constructed Facilities**, vol.35, NO.1, pp04020137.
- [34] Blaber, J and Adair, B and Antoniou, A, **2015**, "Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software" **Experimental Mechanics**, vol.55, NO.6, pp1105-1122.
- [35] joo Kim, Dong.,(2009), PhD thesis, "Strain rate effect on high performance fiber reinforced cementitious composites using slip hardening high strength deformed steel fibers", University of Michigan,
- [36] Wille, Kay and Naaman, Antoine E, **2012**, "Pullout Behavior of High-Strength Steel Fibers Embedded in Ultra-High-Performance Concrete" **ACI Materials Journal**, vol.109, no.4.
- [37] Wu, Zemei and Khayat, Kamal Henri and Shi, Caijun, **2018**, "How do fiber shape and matrix composition affect fiber pullout behavior and flexural properties of UHPC?" **Cement and Concrete Composites**, vol.90, pp193-201.
- [38] Han, Baoguo and Dong, Sufen and Ou, Jinping and Zhang, Chenyu and Wang, Yanlei and Yu, Xun and Ding, Siqi, **2016**, "Microstructure related mechanical behaviors of short-cut super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete" **Materials & Design**, vol.96, pp16-26.

پیوست آ

میانگین گیری نمودار

جهت میانگین گیری از هر سری آزمایش شده بیرون کشیدگی (هر سری شش نمونه) و خمشی (هر سری سه نمونه) از نرم افزار Origin pro 2019 استفاده شده است. روند انجام کار به شرح زیر است:

۱. دسته بندی نمونه های هر سری در قالب داده های خروجی ماشین و ابزار دقیق (لودسل، دیتالاگر و همبستگی تصاویر دیجیتال)

۲. فراخوانی داده ها در نرم افزار و ترسیم نمودار میانگین از مسیر Analysis-Mathematics-

Average Multiple Curves

۳. تنظیم مقیاس میانگین بروی کل دامنه و تابع درونیاب به صورت خطی

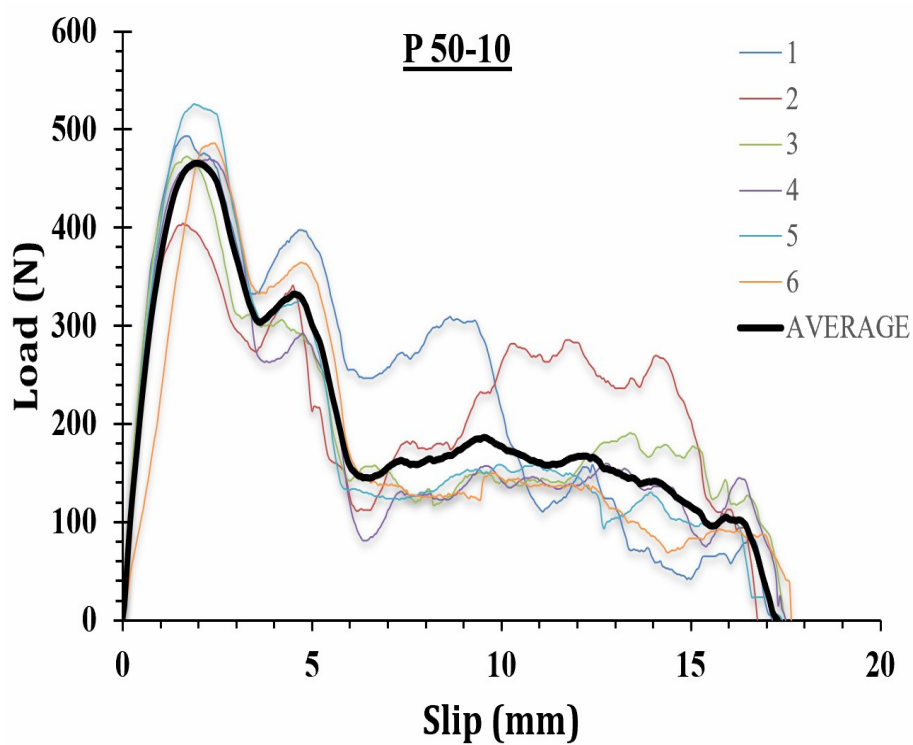
در ادامه نتایج ۵۴ نمونه آزمایش شده و نمودار میانگین متوسط بدست آمده برای هر سری (شامل شش نمونه) با استفاده از این روش را نشان داده شده است. بیشینه نیرو، میزان

جابجایی در نقطه بیشینه و سطح زیر نمودار میانگین تطابق با مقادیر میانگین حاصل از داده‌های خروجی دستگاه (استفاده شده در این تحقیق) مطابق است.

با وجود دقت بسیار در ساخت و انجام آزمایش بیرون کشیدگی، پراکندی در نتایج مشاهده می‌شود.

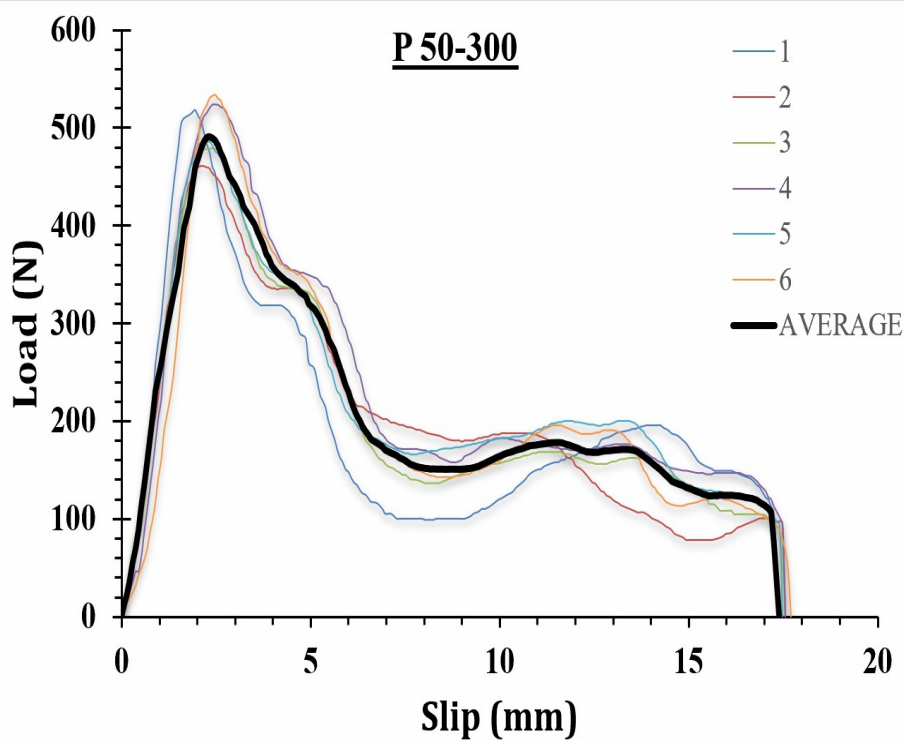
جدول ۱.۰: نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 50-10

Notation	Peak Load	Peak Slip	Peak Work	Total Work
	N	mm	N.mm	N.mm
P 50-10 (1)	494.2	1.6	537	3921
P 50-10 (2)	404.0	1.5	421	3892
P 50-10 (3)	473.0	1.7	556	3563
P 50-10 (4)	469.7	2.2	772	3344
P 50-10 (5)	526.1	1.9	656	3421
P 50-10 (6)	485.6	2.3	626	3325
CV(%)	8	19	18	7
Average	477.1	1.9	595	3578



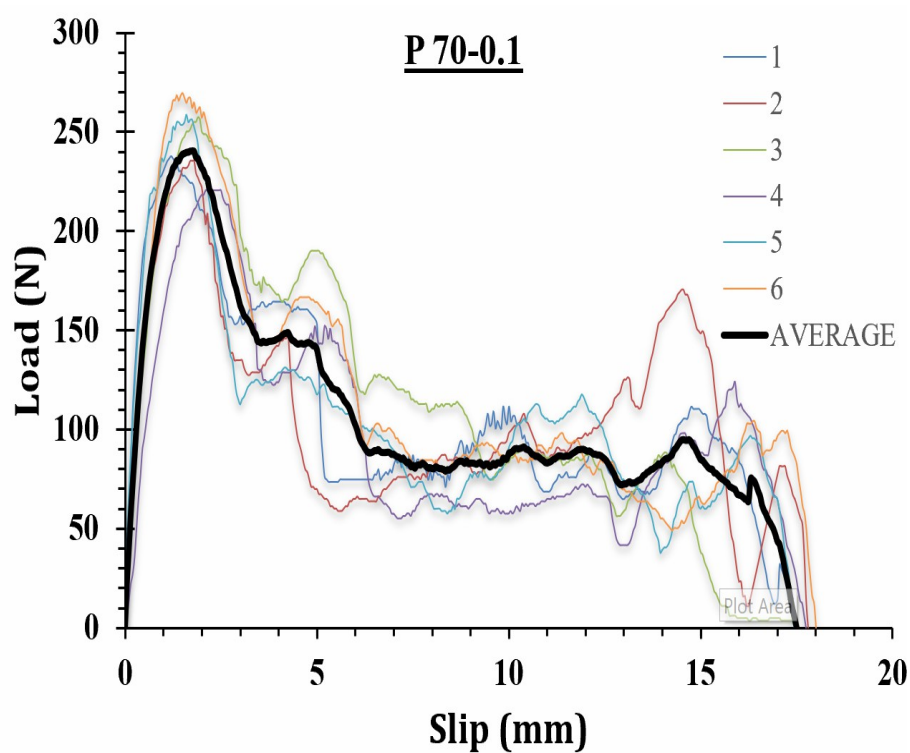
جدول آ.۲: نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 50-300

Notation	Peak Load	Peak Slip	Peak Work	Total Work
	N	mm	N.mm	N.mm
P 50-300 (1)	494.1	1.9	553	3464
P 50-300 (2)	461.2	2	622	3638
P 50-300 (3)	480.0	2.3	649	3636
P 50-300 (4)	523.5	2.5	741	4017
P 50-300 (5)	487.3	2.2	584	3872
P 50-300 (6)	472.1	2.4	603	3714
CV(%)	4	10	10	5
Average	486.4	2.2	625	3723



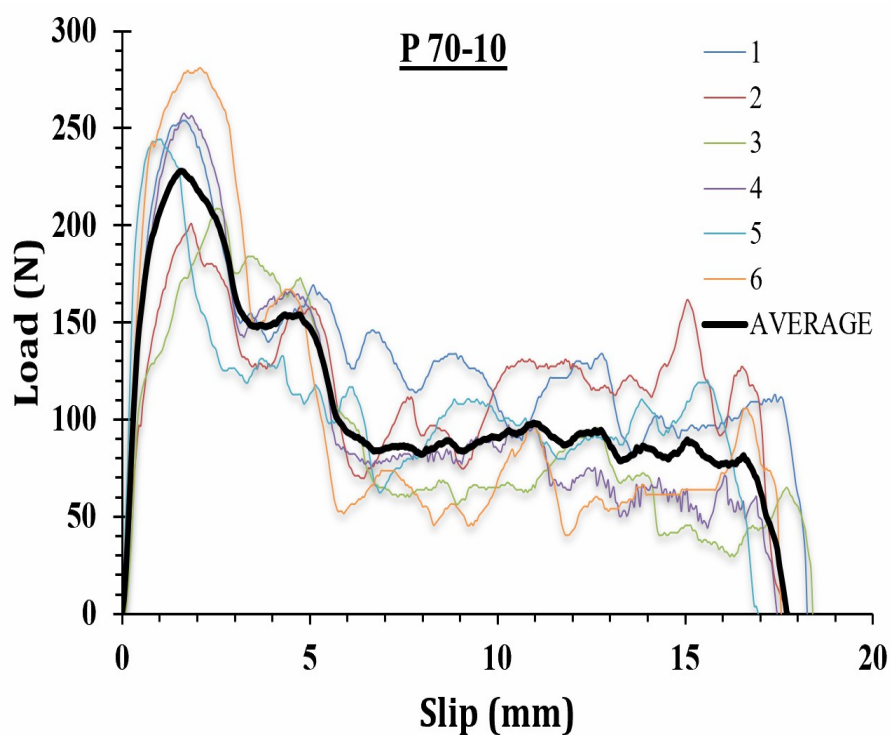
جدول ۳.آ: نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 70-0.1

Notation	Peak Load	Peak Slip	Peak Work	Total Work
	N	mm	N.mm	N.mm
P 70-0.1 (1)	237.9	1.2	215	1874
P 70-0.1 (2)	235.4	1.7	287	1819
P 70-0.1 (3)	257.5	1.8	331	1978
P 70-0.1 (4)	220.7	1.9	272	1746
P 70-0.1 (5)	260.1	1.6	315	1871
P 70-0.1 (6)	272.2	1.5	281	2080
CV(%)	7	14	13	6
Average	247.3	1.6	284	1895



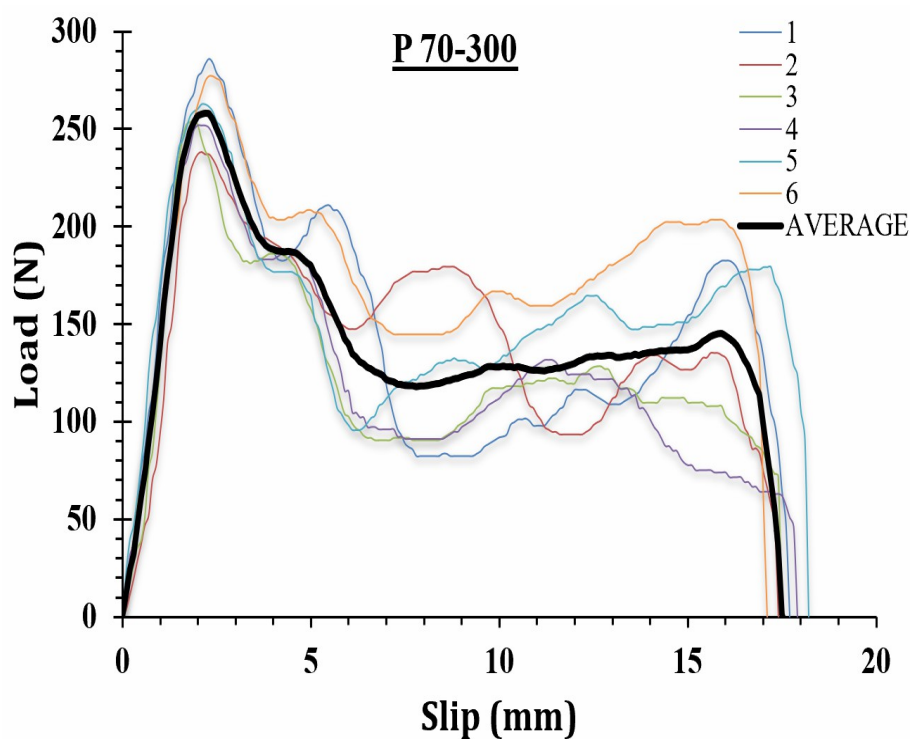
جدول ۴.آ: نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 70-10

Notation	Peak Load	Peak Slip	Peak Work	Total Work
	N	mm	N.mm	N.mm
P 70-10 (1)	253.8	1.7	279	2408
P 70-10 (2)	202.0	1.8	246	2112
P 70-10 (3)	233.0	1.4	373	1718
P 70-10 (4)	255.1	1.9	351	1833
P 70-10 (5)	244.0	1.1	196	1897
P 70-10 (6)	280.8	2.1	435	1860
CV(%)	10	20	26	12
Average	244.8	1.7	313	1971



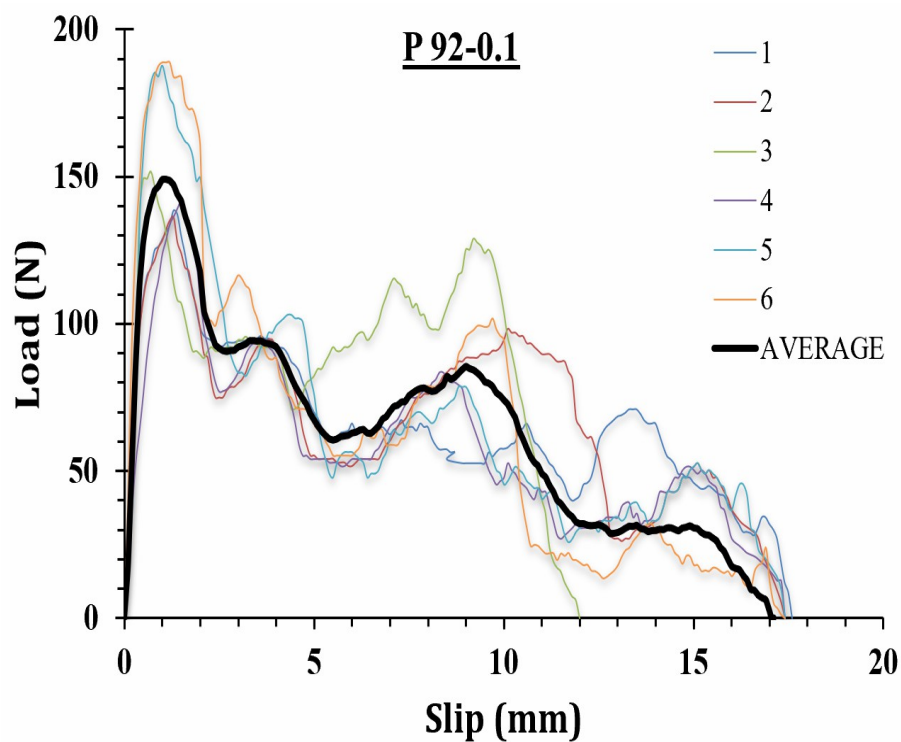
جدول ۵.آ: نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 70-300

Notation	Peak Load	Peak Slip	Peak Work	Total Work
	N	mm	N.mm	N.mm
P 70-300 (1)	286.1	2.3	397	2579
P 70-300 (2)	238.1	2.1	255	2487
P 70-300 (3)	254.8	1.9	264	2196
P 70-300 (4)	251.7	2	316	2194
P 70-300 (5)	262.0	2.1	356	2794
P 70-300 (6)	277.2	2.3	377	3045
CV(%)	6	7	16	12
Average	261.5	2.1	327	2549



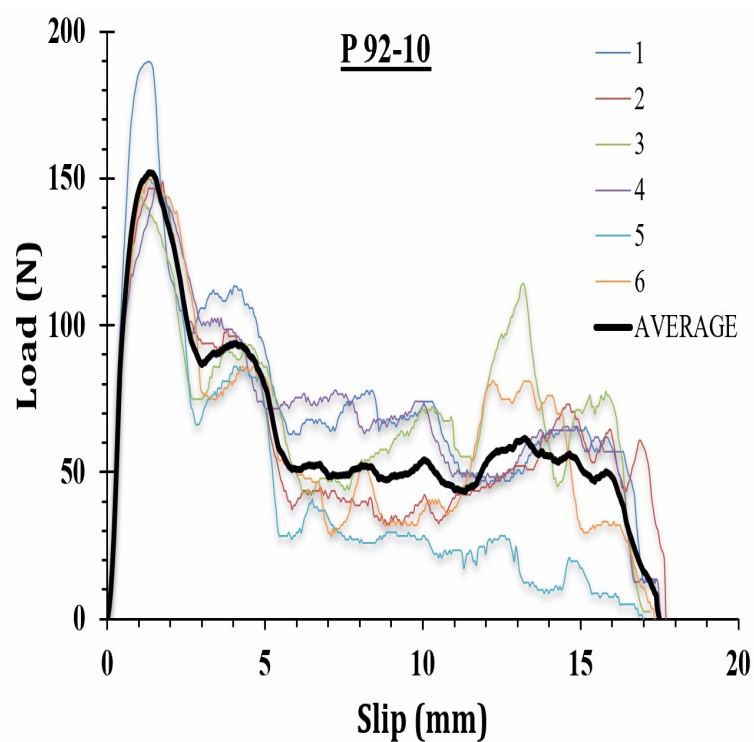
جدول آ.۶: نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 92-0.1

Notation	Peak Load	Peak Slip	Peak Work	Total Work
	N	mm	N.mm	N.mm
P 92-0.1 (1)	138.6	1.3	132	1172
P 92-0.1 (2)	137.0	1.2	124	1187
P 92-300 (3)*	151.6	0.8	72	1096
P 92-01 (4)	141.5	1.4	124	1031
P 92-0.1 (5)	188.8	1.0	138	1177
P 92-0.1 (6)	188.9	1.1	151	1251
CV(%)	14	17	20	6
Average	157.7	1.1	124	1152



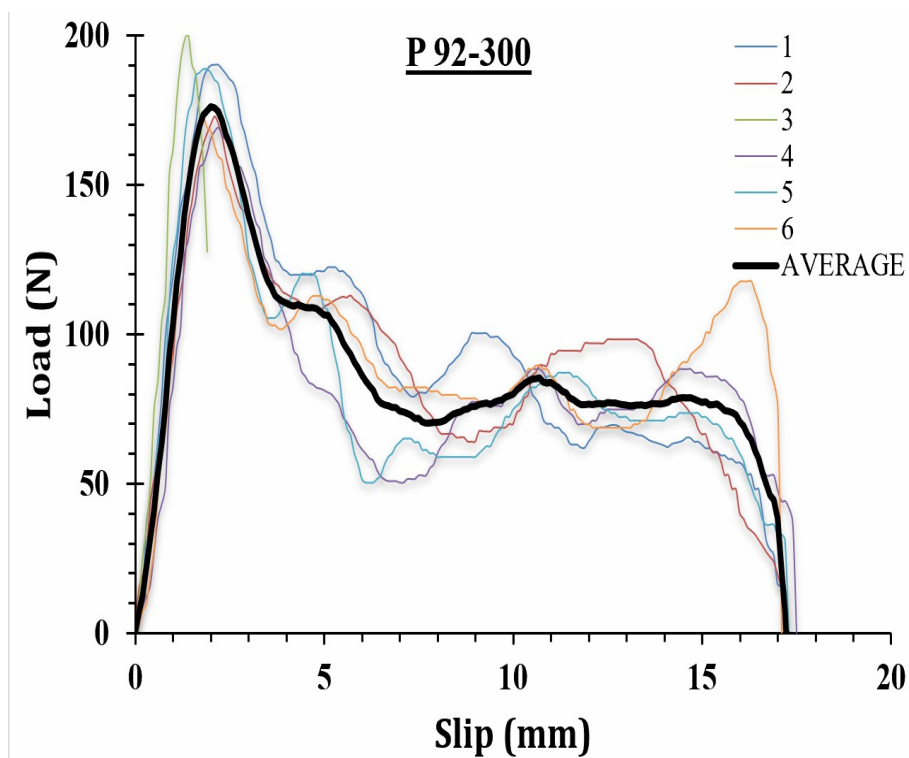
جدول ۷.آ: نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 92-10

Notation	Peak Load	Peak Slip	Peak Work	Total Work
	N	mm	N.mm	N.mm
P 92-10 (1)	168.1	1.4	135	1188
P 92-10 (2)	148.9	1.7	189	1111
P 92-10 (3)	144.6	1.1	100	1245
P 92-10 (4)	147.6	1.5	155	1262
P 92-10 (5)	194.6	0.9	107	1302
P 92-10 (6)	149.6	1.2	118	1030
CV(%)	11	21	23	8
Average	158.9	1.3	134	1190



جدول ۸.آ: نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف سری P 92-300

Notation	Peak Load	Peak Slip	Peak Work	Total Work
	N	mm	N.mm	N.mm
P 92-300 (1)	172.8	2	183	1536
P 92-300 (2)	199.9	1.5	143	<i>Failure</i>
P 92-300 (3)	190.6	2.1	233	1594
P 92-300 (4)	169.2	2.2	199	1518
P 92-300 (5)	188.8	1.8	182	1428
P 92-300 (6)	172.5	1.8	157	1596
CV(%)	6	12	16	4
Average	182.3	1.9	184	1534



جدول ۹.۰: خلاصه نتایج آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای با نرخ کرنش $1/s \times 10^{-5}$

		Unit	B 92-0.1 a	B 92-0.1 b	B 92-0.1 c	Average	COV%
LOP	P	KN	16.994	17.389	15.802	16.728	0.831
	f	MPa	5.10	5.28	4.74	5.04	0.27
	δ	mm	0.042	0.044	0.042	0.043	0.001
	T	$KN.mm$	0.411	0.458	0.394	0.421	0.033
$d_{0.5}$	P	KN	25.544	25.050	20.610	23.735	2.717
	f	MPa	7.66	7.52	6.18	7.12	0.82
	δ	mm	0.500	0.500	0.500	0.500	—
	T	$KN.mm$	10.744	10.396	9.062	10.067	0.888
MOR	P	KN	27.612	27.086	21.994	25.564	3.103
	f	MPa	8.28	8.13	6.60	7.67	0.93
	δ	mm	1.012	1.114	1.281	1.136	0.136
	T	$KN.mm$	24.419	26.413	25.365	25.390	0.995
d_2	P	KN	22.134	23.547	21.725	22.471	0.995
	f	MPa	6.64	7.06	6.52	6.74	0.29
	δ	mm	2.000	2.000	2.000	2.000	—
	T	$KN.mm$	49.627	48.647	40.910	46.395	4.775
d_3	P	KN	16.366	19.191	27.432	18.996	2.073
	f	MPa	4.91	5.76	6.43	5.70	0.62
	δ	mm	3.000	3.000	3.000	3.000	—
	T	$KN.mm$	68.830	70.252	62.533	67.205	3.354

جدول آ.۱۰: خلاصه نتایج آزمایش خمشی چهانقطه‌ای با نرخ کرنش 1/s 1E-3

	Unit	B 92-10 a	B 92-10 b	B 92-10 c	Average	COV%
LOP	P KN	17.214	15.731	17.010	16.650	0.801
	f MPa	5.16	4.72	5.11	4.99	0.24
	δ mm	0.041	0.039	0.042	0.041	0.002
	T KN.mm	0.349	0.336	0.365	0.350	0.011
$d_{0.5}$	P KN	26.633	19.996	28.852	25.161	4.601
	f MPa	7.99	6.00	8.66	7.55	1.38
	δ mm	0.500	0.500	0.500	0.500	—
	T KN.mm	11.278	8.441	11.620	10.450	1.751
MOR	P KN	27.903	21.811	31.236	26.983	3.902
	f MPa	8.37	6.54	9.37	8.09	1.28
	δ mm	0.939	1.221	0.918	1.026	0.138
	T KN.mm	23.206	23.883	24.041	23.710	0.362
d_2	P KN	20.322	19.623	20.076	20.076	0.321
	f MPa	6.10	5.89	6.08	6.02	0.09
	δ mm	2.000	2.000	2.000	2.000	—
	T KN.mm	46.742	40.136	48.687	45.188	3.660
d_3	P KN	16.246	17.451	12.682	15.460	2.025
	f MPa	4.87	5.24	3.81	4.64	0.61
	δ mm	3.000	3.000	3.000	3.000	—
	T KN.mm	65.049	59.058	65.536	63.214	22.946

جدول ۱۱: خلاصه نتایج آزمایش خمشی چهانقطه‌ای با نرخ کرنش 1/s 3E-2

	Unit	B 92-300 a	B 92-300 b	B 92-300 c	Average	COV%
LOP	P KN	22.933	21.638	21.842	22.138	0.696
	f MPa	6.88	6.51	6.55	6.65	0.20
	δ mm	0.044	0.042	0.039	0.042	0.003
	T KN.mm	0.618	0.608	0.535	0.587	0.046
$d_{0.5}$	P KN	32.808	35.583	23.660	30.684	6.239
	f MPa	9.84	7.10	10.68	9.21	1.87
	δ mm	0.500	0.500	0.500	0.500	—
	T KN.mm	14.493	14.923	11.52	13.656	1.835
MOR	P KN	34.132	25.307	37.274	32.238	6.204
	f MPa	10.244	7.59	11.18	9.67	1.86
	δ mm	0.936	0.29	0.782	0.669	0.337
	T KN.mm	29.076	6.277	25.151	20.168	12.189
d_2	P KN	20.626	16.519	29.851	22.332	6.828
	f MPa	6.19	4.96	8.96	6.70	2.05
	δ mm	2.000	2.000	2.000	2.000	—
	T KN.mm	58.782	41.158	65.927	55.289	12.749
d_3	P KN	15.938	13.855	22.494	17.429	4.508
	f MPa	4.78	4.16	6.75	5.23	1.35
	δ mm	3.000	3.000	3.000	3.000	—
	T KN.mm	77.479	56.445	91.996	75.307	17.875

Abstract

In recent decades, many of the weaknesses associated with concrete brittleness have improved with the development of fiber-reinforced concrete. This is due in particular to several developments involving the matrix, the fiber, the fiber-matrix interface, the composite production process, a better understanding of the basic mechanisms controlling their particular behavior, and a continually improving cost-performance ratio. Today, fiber-reinforced concrete has a high energy absorption capacity, which intensifies the interest in studying their behavior at loading rates above the static range. This study aims to investigate the effect of loading rate on the fibers-matrix interface behavior and its relationship with the bending behavior of fiber-reinforced concrete. For this purpose, the pull-out performance of three hooked fibers with different aspect ratios was evaluated by employing an innovative arrangement under various loading rates ranging from the static to the seismic level. Also, the bending performance of reinforced beams with one percent by volume of fibers according to (ASTM C1609) subjected to loading in the same strain rate range with pull-out tests. The digital image correlation (DIC) method was used to measure mid-span deflection and observe the pattern of crack propagation in the two-dimensional strain field. Experimental results reveal that tensile stress of fibers, the fiber-matrix bond strength, and the work done was increased with increasing loading rate. The bond strength per unit area for fibers with an aspect ratio of 92 is more than twice that of fibers with an aspect ratio of 50 at all loading rates. On the other hand, load capacity, toughness, and equivalent bending strength were calculated to evaluate the bending behavior with changes in loading rate. As the strain rate increases, the bending capacity 26% increases. But the strain rate sensitivity of toughness and equivalent flexural strength to changes in strain rate decreased with an increasing deflection in the middle of the span. Based on the composite theory, the fiber-reinforced concrete bending strength

under dynamic loading can be effectively predicted by using the fiber-matrix bond, the dynamic increase coefficient and, the fiber-related parameters.

Keywords: Loading rate, Fiber Reinforced Concrete (FRC), Bond strength, bending behavior, Dynamic Increase Factor (DIF)



Faculty of Civil Engineering

MSc Thesis in Structural Engineering

Effect of strain rate on mechanical properties of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite (HPFRCC)

By: Solayman Nouripour

Supervisor:
Dr.Farshid J.Alaee

October 2021