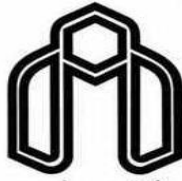


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران و معماری

پایان نامه کارشناسی ارشد

کرایش سازه

بررسی اثرات خوردگی الیاف فولادی بر مشخصات مکانیکی بتن الیافی

الهام علنیراده

استاد راهنما:

دکتر فرشید علایی

استاد مشاور:

مهندس قدس نظر علی

تابستان ۱۳۹۲



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

پرونده تحصیلی

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم الهام علیزاده رشته عمران گرایش سازه تحت عنوان: بررسی اثر خوردگی الیاف فولادی بر مشخصات مکانیکی بتن الیافی که در تاریخ ۹۲/۶/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد.

قبول (با درجه : ۴) امتیاز ۱۹/۱۳	☒ دفاع مجدد	☐ مردود
---------------------------------	---	--------------------------------

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر فرشته ملایی	دانشیار	
۲- استاد مشاور	مهندس قدس نظر علی	مربی	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استاد یار	
۴- استاد ممتحن	دکتر امیر عباس عابدینی	استاد یار	
۵- استاد ممتحن	دکتر سید مهدی حسینی	استاد یار	

رئیس دانشکده : احمد احمدی

تقدیر و پاس

پروردگار عظیم را شاکرم که به من توفیق آموختن عطا فرمود تا بدانم آنچه را که نمی دانم و قدرت بی انتهایش را بیشتر درک کنم.

از خانواده عزیزم مخصوصاً پدر بزرگوار و مادر مهربانم که به حق در تمام مراحل زندگی و تحصیل مرا یاری نموده اند، بسیار سپاسگزارم.

از زحمات بی شائبه استاد کرامتدرم جناب آقای دکتر فرید علایی که بار اصلی تدوین و نگارش پژوهش حاضر را به دوش کشیده اند و خود را دیون محبت های بی دریغشان می دانم، صمیمانه شکر و قدردانی می نمایم. همچنین از اینکه همیشه با صبر و تحمل فراوان پاسخگوی سوالات بشمارم بودند و بارهای سنگینی را بر دوش حمایت و سوزاندن کلمه سنجی های ظریف و موشکافانه، گره گشایی مشکلات اینجانب بودند، بسیار سپاسگزارم.

و به منظور به رسم ادب از جناب آقای مهندس نظرعلی و مهندس منصور جامعی که در این پایان نامه مشاور فنی بوده اند، تشکر می نمایم.

تعهد نامه

اینجانب **الهام علیزاده**، دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **عمران - سازه**، دانشکده مهندسی **عمران معماری** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان:

بررسی اثرات خوردگی اسید فولاد در برده های مس در محیط های صنعتی آب و هوا

تحت راهنمایی آقای دکتر **فرستید 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 پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه 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 کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق آسانم، رعایت شده است.

تاریخ: **۹۲/۸/۲۶**
امضاء دانشجو: 

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست اشکال.....	ذ
فهرست جداول.....	ص
چکیده.....	ط
فصل اول: مقدمه.....	۱
فصل دوم: بتن الیافی.....	۵
۱-۲- مقدمه.....	۶
۲-۲- مزایای بتن الیافی.....	۷
۳-۲- بتن مسلح به الیاف فولادی.....	۹
۱-۳-۲- خصوصیات مکانیکی SFRC.....	۱۰
۱-۱-۳-۲- فشار.....	۱۱
۲-۱-۳-۲- کشش مستقیم.....	۱۱
۳-۱-۳-۲- خمش.....	۱۱
۴-۱-۳-۲- طاقت.....	۱۱
۵-۱-۳-۲- رفتار SFRC تحت بارهای ضربه‌ای.....	۱۲

۱۲.....	۲-۳-۲- SFRC دوام
۱۲.....	۱-۲-۳-۲- خوردگی الیاف قبل از ترک خوردگی ماتریس
۱۲.....	۲-۲-۳-۲- خوردگی الیاف بعد از ترک خوردگی ماتریس
۱۳.....	۳-۲-۳-۲- انقباض و خزش
۱۳.....	۴-۲-۳-۲- یخ زدن و ذوب شدن
۱۳.....	۳-۳-۲- طراحی اعضای SFRC مسلح شده با آرماتور
۱۴.....	۴-۳-۲- کاربردهای بتن مسلح به الیاف فولادی
۱۶.....	فصل سوم: مکانیزم شکست و بررسی رفتار الیاف در بتن الیاف.
۱۷.....	۱-۳- مقدمه
۱۸.....	۲-۳- مکانیک شکست
۱۸.....	۱-۲-۳- تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM)
۲۱.....	۲-۲-۳- تئوری مکانیک شکست غیر خطی (NLFM)
۲۱.....	۱-۲-۲-۳- مدل ترک چسبنده
۲۲.....	۲-۲-۳-۳- مدل ترک نواری
۲۳.....	۳-۳- مکانیزم شکست بتن مسلح به الیاف
۲۴.....	۱-۳-۳- بررسی تاثیر الیاف روی رفتار بتن الیافی
۲۵.....	۱-۱-۳-۳- ناحیه پل زدن الیاف

- ۲۵.....۲-۱-۳-۳ دوزندگی ترک.
- ۲۷.....۳-۱-۳-۳ رفتار FRC تحت تنشهای کششی.
- ۲۹.....۴-۱-۳-۳ مقاومت کششی.
- ۲۹.....۵-۱-۳-۳ انرژی شکست.
- ۳۰.....۶-۱-۳-۳ مقاومت نظیر اولین ترک در ماتریس.
- ۳۰.....۷-۱-۳-۳ رفتار سخت شدگی کرنشی.
- ۳۱.....۲-۳-۳ تاثیر خصوصیات الیاف در مشخصات مکانیکی بتن الیافی.
- ۳۱.....۱-۲-۳-۳ نسبت حجمی الیاف (V_f).
- ۳۱.....۲-۲-۳-۳ نسبت ظاهری الیاف ($\frac{l}{d}$).
- ۳۱.....۳-۲-۳-۳ فاصله و سطح مخصوص الیاف.
- ۳۲.....۴-۲-۳-۳ شکل الیاف.
- ۳۳.....۳-۳-۳ رفتار بیرون کشیدن انواع الیاف از ماتریس بتنی.
- ۳۳.....۴-۳-۳ الیاف صاف.
- ۳۴.....۵-۳-۳ الیاف قلابدار.
- ۳۵.....۶-۳-۳ الیاف مجعد.
- ۳۵.....۷-۳-۳ الیاف پیچیده.

فصل چهارم: فرایند خوردگی و آزمایشات مربوط بر روی نمونه‌های بتن مسلح

۳۶.....	(آرماتور و الیاف فلزی)
۳۷.....	۱-۴- مقدمه
۳۸.....	۲-۴- تهدیدهای محیطی در دوام سازه‌ها
۴۱.....	۱-۲-۴- املاح موجود در آب دریاها
۴۲.....	۳-۴- اثر خوردگی بر رفتار سازه
۴۳.....	۱-۳-۴- مکانیزم‌های خوردگی فولاد در بتن
۴۵.....	۴-۴- عوامل موثر بر خوردگی فولاد در بتن
۴۵.....	۱-۴-۴- نفوذپذیری
۴۶.....	۲-۴-۴- ورود کربنات
۴۸.....	۳-۴-۴- ورود کلراید
۵۰.....	۴-۴-۴- حملات سولفاتی
۵۲.....	۵-۴- خرابی‌های ناشی از خوردگی
۵۲.....	۱-۵-۴- تاثیر خوردگی آرماتور بر ترک خوردگی پوشش بتن
۵۳.....	۲-۵-۴- تاثیر خوردگی آرماتور بر مقاومت پیوستگی بتن و فولاد
۵۶.....	۳-۵-۴- مدلسازی‌های ریاضی حاصل از بررسی اثرات ناشی از خوردگی
۶۱.....	۴-۵-۴- تحقیقات انجام شده بر روی خوردگی نمونه‌های SFRC

فصل پنجم: تشریح برنامه آزمایشگاهی..... ۶۷

- ۵-۱- مقدمه..... ۶۸
- ۵-۲- معرفی مصالح مصرفی..... ۷۰
- ۵-۲-۱- سیمان..... ۷۰
- ۵-۲-۲- فوق روان کننده..... ۷۱
- ۵-۲-۳- سنگدانه..... ۷۱
- ۵-۲-۴- الیاف فولادی..... ۷۲
- ۵-۳- معرفی آزمایشات مربوط به بتن الیافی..... ۷۴
- ۵-۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری..... ۷۶
- ۵-۳-۲- آزمایش مقاومت خمشی..... ۷۶
- ۵-۳-۳- آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی الیاف فولادی..... ۷۹
- ۵-۳-۴- محاسبه میزان چقرمگی و مقاومت اولین..... ۸۰
- ۵-۴- طرح اختلاط نمونه‌ها..... ۸۲
- ۵-۵- چگونگی عمل آوردن نمونه‌ها و قرارگیری آنها در محیط خوردگی..... ۸۶
- ۵-۵-۱- عمل آوری نمونه های گروه اول..... ۸۶
- ۵-۵-۲- عمل آوری نمونه های گروه دوم..... ۹۱
- ۵-۵-۳- عمل آوری نمونه های گروه سوم..... ۹۳

۵-۶-	نتایج بدست آمده از بارگذاری خمشی نمونه‌ها در هر سه گروه آزمایشات.....	۹۴
۵-۶-۱-	نتایج حاصل از آزمایشات دسته اول (الف).....	۹۴
۵-۶-۲-	نتایج حاصل از آزمایشات دسته اول (ب).....	۱۰۸
۵-۶-۳-	نتایج حاصل از آزمایشات دسته دوم.....	۱۱۲
۵-۷-	نتایج بدست آمده از بارگذاری فشاری نمونه‌ها در هر سه گروه آزمایشات.....	۱۱۶
۵-۸-	نتایج حاصل از آزمایش‌بیرون کشیدن الیاف تک از ماتریس بتنی.....	۱۱۹
	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....	۱۲۷
۶-۱:	نتیجه گیری.....	۱۲۸
۶-۲:	پیشنهادهات.....	۱۲۹
	مراجع.....	۱۳۱

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲): فرضیات طراحی تیرهای R/SFRC..... ۱۴
- شکل (۱-۳): ترک مرکزی در صفحه‌ای نامحدود تحت تنش σ ۱۸
- شکل (۲-۳): توزیع تنش در ناحیه FPZ..... ۲۲
- شکل (۳-۳): مدل ترک نواری (a) شکل‌گیری ریزترک‌ها در نوار ترک (b) نمودار تنش کرنش در ریز ترک‌ها..... ۲۳
- شکل (۴-۳): نواحی FPZ و FBZ در بتن‌های الیافی..... ۲۵
- شکل (۵-۳): مراحل مختلف عملکرد الیاف در ماتریس بتنی..... ۲۷
- شکل (۶-۳): منحنی شماتیک از تنش کششی در مقابل بازشدگی دهانه ترک..... ۲۸
- شکل (۷-۳): رفتار بیرون کشیدن الیاف فولادی صاف..... ۳۴
- شکل (۱-۴): دیاگرام مکانیزم تخریب سازه‌های بتنی قرارگرفته در معرض آب دریا..... ۳۹
- شکل (۲-۴): افزایش حجم ناشی از محصولات خوردگی..... ۴۴
- شکل (۳-۴): رابطه غلظت CO_2 برحسب زمان..... ۴۸
- شکل (۴-۴): رابطه غلظت Cl در اعماق مختلف در زمان مشخص..... ۴۹
- شکل (۵-۴): فراهم کردن شرایط خوردگی برای نمونه‌های Pull-out..... ۵۵
- شکل (۶-۴): تاثیر خوردگی در میزان مقاومت چسبندگی بین آرماتور و بتن..... ۵۵
- شکل (۷-۴): مدل ساده ارائه شده به منظور تخمین عمر مفید سازه‌ها..... ۵۷

- شکل (۴-۸): مراحل ایجاد ترک به دلیل انبساط ناشی از محصولات خوردگی..... ۶۰
- شکل (۴-۹): دیاگرام آزاد SFRC در نمونه‌های ترک دار..... ۶۴
- شکل (۵-۱): الف- دانه بندی سنگدانه، ب- مکانیزم خرد کردن سنگها..... ۷۲
- شکل (۵-۲): دستگاه تولید الیاف..... ۷۳
- شکل (۵-۳): مشخصات الیاف..... ۷۴
- شکل (۵-۴): دستگاه خمش و فشار برای کنترل کیفیت مصالح ساختمانی..... ۷۵
- شکل (۵-۵): آزمایش خمش در حالت بار گذاری چهار نقطه‌ای..... ۷۷
- شکل (۵-۶): آزمایش خمش در حالت بار گذاری چهار نقطه‌ای..... ۷۸
- شکل (۵-۷): اندازه‌گیری پارامترهای مربوط در آزمایش خمش..... ۸۰
- شکل (۵-۸): دستگاه Pull-out..... ۸۲
- شکل (۵-۹): مراحل ساخت نمونه‌ها..... ۸۴
- شکل (۵-۱۰): ابعاد قالبها..... ۸۴
- شکل (۵-۱۱): میکسر..... ۸۶
- شکل (۵-۱۲): طبقه بندی برنامه مربوط به گروه اول از آزمایش‌ها..... ۸۷
- شکل (۵-۱۳): مرحله پیش بارگذاری در نمونه‌های مسلح به الیاف قلابدار..... ۸۸
- شکل (۵-۱۴): مرحله پیش بارگذاری در نمونه‌های مسلح به الیاف مجعد..... ۸۸

- شکل (۵-۱۵): پروفیل ساخته شده برای بارگذاری آزمایش خمش چهار نقطه‌ای..... ۸۹
- شکل (۵-۱۶): طبقه بندی برنامه مربوط به گروه دوم از آزمایش‌ها..... ۹۲
- شکل (۵-۱۷): الیاف بعد از ۳ ماه عمل آوری..... ۹۲
- شکل (۵-۱۸): طبقه بندی برنامه مربوط به گروه سوم از آزمایش‌ها..... ۹۳
- شکل (۵-۱۹): مکانیزم آماده سازی نمونه‌های pull-out..... ۹۵
- شکل (۵-۲۰): مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد (تیپ ۱)..... ۹۵
- شکل (۵-۲۱): مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد (تیپ ۲)..... ۹۶
- شکل (۵-۲۲): مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد (تیپ ۳)..... ۹۷
- شکل (۵-۲۳): نتایج آزمایش خمش در نمونه‌های تیپ ۱ در دو ماه (محیط کلر)..... ۹۸
- شکل (۵-۲۴): نتایج آزمایش خمش در نمونه‌های تیپ ۱ در شش ماه (محیط کلر)..... ۹۹
- شکل (۵-۲۵): مقاومت خمشی نمونه‌های تیپ ۱ در دو ماه (محیط سولفات)..... ۱۰۰
- شکل (۵-۲۶): تفاوت قطر در بعضی از نمونه‌ها..... ۱۰۱
- شکل (۵-۲۷): مقاومت خمشی نمونه‌های تیپ ۱ در شش ماه (محیط سولفات)..... ۱۰۳
- شکل (۵-۲۸): مقاومت خمشی نمونه‌های تیپ ۲ در دو ماه (محیط سولفات)..... ۱۰۴
- شکل (۵-۲۹): مقاومت خمشی نمونه‌های تیپ ۲ در شش ماه (محیط سولفات)..... ۱۰۵
- شکل (۵-۳۰): مقاومت خمشی نمونه‌های تیپ ۳ در دو ماه (محیط کلر)..... ۱۰۶
- شکل (۵-۳۱): مقاومت خمشی نمونه‌های تیپ ۳ در شش ماه (محیط کلر)..... ۱۰۷

- شکل (۵-۳۲): مقاومت خمشی نمونه‌های بدون ترک..... ۱۰۹
- شکل (۵-۳۳): کاهش قطر الیاف بر اساس طول دوره عمل آوری بر حسب درصد در نمونه‌های دسته اول..... ۱۱۱
- شکل (۵-۳۴): الیاف قرار گرفته در سطح نمونه - الیاف قلابدار (بعد از تراشیدن سطح)..... ۱۱۱
- شکل (۵-۳۵): مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته شده با الیاف خورده شده..... ۱۱۲
- شکل (۵-۳۶): مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته شده با الیاف خورده شده..... ۱۱۴
- شکل (۵-۳۷): تغییر میزان قطر الیاف در مدت زمان عمل آوری..... ۱۱۵
- شکل (۵-۳۸): روند کاهش قطر الیاف مدفون شده بر اساس دوره‌ی عمل آوری نمونه‌ها (الیاف مجعد) ۱۱۸
- شکل (۵-۳۹): اندازه‌گیری قطر الیاف مدفون شده براساس دوره عمل آوری نمونه‌ها (الیاف قلابدار)..... ۱۱۹
- شکل (۵-۴۰): منحنی نیرو-تغییر مکان مربوط به بیرون کشیدن الیاف قلابدار (SFRC1)..... ۱۲۰
- شکل (۵-۴۲): الیاف Pull-out شده از ماتریس بتنی..... ۱۲۰
- شکل (۵-۴۳): مراحل مربوط به رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار..... ۱۲۳
- شکل (۵-۴۴): منحنی نیرو-تغییر مکان مربوط به بیرون کشیدن الیاف قلابدار (SFRC2)..... ۱۲۳
- شکل (۵-۴۵): الیاف Pull-out شده (SFRC2)..... ۱۲۳
- شکل (۵-۴۶): منحنی نیرو-تغییر مکان مربوط به بیرون کشیدن الیاف قلابدار (SFRC3)..... ۱۲۴

شکل (۴۵-۵): شکست کششی و گسیختگی الیاف (SFRC3)..... ۱۲۵

فهرست جداول

- جدول (۱-۲): انواع الیاف و خواص مکانیکی آنها..... ۸
- جدول (۱-۴): غلظت املاح مختلف در دریاها بر حسب ppm..... ۴۲
- جدول (۲-۴): طبقه بندی محیط‌های مختلف در معرض حملات سولفاتی ۵۱
- جدول (۱-۵): دانه بندی سنگدانه‌های کوارتز (Ottawa)..... ۷۲
- جدول (۵-۲): محاسبه مقاومت خمشی در نمونه‌ها..... ۷۸
- جدول (۳-۵): طرح اختلاط مربوط به ماتریس بتنی..... ۸۳
- جدول (۴-۵): مشخصات نمونه‌های بتن الیافی..... ۸۳
- جدول (۵-۵): مشخصات مربوط به تعداد و اندازه نمونه‌ها در گروه اول آزمایش‌ها (Crimped)..... ۹۰
- جدول (۶-۵): مشخصات مربوط به تعداد و اندازه نمونه‌ها در گروه اول آزمایش‌ها (Hooked)..... ۹۱
- جدول (۷-۵): تعداد و ابعاد نمونه‌ها در آزمایش گروه دوم..... ۹۳
- جدول (۸-۵): مشخصات آزمایش مقاومت بیرون کشیدن الیاف فولادی قلابدار..... ۹۴
- جدول (۹-۵): نتایج آزمایش خمش در نمونه‌های بدون ترک..... ۱۰۸
- جدول (۱۰-۵): نتایج آزمایش خمش در نمونه‌های ساخته شده با الیاف قلابدارخورده شده..... ۱۱۳
- جدول (۱۱-۵): نتایج آزمایش خمش در نمونه‌های ساخته شده با الیاف مجعد خورده شد..... ۱۱۴
- جدول (۱۲-۵): نتایج آزمایش خمشی برای نمونه‌های فشاری مسلح به الیاف مجعد، عمل آوری شده در محیط‌های کلر..... ۱۱۶

جدول (۵-۱۳): نتایج آزمایش خمشی برای نمونه‌های فشاری مسلح به الیاف قلابدار، عمل آوری شده

در محیط‌های کلر..... ۱۲۱

جدول (۵-۱۴): نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف تک (قلابدار) از ماتریس بتنی ۱۲۴

جدول (۵-۱۵): نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف تک (قلابدار) از ماتریس بتنی..... ۱۲۵

چکیده

در کشورهای توسعه یافته استفاده از کامپوزیت پایه سیمانی مسلح شده به الیاف فولادی به دلیل عملکرد مکانیکی بالای آن و شکل پذیری زیاد در ساخت انواع سازه های کاربرد دارد. آزمایشات کمی در خصوص دوام نمونه های بتن مسلح به الیاف فولادی انجام شده است. هدف از این پایان نامه جمع آوری مجموعه ای از آزمایشات به منظور فراهم آورد شرایط خوردگی در در نمونه های SFRC است.

حدوداً ۸۰ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. سه گروه آزمایش طبقه بندی شدند: آزمایش اول در رابطه با بررسی خوردگی روی مسلح به الیاف فولادی اشاره دارد، آزمایش دوم اثر استفاده از الیاف فولادی خورده شده در نمونه های ساخته شده بررسی می کند، و دسته سوم به اثر خوردگی روی رفتار الباف تک به هنگام بیرون کشیده شدن از ماتریس بتنی است. به منظور فراهم ساختن شرایط آسیب پذیر خوردگی از انواع محلول با دمای متفاوت و طول دوره گوناگون استفاده شد.

اثر خوردگی با اندازه گیری چند پارامتر بررسی شد: خواص مکانیکی کامپوزیت در خمش، فشار، و میزان انرژی جذب شده توسط نمونه، ارزیابی میزان سطح خورده شده الیاف، و اندازه گیری مینیمم قطر الیاف بعد از مدت زمان های مربوط به عمل آوری. نتایج همه ی آزمایشات حاکی نشان داد که بعد از اینکه یک دوره مشخص از خوردگی اتفاق می افتد، با افزایش طول خوردگی مقاومت و سختی کاهش می یابد. برای سطح معین از درجه خوردگی یا به عبارتی گذراندن مدت زمان معلوم از دوره عمل آوری کاهش سختی از میزان کاهش مقاومت بالاتر است.

کلمات کلیدی: دوام بتن، خوردگی، بتن مسلح به الیاف فولادی، آزمایش خمش،

آزمایش Pull-out.

فصل ۱

مقدمه

فصل اول: مقدمه

سازه‌های دریایی و تاسیسات موجود در بنادر کشورمان در زمره تاسیسات زیر بنایی مهمی به شمار می‌روند که به دلیل بتنی یا فلزی بودن در معرض پوسیدگی و تخریب ناشی از قرار گرفتن در محیط دریایی هستند. در موارد متعددی این سازه‌ها و تاسیسات طی سالیان متمادی نه به قدر کفایت بازرسی و نگهداری شده‌اند و نه به لحاظ قابلیت ادامه خدمت رسانی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. محیط‌های دریایی به دلیل داشتن ویژگی‌های اساسی متفاوت در بخش‌های مختلف خود از ناحیه اتمسفری (جوی) تا ناحیه پاشش و تر و خشک شدن، ناحیه غوطه‌وری و در نهایت فصل مشترک با خاک از نقطه نظر نوع و روند بروز خرابی و درجه پیشرفت آن دارای عملکردهای گوناگونی است. این امر بر حساسیت‌های ویژه‌ی تأثیرات این محیط بر روی سازه‌ها و تاسیسات مجاور آن می‌افزاید.

عموماً تصور بر این است که بتن یکی از مصالح بسیار با دوام است ولی تاریخچه عملکرد بتن در محیط دریایی حاکی از آن است که بتن در مقابل آب دریا به عنوان یکی از خورنده‌ترین محیط‌های طبیعی در جهان، از نقطه نظر دوام در معرض مشکلات جدی قرار دارد.

با توجه به اهمیتی که استفاده از سازه‌های بتن آرمه در سواحل، خصوصاً در اسکله‌ها، سازه‌های دریایی و میدان‌های اکتشاف نفت و گاز پیدا کرده، نیاز استفاده از بتن آرمه با دوام در برابر خوردگی آرماتور که بتواند عمر مفید مورد نیاز در این سازه‌ها را تأمین کند، به شدت احساس می‌شود. بنابراین باید تمامی عوامل موثر در این پدیده به طور کامل بررسی شده و با کنترل این عوامل، سازه‌ای طراحی نموده که عمر مفید لازم را داشته باشد. لذا مشاهده می‌شود که امروزه آئین نامه‌های طراحی به سمت طراحی بر اساس دوام تمایل پیدا کرده، خصوصاً در سازه‌هایی که در محیط‌های خورنده شدید ساخته می‌شود، توصیه‌ها و محدودیت‌های سختگیرانه‌ای اعمال کرده‌اند. نظریه‌ی عمر مفید سازه‌های بتن مسلح بر اساس محافظت آرماتور از خوردگی و بتن اطراف آرماتور از آسیب‌های ناشی از خوردگی

استوار است.

از پارامترهای مهم در تخریب میلگرد فولادی، ترک ناشی از حجم زیاد محصولات خوردگی در سطح مشترک فولاد و بتن است. نیروهای ایجاد شده ناشی از این حجم فولاد، از مقاومت کششی بتن تجاوز کرده و باعث ایجاد ترک، در سطح مشترک می‌شود که در نهایت بتن در آن ناحیه از هم گسیخته خواهد شد. آزمایشات گسترده‌ای در خصوص تاثیر خوردگی در میزان مقاومت کششی آرماتور و چسبندگی آن با بتن انجام شده است و مدل‌های ریاضی زیادی در خصوص زمان ترک خوردگی پوشش بتن و میزان کاهش مقاومت پیوستگی آرماتور با بتن ارائه شده که در فصل چهار به آن اشاره می‌کنیم.

در کشورهای توسعه یافته استفاده از کامپوزیت پایه سیمانی مسلح شده به الیاف فولادی به دلیل عملکرد مکانیکی بالای آن و شکل پذیری زیاد در ساخت انواع سازه‌ها کاربرد دارد. بتن الیافی در سطح گسترده در روسازی جاده‌ها¹ بکار برده می‌شود، از اینرو ممکن است، در معرض نمک‌های مورد استفاده در فصول یخبندان و مواد شیمیایی قرار گیرد. سازه‌های دریایی مسلح به الیاف، نظیر شاتکریت دیواره‌های سد، در معرض خوردگی حاصل از محیط‌های دریایی هستند. در این نوع سازه‌ها، ترک خوردگی باعث محدود شدن عمر مفید خواهد شد و وضعیت نامساعدی را برای الیاف فولادی تقویت کننده خود از نظر دوام ایجاد می‌کند. چرا که در سازه‌های بتنی مسلح به الیاف فولادی، الیاف به هنگام ترک خوردگی، نقش دوزنده در لبه‌های ترک را ایفا می‌کنند. با توجه به اهمیت دوام این سازه‌ها، اما تا کنون آزمایشات کمی در خصوص دوام نمونه‌های بتن مسلح به الیاف فولادی انجام شده است. در فصل پنجم با ارائه مجموعه‌ای از آزمایشات به بررسی اثر خوردگی در نمونه‌های مسلح شده به الیاف فولادی می‌پردازیم.

¹ - Pavements

مباحث کلی این پایان نامه عبارتند از:

فصل اول شامل مقدمه است.

فصل دوم در رابطه با معرفی بتن الیافی، الیاف فولادی، مزایا و کاربردهای آن می‌باشد.

فصل سوم در رابطه با مکانیک شکست و بررسی نقش الیاف در رفتار مکانیکی بتن الیافی است.

فصل چهارم به کلیاتی در رابطه با فرایند خوردگی فولاد اشاره دارد و مروری بر تحقیقات گذشته و

آزمایشات مربوطه روی نمونه‌های بتنی (آرماتور و الیاف فولادی) می‌کند.

فصل پنجم مرتبط با کارهای آزمایشگاهی، شرح و بحث نتایج است.

در فصل ششم، نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه شده است.

فصل ٢

بتن الیافی

فصل دوم : بتن الیافی

۱-۲ مقدمه

بتن دارای مقاومت زیادی در فشار می‌باشد، ولی مقاومت کششی بسیار پایین و شکنندگی نسبتاً زیاد آن باعث گردیده که در آیین نامه‌های طراحی مقاومت کششی برای بتن منظور نشده و مقاومت برشی نیز به اندازه معینی محدود گردد. استفاده از میلگرد یکی از روش‌های رایج برای کاهش و کنترل عرض ترک‌های حاصل از کشش مستقیم یا برش می‌باشد. اما از آنجا که میلگرد منحصر به بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می‌دهد، تصور اینکه مقطع بتن ایزوتروپ و هموژن است، چندان صحیح نخواهد بود [۱]. به منظور ایجاد شرایط ایزوتروپ و کاهش ضعف شکنندگی و تردی بتن و ایجاد سیستمی که بتواند در تمام جهات به طور تقریباً یکنواخت سبب افزایش نرمی شده و مقاومت کششی را نیز حفظ کند، استفاده از رشته‌های نازک و کوتاه که به صورت تصادفی در تمام جهات در بتن توزیع می‌شود، روش مناسبی به نظر می‌رسد. این رشته‌های نازک الیاف^۱ نامیده می‌شوند که دارای انواع و شکل‌های مختلف بوده و کاربردهای متعددی هستند.

بتن مسلح به الیاف یا بتن الیافی^۲ (FRC)، بتنی است که شامل سیمان هیدرولیکی، سنگدانه و الیاف کوتاه و ناپیوسته می‌باشد. این مصالح ممکن است، شامل مواد پوزولانی و افزودنی‌هایی که در بتن معمولی استفاده می‌شوند، باشد. الیاف معمولاً از جنس فولاد و شیشه و مواد پلیمری (مصنوعی) می‌باشند که به صورت تصادفی توزیع شده‌اند. الیاف طبیعی نیز مانند پنبه نسوز^۳ و کنف برای مسلح کردن بکار می‌روند. معمولاً طول و قطر الیاف به ترتیب بیش از ۷۶mm و ۱ mm نمی‌باشد. ماتریس^۴ بتنی نیز می‌تواند از جنس ملات یا بتن معمولی و یا بتن‌های خاص برای کاربردهای ویژه باشد.

^۱ -Fiber

^۲ - Fiber Reinforced Concrete

^۳ -Asbestos

^۴ - Matrix

۲-۲ مزایای بتن الیافی

یکی از بزرگترین مزایای کاربرد الیاف در بتن افزایش خدمت‌پذیری دراز مدت سازه‌ها می‌باشد. خدمت‌پذیری توانایی حفظ مقاومت، یکپارچگی و عملکرد مورد انتظار در طول عمر مفید سازه می‌باشد. یکی از جنبه‌های خدمت‌پذیری که با افزایش الیاف بهبود می‌یابد کنترل ترک‌ها است. ترک‌های عریض شکل ظاهری و قابلیت اعتماد سازه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. الیاف مانع ایجاد ترک‌های عریض و نفوذ آب و مواد دیگر و در نتیجه کاهش خوردگی آرماتورها می‌شود. با استفاده از درصدهای بالاتر الیاف مقاومت کششی ماتریس افزایش پیدا می‌کند در روش‌های متداول مسلح کردن سازه‌های بتنی هزینه و زمان زیادی صرف آرماتور بندی می‌شود. در صورتی که استفاده از FRC در اکثر موارد باعث کاهش یا حذف کامل آرماتور بندی می‌شود.

قابلیت انعطافی که بتن الیافی دارد، همانند خواص مواد پلاستیکی باعث می‌شود که بتن الیافی گسیختگی ناگهانی نداشته باشد. از آنجا که الیاف در جسم بتن به صورت سه بعدی پراکنده می‌شود، در صورت تشکیل یک ترک در جهات مختلف، الیاف اتصالی را به وجود می‌آورد و از گسترش ترک جلوگیری می‌نماید. بنابراین رشته‌های الیاف بطور فعال در محدود کردن عرض ترک‌ها وارد عمل شده و با تشکیل ریز ترک‌های زیاد همکاری می‌نماید. در نتیجه قابلیت بهره‌برداری بتن را افزایش می‌دهد. این مورد به ویژه در دال‌های مهار شده همانند روسازی‌های بتنی که در آنها اصطکاک بستر مانع از عمل انقباض و انبساط می‌شود، شدیداً به چشم می‌خورد.

به طور خلاصه مزایای بتن الیافی در مقایسه با بتن معمولی را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

مقاومت در برابر تورق، سایش و هوازگی سطح

مقاومت زیاد در برابر تنش‌های خستگی

مقاومت بسیار بالا در برابر ضربه

مقاومت کششی زیاد

قابلیت باربری زیاد بعد از ترک خوردگی

مقاومت خمشی و برشی زیاد

قابلیت شکل پذیری بالا

انواع مختلفی از الیاف در اشکال مختلف ساخته می‌شود مهم‌ترین آن‌ها، نوع فولادی، پلیمری، پلی پروپیلن، شیشه و کربن می‌باشد. این الیاف در هندسه، خواص، کارایی و هزینه متفاوت می‌باشند. انواع رایج این الیاف و خواص آنها در جدول (۱-۲) اشاره شده است.

جدول (۱-۲): انواع الیاف و خواص مکانیکی آنها [۲]

نوع الیاف	قطر الیاف (μm)	سنگینی ویژه ^۱	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (GPa)	درصد افزایش طول به هنگام شکست
فولاد	۵-۵۰۰	۷/۸۴	۲۰۰	۰/۵-۲	۰/۵-۳/۵
شیشه	۹-۱۵	۲/۶	۷۰-۸۰	۲-۴	۲-۳/۵
پولی پروپیلن	۶-۲۰۰	۰/۹-۰/۹۱	۵-۷۷	۰/۱۵-۰/۷۵	۱۵
نایلون	۲۰-۲۰۰	۰/۹۵-۰/۹۶	۴	۰/۹	۱۳-۱۵
پلی اتیلن	۲۵-۱۰۰۰	۰/۹۵-۰/۹۶	۰/۳	۰/۰۸-۰/۶	۳-۸۰
پولی استر	۱۸-۳۶۰	۱/۳۴-۱/۳۹	۱۷/۵	۰/۸۹-۱/۱	۱۱-۱۳

الیاف فولادی مهم‌ترین نوع الیاف هستند، که در قطر و ابعاد بزرگتر استفاده می‌شوند. از مزایای

¹ - Specific Gravity

استفاده از الیاف در ابعاد بزرگتر مقاومت بیشتر در برابر ضربه، کشش، خمش، شکل پذیری بیشتر و افزایش بیشتر سختی مصالح می باشد.

۳-۲ بتن مسلح به الیاف فولادی^۱

یکی از پر مصرف ترین و مناسب ترین نوع الیاف، الیاف فولادی است، که به دلیل شکل پذیری، تامین گیرداری در بتن، مقاومت کششی و سختی مطلوب، نظر اکثر طراحان را به خود جلب کرده است. الیاف فولادی مورد استفاده برای مسلح کردن بتن از نوع کوتاه، ناپیوسته و با نسبت ظاهری $(\frac{L}{d})$ ۲۰ تا ۱۰۰ می باشند. سطح مقطع آن ها با توجه به روش تولید و مواد خام مورد استفاده ممکن است دایره ای، بیضوی، مستطیلی یا هلالی باشد. الیاف فولادی با سطح مقطع دایره ای دارای قطر ۰,۲۵ تا ۱ میلیمتر و با سطح مقطع مستطیلی (ورقه ای) دارای ضخامت ۰,۱۵ تا ۰,۶۴ میلیمتر و عرض ۰,۲۵ تا ۲ میلیمتر می باشند. میزان الیاف مورد استفاده در بتن معمولاً بین ۰,۲۵ تا ۲ درصد حجمی (معادل ۲۰ تا ۱۶۰ کیلوگرم در متر مکعب می باشد) در مورد دال های متکی بر زمین و بعضی اعضای پیش ساخته که شدت بارگذاری در آنها کم است درصد الیاف مورد استفاده کم می باشد.

درجه تراکم SFRC همانند بتن معمولی مقاومت را تحت تاثیر قرار می دهد. از این رو مخلوط باید دارای کارایی مناسب باشد تا الیاف بطور یکنواخت بدون جدا شوندگی یا آب انداختن در سراسر ماتریس توزیع شوند. اگر از الیاف بلند و نازک استفاده شوند، در هنگام مرتعش کردن مخلوط ممکن است الیاف گلوله شوند و با ایجاد قفل و بست و تشکیل در مخلوط بطور غیر یکنواخت توزیع شوند، در حالیکه الیاف با نسبت ظاهری پایین تر از براحتی از هم جدا شده و در ماتریس توزیع می شوند. از طرف دیگر استفاده از الیاف با نسبت ظاهری بالا باعث بهبود خصوصیات مکانیکی FRC می شود. تمایل الیاف به گلوله شدن در مخلوط تابعی از حداکثر بعد سنگدانه و دانه بندی آنها و همچنین نسبت

¹ - Steel Fiber Reinforced Concrete(SFRC)

ظاهری و نسبت حجمی و شکل الیاف و چگونگی اضافه کردن به مخلوط می‌باشد. در صورت استفاده از سنگدانه‌های درشت‌تر و الیاف با نسبت ظاهری بالا و نسبت حجمی الیاف برای جلوگیری از گلوله شدن کاهش می‌یابد.

۱-۳-۲ خصوصیات مکانیکی SFRC

خصوصیات مکانیکی SFRC به نوع الیاف، نسبت ظاهری آن مقاومت ماتریس، اندازه سنگدانه‌ها، اندازه و شکل نمونه و همچنین طریقه ساخت و عمل‌آوری آن وابسته می‌باشد. مکانیزم مقاوم‌سازی الیاف انتقال تنش از ماتریس به الیاف از طریق سطح تماس آنها و یا با قفل و بست بین آنها با ایجاد مهار مکانیکی می‌باشد. تنش کششی نیز تا قبل از ایجاد ترک بین الیاف و ماتریس تقسیم می‌شود و بعد از ترک خوردگی ماتریس تماماً به الیاف منتقل می‌شود. در کنار ماتریس مهم‌ترین عامل کنترل کننده خصوصیات SFRC درصد حجمی و چگونگی عملکرد آنها می‌باشد. عملکرد الیاف بستگی به مقاومت آنها در برابر بیرون کشیده شدن از ماتریس دارد. به طور کلی اگر سطح مقطع الیاف ثابت در نظر گرفته شود، با افزایش طول الیاف تاثیر آنها در افزایش مقاومت مخلوط بیشتر خواهد بود. از آنجا که مقاومت بیرون کشیدگی الیاف بستگی به اندازه سطح تماس آنها با ماتریس دارد. الیاف با سطح مقطع غیردایره‌ای و الیاف‌های دایره‌ای با قطر پایین‌تر بازای درصد حجمی ثابت تاثیر بیشتری در بهبود خصوصیات SFRC دارند. در این صورت شکست عضو زمانی رخ می‌دهد که الیاف در حین بیرون کشیده شدن به حداکثر مقاومت خود رسیده‌اند. افزایش مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیدگی به همراه کاهش نسبت ظاهری با ایجاد تغییر شکل در الیاف امکان‌پذیر است. برای دستیابی به شکل پذیری بالا شکست عضو باید با بیرون کشیده شدن الیاف همراه باشد. این نوع شکست در مقایسه با گسیختگی الیاف تدریجی‌تر می‌باشد. درک خصوصیات مکانیکی SFRC و تغییر این خصوصیات با تغییر در نوع و مقدار الیاف کمک زیادی به طراحی این مصالح خواهد کرد.

الیاف فولادی رفتار بتن را در تمام موده‌های بارگذاری تحت تاثیر قرار می‌دهند، ولی تاثیر آنها در

افزایش مقاومت بتن در حالت فشار، کشش، پیچش، خمش و برش متفاوت است میزان تاثیر در این خصوصیات به طور خلاصه ارائه شده است [۱]:

۲-۳-۱-۱ فشار: در بارهای فشاری مقاومت نهایی بتن الیافی به مقدار کمی تحت تاثیر وجود الیاف قرار می گیرند. افزایش مقاومت فشاری با افزودن ۱٫۵٪ الیاف فولادی تا ۱۵٪ گزارش شده است.

۲-۳-۱-۲ کشش مستقیم: در حالت کشش مستقیم افزایش مقاومت بتن الیافی با افزودن الیاف قابل ملاحظه است. افزایش مقاومت کششی بتن با اضافه کردن ۱٫۵٪ الیاف ۳۰ تا ۴۰ درصد می باشد.

۲-۳-۱-۳ خمش: تاثیر افزودن الیاف در مقاومت خمشی بتن الیاف بیش از دیگر مقاومت های آن می باشد. الیاف باعث تغییر توزیع تنش در مقطع تیر می شود. با افزودن ۴٪ الیاف با بتنی که شامل سنگدانه های ریز می باشند، مقاومت خمش نسبت به حالت بدون الیاف بیش از دو برابر می شود. در صورت استفاده از سنگدانه های درشت، درصد حجمی الیاف از نظر عملی به ۱٫۵ تا ۲ درصد کاهش پیدا می کند در این حالت افزایش مقاومت خمشی نسبت به حالت بدون الیاف بیش از ۷۰ درصد نمی باشد.

۲-۳-۱-۴ طاقت: بزرگترین وجه تمایز SFRC با بتن مسلح نشده طاقت می باشد. بارامتر طاقت با مشاهده رفتار خمشی تیرهای ساده براساس ASTM C1018 قابل بررسی است. در تیرهای بتنی مسلح شده با الیاف، خرابی با گسترش تدریجی ترک ها و تغییر شکل های زیاد همراه خواهد بود. در این حالت یگپارچگی عضو بعد از ترک خوردگی و حتی تغییر شکل های کم حفظ می شود. تیرهای مشابه مسلح نشده با الیاف به طور ناگهانی تحت تغییر شکل های کم می شکنند و به دونیم می شود.

۲-۳-۱-۴ رفتار SFRC تحت بارهای ضربه‌ای: دو پارامتر مهم برای بررسی رفتار FRC تحت بارهای ضربه‌ای مقاومت و انرژی شکست می‌باشد. مقاومت SFRC تحت بارهای خمشی ضربه‌ای تا ۴۰ درصد بیش از بتن خالص است. الیاف‌های فولادی انرژی شکست را تا ۲,۵ برابر برای بتن معمولی و ۳,۵ برابر برای بتن با مقاومت بالا نسبت به حالت بدون الیاف افزایش می‌دهد. افزایش مقاومت در حالت بارگذاری دینامیکی نسبت به حالت استاتیکی ۲ تا ۳ برابر برای بتن‌های معمولی و ۱,۵ برابر برای بتن‌های مقاومت بالا می‌باشد. افزایش انرژی شکست نیز در حالت دینامیکی نسبت به حالت بارگذاری استاتیکی تا ۵ برابر برای بتن‌های معمولی و ۴ برابر برای بتن‌های مقاومت بالا می‌باشد.

۲-۳-۲ دوام SFRC

۲-۳-۱-۲ خوردگی الیاف قبل از ترک خوردگی ماتریس: بطور کلی هر چه مقاومت فشاری بتن بیشتر باشد تراکم آن بیشتر است. چنین بتنی با نسبت آب به سیمان پایین، دارای نفوذپذیری کمی است و خوردگی الیاف محدود به سطح بتن می‌شود. از آنجایی که الیاف‌ها به صورت ناپیوسته می‌باشند و به ندرت در تماس با یکدیگر هستند، خوردگی الیاف در سطح خارجی به عمق بتن منتقل نمی‌شود.

۲-۳-۲-۲ خوردگی الیاف بعد از ترک خوردگی ماتریس: بعد از ترک خوردگی، الیاف دوزنده ترک دچار خوردگی می‌شوند. در صورتی که عرض ترک‌ها کمتر از 0.1 mm باشد، خوردگی الیاف فولادی اتفاق نمی‌افتد. اگر عرض ترک بیش از 0.1 mm باشد ولی عمق آنها کم باشد، خوردگی به صورت موضعی ایجاد می‌شود که معمولاً از نظر سازه‌ای چندان با اهمیت نیست [۳].

۲-۳-۲-۳ انقباض و خزش: میزان انقباض بتن به عوامل زیادی از جمله خصوصیات مصالح، دما و رطوبت نسبی محیط، سن بتن در زمانی که وارد محیط خشک می‌شود و حجم بتن بستگی دارد. اگر در مقابل انقباض بتن قید ایجاد شود ترک‌های کششی در آن ایجاد می‌شود یکی از روش‌های موثر برای کاهش اثرات منفی جمع‌شدگی، مسلح کردن بتن با الیاف است. آزمایشات نشان می‌دهند که الیاف فولادی تاثیر کمی در کاهش انقباض آزاد بتن دارند هر چند در مورد انقباض اعضایی که محدود شده‌اند استفاده از الیاف فولادی باعث کاهش طول و عرض ترک‌ها می‌شوند. علاوه بر این الیاف باعث انتقال تنش در سطوح ترک می‌شوند الیاف فولادی کاهش قابل ملاحظه‌ای در خزش اعضای فشاری ایجاد نمی‌کند.

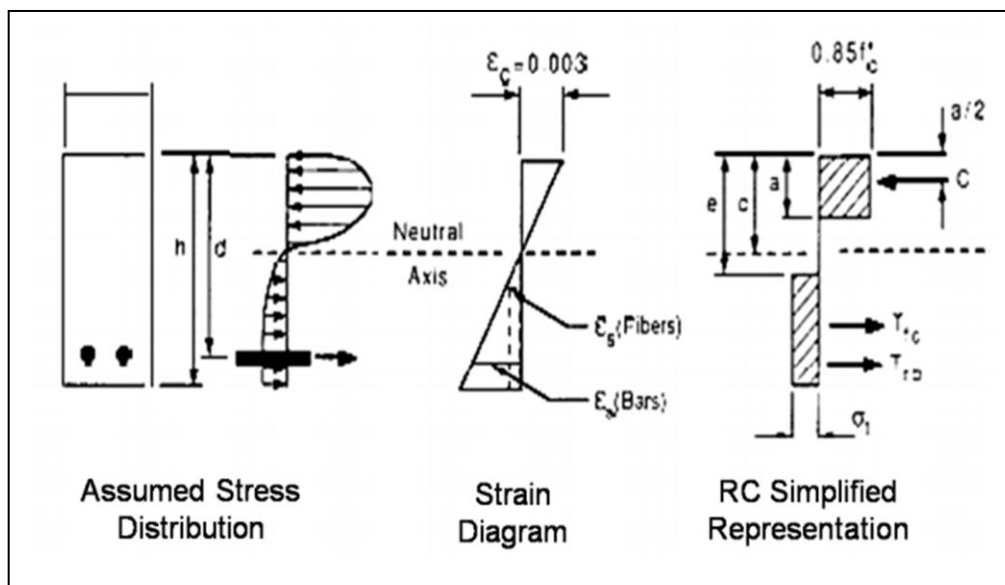
۲-۳-۲-۴ یخ زدن و ذوب شدن: تاثیر الیاف فولادی در مقاومت بتن در مقابل یخ زدن و ذوب شدن قابل ملاحظه نمی‌باشد. هر چند که شدت پوسته شدن و تخریب بتن را کاهش می‌دهد و از ایجاد ترک‌های قابل مشاهده جلوگیری می‌کند در حقیقت مهم‌ترین عامل در افزایش مقاومت بتن در برابر یخ زدن و ذوب شدن متوالی ساختار مناسب حفره‌های هوا در ماتریس می‌باشد و در این مورد SFRC هیچ فرقی با بتن نخواهد داشت.

۲-۳-۳ طراحی اعضای SFRC مسلح شده با آرماتور^۱

معمولا در کاربردهای سازه‌ای الیاف به عنوان تکمیل کننده میلگردهای فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. الیاف فولادی از انتشار ترک جلوگیری می‌کنند و مقاومت عضو در برابر تنش‌های حرارتی، جمع شدگی و ضربه را افزایش می‌دهند. در اعضای غیر سازه‌ای که وجود آرماتورها به صورت پیوسته مورد نیاز نیست مانند کف سازی‌ها می‌توان به منظور بهبود مقاومت خمشی و ضربه‌ای از الیاف فولادی به طور مستقل استفاده کرد. در این صورت امکان کاهش ضخامت لایه بتن وجود دارد. علاوه بر این SFRC عملکرد بهتری نسبت به بتن مسلح معمولی در این موارد خواهد داشت. مواردی

^۱ - Reinforced FRC(R/SFRC)

از کاربرد SFRC در اعضای سازه‌ای بدون حضور آرماتور مانند دالها با دهانه کوتاه تجربه شده است. تجربه نشان می‌دهد که الیاف‌های فولادی را می‌توان جایگزین تمام یا بخشی از آرماتورهای عرضی کرد. با افزودن الیاف به تیرهای بتن مسلح معمولی مقاومت خمشی آنها نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱-۲) [۴].



شکل (۱-۲): فرضیات طراحی تیرهای R/SFRC [۴]

۲-۳-۴ کاربردهای بتن مسلح به الیاف فولادی [۵]

بتن مسلح به الیاف فولادی را می‌توان به تنهایی و به همراه بتن مسلح معمولی بکار برد. مواردی که می‌توان بتن الیافی را به تنهایی بکار گرفت عبارتند از:

روسازی بتنی بزرگراه‌ها، جاده‌ها و فرودگاه‌ها

لوله‌های بتنی

کف کارخانه‌ها، توقفگاه‌ها، جایگاه بنزین . سالن‌های صنعتی

دیواره و کف کانال‌ها

قطعات پیش ساخته

در ساختمان تونل‌ها یا معابر معادن به صورت بتن پاشی

سازه‌های ضد انفجار و ضد حریق

شمع‌های ضربه گیر

فصل ۳

مکانیزم شکست و بررسی رفتار

الیاف در بتن الیافی

فصل سوم: مکانیزم شکست و بررسی رفتار الیاف در بتن الیافی

۱-۳ مقدمه

در این فصل ابتدا مختصری در رابطه با تئوری الاستیک خطی مکانیک شکست^۱ برای مصالح شکننده توضیح داده می‌شود و سپس مکانیک شکست غیر خطی^۲ و امکان استفاده از این قوانین در مطالعه بتن الیافی و همچنین نقش الیاف در نحوه گسترش ترک مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در اوایل قرن بیستم، بررسی علل شکست ناگهانی بعضی سازه‌ها علم جدیدی را به نام مکانیک شکست پای‌گذاری کرد. اگر چه طراحی بسیاری از سازه‌ها بر مبنای تئوری الاستیسیته و مقاومت مصالح درست بوده است، علت شکست، ترک‌هایی است که در سازه وجود داشته یا در حین ساخت ایجاد می‌شوند.

در مقاومت مصالح پارامترهای تنش معرف پایداری و میزان تحمل یک عضو در مقابل بارهای وارده می‌باشد اما در مکانیک شکست همیشه فرض بر این است که مصالح دارای عیوب و ترک‌های اولیه می‌باشند و با وجود اینکه شروع ترک بستگی به تنش وارده بر عضو دارد اما معیاری مبتنی بر انرژی برای خرابی بکار گرفته می‌شود.

بتن نسبت به مصالح شکننده پیچیدگی‌های بیشتری دارد و یک ماده شبه شکننده به شمار می‌آید. وجود حفره‌های موئینه، حباب هوا و ترک‌های ناشی از جمع شدگی و آثار ناشی از اختلاط ناقص به واسطه رفتار سیمانی در بتن پدید می‌آید، که نهایتاً ترکیب این ماده سخت و شکننده با سنگدانه‌ها که مانند جسم سخت رفتار می‌کنند، ناسازگاری را در سطح تماس این دو ایجاد می‌کند.

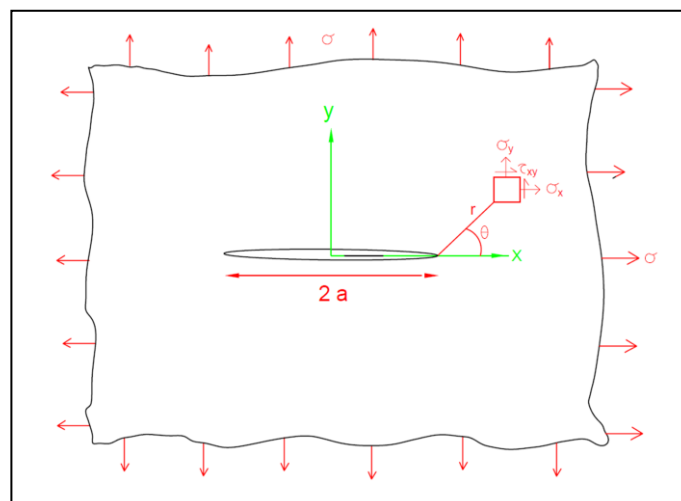
^۱ - Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)

^۲ - Nonlinear Fracture Mechanics (NLFM)

۲-۳ مکانیک شکست

۱-۲-۳ تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM)

در سال ۱۹۲۱، گریفیث مسئله مکانیک شکست را مطرح کرد و به دنبال این مطلب بود که چرا استحکام واقعی مواد به طور قابل ملاحظه‌ای از استحکام تئوری مواد کمتر است. در نهایت دانست این اختلاف به دلیل وجود ریز ترک‌ها در ساختار مواد است، لذا برای حل این مسئله فرضیه‌ای را مطرح نمود که تمام فرایندهای خرابی در نوک ترک ایجاد خواهد شد و بقیه قسمت‌ها در حالت الاستیک باقی می‌ماند. سپس با کمک تئوری الاستیسته و فرضیه پیشنهاد شده، در صفحه‌ای نامحدود با ضخامت واحد، تحت تنش σ ، دارای یک ترک مرکزی به طول $2a$ ، مولفه‌های تنش را در همسایگی نوک ترک، مستقل از شکل هندسی و چگونگی بارگذاری محاسبه کرد شکل (۱-۳) [۶].



شکل (۱-۳): ترک مرکزی در صفحه‌ای نامحدود تحت تنش σ

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \\ \sigma_y = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \\ \tau_{xy} = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{cases} \quad (۱-۳)$$

K_I ضریب شدت تنش نامیده می‌شود. که مقدار بحرانی آن در لحظه شکست با توجه به متداول‌ترین حالت گسترش ترک برابر است با:

$$k_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (۲-۳)$$

معادلات حاکی از آن بود که به خوبی شرایط لازم برای گسترش ترک ارضا نمی‌شود؛ فرضاً تنش در نوک ترک تحت بارهای کم نیز به سمت بی‌نهایت میل می‌کند، لذا دریافت، که بر مبنای تئوری الاستیک خطی نمی‌توان یک معیار تنش را برای بیان شرایط خرابی معرفی نمود بنابراین خرابی را بر اساس معیار انرژی توصیف کرد.

با انتشار ترک انرژی ذخیره شده در عضو در ناحیه خرابی نوک ترک مستهلک می‌شود نرخ آزاد شدن انرژی یا نیروی رانش ترک به صورت زیر بیان می‌شود.

$$G = - \frac{\partial \Pi(a)}{\partial a} \quad (۳-۳)$$

که در آن انرژی پتانسیل عضو (Π)، برابر با تفاضل کار انجام شده توسط بارهای خارجی (W) و انرژی کرنشی عضو (U) که خود تابعی از اندازه ترک است، می‌باشد. که با توجه به میدان تنش‌های تعریف شده پارامتر G در نوک ترک این‌گونه محاسبه می‌شود.

$$G_c = \frac{2\pi\sigma^2 a}{E} \quad (۴-۳)$$

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (5-3)$$

انرژی مصرفی برای گسترش ترک با R نشان داده شده است و برابر است با $R = \frac{dW}{da}$ ، که مقاومت ترک نام دارد و مقدار ثابتی است. شرط گسترش ترک آن است که G حداقل برابر با R باشد.

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{EG_c}{\pi a}} \quad (6-3)$$

انرژی یک معیار لازم برای رشد ترک است اما کافی نیست. شرط گسترش ترک آن است که، تنش و میزان انرژی آزاد شده در نوک ترک بحرانی باشد.

در اجسام ترد اصولاً انرژی صرف ایجاد سطوح جدید ترک می‌شود زیرا تغییر شکل پلاستیک در نوک ترک ناچیز است، در اجسام نرم صرف تغییر شکل پلاستیک نوک ترک می‌شود.

فرایند خرابی در نوک ترک محدود به یک نقطه نمی‌شود، بلکه محدوده‌ی مشخصی به نام منطقه صدمه دیده نوک ترک^۱ (FPZ) را در بر می‌گیرد. مصالح در این ناحیه به دلیل شکل‌گیری ریز ترک‌ها، رفتار نرم شدگی کرنشی را از خود نشان می‌دهند. بخشی از این ریز ترک‌ها به دلیل حضور تنش‌های حرارتی و انقباضی قبل از اعمال بار در ناحیه‌ای به نام منطقه انتقال^۲ (ITZ) می‌باشد. این ناحیه با ضخامت ۱۰ الی ۱۵ میکرومتر در اطراف سنگدانه است که به دلیل تخلخل بالا و مقاومت پایین آن زمینه برای پیدایش ریز ترک‌ها و شروع رفتار غیر خطی بتن آغاز می‌شود. تاثیر شکل‌گیری این نوع ترک خوردگی، کاهش نرخ آزاد شدن انرژی در نوک ترک و در عین حال افزایش حجم منطقه FPZ و توانایی آن در جذب انرژی آزاد شده می‌باشد.

بنابراین باید به دنبال ارائه راه‌کاری برای توصیف رفتار نرم شوندگی بتن در ناحیه نوک ترک بود.

^۱ - Fiber Process Zone

^۲ - Interfacial Transition Zone

به همین دلیل تئوری مکانیک شکست غیر خطی به کمک توصیف رفتار مصالح شکل‌پذیر و شبه شکننده می‌آید.

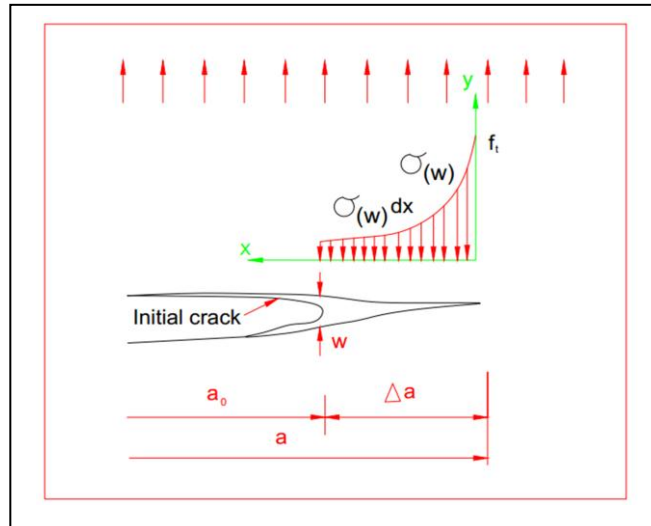
۳-۲-۲ تئوری مکانیک شکست غیر خطی (NLFM)

از آنجا که تنش در نوک ترک برای هر نوع مصالحی به سمت بینهایت میل می‌کند و با توجه به اینکه هیچ نوع مصالحی نمی‌تواند تنش بینهایت را تحمل کند لذا طول معینی از مصالح در جلوی نوک ترک رفتار غیر خطی از خود نشان می‌دهند. در فولاد این منطقه به صورت یک ناحیه جاری شده ظاهر می‌گردد، اما در بتن به دلیل ماهیت غیر همگن آن و وجود فازهای مختلف از مصالح ناحیه غیر خطی جلوی ترک به صورت یک منطقه صدمه دیده ظاهر می‌گردد. این ناحیه غیر خطی همچنین توجیهی برای نرم شدگی کرنش در منحنی رفتار بتن بعد از بار حداکثر خواهد بود. بنابراین در بتن باید از تئوری مکانیک شکست غیر خطی جهت توصیف این ناحیه غیر خط استفاده کرد.

۳-۲-۲-۱ مدل ترک چسبنده^۱:

بر اساس تحقیقات Dugdale و Barenblatt در خصوص ارائه این نوع مدل سازی، در نظر گرفتن یک ناحیه پلاستیک با طول مشخص در نوک ترک، همراه با توزیع تنش چسبنده که مایل به بستن ترک است و تابعی از میزان باز شدگی ترک w می‌باشد، است. در این مدل باز شدگی ترک در ابتدای ناحیه پلاستیک، دقیقاً از جاییکه تنش ناگهان صفر می‌شود، آغاز می‌گردد. و در نوک ترک، تنش، حداکثر خود یعنی مقاومت کششی مواد f_t ، می‌باشد. با افزایش باز شدگی، تنش کاهش یافته و به صفر می‌رسد شکل (۳-۲) [۷].

¹ - Cohesive Crack Model



شکل (۳-۲): توزیع تنش در ناحیه FPZ

بنابراین در یک سازه بتنی نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی در نوک ترک G حاصل جمع نرخ آزاد سازی انرژی برای ایجاد سطوح جدید شکست G_{IC} (که از اصول مکانیک شکست خطی محاسبه می‌شود) و انرژی لازم جهت غلبه بر تنش‌های چسبنده G_σ می‌باشد، به عبارتی:

$$G = G_{IC} + G_\sigma \quad (۳-۷)$$

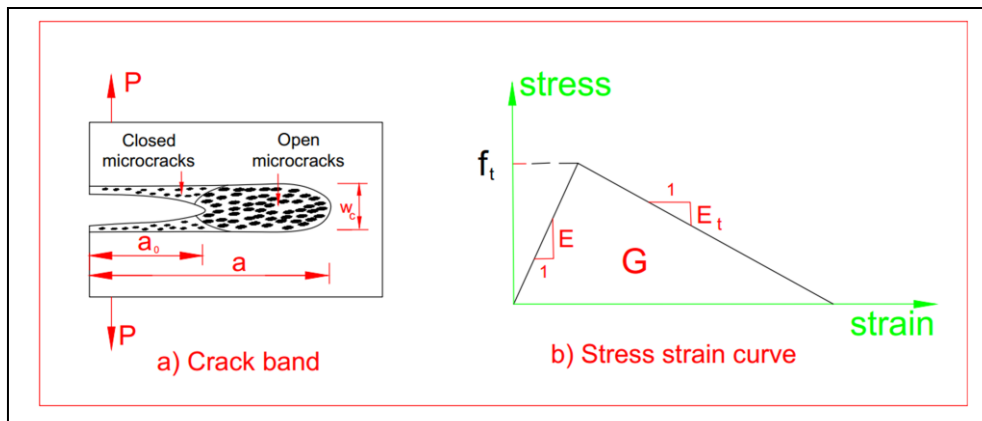
که در آن G_σ برابر است با:

$$G_\sigma = \int_0^w \sigma(w) dw \quad (۳-۸)$$

۳-۲-۲-۲ مدل ترک نواری^۱:

فرضیه‌ای که Bazant در خصوص ارائه این مدل ارائه داد این بود که، ریزترک‌ها در نوک ترک اولیه در نواری به ضخامت w_c شکل گرفته‌اند (شکل ۳-۳)، از طرفی تنش را برحسب تابعی از کرنش تعریف کرد و میزان انرژی شکست را طبق فرمول زیر معرفی نمود [۸]:

^۱ - Crack Bond Model



شکل (۳-۳): مدل ترک نواری (a) شکل‌گیری ریزترک‌ها در نوار ترک (b) نمودار تنش کرنش در ریز ترک‌ها

$$G = w_c \int_0^{\infty} \sigma d\varepsilon \quad (۹-۳)$$

۳-۲-۳ مکانیزم شکست بتن مسلح به الیاف

همانطور که گفته شد، نحوه‌ی شکست بتن غیر مسلح، به صورت گسترش ترک در امتداد عمود بر جهت تنش کششی حداکثر می‌باشد که بسته به اندازه و مقاومت نسبی سنگدانه‌ها و ملات سیمان، صفحه ترک از داخل سنگدانه‌ها گذشته یا اینکه آنها را دور می‌زند. در رابطه با بتن الیافی، مکانیزم شکست بسته به اندازه، هندسه، مشخصات مکانیکی و میزان چسبندگی آنها با ماتریس متفاوت است. بنابراین کل انرژی شکست را می‌توان، مجموع کار انجام شده در اثر گسیختگی الیاف و ماتریس و کار انجام شده توسط بیرون کشیدگی الیاف در نظر گرفت، که سهم عمده این انرژی مربوط به کار انجام شده توسط بیرون کشیدن^۱ الیاف می‌باشد. در واقع ناحیه نوک ترک تحت تاثیر دو سیستم نیرویی قرار می‌گیرد. نخست نیروهای خارجی که باعث ایجاد حوضه کششی شدید می‌شوند و ترک را به جلو می‌رانند. دوم نیروهای دوزنده الیاف که حوزه فشاری در نوک ترک ایجاد می‌کنند و با گسترش ترک مقابله می‌کنند.

^۱ - Pull-out

۳-۳ بررسی تاثیر الیاف روی رفتار بتن الیافی

در سال‌های اخیر پیشرفتهای وسیعی در توسعه بتن الیافی صورت گرفته است. با ایجاد تغییر در خصوصیات ماتریس، الیاف و سطح تماس آنها و همچنین روش ساخت این مصالح، افزایش چشم‌گیری در مقاومت و شکل پذیری و بهبود کارایی صورت گرفته است. FRC ها براساس پاسخ آنها به نیروهای کششی به دو دسته تقسیم می‌شوند. FRC های معمولی یا Low Performance و HPFRCC^۱ ها.

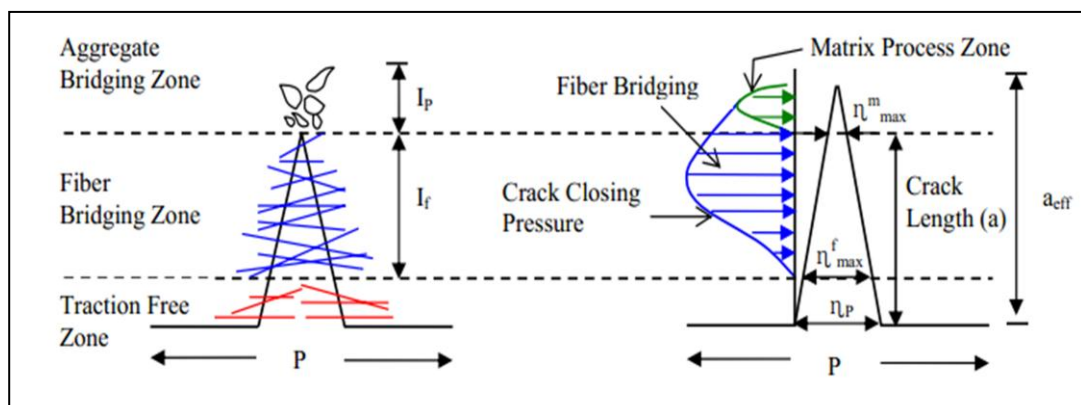
در مورد اینکه برای بررسی عملکرد HPFRCC می‌توان رفتار آن را تحت آزمایش خمش (بجای آزمایش کشش مستقیم) مورد ارزیابی قرار داد یا نه هنوز اختلاف نظر وجود دارد. عده‌ای معتقدند که چنانچه تغییر شکل نمونه‌های FRC در آزمایش خمش همراه با سخت شدگی کرنشی و تشکیل ترک‌های متعدد همراه باشد می‌توان آنها را به عنوان HPFRCC معرفی کرد [۹]. این فرضیه در حقیقت واقعیت را نادیده می‌گیرد. که در حالت بارگذاری خمشی ترک‌هایی که در ناحیه کششی تیر ایجاد شده‌اند، با انتشار به سمت ناحیه فشاری تیر پایدار شده و امکان شکل‌گیری ترک در نواحی دیگر تیر ایجاد می‌شوند. این عامل باعث می‌شود که در حالت خمش ترک‌های متعدد نسبت به حالت کشش مستقیم ایجاد شود. اما از آنجا که انجام آزمایش کشش مستقیم نسبت به آزمایش خمش مشکل‌تر است و شرایط خاص و کنترل شده‌ای را می‌طلبد از طرفی حالت کشش مستقیم در سازه‌ها کمتر اتفاق می‌افتد. بنابراین هر دو آزمایش کشش مستقیم و خمش برای اظهار نظر در مورد عملکرد HPFRCC معتبر شناخته شده‌اند.

FRC های معمولی در مقایسه با بتن دارای شکل پذیری بیشتری می‌باشند. ولی مقاومت کششی آنها تفاوت چندانی با بتن ندارد. در مقابل HPFRCC ها تحت بارهای کششی رفتار سخت شدگی کرنشی نشان می‌دهند.

^۱ - High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite

۳-۳-۱ ناحیه پل زدن الیاف

طولی از ترک که توسط الیاف متصل شده؛ FBZ نام دارد، که با گسترش این ناحیه الیاف از هم گسیخته یا بیرون کشیده می‌شوند. اندازه این ناحیه به ابعاد نمونه، نحوه‌ی بارگذاری و خصوصیات ظاهری و مکانیکی الیاف وابسته است. مطابق شکل (۳-۴) فرآیند شکست را می‌توان در سه ناحیه مجزا تقسیم نمود ناحیه آزاد کشش^۱ (TFZ) که انتقال بار در هیچ طولی اتفاق نخواهد افتاد. ناحیه دوزندگی الیاف (FBZ) که در آن انتقال تنش توسط اصطکاک لغزشی الیاف صورت می‌گیرد و ناحیه عملکرد ماتریس یا (FPZ) که در آن قفل بست سنگدانه‌ها اجازه انتقال تنش را در ماتریس خواهد داد [۱۰].



شکل (۳-۴): نواحی FPZ و FBZ در بتن‌های الیافی [۱۰]

۳-۳-۲ دوزندگی ترک:

با شناخت رفتار بتن و الیاف و اندرکنش آنها می‌توان اثر پل زدن الیاف را در مقابله گسترش و باز شدن ترک در نظر گرفت. ضریب شدت تنش کل K_I حاصل مجموع دو پارامتر K_{Ia} (معرف عامل گسترش ترک بر اثر نیروهای خارجی) و K_{If} (معرف عامل مقابله کننده با گسترش ترک) می‌باشد.

¹ - Traction Free Zone

به عبارتی:

$$K_I = K_{Ia} + K_{If} \quad (۱۰-۳)$$

معیار گسترش ترک رسیدن K_I به یک مقدار بحرانی می باشد.

با توجه به مطالب ارائه شده:

$$k_{Ia} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (۱۱-۳)$$

برای ترک به طول $2a$ ، تحت تنش σ_a و زوج بار شکافنده F می توان نوشت [۱۱]:

$$K_{If} = -\int K_{If} dx = \int \frac{F}{\sqrt{\pi a}} \left(\frac{x+a}{x-a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۱۲-۳)$$

بار وارد بر دو وجه ترک در ناحیه FBZ، $P(\delta x)$ ، تابعی از میزان باز شدگی ترک در محل x می باشد، در حالت بحرانی که ترک شروع به گسترش نماید، میزان باز شدگی ترک (CTOD) برابر با δf بوده لذا با جای گذاری در رابطه بالا ضریب مورد نیاز برای گسترش ترک برابر خواهد بود با:

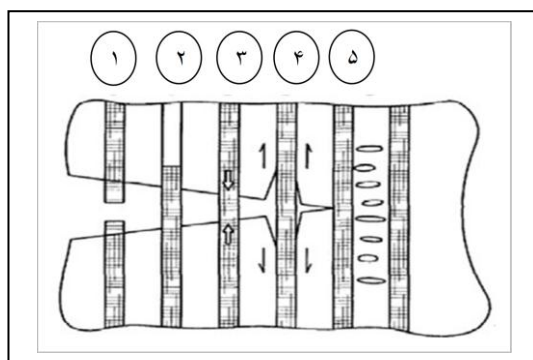
$$K_{ICE} = (E_m P_f \delta f)^{\frac{1}{2}} + K_{IC} \quad (۱۳-۳)$$

در اغلب موارد K_{IC} در مقایسه با K_{ICF} ناچیز بوده و از رابطه می تواند حذف شود لذا:

$$K_{ICE} = (E_m P_f \delta f)^{\frac{1}{2}} = (E_m G_F)^{\frac{1}{2}} \quad (۱۴-۳)$$

که در این رابطه G_F ، میزان انرژی لازم برای بیرون کشیدن الیاف از واحد سطح جدار ترک می باشد و انرژی شکست نامیده می شود.

شکل (۳-۵) توانایی الیاف را در جذب انرژی و تحمل بار در ناحیه بعد از ترک نشان می دهد، (post cracking). نحوه مکانیزم جذب انرژی الیاف و ماتریس بتنی به صورت زیر ارائه شده است.



- (۱) شکست الیاف
- (۲) بیرون کشیدگی الیاف
- (۳) پل زدن الیاف در دو لبه ترک
- (۴) جداسازی الیاف و ماتریس
- (۵) ترک خوردگی ماتریس

شکل (۳-۵): مراحل مختلف عملکرد الیاف در ماتریس بتنی [۱۲]

۳-۳-۳ رفتار FRC تحت تنش‌های کششی:

با افزایش بار در بتن الیافی، ریز ترک‌های موجود در ناحیه FPZ، رشد پیدا کرده و در نهایت ترک موضعی ایجاد می‌کنند. الیاف می‌توانند مکانیزم شکل‌گیری ترک در ناحیه FPZ را تحت تاثیر قرار دهند. عرض ترک متأثر از سختی، نسبت حجمی و خصوصیات اتصال الیاف به ماتریس می‌باشد. تاثیر الیاف در مسلح کردن بتن را در قالب سه پارامتر ضریب شدت تنش بررسی کرد.

K_{IC}^M : طاقت شکست بتن مسلح نشده

K_{IC}^C : طاقت شکست نظیر رشد ریز ترک‌ها (آغاز ناحیه غیر خطی)

K_{IC}^{C*} : طاقت شکست بعد از شکل‌گیری ریز ترک‌ها و هنگام شروع ترک موضعی

این پارامترها با ثبت مقادیر تنش و ترسیم منحنی $\sigma-CMOD$ (شکل (۳-۶)) برای مصالح

سیمانی مسلح به الیاف قابل اندازه‌گیری است. این منحنی در ۵ ناحیه قابل بررسی است [۱۳]:

ناحیه I (رفتار الاستیک خطی): در این مرحله رفتار مصالح به حالت الاستیک خطی است، ریز ترک‌ها

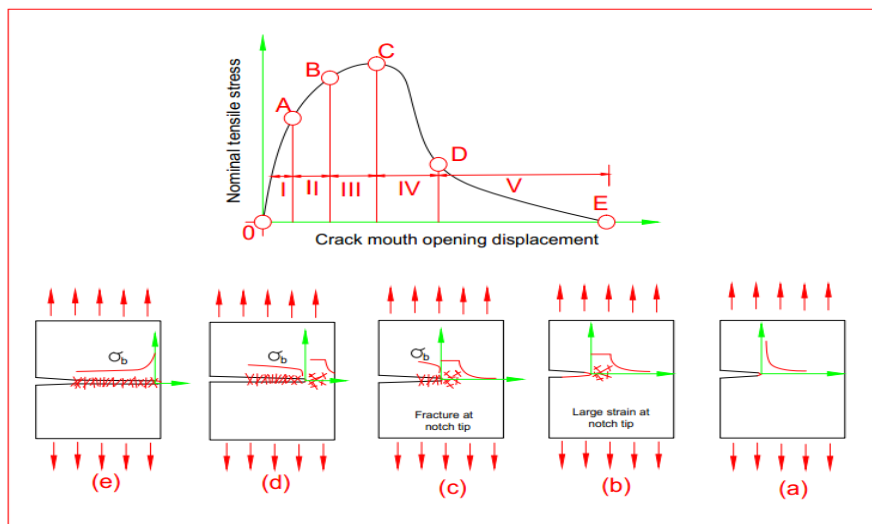
هنوز رشد نکرده و ضریب شدت تنش کمتر از K_{IC}^C می‌باشد.

ناحیه II (تغییر شکل غیر خطی): به دلیل رشد ریزترک‌ها سختی نمونه کاهش پیدا کرده (شیب نمودار کاهش می‌یابد). ضریب شدت تنش بین دو مقدار K_{IC}^C و K_{IC}^{C*} است. اگر الیاف به اندازه‌ای ریز نباشد که بین سطوح ریزترک‌ها در ناحیه FPZ اتصال برقرار کند تنش‌های σ_A و σ_B به هم نزدیک خواهد بود.

ناحیه III (رشد پایدار ترک موضعی): با شروع ترک موضعی، الیاف در بین سطوح ترک اتصال برقرار کرده و مقداری از تنش اعمال شده را تحمل می‌کند. لازم به توضیح است که برای رشد ترک به صورت پایدار نیاز به افزایش بار است. ضریب شدت تنش در این حالت کمتر از K_{IC}^{C*} است.

ناحیه IV (رشد ناپایدار ترک موضعی): ترک در سراسر عرض نمونه به صورت ناپایدار رشد پیدا کرده است و دیگر افزایش بار متوقف خواهد شد.

ناحیه V (دوزندگی ترک توسط الیاف): تمام نیروهای اعمال شده در این مرحله توسط الیاف تحمل شده و شکست نمونه با شکست الیاف یا بیرون کشیدگی آن همراه است.



شکل (۳-۶): منحنی شماتیک از تنش کششی در مقابل بازشدگی دهانه ترک [۱۳]

۳-۳-۴ مقاومت کششی:

حداکثر مقاومت عضو تحت تنش‌های کششی مستقیم (f_t') در حین شکل‌گیری ترک موضعی در امتداد سطوح شکست ایجاد می‌شود. در این مرحله قسمتی از نیروی کششی توسط دوزندگی الیاف و قسمتی هم توسط نواحی بتن ترک نخورده تحمل می‌شود. مقاومت کششی نهایی کامپوزیت به صورت زیر پیشنهاد شده است [۶].

$$f_t' = \beta_1 \frac{\eta K_{IC,P}}{\sqrt{\pi a_0}} (l - v_f) + \beta_2 \tau_v v_f \frac{l}{d} \quad (۱۵-۳)$$

در این رابطه $\beta_1 = 1$ ، $\beta_2 = 2$ و τ_v تنش پیوستگی بین الیاف و ماتریس در زمانیکه تنش در کامپوزیت به f_t' می‌رسد. $K_{IC,P}$ طاقت شکست مخلوط سیمان و میکروسیلیس می‌باشد. η ضریبی است که نشان دهنده مقاومت اضافی در برابر ترک خوردگی ناشی از سنگدانه‌ها می‌باشد. a_0 برابر نصف طول ناحیه ترک خورده و l ، d و v_f به ترتیب قطر و طول نسبت حجمی الیاف می‌باشند.

۳-۳-۵ انرژی شکست:

انرژی شکست (G_f) با تقسیم انرژی جذب شده در ناحیه شکست تقسیم بر سطح ایجاد شده در اثر ترک خوردگی بدست می‌آید. در هنگامی که ظرفیت باربری عضو به حداکثر می‌رسد بازشدگی ترک w بسیار ناچیز است در پایان مرحله نرم‌شدگی باز شدگی ترک به بیش از نصف طول الیاف خواهد رسید. لذا سهم بسیار زیادی از انرژی صرف بیرون کشیدن الیاف می‌شود. رابطه بین تنش منتقل شده توسط دوزندگی الیاف و باز شدگی ترک به صورت زیر می‌باشد [۶]:

$$\sigma(w) = 2hl v_f \alpha \eta K_{IC,P} \sqrt{\frac{l}{d} \frac{E_f}{E_b}} \left[\frac{l}{8} - \frac{w}{2l} + \frac{w^2}{2l^2} \right] \quad (۱۶-۳)$$

با استفاده از رابطه فوق انرژی شکست برابر است با:

$$G_f = \int_0^{\frac{l}{2}} \sigma(w) d(w) = \frac{h}{24} l^2 \nu_f \alpha \eta K_{IC,P} \sqrt{\frac{l}{d} \frac{E_f}{E_b}} \quad (17-3)$$

در این رابطه E_f و E_b به ترتیب مدول الاستیسیته الیاف و ماتریس می‌باشند. α پارامتری است که با η و $h = \frac{2}{4+f^2} (e^{\frac{\pi}{2}} + 1)$ رابطه دارد. h و f ضرایبی هستند که به اندرکنش الیاف و ماتریس وابسته می‌باشند.

۳-۳-۶ مقاومت نظیر اولین ترک در ماتریس:

با افزایش مقاومت پیوستگی الیاف به ماتریس مقاومت نظیر اولین ترک بهبود می‌یابد. کاهش فاصله و قطر الیاف نیز مقاومت اولین ترک را به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. Naaman با بررسی رفتار بیرون کشیدن الیاف مختلف مدفون از ماتریس سیمانی به این مسئله پی‌برد که حداکثر مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن بعد از ایجاد لغزش کمی بوجود می‌آید. وی نتیجه گرفت که در صورت استفاده از ماتریس سیمانی معمولی و الیاف درشت تا قبل از ترک خوردگی ماتریس، تنش ایجاد شده در الیاف تنها ۲۵ درصد مقاومت بیرون کشیدگی حداکثر آنها خواهد بود [۱۴].

۳-۳-۷ رفتار سخت شدگی کرنشی^۱:

بعد از ترک خوردگی ماتریس، عامل اصلی تامین مقاومت، اتصال لبه ترک توسط الیاف و مقاومت آنها در برابر بیرون کشیده شدن از ماتریس می‌باشد. تاثیر الیاف در این مرحله از رفتار کامپوزیت را می‌توان با اندازه‌گیری پارامتری که از حاصل ضرب مقاومت بیرون کشیدگی الیاف تک (در حالت مستقیم) در تعداد الیاف در واحد حجم حاصل می‌شود مورد بررسی قرار داد [۱۴].

¹ - Strain Hardening Behavior

۳-۴ تاثیر خصوصیات الیاف در مشخصات مکانیکی بتن الیافی

منظور از خصوصیات ماتریس اندازه، شکل، نسبت حجمی و نحوه قرارگیری الیاف در ماتریس بتنی است. که به نوع تاثیر آنها در مقاومت کششی و شکل پذیری بتن الیافی اشاره خواهیم کرد.

۳-۴-۱ نسبت حجمی الیاف (V_f):

افزایش درصد الیاف و توزیع یکنواخت آنها در ماتریس مانع از رشد ترکها شده و تغییر شکل های موضعی را به تاخیر می اندازد. از طرف دیگر افزایش نسبت حجمی الیاف باعث کاهش کارایی بتن می شود. ماکزیمم حجم وابسته به نسبت ابعاد الیاف است. کارایی خوبی می توان از بتن الیافی انتظار داشت.

۳-۴-۲ نسبت ظاهری الیاف ($\frac{l}{d}$):

نسبت ظاهری برابر با نسبت طول به قطر معادل الیاف می باشند. افزایش نسبت ظاهری باعث بهبود مقاومت کششی و شکل پذیری بیشتر کامپوزیت می شود. همینطور میزان انرژی شکست را بالا می برد. چرا که انرژی به طور مستقیم با مربع طول و به طور معکوس با جذر قطر رابطه دارد. اگر الیاف شکل پذیر و دارای مدول الاستیسیته پایین باشد مقاومت بیرون کشیدگی افزایش پیدا می کند. در مورد الیاف شکننده افزایش زاویه تمایل باعث کاهش مقاومت بیرون کشیدگی خواهد شد [۱۵].

۳-۴-۳ فاصله و سطح مخصوص الیاف:

فاصله الیاف و سطح مخصوص^۱ آنها پارامترهایی هستند که کارایی بتن تازه و خصوصیات مکانیکی بتن سخت شده را تحت تاثیر قرار می دهد. سطح مخصوص عبارتند از سطح کل الیاف موجود در واحد حجم بتن. فاصله الیاف تابعی از سطح مقطع، نسبت حجمی و زاویه تمایل آنها

^۱ - Specific Surface

می‌باشد. در صورتی که فاصله الیاف کم باشد، انرژی بیشتری برای اختلاط و تراکم بتن نسبت به حالتی که از الیاف درشت‌تر و با فاصله بیشتر استفاده شود نیاز می‌باشد. سطح مخصوص الیاف عامل موثری در کاهش فاصله و باز شدگی ترک‌ها به شمار می‌رود با افزایش سطح مخصوص الیاف ترک‌های مویی با فاصله کم ایجاد می‌شود توانایی الیاف برای جلوگیری از رشد ترک بستگی به فاصله الیاف در سطح ترک خورده دارد. کاهش فاصله الیاف باعث افزایش مقاومت الیاف در برابر ترک خوردگی خواهد شد [۱۵].

میانگین فاصله الیاف با فرض توزیع یکنواخت الیاف در ماتریس سخت شده سیمانی محاسبه و معادله پیشنهادی برای تخمین فاصله بین الیاف مطابق زیر بیان شده است [۱۱]:

$$S = \frac{K d}{\sqrt{V_f}} \quad (3-18)$$

S فاصله الیاف، K ضریب ثابت بین ۰٫۸ تا ۱٫۱۲، که به جهت‌گیری الیاف وابسته است، d قطر الیاف و V_f نسبت حجمی الیاف است.

۳-۴-۴ شکل الیاف:

به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی FRC درک رفتار بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس اهمیت ویژه‌ای دارد. مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیدن از ماتریس ناشی از دو عامل اصطکاک و مهار مکانیکی است. عامل اصطکاک وابسته به کیفیت سطح تماس الیاف و ماتریس و خصوصیات مصالح دارد که با افزایش لغزش تا حد زیادی از بین می‌رود. مهار مکانیکی ناشی از هندسه الیاف و ایجاد تغییر شکل در آنها می‌باشد. این عامل بعد از جداشدگی الیاف از ماتریس و لغزش اندک فعال شده و بسته به کیفیت مهار تا تغییر شکل‌های زیاد مقاومت خود را حفظ می‌کند.

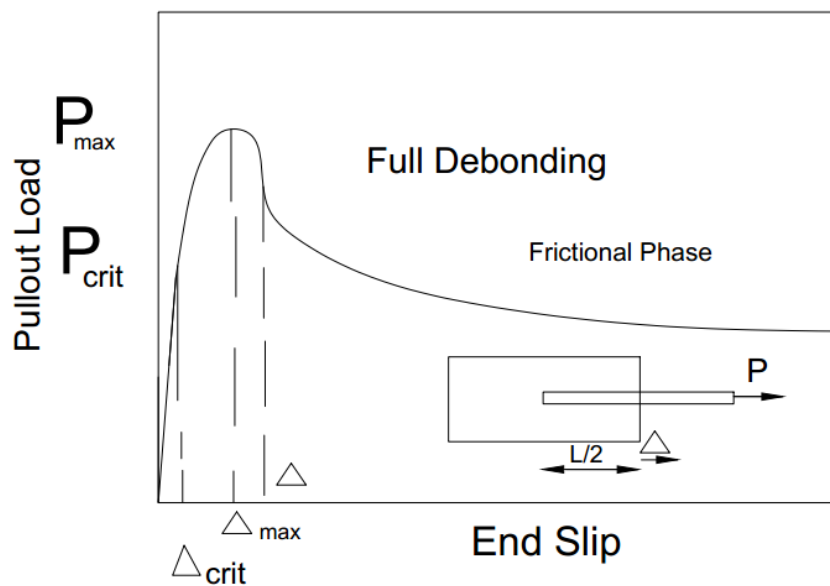
۳-۵ رفتار بیرون کشیدن انواع الیاف از ماتریس بتنی:

درمورد الیاف درشت مقاومت بیرون کشیدگی معمولاً با افزایش لغزش کاهش پیدا می‌کند. در مقابل مقاومت بیرون کشیدگی ریز الیاف با افزایش لغزش افزوده می‌شود. این رفتار در مورد الیاف آبدوست مانند نایلون بیش از الیاف دافع آب مانند پلی پروپیلن به چشم می‌خورد. قطر الیاف آبدوست بعد از اختلاط در ماتریس سیمانی افزایش پیدا می‌کند، که دلیل آن نفوذ آب به داخل الیاف می‌باشد. در نتیجه تورم الیاف تنش فشاری در سطح تماس الیاف و ماتریس ایجاد شده و مقاومت بیرون کشیدن آنها افزایش پیدا می‌کند. در مورد الیاف تغییر شکل یافته مانند قلابدار^۱ و مجعد نوع بیرون کشیدن و خرابی متفاوت است و ممکن است با گسیختگی یا تغییر شکل الیاف همراه باشد [۱۶]:

۳-۵-۱ الیاف صاف:

با توجه به مدل تئوری ارائه شده Naaman در رابطه با بیرون کشیدگی الیاف صاف معمولی که به طور مستقیم در ماتریس سیمانی مدفون شده‌اند شکل (۳-۷)، با رسیدن نیروی بیرون کشیدگی به P_{cri} و میزان لغزش Δ_{cri} ، جدا شدگی الیاف از ماتریس آغاز می‌شود و تمام طول الیاف را در بر می‌گیرد. در این حالت تنش برشی الاستیک در سطح تماس الیاف و ماتریس از مقاومت پیوستگی بیشتر است. بین Δ_{cri} و Δ_0 مقاومت بیرون کشیدگی ترکیبی از تنش چسبندگی و اصطکاک می‌باشد. بعد از Δ_0 مقاومت بیرون کشیدگی توسط اصطکاک تامین می‌شود. [۱۷]:

¹ - Hooked



شکل (۷-۳): رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی صاف [۱۷]

۳-۵-۲ الیاف قلابدار:

برای بررسی رفتار بیرون کشیدن الیاف فولادی قلابدار سه نوع آزمایش انجام می‌شود [۱۷]:
دسته اول بیرون کشیدن الیاف قلابدار از مکعب بتنی، دسته دوم بیرون کشیدن الیافی که انتهای آن بریده شده است، هدف از این آزمایش میزان چسبندگی الیاف و ماتریس و جداکردن تاثیر هندسه الیاف است. دسته‌ی سوم آزمایش بر روی الیاف قلابداری که سطح آن به روغن آغشته شده است. هدف از این آزمایش حذف چسبندگی الیاف و ماتریس می‌باشد.

مراحل بیرون کشیدن الیاف قلابدار از ماتریس بتنی شامل سه مرحله است: مرحله الاستیک (قبل از Δ_{crit})، مرحله‌ی جداشدگی جزئی (بین Δ_{crit} و Δ_0)، که این دو مرحله به خوبی منطبق با الیاف صاف است. قبل از شروع مرحله‌ی سوم مرحله مهار مکانیکی قلاب انتهایی فرا می‌رسد. در این مرحله با حرکت الیاف و تغییر شکل آن در ماتریس مفصل پلاستیک ایجاد شده که در حین بیرون کشیده شدن الیاف این مفاصل جا به جا خواهند شد. ایجاد مفاصل پلاستیک باعث افزایش مقاومت

بیرون کشیده شدن می‌شود.

۳-۵-۳ الیاف مجعد:

مقاومت الیاف مجعد و انرژی جذب شده در حین بیرون کشیده شدن از ماتریس تابعی از طول و ارتفاع موج‌هاست. اگر طول موج کم و ارتفاع موج زیاد باشد علاوه بر افزایش مقاومت بیرون کشیدگی، انرژی جذب شده کاهش می‌یابد و امکان گسیختگی الیاف وجود دارد [۱۴].

۳-۵-۴ الیاف پیچیده:

یکی دیگر از روش‌های متداول برای ایجاد مهار مکانیکی در الیاف فولادی پیچاندن آنها در امتداد طول می‌باشد. الیاف پیچیده، الیافی با سطح مقطع غیر دایره‌ای هستند که حول محور طولی خود پیچیده شده‌اند. که به دلیل دارا بودن سطح تماس بیشتر در ازای سطح مقطع یکسان و ایجاد لنگر پیچشی در هنگام بیرون کشیدگی مقاومت بیرون کشیدگی بیشتری دارند. استفاده از الیافی که رفتار سخت شدگی کرنشی از خود نشان می‌دهند، موثرترین روش برای دستیابی به HPFRCC است [۱۸].

فصل ۴

فرآیند خوردگی و آزمایشات مربوطه بر روی
نمونه‌های بتن مسلح به (آرماتور و الیاف فلزی)

فصل چهارم: فرایند خوردگی و آزمایشات مربوط بر روی

نمونه‌های بتن مسلح (آرماتور و الیاف فلزی)

۴-۱ مقدمه

استفاده روز افزون از بتن مسلح تنها به علت عملکرد مکانیکی خوب آن نیست، بلکه به علت دوام و پایداری طولانی مدت آن نیز می‌باشد. بتن نسبت به فولاد از دوام بالاتری برخوردار است و هنگامی که فولاد توسط بتن احاطه می‌گردد محیط مقاومی را برای فولاد ایجاد کرده و فولاد می‌تواند به عنوان مسلح کننده در بتن تا مدت طولانی مورد استفاده قرار گیرد. مشروط براین که بتن احاطه کننده بتواند از نظر فیزیکی و شیمیایی آرماتور را محافظت نموده و از خوردگی آرماتور^۱ جلوگیری کند.

آلودگی سازه‌های بتن آرمه به یون کلر عمدتاً در محیط‌های دریایی و یا در اثر استفاده از نمک‌های یخ زدا در پل‌ها به وجود می‌آید. این آلودگی باعث نوعی خوردگی الکتروشیمیایی می‌شود. خوردگی، رفتار سازه را به سرعت تنزل داده و موجب کاهش سریع مقاومت و سرویس دهی سازه می‌گردد.

تخریب سازه‌های دریایی^۲ بتنی ممکن است، ناشی از اثرات فیزیکی یا شیمیایی آب دریا بر روی آنها باشد. خوشبختانه تجزیه بتن توسط خودش منجر به آسیب وسیع به سازه‌های مدرن نشده است، ولی به هر حال از بین رفتن و آسیب پوشش بتنی روی میلگردها، عامل اصلی تشدید خوردگی فولاد روی بتن است. اعضای مانند سرشمع‌ها، تیرها و عرشه‌ها در محیط دریایی فعال و در جایی که امواج و پاشش اتفاق می‌افتد، نسبت به محیط‌های با آسیب کمتر، نوعاً تخریب‌های جدی‌تری را متحمل

^۱ -Corrosion of Reinforcement

^۲ -Marine Structures

می‌شوند. به همین دلیل در بار اندازه‌های ساحلی، اعضای نزدیک به خشکی دچار تخریب‌های بیشتری نسبت به اعضای دورتر از ساحل هستند. در واقع وقتی ضربه امواج به شیب ساحل و دیوار ساحلی برخورد می‌کند، اسپری‌های مملو از یون‌های کلرید مستقیماً پرتاب شده و به این اعضاء برخورد می‌نمایند. نوع اسکلت سازه نیز نقش مهمی را در روند پیشرفت خوردگی بازی می‌کند. گوشه‌های سازه‌ای به دلیل امکان نفوذ بیشتر کلر از دو وجه آنها و همچنین نیاز به فشار کمتر جهت تخریب سازه‌ای ناشی از احاطه نبودن کامل، با سرعت بیشتری دچار خوردگی، آسیب و تخریب می‌گردند.

۴-۲ تهدیدهای محیطی در دوام سازه‌ها

میزان خرابی بخش‌های مختلف از یک سازه بستگی به موقعیت آنها نسبت به ناحیه جزر و مدی نیز دارد. جزر و مد به بالا آمدن و پایین رفتن آب اقیانوس‌ها با برنامه منظمی به صورت دوبار در روز اطلاق می‌شود. اختلاف سطح آب در یک جزر و مد از حد ۰/۵ متر در بعضی مناطق تا حتی ۱۵ متر در مناطق دیگر می‌رسد. نیروهایی که توسط امواج اقیانوس ایجاد می‌شوند، اغلب بسیار بزرگ بوده و تاثیر آنها بر سازه‌های ثابت دریایی مبنای طراحی قرار می‌گیرد.

بر حسب موقعیت قرارگیری سازه در آب دریا، می‌توان روش‌های تخریب بتن را به سه صورت زیر دسته بندی کرد شکل (۴-۱) [۱۱]:

الف (بتن‌هایی که بالاتر از جزر و مد^۱ قرار گرفته و در معرض آب نیستند. بلکه در معرض جریان هوایی هستند که نمک‌های دریا در آن وجود دارد. حمله‌هایی که روی این قسمت بتن رخ می‌دهد، ممکن است به خوردگی آرماتور بتن منجر گردد.

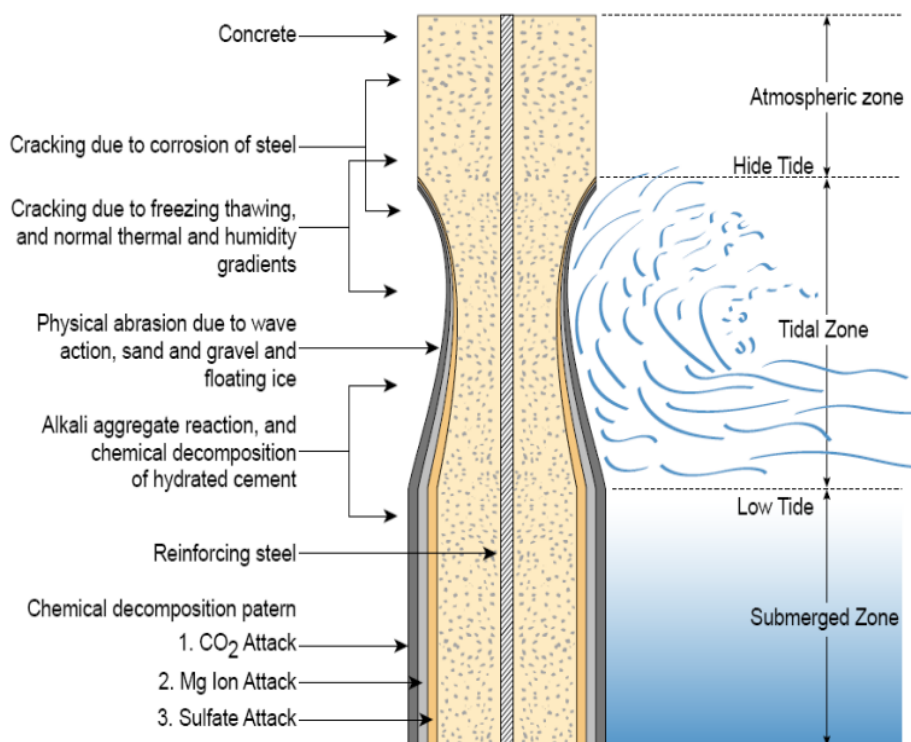
ب (بتن‌های قرار گرفته در ناحیه جزر و مد^۲، می‌توانند تحت تاثیر تر و خشک شدن متناوب،

^۱ - High Tide Line

^۲ - Tidal Zone

خوردگی آرماتور، واکنش‌های شیمیایی که باعث از بین رفتن محصولات هیدراتاسیون می‌شوند و فرسایش ناشی از برخورد امواج و ماسه قرار گیرند.

ج (قسمتی از سازه بتنی که زیر خط جزر و مد^۱ قرار دارد ، برای انجام واکنش‌های شیمیایی آمادگی کامل دارد ولی نسبت به خوردگی فولاد کمتر آسیب می‌بیند.



شکل (۴-۱): خرابی قسمت‌های مختلف از سازه‌های بتن مسلح در مجاورت آب دریا [۱۱]

در بتنی که مرتباً در معرض سیکل‌های تر و خشک شدن با آب دریا یا محلول‌های خطرناک آسیب پذیر قرار دارد، ورود کلریدها به داخل بتن سرعت افزایش یابنده خواهد یافت. بتن در حالتی که خشک است، آب نمک را جذب کرده و تحت بعضی شرایط ممکن است این جذب ادامه یابد تا بتن به حد اشباع برسد. سپس اگر شرایط خارجی تغییر کند و بتن خشک شود جهت حرکت آب برعکس می‌شود و آب از طریق منافذ مجاور هوا تبخیر خواهد شد. با تبخیر آب منفذی، نمک‌ها باقی خواهند

^۱ - Low Tide Line

ماند و غلظت آن در نزدیکی سطح بتن افزایش خواهد یافت. بدین طریق گرادیان غلظت باعث حرکت نمک‌ها به نواحی با غلظت کمتر می‌شود. در سیکل‌های بعدی با حرکت آب به سمت خارج و حرکت نمک به سمت داخل، نمک موجود در محلول منافذ مویین زیادتر می‌شود و ورود و پیشرفت آنها به طرف فولاد بطور فزاینده‌ای صورت می‌گیرد. بسته به رطوبت نسبی خارجی و مدت دوره خشک شدن این امکان وجود دارد که بیشتر آب مناطق خارجی بتن تبخیر شده و آب باقیمانده، از نمک اشباع می‌شود و کریستال‌های نمک را به وجود می‌آورد. اگر دوره تر شدن کوتاه‌تر باشد وضع بحرانی‌تر خواهد شد. ممکن است اختلاف قابل توجهی در میزان خوردگی بخش‌های مختلف یک سازه وجود داشته باشد چرا که ورود کلریدها به داخل بتن به شدت تحت تاثیر ترتیب دقیق دوره‌های تر و خشک می‌باشد و این دوره‌های تر و خشک شدن به علت عواملی از جمله جابجایی، آب دریا، باد و قرار گرفتن در معرض نور خورشید می‌باشند. بنابراین بیشترین آسیب دیدگی بتن در جایی است که بتن گاهگاهی با آب دریا تر شود و یا در مجاورت با آب دریا شسته شود.

ترک خوردن پوشش بتن، ورود کلریدها را آسان می‌کند، لذا خوردگی افزایش خواهد یافت. لازم به ذکر است که ترک‌های عریض‌تر از ۰,۲ تا ۰,۴ میلیمتر شرایط را برای ورود کلر حادتر می‌کند. با توجه به تاثیر ترک‌های ایجاد شده در پوشش بتن در اثر بارگذاری سازه و ایجاد تنش‌های کششی در آن بر تسریع روند خوردگی، آئین نامه‌ها با توجه به نوع شرایط محیطی، حداکثر عرض ترک را، تحت اثر بارگذاری محدود می‌کنند. همانطور که پیشتر اشاره شد بارگذاری سازه تنها منشاء ایجاد ترک نیست بلکه عواملی نظیر ذوب و یخبندان، جمع شدگی پلاستیک، جمع شدگی ناشی از خشک شدن، حمله سولفات‌ها و واکنش‌های قلیایی می‌توانند ترک‌هایی ایجاد کنند. نقش ترک‌ها در تسریع خوردگی علاوه بر عرض ترک، موقعیت قرارگیری آن می‌باشد. بحرانی‌ترین ترک‌ها آنهایی هستند که در راستای آرماتور طولی و عمده‌ها در اثر تجمع محصولات خوردگی اتفاق بیفتد. علاوه بر این درجه حرارت‌های بالا اثرات متعددی روی خوردگی دارد و میزان کلرید آزاد موجود در آب منافذ را بالا می‌برد و واکنش‌های شیمیایی سریعتر انجام می‌شود. افزایش دما در حد ۱۰ درجه سانتیگراد باعث می‌شود که

سرعت واکنش‌های خوردگی را دو برابر کند. از طرفی اختلاف درجه حرارت در سطح بتن و داخل آن مکانیزم نفوذ را بیشتر تحت تاثیر خود قرار می‌دهد.

همانطور که اشاره شد، وزش باد می‌تواند باعث نفوذ یون کلر موجود در هوا به داخل بتن شود. تری و خشکی مکرر مانند آن چه در منطقه جزر و مد و یا در محلی که در معرض پاشش آب دریا می‌باشد به شدت بر خوردگی میلگردها تاثیر می‌گذارد و آن را تشدید می‌کند. افزایش غلظت نمک-های موجود در آب منطقه و در اختیار قرار گرفتن رطوبت و اکسیژن می‌تواند از علل تشدید دهنده‌ی آن نیز باشد.

اگر سازه کاملاً غوطه‌ور باشد و معمولاً از آب دریا خارج نشود اکسیژن زیادی برای زنگ زدگی میلگردها در محیط بتن حضور نخواهد داشت و خوردگی با تاخیر قابل ملاحظه و سرعت کم اتفاق می‌افتد. به همین دلیل آیین نامه‌ها حداکثر نسبت آب به سیمان بتن مغروق در آب دریا را ۰,۴۵ می‌دانند، در حالی که در سایر شرایط در محیط خورنده این حداکثر به ۰,۴ محدود می‌شود. بتن مدفون در خاک مرطوب حاوی سولفات و یون کلر شرایط بدتری نسبت به بتن مغروق در آب دریای شور دارد که یک علت آن را نیز می‌توان وجود اکسیژن و کاملاً اشباع نبودن بتن دانست.

۴-۲-۱ مصالح موجود در آب دریاها

ایران کشور پهناور است با شرایط اقلیمی ویژه، که در حال حاضر با روند رو به رشد طرح‌های عمرانی در بخش‌های نفت و گاز، نیروگاهی، سد سازی و پتروشیمی اهمیت افزایش طول عمر سازه‌ها و حفظ کیفیت آنها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. محیط‌های دریایی عموماً محیط‌های خشن برای مصالح معمولی از جمله بتن و فولاد هستند. آب دریا دارای یون‌ها و گازهای خورنده و جایگاه موجودات دریایی است که برای مصالح ساختمانی مضر هستند. فشارهای هیدرواستاتیکی و تغییرات بالای دما که اغلب در نواحی ساحلی و سازه‌های دریایی وجود دارند، قادر به سرعت بخشیدن به تخریب مصالح ساختمانی می‌باشند. ترکیبات شیمیایی آب‌های آزاد (اقیانوس‌ها) تقریباً یکسان است و

تفاوت آن بیشتر به درجه شوری آب مربوط می‌شود. درجه شوری آب در نواحی مختلف اقیانوس بین ۲/۳ تا ۴/۰ متغیر است. میزان متوسط املاح در آب خلیج فارس در مقایسه با املاح آب دریاهاى آزاد بر حسب ppm (قسمت در میلیون) در جدول (۴-۱) نشان داده شده است.

جدول (۴-۱): غلظت املاح مختلف در دریاها بر حسب ppm [۱۹]

نمک	آبهای دریاهاى آزاد	آبهای خلیج فارس
املاح کلسیم	۴۸۰-۵۰	۴۸۰
املاح منیزیم	۱۴۰۱۰-۳۰۶	۱۳۵۰۰
املاح سدیم	۲۱۹۰-۱۲۲۰۰	۱۲۶۰۰
املاح پتاسیم	۵۵۰-۷۰	۴۷۰
املاح سولفات	۲۸۱۰-۵۸۰	۳۳۰۰
املاح کلر	۲۰۰۰۰-۳۹۶۰	۲۳۴۰۰

ملاحظه می‌شود که غلظت انواع نمک‌ها در خلیج فارس معادل و یا بالاتر از حداکثر آن در آب دریاهاى آزاد است و نزدیک به ۹۵ درصد از تخریب‌های بتنی در سواحل آن به دلیل خوردگی در تقویت کننده‌های فلزی بتن می‌باشد. لذا در طرح و ساخت سازه‌های ساحلی و دریایی باید به آن توجه مخصوص و همه جانبه گردد.

۴-۳ اثر خوردگی بر رفتار سازه

لایه محافظ و غیر فعال اطراف آرماتور در بتن که به علت محیط قلیایی بتن اطراف آرماتور می‌باشد، در اثر نفوذ یون کلرید و دی اکسید کربن از بین رفته و خوردگی آغاز می‌شود. مهم‌ترین اثرات خوردگی که باعث کاهش عمر مفید سازه می‌گردند عبارتند از: ترک خوردن پوشش بتنی، از بین رفتن مقاومت پیوستگی، کاهش سطح مقطع آرماتور.

۴-۳-۱ مکانیزم‌های خوردگی فولاد در بتن

خوردگی یک فرآیند الکتروشیمیایی بین یک ماده، معمولاً فلز، و محیط اطراف آن می‌باشد که به تغییر خواص ماده منجر خواهد شد که در اثر انتقال یون‌های آهن از فولاد صورت می‌گیرد. انتقال یونها بوسیله واکنش الکتروشیمیایی و حل شدن یون های Fe^{2+} در محلول منفذی بتن انجام می‌شود. این حل شدن در حجم محدود محلول آبی منافذ بتن اطراف فولاد اتفاق می‌افتد. نتیجه‌ی فرآیند حل شدن کاهش وزن فولاد می‌باشد و در نتیجه قطر میلگرد کاهش می‌یابد.

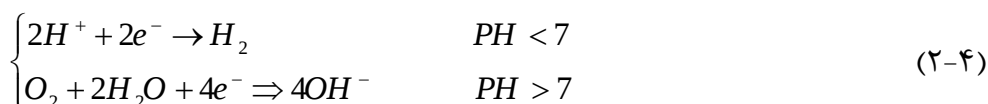
برای بررسی شرایط خوردگی فولاد در بتن باید با مفاهیم اصلی هر دو واکنش شیمیایی و فرآیندهای الکتریکی آن آشنا شویم، برای طراحی یک سازه بتن مسلح داشتن چنین اطلاعاتی به منظور کاهش مشکلات ناشی از خوردگی آرماتور در سازه ضروری می‌باشد.

مکانیزم الکتروشیمیایی که بدین طریق ایجاد می‌شود نتیجه فرآیندهای زیر است [۲۰]:

- ناحیه آندی، که با اکسیداسیون آهن و آزاد شدن الکترون‌ها همراه است، عبارتی:

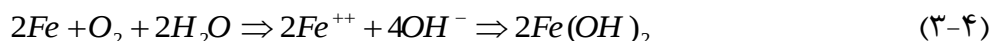


- ناحیه کاتدی، که الکترون‌های آزاد شده را به واسطه کاهش اکسیژن محلول در آب طبق واکنش زیر مصرف می‌کند و بسته به میزان PH در آن ناحیه یکی از واکنش‌های زیر رخ خواهد داد:

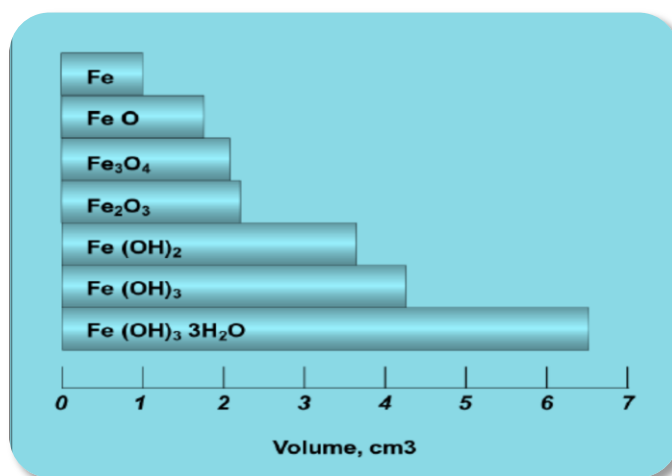


- حضور الکترولیت که عموماً محلولی آبی است و حامل عبور یونهاست. که در بتن محلول قلیایی منافذ به عنوان الکترولیت محسوب خواهد شد و باعث عبور جریان از آند با پتانسیل پایین به سمت کاتد با پتانسیل بالا خواهد شد.

- واکنش خوردگی سرتاسری، که نتایج زیر را ارائه می دهد:



که این فرآیند به تشکیل هیدروکسید آهن قابل حل منجر شده که با واکنش های بعدی و با افزایش تدریجی درحجم به تشکیل هیدرات غیرمحافظ هیدروکسیدهای آهن شکل (۲-۴) منجر می گردد.



شکل (۲-۴): افزایش حجم ناشی از محصولات خوردگی

این محصول خوردگی حجمی برابر با ۲ الی ۷ برابر حجم اولیه آهن، فضا اشغال کرده و در نتیجه تنش مکانیکی زیادی در بتن به وجود می آورد که به بروز گسیختگی و تورق منجر شده و ممکن است فرآیند خوردگی را تشدید کند. نفوذ بیشتر اکسیژن و رطوبت، فرایند تخریب را سریع تر می کند. یادآوری این نکته مهم است که در واکنش خوردگی، کلرورها در این فرآیند دخالتی ندارند و از این نظر هیچ کاهش و تحلیلی در مقدار کلرورها مشاهده نمی شود، بنابراین تا وقتی کلرورها به هر طریقی از سطح میلگردها زدوده نشوند، اثر مخرب آنها در غشاء مصونیت میلگردها ادامه خواهد داشت.

خوردگی فولاد در هر محیطی یک فرآیند پیش رونده می باشد که در اثر انتقال یون های آهن از فولاد صورت می گیرد. انتقال یون ها بوسیله واکنش الکتروشیمیایی و حل شدن یون های Fe^{2+} در

محلول منفذی بتن انجام می‌شود. این حل شدن در حجم محدود محلول آبی منافذ بتن اطراف فولاد اتفاق می‌افتد. نتیجه فرآیند حل شدن کاهش وزن فولاد می‌باشد و در نتیجه قطر میلگرد کاهش می‌یابد.

این محصولات خوردگی در یک مکان محدود در بتن اطراف فولاد به جا می‌ماند. تشکیل این محصولات خوردگی در یک مکان محدود باعث ایجاد فشارهای انبساطی می‌شود. مخصوصاً وقتی بتن در معرض یخ زدگی و آب شدگی یا تحت تاثیر عوامل محیطی دیگری قرار دارد میزان این تخریب شدیدتر می‌باشد. فشار داخلی ایجاد شده در اثر این فرآیند باعث ترک خوردن بتن از داخل به سمت خارج شده و در صورت ادامه روند خوردگی موجب نمایان شدن ترک‌هایی در امتداد آرماتور در سطح بتن می‌شود و در مراحل بعدی باعث ورقه شدن و متلاشی شدن پوشش در ناحیه وسیعی می‌گردد.

۴-۴ عوامل موثر بر خوردگی فولاد در بتن

جهت مقابله با پدیده خوردگی فولاد مدفون در بتن باید عوامل به وجود آورنده این پدیده در منطقه را شناخت، مهم‌ترین عوامل موثر بر خوردگی میلگردهای فولادی در بتن عبارتند از:

۴-۴-۱ مقدار و اندازه تخلخل‌ها در پوشش بتنی

سطح بتن به عنوان خط مقدم دفاع در برابر نفوذ عناصر مخرب محسوب می‌شود. ساختار این سطح با دیگر نقاط بتن، مخصوصاً مغزه بتن، کاملاً متفاوت است به طوریکه مقدار و اندازه تخلخل‌ها در این قسمت، بیشتر از مغزه بتن است. بنابراین لایه سطحی بتن آمادگی بیشتری برای نفوذ عوامل مخرب دارد.

تبخیر بیش از نیمی از آب بتن، از عوامل اصلی بروز خوردگی و نفوذپذیری بتن محسوب می‌شود

که سبب ایجاد لوله‌های موئین گشته و نفوذ مواد شیمیایی به داخل لوله‌های موئین باعث خوردگی آرماتورها و انبساط آنها تا ۶ برابر حجم اولیه گشته و نهایتاً با ترک خوردن بتن نفوذپذیری بتن تشدید خواهد شد و عمر سازه به شدت افت خواهد کرد.

۴-۴-۲ ورود کربنات

همانطور که اشاره شد، pH بالای بتن (حدوداً ۱۳) عاملی برای محافظت آرماتورها در برابر خوردگی است، که در اطراف آرماتور لایه‌ای محافظ (لایه اکسید) را ایجاد خواهد کرد.

مطابق با واکنش زیر، کلسیم سیلیکات (CH) موجود در سیمان پرتلند با آب واکنش داده و سیلیکات کلسیم هیدرات (CHS) و هیدروکسید کلسیم $(Ca(OH)_2)$ (آهک^۱) ایجاد می‌شود. آهک تولید شده با دیگر قلیایی‌های موجود در المان‌های خاکی نظیر پتاسیم، سدیم، خاصیت قلیایی در بتن تازه را افزایش می‌دهد.



با ورود CO_2 هوا واکنشی توسط کلسیم هیدروکسید موجود در بتن صورت می‌گیرد که تحت این واکنش کلسیم کربنات ($CaCO_3$) تولید و pH بتن تا حدود ۹,۵ پایین خواهد آمد. پوشش محافظ آرماتور وقتی در معرض کلسیم کربنات قرار می‌گیرد تخریب می‌شود، در این مرحله خوردگی آغاز می‌شود.



با پیشروی کلسیم کربنات در اعماق بتن و رسیدن آن به آرماتورها، لایه‌ی محافظ به واسطه کاهش pH در معرض خوردگی قرار می‌گیرد و به مرور زمان، شرایط برای تخریب آن فراهم خواهد

^۱ - Lime

شد. ضریب انتشار CO_2 با ارائه فرضیات ساده شده مطابق روابط زیر ارائه شده‌اند [۲۱]:

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{CO_2} \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x}) - f_{CO_2} \quad (۴-۶)$$

که در آن، C_{CO_2} غلظت CO_2 آزاد، D_{CO_2} ضریب انتشار CO_2 در بتن، x فضای مختصاتی. f_{CO_2} میزان کل CO_2 انتشار شده می‌باشد.

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = D_{e,CO_2} \frac{\partial^2 C_{CO_2}}{\partial x^2} \quad (۴-۷)$$

این فرضیات عبارتند از؛ (۱) انتشار CO_2 در ماتریس بتن در تمام ریز ساختار آن یکنواخت است. (۲) ساختار و خواص بتن با زمان تغییر نمی‌کند. (۳) با انتشار CO_2 تغییرات قابل ملاحظه‌ای در خواص بتن و ریز ساختار آن نخواهیم داشت. در نهایت ضریب انتشار موثر CO_2 در بتن به صورت زیر بیان خواهد شد:

$$D_{e,CO_2} = \frac{D_{CO_2}}{1 + \frac{\partial f_{CO_2}}{\partial C_{CO_2}}} \quad (۴-۸)$$

با حل معادله دیفرانسیل بالا تحت شرایط مرزی مکانی و زمانی زیر؛

$$\begin{cases} C_{CO_2} \big|_{x=0} = C_{s,CO_2} = const \\ C_{CO_2} \big|_{x=\infty} = C_{\infty,CO_2} = 0 \\ C_{CO_2} \big|_{t=0} = C_{i,CO_2} = 0 \end{cases} \quad (۴-۹)$$

میزان غلظت CO₂ موجود در بتن مطابق رابطه زیر بدست خواهد آمد^۱:

$$D_{CO_2} = C_{s,CO_2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[x / (D_{e,CO_2} t)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}$$

رابطه‌ای تجربی زیر نیز عمق نفوذ کربنات را بر حسب سال بیان می‌کند شکل (۳-۴):

$$x = \sqrt{2tD \frac{C_1}{C_2}} \quad (۱۰-۴)$$

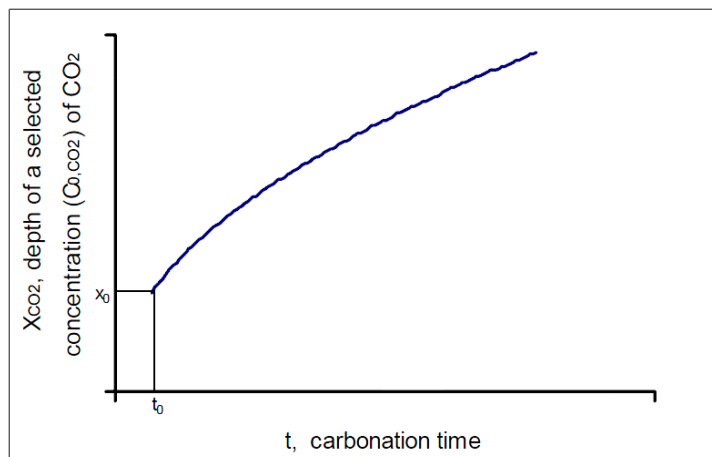
که در آن، x عمق کربناته بر حسب میلیمتر، D ضریب انتشار CO₂ بر حسب $\frac{mm^2}{year}$ ، C_1

غلظت CO₂ آزاد موجود در هوا ($\frac{g}{m^3}$ ، ۰٫۸-۰٫۶)، C_2 مقدار CO₂ حاصل از واکنش‌های بتن ($\frac{g}{m^3}$)

غلظت CO₂ آزاد موجود در هوا ($\frac{g}{m^3}$ ، ۰٫۸-۰٫۶)، C_2 مقدار CO₂ حاصل از واکنش‌های بتن ($\frac{g}{m^3}$)

غلظت CO₂ آزاد موجود در هوا ($\frac{g}{m^3}$ ، ۰٫۸-۰٫۶)، C_2 مقدار CO₂ حاصل از واکنش‌های بتن ($\frac{g}{m^3}$)

غلظت CO₂ آزاد موجود در هوا ($\frac{g}{m^3}$ ، ۰٫۸-۰٫۶)، C_2 مقدار CO₂ حاصل از واکنش‌های بتن ($\frac{g}{m^3}$)



شکل (۳-۴): رابطه غلظت CO₂ بر حسب زمان در اعماق بتن

^۱ - $\operatorname{erf}(\lambda) = 1 - \operatorname{erfc}(\lambda) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\lambda} e^{-z^2} dz$

۴-۴-۳ ورود کلراید

منبع ورود کلراید به سطح بتن، مواد تشکیل دهنده بتن مانند آب، سنگدانه‌ها، سیمان پرتلند و مواد افزودنی، نمک‌های ناشی از یخبندان، تماس با آب‌های شور و آب دریا و یا استفاده از آب شور برای ساخت و عمل آوری بتن می‌باشد.

پخش و انتشار کلراید از سطح به اعماق بتن و همین‌طور غلظت کلراید با گذشت زمان افزایش می‌یابد. در خصوص میزان انتشار کلر اعماق مختلف بتن رابطه زیر پیشنهاد شده است [۲۰]؛

$$\frac{\partial C_{Cl}}{\partial t} = D_{Cl} \frac{\partial^2 C_{Cl}}{\partial x^2} \quad (۴-۱۱)$$

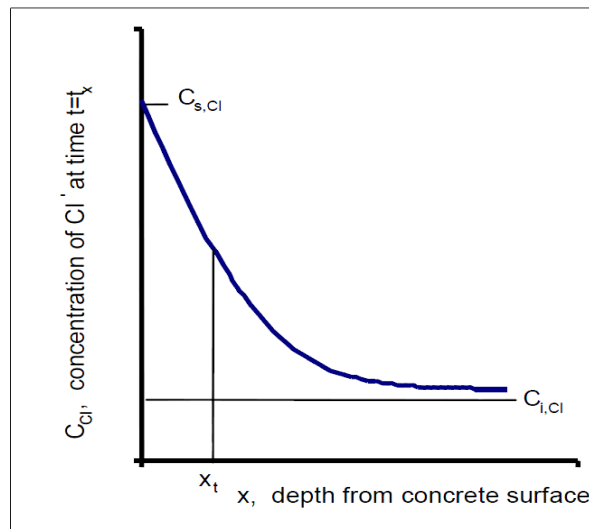
C_{Cl} غلظت کلراید آزاد در بتن، D_{Cl} ضریب انتشار آزاد کلر می‌باشد.

که با توجه به شرایط مرزی معادله دیفرانسیل به گونه زیر حل خواهد شد.

$$C_{Cl} = C_{s,Cl} - (C_{s,Cl} - C_{i,Cl}) \operatorname{erf} \left[x / (4D_{Cl}t)^{1/2} \right] \quad (۴-۱۲)$$

که در آن، $C_{s,Cl}$ غلظت آزاد کلر در لایه سطحی از پوشش بتن، $C_{i,Cl}$ غلظت آزاد کلر در داخل بتن قبل از حمله یون‌های کلر، x و t عمق نفوذ و مدت زمان می‌باشد شکل (۴-۴).

میزان غلظت، سرعت و انتشار وابسته به منبع ورود کلراید و چگونگی محافظت سازه در برابر بارندگی‌های فصلی است.



شکل (۴-۴): میزان غلظت Cl در اعماق مختلف بتن در زمان مشخص

رابطه ای تجربی زیر نیز عمق نفوذ کلر را بر حسب زمان بیان می کند :

$$X_{Cl} = A_{0,Cl} t^{1/2} \quad (۴-۱۳)$$

هنگامی که غلظت کلراید به سطح بحرانی رسید، آستانه مقدار حدی نام دارد که در این مقدار حدی فرایند خوردگی آغاز خواهد شد.

طبق آیین نامه های ASTM C 1152 مقدار کلر مجاز در بتن ۰,۴ درصد وزنی سیمان می باشد. مقدار ماکزیمم کلر موجود در سنگدانه ها نباید از ۰,۰۵ درصد وزنی سنگدانه تجاوز کند. مطابق با آیین نامه آبا مقدار کلرید مجاز قابل حل در سنگدانه های بکار رفته در بتن مسلح را به ۰,۰۴ درصد وزنی سنگدانه محدود می کند. همین مقدار مجاز کلر در آب مصرفی در طرح اختلاط بتن را ۵۰۰ ppm محدود می نماید.

۴-۴-۴ حملات سولفاتی

در بتنی که توسط سولفات‌ها مورد حمله قرار گرفته است معمولاً خرابی از لبه‌ها و گوشه‌ها شروع شده و با ترک خوردن و تجزیه بتن ادامه می‌یابد. دلیل بروز این علائم آن است که حمله‌ی سولفات‌ها باعث تشکیل سولفات کلسیم ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (گچ^۱) و سولفوآلومینات کلسیم ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) یا (اترینگایت^۲) می‌گردد. این محصولات نسبت به ترکیباتی که جایگزین آنها شده‌اند، دارای حجم بیشتری بوده و باعث انبساط و ریختن بتن سخت شده می‌گردند [۱۱]:

براساس ACI 318 محیط‌های سولفاتی را با توجه به میزان حملات سولفاتی به صورت جدول (۲-۴) می‌توان دسته بندی کرد:

جدول (۲-۴) : طبقه بندی محیط‌های مختلف در معرض حملات سولفاتی [۱۱]

شرایط محیطی

	غلظت سولفات بر اساس SO_4	
	در آب بر حسب (ppm)	در خاک بر حسب (درصد)
کم	<150	<0.1
معتدل	150 to 1500	0.1 to 0.2
شدید	1500 to 10000	0.2 to 2.0
خیلی شدید	>10000	>2.0

سولفات منیزیم دارای تاثیر مخرب بیشتری نسبت به سولفات‌های دیگر می‌باشد زیرا به تجزیه شدن سیلیکات‌های کلسیم (C_2S و C_3S) هیدراته شده و همچنین $\text{Ca}(\text{OH})_2$ و C_3A هیدراته شده منتهی می‌گردد. سپس سیلیکات منیزیم هیدراته شده که دارای هیچ خاصیت چسبندگی نمی‌باشد،

¹ - Gypsum

² - Ettringite

تشکیل می‌شود [۱۱].

از آنجا که C_3A توسط سولفات‌ها مورد حمله قرار می‌گیرد، با مصرف سیمان‌هایی با C_3A کم، نظیر سیمان‌های ضد سولفات (نوع V)، می‌توان آسیب پذیری بتن در مقابل حمله سولفات‌ها را کاهش داد. همچنین می‌توان با استفاده از سیمان پرتلند روباره آهن‌گذاری (نوع IS) و سیمان پرتلند پوزولانی (نوع IP) مقاومت بتن را افزایش داد.

چند پارامتر تعیین کننده در حملات سولفاتی عبارت است از غلظت یون‌های سولفات، دمای واکنش، نوع خواص شیمیایی، ضریب پخش یون‌های سولفات در بتن، نحوه‌ی عمل آوری و نسبت (آب به مجموع سیمان و پزولان، (w/binder)) می‌باشد.

۴-۵ خرابی‌های ناشی از خوردگی

دلیل اهمیت مسئله خوردگی آسیب‌هایی است که در اثر آن بر سازه اعمال خواهد شد. این آسیب‌ها شامل دو نوع سازه‌ای و غیر سازه‌ای می‌باشند که آسیب‌های غیر سازه‌ای شامل بد نما شدن سطح بتن به علت ترک خوردگی، تغییر رنگ آن و ایجاد تورم بخصوص در بخش نازک کاری سازه‌ها می‌باشد و آسیب‌های سازه‌ای به علت کاهش ضریب اطمینان سازه، مشخصات مکانیکی، کاهش قطر آرماتور، مقاومت پیوستگی آرماتور و بتن، ترک خوردن و پوکیدن پوشش بتن در مقابل بارهای وارده است.

مهم‌ترین آسیب‌های ناشی از خوردگی ترک خوردن پوشش بتن و کاهش مقاومت پیوستگی می‌باشد. چرا که قبل از آنکه کاهش سطح مقطع آرماتور اهمیت پیدا کند و باعث ضعف در قدرت باربری عضو سازه‌ای شود، پوشش ترک خورده و مقاومت پیوستگی نیز کاهش می‌یابد.

۴-۵-۱ تاثیر خوردگی آرماتور بر ترک خوردگی پوشش بتن

تحقیقات انجام شده در روی دوام سازه‌ها عمدتاً به تحقیقات در رابطه با ترک خوردگی منتهی می‌شود. در ترک خوردن پوشش بتنی مهم‌ترین فاکتور نسبت ضخامت پوشش به قطر آرماتور (c/d) می‌باشد. شبیه سازی افزایش حجم آرماتور خورده شده در آزمایشات برای تعیین فشار لازم برای ترک خوردن پوشش بتن، معمولاً با ایجاد حفره در نمونه و اعمال فشار داخلی توسط پمپ هیدرولیکی انجام می‌شود. تحقیقاتی با تکیه بر این اصل در خصوص یافتن رابطه میزان فشار بر ترک خوردگی ارائه شد.

در سال ۱۹۸۶ (Williamson et al) آزمایشات خود را روی نمونه‌های مکعب با ابعاد ۱۵۰ میلیمتر که دارای سوراخ‌هایی به قطر ۲۲ میلیمتر بودند انجام داد. موقعیت سوراخ‌ها در قطعه چنان تغییر می‌کرد که نسبت c/d در محدوده ۱ به ۳ قرار داشت. (با فرض مقاومت کششی ۵ مگاپاسکال برای بتن) این سوراخ‌ها نشان‌دهنده محل آرماتور بوده و در این آزمایش شبیه سازی فشار ناشی از افزایش حجم حاصل از محصولات خوردگی با ایجاد فشار توسط پمپ هیدرولیکی انجام شد [۲۲].

Morinaga با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ۱۵۰ و ۲۰۰ که هر کدام دارای سوراخ‌هایی به قطرهای ۹، ۱۹، ۲۵ میلیمتر بودند. آزمایش خود را انجام داد. نسبت c/d بین ۱،۵ تا ۳،۵ قرار داشت. (مقاومت کششی از طریق آزمایش برزلی معادل ۱،۱ تا ۳،۳ برآورد شد) در نهایت نتایج تجربی خود را در قالب فرمولی ارائه داد که در این فرمول فشار لازم تابعی از مقاومت کششی بتن و نسبت پوشش به قطر آرماتور می‌باشد [۲۳].

$$P_{\max} = f_t \left(1 + 2 \frac{c}{d}\right)^{0.85} \quad (۴-۱۴)$$

در بررسی‌های انجام شده او، نتایج حاکی از آن است که اگر نسبت c/d به اندازه کافی بزرگ باشد (بزرگتر از ۳) در درصد‌های بالای خوردگی پوشش بتنی مقاومت کرده و اثری از ترک خوردگی

در آن دیده نخواهد شد. همچنین در نمونه‌های با پوشش مساوی اما قطر متفاوت آرماتور، برای نمونه‌های با قطر بزرگتر فشار لازم کمتر می‌باشد. علت این امر آن است که در قطر بالاتر به علت سطح تماس بیشتر آرماتور با بتن نیروی انبساطی ایجاد شده بیشتر بوده، بنابراین با اعمال فشار مساوی به نمونه‌های با پوشش مساوی، تغییر شکل ایجاد شده در بتن در نمونه با قطر آرماتور بزرگتر بیشتر است. و باعث می‌شود ترک خوردگی سریعتر رخ دهد.

۴-۵-۲ تاثیر خوردگی آرماتور بر مقاومت پیوستگی بتن و فولاد

Mangat et all با تنظیم یک برنامه آزمایشگاهی گسترده تلاش کردند که مقاومت خمشی باقیمانده تیرهای بتنی با آرماتورهای کششی با درجات مختلف خوردگی را بدست آورند. نمونه‌های آزمایشگاهی شامل ۱۱۱ نمونه بتنی به طول ۹۱۰ میلیمتر و مقطع مستطیلی ۱۰۰ در ۱۵۰ میلیمتر همراه با دو آرماتور به قطرهای ۱۰ یا ۸ میلیمتر مسلح شده بودند. روش اعمال خوردگی، خوردگی تسریع شده^۱ بود. و توانستند با مستغرق کردن نمونه‌ها در محلول ۳٫۵ درصدی آب نمک و اعمال دانسیته‌ی جریانی برابر ۱، ۲، ۳ و ۴ A/cm^2 با تخمین مدت زمان اعمال جریان، به وسیله قانون فارادی، به درصد خوردگی‌های مورد نظر خود دست یابند [۲۴].

$$\Delta w = \frac{AIt}{ZF} \quad (۴-۱۵)$$

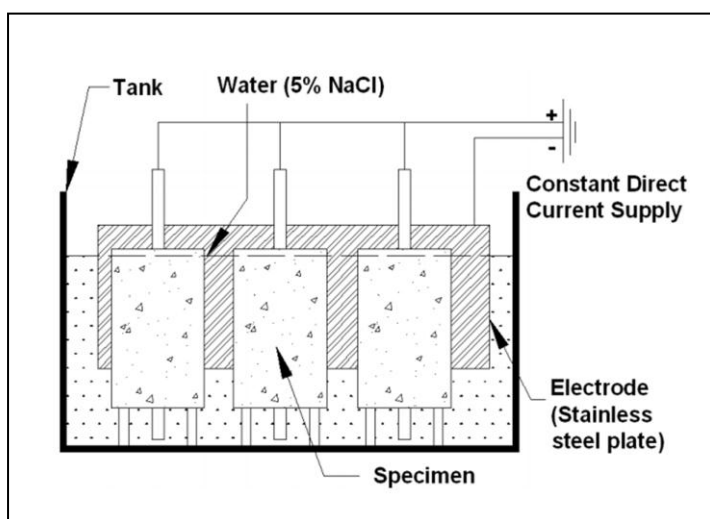
Amleh & Mirza تحقیق دیگری در این زمینه انجام دادند و با انجام آزمایش کشش روی نمونه‌های استوانه‌ای به طول ۱ متر و قطر ۱۰۰ میلیمتر و قرار دادن آنها در محلول ۵ درصد آب نمک و اعمال خوردگی سریع به درجات مختلف خوردگی رسیدند [۲۵]. کنترل درجه خوردگی به سه روش انجام شده است:

^۱ - Accelerated Corrosion Test

عرض ترک، درصد کاهش وزن فولاد و درصد کاهش سطح مقطع فولاد.

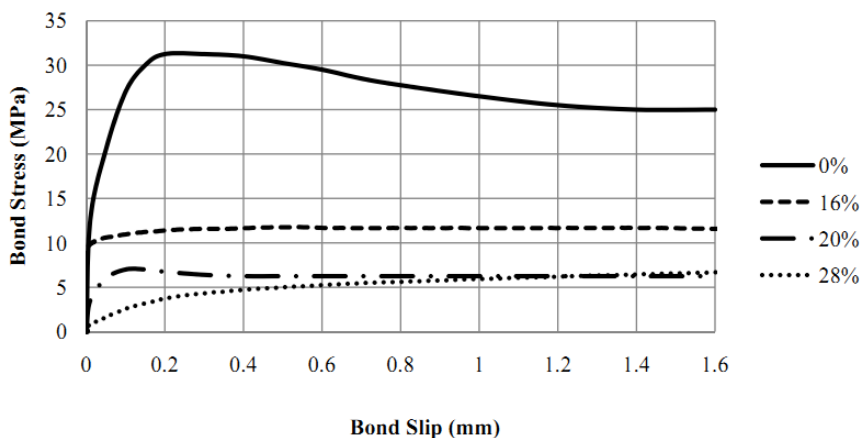
با مطالعه رفتار ترک خوردگی در نمونه‌های کششی می‌توان به روند کاهش مقاومت پیوستگی پی برد. بعد از ایجاد اولین ترک و با ادامه بارگذاری، چسبندگی بین بتن و آرماتور از بین می‌رود. و بارها به آج‌های آرماتور انتقال می‌یابد. با افزایش بار ترک‌های ریز در اطراف آرماتور اصلی شکل می‌گیرند. کاهش چسبندگی و ترک خوردگی باعث کاهش سرعت انتقال نیرو از آرماتور به بتن می‌شود. کاهش قفل و بست‌های آج‌های آرماتور و بتن به علت کاهش سطح مقطع آرماتورها و کوچک شدن آج‌ها و افزایش ترک‌های طولی و عریض شدن آنها باعث کاهش مقاومت پیوستگی می‌شود.

از تحقیقات دیگری که در رابطه با کاهش مقاومت پیوستگی در اثر خوردگی انجام شده است می‌توان به تحقیقات Palermo & Kivell اشاره نمود. تحقیقات آنها شامل دو بخش: آزمایش بیرون کشیدن آرماتور و آزمایش خمشی دو سری تیر با طول مهاری آرماتور متفاوت می‌باشد شکل (۴-۵). این محققان از دو نوع سیمان معمولی و پوزولانی در آزمایش خود استفاده کردند. در این آزمایش از خوردگی تسریع شده الکتروشیمیایی برای اعمال خوردگی استفاده شد. طوری که نمونه‌ها در محلول ۵ درصد NaCl قرار گرفته و جریانی برابر با ۰,۱A از آنها خواهد گذشت [۲۶].



شکل (۴-۵): ایجاد شرایط خوردگی به روش الکتروشیمیایی برای نمونه‌های Pull-out

درصد خوردگی براساس درصد خوردگی وزنی می‌باشد. در رابطه با آزمایش بیرون کشیدن، مقاومت پیوستگی به شدت متاثر از درصد خوردگی می‌باشد. نتیجه آزمایش بیرون کشیدن آرماتور در شکل (۴-۶) آماده است.



شکل (۴-۶): تاثیر خوردگی در میزان مقاومت چسبندگی بین آرماتور و بتن

بر اساس آن با کاهش ۱۵ درصدی از سطح مقطع، مقاومت چسبندگی بیش از ۵۰ درصد کاهش خواهد یافت.

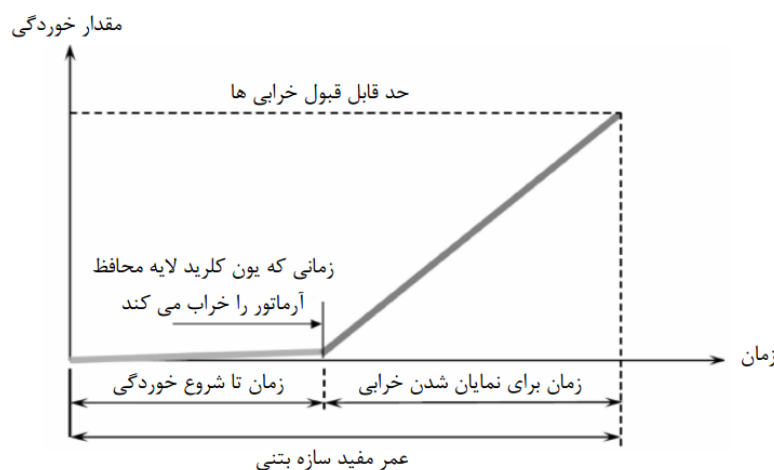
مشاهده می‌شود که کاهش مقاومت پیوستگی برای بتن با سیمان معمولی شدیدتر است و با اعمال حدود ۸ درصد خوردگی مقاومت پیوستگی برای این نوع بتن تا نصف کاهش می‌یابد. در صورتیکه برای همین درصد خوردگی در بتن با سیمان پوزولانی کاهش مقاومت کمتر است. زمان لازم برای اعمال خوردگی در بتن با سیمان پوزولانی سه برابر این زمان برای بتن معمولی می‌باشد.

۶-۴ مدل سازی‌های ریاضی در خصوص عمر مفید سازه‌های بتن آرمه

مدل‌هایی در خصوص تخمین عمر مفید سازه‌هایی که در معرض خوردگی هستند، بر اساس روند مکانیزم خوردگی و چگونگی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان خرابی‌ها ارائه شده‌اند. قابل ذکر است که پارامترهایی نظیر نسبت ضخامت پوشش به قطر آرماتور، نفوذپذیری بتن، سرعت خوردگی و

محصور شدگی بتن در طولانی شدن عمر مفید سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. قرار دادن ضوابط حداقلی و حداکثر برای این پارامتر در آیین نامه‌های طراحی نشان دهنده میزان اهمیت تاثیر این پارامترها در عمر مفید سازه است.

مدل‌های ارائه شده، در خصوص تخمین عمر مفید سازه‌های مسلح شده به آرماتور و در معرض خوردگی، بر اساس مدل ساده ارائه شده توسط Tutti (1982) پایریزی شده‌اند شکل (۴-۷). در این مدل مکانیزم خوردگی سازه‌های بتنی به دو بخش شروع خوردگی و پیشروی خوردگی تقسیم می‌شود. مرحله شروع خوردگی مدت زمانی است که یون‌های خورنده به سطح آرماتور می‌رسد که به سرعت نفوذ یون کلر و عمق پوشش وابسته است و لایه محافظت شده آرماتور را از بین می‌برد. مرحله پیشروی خوردگی مدت زمانی است که سازه کارایی‌اش را در اثر آسیب‌های ناشی از خوردگی از دست می‌دهد که به سرعت تولید و نوع محصولات خوردگی و مشخصات بتن و محل قرار گرفتن آرماتور در بتن وابسته است.



شکل (۴-۷) : مدل ساده ارائه شده به منظور تخمین عمر مفید سازه‌ها [۲۷]

مدل‌هایی که عمر مفید سازه‌ها را پیش بینی می‌کنند باید به هر دو مرحله خوردگی توجه ویژه داشته باشند چرا که برای طراحی سازه‌های جدید اطمینان از طولانی بودن مدت زمان شروع

خوردگی و برای سازه‌های موجود اطمینان از طولانی بودن مدت زمان پیشروی خوردگی به واسطه فراهم سازی جهت کنترل فرایند خوردگی از اهمیت خاصی برخوردار است. در اینجا به ارائه چندین مدل ریاضی در رابطه با تخمین عمر مفید سازه‌ها می‌پردازیم:

- Anderade و همکاران با تحقیقاتی که در رابطه با میزان خوردگی لازم برای ایجاد ترک در پوشش انجام دادند به رابطه‌ای میان سرعت خوردگی و میزان کاهش قطر آرماتور دست یافتند [۲۸].

$$d' = d - 0.023i_{corr}(t - t_i) \quad (۱۶-۴)$$

که در آن، d' قطر آرماتور در زمان t برحسب میلیمتر، d قطر اولیه آرماتور به میلیمتر، i_{corr} سرعت خوردگی به میکروآمپر بر سانتیمتر مربع، $t - t_i$ زمان سپری شده از آغاز خوردگی به سال.

- Bazant با شبیه سازی افزایش حجم محصولات خوردگی از طریق افزایش اعمال فشار به اطراف آرماتور رابطه‌ای تئوری برای تخمین زمان ترک خوردن پوشش ارائه داد [۲۹].

$$t_{crack} = \rho_{corr} \frac{D \Delta D}{S j_r} \quad (۱۷-۴)$$

که در آن، t_{crack} زمان ترک خوردن بتن به ثانیه، ρ_{corr} تابعی از چگالی فولاد و زنگ آهن به کیلوگرم بر متر مکعب، D قطر آرماتور به متر، s فاصله بین آرماتورها به متر، j_r سرعت تولید زنگ آهن به کیلوگرم بر متر مربع - ثانیه.

$$\rho_{corr} = \frac{\pi}{2} \left[(1/\rho_r) - (0.523/\rho_{st}) \right]^{-1} \quad (۱۸-۴)$$

افزایش قطر آرماتور تابعی است از مشخصات آرماتور، مقاومت کششی بتن و انعطاف پذیری حفره

میلگرد^۱ δ_{pp} که به صورت زیر محاسبه خواهد شد.

$$\Delta D = 2f_t \frac{L}{D} \delta_{pp} \quad (۱۹-۴)$$

$$\delta_{pp} = \left(\frac{D(1+\varphi_{cri})}{E} \right) \left\{ (1+\nu) + D^2 \left[\frac{2}{S^2} + \frac{1}{4L(L+D)} \right] \right\} \quad (۲۰-۴)$$

که در آن، φ_{cri} خزش در بتن، ν ضریب پواسون، E مدول الاستیسیته بتن می‌باشد.

- با استفاده از مدل ارائه شده توسط Morinaga با کمک داده‌های وسیع آزمایشگاهی خود معادله‌ای تجربی را در خصوص میزان جرم بحرانی از محصولات خوردگی در اطراف آرماتور (Q_{cri})، که منجر به ایجاد ترک می‌شود را ارائه داد، همچنین معادله‌ای در رابطه با زمان ترک خوردگی نیز فرمولی پیشنهاد کرد [۳۰]:

$$Q_{cri} = 0.602d \left(1 + \frac{2c}{d} \right)^{0.85} \quad (۲۱-۴)$$

که در آن: d قطر آرماتور بر حسب میلیمتر، c ضخامت پوشش بتن بر حسب میلیمتر و Q_{cri} حجم محصولات خوردگی اطراف آرماتور در هنگام ترک خوردگی بر حسب $10^{-4} g/cm^2$ محاسبه خواهد شد.

$$t_{crack} = \frac{Q_{cri}}{i_{cor}} \quad (۲۲-۴)$$

که در آن، i_{cor} سرعت خوردگی بر حسب گرم بر روز، t_{crack} زمان ترک خوردگی بر حسب روز می‌باشد.

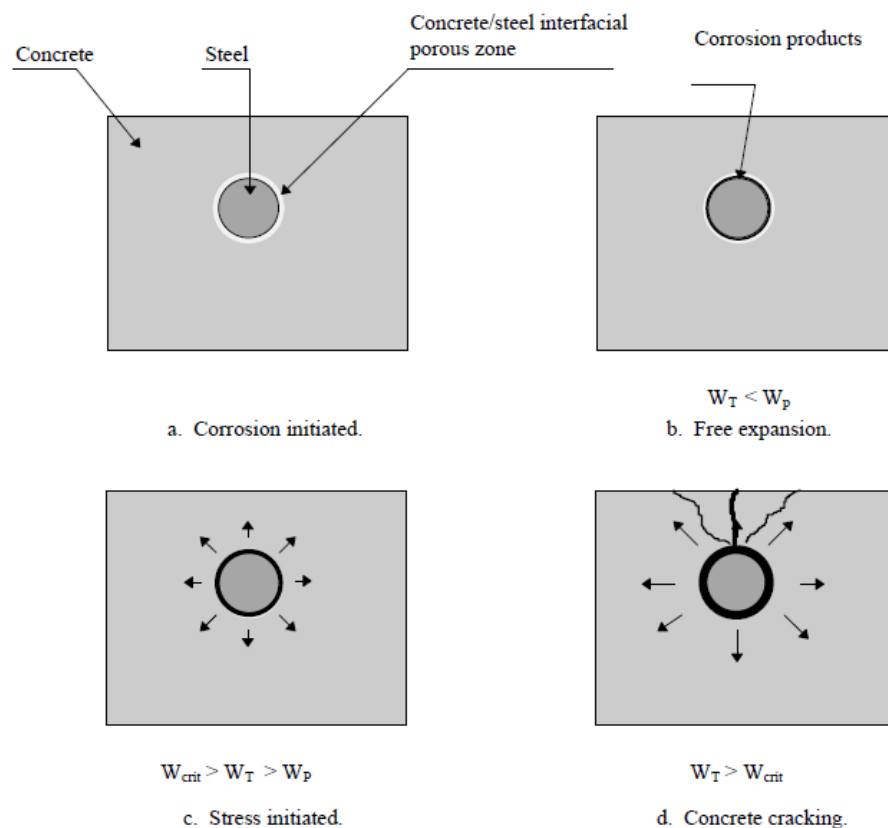
- Liu مدلی برای تخمین زمان ترک خوردگی و حجم ناشی از میزان محصولات خوردگی ارائه داد. در این مدل فرایند ایجاد ترک به دلیل افزایش حجم ناشی از خوردگی در سه مرحله

¹ - Bar hole flexibility

خلاصه خواهد شد. مرحله انبساط آزاد، در این مرحله نوار فعال اطراف آرماتور توسط یون‌های کلر شکسته خواهد شد از طرفی مواد حاصل از خوردگی می‌توانند تمام خلل و فرج ناشی از خمیر سیمان در سطح مشترک بتن و فولاد را پر کنند این حجم خوردگی را W_p می‌نامند. که طبق رابطه زیر محاسبه خواهد شد [۲۸]:

$$W_p = \rho_{rust} V_p \quad (۲۳-۴)$$

که در آن V_p حجم فضای خالی در سطح مشترک فولاد و بتن است که به عواملی چون نسبت آب به سیمان، اندازه دانه بندی و آرماتور و ناحیه انتقال بین خمیر سیمان و دانه بندی بستگی دارد. ρ_{rust} چگالی مواد حاصل از خوردگی می‌باشد شکل (۴-۸).



شکل (۴-۸): مراحل ایجاد ترک به دلیل انبساط ناشی از محصولات خوردگی [۲۸]

مرحله ایجاد تنش، که در این مرحله حجم محصولات خوردگی از W_p بیشتر بوده و باعث ایجاد تنش در سطح مشترک فولاد و بتن خواهد شد. این میزان حجم خوردگی W_T می‌نامند. مرحله ترک خوردگی که در آن W_T از میزان بحرانی خود (W_{cri}) بیشتر شده و تنش‌های داخلی حاصل از آن از میزان مقاومت کششی بتن تجاوز کرده و باعث ایجاد ترک در پوشش بتن خواهد شد.

$$W_{cri} = \rho_{rust} \left(\pi(d_s + d_0)D + \frac{W_{st}}{\rho_{st}} \right) \quad (24-4)$$

که در آن، ρ_{st} چگالی فولاد، d_0 ضخامت فضای خالی در اطراف سطح مشترک، d_s ضخامت محصولات خوردگی به هنگام ایجاد تنش کششی، D قطر آرماتور، W_{st} جرم فولاد خورده شده می‌باشد.

محاسبه زمان ترک خوردگی نیز توسط فرمول (۲۵-۴) پیشنهاد شد:

$$t_{crack} = \frac{W_{cri}^2}{2K_p} \quad (25-4)$$

و K_p از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$K_p = 2.59 \times 10^{-6} (1/\alpha) \pi D i_{cor} \quad (26-4)$$

که در آن، α به نوع محصولات خوردگی وابسته است. i_{cor} میانگین سرعت خوردگی سالیانه بر حسب mA/ft^2 است.

۷-۴ تحقیقات انجام شده بر روی خوردگی نمونه‌های SFRC

تحقیقاتی در زمینه بررسی خوردگی SFRC روی محیط‌های دریایی و یا محیط‌های خورنده

شبه سازی^۱ شده آن، صورت گرفته است که به بخشی از آن‌ها می‌پردازیم:

- Schiessl & Weydert(1988). تحقیقاتی در خصوص مکانیزم خوردگی روی نمونه‌های SFRC ترک خورده انجام دادند. نمونه‌ها، تیرهای مستطیلی در ابعاد ۱۵۰*۱۰۰*۷۰۰ بودند. در تحقیقات آنها عرض ترک در نمونه‌ها حدوداً در محدوده ۰,۰۵ تا ۰,۴ میلیمتر قرار داشت. بعد از آن که نمونه‌ها در معرض محیط‌های خوردنده قرار گرفتند، به قطعات کوچکتر در محل ترک‌ها تفکیک شدند. محتوای کلراید از سطوحی که در معرض محیط قرار گرفته و سطوحی که عمود بر سطح ترک است به نمونه‌ها وارد می‌شد. نتایج اندازه‌گیری غلظت کلر نشان داد که با افزایش فاصله از محل بازشدگی ترک، میزان محتوای کلرید نفوذی، کاهش یافت و متعاقب آن اثرات خوردگی هم کمتر شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های انجام شده در خصوص نفوذ یون کلر و عرض ترک در نمونه‌ها نشان داد که به منظور کنترل و توقف خوردگی هیچ عرض ترکی را نمی‌توان به عنوان عرض ترک بحرانی تعریف نمود. چرا که یون‌های کلر، قابلیت نفوذ به نمونه، در ترک‌های خیلی باریک را هم دارند. یکی از عوامل اصلی در خوردگی دسترسی به میزان اکسیژن است که با نازکتر بودن عرض ترک میزان دسترسی به اکسیژن در این ترک‌ها محدود تر می‌شود و محیط قلیایی داخل بتن نیز در برابر اثرات خوردگی مقاوم‌تر می‌ماند. تحقیقات آنها نشان داد که میزان محتوای کلراید، در ازای افزایش میزان باز شدگی ترک افزایش می‌یابد. همچنین یک ترک در برابر میزان کلر وارد شده هیچ‌گاه در برابر خوردگی محافظت نخواهد شد. در این تحقیق علاوه بر محیط آسیب پذیر کلراید، نمونه‌هایی نیز در معرض کربنات قرار داشتند. پس مدت زمان مقرر برای اعمال خوردگی، مشاهده شد که دیواره ترک‌ها کربناته شده و الیاف نیز به طور کامل در برابر خوردگی محافظت نشدند. در این دسته از نمونه‌ها الیاف زیاد آسیب ندیدند علت آن فقدان

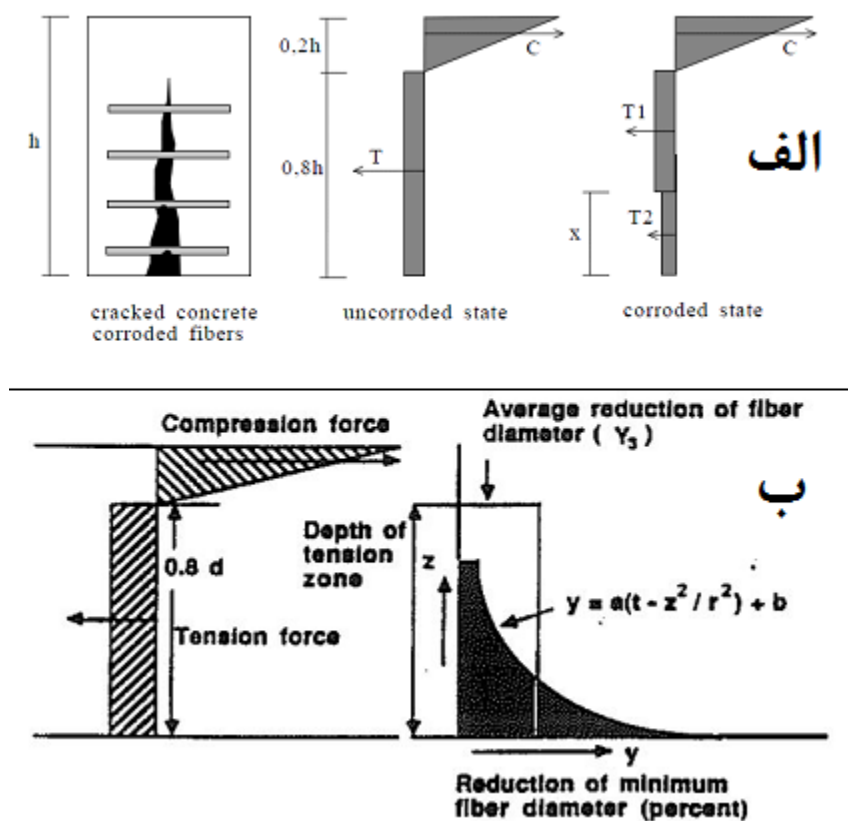
¹ -Simulated Corrosion Test

رطوبت در این محیط گزارش شد. وجود رطوبت می تواند در ایجاد خوردگی موثرتر از فراهم کردن شرایط کربناته شدن، برای الیاف دوزنده ترک باشد. الیاف گالوانیزه شده نیز در این تحقیق استفاده شد که تاخیری در شروع فرآیند خوردگی در آنها مشاهده شد، در نهایت با گذر زمانی طولانی تر این الیاف نیز خورده شدند [۳۱].

- Namman & Kosa، تحقیقاتی در زمینه تعیین میزان سرعت خوردگی در SFRC و چگونگی تاثیرات خوردگی بر ظرفیت بارگذاری و شکل پذیری آن انجام دادند. تحقیقات آنها شامل آزمایش روی نمونه های ترک دار، بدون ترک، نمونه های با نفوذپذیری بالا و نمونه های ساخته شده از الیاف خورده شده در محیط های کلریدی و کربناته شده بود. به منظور ایجاد ترک در نمونه ها، نمونه ها تا تغییر مکان ۳ میلیمتر و تغییر مکان متناظر با ماکزیمم بار بارگذاری شدند. عرض ترک با توجه به بارگذاری اولیه و ابعاد نمونه ها در حدود ۱۲، ۲۰ تا ۲۷، ۰ میلیمتر گزارش شد. با توجه به نتایج حاصل از تحقیقات، کاهش ۲۰ درصد میانگین قطر الیاف، ۱۰ درصد از میزان ظرفیت باربری می کاهد و ۲۵ درصد سختی I_5 کاهش می دهد (شاخص I_5 عبارتند از نسبت کار انجام شده یا سطح زیر نمودار برای رسیدن به تغییر مکان سه برابر تغییر مکان نظیر اولین ترک به سطح زیر نمودار تا تغییر مکان نظیر اولین ترک). از طرفی شکست کششی الیاف جایگزین گسیختگی چسبندگی بین الیاف و بتن می شود. با توجه به بررسی های انجام شده در رابطه با تاثیر عرض ترک روی خوردگی و تغییرات در میزان ظرفیت باربری، عرض ترک ۰،۱۵ میلیمتر به عنوان عرض ترک بحرانی معرفی شد. کمتر از ۰،۱۵ میلیمتر هیچ تغییری در میزان ظرفیت باربری مشاهده نخواهد شد. همچنین نتایج او در نهایت به ارائه مدلی تحلیلی به منظور تعیین اثر خوردگی در مقاومت بتن ترک خورده منجر شد.

این مدل بر اساس آن طراحی می شود که با کاهش قطر الیاف شکست چسبندگی الیاف به شکست کششی الیاف تبدیل می شود. فرضیات لازم در این مدل قرار گرفتن چند الیاف در

ناحیه کششی، مقاومت چسبندگی، مقاومت کششی الیاف، طول مدفون شده الیاف و دیگر پارامترها می‌باشد. فرض می‌شود $\frac{1}{4}$ از طول الیاف با مقاومت چسبندگی درگیر است. در این مدل تنها از الیاف مستقیم برای مدل سازی استفاده شد. مکانیزم مدل کردن الیاف قلابدار به دلیل وجود مهار مکانیکی پیچیده‌تر می‌شود. شکل الف (۹-۴)، دیاگرام آزاد مدل ارائه شده را نشان می‌دهد [۳۲].



شکل (۹-۴): الف) دیاگرام آزاد SFRC در نمونه‌های ترک دار - ب) رابطه بین کاهش قطر الیاف و عمق ناحیه‌ی کشش

$$M_1 = N \cdot \pi \cdot \phi \cdot f_b \cdot \frac{l}{4} \cdot 0.4 \cdot h \quad (۲۷-۴)$$

$$M_2 = T_1 \cdot \left(\frac{0.8h - x}{0.8h} \right) + T_2 \cdot \left(0.8h - \frac{x}{h} \right) \quad (۲۸-۴)$$

$$T_1 = \left(\frac{0,8h - x}{0,8h} \right) \cdot N \cdot \pi \cdot \phi \cdot f_b \cdot \frac{l}{4} \cdot h \quad (29-4)$$

$$T_2 = \frac{x}{0,8 \cdot h} \cdot N \cdot f_{mean} \quad (30-4)$$

$$F_{Mean} = \left(\int_0^{l_{ec}} f_b \cdot \pi \cdot \phi \cdot l_e dl + \int_{l_{ec}}^{l/2} f_s \cdot A_c dl \right) / \frac{l}{2} \quad (31-4)$$

$$F_{Mean} = \left(\int_0^{l_{ec}} f_b \cdot \pi \cdot \phi \cdot l_e dl + \int_{l_{ec}}^{l/2} f_s \cdot A_c dl \right) / \frac{l}{2} \quad (32-4)$$

$$l_{ec} = \frac{(\phi_c^2 f_s)}{4 \cdot \phi \cdot f_b} \quad (33-4)$$

$$S = \frac{M_1}{M_2} \quad (34-4)$$

که در آن x عمق ناحیه خورده شده، N تعداد الیاف در ناحیه کشش، M_1 و M_2 ظرفیت لنگر برای الیاف خورده نشده و خورده شده، T_1 و T_2 نیروی کششی در ناحیه خورده نشده و خورده شده، F_{Mean} میانگین مقاومت برای هر الیاف، f_b تنش چسبندگی بین الیاف و ماتریس، f_s مقاومت کششی الیاف، ϕ و ϕ_c قطر الیاف، l_e و l_{ec} طول مدفون شده الیاف و طول بحرانی، A_c کمترین سطح مقطع الیاف، S نسبت ظرفیت لنگر می باشد.

پارامتر S تغییرات میزان ظرفیت لنگر را در اثر خوردگی در نمونه ها محاسبه می کند.

در ادامه ی تحقیقات این دانشمندان، Hannant، توانست رابطه بین کاهش قطر الیاف واقع در اطراف ناحیه ترک را در اثر خوردگی براساس عمق ناحیه کشش بیابد شکل ب (4-9) [33].

$$(35-4)$$

$$Y = a(t - z^2 / r^2) + b$$

که در این رابطه Y میانگین کاهش قطر الیاف، t زمان (دوره عمل آوری به ماه)، z عمق

الیاف در ناحیه کشش، r قطر الیاف، a و b سرعت خوردگی و ضریب نفوذ یون می‌باشد.

- (Mangat & Gurusamy (1985) آزمایشاتی در زمینه انتشار کلر در SFRC قرار گرفته در معرض محیط‌های دریایی انجام دادند. نمونه‌ها در آزمایشگاه تحت شرایط شبیه سازی شده‌ای از جزر و مد دریایی با پاشیدن آب دریا قرار داشتند. میزان نفوذ یون کلر در سطوحی که به فاصله ۱۰ میلیمتر از سطح ترک قرار داشت، اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که با افزایش عرض ترک، محتوای کلراید افزایش یافت و عرض ترک ۰٫۲ میلیمتر به عنوان عرض ترک بحرانی معرفی شد و برای ترک‌های بالاتر از ۰٫۵ میلیمتر اثرات خوردگی قابل ملاحظه است. مقاومت پسماند^۱ در نمونه‌های ترک خورده با عرض ترک کمتر از ۰٫۲ mm در مقایسه با نمونه‌های بدون ترک بیشتر است. یکی از دلایل مربوط در این خصوص پدیده خودترمیمی یا افزایش میزان مهار در الیاف است. به طور کلی با توجه به تحقیقات حاصل شده بیشترین ورود کلراید، در سه ماهه اول عمل آوری نمونه‌ها اتفاق خواهد افتاد. در رابطه با کیفیت فولاد نیز تحقیقاتی انجام شد، الیاف کم کربن در عرض ترک‌های زیر ۰٫۲۴ mm هیچ گونه خوردگی از خود نشان نخواهند داد. الیاف ضد زنگ در عرض ترک بالاتر از ۰٫۹۴ mm دچار خوردگی خواهند شد. مقاومت این الیاف در برابر خوردگی وابسته به میزان پایداری لایه فعال اکسید روی الیاف می‌باشد، پایداری این لایه به محتوای کروم بستگی دارد (که در حدود ۱۲٪ مناسب است) [۳۴].

- (Hannant & Edgington (1976 هدف از ارائه تحقیقات این محققان تعیین اثر خوردگی الیاف فولادی بر ظرفیت باربری بتن الیافی است. در این راستا نمونه‌هایی ترک خورده و بدون ترک آماده شدند. ترک در نمونه‌ها ۸ روز پس از سفت شدن اجرا شد. آب بند شدن و بسته شدن دیواره‌ی ترک‌ها در مدت زمان قرار گیری در محلول در ظرفیت باربری نمونه‌ها بی تاثیر

^۱ - Residual Strength

نبود. آنها توانستند با استفاده از نتایج حاصل بارگذاری خمشی مدلی برای تخمین چسبندگی بین الیاف و بتن ارائه دهند [۳۵].

فصل ۵

تشریح برنامه آزمایشگاهی

فصل پنجم: تشریح برنامه آزمایشگاهی

۵-۱ مقدمه

در فصل‌های گذشته تاثیر خصوصیات ماتریس و الیاف بر عملکرد بتن الیافی مورد بررسی قرار گرفت. میزان تاثیر الیاف به عواملی چون خصوصیات ماتریس، نظیر مقاومت و اندازه ذرات سنگدانه و خصوصیات الیاف نظیر نوع الیاف، مدول الاستیسته، مقاومت، نسبت ظاهری، نسبت حجمی الیاف و کیفیت اتصال الیاف به ماتریس بستگی دارد.

افزایش نسبت حجمی، نسبت ظاهری، کاهش قطر و ایجاد تغییر شکل در الیاف باعث بهبود عملکرد بتن الیافی خواهد شد. الیاف مورد استفاده در این تحقیق الیاف مجعد و قلابدار بودند که، به دلیل برقراری اتصال قوی با ماتریس سیمانی و جذب انرژی زیاد در اثر بیرون کشیده شدن از ماتریس، نسبت به انواع دیگر الیاف تغییر شکل یافته، موثرتر هستند.

از آنجایی که الیاف فولادی دارای قطر کمتری نسبت به میلگردهای فولادی هستند، اگرچه که یک لایه خوردگی تاثیر چندانی در عملکرد میلگرد تقویتی نخواهد گذاشت، اما می‌تواند خطر قابل پیشرونده‌ای برای الیاف فولادی ایجاد کند.

همانطور که در فصل پیشین اشاره شد، از پارامترهای مهم در تخریب میلگرد فولادی، ترک ناشی

از حجم زیاد محصولات خوردگی در سطح مشترک فولاد و بتن است. نیروهای ایجاد شده ناشی از این حجم فولاد، از مقاومت کششی بتن تجاوز کرده و باعث ایجاد ترک، در سطح مشترک می‌شود که در نهایت بتن در آن ناحیه از هم گسیخته خواهد شد، که در رابطه با الیاف فولادی تقویت کننده بتن، نیروهای حاصل از خوردگی خیلی کمتر است و نمی‌تواند موجب ترک خوردگی در سطح مشترک شود [۳۳].

بتن الیافی در سطح گسترده در روسازی جاده‌ها^۱ بکار برده می‌شود، از اینرو ممکن است، در معرض نمک‌های مورد استفاده در فصول یخبندان و مواد شیمیایی قرار گیرد. سازه‌های دریایی مسلح به الیاف، نظیر شاکریت دیواره‌های سد، در معرض خوردگی حاصل از محیط‌های دریایی هستند. در این نوع سازه‌ها، ترک خوردگی باعث محدود شدن عمر مفید خواهد شد و وضعیت نامساعدی را برای الیاف فولادی تقویت کننده خود از نظر دوام ایجاد می‌کند. چرا که در سازه‌های بتنی مسلح به الیاف فولادی، الیاف به هنگام ترک خوردگی، نقش دوزنده در لبه‌های ترک را ایفا می‌کنند.

هدف از ارائه این پایان نامه، فراهم نمودن شرایط خوردگی برای نمونه‌ها و انجام مجموعه‌ای از آزمایشات، به منظور بررسی اثر خوردگی الیاف در خرابی نمونه‌های مسلح به الیاف فولادی و از طرفی تاثیر ترک در میزان خوردگی و ظرفیت باربری بتن الیافی است.

مراحل اصلی برنامه‌ی آزمایشگاهی به شرح زیر می‌باشد که در ادامه در رابطه با جزئیات آن توضیحاتی ارائه می‌شود:

گروه اول) آزمایش تسریع خوردگی در نمونه‌های مسلح به الیاف فولادی^۲.

گروه دوم) استفاده از الیاف خورده شده^۳ در ساخت نمونه‌ها.

^۱ - Pavements

^۲ - Accelerated corrosion tests of fiber reinforced concrete

^۳ - Containing corroded fibers

گروه سوم) آزمایش بیرون کشیدن الیاف فولادی از ماتریس بتنی^۱.

از جمله پارامترهایی که در آزمایشات به بررسی آنها خواهیم پرداخت :

- ۱- ارائه یک طرح اختلاط تقریباً ثابت برای تمامی نمونه‌ها
- ۲- بررسی تاثیر انواع محیط‌های خوردگی در الیاف فولادی
- ۳- چگونگی تسریع روند خوردگی در آزمایشگاه
- ۴- تاثیر ترک در میزان و سرعت خوردگی نمونه‌ها
- ۵- تاثیر خوردگی الیاف تک در میزان مقاومت پیوستگی بین الیاف و ماتریس
- ۶- بررسی تاثیر نسبت آب به سیمان در خوردگی الیاف فولادی
- ۷- انجام آزمایشات (فشار، خمش و بیرون کشیدن الیاف فولادی تک از ماتریس بتنی)

اثر خوردگی با اندازه‌گیری چند متغیر ارزیابی می‌شود. این متغیرها شامل خواص مکانیکی کامپوزیت در خمش، فشار و سختی، ارزیابی سطح خورده شده الیاف و اندازه‌گیری قطر مینیمم الیاف، بعد از قرارگیری در محیط آسیب‌پذیر می‌باشد.

۲-۵ معرفی مصالح مصرفی

۱-۲-۵ سیمان

انتخاب نوع سیمان مورد استفاده در بتن با مقاومت بالا اهمیت زیادی دارد. چنانچه مقاومت در کوتاه مدت مورد نظر باشد، استفاده از سیمان پرتلند نوع ۳ توصیه می‌شود، اگر در مخلوط بتن با مقاومت بالا از درصد زیاد سیمان استفاده می‌شود، به علت تولید حرارت زیاد، بهتر است از سیمان پرتلند نوع ۲ استفاده شود.

سازگاری نوع سیمان مصرفی با افزودنی‌های مورد استفاده در بتن با مقاومت بالا نیز اهمیت

¹ - Behavior of Single fiber Pull-out

زیادی دارد. از آنجایی که اثر مواد افزودنی کاهنده آب در مقاومت، به طور قابل ملاحظه‌ای تابع ترکیبات سیمان است، بیشترین افزایش مقاومت نظیر سیمان‌هایی است که مواد قلیایی کمتر یا C_3A کمتری داشته باشند. وجود C_3A باعث افزایش نسبت آب به سیمان و کاهش کارایی می‌شود. از اینرو به کاربردن سیمان تیپ ۲ توصیه می‌شود. چرا که در ساخت این نوع سیمان سعی می‌شود تا حد امکان از مقدار C_3A کاسته و به C_2S افزوده شود [۳۶].

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۲ تولید کارخانه سیمان شاهرود استفاده شده است. وزن مخصوص آن براساس ASTM C187، $3,16 \text{ gr/cm}^3$ تخمین زده شد. در اثر وارد آمدن فشار در طی مرحله حمل و انبار کردن، سیمان دارای گلوله‌های درشت بود که به منظور بالا بردن کیفیت بتن کلیه سیمان‌ها قبل از استفاده از الک ۵۰ رد شد.

۳-۲-۵ فوق روان کننده

فوق روان کننده PCE نسل جدید فوق روان‌کننده ویژه ساخت بتن خود متراکم^۱ می‌باشد. با استفاده از مقدار کمی فوق روان کننده به همراه نسبت آب به سیمان پایین، کارایی، به نحو مطلوبی افزایش پیدا می‌کند. PCE مایعی قهوه‌ای رنگ است می‌باشد و پایه شیمیایی آن دیسپرسیون پلیمری و نمک کربوکسیلیت است. وزن مخصوص PCE $1,03 \text{ Kg/lit}$ و مقدار مصرف آن $0,2-1,2$ درصد وزنی سیمان توصیه شده است. در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از فوق روان کننده PCE استفاده شد.

۴-۲-۵ سنگدانه

سنگدانه مورد مصرف از نوع ریز دانه و جنس کوارتز می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهد که در بتن با مقاومت بسیار زیاد معمولاً از سنگدانه کوارتز استفاده می‌شود، که دلیل آن سازگاری با خمیر

¹-Self Consolidating Concrete

سیمان می‌باشد [۳۷، ۳۸، ۳۹]. در نهایت مخلوط سیمان، میکروسیلیس و سنگدانه کوارتز به صورت جسم یکپارچه و همگن تغییر شکل می‌دهند. همانند میکروسیلیس، کوارتز هم دارای ۹۵ درصد سیلیس SiO_2 است. در کوارتز، سیلیس به صورت کریستال است و تنها در دمای بالا نظم کریستالی آن به هم خورده و با آهک موجود در سیمان ترکیب می‌شود [۳۶]. دانه‌بندی مربوط به طرح اختلاط نمونه‌ها در جدول (۱-۵) و شکل (۵-۱) (الف) ارائه شده که مطابق با (ASTM C778) می‌باشد. با توجه به اینکه دانه‌بندی سنگدانه‌های موجود با دانه‌بندی مورد نیاز برای طرح مخلوط‌های این پایان نامه تفاوت نسبتاً زیادی داشت بنابراین تمامی سنگدانه‌ها پس از خشک شدن کامل به آزمایشگاه دانشکده معدن منتقل شده و در دو مرحله با استفاده از آسیاب، شکل (۵-۶) (ب)، خرد شدند و پس از آن با توجه به نوع طرح اختلاط، دانه‌بندی صورت گرفت، برای دانه‌بندی از الک‌های نمره (۱۶، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۱۰۰) استفاده شد. وزن مخصوص سنگدانه کوارتز براساس ASTM C128، 2.75 gr/cm^3 تخمین زده شد.

جدول (۵-۱): دانه بندی سنگدانه‌های کوارتز (Ottawa)

اندازه دانه بندی (درصد عبوری از الک)	
1.18 mm (No.16)	100
600 μm (No.30)	96
450 μm (No.40)	65
300 μm (No.50)	20
150 μm (No.100)	0



(ب)



(الف)

شکل (۵-۱): الف- دانه بندی سنگدانه، ب- مکانیزم خرد کردن سنگها

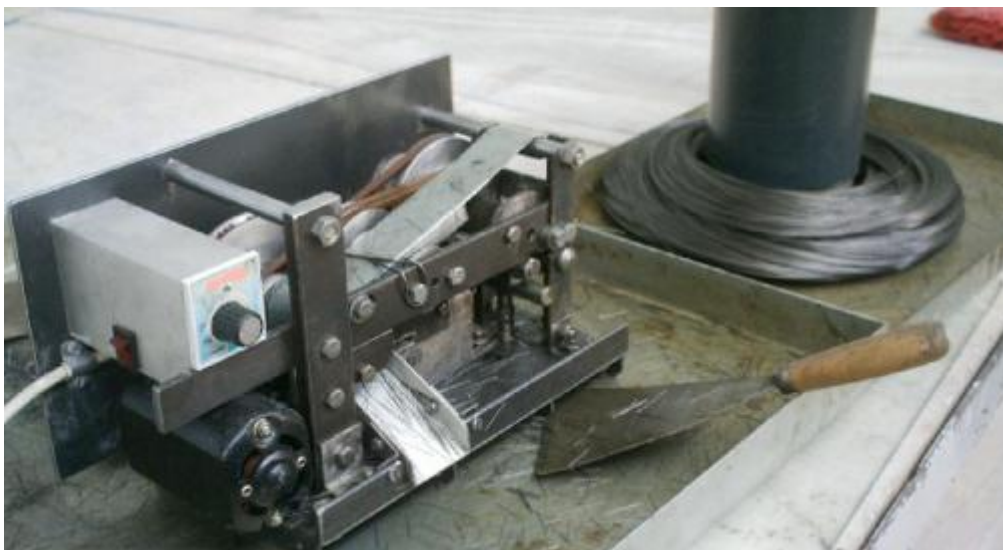
۵-۲-۵ الیاف فولادی

از جمله مهم‌ترین عوامل محدودکننده‌ی انتخاب هندسه الیاف، می‌توان طول و نسبت ظاهری آن را نام برد. مطابق با ASTM C1018 در رابطه با محدودیت ابعاد الیاف در نمونه‌های بتن الیافی، طول الیاف باید از یک سوم کوچکترین بعد نمونه کمتر باشد. لازم به ذکر است که این قاعده در رابطه با آزمایش‌های این پروژه به دلیل کاهش دادن ضخامت نمونه‌ها رعایت نشد و الیاف در نمونه‌ها توزیع دو بعدی داشتند.

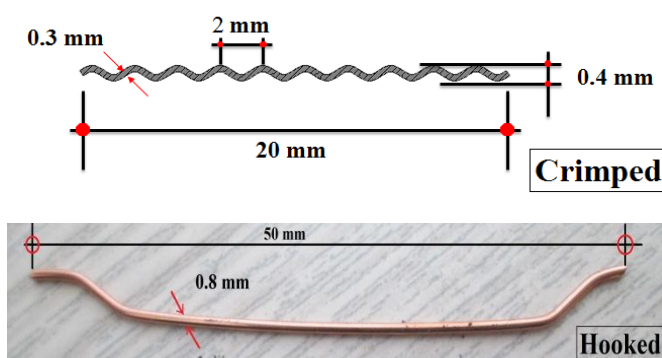
با توجه به نتایج تجربی بدست آمده از تحقیقات انجام شده در آزمایشگاه، در خصوص یافتن طرح هندسی بهینه از الیاف، در این پایان نامه از الیاف مجعد^۱ با طول ۲۰ میلیمتر، قطر ۰,۳ میلیمتر، طول موج ۲ میلیمتر، ارتفاع موج ۰,۴ میلیمتر با مقاومت کششی $1800-1900 \text{ kg/cm}^2$ استفاده شد [۴۰]. این الیاف با دستگاهی که قابلیت خم کردن، برش دادن و ساخت الیاف با انواع مختلف طول، قطر، ارتفاع و طول موج را داراست، ساخته شد شکل (۵-۲). نوع دیگر از الیاف مورد استفاده در این تحقیق الیاف تغییر شکل یافته قلابدار^۲ بود. این الیاف دارای طول ۵۰ میلیمتر و قطر ۰,۸ میلیمتر، با مقاومت کششی 800 kg/cm^2 در شکل (۵-۳) دیگر مشخصات الیاف ارائه شده است.

^۱ - Crimped

^۲ - Hooked



شکل (۵-۲): دستگاه تولید یاف



شکل (۵-۳): مشخصات یاف

۵-۳ معرفی آزمایشات انجام شده روی نمونه‌های بتن الیافی

مقاومت نمونه‌های بتنی تحت تاثیر عوامل ثانویه نظیر سرعت بارگذاری، اندازه نمونه و شرایط نگهداری تغییر می‌کند. علاوه بر این به منظور قابل قیاس بودن نتایج بدست آمده از آزمایشات انجام شده در تحقیقات مختلف، نیاز به استفاده از روش‌ها و تجهیزات استاندارد برای تعیین خصوصیات FRC می‌باشد. کاهش سرعت بارگذاری یا افزایش زمان اعمال یک بار افزاینده، منجر به مقاومت کمتر از حالت آزمایش استاندارد می‌گردد. اگر بار، آنی وارد شود، مقاومت بالاتری ثبت می‌شود و کرنش نظیر گسیختگی کمتر می‌شود (حالت شکننده). با توجه به این که شرایط مربوط به آزمایش‌های

فشاری و خمشی با دستورالعمل‌های استاندارد تا حدودی متفاوت است، ابتدا مختصری در رابطه با نحوه‌ی انجام این آزمایش‌ها مطابق با استانداردهای موجود توضیح داده می‌شود، سپس به ذکر مشخصات مربوط به آنها در این تحقیق می‌پردازیم. جهت بارگذاری نمونه‌ها، از دستگاهی که قابلیت اعمال بار، با سرعت مشخص و ثبت دقیق مقاومت نمونه‌ها در زمان‌های کوتاه را دارا می‌باشد استفاده خواهد شد شکل (۴-۵).



شکل (۴-۵): دستگاه خمش و فشار برای کنترل کیفیت مصالح ساختمانی

به طور کلی موارد ذکر شده در ASTM C31 که برای آماده سازی نمونه‌های بتنی بکار می‌روند در مورد FRC نیز قابل کاربرد می‌باشند [۴۱]. لرزش داخلی و استفاده از میلگرد برای متراکم کردن به دلیل اینکه باعث پخش غیر یکنواخت الیاف و تغییر جهت آنها از حالت تصادفی می‌شود در مورد

بتن الیافی مناسب نمی‌باشد [۴۱]. هرچند که آیین نامه ACI 544-4R ارتعاش داخلی را برای SFRC مجاز دانسته است. مناسب‌ترین روش برای متراکم کردن بتن الیافی لرزش خارجی با استفاده از میز لرزان است.

۵-۳-۱ آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری به عنوان مهمترین معیار جهت تعیین کیفیت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. از نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای در ابعاد مختلف برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن استفاده می‌شود. اندازه نمونه‌ها بستگی به اندازه بزرگترین سنگدانه و مقاومت بتن دارد (ظرفیت دستگاه آزمایش یک عامل محدود کننده برای اندازه نمونه می‌باشد). بر اساس ASTM C39 برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های استوانه‌ای 152×305 میلیمتر استفاده می‌شود (در زمانی که ابعاد بزرگترین سنگدانه کمتر از ۵۰ میلیمتر باشد). در آزمایش مقاومت فشاری، نیرو با سرعت مشخص به نمونه بتنی وارد می‌شود، تا خرابی اتفاق بیفتد. سرعت اعمال بار برای نمونه‌های فشاری طبق استاندارد 1.3 mm/min ($0.14 - 0.34 \text{ MPa/sec}$) می‌باشد. سرعت بارگذاری در نمونه‌های بتنی باید طوری باشد تا در حدود ۲ الی ۳ دقیقه بارگذاری، بتن به مقاومت نهایی خود برسد. اگر بارگذاری در کمتر از ۳۰ ثانیه تا شکست انجام شود حدود ۲ تا ۳ درصد مقاومت بالاتری را از مقاومت واقعی نتیجه می‌دهد.

وجود الیاف در بتن باعث کاهش شکنندگی آن و تغییر مود شکست نمونه می‌شود. افزایش مقاومت فشاری بعد از ترک خوردگی ماتریس از بین نمی‌رود ولی تا حدودی نسبت به مرحله الاستیک خطی کاهش می‌یابد، به عبارتی تغییر شکل نظیر بار حداکثر، افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد. بنابراین اضافه کردن الیاف به بتن مقاومت فشاری آن را به مقدار زیادی تحت تاثیر قرار نخواهد داد.

در این پایان نامه اندازه بزرگترین سنگدانه کمتر از ۰/۶ میلیمتر بوده و نمونه‌های فشاری استوانه‌هایی در ابعاد ۷۵ × ۱۵۰ میلیمتر بودند و با سرعت ۳/۵ mm/min بارگذاری شدند.

۵-۳-۲ آزمایش مقاومت خمشی

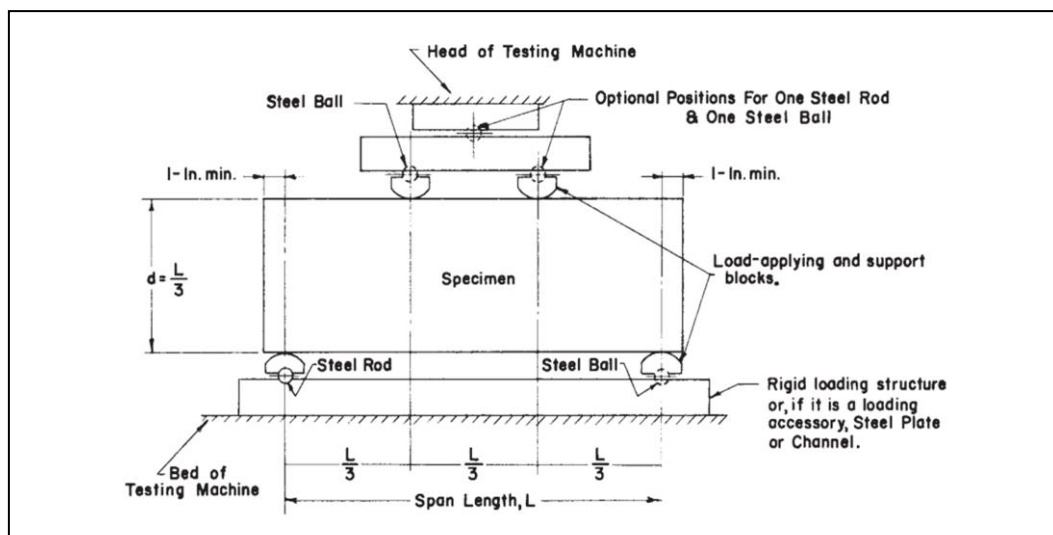
مقاومت خمشی FRC با آزمایش بارگذاری تیر در نقاط یک سوم دهانه مطابق ASTM C78 یا آزمایش بارگذاری در وسط دهانه مطابق ASTM C293 بدست می‌آید که مورد اول دارای مقبولیت بیشتری است. مقاومت خمشی، با توجه به، حداکثر بار قابل دستیابی، بر اساس نمودار نیرو- تغییر مکان بدست می‌آید. در آزمایش خمش، تنش کششی ماکزیمم در تارهای پایین تیر بوجود می‌آید که مدول گسیختگی نامیده می‌شود. اگر شکست در دهانه وسطی رخ دهد مدول گسیختگی از رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

اگر شکست در خارج از دهانه میانی اتفاق افتد و فاصله آن از نقاط یک سوم میانی کمتر از L باشد، نتایج آزمایش معتبر خواهد بود. در این حالت مدول گسیختگی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

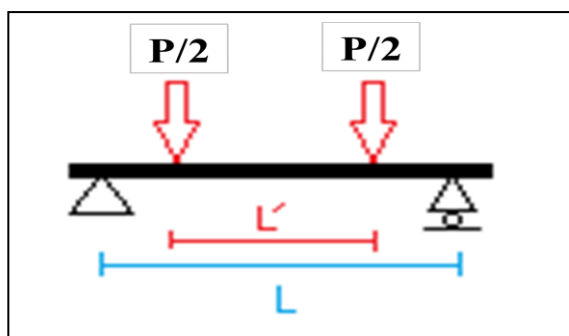
a فاصله متوسط بین محل ترک و تکیه گاه می‌باشد شکل (۵-۵).



شکل (۵-۵): آزمایش خمش در حالت بار گذاری چهار نقطه‌ای

در این پایان‌نامه نمونه‌های خمشی در ابعاد مستطیلی تخت (۳۰۰×۷۵×۱۲,۵) میلیمتر ساخته شده با الیاف مجعد و (۴۵۰×۷۵×۳۷,۵) میلیمتر ساخته شده با الیاف قلابدار در نظر گرفته شده‌اند که با سرعت ۲,۵ mm/min بارگذاری می‌شوند. آزمایش خمش چهار نقطه‌ای با دهانه بارگذاری ۲۵۰ mm و ۴۰۰ mm با توجه به ابعاد نمونه‌ها در نظر گرفته شد. که در آنها ناحیه‌ای که میزان لنگر در آن ثابت است ۱۰۰ mm می‌باشد. ضخامت کم تیرها نیز، به منظور تسریع روند خوردگی در نمونه‌ها، در مدت زمان کوتاه‌تر می‌باشد.

با توجه به اینکه ابعاد نمونه‌های بکار گرفته شده بنا به شرایط با دستور العمل‌های استاندارد ASTM C78 مطابقت ندارد. با کمک دیاگرام آزاد تیر شکل (۵-۶)، حداکثر مقاومت خمشی برای ابعاد هندسی مختلف از نمونه‌ها محاسبه می‌شود. جدول (۵-۲) روابط را برای تیرها با توجه به ابعاد بیان می‌کند.



شکل (۵-۶): دیاگرام آزاد بارگذاری در نقاط یک سوم دهانه

جدول (۵-۲): محاسبه مقاومت خمشی در نمونه‌ها

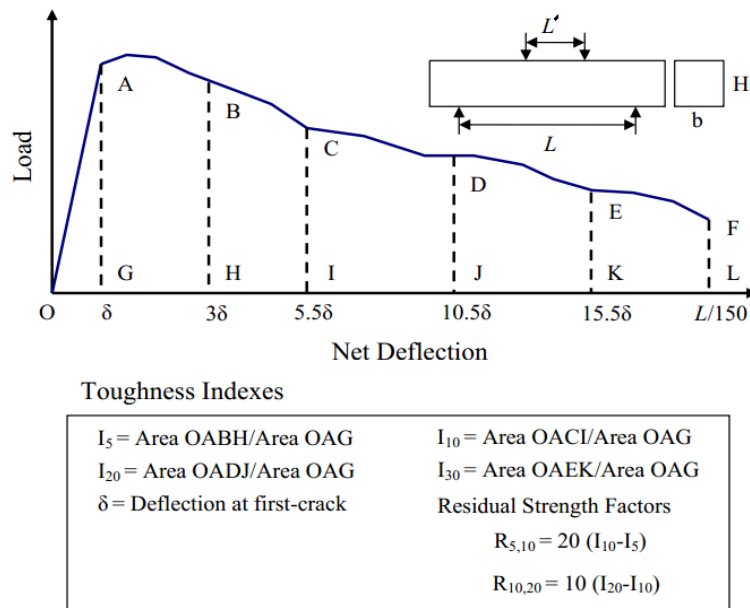
ابعاد نمونه	L' (mm)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	$M = \frac{P}{2} \left(\frac{L}{2} - 50 \right)$	$S = \frac{bh^2}{6}$	$\sigma = \frac{M}{S}$
300×75×12.5	۱۰۰	۲۵۰	۷۵	۱۲/۵	۳۷/۵P	۱۹۵۳,۱۳	
450×75×37.5	۱۰۰	۴۰۰	۷۵	۳۷/۵	۷۵P	۱۷۵۷۸,۱	

۵-۳-۳ محاسبه میزان چقرمگی^۱ و مقاومت اولین ترک:

چقرمگی نشان‌دهنده‌ی ظرفیت جذب انرژی مصالح و توانایی مقاومت آنها در مقابل خرابی، در اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. اندازه‌گیری چقرمگی و مقاومت اولین ترک با استفاده از آزمایش بارگذاری تیر در نقاط یک سوم دهانه مطابق با ASTM C1018 صورت می‌گیرد. از این آزمایش هم چنین می‌توان برای بدست آوردن مقاومت خمشی بتن استفاده کرد. از اینرو تمام موارد ذکر شده در ASTM C78، در این آزمایش نیز رعایت می‌شود. انرژی جذب شده توسط نمونه برابر سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان می‌باشد. این نمودار بستگی به ابعاد نمونه، چگونگی اعمال بار و سرعت بارگذاری دارد و پارامتر ثابتی نیست. برای برآورد میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌های FRC پارامتر دیگری پیشنهاد شده است. این پارامتر با تقسیم انرژی جذب شده توسط نمونه ساخته شده از FRC به انرژی جذب شده توسط تیر با همان ابعاد که از ماتریس مسلح نشده با الیاف ساخته شده است بدست می‌آید. این پارامتر بدون بعد نشان‌دهنده بهبود خواص مصالح در اثر مسلح شدن با الیاف می‌باشد. با توجه به مطالب فوق و با فرض اینکه افزودن الیاف در مقاومت اولین ترک نقشی ندارد، اندیس‌های طاق که برابر سطح زیر نمودار $P - \Delta$ تا تغییر مکان مشخص تقسیم بر سطح زیر نمودار تا تغییر مکان نظیر اولین ترک در ماتریس می‌باشند، تعریف می‌شوند. اندیس‌های I_5 ، I_{10} ، I_{20} ، I_{30} که به ترتیب نظیر ۳، ۵/۵، ۱۰/۵، ۱۵/۵ برابر تغییر مکان اولین ترک می‌باشند شکل (۵-۷). اندیس‌های طاق دارای مقدار حداقل ۱ برای رفتار الاستیک شکننده و مقادیر حداکثر ۵، ۱۰، ۳۰ برای رفتار الاستوپلاستیک می‌باشند. دستگاه آزمایش باید قادر به ایجاد تغییر مکان با نرخ ثابت باشد،

^۱ - Toughness

برای تشکیل منحنی نیرو- تغییرمکان، افزایش نیرو مناسب نمی‌باشد چرا که ثبت اطلاعات بعد از بار حداکثر، با مشکل مواجه می‌شود. ثبت تغییر مکان در نقاط اعمال بار یا در وسط دهانه انجام می‌شود. همانطور که ذکر شد در این پایان نامه بار با سرعت $2/5 \text{ mm/min}$ به صورت نقطه‌ای در نقاط یک سوم دهانه وارد می‌شود.



شکل (۵-۷): اندازه‌گیری پارامترهای مربوط در آزمایش خمش

۵-۳-۴ آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی الیاف فولادی:

بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس در نوع رفتار FRC تعیین کننده می‌باشد. اگر شکست با گسیخته شدن الیاف همراه باشد نمونه مقاومت کششی زیادی را تحمل می‌کند، ولی رفتار آن ترد خواهد بود و چنانچه الیاف از ماتریس بیرون کشیده شوند به دلیل تدریجی بودن این نوع شکست رفتار نمونه شکل پذیر می‌باشد. برای دستیابی به هر دو پارامتر مقاومت کششی و شکل پذیری بالا و در نتیجه بیشترین میزان جذب انرژی باید هندسه الیاف به گونه‌ای طرح شود تا الیاف در حالت نهایی در آستانه گسیختگی قرار گیرند ولی قبل از گسیختگی از ماتریس بیرون کشیده شوند. در اینجا حالتی بررسی می‌شود که الیاف هم جهت با تنش کششی اعمال شده (عمود بر سطح ترک) قرار گرفته

باشند. در این حالت وقتی الیاف در مخلوط بتنی تحت کشش قرار می‌گیرند، چنانچه طول الیاف از طول بحرانی (L_c) کمتر باشد به دلیل از بین رفتن پیوستگی حتماً از ماتریس بیرون کشیده می‌شوند. در صورتی که طول الیاف از L_c بیشتر باشد احتمال اینکه در حالت نهایی گسیخته شود وجود دارد [۳۵].

در صورت استفاده از الیاف صاف عوامل موثر، نسبت ظاهری (L/d) و قطر الیاف، نوع و مقاومت ماتریس می‌باشد. در این میان استفاده از الیاف با قطر پایین‌تر به دلیل توزیع بهتر و افزایش تعداد الیاف در واحد حجم (fiber count) باعث می‌شود که ترک‌ها توسط الیاف بیشتری مهار شوند که این عامل باعث افزایش مقاومت کششی و شکل‌پذیری FRC می‌شود. چنانچه از الیاف موجدار استفاده شود پارامترهای دیگری علاوه بر قطر و نسبت ظاهری اهمیت پیدا می‌کند. از جمله این پارامترها طول و ارتفاع موجها می‌باشد. در مورد الیاف صاف تنش چسبندگی و اصطکاکی، در سطح تماس الیاف و ماتریس، کنترل‌کننده رفتار الیاف و ماتریس می‌باشد. ولی در مورد الیاف تغییر شکل یافته قلابدار عامل سومی اهمیت پیدا می‌کند که مهار مکانیکی می‌باشد. در این مورد الیاف در حین بیرون کشیده شدن در نواحی تغییر شکل یافته جاری شده و تغییر شکل پلاستیک می‌دهد که باعث ایجاد نیروی مقاوم و جذب انرژی زیاد می‌شود. کیفیت مهار بستگی به این موجها و مقاومت ماتریس دارد. افزایش نسبت ظاهری باعث کاهش کارایی و توده شدن الیاف و عدم توزیع یکنواخت آنها در تمام حجم ماتریس و در نتیجه افت کیفیت بتن الیافی می‌شود. با انجام آزمایشات تجربی می‌توان نسبت ظاهری بهینه را بدست آورد استفاده از الیاف با نسبت ظاهری بیش از صد اصلاً توصیه نمی‌شود.

روش استاندارد برای انجام آزمایشات مقاومت بیرون کشیدگی الیاف، استفاده از دستگاه‌های بسیار دقیق با ظرفیت پایین و توانایی اعمال تغییر مکان با نرخ ثابت و ثبت دقیق شاخه صعودی و نزولی نمودار نیرو- تغییر (میزان لغزش الیاف) می‌باشد. الیاف به صورت کاملاً عمودی و با طول مشخص در بتن مدفون می‌شوند. انجام آزمایشات به دلیل قطر کم الیاف و نیروی قابل تحمل توسط

آنها باید با دقت بیشتری انجام شود. شکل (۸-۵) دستگاه Pull-out را نشان می دهد.



شکل (۸-۵): دستگاه Pull-out

۵-۴ طرح اختلاط نمونه‌ها

طرح اختلاط پیشنهادی در ساخت نمونه‌ها، بر حسب درصد وزنی سیمان در جدول (۵-۳) ارائه شده است. از آنجا که وجود میکروسیلیس در طرح اختلاط باعث روانی و خمیری شدن نمونه‌های بتنی می‌شود و میزان نفوذپذیری را در برابر یون‌های مضر و کلراید کاهش می‌دهد و دوام بتن را در برابر محیط‌های آسیب‌پذیر افزایش می‌دهد به دلیل زمان بر بودن پروژه، میکروسیلیس استفاده نشد، بعد از ساخت نمونه‌های متعدد آزمایشی، برای جبران میزان روانی (در اثر حذف میکروسیلیس)، فوق روان‌کننده به میزان ۰٫۳ درصد وزنی سیمان برای نمونه‌های اصلی انتخاب شد و در طرح اختلاط مد نظر قرار گرفت. نمونه‌های خمشی با توجه به ابعاد و نوع الیاف، در سه تیپ ساخته شدند، تیپ یک نمونه‌هایی با ابعاد (۱۲،۵×۷۵×۳۰۰) میلیمتر و مسلح به الیاف مجعد، تیپ ۲ نمونه‌هایی با ابعاد (۳۷،۵×۷۵×۴۵۰) میلیمتر و مسلح به الیاف قلابدار با نسبت آب به سیمان ۰٫۴۲/۰ است، تیپ ۳ نمونه‌هایی با ابعاد (۳۷،۵×۷۵×۴۵۰) مسلح به الیاف قلابدار با نسبت آب به سیمان ۰٫۳۷/۰، می‌باشد. در طرح اختلاط پیشنهادی دو نسبت آب به سیمان برای نمونه‌ها به کار گرفته شد. تا تاثیر آن در میزان خوردگی الیاف بررسی شود.

جدول (۵-۳): طرح اختلاط مربوط به ماتریس بتنی

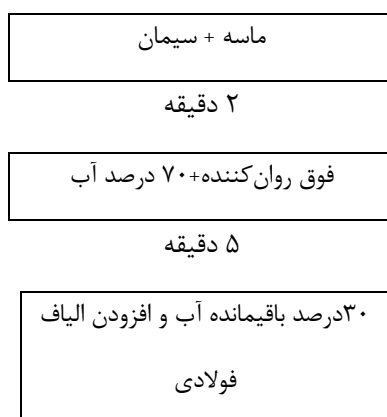
Mix Design	
Portland Cement	1
Sand (Ottawa)	1.5
Water	0.42,0.37
S.P	0.32
Fiber	2,1.5

جدول (۵-۴) خصوصیات نمونه‌های بتن الیافی را در هر سه تیپ نشان می‌دهد.

جدول ۵-۴: مشخصات نمونه‌های بتن الیافی

شماره نمونه‌ها	مشخصات بتن				مشخصات الیاف			ابعاد نمونه‌ها (mm)
	W/C	سیمان (g/m ³)	سنگدانه (g/m ³)	S.P (g/m ³)	نوع	درصد حجمی (Kg/m ³)	L/d	
Type 1	۰,۴۲	۷۷۸/۳	۱۱۶۷/۵	۲/۵	مجعد	۲ (۱۵۷)	۶۶/۷	$300 \times \frac{M}{S} 75 \times 12.5$
Type2	۰,۴۲	۷۷۸/۳	۱۱۶۷/۵	۲/۵	قلابداری	۲ (۱۵۷)	۶۲/۵	$450 \times \frac{M}{S} 75 \times 37.5$
Type 3	۰,۳۸	۸۰۷/۹	۱۲۱۱/۳	۲/۶	قلابداری	۱,۵ (۱۵۷)	۶۲/۵	$450 \times \frac{M}{S} 75 \times 37.5$

ماتریس بتن در تمامی نمونه‌ها، دارای یک طرح اختلاط تقریباً ثابت بود. روند طرح اختلاط نیز برای ساخت نمونه‌ها مطابق با مراحل شکل (۵-۹) انجام شد.



شکل (۵-۹): مراحل ساخت نمونه‌ها



شکل (۵-۱۰): ابعاد قالبها

برای ساخت نمونه‌های مسلح شده به الیاف مجعد به دلیل حجم کم نمونه‌ها از میکسر شماره ۱ با گنجایش ۱/۵ لیتر استفاده شد. در میکسر جام ثابت است و پره همزن با دوران حول دو محور عمودی، فشار زیادی به بتن وارد می‌کند که این عمل باعث تاثیر بیشتر مواد افزودنی می‌شود. ابتدا ماسه‌های دانه بندی شده به داخل جام میکسر ریخته می‌شوند. بعد از مخلوط شدن کامل ماسه‌ها سیمان به آنها اضافه می‌شود. به منظور اختلاط کامل، مصالح به جام دیگری منتقل می‌شوند. سپس محلول ۷۰ درصد آب و فوق روان کننده بسیار آهسته و به تدریج در دو یا سه مرحله به مصالح خشک افزوده می‌شود. در این مرحله مقداری مصالح خشک در ته جام باقی می‌ماند که باید آن را دوباره تعویض کرد. با این مقدار آب و فوق روان کننده بتن به صورت پودر نمناک در می‌آید. آب و فوق روان کننده به تمامی قسمت‌های مصالح خشک رسیده‌اند، ولی برای چسباندن ذرات بتن به یکدیگر آب بیشتری نیاز است. با افزودن ۳۰ درصد آب باقی‌مانده ذرات بتن به هم می‌چسبند و کارایی لازم بدست می‌آید. هرچه زمان اختلاط بیشتر باشد فوق روان کننده بیشتر تاثیر می‌گذارد. بعد از آن الیاف فولادی به مخلوط بتنی به تدریج اضافه می‌شود.

برای ساخت نمونه‌های مسلح شده به الیاف قلابدار به دلیل حجم بالای نمونه‌ها از میکسر شماره ۲ با گنجایش ۱۰ لیتر استفاده شد. سیستم اختلاط در این میکسر به این صورت است که جام ثابت

نیست و حول یک محور قائم دوران می‌کند و پره در جای خود ثابت است. زمان اختلاط در این میکسر طولانی‌تر است و تبخیر آب در آن قابل ملاحظه می‌باشد. برای رسیدن به کارایی مربوط به طرح اختلاط باید آب بیشتری در هنگام اختلاط به بتن اضافه کرد چرا که قسمتی از این آب اضافی در اثر حرارت تولیدی در اثر واکنش‌های خمیر سیمان تبخیر می‌شود. به همین دلیل این آب اضافی کارایی را تغییر نمی‌دهد و باعث کاهش مقاومت نمی‌شود. ترتیب اختلاط مصالح در این میکسر به این صورت می‌باشد که ابتدا ماسه و سپس سیمان کاملاً با هم مخلوط می‌شود. روش اضافه کردن آب به مصالح خشک باید با دقت صورت گیرد. بعد از آن محلول ۷۰ درصد کل آب و فوق روان‌کننده به صورت جت آب باریک و با شدت به نقاط مناسب روی مصالح خشک که در حالت اختلاط هستند پاشیده می‌شود. در نهایت برای رسیدن به کارایی مد نظر ۳۰ درصد آب باقی مانده بتدریج اضافه می‌شود شکل (۵-۱۱).



شکل (۵-۱۱): میکسر

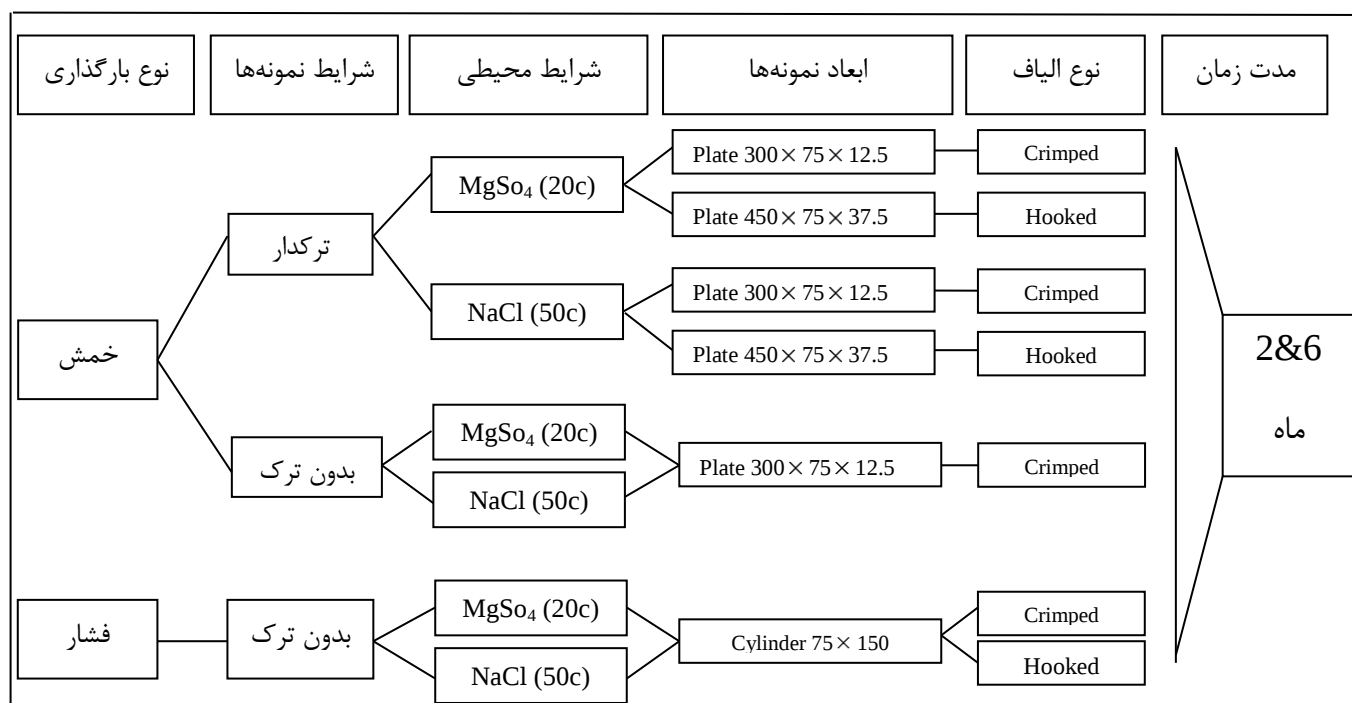
۵-۵ چگونگی عمل آوری نمونه‌ها و قرارگیری آنها در محیط خوردگی

در این قسمت به نحوه عمل آوری و نگهداری نمونه‌ها در محیط خوردگی در هر سه گروه اشاره

می‌شود.

۵-۱-۵ عمل آوری نمونه‌های گروه اول

در گروه اول از آزمایشات مطابق شکل (۵-۱۲)، دو نوع آزمایش فشاری و خمشی منظور شده است که نمونه‌های خمشی شامل ۲ دسته، نمونه‌های ترک‌دار و بدون ترک هستند، نمونه‌های بدون ترک فقط ابعاد $300 \times 75 \times 12.5$ و $450 \times 75 \times 37.5$ میلیمتر را شامل می‌شود و نمونه‌های ترک‌دار شامل هر دو ابعاد $300 \times 75 \times 12.5$ و $450 \times 75 \times 37.5$ میلیمتر است. نمونه‌های فشاری بدون ترک می‌باشند. که در هر دو شرایط محیطی سولفات ($MgSO_4$) و کلر ($NaCl$) نگهداری می‌شوند.



شکل (۵-۱۲): طبقه بندی برنامه مربوط به گروه اول از آزمایش‌ها

با توجه به نوع و روند طرح اختلاط مذکور، بعد از ساخت، نمونه‌ها بمدت ۲۴ ساعت در قالب قرار گرفته و سپس بیرون آورده می‌شوند. شیوه‌ی عمل آوری نمونه‌های ترک خورده، ۱۴ روز در آب ۲۰ درجه سانتیگراد و ۱۴ روز در دمای آزمایشگاهی بود.

بارگذاری نمونه‌های ترکدار شامل ۲ مرحله، مرحله پیش بارگذاری و بارگذاری مجدد است. در مرحله پیش بارگذاری، نمونه‌ها با آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، تا تغییر مکان ۳ میلیمتر در وسط دهانه‌ی بارگذاری، تحت اعمال بار قرار می‌گیرند (شکل ۵-۱۳) و (شکل ۵-۱۴). بعد از اتمام دوره‌های عمل آوری، مجدداً بارگذاری می‌شوند. (تغییر مکان توسط LVDT و نیرو توسط LOADCEL ثبت می‌شود). ترک‌ها به منظور نفوذ یون‌های کلرید و سولفات به داخل بتن، منظور شده‌اند که روند خوردگی را تسریع می‌بخشد.



شکل (۵-۱۳): مرحله پیش بارگذاری در نمونه‌های مسلح به الیاف قلابدار



شکل (۵-۱۴): مرحله پیش بارگذاری در نمونه‌های مسلح به الیاف مجعد

به منظور انجام آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، قطعه‌ای از فولاد طراحی و ساخته شد تا بتواند بار را در نقاط مذکور اعمال کند. وزن این پروفیل حدوداً ۶ کیلوگرم بود که در محاسبات لحاظ نیز گردید شکل (۵-۱۵).



شکل (۵-۱۵): پروفیل ساخته شده برای بارگذاری آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

شیوه‌ی عمل آوری نمونه‌های بدون ترک، ۶ روز در آب ۲۰ درجه سانتیگراد و ۷ روز در دمای

آزمایشگاهی بود.

بعد از آن تمام نمونه‌ها در محیط‌های خوردگی در سیکل‌های خشک و مرطوب (Dry&Wet) به مدت ۲ و ۶ ماه قرار گرفتند. چرخه‌ی خوردگی در نمونه‌های دو ماه ۳ روزه و در نمونه‌های شش ماه ۱ روزه بود. غلظت محلول‌ها براساس استاندارد ACI 318 ، برای محیط‌های سولفاتی متناسب با شدیدترین نوع خوردگی گزینش شد، محیط کلریدی، محلول ۳,۵ درصد آب نمک با دمای ۵۰ درجه سانتیگراد و دمای محلول سولفاتی ۲۰ درجه سانتیگراد بود.

برای مقایسه و کنترل نتایج حاصل، در هر تیپ، نمونه‌های شاهد ساخته شد. عمل آوری این نمونه‌ها ۶ روز در محیط آبی و ۲۱ روز در دمای آزمایشگاه بود، این نمونه‌ها ۲۸ روزه تست شدند.

جدول (۵-۵) ابعاد، تعداد و شرایط قرارگیری نمونه‌ها در گروه اول برای نمونه‌های مسلح شده با الیاف مجعد را بطور خلاصه نشان می‌دهد.

جدول (۵-۵): مشخصات مربوط به تعداد و اندازه نمونه‌ها در گروه اول آزمایش‌ها (مجعد ۲٪)

نوع الیاف مجعد	نوع محلول			آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵۰×۷۵	آزمایش خمش پلیت ۳۰۰×۷۵×۱۲,۵	
					بدون ترک	ترک دار
درصد الیاف	کلراید	کنترلی	سولفات	—	—	بارگذاری تا رسیدن به تغییر مکان ۳ میلیمتر
	—	Water	—	۳	۳	۳
	—	—	Mgso ₄	۳	۳	۳
	Nacl	—	—	۳	۳	۳

ثابت	توضیحات	غلظت محلول‌های سولفاتی متناسب با آیین نامه ACI318 و شدید ترین نوع شرایط خوردگی است. غلظت کلراید ۳,۵ درصد وزنی آب است.		
		۹	۹	۹
۲٪	مجموع نمونه‌ها			

جدول (۵-۶) ابعاد، تعداد و شرایط قرارگیری نمونه‌ها در گروه اول برای نمونه‌های مسلح شده با الیاف قلابدار را بطور خلاصه نشان می‌دهد.

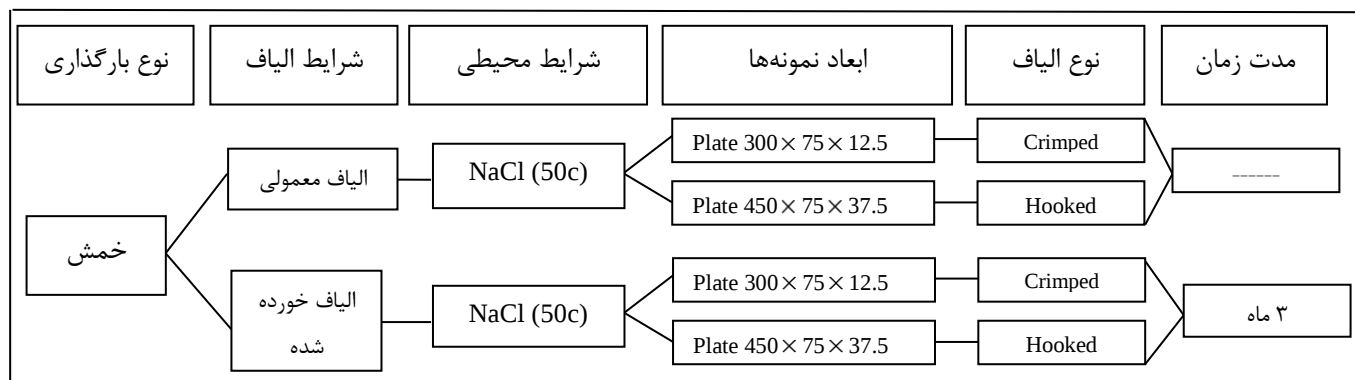
جدول (۵-۶): مشخصات مربوط به تعداد و اندازه نمونه‌ها در گروه اول آزمایش‌ها (قلابدار ۱/۵ و ۲٪)

نوع الیاف قلابدار	نوع محلول			آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵۰×۷۵	آزمایش خمش پلیت ۴۰۰×۷۵×۳۷,۵
					ترک‌دار بارگذاری تا رسیدن به تغییر مکان ۳ میلیمتر
	سولفات	کنترلی	کلراید	درصد	
	-	Water	-	۳	۳

الیاف	-	-	Mgso ₄	۳	۳
ثابت	Nacl	-	-	۳	۳
۱/۵، ۲٪	توضیحات			غلظت محلول‌های سولفاتی متناسب با آیین نامه ACI318 و شدید ترین نوع شرایط خوردگی است غلظت کلراید ۳,۵ درصد وزنی آب است.	
	مجموع نمونه‌ها			۹	۹

۵-۲-۵ عمل آوری نمونه‌های گروه دوم

در گروه دوم از آزمایشات مطابق شکل (۵-۱۶)، نوع آزمایش، آزمایش خمشی است و شرایط نمونه‌ها، نمونه‌های مسلح شده به الیاف خورده شده و نمونه‌های مسلح شده به الیاف خورده نشده (نمونه‌شاهد) می‌باشد که در هر دو ابعاد $۱۲/۵ \times ۷۵ \times ۳۰۰$ و $۳۷/۵ \times ۷۵ \times ۴۵۰$ ساخته می‌شوند.



شکل (۵-۱۶): طبقه بندی برنامه مربوط به گروه دوم از آزمایش‌ها

در خصوص نحوه‌ی عمل آوری الیاف برای ساخت نمونه‌های گروه دوم، الیاف قلابدار و مجعد در دوره‌های ۳ ماهه از چرخه‌های ۳ روزه (خشک/مرطوب) در محلول ۳,۵ درصد سدیم کلرید قرار گرفتند (شکل ۵-۱۷)، بعد از گذراندن این دوره‌ها، نمونه‌های ساخته شده از الیاف بعد از ۲۸ روز قرار گیری در آب تست شدند. کاهش حداقل قطر الیاف بعد از ۳ ماه عمل آوری به طور میانگین ۵۰

درصد اندازه‌گیری شد.



شکل (۵-۱۷): الیاف بعد از ۳ ماه عمل آوری

جدول (۵-۷)، ابعاد و تعداد نمونه‌ها را در گروه دوم به صورت خلاصه ارائه می‌دهد.

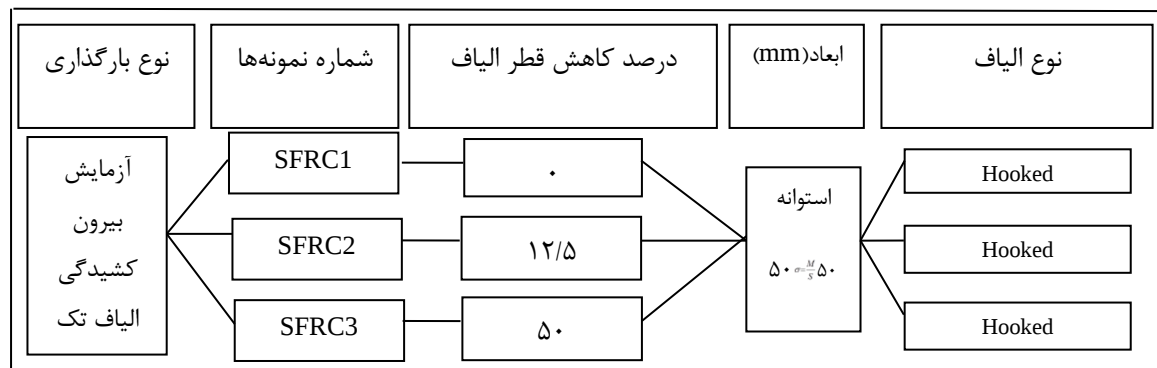
جدول (۵-۷): تعداد و ابعاد نمونه‌ها در آزمایش گروه دوم

شماره نمونه‌ها	درجه خوردگی بر اساس کاهش قطر الیاف (درصد)	ابعاد	تعداد
SFRC1	Crimped—0%	$300 \times \frac{M}{S} 75 \times 12.5$	3
	Hooked---0%	$450 \times \frac{M}{S} 75 \times 37.5$	3
SFRC3	Crimped—50%	$300 \times \frac{M}{S} 75 \times 12.5$	3
	Hooked---50%	$450 \times \frac{M}{S} 75 \times 37.5$	3

۵-۵-۳ عمل آوری نمونه‌های گروه سوم

در گروه سوم از آزمایشات مطابق شکل (۵-۱۸)، که در رابطه با بررسی اثر خوردگی در نوع رفتار بیرون کشیدگی الیاف تک از ماتریس بتنی است؛ الیاف با طول مشخص (نصف طول الیاف) در ماتریس استوانه‌ای 50×50 میلیمتر مدفون شده و ۶ روز در آب نگهداری (با توجه به خوردگی الیاف، نمونه‌ها طوری در آب قرار گرفتند که سطح نمونه در تماس با سطح آب بود) و با کمک دستگاه

Pull-out بیرون کشیده می‌شوند. سیستم طراحی نمونه‌های Pull-out به گونه‌ای بود که ابتدا نصف طول الیاف به صورت کاملاً عمودی در داخل یک پایه فلزی جایگذاری شد بعد از ثابت کردن الیاف، و در مرکز قالب استوانه‌ای ماتریس قرار گرفت و از بتن پر شد (شکل ۵-۱۹). با کمک میز لرزان اندکی ویبره شد.



شکل (۵-۱۸): طبقه بندی برنامه مربوط به گروه سوم از آزمایش‌ها



شکل (۵-۱۹): مکانیزم آماده سازی نمونه‌های pull-out

SFRC1 نمونه معیار مقایسه و کنترل نتایج حاصل در این گروه می‌باشد. در SFRC2 رنج خوردگی بر اساس کاهش قطر الیاف تقریباً معادل ۱۲/۵ درصد و در SFRC3 خوردگی بر اساس کاهش قطر الیاف حدوداً ۵۰ درصد اندازه‌گیری شد.

جدول (۵-۸)، تعداد و مشخصات انواع الیاف مدفون شده در ماتریس را به صورت خلاصه ارائه می‌دهد.

جدول (۵-۸): مشخصات آزمایش مقاومت بیرون کشیدن الیاف فولادی قلابدار

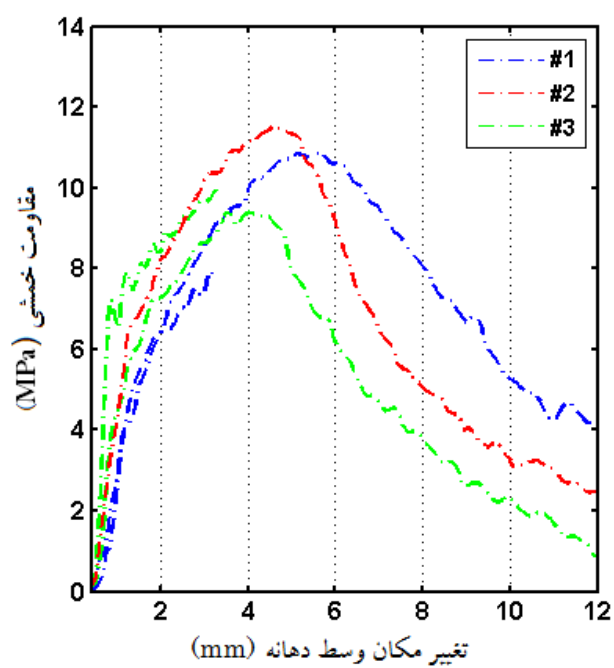
شماره نمونه‌ها	استوانه (تعداد) 50×50 (mm)	طول مدفون شده الیاف (mm)
SFRC1	۴	۲۵
SFRC2	۴	۲۵
SFRC3	۴	۲۵

۶-۵ نتایج حاصل از بارگذاری خمشی نمونه‌ها در هر سه گروه آزمایشات

۶-۵-۱ نتایج آزمایشات دسته اول (نمونه‌های ترک‌دار)

در شکل‌های (۵-۲۰) تا (۵-۲۲) رفتار نمونه‌های خمشی در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای برای تیپ‌های ۱، ۲ و ۳ ارائه شده است. که در آن علاوه بر ماکزیمم بار وارده و مقاومت خمشی اطلاعات دیگری مانند تغییر مکان نظیر حداکثر بار و جذب انرژی تا تغییر مکان ۱۲ میلیمتر بدست آمده است. با دقت در نمودارها مشاهده می‌شود که بارگذاری نمونه‌های ترک‌دار شامل دو مرحله (پیش بارگذاری (تا تغییر مکان ۳ میلیمتر) و بارگذاری مجدد) است. هر دوی این مراحل برای هر نمونه با یک رنگ در نمودار خمش ترسیم شده است.

نمونه‌های شاهد با سن ۲۸ روزه (Type1)	تنش حداکثر خمشی (Mpa)	حداکثر ظرفیت باربری (N)	Δ_m (mm)	طاقیت* N-m
# ۱	۹/۳۹	۴۸۹/۱	۵/۳	۲/۵
# ۲	۱۰/۸۶	۵۶۵/۵	۴/۶	۴
# ۳	۸/۴۲	۴۲۸/۷	۴	۲/۹
میانگین	۹/۶	۴۹۴/۴۳	۴/۶۳	۳/۵

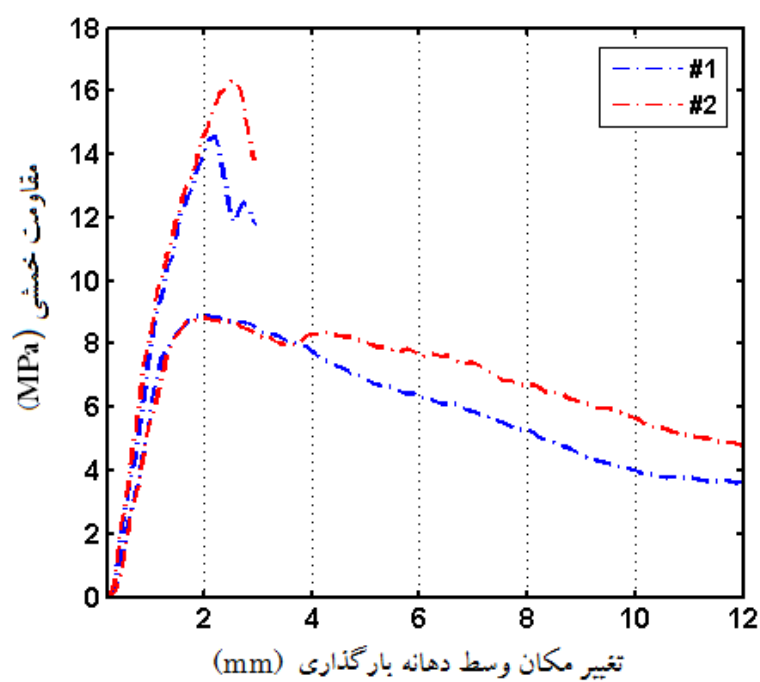


* سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان

شکل (۵-۲۰): مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد (تیپ ۱)

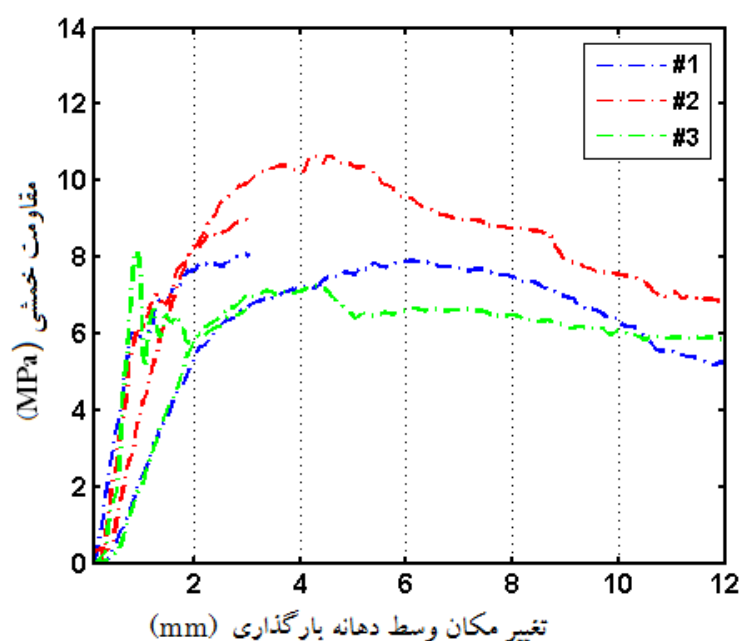
نمونه‌های شاهد با سن ۲۸ روزه (Type2)	تنش حداکثر خمشی (Mpa)	حداکثر ظرفیت باربری (KN)	Δ_m (mm)	طاقة* (N-m)
# ۱	۸/۴۶	۲/۰۸	۱/۸	۱۶/۲
# ۲	۸/۴۳	۲/۰۸	۱/۸	۱۸/۷۵
میانگین	۸/۴۵	۲/۰۰	۱/۸	۱۷/۴۸

* سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان



شکل (۵-۲۱): مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد (تیپ ۲)

نمونه‌های شاهد با سن ۲۸ روزه (Type3)	تنش حداکثر خمشی (Mpa)	حداکثر ظرفیت باربری (KN)	Δ_m (mm)	طاقة* (N-m)
# ۱	۷/۹	۱/۸۶	۶/۱	۱۷/۳
# ۲	۱۰/۶۹	۲/۵۱	۴/۲	۲۲/۷
# ۳	۶/۹۹	۱/۶۴	۴/۳	۱۶/۳
میانگین	۸/۵۲	۲/۰۰	۴/۸۶	۱۸/۷



* سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان

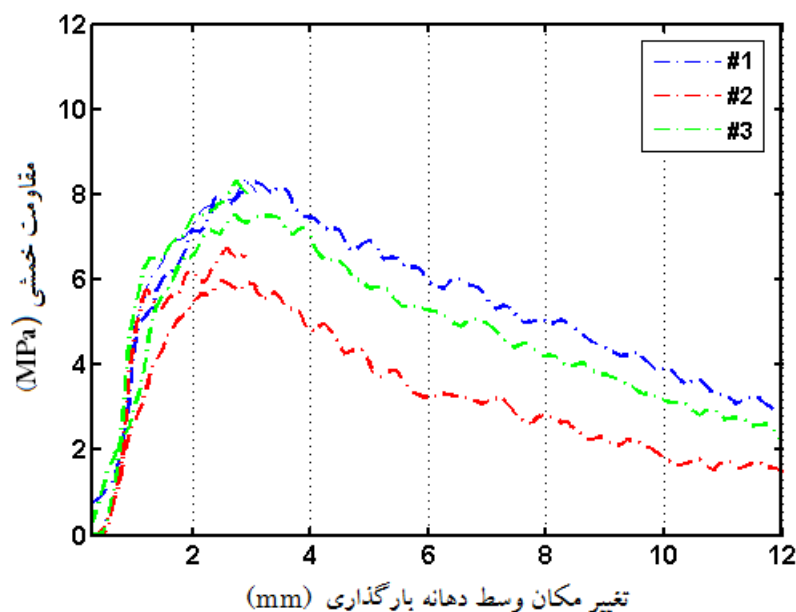
شکل (۵-۲۲): مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد (تیپ ۳)

به منظور انجام بررسی و مقایسه نسبی، ساخت نمونه‌های شاهد در برنامه آزمایشی مد نظر قرار گرفت. هدف از تست آنها، رسیدن به میزان مقاومت قابل تحمل در نمونه‌ها با توجه به ابعاد آنها و همینطور تا حدودی داشتن مبنایی برای بررسی مقایسه نتایج حاصل از نمونه‌های عمل آوری شده در محیط‌های آسیب پذیر بود. البته در درجه اول ملاک مقایسه نتایج، در نمونه‌های ترک دار، مرحله اول بارگذاری (مرحله پیش بارگذاری) می‌باشد. چرا که بارگذاری در مرحله دوم طبیعتاً وابسته به مرحله اول می‌باشد. در نمونه‌های شاهد، (تیپ ۱ و ۳) مشاهده شد که در مرحله اول بارگذاری، نمونه‌ها با ایجاد تغییر مکان ۳ میلیمتر می‌توانند مقاومت خمشی بین ۷ تا ۱۰ مگاپاسکال را تحمل کنند، با توجه به

خطی بودن نمودار در این مرحله، می‌توان انتظار تحمل بار بیشتر را از نمونه‌ها، در مرحله دوم بارگذاری داشت، با انجام بارگذاری در مرحله دوم شاهد ماکزیمم مقاومت خمشی بیشتر، حدوداً ۸ تا ۱۲ مگاپاسکال در این نمونه‌ها هستیم. در نمونه‌های تیپ ۲ بارگذاری تا تغییر مکان ۳ میلیمتر، رفتار نمونه را از مرحله الاستیک خطی خارج کرده و مقاومت خمشی نمونه در مرحله دوم را کاهش می‌دهد.

شکل (۵-۲۳) و شکل (۵-۲۴) نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های قرار گرفته در محلول کلر در دوره‌های ۲ و ۶ ماهه، در هر دو مرحله بارگذاری، برای تیپ (۱) نشان می‌دهد.

نمونه‌های غوطه‌ور در محلول کلر با دمای ۵۰ درجه به مدت دو ماه (Type1)	تنش حداکثر خمشی (Mpa)	حداکثر ظرفیت باربری (N)	Δ_m (mm)	طاقیت* (N-m)
# ۱	۸/۳۱	۴۳۲/۲	۲/۳	۲/۳۰
# ۲	۵/۹۶	۳۸۰/۲۳	۲/۹۵	۲/۰۰
# ۳	۷/۸۱	۳۹۰/۳۲	۲/۴	۲/۹
میانگین	۷/۳۶	۴۰۰/۹۱	۲/۸۸	۲/۷۳



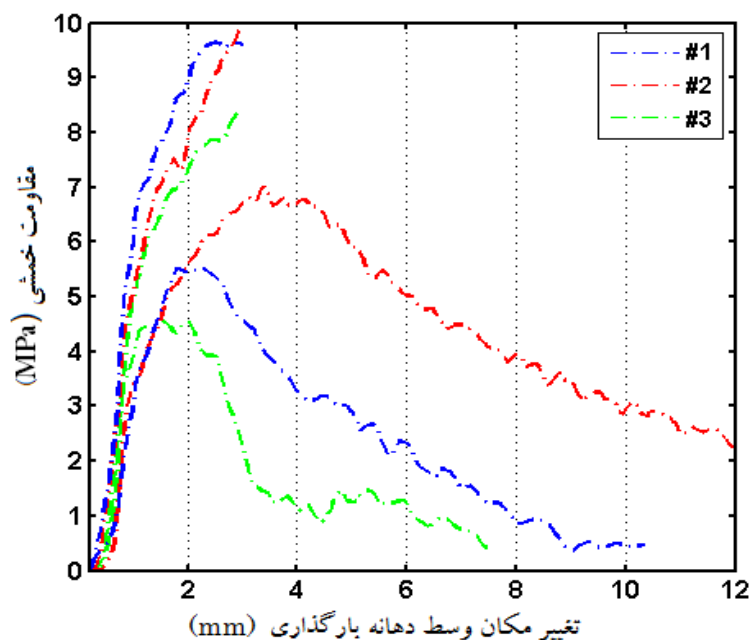
* سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان

شکل (۵-۲۳): نتایج آزمایش خمشی در نمونه‌های تیپ ۱ در دو ماه (محیط کلر)

نمونه‌هایی که دو ماه در معرض محیط کلر در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد بودند؛ با توجه به دوره کوتاه مدت خوردگی تغییر چندانی در میزان مقاومت نمونه‌ها مشاهده نشد و نتایج آزمایش خمش در هر دو مرحله بارگذاری نزدیک به هم بود. ترک‌های موجود در نمونه‌ها شرایط را برای ورود یونهای کلر تشدید کرد، این شرایط بیشتر روی شکل ظاهری نمونه‌ها و تغییر رنگ آنها (به نارنجی روشن) و الیاف قرار گرفته در سطح نمونه تاثیر گذار بود.

نمونه‌های غوطه‌ور در محلول کلر با دمای ۵۰ درجه به مدت شش ماه (Type1)	تنش حداکثر خمشی (Mpa)	حداکثر ظرفیت باربری (N)	Δ_m (mm)	طاقة* (N-m)
#۳	۴/۵۵	۲۳۶/۹۹	۲/۴	۰/۸
#۲	۶/۰۱	۳۱۲/۸۴	۲/۳	۲/۳
#۱	۵/۵۳	۲۸۸/۱۸	۲/۹۵	۱/۲
میانگین	۵/۳۷	۲۹۷/۳۴	۲/۸۸	۱/۴۳

* سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان

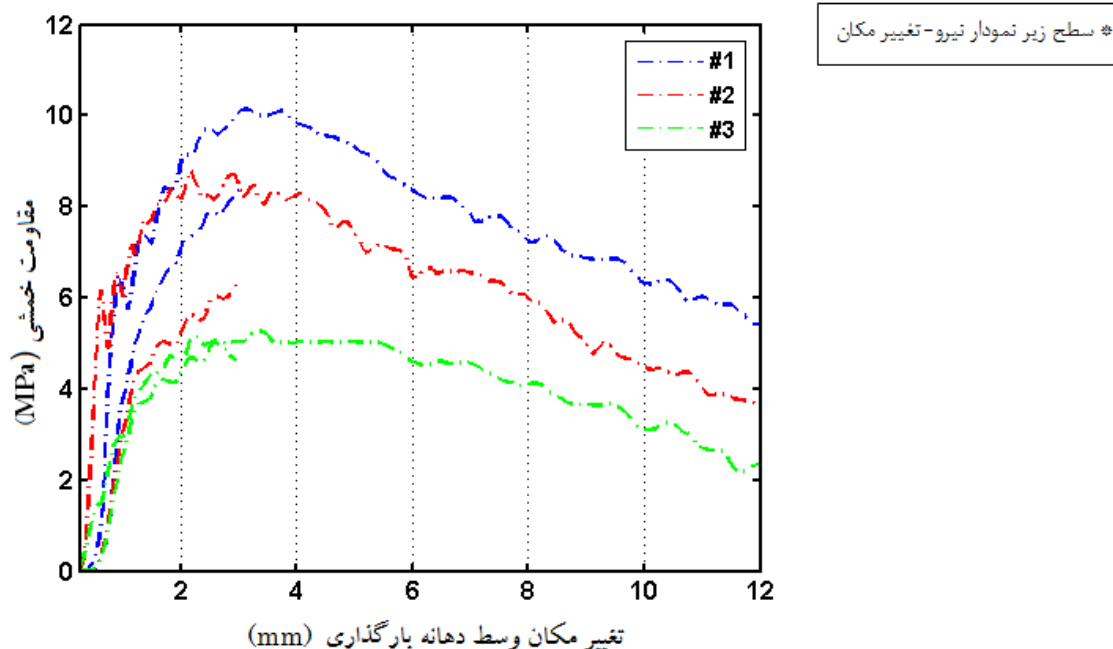


شکل (۵-۲۴): نتایج آزمایش خمش در نمونه‌های تیپ ۱ در شش ماه (محیط کلر)

با طولانی شدن مدت زمان قرارگیری نمونه‌ها در محیط آسیب پذیر کمر، با مقایسه نمودار خمش در هر دو مرحله از بارگذاری، مشاهده شد که افزایش طول دوره خوردگی باعث کاهش میزان انرژی جذب شده و ماکزیمم مقاومت خمشی قابل تحمل و قطر الیاف در مرحله دوم نسبت به مرحله اول بارگذاری شده است. این کاهش در میزان ظرفیت جذب انرژی حدوداً ۳۰ تا ۳۵ درصد بود.

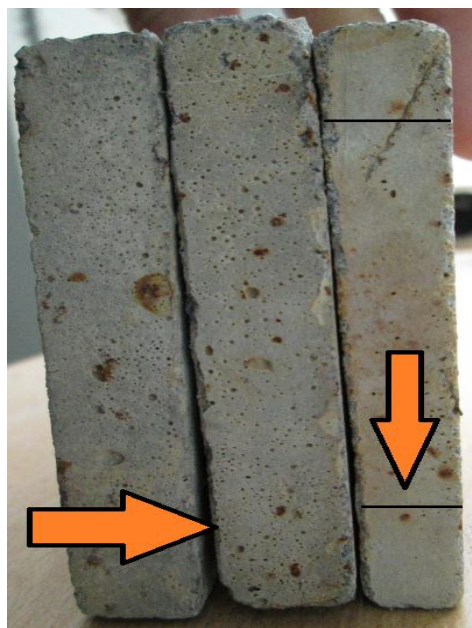
شکل (۵-۲۵) و شکل (۵-۲۷) نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های قرار گرفته در محلول سولفات در دوره‌های ۲ و ۶ ماهه، در هر دو مرحله بارگذاری، برای تیپ (۱) را نشان می‌دهد.

طاقة *	Δ_m	حداکثر ظرفیت باربری	تنش حداکثر خمشی	نمونه‌های غوطه‌ور در محلول سولفات با
(N-m)	(mm)	(N)	(Mpa)	دمای ۲۰ درجه به مدت دو ماه (Type1)
۲/۵	۲/۶	۲۷۲/۹۵	۵/۲۶	#۳
۴/۸۷	۲/۷	۵۲۸/۲۳	۱۰/۱۴	#۱
۴/۲	۲/۸	۴۲۱/۲	۸/۲۸	#۲
۴/۵۵	۲/۴	۳۹۵/۵۹	۷/۶۲	میانگین



شکل (۵-۲۵): مقاومت خمشی نمونه‌های تیپ ۱ در دو ماه (محیط سولفات)

خوردگی در این نمونه‌ها تغییر چندانی در میزان مقاومت و جذب انرژی آنها نداشت. ترک‌های موجود در نمونه‌ها شرایط را برای انجام واکنش‌های سولفاتی تشدید کرد که باعث تغییر رنگ ظاهری نمونه شد. نمونه شماره سه، در مرحله اول و دوم مقاومت خمشی کمتری را تحمل کرد، ضخامت این نمونه در مقایسه با نمونه‌های دیگر کمتر بود شکل (۵-۲۶). به همین دلیل تا رسیدن به تغییر مکان ۳ میلیمتر، ترک‌های ایجاد شده عرض بیشتری داشتند. با توجه به اینکه قطر قالب‌های نمونه‌های تیپ ۱، ۱۲/۵ میلیمتر بود مرحله مربوط به بتن ریزی و متراکم کردن، با این قطر کم می‌تواند درصد خطا را در ساخت نمونه‌ها را بالا ببرد. لذا در میانگین‌گیری جامعه آماری در این دسته از نمونه شماره سه صرفه نظر می‌شود.



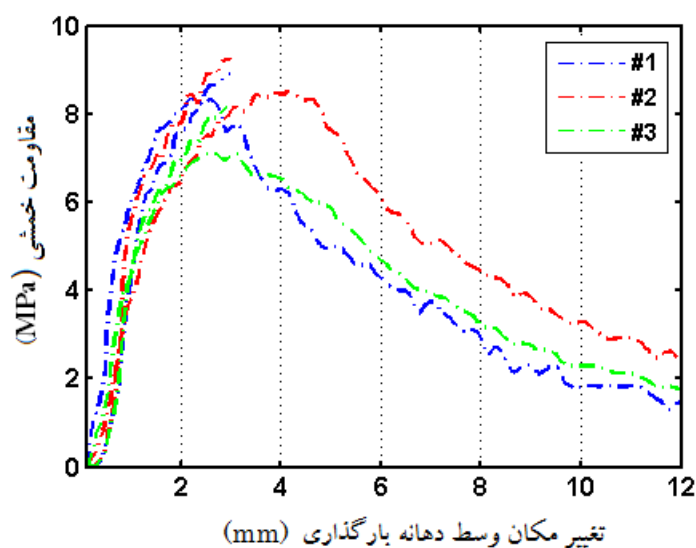
شکل (۵-۲۶): تفاوت قطر در بعضی از نمونه‌ها

تغییر دیگری که با مقایسه نمودارها قابل مشاهده بود بیشتر شدن شیب ناحیه خطی نمودار در مرحله دوم بارگذاری نسبت به مرحله‌ی اول است. ممکن است دلیل این نوع رفتار در نمونه‌ها، آب-بندی ترک به واسطه قرارگیری طولانی مدت نمونه‌ها در محلول و تماس آن با جریان آب و انجام واکنش‌های شیمیایی بین سیمان و آب باشد. همانطور که این اثر در تحقیقات محققین مشاهده شد و

از آن به عنوان اثر خود ترمیمی ترک^۱ یاد شد. اثر خودترمیمی ترک‌ها یکی از عوامل مهم در مهارکردن و محدود نمودن عرض ترک است که تحت شرایط رطوبتی و با عبور جریان محدود آب از ترک‌هایی با عرض کم به وجود خواهد آمد. به عبارت دیگر حاصل واکنشی است که در آن با حل شدن دی اکسید کربن در آب و ایجاد یون بی کربنات همینطور خارج شدن یون کلسیم از محتوای هیدروکسید کلسیم در بتن و در نهایت با حضور جریان محدود آب که در عین حال از کلسیم و یون بی کربنات اشباع است لایه کریستال آهکی در طول دیواره ترک ایجاد شده و ترک را به آرامی آب-بندی می‌کند. عوامل موثر در پدیده خودترمیمی کیفیت بتن، نوع حرکت ترک و میزان pH موجود در آب است. اثر خود ترمیمی ترک‌ها توسط Schiessl (1966) بررسی شد [۳۱]. در تحقیقات او نتایج حاکی از آن داشت که اگر آب جریان یافته در عرض ترک حاوی غلظت بالایی از کلر (بالتر از ۰.۵ درصد وزنی در کیلوگرم سیمان) باشد فرایند خوردگی همچنان ادامه دارد، در غیر این صورت خوردگی متوقف می‌شود.

¹ -Self healing

طاقة* (N-m)	Δ_m (mm)	حداکثر ظرفیت باربری (N)	تنش حداکثر خمشی (Mpa)	نمونه‌های غوطه‌ور در محلول سولفات با دمای ۲۰ درجه به مدت شش ماه (Type1)
۲/۲	۲/۶	۴۳۴/۹۱	۸/۳۵	# ۱
۲/۶۵	۴	۴۴۲/۶۱	۸/۵۱	# ۲
۲/۹	۲/۷	۳۲۹/۵۵	۷/۲۱	# ۳
۲/۲۵	۲/۴	۳۹۵/۵۹	۷/۶۲	میانگین



* سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان

شکل (۵-۲۷): مقاومت خمشی نمونه‌های تیپ ۱ در شش ماه (محیط سولفات)

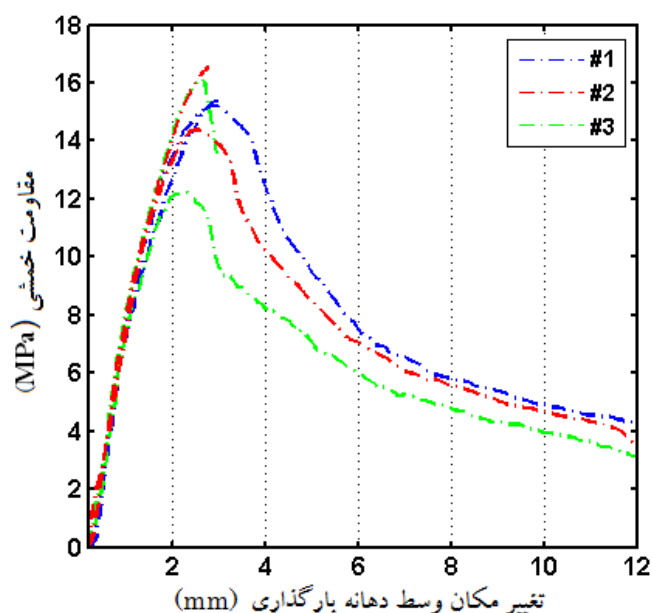
با طولانی شدن مدت زمان قرارگیری نمونه‌ها، مشاهده شد که دوره خوردگی در این نمونه‌ها باعث کاهش میزان انرژی جذب شده به میزان ۷ تا ۱۰ درصد نسبت به نمونه‌های کنترلی شد.

شکل (۵-۲۸) و شکل (۵-۲۹) نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های قرار گرفته در محلول سولفات در دوره‌های ۲ و ۶ ماهه، در هر دو مرحله بارگذاری، برای تیپ (۲) را نشان می‌دهد.

#۲
#۳

نمونه‌های غوطه‌ور در محلول سولفات با دمای ۲۰ درجه به مدت دو ماه (Type2)	تنش حداکثر خمشی (Mpa)	حداکثر ظرفیت باربری (KN)	Δ_m (mm)	طاقة* (N-m)
# ۳	۱۵/۱۹	۲/۵۳	۲/۸	۲۱/۶
# ۲	۱۲/۲۱	۲/۸۶	۲	۱۷/۵۷
# ۱	۱۵/۲۴	۲/۵۷	۳	۲۲/۲۱
میانگین	۱۴/۲۱	۲/۳۲	۲/۶	۲۰/۴۶

* سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان



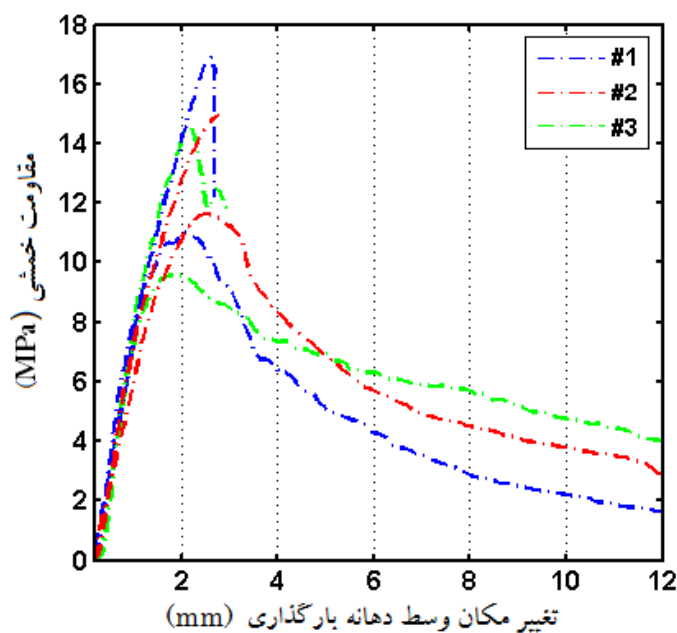
شکل (۵-۲۸): مقاومت خمشی نمونه‌های تیپ ۲ در دو ماه (محیط سولفات)

با توجه به مشخصات شکل (۵-۲۸) نمونه‌هایی که دو ماه تحت شرایط سولفات قرار داشتند. در مقایسه با نمونه‌های کنترلی در مرحله دوم، مقاومت خمشی بالاتری را تحمل کردند، این افزایش ممکن است به دلیل نحوه و مدت زمان عمل آوری نمونه‌ها باشد، از طرفی همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه‌هایی که در مرحله اول بارگذاری، حالت الاستیک خطی خود را حفظ کرده‌اند، (آبی و قرمز) مسلماً در مرحله دوم می‌توانند مقاومت بالاتری را تحمل کنند. نمونه شماره ۳ (نمودار سبز) در مرحله اول بارگذاری از حالت الاستیک خطی خارج شده و بعد از آن تا مقاومت ۱۲ مگاپاسکال را

تحمل می‌کند.

نمونه‌های غوطه‌ور در محلول سولفات با دمای ۲۰ درجه به مدت شش ماه (Type2)	تنش حداکثر خمشی (Mpa)	حداکثر ظرفیت باربری (KN)	Δ_m (mm)	طاقة* (N-m)
#۲	۱۱/۶۴	۲/۲	۲/۸	۱۶/۹۲
#۱	۱۱/۰۰	۲/۵۷	۲	۱۶/۷۱
#۳	۹/۵۷	۲/۲۴	۲	۱۳/۶
میانگین	۱۰/۷۴	۲/۶۷	۲/۳	۱۵/۷۴

* سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان



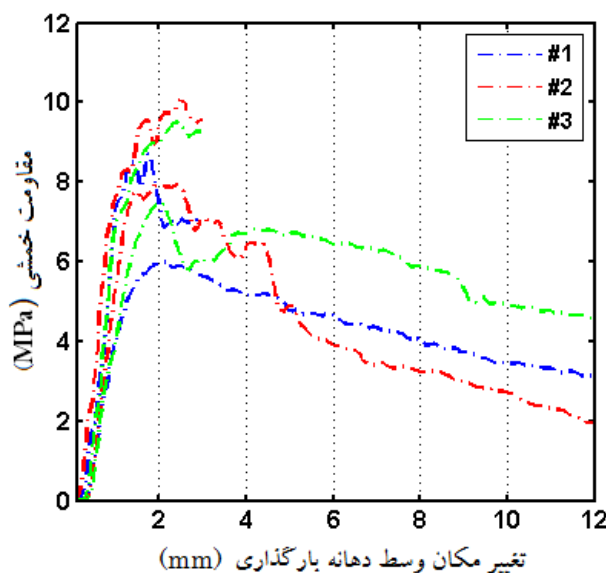
شکل (۵-۲۹): مقاومت خمشی نمونه‌های تیپ ۲ در شش ماه (محیط سولفات)

با طولانی شدن مدت زمان عمل آوری نمونه‌ها، خوردگی باعث کاهش میزان انرژی جذب شده و ماکزیمم مقاومت خمشی قابل تحمل در نمونه و قطر الیاف شد. این کاهش حدوداً ۱۰ تا ۱۵ درصد نسبت به نمونه‌های دو ماه بود.

شکل (۵-۳۰) و شکل (۵-۳۱) نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های قرار گرفته در

محلول کلر در دوره‌های ۲ و ۶ ماهه، در هر دو مرحله بارگذاری، برای تیپ (۳) را نشان می‌دهد.

نمونه‌های غوطه‌ور در محلول کلر با دمای ۵۰ درجه به مدت دو ماه (Type3)	تنش حداکثر خمشی (Mpa)	حداکثر ظرفیت باربری (KN)	Δ_m (mm)	طاقة* (N-m)
#۲	۷/۹۳	۱/۸	۱/۸	۱۱/۸۷
#۳	۷/۷۶	۱/۵۵	۲	۱۵/۶۴
#۱	۵/۹۶	۱/۴	۲	۱۱/۹۳
میانگین	۷/۲۲	۱/۵۸	۱/۹۳	۱۳/۱۵



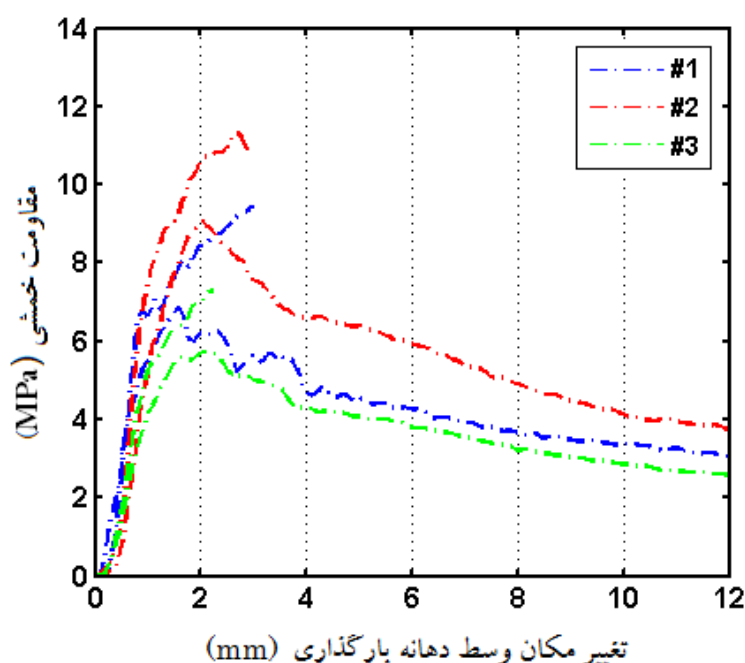
* سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان

شکل (۵-۳۰): مقاومت خمشی نمونه‌های تیپ ۳ در دو ماه (محیط کلر)

در نمونه‌هایی که ۲ ماه در محیط کلر عمل آوری شدند با توجه به نمودار بارگذاری مرحله اول، تغییر چندانی در میزان مقاومت نمونه‌ها در بارگذاری مرحله دوم، مشاهده نشد. در نمونه‌ی شماره سه در تغییر مکان حدودا ۳ تا ۴ میلیمتر نمودار روند صعودی پیدا کرده است این تغییر روند به دلیل توزیع غیر یکنواخت الیاف در نمونه‌ها می‌باشد. همین علت باعث افزایش رفتار سخت شدگی کرنشی و در نهایت جذب انرژی بیشتر در این نمونه نسبت به نمونه‌های دیگر می‌باشد.

نمونه‌های غوطه‌ور در محلول کلر با دمای ۵۰ درجه به مدت شش ماه (Type3)	تنش حداکثر خمشی (Mpa)	حداکثر ظرفیت باربری (KN)	Δ_m (mm)	طاقة* (N-m)
#۱	۶/۸۴	۱/۶۱	۱/۸	۱۱/۹۳
#۲	۸/۸۵	۲/۱۲	۲	۱۴/۲۳
#۳	۵/۹۲	۱/۳۴	۲	۱۲/۱۴
میانگین	۷/۳۳	۱/۷	۱/۹۳	۱۲/۷

* سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان



شکل (۵-۳۱): مقاومت خمشی نمونه‌های تیپ ۳ در شش ماه (محیط کلر)

با طولانی شدن مدت زمان عمل آوری نمونه‌ها، مشاهده شد که دوره خوردگی در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های دو ماهه باعث کاهش میزان انرژی جذب شده تا حدود ۳ درصد شد و در میزان حداکثر مقاومت خمشی، تغییر چندانی وجود نداشت. خوردگی در این دسته از نمونه‌ها بدلیل بزرگی ابعاد نمونه تغییر چندانی در مشخصات مکانیکی نداشته و تنها به تغییر رنگ ظاهری نمونه‌ها و تغییر حدوداً ۲۰ درصدی در قطر الیاف قرار گرفته در سطوح نمونه نزدیک به ترک، محدود شد. شرایط دمایی ۵۰ درجه محلول در بالا نگه داشتن مقاومت نمونه در مدت زمان مربوطه بی‌تاثیر نبوده است.

۵-۶-۲ نتایج حاصل از آزمایشات دسته اول (نمونه‌های بدون ترک)

در شکل (۵-۳۲) و جدول (۵-۹) رفتار نمونه‌های خمشی در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای برای

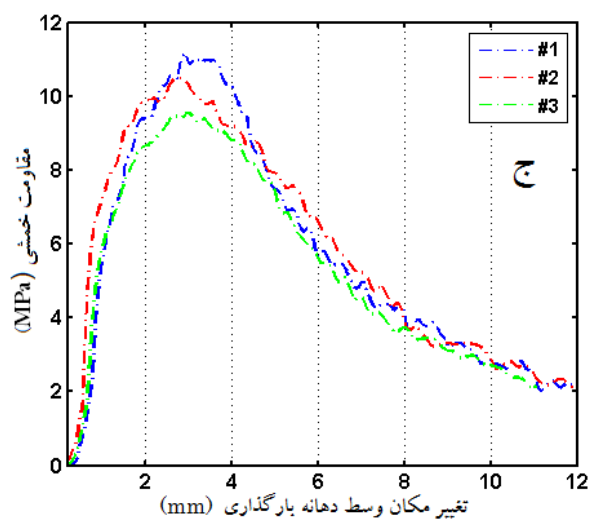
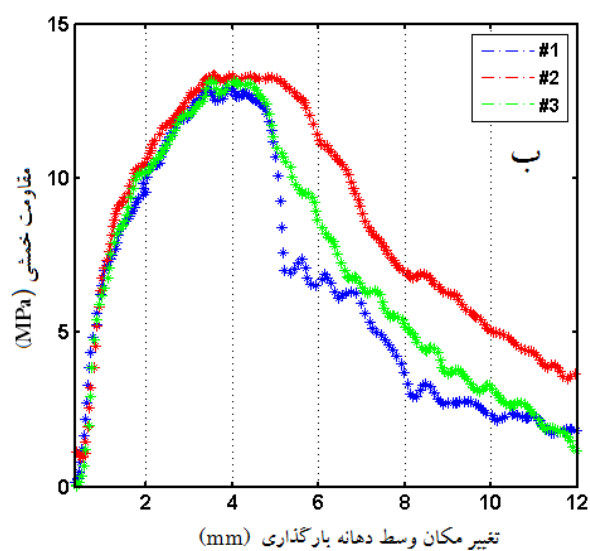
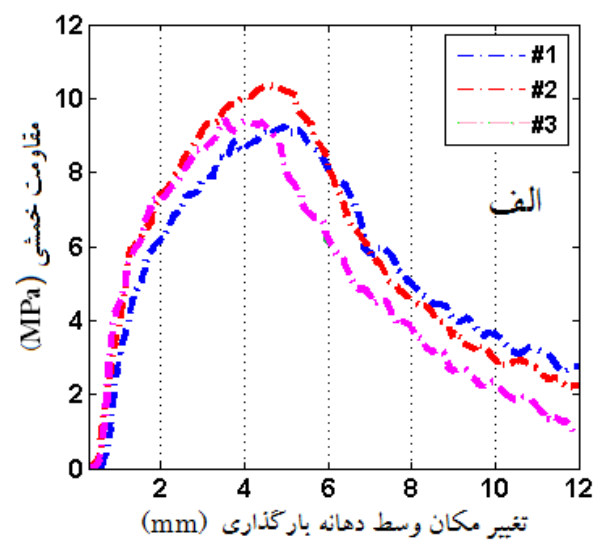
تیپ ۱ در ارائه شده است.

جدول (۵-۹): نتایج آزمایش خمش در نمونه‌های بدون ترک

توضیحات	مقاومت خمشی نظیر اولین ترک (Mpa)		مقاومت خمشی حداکثر (Mpa)		اندیس‌های طاق [*]	
					I ₅	I [*]
نمونه‌های شاهد با سن ۲۸ روزه (الف)	۶/۱	میانگین	۱۰/۲	میانگین	۵/۹۲	۳/۲
	۵/۸۵		۹/۲۱		۵/۳	۳/۶۹
	۴/۴۸	۵/۴۴	۹/۲۳	۹/۵۵	۴/۷۹	۳/۴۵
نمونه‌های غوطه‌ور در محلول ۵۰ درجه کلر به مدت ۲ ماه (ب)	۹/۱۳	میانگین	۱۲/۸۲	میانگین	۵/۴۸	۳/۹۲
	۱۲/۱۸		۱۳/۳۳		۴/۹۸	۵/۳
	۱۱/۱۱	۱۰/۸	۱۳/۱۵	۱۳/۱	۶/۱۴	۴/۳
نمونه‌های غوطه‌ور در محلول ۵۰ درجه کلر به مدت ۶ ماه (ج)	۷/۶۵	میانگین	۱۰/۴۹	میانگین	۴/۷	۳/۵۳
	۸/۷۷		۱۱/۰۲		۵/۴۹	۳/۶۳
	۶/۵۸	۷/۶۶	۹/۵۶	۱۰/۳۵	۴/۵۵	۳/۱۲
نمونه‌های غوطه‌ور در محلول ۲۰ درجه سولفات به مدت ۶ ماه	۶/۳۹۷	میانگین	۱۰/۸۱	میانگین	۵/۲۸	۳/۸
	۶/۵۵	۶/۴	۸/۵۲	۹/۷	۴/۲۶	۳/۴

I^{*} مساحت زیر نمودار نیرو - تغییر مکان (تا تغییر مکان ۱۲ میلیمتر) بر حسب N-m

I₅ عبارتند از نسبت کار انجام شده یا سطح زیر نمودار برای رسیدن به تغییر مکان سه برابر تغییر مکان نظیر اولین ترک به سطح زیر نمودار تا تغییر نظیر اولین ترک



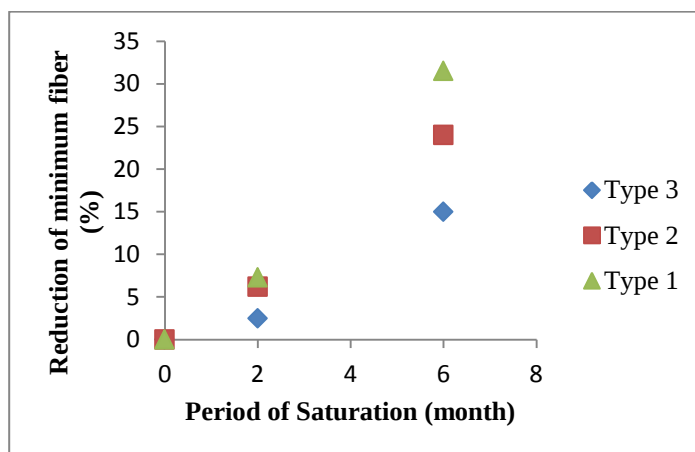
شکل (۵-۳۲): مقاومت خمشی نمونه‌های بدون ترک

از مقایسه نتایج در نمونه‌های بدون ترک، مشاهده شد که حداکثر مقاومت خمشی و میزان

ظرفیت جذب انرژی در نمونه‌های دو ماه (نمودار (ب)) نسبت به نمونه‌های کنترلی (نمودار (الف)) به ترتیب ۳۷ و ۲۸ درصد افزایش یافت. از مقایسه پارامترهای I_5 در این نمونه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که رفتار نمونه‌های شاهد شکننده‌تر از نمونه‌های ۲ ماهه است. دلیل این رفتار می‌تواند نحوه‌ی عمل آوری طولانی و اثرات زود هنگام خوردگی در نمونه‌های ۲ ماه باشد که نتیجه آن افزایش در میزان چسبندگی سطح مشترک بین الیاف و ماتریس است. در حالیکه در نمونه‌های ۶ ماه (نمودار (ج)) ماکزیمم مقاومت خمشی تقریباً ۲۰ درصد و ظرفیت جذب انرژی حدوداً ۲۴ درصد نسبت به نمونه‌های ۲ ماه کاهش یافت. در نمونه‌های بدون ترک، تغییرات ظاهری ذکر شده همزمان با تغییر در مشخصات مکانیکی نیز همراه بودند.

در شکل (۵-۳۳) میانگین درصد کاهش کمترین قطر الیاف در نمونه‌های دسته اول با توجه به دوره عمل آوری نمونه‌ها نشان داده شده است. اندازه‌گیری قطر الیاف به طور متوسط در سطح نمونه و سطوح نزدیک به ترک انجام شد. از آنجا که سطوح نمونه تا حد قابل توجهی در معرض همه جانبه حملات یون‌های آسیب رسان هستند سعی بر آن شد تا سطوح نمونه با ضربه زدن برس سیمی در نواحی که خوردگی، رنگ نمونه را به شدت تغییر داده بود، تراشیده شود (شکل ۵-۳۴). تا الیاف از آن قسمت بیرون آید. به منظور اندازه‌گیری راحت‌تر قطر الیاف، در سطوح نزدیک به ترک، بارگذاری تا مرحله‌ای که بتوان به راحتی به الیاف دسترسی پیدا کرد ادامه داشت. قطر الیاف با کولیس با دقت ۰,۰۲ میلی‌متر برای الیاف قلابدار و میکروسنج با دقت ۰,۰۰۲ میلی‌متر برای الیاف مجعد اندازه‌گیری شد. با بیرون آوردن الیاف در ناحیه ترک مشاهده شد که میزان پیشروی خوردگی الیاف از هر طرف از عرض ترک در ماتریس بتنی ۲ تا ۳ میلی‌متر بوده است. نمونه‌های تیپ ۱ به دلیل ابعاد کم، قابلیت انعطاف بالاتری داشتند و ترک ایجاد شده تا تغییر مکان ۳ میلی‌متر عرض کمتری در مقایسه با نمونه‌های بزرگتر داشت. لذا با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده میزان کاهش قطر در الیافی که در سطح نمونه جای گرفتند بالاتر از الیافی بود که در نزدیکی ترک قرار داشتند به عبارتی برای نمونه‌هایی که عرض ترک در آنها در مرحله پیش بارگذاری کمتر از ۰,۱ میلی‌متر بود. عملاً هیچ خوردگی برای الیاف

در آن ناحیه رخ نداد. در نمونه‌های تیپ ۲ و ۳، ترک‌ها با ایجاد تغییر مکان ۳ میلیمتر، عرض بیشتری داشته و شرایط را برای الیافی عبوری از ترک نسبت به الیاف قرار گرفته در سطح آسیب پذیرتر کردند. در نمونه‌های بزرگ کاهش قطر الیاف عبوری از ترک با افزایش عرض ترک بیشتر شد.



شکل (۳۳-۵): کاهش قطر الیاف بر اساس طول دوره عمل آوری بر حسب درصد در نمونه‌های دسته اول



شکل (۳۴-۵): الیاف قرار گرفته در سطح نمونه - الیاف قلابدار (بعد از تراشیدن سطح)

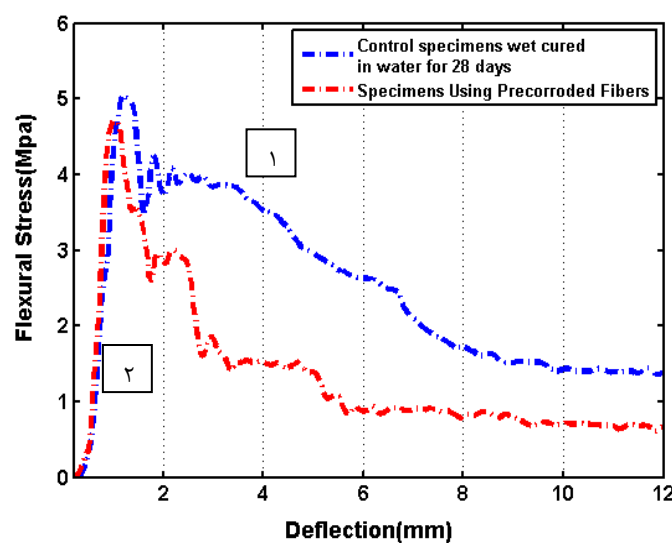
مطابق اندازه‌گیری‌های انجام شده روی الیاف نمونه‌های تیپ ۲ نسبت آب به سیمان بالاتری

داشتند ملاحظه می‌شود که کاهش مینیمم قطر الیاف در آنها بالاتر از نمونه‌های تیپ ۳ می‌باشد. بیشترین کاهش قطر الیاف در نمونه‌های تیپ یک رخ داد. ابعاد کم این نمونه‌ها از الیاف قرار گرفته شده در سطوح نتوانست به خوبی محافظت کند.

۳-۶-۵ نتایج حاصل از آزمایشات دسته دوم

این دسته از آزمایشات شرایط آسیب‌پذیرتری برای الیاف بوجود آوردند که تاثیر خوردگی را در مشخصات مکانیکی بتن الیافی آشکارتر می‌کند. به طور کلی در نمونه‌های تقویت شده با الیاف فولادی تغییر شکل یافته قلابدار، مشاهده شد که استفاده از الیاف خورده شده در ساخت نمونه‌ها باعث کاهش میزان انرژی ذخیره شده می‌شود.

در جدول (۵-۱۰) نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی ارائه شده است. در شکل (۵-۳۵)، نمودار ۱ نمونه‌های ساخته شده با الیاف خورده نشده است (نمونه‌های شاهد) و نمودار شکل ۲ نمونه‌های ساخته شده مسلح به الیاف خورده شده می‌باشد.



شکل (۵-۳۵): مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته شده با الیاف خورده شده

جدول (۵-۱۰): نتایج آزمایش خمش در نمونه‌های ساخته شده با الیاف قلابدار خورده شده

توضیحات	مقاومت خمشی نظیر اولین ترک (Mpa)	مقاومت خمشی حداکثر (Mpa)	اندیس‌های طاقت*	
			I_5	I^*
نمونه‌های شاهد با سن ۲۸ روزه (Type3)	۴/۳۶	۵/۱۶	۵/۶۵	۸/۱۷
نمونه‌های ساخته شده از الیاف خورده شده قلابدار (Type3)	۴/۸۱	۴/۸۱	۴/۰۳۵	۴/۴۴

I^* (تا تغییر مکان ۱۲ میلیمتر) N-mm مساحت زیر نمودار نیرو - تغییر مکان بر حسب I عبارتند از نسبت کار انجام شده یا سطح زیر نمودار برای رسیدن به تغییر مکان سه برابر تغییر مکان نظیر اولین ترک به سطح زیر نمودار تا تغییر نظیر اولین ترک

با مشاهده شکل (۵-۳۵) و مقایسه نمودارهای ۱ و ۲ مشاهده شد که خوردگی الیاف تاثیر چندانی در حداکثر مقاومت خمشی نداشته است. همانطور که گفته شد خوردگی الیاف به طور متوسط کاهش ۵۰ درصدی قطر الیاف را به همراه داشت. با توجه به شکل ظاهری ایجاد شده در الیاف، با ساخت نمونه و انجام آزمایش خمش بر روی آن، میزان انرژی جذب شده به میزان ۵۰ درصد کاهش یافت. در این نمونه‌ها مقاومت خمشی حداکثر همان مقاومت خمشی نظیر اولین ترک بود و رفتار سخت شدگی کرنشی در نمونه‌های بتن الیافی مشاهده نشد.

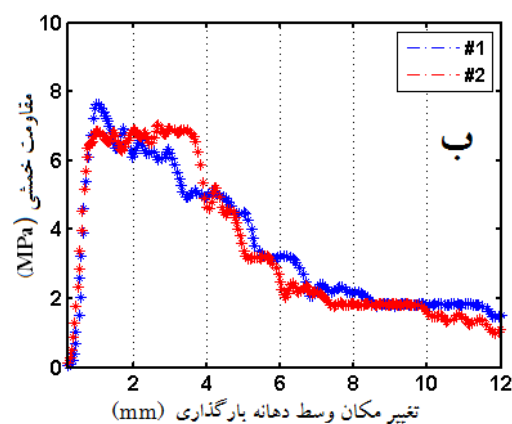
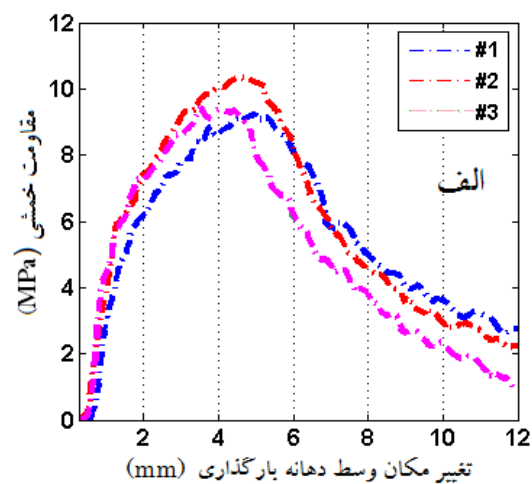
در جدول (۵-۱۱) نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی و در شکل (۵-۳۶) نیز نمودار مقاومت خمشی برای نمونه‌های ساخته شده با الیاف خورده شده مجعد ارائه شده است.

جدول (۵-۱۱): نتایج آزمایش خمشی در نمونه‌های ساخته شده با الیاف مجعد خورده شده

توضیحات	مقاومت خمشی نظیر اولین ترک (Mpa)	مقاومت خمشی حداکثر (Mpa)	اندیس‌های طاقت*	
			I_5	I^*
نمونه‌های ساخته شده از الیاف خورده شده مجعد (Type1) (ب)	۷/۰۴	۷/۰۴	۴/۹۳	۴۱/۸۶
	۷/۶۴	۷/۸۱	۳/۷۱	۴۰/۹۱
نمونه‌های شاهد با سن ۲۸ روزه (Type1) (الف)	۶/۳۱	۱۰/۱۲	۵/۴۸	۶۱/۶۴
	۵/۸۵	۹/۲۱	۴/۹۸	۷۶/۱۴
	۵/۴۸	۹/۲۳	۶/۱۴	۶۶/۲

I^* مساحت زیر نمودار نیرو - تغییر مکان (تا تغییر مکان ۱۲ میلیمتر)

I_5 عبارتند از نسبت کار انجام شده یا سطح زیر نمودار برای رسیدن به تغییر مکان سه برابر تغییر مکان نظیر اولین ترک به سطح زیر نمودار تا تغییر نظیر اولین ترک

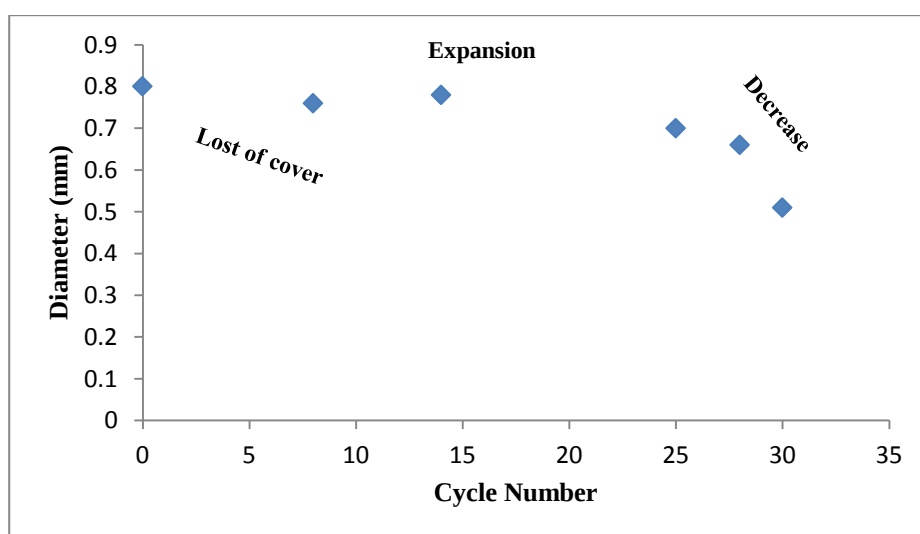


شکل (۵-۳۶): مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته شده در گروه دوم

نمودار (ب) مربوط به نمونه‌های ساخته شده با الیاف خورده شده مجعد و نمودار (الف) مربوط به نمونه‌های کنترلی می‌باشد با توجه به نمودارها و ارزیابی نتایج جدول (۵-۱۱) مشاهده شد که کاهش تقریباً ۵۰ درصدی قطر الیاف، باعث کاهش حدوداً ۲۷ درصد حداکثر مقاومت خمشی شد. میزان انرژی جذب شده نیز به میزان ۴۴ درصد کاهش یافت. مقاومت خمشی حداکثر برابر همان مقاومت خمشی نظیر اولین ترک بود، به این معنی که بعد از آن منحنی نیرو - تغییر مکان سیر صعودی نداشت و میزان مقاومت نمونه کاهش یافت. طوری که دیگر رفتار سخت شدگی کرنشی در نمونه‌های بتن الیافی مشاهده نشد.

بعد از آزمایش نمونه‌های ساخته شده با الیاف خورده شده، نوع رفتار بیرون کشیدن الیاف فولادی از ماتریس بررسی شد، حدوداً ۸۰ درصد الیاف مجعد با گسیختگی کششی همراه بودند. بقیه Pull-out شدند، ۷۰ درصد از الیاف قلابدار هم با گسیختگی کششی همراه بودند.

نمودار زیر نیز روند کاهش قطر الیاف را بر حسب تعداد دوره‌های عمل آوری نشان می‌دهد. در سیکل‌های ابتدایی بتدریج پوشش الیاف را از بین می‌رود بعد از آن الیاف کمی افزایش حجم می‌دهد. با افزایش تعداد سیکل‌ها خوردگی بیشتر شده و قطر سریعتر کاهش می‌یابد.



شکل (۵-۳۷): اندازه گیری قطر الیاف بر حسب تعداد چرخه‌ی عمل آوری شده

۵-۷ نتایج آزمایشات مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه‌های استوانه‌ای $\phi 75 \times 150$ میلیمتر، مسلح به الیاف قلابدار و مجعد در جداول آمده است. پارامترهای محاسبه شده در این جدول عبارتند از میانگین تنش حداکثر فشاری و میزان جذب انرژی برای تعداد سه نمونه می‌باشد.

جدول (۵-۱۲): نتایج آزمایش فشاری نمونه‌های مسلح به الیاف مجعد، عمل آوری شده در محیط‌های کلر

درصد کاهش حداقل قطر الیاف	طاقة* (Nm)	حداکثر تنش فشاری (MPa)	شرایط محیطی
%۰	۱۲۵/۵۸	۲۱/۸	عمل آوری نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در دمای آزمایشگاه
%۳	۱۳۲/۶	۲۴/۶	عمل آوری نمونه‌ها به مدت ۲ ماه در کلر با دمای ۵۰ درجه
%۷/۲	۱۳۰/۷	۲۳/۹۶	عمل آوری نمونه‌ها به مدت ۶ ماه در کلر با دمای ۵۰ درجه
* سطح زیر نمودار تنش-کرنش تا کرنش ۰,۰۲۵			
توجه: جامعه آماری نمونه‌ها در هر دسته از آزمایشات فشار ۳ است.			

با توجه به نتایج حاصله از آزمایش مقاومت فشاری، عمل آوری نمونه‌های فشاری در مدت ۲ ماه در محلول کلر با دمای ۵۰ درجه سانتیگراد، باعث افزایش ۱۴ درصدی در میزان تنش حداکثر فشاری نسبت به نمونه‌های ۲۸ روزه عمل آوری شده در دمای آزمایشگاه شد. این افزایش به دلیل نحوه عمل آوری در دمای بالای ۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. با توجه به قرارگیری در محیط آسیب پذیر تغییرات ظاهری از جمله تغییر رنگ در نمونه‌ها اتفاق افتاد. الیافی که در نزدیکی سطح نمونه قرار داشتند باعث خوردگی شده و منجر به تغییر رنگ بتن در ناحیه‌های خوردگی شد. سعی شد تا الیافی که در سطح قرار داشتند را در تعداد ناحیه‌ی محدودی که دارای شدیدترین تغییر رنگ ظاهری بود با روش تراشیدن تا حدودی بیرون کشیده شود. سپس با اندازه‌گیری قطر الیاف میزان خوردگی در تغییر

قطر الیاف اندازه گیری شد. بیشترین اندازه تغییر قطر برای الیاف مجعد در نمونه‌های ۲ ماه ۳ درصد بود. حداکثر تنش فشاری در نمونه‌های ۶ ماه در مقایسه با نمونه‌های دو ماه تغییری نداشت. ملاحظه شد که با افزایش طول دوره خوردگی مقاومت فشاری تغییری نمی‌کند. با اندازه‌گیری قطر الیاف قرار گرفته در سطوح، برای نمونه‌های ۶ ماه بیشترین میزان کاهش قطر الیاف ۸ درصد بود.

جدول (۵-۱۳): نتایج آزمایش فشاری نمونه‌های مسلح به الیاف قلابدار، عمل آوری شده در محیط‌های کلر

درصد کاهش حداقل قطر الیاف	طاقت* (Nm)	حداکثر تنش فشاری (MPa)	شرایط محیطی
٪۰	۲۰۰/۸	۲۹/۴	عمل آوری نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در دمای آزمایشگاه
٪۵/۵	۲۱۴/۶	۳۳/۵	عمل آوری نمونه‌ها به مدت ۲ ماه در کلر با دمای ۵۰ درجه
٪۱۴	۲۲۱/۵۸	۳۴/۶	عمل آوری نمونه‌ها به مدت ۶ ماه در کلر با دمای ۵۰ درجه

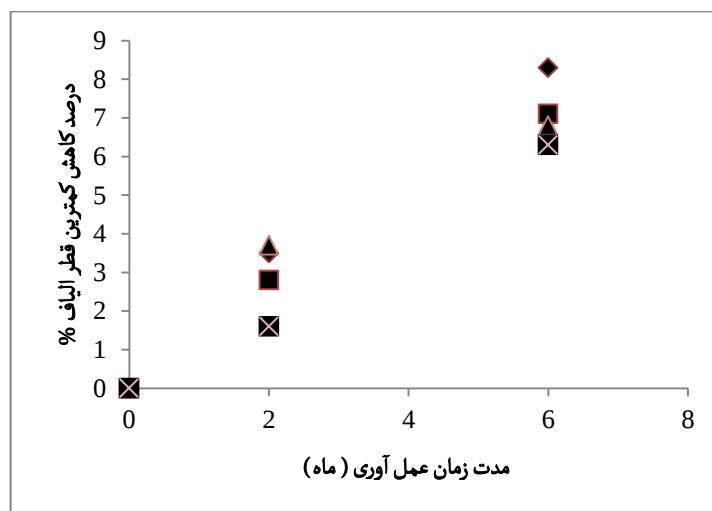
* سطح زیر نمودار تنش-کرنش تا کرنش ۰,۰۲۵ درصد

توجه: جامعه آماری نمونه‌ها در هر دسته از آزمایشات فشار ۳ است.

با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مسلح به الیاف قلابدار، عمل آوری نمونه‌های فشاری در مدت ۲ و ۶ ماه در محلول کلر با دمای ۵۰ درجه سانتیگراد، تاثیر چندانی در حداکثر مقاومت فشاری نداشت. افزایش اندک حدوداً ۱۳ درصدی در این نتایج، ناشی از دمای بالای محلول و مدت طولانی عمل آوری بود. این افزایش به دلیل نحوه‌ی عمل آوری در محیط کلر و دمای بالای ۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. با توجه به قرار گیری در محیط آسیب پذیر تغییرات ظاهری از جمله تغییر رنگ در نمونه‌ها اتفاق افتاد. الیافی که در نزدیکی سطح نمونه قرار داشت دچار خوردگی شده و منجر به تغییر رنگ ماتریس در ناحیه‌های مربوط به خوردگی شد. اندازه‌گیری قطر الیاف موجود در سطح

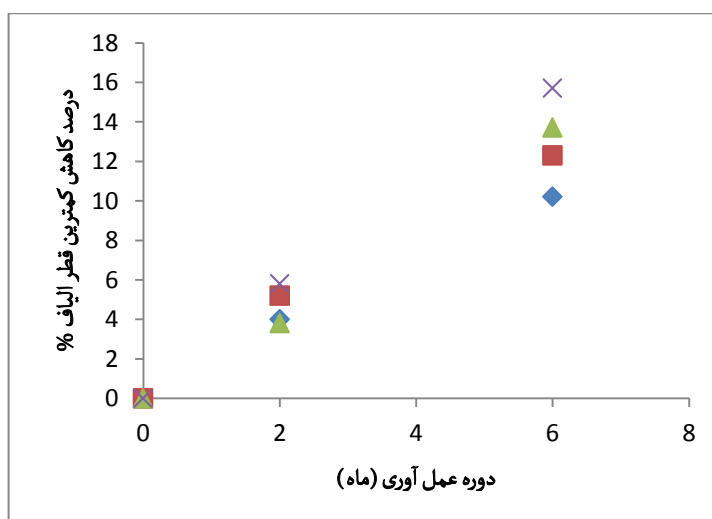
کاهش حدوداً ۵/۵ درصدی را در نمونه‌های دو ماه و ۱۴ درصدی را در نمونه‌های ۶ ماه داشتند.

میزان کاهش قطر در الیاف قلابدار در مقایسه با الیاف مجعد، بیشتر بود. چرا که قطر و طول الیاف قلابدار تقریباً ۲/۵ برابر قطر و طول الیاف مجعد بوده، و در یک قالب با ابعاد $۱۵۰ \times \frac{۷۵}{۵}$ میلیمتر، الیاف مجعد توزیع بهتری نسبت به الیاف قلابدار داشتند. این مسئله باعث شد تا الیاف قلابدار دسترسی بیشتر با سطح نمونه داشته و بیشتر خورده شوند شکل (۵-۳۸) و شکل (۵-۳۹).



شکل (۵-۳۸): روند کاهش قطر الیاف مدفون شده در نمونه‌های فشاری بر اساس دوره‌ی عمل آوری

نمونه‌ها (الیاف مجعد)



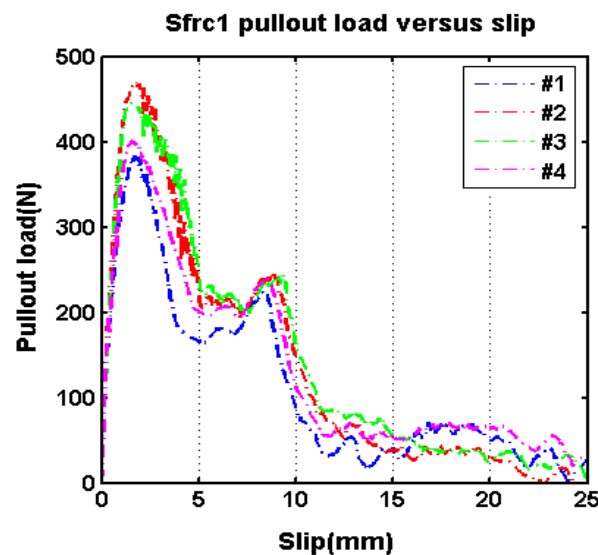
شکل (۵-۳۹): اندازه‌گیری قطر الیاف مدفون شده در نمونه‌های فشاری بر اساس دوره‌ی عمل آوری نمونه‌ها (الیاف قلابدار)

۵-۸ نتایج آزمایشات بیرون کشیدن الیاف قلابدار

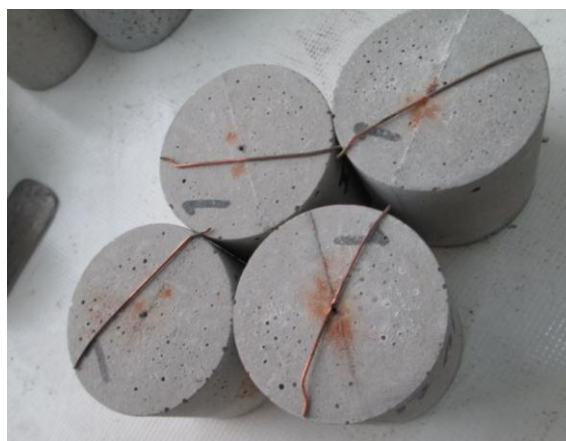
با کمک آزمایش Pull-out اثر خوردگی در مقاومت پیوستگی بین ماتریس بتنی و الیاف بررسی شد.

شکل (۴۰-۵، ۴۳-۵، ۴۵-۵) نمودار نیروی بیرون کشیدگی - لغزش الیاف از ماتریس بتنی را نشان برای هر یک از نمونه‌های SFRC1، SFRC2، SFRC3 نشان می‌دهد.

در جداول (۱۴-۵)، (۱۵-۵)، (۱۶-۵) نیز مقادیر مربوط به ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی، میزان انرژی جذب شده توسط الیاف تا بیرون کشیدگی کامل الیاف از ماتریس و همینطور اندازه‌گیری قطر الیاف بعد از سپری شدن دوره‌های عمل آوری مربوطه، برای هر دسته از نمونه‌ها ارائه شده است.



شکل (۴۰-۵): منحنی نیرو- تغییر مکان مربوط به بیرون کشیدن الیاف قلابدار (SFRC1)



شکل (۵-۴۱): الیاف Pull-out شده از ماتریس بتنی

جدول (۵-۱۴): نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف تک (قلابداری) از ماتریس بتنی (نمونه شاهد)

شماره نمونه‌ها	درجه خوردگی	نوع شکست	ماکزیمم نیروی کشیدگی (N)	سختی	کمترین قطر الیاف بعد از خوردگی (mm)
SFRC1					
# 1	0%	Pull-out	۴۶۸/۱	۳۴۸۷/۷	۰/۸
# 2		Pull-out	۴۰۱/۲	۳۳۷۲/۵	۰/۸
# 3		Pull-out	۴۴۵/۲	۳۶۷۴/۵	۰/۸
# 4		Pull-out	۳۸۳/۵	۲۸۸۹/۵	۰/۸

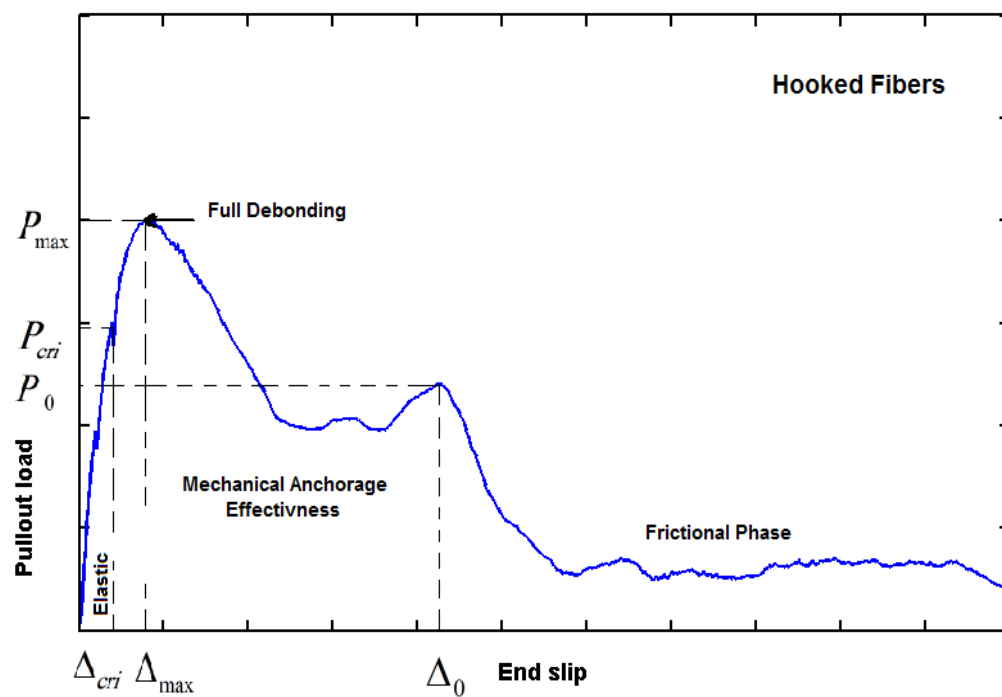
ابتدا توصیفی در رابطه با نمودار و گراف‌های بدست آمده از دستگاه آزمایشی Pull-out داده می‌شود. سپس اثر خوردگی روی نمودارها مورد بحث قرار می‌گیرد.

مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن از ماتریس ناشی از دو عامل اصطکاک و مهار مکانیکی آن است. اصطکاک بستگی به کیفیت سطح تماس الیاف و ماتریس و خصوصیات مصالح ناحیه تماس دارد که با افزایش لغزش تا حد زیادی از بین می‌رود. مهار مکانیکی ناشی از هندسه الیاف و نحوه

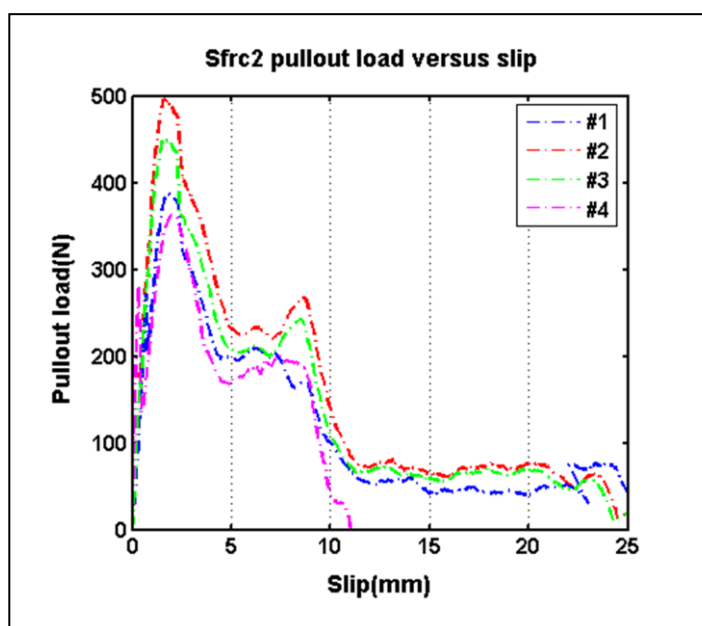
ایجاد تغییر شکل در آنها می‌باشد. این عامل نیز بعد از جداسازی کامل الیاف از ماتریس و بعد از اندکی لغزش فعال شده و بسته به کیفیت مهار تا تغییر شکل‌های زیاد مقاومت خود را حفظ می‌کند.

در این گروه، از الیاف در انتها قلابدار استفاده شد. نحوه و رفتار بیرون کشیدن الیاف قلابدار را در قالب شکل شماتیک از نمودار بدست آمده در چند مرحله توصیف می‌شود. مرحله اول؛ مرحله الاستیک یا آغاز جداسازی الیاف از ماتریس، که در این مرحله تنش برشی الاستیک در سطح تماس الیاف و ماتریس بالاتر از میزان مقاومت پیوستگی است و زمانی که نیروی بیرون کشیدگی به P_{cri} و میزان لغزش به Δ_{cri} می‌رسد جداسازی الیاف از ماتریس بتنی آغاز می‌شود. مرحله دوم؛ جداسازی جزئی (بین Δ_{cri} و Δ_{max}) که تنش‌ها در این مرحله ترکیبی از تنش‌های چسبندگی و اصطکاکی می‌باشد. که مجموع این تنش‌ها از میزان نیروی مربوط به بیرون کشیدگی بیشتر است. با رسیدن P_{cri} به P_{max} ، نیروی بیرون کشیدگی الیاف بر مجموع تنش‌های داخلی سطح مشترک الیاف و ماتریس غالب شده و الیاف به طور کامل از ماتریس جدا می‌شود و بعد از آن افت ناگهانی را در نمودار شاهد هستیم.

مرحله سوم؛ تاثیر مهار مکانیکی و ایجاد مفاصل پلاستیک (بین Δ_{max} و Δ_0) که در این مرحله الیاف شروع به تغییر شکل و حرکت در ماتریس می‌کند. تغییر شکل اعمال شده در الیاف باعث ایجاد مفصل پلاستیک شده که در حین بیرون کشیدگی این مفاصل جا به جا خواهند شد. در شروع مرحله مذکور دو مفصل پلاستیک ایجاد می‌شود و بعد از مقدار مشخصی بیرون کشیدگی یک مفصل حذف شده و تنها یک مفصل باقی می‌ماند. ایجاد مفاصل پلاستیک مقاومت الیاف را در برابر بیرون کشیده شدن افزایش می‌دهد. مرحله چهارم؛ بیرون کشیدگی اصطکاکی، بعد از از بین رفتن تنش چسبندگی در سطح الیاف و ماتریس، مقاومت بیرون کشیدگی به طور کامل توسط اصطکاک تامین می‌شود و بعد از حذف شدن مفاصل پلاستیک و افزایش لغزش، در این مرحله رفته رفته مقاومت بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس بتنی کاهش یافته و الیاف از ماتریس بیرون کشیده خواهد شد [۱۷] شکل (۵-۴۱) و شکل (۵-۴۲).



شکل (۴۲-۵): مراحل مربوط به رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار



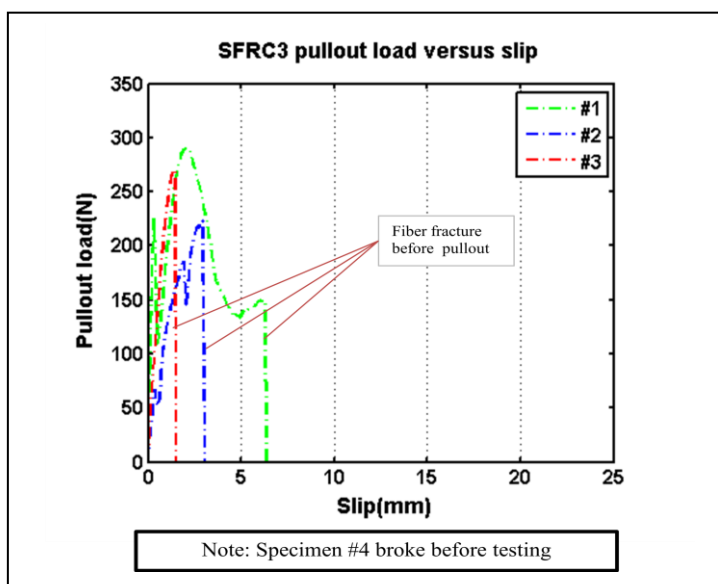
شکل (۴۳-۵): منحنی نیرو-تغییر مکان مربوط به بیرون کشیدن الیاف قلابدار (SFRC2)



شکل (۴۴-۵): الیاف Pull-out شده (SFRC2)

جدول (۱۵-۵): نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف تک (قلابداری) از ماتریس بتنی (درجه خوردگی ۱۲/۵٪)

شماره نمونه‌ها	درجه خوردگی	نوع شکست	ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی	میزان جذب انرژی	طول الیاف بعد از آزمایش	کمترین قطر الیاف بعد از خوردگی
SFRC2						
# 1	12/5%	Pull-out	۴۹۵/۳	۳۸۷۷/۵	۵۰	۰/۷۶
# 2		Pull-out	۳۸۷/۵	۳۰۵۶/۹	۵۰	۰/۷۸
# 3		Pull-out	۴۵۱/۶	۳۴۷۰/۴	۵۰	۰/۷۴
# 4		Pull-out	۳۶۳/۹	۲۰۹۷/۶	۵۰	۰/۷۵



شکل (۴۵-۵): منحنی نیرو-تغییر مکان مربوط به بیرون کشیدن الیاف قلاداری (SFRC3)



شکل (۵-۴۶): شکست کششی و گسیختگی الیاف (SFRC3)

جدول (۵-۱۶): نتایج آزمایش بیرون کشیدگی الیاف تک (قلادار) از ماتریس بتنی درجه خوردگی ۵۰٪

شماره نمونه‌ها	درجه خوردگی	نوع شکست	حداکثر نیروی بیرون کشیدگی (N)	سختی	طول الیاف بعد از آزمایش (mm)	کمترین قطر الیاف بعد از خوردگی (mm)
SFRC3						
# 1	50%	شکست الیاف	۲۹۰	۱۱۷۹/۱	۳۰	۰/۶۴
# 2		شکست الیاف	۲۲۲/۵	۴۱۳/۹۴	۲۷/۲	۰/۵۱
# 3		شکست الیاف	۲۷۰/۱	۴۳۰/۹۴	۲۶,۳	۰/۴۴
# 4		شکست الیاف قبل از آزمایش	---	.	۲۳	۰/۳۲

با توجه مقایسه نتایج حاصل از آزمایش Pull-out، (در جداول (۵-۱۴)، (۵-۱۵)، (۵-۱۶)) در خصوص نمونه‌های SFRC1، SFRC2 و SFRC3 مشاهده می‌شود که ماکزیمم نیروی مربوط به بیرون کشیدن الیاف در SFRC2 کمی بیشتر از SFRC1 است. علت این افزایش، افزایش قطر الیاف به دلیل تشکیل محصولات خوردگی در سرتاسر الیاف می‌باشد. از طرفی سطح الیاف با تشکیل این مواد برجستگی بیشتری پیدا می‌کند و میزان چسبندگی الیاف و ماتریس را بالا می‌برد. درصد خوردگی الیاف مدفون شده در نمونه‌ی SFRC2، ۱۲/۵ درصد است شکل (۵-۴۴). در اثر خوردگی در ابتدا

پوشش محافظ روی الیاف از بین رفته سپس حجم الیاف در اثر مواد حاصل از خوردگی افزایش می‌یابد. لذا نیروی مربوط به بیرون کشیدن الیاف در مرحله مربوط به جداسازی الیاف از ماتریس، بالا می‌رود. در نمونه‌های مربوط به SFRC3، درجه خوردگی بر اساس کاهش قطر الیاف ۵۰ درصد است. بیرون کشیدن این الیاف از ماتریس، با گسیخته شدن و شکست الیاف قبل از بیرون کشیده شدن از ماتریس همراه است شکل (۴۶-۵) و شکل (۴۵-۵).

فصل ۶

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۶ نتیجه گیری

- با توجه به مدت زمان آزمایش و شرایط محیطی استفاده شده در این تحقیق، تورم ناشی از خوردگی الیاف فولادی قادر به ایجاد ترک در ماتریس نشد. در طول مدت عمل آوری نمونه‌ها، تغییراتی ظاهری در رنگ نمونه به وجود آمد و رنگ بتن را به تدریج عوض کرد این تغییر رنگ با طولانی شدن دوره، شدیدتر بود.
- با توجه به نتایج مربوط به نمونه‌های ساخته شده با الیاف خورده شده و ایجاد خوردگی به میزان ۵۰ درصد در الیاف، میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌های SFRC حدوداً ۵۰ درصد کاهش یافت. در این حالت نمونه‌های بتن الیافی دیگر رفتار سخت شدگی کرنشی نداشت و رفتار نمونه شکننده‌تر شد. به عبارتی افزایش مقاومت نمونه‌ها بعد از پیدایش اولین ترک متوقف می‌شود.
- با توجه به آزمایش مربوط به بیرون کشیدگی الیاف تک از ماتریس بتنی، میزان نیروی بیرون کشیدگی در درصد‌های اولیه از خوردگی با توجه به افزایش حجم و برجستگی‌های ناشی از تأثیرات خوردگی در الیاف ابتدا افزایش، سپس با توجه به ناپایدار شدن حجم و برجستگی‌های ایجاد شده در اثر زمان، کاهش یافت.
- با بررسی شکست نمونه‌های بتنی و همین طور بررسی رفتار الیاف در هنگام بیرون کشیده شدن از ماتریس بتنی، در درصد‌های بالای خوردگی، به دلیل کاهش قطر، الیاف قبل از بیرون کشیده شدن از ماتریس، گسیخته می‌شوند. در نمونه‌های ساخته شده با الیاف فولادی خورده شده، بعد از تست خمشی نمونه، مشاهده شد که حدود ۷۰ درصد از الیاف گسیخته شدند و حدوداً ۲۵ درصد از آنها بیرون کشیده شدند.

- شرایط محیطی گرم و مرطوب علیرغم سرعت بخشیدن به کسب مقاومت اولیه فشاری و کششی بتن فعالیت‌های مخرب کلریدی را بیشتر کرده و آثار خوردگی در بتن‌هایی که در این شرایط محیطی عمل آوری شدند زودتر بروز کرد.
- میزان مینیمم کاهش قطر الیاف در نمونه‌های بتنی با درصد آب به سیمان بالا، بیشتر بود.
- در اثر شرایط محیطی فوق العاده شدید، الیافی که در سطح نمونه قرار داشتند دیگر در برابر خوردگی محافظت نشدند و قطر الیاف به مرور زمان کاهش یافت. این کاهش قطر در نهایت باعث کاهش مقاومت قابل تحمل، و میزان انرژی جذب شده توسط نمونه شد.

۲-۶-۲ پیشنهادات

- ❖ به دلیل پروسه بلند مدت آزمایشاتی که در زمینه خوردگی انجام می‌شوند همینطور اهمیت مسئله خوردگی پیشنهاد می‌شود که مکانیزم روند خوردگی با دستگاهی که امکان فراهم کردن شرایط جزر و مدی (Dry/Wet) را به صورت خوردکار دارد، انجام شود. دستگاه پاشش نمک (Salt Spray) طوری طراحی شده است که با بوجود آوردن این شرایط، می‌تواند روند خوردگی را بیشتر تسریع بخشد. مکانیزم طراحی این دستگاه در ASTM B117 ارائه شده است. اگر چه که نتایج حاصل از این روش، نمی‌تواند بیانگر مقاومت واقعی خوردگی در محیط‌های خورنده دیگر باشد. زیرا عوامل متعددی نظیر تشکیل لایه‌های محافظ می‌توانند تاثیر متفاوتی بر سرعت خوردگی داشته باشند.
- ❖ بهتر است با توجه به اهمیت پدیده‌ی ترک خوردگی در نمونه‌های SFRC، میزان یون‌های نفوذی کلر را در اعماق مختلف با محلول‌هایی از جمله نیترات نقره اندازه‌گیری شود. تا بتوان محتوای کلر را با توجه به عرض ترک به وجود آمده ارزیابی شود.
- ❖ با ارائه مجموعه گسترده‌ای از آزمایشات می‌توان تمام پارامترهای موثر از قبیل عرض

ترک، نوع، اندازه و شکل الیاف، مقاومت کششی الیاف، میزان نفوذپذیری ماتریس، نفوذ یون‌های کلر در اعماق بتن، که در تعیین عمر مفید نمونه‌های ساخته شده با الیاف فولادی تعیین کننده است مورد بررسی قرار داد. در نهایت بتوان مدلی برای تعیین عمر مفید سازه‌های SFRC ارائه داد.

مراجع

[۱]- حسنی. ابوالفضل، ۱۳۷۷، " تاثیر الیاف فولادی در کنترل ترک‌های کششی بتن، وزارت مسکن و شهرسازی"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

[2]- ACI Committee 544.1R, 2004, " State of the art report on fiber reinforced concrete", ACI Manual of Concrete Practice.

[3]-Louis. J, Balouch. S, 2005, "Corrosion of steel fiber reinforced concrete from the cracks", Cement and Concrete Research, pp 572-577.

[4]- ACI Committee 544.4R, 2004, " Design consideration for steel fiber reinforced concrete", ACI Manual of Concrete Practice.

[5]- ACI Committee 544.4R, 2004, " Design consideration for steel fiber reinforced concrete", ACI Manual of Concrete Practice.

[6]-Broke. D, "Elementary engineering fracture mechanics", 1984, 3st ed, Martinus Nijhoff Publishers.

[7]-Barentbaltt. G, 1962, "The mathematical theory of equilibrium of cracks in brittle fracture", Advances in Applied Mechanics.

[8]-Bazant. Z, 1983, "Crack band theory for fracture of concrete", Journal of Materials and Structures, RILEM, Vol 16, pp 155-177.

[9]-Li.V.C & Wang.S, 2003, "On high performance fiber reinforced cementations composites", Japan Concrete Institute, pp13-23.

[10]-Cotterell. B & Mai. Y.M, 1996, "Fracture mechanics of cementations materials", Chapman & Hall, 1st ed.

[11]- Roque. R, 2009 , "Durability of fiber reinforced concrete in florida", Department of Civil and Coastal Engineering, Florida Department of Transportation.

[12]-Tejchman. J, Kozicki. J, 2010, "Experimental and theoretical investigations of steel-fibrous concrete", Springer Series in Geomechanics & Geoengineering.

[13]- Nelson. P.k& Li. V. C& ASCE. F& Kamada. T, 2002, "Fracture toughness of micro fiber reinforced cement composites", Journal of advanced materials in civil engineering, p384-391.

[14]- A. E. Naaman & H.W.Reinhardt, 1996, "High performance fiber reinforced cement composites", E&FN SPON.

[15]- Tabak. V, 2007, "Effect of aspect ration and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC", Construction and Building Materials, pp 1250-1253.

[16]-Nawy.E.G, 2001, "Fundamental of high performance concrete", 2nd ed. John wiley & sons, Inc.

[17]- Alwan. J.A. & Namman.A.E & Guerrero. P, 1999, " Effect of mechanical clamping on the pull out response of hooked steel fiber embedded in cementations materials", Concrete Science and Engineering, vol 1, pp15-25.

[18]-Namman.A.E, " Engineered steel fiber with optimal properties for reinforcement of cement composites" , Journal of advanced concrete technology, Vol.1.no.3, pp 241-252.

[۱۹]- اژدری. م، ۱۳۸۳مقاله بررسی مشکلات اجرایی بتن در سواحل گرم خلیج فارس.

[20]- Bentur. A, Diamond. N.S & Berke. N.S, 1997, " Steel corrosion in concrete", E&FN SPON.

[21]- Darwin. D, Kepler. L, Carl .E, 2000, "Evaluation of corrosion protection methods for reinforced concrete highway structutr", Structural Engineering and Engineering Materials.

[22]-Williamson, S.J, and Clark, L.A, 2000, "Pressure to cause cover cracking of concrete due to reinforcement corrosion", Magazine of Concrete Research, pp 455-467.

[23]-Morinaga.S, 1988, "Prediction of service life of reinforced concrete building based on the rate o corrosion", Institute of Technology.

[24]- Mangat. P, Elgarf. M, 1999 , " Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement", ACI Structural Journal, pp 149-161.

[25]-Amleh, L. and Mirza, S., 1999, "Corrosion influence on bond between steel and concrete", ACI Structural Journal, pp 415-423.

[26]- Kivell. A, Palermo and Scot. A, 2011, "Effects of bond deterioration due to corrosion in reinforced concrete", Department of Civil and Natural Resources Engineering, University of Canterbury, Paper Number 081.

[27]- Tutti, k, "Corrosion of steel in concrete", 1983, Cement & Concrete Research Institute.

[28]-Liu. Y, 1996 , "Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures", Department of Civil Engineering.

[29]-Bazant. Z, 1979, " Physical model for steel corrosion in concrete sea structures-

application”, ASCE Journal of the Structure Division, pp 1155-1166.

[30]-Morinaga. S, 1988, “Prediction of service life of reinforced concrete building based on the rate o corrosion”, Institute of Technology.

[31]-Schiessl. P, Weydert. R, 1966, “The effect of a corrosive environment on the properties of steel fiber reinforced portland cement mortar”, Clarkson College of Technology, pp 130.

[32]-Kosa. K, Naaman. A, 1990, “Corrosion of steel fiber reinforced concrete”, ACI Materials Journal, 27-37, pp110-120.

[33]- Kosa. K, Naaman. A, Hansen. W, 1991, “Durability of fiber reinforced mortar”, ACI Materials Journal, pp310-319.

[34]- Mangat. P, Gurusamy. K, 1988, “Corrosion resistance of steel fibers in concrete under marine exposure”, Cement and Concrete Research, vol 18, pp 44-54.

[35]- Hannant, D.J. Edgington, J, 1992, “Durability of steel fiber concrete”, Fiber Reinforced Cement and Concrete, RILEM, pp 159-169.

[36]- Nawy.E.G, 2001, “Fundamental of high performance concrete”, 2nd ed. John wiley & sons, Inc.,

[37]- Alaaee. F.J, 2002, “ Retrofitting of concrete structures using high performance fiber reinforced cementitious composites(HPFRCC)”, Thesis submitted for the degree of PHD.

[38]- Sdrekarimi. A, “Development of light weight reactive powder concrete”, Japan concrete institute, Journal of Advanced Concrete Technology, vol.2, no.3, pp 409-417.

[39]-Karihaloo. B, Benson. S, Alaaee. F, 2004, “ CARDIFRC- Properties and application to retrofitting”, Proceeding of the Fifth International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structure, USA, 12-16.

[۴۰]- نظر علی. ق، ۱۳۸۵، پایان نامه ارشد، دستیابی به مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با مقاومت کششی و شکل پذیری بالا، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[41]-Cotterell. B & Mai. Y.M, 1996 , “Fracture mechanics of cementations materials”, chapman & hall, 1st ed.

Abstract

In developing countries, usage of steel fiber reinforced cementitious composites is widely expanding in structures, due to their high mechanical performance and their flexibility. Little information exists on the corrosion characteristics of steel fiber reinforced concrete. The goal of this thesis is to investigate the behaviour of steel fibre reinforced concrete exposed to corrosive environments.

Series of experiments were conducted to provide corrosion conditions for SFRC specimens. About 80 specimens were cast and tested. Three test programs were conducted: one dealt with the effect of corrosion on steel fiber reinforced mortar specimens, next considered the effects of using precorroded fiber in mortar specimens, and the other dealt with the effect of corrosion on the behaviour and the failure modes of a single fiber pull-out test. Different exposure periods, types of solutions and the temperature of environment were taken into account.

The effects of corrosion were evaluated by measuring several variables: mechanical properties of the composite (in bending, compression and toughness), evaluation of corroded surface of the fibers, and the measurements of minimum fiber diameter after exposure. All experimental results showed that, at early stages of corrosion, the mechanical properties of the composites are generally improved. It can be the result of the expansion of steel fibres due to corrosion and therefore, their better anchorage in the matrix. However, after reaching a certain degree of corrosion, the mechanical properties are decreased. In fact, the loss of steel in fibres due to the corrosion of this stage causes this deterioration in the mechanical properties.

It was also observed that for a certain level of exposure or degree of corrosion, the decrease in the toughness of steel fibre reinforced concrete is much more than that in its strength.

Keywords: Concrete durability, Corrosion, Steel fiber reinforced concretes, flexural tests, pull-out test.



Shahrood University of Technology

Department of Civil Engineering

Effect of Steel Fiber Corrosion On Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete (FRC)

Thesis submitted for the degree of Master of science

(structural Engineering)

This thesis was presented

By:

Elham Alizade

Supervisors:

Dr. Farshid J. Alaei

September 2013