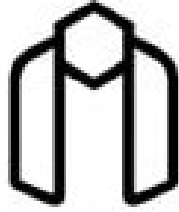


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

گروه عمران

طراحی کامپوزیت پایه سیمانی مهندسی شده با الیاف پلی وینیل الکل با رفتار سخت شدگی مجدد و ترک های متعدد

دانشجو: ستاره السادات بیطرف

استاد راهنما:

دکتر فرشید علایی

استاد مشاور:

دکتر بهروز حسنی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیرماه ۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: عمران و معماری

گروه: عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد (رساله دکتری) آقای/خانم.....

تحت عنوان: طراحی کامپوزیت پایه سیمانی مهندسی شده با الیاف پلی وینیل الکل با رفتار سخت
شدگی مجدد و ترک های متعدد

در تاریخ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد(رساله
دکتری) مورد ارزیابی و با درجه.....مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	امضا	اساتید مشاور	امضا
نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:	
نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:	

اساتید داور	امضا	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضا
نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:	
نام و نام خانوادگی:			
نام و نام خانوادگی:			
نام و نام خانوادگی:			

تقدیم به

پدر و مادرم

که از تمامی وجودشان در راه تکامل من دریغ نکردند

و **مادربزرگ عزیزم** که وجودش سبزی حضور است

و **همسر عزیزم فاضل** که همیشه همراه است

تشکر و قدردانی:

در ابتدای این پایان نامه لازم می دانم از زحمات بی دریغ جناب آقای دکتر علایی و همکاری جناب آقای مهندس کلانتری و زحمات کلیه افرادی که در هدایت و تکمیل این مجموعه مرا یاری کرده اند، تشکر و قدردانی نمایم.

دانشجو تایید می‌نماید که مطالب مندرج در این پایان‌نامه (رساله) نتیجه تحقیقات خودش می‌باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد.

ماه و سال: تیر ۱۳۹۰

چکیده:

کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC) نوع پیشرفته‌ای از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف با ظرفیت کرنش کششی بالا ناشی از رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و ترک‌خوردگی مویی متعدد است. مهندسی مواد در ECC از ارتباط میان میکروسازه‌ها، پروسه ساخت، مشخصات مصالح و کارایی تشکیل شده است. در واقع میکرومکانیک برقرارکننده پل‌ارتباطی میان ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت و مشخصات مصالح می‌باشد. پارامترهای میکرومکانیکی براساس اندرکنش میان الیاف، ماتریس و لایه میانی دو معیار لازم برای دستیابی به رفتار ویژه ECC را مقدور می‌سازد. این دو معیار بر پایه مقاومت ماتریس و حالت ترک پایا استوارند. در واقع دستیابی به این حالت تضمین‌کننده کامپوزیت سیمانی مهندسی شده با کارایی بالا و رفتار سخت‌شوندگی کرنشی است.

تحقیقات متعددی توسط پژوهشگران در نقاط مختلف جهان جهت شناسایی و بهبود رفتار ECC انجام شده است اما متأسفانه علی‌رغم رفتار منحصربفرد این بتن؛ تاکنون گزارشی مبنی بر ساخت آن در کشور منتشر نشده است. بر این اساس هدف اصلی پایان‌نامه ساخت این کامپوزیت برای اولین بار در ایران با استفاده از مصالح در دسترس و موجود در نظر گرفته شده است. بنابراین در ابتدا برای درک بهتر و دستیابی به الگوی طراحی مفاهیم رفتار سخت‌شوندگی کرنشی، ترک‌خوردگی مویی متعدد و حالت ترک پایا بر مبنای میکرومکانیک و مکانیک شکست پرداخته شده است. سپس فعالیت‌های آزمایشگاهی در راستای دستیابی به پروسه ساخت ECC انجام گرفته شده است. و در نهایت بر اساس مدل پیشنهادی رفتار کششی ECC ساخته شده مدل‌سازی شده و پارامترهای میکرومکانیکی آن محاسبه می‌شود.

کلمات کلیدی: کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، سخت‌شوندگی کرنشی، میکرومکانیک،

ترک‌خوردگی مویی متعدد

فهرست مطالب:

۱.....	فصل اول: مقدمه
۱.....	۱-۱ مقدمه
۲.....	۲-۱ ECC چیست؟
۳.....	۳-۱ اهداف پایان نامه
۳.....	۴-۱ ساختار کلی پایان نامه
۵.....	فصل دوم: مکانیک شکست
۶.....	۱-۲ مقدمه
۷.....	۲-۲ مکانیک شکست الاستیک خطی
۷.....	۱-۲-۲ تنش در نوک ترک
۸.....	۲-۲-۲ تئوری گریفیث
۹.....	۳-۲-۲ ناحیه پلاستیک نوک ترک
۱۰.....	۴-۲-۲ رشد ترک
۱۲.....	۵-۲-۲ روش انتگرال J
۱۵.....	۶-۲-۲ محدودیت کاربرد LEFM
۱۵.....	۳-۲ تئوری مکانیک شکست غیر خطی
۱۶.....	۱-۳-۲ رفتار غیرخطی بتن
۱۷.....	۲-۳-۲ ناحیه FPZ

۱۸.....	مدل ترک چسبنده ۳-۳-۲
۱۹.....	مدل ترک مجازی ۱-۳-۳-۲
۲۰.....	مدل ترک نواری ۲-۳-۳-۲
۲۱.....	مدل ترک الاستیک موثر (شکست دو پارامتری Jenq & Shah): ۳-۳-۳-۲
۲۱.....	مکانیک شکست بتن مسلح به الیاف: ۴-۳-۲
۲۲.....	ناحیه دوزنده ترک: ۱-۴-۳-۲
۲۳.....	دوزندگی ترک: ۲-۴-۳-۲
۲۴.....	رفتار FRC تحت تنش کششی: ۲-۴-۳-۲
۲۷.....	تعیین پارامترهای مکانیک شکست مصالح از طریق آزمایش ۳-۴-۳-۲
۲۹.....	فصل سوم: کامپوزیت سیمانی مهندسی شده Engineered Cementitious Composite... ۲۹
۲۹.....	۱-۳ مقدمه
۳۰.....	۲-۳ توسعه تاریخی
۳۳.....	۳-۳ مشخصات ECC
۳۳.....	۱-۳-۳ مشخصات کلی
۳۴.....	۲-۳-۳ مشخصات کششی
۳۶.....	۳-۳-۳ مشخصات فشاری
۳۶.....	۴-۳-۳ مشخصات خمشی
۳۷.....	۵-۳-۳ انرژی شکست
۳۸.....	۴-۳ ملاحظات طراحی ECC

- ۴۰..... ۵-۳ طرح اختلاط و پروسه ساخت
- ۴۱..... ۶-۳ کنترل کیفیت
- ۴۳..... ۷-۳ برهمکنش ECC و آرماتور فولادی
- ۴۶..... ۸-۳ رفتار المان‌های سازه‌ای از ECC
- ۴۶..... ۱-۸-۳ المان‌های خمشی
- ۴۸..... ۲-۸-۳ المان‌های برشی
- ۴۸..... ۱-۲-۸-۳ المان‌های ECC در برش
- ۴۹..... ۲-۲-۸-۳ المان‌های مسلح ECC در برش
- ۵۰..... ۳-۸-۳ المان‌های ستونی
- ۵۱..... ۴-۸-۳ المان‌های اتصال تیر به ستون
- ۵۳..... ۵-۸-۳ المان‌های پانل دیواری
- ۵۳..... ۹-۳ نگاه دقیق بر پاسخ المان‌های R/ECC
- ۵۴..... ۱-۹-۳ پتانسیل کاهش یا حذف آرماتورهای برشی
- ۵۴..... ۲-۹-۳ تُلرانس خرابی
- ۵۵..... ۳-۹-۳ سازگاری تغییر شکل میان ECC و آرماتور
- ۵۵..... ۴-۹-۳ کنترل عرض ترک و حذف آرماتور کنترل ترک
- ۵۶..... ۵-۹-۳ تبدیل شکل‌پذیری مصالح به مقاومت سازه
- ۵۶..... ۶-۹-۳ حفاظت از FRP در مقاوم‌سازی
- ۵۷..... ۱۰-۳ دوام ECC و المان‌های سازه‌ای

- ۵۷..... ۱-۱۰-۳ دوام مصالح و المان‌ها
- ۵۷..... ۲-۱۰-۳ ECC در شرایط آب‌وهوایی مختلف
- ۵۷..... ۱-۲-۱۰-۳ ظرفیت کرنش کششی درازمدت
- ۵۸..... ۲-۲-۱۰-۳ مقاومت فشاری درازمدت
- ۵۹..... ۳-۲-۱۰-۳ دوام در ذوب و یخ‌زدگی
- ۵۹..... ۴-۲-۱۰-۳ دوام در شرایط گرمسیری
- ۶۰..... ۵-۲-۱۰-۳ دوام در معرض یون کلرید
- ۶۰..... ۶-۲-۱۰-۳ دوام در معرض یخ‌زدایی با نمک
- ۶۰..... ۳-۱۰-۳ دوام R/ECC
- ۶۱..... ۱۱-۳ طبقه‌بندی اهداف کاربرد
- ۶۲..... ۱-۱۱-۳ تاسیسات زیربنایی امن
- ۶۲..... ۲-۱۱-۳ تاسیسات زیر بنایی امن تحت شرایط محیطی شدید
- ۶۲..... ۳-۱۱-۳ قابلیت تولید تاسیسات زیربنایی
- ۶۳..... ۱۲-۳ ECC خودترمیم‌گر
- ۶۵..... ۱۳-۳ هزینه تولید ECC
- ۶۶..... ۱۳-۳ توسعه تکنولوژی ECC
- ۶۷..... ۱۵-۳ دورنمای ECC
- ۶۷..... فصل چهارم: آنالیز میکرومکانیک
- ۶۸..... ۱-۴ مقدمه

۶۸.....	۲-۴ مکانیک شکست مصالح پایه سیمانی
۶۹.....	۱-۲-۴ شکست ترد
۶۹.....	۲-۲-۴ شکست شبه ترد
۷۰.....	۳-۲-۴ شکست شکل پذیر
۷۰.....	۳-۴ میکرومکانیک
۷۱.....	۱-۳-۴ منحنی σ - ϵ
۷۲.....	۲-۳-۴ آنالیز حالت ترک پایا
۷۳.....	۳-۳-۴ حل حالت ترک پایا برای ماتریس ترک خورده
۷۵.....	۴-۳-۴ میکرومکانیک الیاف
۷۵.....	۱-۴-۳-۴ میکرومکانیک پل زنی تک رشته الیاف صاف
۷۶۷۶.....	۲-۴-۳-۴ میکرومکانیک پل زنی تک رشته الیاف مایل
۷۶.....	۳-۴-۳-۴ میکرومکانیک پل زنی توزیع حجمی از الیاف
۷۷.....	۵-۳-۴ رابطه σ - δ در کامپوزیت
۷۸.....	۶-۳-۴ ملزومات رفتار سخت شوندگی کرنشی
۷۹۷۹.....	۴-۴ کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC)
۸۰.....	فصل پنجم: فعالیت‌های آزمایشگاهی
۸۱.....	۱-۵ مقدمه
۸۱.....	۲-۵ مراحل کار آزمایشگاهی
۸۱.....	۳-۵ مصالح مصرفی

- ۸۲..... ۱-۳-۵ سیمان
- ۸۳..... ۲-۳-۵ خاکستر بادی
- ۸۴..... ۳-۳-۵ سنگدانه
- ۸۴..... ۴-۳-۵ فوق‌روان‌کننده
- ۸۵..... ۱-۴-۳-۵ PCE فوق‌روان‌کننده
- ۸۵..... ۲-۴-۳-۵ M63 فوق‌روان‌کننده
- ۸۵..... ۵-۳-۵ الیاف
- ۸۶..... ۶-۳-۵ افزودنی قوام آور
- ۸۷..... ۴-۵ ساخت نمونه ها
- ۸۷..... ۱-۴-۵ روند کلی اختلاط
- ۸۸..... ۲-۴-۵ آماده سازی نمونه ها
- ۸۸..... ۳-۴-۵ عمل آوری نمونه ها
- ۸۸..... ۴-۴-۵ جزئیات طرح های مختلف
- ۸۹..... ۵-۵ آزمایشات نمونه ها
- ۸۹..... ۱-۵-۵ آزمایش مقاومت فشاری
- ۹۰..... ۲-۵-۵ آزمایش مقاومت خمشی
- ۹۲..... ۳-۵-۵ آزمایش اندازه گیری طاقت ماتریس
- ۹۲..... ۴-۵-۵ عکس‌برداری از الیاف
- ۹۲..... ۵-۵-۵ آزمایش انحلال پارافرمالدئید

۹۳.....	۶-۵ نتایج آزمایشات
۹۳.....	۱-۶-۵ آزمایش مقاومت فشاری
۹۳.....	۲-۶-۵ آزمایش مقاومت خمشی
۹۴.....	۳-۶-۵ آزمایش اندازه گیری طاقت ماتریس
۹۵.....	۴-۶-۵ عکس برداری از الیاف
۹۵.....	۵-۶-۵ آزمایش انحلال پارافرمالدئید
۹۵.....	فصل ششم: مدل سازی ECC ساخته شده Shahrood-ECC
۹۶.....	۱-۶ مقدمه
۹۶.....	۲-۶ آزمایشات کشش مستقیم و خمش
۹۸.....	۳-۶ آنالیز معکوس
۹۹.....	۱-۳-۶ روش Ostergrad
۹۹.....	۲-۳-۶ روش Kanakubo
۱۰۰.....	۴-۶ مدل سازی ECC
۱۰۰.....	۱-۴-۶ چارچوب کلی مدل سازی
۱۰۱.....	۲-۴-۶ مدل رفتار خمشی
۱۰۳.....	۳-۴-۶ تولید دستگاه معادلات
۱۰۳.....	۱-۳-۴-۶ معادله تغییر مکان
۱۰۶.....	۲-۳-۴-۶ معادله تعادل نیرو
۱۱۰۱۱۰.....	۳-۳-۴-۶ معادله تعادل لنگر

۱۱۱.....	۴-۴-۶ حل دستگاه معادلات
۱۱۱.....	۴-۴-۶ نتایج
۱۱۴.....	۱-۵-۴-۶ رسم دیاگرام های توزیع تنش و توزیع کرنش
۱۲۲.....	۲-۵-۴-۶ بررسی دیاگرام های ترسیم شده
۱۲۳.....	۳-۵-۴-۶ رسم دیاگرام تنش - کرنش کششی
۱۲۴.....	۴-۵-۴-۶ مقایسه دیاگرام های S-ECC و Li-ECC
۱۲۷.....	فصل هفتم: محاسبه پارامترهای میکرومکانیکی S-ECC
۱۲۸.....	۱-۷ مقدمه
۱۲۹.....	۲-۷ رفتار کششی در FRCCs
۱۲۹.....	۳-۷ رفتار کششی در SH-FRCCs
۱۳۰.....	۱-۳-۷ رفتار کششی S-ECC
۱۳۱.....	۴-۷ پیوند میکروسازه ها در ECC با رفتار کششی
۱۳۳.....	۱-۴-۷ بیرون کشیدگی الیاف
۱۳۴.....	۲-۴-۷ مدل سازی در حالت ترک پایا
۱۳۶.....	۳-۴-۷ معادلات حاکم در رفتار ECC
۱۳۷.....	۱-۳-۴-۷ معادلات حاکم در رفتار S-ECC
۱۳۷.....	۱-۱-۳-۴-۷ معیار مقاومت
۱۳۷.....	۲-۱-۳-۴-۷ معیار انرژی
۱۳۹.....	۵-۷ محاسبه پارامترهای میکرومکانیکی

۱۴۰	..... مدل پیشنهادی Li ۱-۵-۷
۱۴۰	..... S-ECC ۲-۵-۷ محاسبه پارامترهای میکرومکانیکی
۱۴۱	..... Li-ECC و S-ECC مقایسه نتایج ۶-۷
۱۴۲	..... فصل هشتم: نتیجه گیری
۱۴۳	..... ۱-۸ جمع بندی
۱۴۷	..... ۲-۸ فعالیت‌های انجام گرفته
۱۴۷	..... ۳-۸ نتایج حاصله
۱۴۸	..... ۴-۸ پیشنهادات
۱۵۰	..... مراجع:
۹۸	..... پیوست الف: مشخصات مصالح
۱۷۱	..... پیوست ب: استاندارد آزمایشات
۱۷۹	..... پیوست ج: مجموعه طرح‌های اختلاط
۱۹۰	..... پیوست د: متن اصلی برنامه مدل پیشنهادی تحت نرم‌افزار MATLAB 2010

فهرست اشکال:

- شکل ۱-۲: مدل‌های مختلف ترک خوردگی..... ۷
- شکل ۲-۲: ترک در صفحه بینهایت تحت تنش σ ۸
- شکل ۳-۲: توزیع تنش در نواحی نزدیک نوک ترک..... ۹
- شکل ۴-۲: اندازه منطقه پلاستیک با تقریب اول..... ۱۰
- شکل ۵-۲: انرژی ارتجاعی صفحه ترکدار..... ۱۰
- شکل ۶-۲: تعاریف روش انتگرال J..... ۱۳
- شکل ۷-۲: کنتورهای روش انتگرال J..... ۱۳
- شکل ۸-۲: انواع شکست در مصالح مختلف..... ۱۶
- شکل ۹-۲: منحنی رفتاری بتن و مواد تشکیل دهنده..... ۱۷
- شکل ۱۰-۲: منحنی نیرو-تغییر مکان کششی بتن و ناحیه FPZ..... ۱۷
- شکل ۱۱-۲: توزیع تنش در ناحیه FPZ برای مدل‌های مختلف..... ۱۸
- شکل ۱۲-۲: (a) ترک در روش ترک مجازی،..... ۲۰
- شکل ۱۳-۲: مدل ترک نواری..... ۲۰
- شکل ۱۴-۲: مدل شکست دو پارامتری Jenq & Shah..... ۲۱
- شکل ۱۵-۲: نواحی FPZ و FBZ در بتن‌های الیافی..... ۲۲

- شکل ۲-۱۶: ترک تحت تنش σ ، بار گسترده دوزنده P و زوج بار شکافنده F..... ۲۴
- شکل ۲-۱۷: منحنی شماتیک تنش کششی-بازشدگی دهانه ترک و مراحل مختلف خرابی..... ۲۵
- شکل ۲-۱۸: آزمایش استاندارد تیر ترک‌دار تحت خمش..... ۲۷
- شکل ۳-۱: منحنی تنش- کرنش (یا تغییرمکان) کششی برای بتن معمولی، FRC و HPFRC..... ۳۱
- شکل ۳-۲: نمودار تنش - کرنش کششی ECC در چهار مرحله ۳۴
- شکل ۳-۳: نمودار تنش - کرنش فشاری FRC و ECC ۳۶
- شکل ۳-۴: نمودار تنش-تغییرمکان خمشی FRC و ECC ۳۷
- شکل ۳-۵: نمودار تنش- تغییر مکان در کامپوزیت با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی ۳۹
- شکل ۳-۶: هندسه آزمایش قیف نزولی اسلامپ و نتیجه آن بر ECC ۴۲
- شکل ۴-۷: شیوه‌های پرداخت ECC ۴۳
- شکل ۳-۸: شکل‌گیری ترک و تنش‌های درونی در R/C و R/ECC ۴۴
- شکل ۳-۹: وضعیت سطح مشترک پس از تسلیم آرماتور فولادی در R/C و R/ECC ۴۶
- شکل ۳-۱۰: شکل‌گیری ترک خمشی در R/C و R/ECC ۴۷
- شکل ۳-۱۱: تغییر شکل خمشی در R/C و R/ECC ۴۷
- شکل ۳-۱۲: منحنی بارضربه‌ای- تغییر مکان آزمایش تیر Ohno برای ECC و FRC ۴۸
- شکل ۳-۱۳: منحنی هیستریزس آزمایش تیر Ohno برای R/C و R/ECC ۴۹
- شکل ۳-۱۴: الگوی خرابی در تیر برشی Ohno ۵۰

- شکل ۳-۱۵: منحنی هیستریزس آزمایش ستون برای R/ECC و R/C ۵۰
- شکل ۳-۱۶: شکست نهایی در محل مفصل پلاستیک ۵۲
- شکل ۳-۱۷: مقادیر انرژی جذب شده در PC و PC/ECC ۵۳
- شکل ۳-۱۸: تنظیمات و نتایج آزمایش پانل دیواری ۵۳
- شکل ۳-۱۹: ماکزیمم عرض ترک در طول زمان ۵۵
- شکل ۳-۲۰: ظرفیت کرنشی- طول عمر ECC پس از قالب‌ریزی ۵۸
- شکل ۳-۲۱: مقاومت فشاری- طول عمر ECC ۵۹
- شکل ۳-۲۲: مدول دینامیکی در آزمایشات انجماد و یخ‌زدگی برای بتن معمولی و ECC ۵۹
- شکل ۳-۲۳: نمودار تنش- کرنش ECC قبل و بعد از خمودترمیمی ۶۴
- شکل ۳-۲۴: ترک خوردگی جدید حین بارگذاری دوباره نمونه ۶۴
- شکل ۴-۱: منطقه شکست در مصالح پایه سیمانی ۶۸
- شکل ۴-۲: منحنی تنش-کرنش ۶۹
- شکل ۴-۳: پیوند میان اجزای سازنده کامپوزیت ۷۱
- شکل ۴-۴: منحنی σ - δ و مفهوم انرژی مکمل ۷۱
- شکل ۴-۵: مدل ترک خوردگی در حالات گیرفیبیت و هموار ۷۳
- شکل ۴-۶: پلبندهی الیاف در یک ترک باز شده و منحنی شماتیک تنش-جابجایی الیاف ۷۳
- شکل ۴-۷: (a) توزیع تنش در لبه ترک و انتگرال J در حالت ترک پایا ۷۴

- شکل ۴-۸: بیرون کشیدن تک رشته الیاف..... ۷۵
- شکل ۴-۹: بیرون کشیدن تک رشته الیاف مورب..... ۷۶
- شکل ۴-۱۰: توزیع حجم الیاف در کامپوزیت..... ۷۷
- شکل ۴-۱۱: ظرفیت کرنشی ECC برای حجم گوناگون الیاف..... ۷۹
- شکل ۴-۱۲: انرژی شکست در سطح آزاد ترک و خارج از آن برای ECC..... ۸۰
- شکل ۵-۱: مصالح مصرفی برای ساخت ECC..... ۸۲
- شکل ۵-۲: سیمان تیپ I برای ساخت ECC..... ۸۲
- شکل ۵-۳: خاکستریادی کلاس C مصرفی برای ساخت ECC..... ۸۴
- شکل ۵-۴: الیاف پلی وینیل الکل REC-15 مصرفی برای ساخت ECC..... ۸۶
- شکل ۵-۵: قالب و نمونه استوانه ای 100x200 برای آزمایش فشار..... ۹۰
- شکل ۵-۶: قالب و نمونه تیر 100x100x500 برای آزمایش خمش..... ۹۱
- شکل ۵-۷: دستگاه یونیورسال جهت انجام آزمایش خمش..... ۹۱
- شکل ۵-۸: هندسه آزمایش مقاومت خمشی؛ بارگذاری تیر در نقاط یک سوم دهانه..... ۹۱
- شکل ۵-۹: نتایج آزمایش مقاومت فشاری..... ۹۳
- شکل ۵-۱۰: نتایج آزمایش مقاومت خمشی برای PVA-ECC , ECC Without Fiber..... ۹۴
- شکل ۵-۱۱: نتایج آزمایش مقاومت خمشی برای PVA-ECC Mix 4,6..... ۹۴
- شکل ۵-۱۲: نمونه الیاف پیش از قرارگیری در پارافرمالدئید..... ۹۵

- شکل ۱-۶ مقایسه نتایج آزمایشات خمش و کشش مستقیم برای یک GFRC..... ۹۷
- شکل ۲-۶: ساده سازی رفتار کامپوزیت برای فشار و کشش در روش Ostergarad ۹۹
- شکل ۳-۶: ساده سازی رفتار کامپوزیت برای فشار و کشش در روش Kanakubo ... ۱۰۰
- شکل ۴-۶: نقاط آنالیز معکوس در روش Kanakubo ۱۰۰
- شکل ۵-۶: چارچوب کلی مدلسازی ECC..... ۱۰۰
- شکل ۶-۶: حالت تغییر شکل خمشی تیر و هندسه تغییر شکل جز تیر..... ۱۰۱
- شکل ۷-۶: هندسه آزمایش خمش چهار نقطه ای و مراحل رسم دیاگرام $\frac{M}{EI}$ ۱۰۴
- شکل ۸-۶: دیاگرام کرنش در ارتفاع مقطع..... ۱۰۴
- شکل ۹-۶: دیاگرام تنش- کرنش در حالت فشار..... ۱۰۶
- شکل ۱۰-۶: دیاگرام تنش- کرنش در حالت کشش مستقیم..... ۱۰۶
- شکل ۱۱-۶: نمودار های تنش- کرنش فشاری و کششی برای نقطه ای دلخواه..... ۱۰۷
- شکل ۱۲-۶: دیاگرام های توزیع تنش و کرنش در مقطع تیر..... ۱۰۷
- شکل ۱۳-۶: محاسبه نیروی فشاری وارد بر مقطع..... ۱۰۸
- شکل ۱۴-۶: محاسبه نیروی کششی وارد بر مقطع..... ۱۰۸
- شکل ۱۵-۶: بازوی لنگر برای نیروهای فشار و کشش..... ۱۱۰
- شکل ۱۶-۶: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه ($P_i= 7500$, $\Delta_i= 0.2$) ۱۱۴
- شکل ۱۷-۶: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه ($P_i= 13000$, $\Delta_i= 0.4$) ۱۱۴

- شکل ۶-۱۸: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 15000, \Delta_i = 0.6)$ ۱۱۵
- شکل ۶-۱۹: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 16500, \Delta_i = 0.8)$ ۱۱۵
- شکل ۶-۲۰: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 17000, \Delta_i = 1.0)$ ۱۱۶
- شکل ۶-۲۱: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 17500, \Delta_i = 1.2)$ ۱۱۶
- شکل ۶-۲۲: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 18000, \Delta_i = 1.4)$ ۱۱۷
- شکل ۶-۲۳: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 18500, \Delta_i = 1.6)$ ۱۱۷
- شکل ۶-۲۴: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 18500, \Delta_i = 1.8)$ ۱۱۸
- شکل ۶-۲۵: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 19500, \Delta_i = 2.0)$ ۱۱۸
- شکل ۶-۲۶: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 19500, \Delta_i = 2.2)$ ۱۱۹
- شکل ۶-۲۷: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 18000, \Delta_i = 2.4)$ ۱۱۹
- شکل ۶-۲۸: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 12000, \Delta_i = 2.6)$ ۱۲۰
- شکل ۶-۲۹: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 9000, \Delta_i = 2.8)$ ۱۲۰
- شکل ۶-۳۰: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 7000, \Delta_i = 3.0)$ ۱۲۱
- شکل ۶-۳۱: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 5500, \Delta_i = 3.2)$ ۱۲۱
- شکل ۶-۳۲: منحنی تنش - کرنش S-ECC برای کشش مستقیم ۱۲۳
- شکل ۶-۳۳: منحنی های تنش - تغییر مکان خمش برای Li-ECC و S-ECC ۱۲۴
- شکل ۶-۳۴: منحنی های تنش - کرنش فشاری برای Li-ECC و S-ECC ۱۲۴

- شکل ۶-۳۵: منحنی های تنش- کرنش کششی برای Li-ECC و S-ECC..... ۱۲۵
- شکل ۷-۱: مدل رفتاری یک RSFRCC تحت کشش..... ۱۲۹
- شکل ۷-۲: مدل رفتاری یک SH-FRCC تحت کشش..... ۱۳۰
- شکل ۷-۳: نمودار تنش-کرنش S-ECC مدل سازی شده در حالت کششی..... ۱۳۱
- شکل ۷-۴: ارتباط اجزای مختلف در مقیاس متفاوت برای ECC..... ۱۳۲
- شکل ۷-۵: پیوند بین میکروسازه ها و عملکرد کششی ECC..... ۱۳۲
- شکل ۷-۶: منحنی رفتاری الیاف مختلف در آزمایش بیرون کشیدگی تک رشته الیاف..... ۱۳۳
- شکل ۷-۷: مدل رفتاری ECC - رفتار کششی، حالت ترک پایا و بیرون کشیدگی الیاف..... ۱۳۵
- شکل ۷-۸: منحنی σ - δ الیاف در ECC..... ۱۳۶
- شکل ۷-۹: منحنی σ - δ الیاف در ECC..... ۱۳۸
- شکل ۷-۱۰: پارامتر های میکرو مکانیکی در ECC و نحوه ارتباط آنها..... ۱۳۹

فهرست جداول:

- جدول ۱-۳: مقایسه رفتاری بین FRC، HPFRC و ECC ۳۲
- جدول ۲-۳: خواص فیزیکی کلی ECC ۳۳
- جدول ۳-۳: مقایسه رفتاری FRC و ECC ۳۸
- جدول ۴-۳: طرح اختلاط (kg/m^3) ECC ۴۰
- جدول ۵-۳: مشخصات PVA ۴۱
- جدول ۶-۳: کاربرد ECC براساس مشخصات و واکنش سازه‌ای ۶۱
- جدول ۱-۵: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی ۸۳
- جدول ۲-۵: مشخصات الیاف PVA ۸۶
- جدول ۳-۵: انواع طرح اختلاط برای (kg/m^3) ECC ۸۷
- جدول ۱-۶: پارامترهای مورد استفاده در دیاگرام‌ها ۱۰۷
- جدول ۲-۶: مشخصات نقاط مورد بررسی در مدل سازی ۱۱۲
- جدول ۳-۶: پارامترهای دستگاه معادلات برای نقاط مختلف ۱۱۳
- جدول ۴-۶: مقادیر تنش و کرنش در حالت کشش مستقیم ۱۲۳
- جدول ۵-۶: مشخصات رفتار کلی S-ECC و Li-ECC و FRC ۱۲۵
- جدول ۱-۷: مقادیر K_m های ارائه شده در مقالات بر اساس طرح اختلاط ۱۳۷

جدول ۲-۷: مقادیر پارامترهای میکرومکانیکی برای S-ECC ۱۴۱

جدول ۳-۷: مقایسه پارامترهای میکرومکانیکی برای S-ECC و Li-ECC ۱۴۲

فصل اول:

مقدمه

۱-۱ مقدمه:

امروزه بتن در سازه‌های عمرانی بعنوان یکی از مصالح اصلی در صنعت ساخت و ساز به شمار می‌آید. تمایل زیاد صنعت به استفاده از مصالح بتنی منجر به انجام تحقیقاتی گسترده در راستای بهبود خواص و اصلاح معایب آن انجام شده است. مشهورترین ضعف بتن، تردشکنی^۱ و عدم شکل‌پذیری^۲ ذاتی آن است. شکل‌پذیری در واقع توسط قابلیت تغییرشکل کششی یا همان ظرفیت کرنش کششی سنجیده می‌شود که مربوط به مصالحی شکل‌پذیر همانند فولاد است نه مصالح بتنی. تلاش‌های نخستین در راستای دستیابی به مصالح بتنی با شکل‌پذیری کششی منجر به کاربرد میلگردهای فولادی در بتن شد. پس از آن تحقیقات نشان دادند که کاربرد الیاف هم‌راستای پیوسته و کاربرد بتن‌های الیافی^۳ می‌تواند شکل‌پذیری کششی را صدها برابر بتن معمولی افزایش دهد. با توجه به پژوهش‌های انجام شده بر روی شکل‌پذیری؛ امروزه در حالت کلی بتن‌های الیافی بر اساس نوع رفتار خود به دو دسته تقسیم می‌شوند: دسته اول شامل بتن‌های الیافی است که از خود رفتار نرم‌شوندگی کرنشی^۴ یا کاهش تنش تحمل شده با افزایش ظرفیت کرنشی را نشان می‌دهند و در مقابل دسته دوم شامل بتن‌های الیافی با شکل‌پذیری بالا^۵ است که از خود رفتار سخت‌شوندگی کرنشی^۶ یا افزایش تنش تحمل شده همراه با افزایش ظرفیت کرنشی را نشان می‌دهند.

در حالیکه HPFRC در مقابل بتن‌های معمولی و حتی FRCs خواص کششی بسیار مطلوبی را از خود نشان می‌دهند؛ اما تا سالها تنها به آزمایشگاه‌های پژوهشی یا کارکردهایی تخصصی محدود بوده‌اند. این محدودیت بابت ملزوماتی همچون صرفه‌جویی اقتصادی و قابلیت ساخت آسان در پروژه‌های

^۱ Brittleness

^۲ Ductility

^۳ Fiber Reinforced Concrete (FRC)

^۴ Strain Softening

^۵ High Performance Fiber Reinforced Concrete (HPFRC)

^۶ Strain Hardening

صنعتی به خصوص ساخت بتن کارگاهی بود. در واقع وقتی الیاف پیوسته یا با درصدی بالا در کامپوزیت استفاده می‌شوند، ملزومات را به راحتی و یکجا نمی‌توان برآورده کرد.

۱-۲ ECC چیست؟

در سالیان اخیر نسل جدیدی از HPFRC تحت عنوان "Engineered Cementitious Composites(ECC)" و یا "کامپوزیت سیمانی مهندسی شده" برای اولین بار در دانشگاه میشیگان ابداع شده است. این کامپوزیت در واقع نوع پیشرفته‌ای از HPFRC براساس کاربرد الیاف کوتاه از هم جدا نظیر پلی اتیلن^۱ یا پلی وینیل الکل^۲ با توزیعی تصادفی و در حجمی متوسط است. این کامپوزیت به لحاظ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی هیچ تفاوتی با بتن‌های الیافی معمولی بجز بهبود رفتار کششی با شکل‌پذیری زیاد ناشی از قابلیت ترک‌خوردگی متعدد^۳ ندارد. کامپوزیت ECC استحکام کششی متوسطی حدود 4 تا 6 مگاپاسکال و ظرفیت کرنش کششی حدود 3-5% را دارد و در طراحی آن برخلاف سایر FRCs از علم میکرومکانیک^۴ کمک گرفته شده است. در این راستا اندرکنش میان الیاف، ماتریس و لایه میانی آنها برای دستیابی به ظرفیت کرنش کششی بالا با توسعه ترک‌های مویی متعدد و نزدیک به هم و در عین حال کاربرد حداقل الیاف با استفاده از مدل‌های تئوریک بطور دقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. توانمند شدن این نوع بتن با خصوصیات ذکر شده قابلیت تحمل تغییر شکل کششی و ارائه رفتار سخت‌شدگی کرنشی را به بتن عرضه داشته و کاربرد آن را در اعضای سازه‌ای نظیر تیر، ستون، دیوارهای برشی، المان‌های اتلاف‌کننده انرژی که به لحاظ شکل‌پذیری و کنترل عرض ترک حائز اهمیت می‌باشند را به مرز باور رسانیده است.

^۱ Polyethylene(PE)

^۲ PolyVinyl Alcohol(PVA)

^۳ Multiple Cracking

^۴ Micromechanics

۳-۱ اهداف پایان نامه:

تحقیقات متعددی توسط پژوهشگران در نقاط مختلف جهان جهت شناسایی و بهبود رفتار ECC انجام شده است اما متأسفانه علی‌رغم رفتار منحصر بفرد این بتن؛ تاکنون گزارشی مبنی بر ساخت آن در کشور منتشر نشده است. بر این اساس هدف اصلی پایان‌نامه ساخت این کامپوزیت برای اولین بار در ایران با استفاده از مصالح در دسترس و موجود در نظر گرفته شده است. اهداف کلی این پایان‌نامه عبارتند از:

- بررسی مبانی مکانیک شکست
- بررسی مکانیک شکست بتن به‌ویژه بتن الیافی
- بررسی مشخصات و رفتار کلی ECC
- بررسی رفتار ECC از دیدگاه میکرومکانیک
- ساخت ECC با مصالح موجود در کشور
- تعیین پارامترهای میکرومکانیکی ECC ساخته شده و مقایسه نتایج با مقادیر مرجع

۴-۱ ساختار کلی پایان‌نامه:

در راستای دستیابی به اهداف عنوان شده در بخش قبل این پایان‌نامه در هشت فصل به شرح زیر تدوین شده است:

فصل اول شامل مقدمه می‌باشد.

فصل دوم مروری مختصر دارد بر قوانین مکانیک شکست که در فصول بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این راستا ابتدا تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی^۱ برای مصالح شکننده مورد

^۱ Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)

بررسی قرار می‌گیرد. سپس بدلیل عدم کاربرد LEFM در بتن مکانیک شکست غیرخطی^۱ معرفی شده و امکان استفاده از آن در بتن‌های الیافی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

هدف از فصل سوم، جمع‌آوری اطلاعات و بررسی مطالعات انجام شده بر روی ECC در نظر گرفته شده است که شامل مواردی همچون تاریخچه پیدایش، مشخصات کلی (شامل پارامترهای کششی، فشاری، خمشی و...)، روند طراحی، پروسه ساخت، کنترل کیفیت، رفتار المان‌های سازه‌ای، دوام، قابلیت خودترمیم‌گری، هزینه تولید، گسترش و دورنمایی از آینده می‌باشد.

در فصل چهارم به منظور طراحی ECC رفتار کلی و اندرکنش اجزا از دیدگاه میکرومکانیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور؛ در ابتدا انواع مکانیک شکست مصالح پایه سیمانی بیان می‌شود، سپس با توجه به قوانین میکرومکانیک آنالیز حالت ترک پایا و رفتار کلی کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت با توجه به ملزومات سخت شوندگی کرنشی؛ رفتار ECC توضیح داده می‌شود.

هدف از فصل پنجم دستیابی به روش ساخت ECC با مصالح در دسترس و انجام آزمایشات مختلف روی نمونه‌های مختلف برای رسیدن به طرحی بهینه می‌باشد. در این راستا مراحل کار آزمایشگاهی انجام گرفته شامل جمع‌آوری اطلاعات اولیه در ارتباط با نوع مصالح مصرفی، تهیه مصالح مورد نیاز، ساخت نمونه‌های مختلف با طرح اختلاط‌های مختلف و انجام آزمایشات گوناگون از جمله آزمایشات فشاری و خمشی؛ و ثبت مشاهدات می‌باشد.

در فصل ششم، مدلی برای رفتار خمشی ECC پیشنهاد شده که با تولید و حل یک سری دستگاه معادلات رفتار کششی ECC معادل‌سازی می‌شود. و در نهایت رفتار کششی، فشاری و خمشی ECC ساخته شده با ECC مرجع مقایسه و صحت‌سنجی می‌شود.

^۱ Nonlinear Elastic Fracture Mechanics (NLEFM)

هدف از فصل هفتم مشخص کردن رفتار میکروسازه‌ها و همچنین پیوند آنها در ECC ساخته شده؛ محاسبه پارامترهای میکرومکانیکی آن و مقایسه نتایج با آزمایشات مستقیم است. در نهایت با توجه به معیارهای مقاومت و انرژی و مقایسه شاخص‌های حاصله با مقادیر پیشنهادی ادعای ساخت کامپوزیت سیمانی مهندسی شده برای اولین بار در کشور اثبات می‌شود.

و در نهایت؛ در فصل هشتم به بیان نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

فصل دوم:

مکانیک شکست

بررسی علل شکست ناگهانی برخی سازه‌ها نشان می‌دهد که طراحی بسیاری از آنها بر مبنای تئوری الاستیسیته و مقاومت مصالح درست بوده و علت شکست ترک‌هایی است که در سازه وجود داشته و یا در حین بارگذاری در آن به وجود آمده است. در اوایل قرن بیستم علم جدیدی به نام مکانیک شکست پایه‌گذاری شد که سازه‌ها را بر مبنای وجود ترک و نحوه عملکرد آن در سازه مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار می‌دهد [۱]. در مقاومت مصالح پارامتر تنش معرف پایداری و تحمل یک عضو در مقابل بارهای اعمالی است. ولی از آنجائیکه در مکانیک شکست همیشه فرض بر وجود عیوب و ترک‌های اولیه در سازه می‌باشد، معیارهای تنش به تنهایی برای بیان میزان تحمل یک عضو کافی نیستند. هرچند که شروع ترک بستگی به تنش وارده بر عضو دارد؛ اما در حقیقت شکل‌گیری ترک نیاز به سطح انرژی خاصی دارد. بنابر این باید معیاری مبتنی بر میزان انرژی برای علم مکانیک شکست در نظر گرفته شود. تئوری‌های معمول که برای شکست مصالح تُرد توسعه یافته‌اند شکست بتن را به درستی تشریح نمی‌کنند [۲]. در واقع بتن نسبت به مصالح شکننده ایده‌آل پیچیدگی بیشتری داشته و بعنوان یک ماده شبه شکننده^۱ به‌شمار می‌آید. یکی از علل پیچیده بودن مکانیزم شکست بتن طبیعت غیرهموزن آن است. سنگدانه‌ها همانند یک جسم سخت رفتار کرده که توسط ماده‌ای نرم و شکننده که همان ماتریس سیمانی است؛ احاطه شده‌اند. این اختلاف سختی میان سنگدانه و ماتریس منجر به ایجاد ناسازگاری در ناحیه تماس بین این دو فاز می‌شود. ساختار خمیر سیمان سخت شده بسیار پیچیده می‌باشد. بعنوان مثال حداقل چهار نوع مختلف همانند حفره‌های ژل موئینه، حباب‌های هوا محبوس، ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی و فضاهای خالی ناشی از اختلاط ناقص؛ در ساختار خمیر سیمان وجود دارند [۲]. این نکته قابل توجه است که همیشه دلیل اصلی شکست بتن ضعف ملات سیمانی نیست. بلکه گاهی ضعف سنگ‌دانه‌ها یا سطح تماس سنگدانه و ماتریس ممکن است به خرابی

^۱ Quasi Brittle

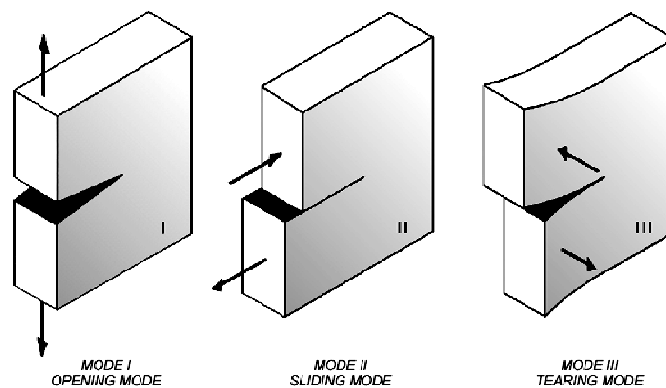
منجر شود. از این رو این فصل مروری مختصر دارد بر قوانین مکانیک شکست که در بخش‌های بعدی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در این راستا ابتدا تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی برای مصالح شکننده مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس بدلیل عدم کاربرد LEFM در بتن مکانیک شکست غیرخطی معرفی شده و امکان استفاده از آن در بتن‌های الیافی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲ مکانیک شکست الاستیک خطی:

۱-۲-۲ تنش در نوک ترک:

یک ترک می‌تواند به سه طریق تحت تنش واقع شده و گسترش یابد [۳] (شکل ۱-۲):

- I: بازشونده^۱: که در آن جابجائی سطح ترک عمود بر سطح ترک می‌باشد.
- II: لغزشی^۲: که در آن جابجائی سطح ترک در صفحه ترک اما عمود بر لبه ترک می‌باشد.
- III: پاره‌گی^۳: که در آن جابجائی سطح ترک در صفحه ترک ولی موازی لبه ترک است.



شکل ۱-۲: مدل‌های مختلف ترک‌خوردگی

^۱ Opening Mode

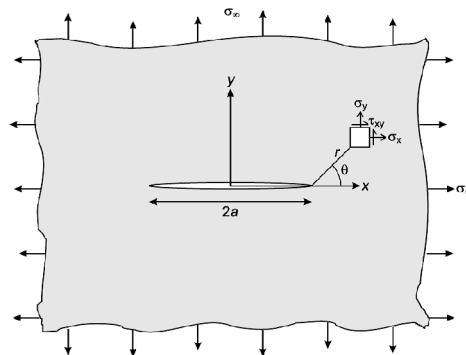
^۲ Sliding Mode

^۳ Tearing Mode

ترک نوع I شایعترین حالت گسترش ترک است. ترک نوع II بوسیله برش در صفحه و نوع III بوسیله برش خارج از صفحه ایجاد می‌گردد. ترکیب سه حالت فوق حالت عمومی ترک را بیان می‌کند.

۲-۲-۲ تئوری گریفیث^۱:

گریفیث اولین کسی بود که مساله مکانیک شکست را در سال 1921 حل نمود. بدین جهت بعدها به عنوان پدر تئوری مکانیک شکست نامیده شد [۴]. یک صفحه نامحدود با ضخامت واحد که تحت تنش σ با دو لبه ثابت که دارای یک ترک مرکزی به طول $2a$ می‌باشد را در نظر بگیرید (شکل ۲-۲)



شکل ۲-۲: ترک در صفحه بینهایت تحت تنش σ

مستقل از شکل هندسی عضو و چگونگی بارگذاری مولفه‌های تنش در همسایگی نوک ترک در مدل I به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۳]:

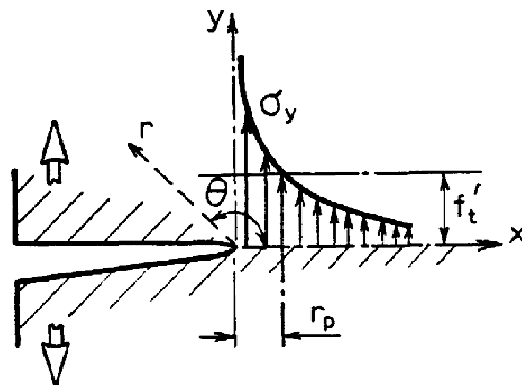
$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_y &= \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\end{aligned}\tag{۱-۲}$$

پارامتر K ضریب شدت تنش^۱ نامیده می‌شود مقدار بحرانی K_I در لحظه شکست برابر است با:

^۱ Griffith

$$K_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (2-2)$$

شکل ۳-۲ توزیع تنش در نواحی اطراف ترک را نشان می‌دهد. با توجه به معادلات ۱-۲ وقتی r به سمت صفر میل می‌کند، مقادیر تنش بینهایت می‌شوند. عملاً وقتی تنش از حد مشخصی فراتر رود تغییر شکل پلاستیک رخ می‌دهد و تنش نوک ترک ثابت باقی می‌ماند. همچنین در مقادیر زیاد r تنش صفر می‌شود بعبارت دیگر تنش در نوک ترک تابع تکین^۲ است [۵].



شکل ۳-۲: توزیع تنش در نواحی نزدیک نوک ترک

۳-۲-۲ ناحیه پلاستیک نوک ترک:

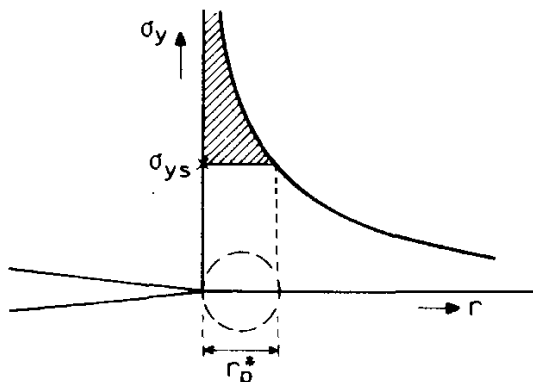
در واقع فرایند خرابی در نوک ترک محدود به یک نقطه نمی‌شود و ناحیه مشخصی به نام منطقه گسترش ترک^۳ را در بر می‌گیرد. ناحیه FPZ محدوده‌ای است که در آن مصالح رفتار نرم‌شوندگی کرنشی را از خود نشان می‌دهند [۶]. این منطقه غیر الاستیک شدت تنش را کاهش داده و ادامه یافتن ترک را مشکل می‌سازد. ابروین^۴ تخمین‌هایی از اندازه منطقه پلاستیک را به دست آورد (شکل ۴-۲).

^۱ Stress Intensity Factor

^۲ Singularity Stress Function

^۳ Fracture Process Zone (FPZ)

^۴ Irwin



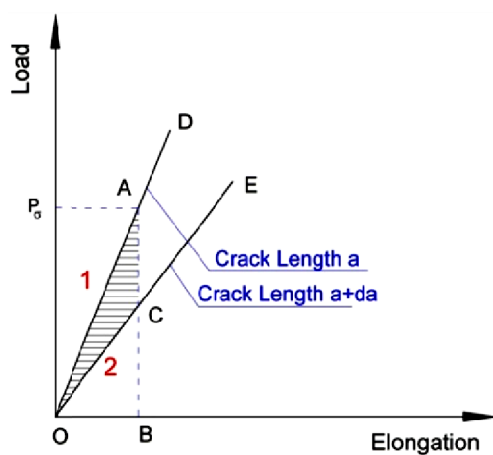
شکل ۲-۴: اندازه منطقه پلاستیک با تقریب اول

شعاع ناحیه پلاستیک در تخمین اول برای حالت تنش صفحه‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$r_p^* = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_{ys}^2} \quad (۳-۲)$$

۴-۲-۲ رشد ترک:

حالت یک صفحه با لبه‌های ثابت در بخش قبل مورد بررسی گرفت. نمودار انرژی ارتجاعی برای این صفحه به صورت زیر رسم می‌شود [۳]:



شکل ۲-۵: انرژی ارتجاعی صفحه ترکدار

سطح OAB انرژی الاستیک موجود در صفحه را نشان می‌دهد. اگر ترک باندازه da افزایش طول دهد سختی صفحه کاهش می‌یابد (خط OC). این بدین معنی است که یک مقدار نیرو رها می‌شود (لبه‌ها ثابت‌اند). در نتیجه انرژی الاستیک موجود در صفحه کاهش یافته و برابر سطح OCB می‌گردد.

پیشرفت ترک از a به $a+da$ موجب رها شدن انرژی الاستیک صفحه بمقدار سطح OAC خواهد شد. گریفیت اظهار داشت که: ترک وقتی رشد می‌کند که انرژی رها شده در اثر رشد ترک برای تأمین انرژی لازم جهت رشد آن کافی باشد. اگر انرژی رها شده کمتر از انرژی لازم باشد، جهت رشد ترک بایستی مقدار تنش را افزایش داد. بنابر این شرط رشد ترک عبارتست از:

$$\frac{du}{da} = \frac{dw}{da} \quad (۴-۲)$$

که در آن du مقدار انرژی رها شده در اثر گسترش ترک باندازه da ، dw مقدار انرژی لازم جهت گسترش ترک باندازه da ، می‌باشند. براساس محاسبات انجام شده توسط انگلیس برای میدان تنش یک ترک بیضوی گریفیت du/da را بصورت رابطه زیر بدست آورد [۵]:

$$\frac{du}{da} = \frac{2\pi\sigma^2 a}{E} \quad (۵-۲)$$

معمولاً du/da با G جایگزین می‌شود. پس:

$$G = \frac{2\pi\sigma^2 a}{E} \quad (۶-۲)$$

پارامتر G نرخ انرژی ارتجاعی رها شده^۱ در یک نوک ترک است که بعنوان نیروی رانش ترک نیز خوانده می‌شود. انرژی مصرفی برای گسترش ترک با R نشان داده شده و برابر با $R = dw/da$ و مقاومت ترک^۲ نامیده می‌شود. در تقریب اول فرض می‌شود که انرژی لازم برای ایجاد یک ترک برابر همان انرژی لازم برای رشد ترک باندازه da باشد. این گفته بدین معنی است که R ثابت است. بنابراین شرط انرژی (معادله ۲-۳) بیان می‌دارد که G باید حداقل برابر R قبل از انتشار ترک^۳ باشد [۳].

^۱ Elastic Energy Release Rate

^۲ Crack Resistance

^۳ Crack Propagation

یعنی برای اینکه ترک گسترش یابد باید G حداقل برابر R باشد. اگر R مقدار ثابتی باشد پس باید G از یک حد معین بحرانی G_{Ic} بیشتر باشد تا ترک گسترش یابد:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{EG_{Ic}}{\pi a}} \quad (7-2)$$

با اندازه گیری این تنش نرخ انرژی رها شده بحرانی قابل تعیین می‌باشد. در اجسام ترد اصولاً انرژی صرف ایجاد سطوح جدید ترک می‌شود زیرا تغییر شکل پلاستیک در نوک ترک ناچیز است. در اجسام نرم اصولاً انرژی صرف تغییر شکل پلاستیک نوک ترک می‌شود. پس انرژی یک معیار لازم برای رشد ترک است ولی کافی نیست. حتی اگر انرژی کافی برای رشد ترک تأمین شود، ترک پیشرفت نخواهد کرد مگر اینکه ماده موجود در نوک ترک آماده گسیخته شدن باشد. یعنی ماده باید در انتهای ظرفیت تحمل بار و تغییر شکل باشد. اما دومی یعنی در ماکزیمم تغییر شکل بودن معادل معیار انرژی می‌باشد [۶]. بنابراین بطور خلاصه رشد ترک هنگامی رخ می‌دهد که اولاً تنش در نوک ترک به تنش بحرانی σ_c رسیده باشد (معادله ۲-۲) و ثانیاً انرژی آن برابر مقدار بحرانی شود (معادله ۲-۶).

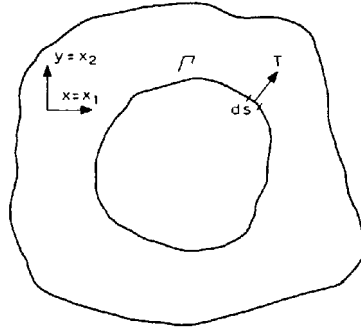
۲-۲-۵ روش انتگرال J:

برای محاسبه اثر ناحیه پلاستیک ابتدا باید یک حل الاستیک-پلاستیک برای میدان تنش نوک ترک بدست آورد. یک روش برای حل این مسأله انتگرال J می‌باشد، که بصورت زیر تعریف می‌شود [۳]:

$$G = \int_{\Gamma} (Wdy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (8-2)$$

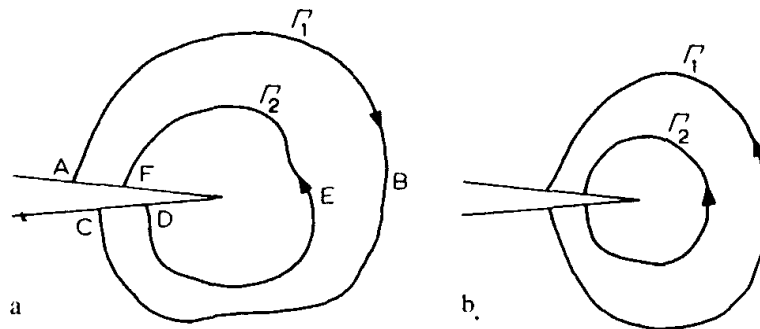
مطابق شکل ۲-۶؛ Γ یک کنتور بسته در جهت خلاف عقربه‌های ساعت که یک منطقه‌ای از جسم تحت تنش را حاطه نموده است. پارامتر T بردار کششی عمود و در جهت خارج آن می‌باشد. چنانچه انرژی کرنشی بازای واحد حجم را با W نشان دهیم، داریم.

$$W = W(x, y) = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (9-2)$$



شکل ۲-۶: تعاریف روش انتگرال J

می‌توان نشان داد برای هر کنتور بسته $J=0$ خواهد بود. مطابق شکل ۲-۷ انتگرال J روی کنتور بسته ABCDEF در اطراف نوک ترک در نظر بگیرید. صفر است. چون روی قسمت‌های CD و AF (لبه‌های ترک) $T=0$ و $dy=0$ ، لذا سهم آنها در انتگرال صفر می‌باشد. بنابراین سهم ABC در انتگرال برابر است با (اما علامت مخالف) سهم DEF. معنی این عبارت این است که اگر انتگرال J را به ABC یا FED محدود کنیم نتیجه یکی خواهد بود.



شکل ۲-۷: کنتورهای روش انتگرال J

به بیان دیگر انتگرال مستقل از بقیه خواهد بود. یعنی $J_{\Gamma_1} = J_{\Gamma_2}$. دقت شود که دو مسیر Γ_1 و Γ_2 بسته نیستند بلکه از یک لبه ترک شروع و به لبه دیگر ختم می‌گردند. مقدار J برای تمام کنتورهایی که از یک لبه ترک شروع و به لبه دیگر ختم گردند برابر می‌باشد.

$$J = \int_{ABC=\Gamma_1} + \int_{CD} + \int_{DEF=\Gamma_2} + \int_{FA} = 0 \quad (10-2)$$

$$\int_{\Gamma_1} (w dy - T \frac{\delta u}{\delta x} ds) = - \int_{\Gamma_2} (w dy - T \frac{\delta U}{\delta x} ds)$$

برای حالت ارتجاعی با استفاده از حل میدان تنش ارتجاعی می‌توان J را محاسبه کرد. ریس نشان داده است که در نهایت $G = J$ خواهد بود. یعنی برای حالت ارتجاعی، انتگرال J با نرخ انرژی رها شده برابر است. همچنین او نتیجه گرفت که در حالت کلی مقدار J برابر است با مشتق انرژی پتانسیل نسبت به طول ترک a یعنی:

$$J = \frac{-\partial V}{\partial a} \quad (11-2)$$

در حالت الاستیک این دو رابطه معادلند. به عبارت دیگر انتگرال J یک رابطه عمومی برای نرخ انرژی رها شده در اثر رشد ترک می‌باشد. انتگرال J برای بیان انرژی رها شده در حالتیکه در نوک ترک ناحیه پلاستیک قابل توجهی وجود دارد، صادق می‌باشد. روش انتگرال J از مسیر انتخابی مستقل می‌باشد و برای محاسبه آن می‌توان مسیر را طوری انتخاب کرد که محاسبه انتگرال آسان باشد (مثل لبه‌های جسم). پس انتگرال J وسیله ساده برای محاسبه نرخ انرژی رها شده G در حالتیکه منطقه پلاستیک بزرگ در نوک ترک وجود دارد می‌باشد. می‌توان انتظار داشت که برای J یک مقدار بحرانی وجود دارد که در آن رشد ترک اتفاق می‌افتد (J_{IC}). چون روش انتگرال J برای حالت الاستیک هم صادق است، پس مقدار بحرانی انتگرال برابر مقدار بحرانی G می‌باشد:

$$J_{IC} = G_{IC} \quad (12-2)$$

معادله ۱۲-۲ اعلام می‌دارد که رفتار رشد ترک وقتی که منطقه پلاستیک زیادی وجود دارد را می‌توان از J_{IC} تعیین نمود J_{IC} براساس مقدار G_{IC} برای حالت پلاستیسته کوچک تعیین می‌گردد و برعکس. مزیت انتگرال J در این است که لازم نیست شرایط اندازه نمونه و ضخامت را به دقت تعیین G_{IC} و K_{IC} در نظر بگیریم. یعنی در استفاده از J لازم نیست که ابعاد نمونه و ضخامت را دقیقاً داشته

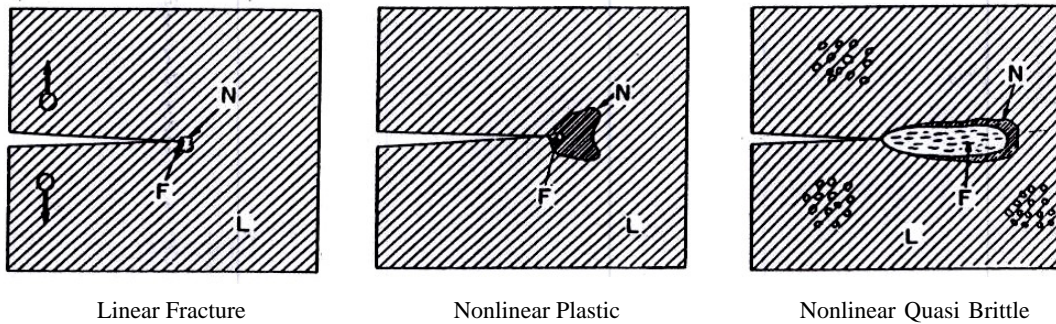
باشیم. در حالت دوم (یعنی استفاده از G_{IC} و K_{IC}) منطقه پلاستیک باید کوچک باشد. بنابراین ابعاد ترک و نمونه باید بزرگ باشند تا بتوان از منطقه پلاستیک صرفنظر کرد. محدودیت منطقه پلاستیک (یعنی کوچک بودن آن) را می‌توان در موقع کاربرد انتگرال J نادیده گرفت [۵].

۲-۲-۶ محدودیت کاربرد LEFM:

با توجه به مطالب بیان شده بدیهی است، LEFM تنها زمانی کاربرد دارد که r_p نسبت به بعد سازه خیلی کوچک باشد. عدم قابلیت استفاده از LEFM در رفتار بتن به دلیل گسترش ناحیه نسبتاً بزرگ خرابی در نوک ترک است. مصالح این ناحیه بدلیل شکل‌گیری ریزترک‌ها از خود نرم‌شوندگی نشان می‌دهند. تاثیر این ترک‌خوردگی، کاهش نرخ آزاد شدن انرژی در نوک ترک و در عین حال افزایش حجم FPZ و توانایی جذب انرژی در آن می‌باشد [۶]. از اینرو باید به‌دنبال تئوری جدیدی برای توصیف رفتار ویژه بتن در ناحیه خرابی نوک ترک بود.

۲-۳ تئوری مکانیک شکست غیر خطی:

دو نوع مکانیک شکست غیرخطی جهت تفسیر رفتار مصالح وجود دارد. مکانیک شکست غیر خطی برای مصالح شکل‌پذیر مانند فلزات؛ و مصالح شبه شکننده مانند بتن. در مقایسه با مصالح ترد ناحیه غیر خطی برای هر دو مصالح شکل‌پذیر و شبه شکننده بزرگ است (شکل ۲-۸). مصالح شکل‌پذیر در ناحیه غیرخطی رفتار سخت‌شوندگی کرنشی یا پلاستیک کامل را از خود نشان می‌دهند و ناحیه خرابی هنوز نسبت به ناحیه غیر خطی کوچک می‌باشد [۱]. در مقابل در مصالح شبه شکننده مانند بتن ناحیه خرابی نسبتاً بزرگ بوده و تقریباً تمام ناحیه غیرخطی را دربر می‌گیرد. بنابراین با توجه به این تفاوت‌های رفتاری؛ تئوری‌های شکست فلزات به‌طور مستقیم برای بتن قابل کاربرد نمی‌باشند [۶].

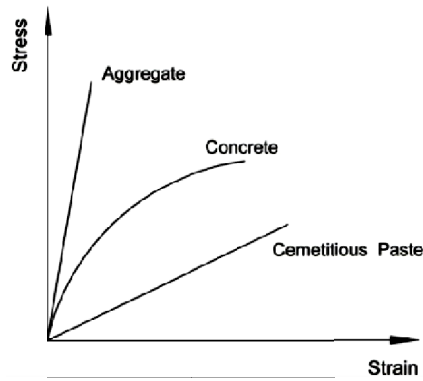


شکل ۲-۸: انواع شکست در مصالح مختلف

۲-۳-۱ رفتار غیرخطی بتن:

رفتار مصالح براساس منحنی تنش-کرنش تعریف می‌شود. با اینکه مواد اصلی تشکیل دهنده بتن یعنی سنگدانه و سیمان تا حدود 80% مقاومت نهایی خود دارای رفتار خطی می‌باشند اما در بتن مطابق شکل ۲-۹ زمانی که تنش به 30-40% ظرفیت نهایی می‌رسد رفتار غیرخطی شروع می‌شود [۸]. دلیل شروع سریعتر رفتار غیرخطی بتن در مقایسه با مواد تشکیل دهنده آن وجود منطقه‌ای تحت عنوان منطقه انتقال^۱ می‌باشد. ناحیه TZ منطقه واکنش سیمان و سنگدانه با ضخامت 10-15 میکرومتر در اطراف سنگدانه و ضعیف‌تر از سنگدانه و سیمان است. لازم به ذکر است در منطقه TZ قبل از اعمال بار خارجی به دلیل وجود تنش‌های حرارتی و تنش‌های انقباضی؛ ترک‌های بسیار ریزی وجود دارد. بنابراین به دلیل تخلخل بالا و مقاومت پایین این منطقه ترک‌ها به سرعت در آن گسترش پیدا می‌کنند در حالیکه سیمان و سنگدانه هنوز بدون ترک هستند و همین امر باعث شروع شدن زودتر انحنا در منحنی رفتاری بتن می‌گردد [۹].

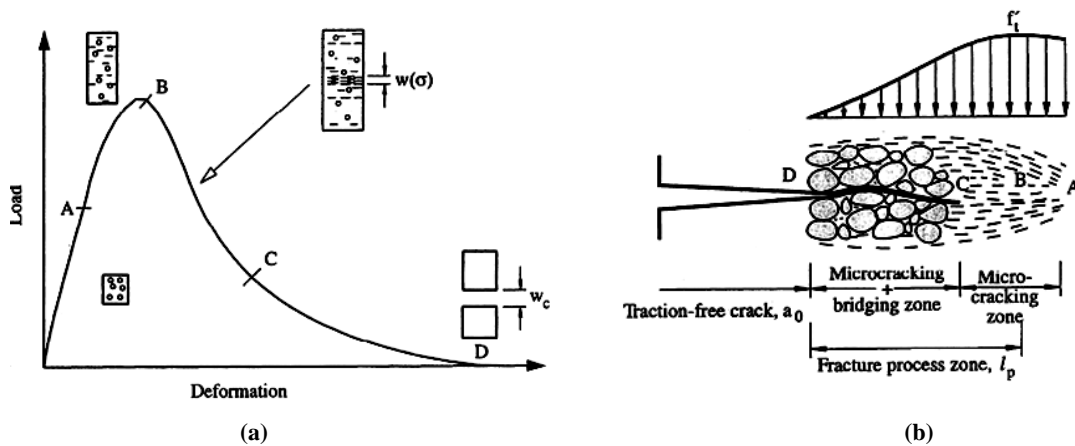
^۱ Transition Zone (TZ)



شکل ۲-۹: منحنی رفتاری بتن و مواد تشکیل دهنده

۲-۳-۲ ناحیه FPZ:

همانگونه که اشاره شد FPZ منطقه‌ای است که در آن مصالح رفتار نرم‌شوندگی کرنشی را از خود نشان می‌دهند. اندازه این ناحیه برای خمیر سیمانی حدود 1 میلیمتر است و این در حالی است که در بتن‌های سازه‌ای به 200-500 برابر آن می‌رسد [۷]. سنگدانه‌ها از شکست ترد در بتن جلوگیری کرده و ناحیه FPZ بدلیل نرم‌شوندگی ناشی از ریزترک و پلبندی میان آنها شکل گرفته و بزرگ می‌شود. شکل ۲-۱۰ نشان‌دهنده پاسخ بتن در کشش و اثرات ریزترک‌ها و پلبندی آنها بر ناحیه FPZ است.

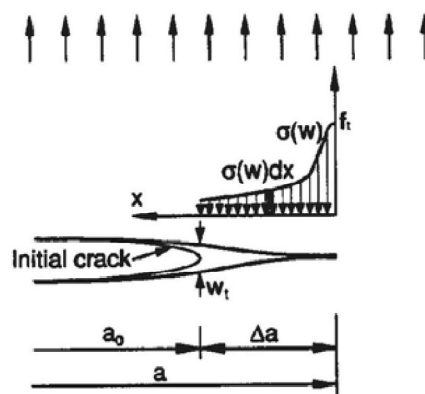


شکل ۲-۱۰: (a) منحنی نیرو-تغییر مکان کششی بتن (b) ناحیه FPZ در ناحیه اولیه کوچک و برابر AB و در حالت نرم‌شوندگی کرنشی بزرگ و مساوی BCD

با توجه به موارد اشاره شده لازم است برای کاربرد مکانیک شکست در بتن در فرمول‌های به‌دست آمده برای فلزات تغییراتی داده شود در این راستا مدل‌های مختلفی برای شکست بتن ارائه شده‌اند که در بخش‌های بعدی به آنها اشاره می‌شود.

۲-۳-۳ مدل ترک چسبنده^۱:

برای اولین بار Barenblatt و Dugdale پیشنهاد کردند که یک ناحیه پلاستیک با طول مشخص باید در نوک ترک وجود داشته باشد (شکل ۲-۱۱). طول این ناحیه باید به‌اندازه‌ای باشد که تنش ایجاد شده در نوک ترک از تکین شدن تابع تنش جلوگیری و آنرا محدود سازد ($k_I = 0$). در این مدل برای شبیه‌سازی پاسخ غیر الاستیک مصالح موجود در نوک ترک؛ می‌توان از یک توزیع تنش چسبنده که مایل به بستن ترک در طول این ناحیه است، استفاده نمود [۱۰]. بازشدگی ترک در ابتدای ناحیه پلاستیک دقیقاً از جاییکه تنش ناگهان صفر می‌شود، شروع می‌شود. مطابق شکل تنش چسبنده $\sigma(w)$ تابعی از میزان بازشدگی ترک w می‌باشد. در نوک ترک تنش برابر حداکثر خود یعنی مقاومت کششی مواد f_t می‌باشد. با افزایش بازشدگی، تنش کاهش یافته و به صفر می‌رسد.



شکل ۲-۱۱: توزیع تنش در ناحیه FPZ برای مدل‌های مختلف

^۱ Cohesive Crack Model (CCM)

در یک سازه بتنی نرخ آزادسازی انرژی کرنشی در نوک ترک G از دو مولفه نرخ آزادسازی انرژی برای ایجاد سطوح جدید شکست G_{IC} و انرژی لازم برای غلبه بر تنش‌های چسبنده G_{σ} تشکیل شده است:

$$G = G_{IC} + G_{\sigma} \quad (۱۳-۲)$$

در این معادله G_{IC} با استفاده از اصول مکانیک شکست خطی به دست می‌آید و G_{σ} برابر است با:

$$G_{\sigma} = \frac{1}{\Delta a} \int_0^{\Delta a} \int_0^w \sigma(w) dx dw = \frac{1}{\Delta a} \int_0^{\Delta a} dx \int_0^w \sigma(w) dw = \int_0^w \sigma(w) dw \quad (۱۴-۲)$$

در تعریف مدل‌های مختلف رفتاری بتن، از یکی از دو عبارت مستقل سمت راست معادله ۲-۸ در مقابل دیگری صرف نظر شده و در واقع دو مدل کلی برای شکست بتن مطرح می‌شود [۵]:

- مدل ترک مجازی^۱

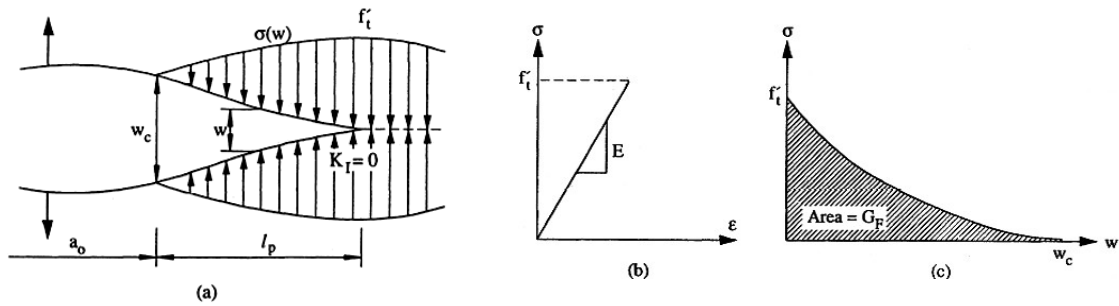
- مدل ترک الاستیک موثر^۲

۲-۳-۱ مدل ترک مجازی:

برای اولین بار Hillerborg مدل ترک مجازی را پیشنهاد کرد. در این مدل تنش در ناحیه خرابی نوک ترک واقعی به تدریج کاهش یافته و رفتار مصالح در مقابل بازشدگی دهانه ترک به صورت نرم‌شوندگی است [۱۱]. تنش σ که لبه‌های ترک مجازی را به هم نزدیک می‌کند از صفر در لبه ترک واقعی تا مقاومت کششی مصالح در نوک ترک مجازی به صورت تدریجی افزایش پیدا می‌کند (شکل ۲-۱۲). در این مدل اطلاع از دو خصوصیت ضروری می‌باشد: شکل نمودار σ - δ و سطح زیر آن؛ که انرژی شکست نامیده می‌شود. انرژی با تقسیم انرژی جذب شده بر سطح ترک محاسبه می‌شود [۷].

^۱ Fictitious Crack Model (FCM)

^۲ Effective Elastic Crack Model

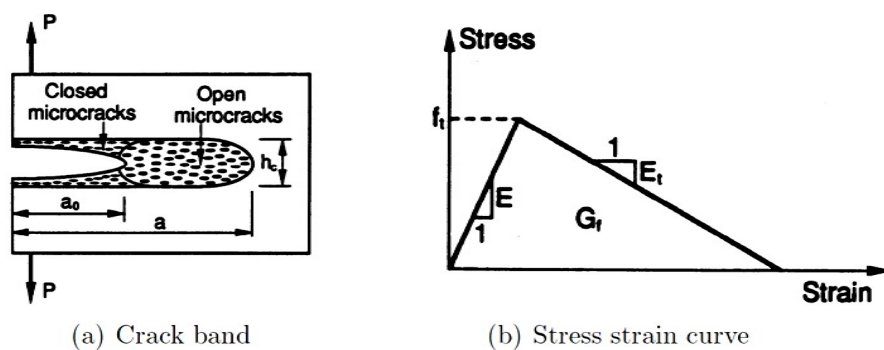


شکل ۲-۱۲: (a) ترک با طول واقعی a_0 در روش ترک مجازی، (b) رفتار مصالح دور از ترک به صورت الاستیک خطی (c) مصالح ناحیه FPZ دارای رفتار نرم‌شوندگی

۲-۳-۳-۲ مدل ترک نواری^۱:

در این مدل ضخامت ناحیه FPZ ناچیز فرض شده و این در حالی است که خرابی در نوک ترک لزوماً محدود به یک ناحیه باریک نمی‌شود. Bazant فرض کرد که ریزترک‌ها در نوک ترک اولیه در نواری به ضخامت w_c شکل می‌گیرند (شکل ۲-۱۳). در این مدل معادله تنش به‌جای اینکه بر حسب بازشدگی ترک باشد تابعی از کرنش تعریف شده است و انرژی شکست به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۲]:

$$G = w_c \int_0^{\infty} \sigma d\varepsilon \quad (۱۴-۲)$$

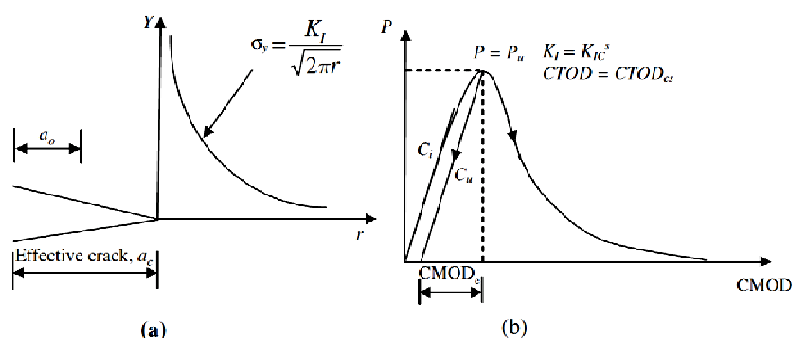


شکل ۲-۱۳: مدل ترک نواری (a) شکل‌گیری ریزترک‌ها در نوار ترک (b) نمودار تنش-کرنش ریزترک‌ها

^۱ Crack Bond Model (CBM)

۳-۳-۳-۲ مدل ترک الاستیک موثر (شکست دو پارامتری Jenq & Shah):

در این مدل از اثر تنش‌های چسبنده در ناحیه نوک ترک صرف‌نظر می‌شود و با افزودن مقداری معین به طول، ترک بدون تنش‌های چسبنده در نظر گرفته می‌شود [۱۳]. بنابراین به این دلیل که در این روش تنها از یک ترک الاستیک موثر استفاده می‌شود؛ می‌توان از معیارهای شکست خطی استفاده کرد. در این حالت برای جدا کردن رفتارهای الاستیک و پلاستیک فرض می‌کنیم نمونه تا بار حداکثر بارگذاری و سپس باربرداری و مجدداً بارگذاری شود (شکل ۲-۱۴).



شکل ۲-۱۴: مدل شکست دو پارامتری Jenq & Shah

در این حالت بازشدگی ترک^۱ به دو بخش الاستیک $CMOD^e$ و غیرالاستیک $CMOD^p$ تقسیم شده که پارامتر اول با استفاده از قوانین شکست الاستیک و پارامتر دوم از آزمایش خمشی به دست می‌آید.

۴-۳-۲ مکانیک شکست بتن مسلح به الیاف:

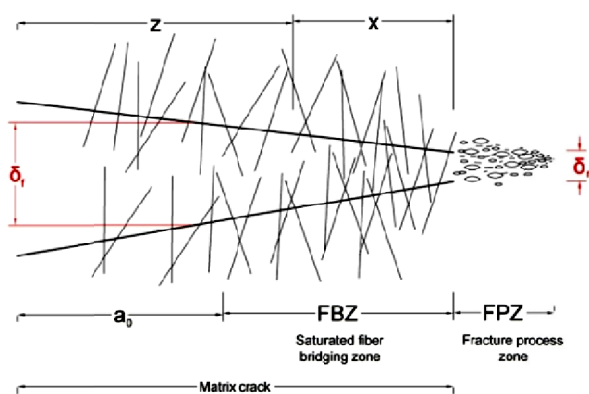
در بتن معمولی گسترش ترک در راستای عمود بر تنش کششی حداکثر می‌باشد و بسته به اندازه و مقاومت سنگ‌دانه و ملات سیمانی؛ از میان سنگ‌دانه‌ها گذشته و یا آنها را دور می‌زند. در بتن الیافی، مکانیزم شکست به اندازه، هندسه، مشخصات مکانیکی الیاف و ماتریس و پیوستگی میان آنها بستگی

^۱ Crack Mouth Opening Displacement (CMOD)

دارد. در این مصالح با گسترش ترک، الیاف نقش دوزنده^۱ دو لبه ترک به هم را دارند. به دلیل اینکه کرنش خرابی الیاف از ماتریس بیشتر است، گسیختگی ماتریس قبل از الیاف به شکل ترک ایجاد می‌شود. در این حالت انرژی شکست مجموع کار انجام شده در اثر گسیختگی الیاف-ماتریس و بیرون کشیده شدن الیاف است. عامل دوم در بتن الیافی بسیار قابل اهمیت است. در این حالت ناحیه نوک ترک تحت تاثیر دو سیستم نیرویی قرار می‌گیرد. نخست نیروهای خارجی که باعث ایجاد حوزه کششی شدید در ناحیه نوک ترک شده و می‌توانند ترک را به جلو برانند. دوم نیروهای دوزنده الیاف که حوزه فشاری شدید در ناحیه نوک ترک ایجاد می‌کنند و با گسترش ترک مقابله می‌کنند [۱۴].

۲-۳-۴-۱ ناحیه دوزنده ترک^۲:

هنگام بارگذاری FRC با ترک اولیه، ابتدا ناحیه FPZ در نوک ترک ایجاد می‌شود. وقتی بازشدگی به مقدار بحرانی δ_m می‌رسد، الیاف دو لبه را به هم متصل کرده و در مقابل گسترش آن مانع ایجاد می‌کنند [۱۴]. طولی از ترک که توسط الیاف متصل شده؛ FBZ نامیده می‌شود. با گسترش این ناحیه الیاف گسیخته یا از ماتریس بیرون کشیده می‌شوند. اندازه این ناحیه به پارامترهای ابعاد نمونه؛ شکل بارگذاری و خصوصیات الیاف بستگی دارد (شکل ۲-۱۵).



شکل ۲-۱۵ نواحی FPZ و FBZ در بتن‌های الیافی

^۱ Tailoring

^۲ Fiber Bridging Zone (FBZ)

۲-۳-۴-۲ دوزندگی ترک:

با شناخت رفتار بتن، الیاف و اندرکنش میان آنها می‌توان اثر دوزندگی و پلزی الیاف را در مقابله با گسترش و بازشدگی ترک در نظر گرفت. ضریب شدت تنش بر اثر عوامل خارجی (K_I)؛ معرف عامل گسترش دهنده ترک (K_a) و ضریب شدت تنش در نوک ترک بر اثر الیاف (K_{If})؛ معرف عامل مقابله کننده با گسترش ترک می‌باشد. پارامتر K_{If} مقداری منفی داشته و واکنش به K_I است. ضریب شدت تنش کل از جمع این دو ضریب به دست می‌آید:

$$K_I = K_{Ia} + K_{If} \quad (15-2)$$

معیار گسترش ترک، رسیدن K_I به یک مقدار بحرانی است. برای ترکی به طول $2a$ ؛ تحت تنش σ و زوج بار شکافنده F (شکل ۲-۱۶) می‌توان نوشت [۱]:

$$K_{Ia} = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (16-2)$$

$$K_{If} = \frac{F}{\sqrt{\pi a}} \left(\frac{a+x}{a-x} \right)^{0.5} \quad (17-2)$$

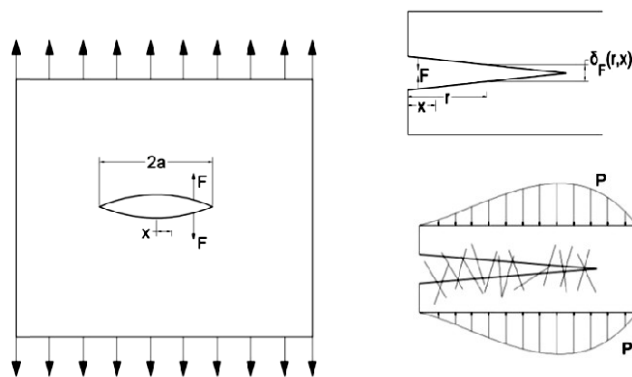
در نهایت با قرار دادن بار گسترده P_f به جای بار F و ساده‌سازی روابط خواهیم داشت [۱۵]:

$$K_{ICE} = (E_m P_f \delta_f)^{0.5} + K_{Ic} = K_{Icf} + K_{Ic} \quad (18-2)$$

که در آن K_{ICE} طاقت شکست معادل مصالح مرکب می‌باشد که از دو قسمت سهم الیاف K_{Icf} و سهم بتن K_{Ic} تشکیل شده است. در اغلب موارد K_{Ic} در مقایسه با K_{If} ناچیز بوده و معیار شکست را می‌توان فقط براساس طاقت الیاف در نظر گرفت:

$$K_{ICE} = K_{ICF} = (E_m P_f \delta_f)^{0.5} = (E_m G_f)^{0.5} \quad (19-2)$$

نتیجه این مدل ساده شده؛ مشابه روابط مکانیک شکست الاستیک خطی گردیده و در آن معیار گسترش ترک رسیدن K_I به مقدار بحرانی K_{ICE} می‌باشد [۱۵]. در معادله ۲-۱۹ پارامتر G_f معرف انرژی لازم برای بیرون کشیدن الیاف در واحد سطح ترک می‌باشد و انرژی شکست نامیده می‌شود.



شکل ۲-۱۶: ترک تحت تنش σ ، بار گسترده دوزنده P و زوج بار شکافنده F

۲-۳-۳ رفتار FRC تحت تنش کششی:

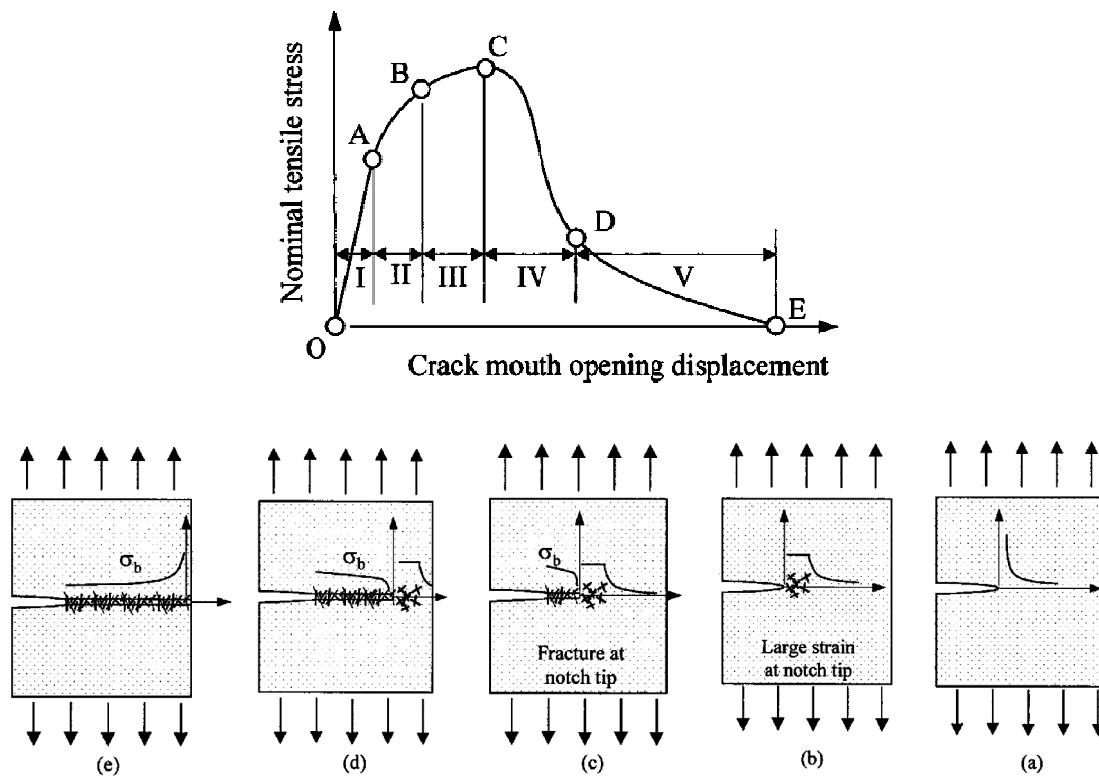
ترک و عیوب اولیه در کامپوزیت‌هایی همچون بتن معمول و بتن الیافی وجود دارند. با افزایش بار ریزترک‌ها در ناحیه FPZ رشد پیدا کرده؛ وقتی تراکم آنها به حالت اشباع رسید با اتصال آنها ترک موضعی ایجاد می‌شود. الیاف می‌توانند مکانیزم‌های شکل‌گیری ترک در ناحیه FPZ را تحت تاثیر قرار دهند. عملکرد الیاف در این ناحیه نسبت به تاثیر آن در قسمت دوزنده ترک پیچیده‌تر است. عرض ترک متأثر از سختی، نسبت حجمی و خصوصیات اتصال ماتریس به الیاف می‌باشد. تاثیر الیاف در مسلح کردن بتن با مقایسه سه پارامتر ضریب شدت تنش بررسی می‌شود:

K_{IC}^M : طاقت شکست ماتریس.

K_{IC}^C : طاقت شکست نظیر شروع رشد ریزترک (آغاز ناحیه غیرخطی).

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

این سه پارامتر از ثبت مقادیر تنش در مراحل مختلف شکل‌گیری ترک به دست می‌آید. شکل ۲-۱۷ منحنی تنش-بازشدگی برای مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف^۱ در پنج ناحیه مختلف را نشان می‌دهد [۱۶].



شکل ۲-۱۷: منحنی شماتیک تنش کششی در مقابل بازشدگی دهانه ترک و مراحل مختلف خرابی

ناحیه I (الاستیک خطی): در این ناحیه بتن به صورت الاستیک تغییر شکل داده و ریزترک‌ها هنوز رشد نکرده‌اند.

$$\text{Zone I: } K_I < K_{IC}^C \text{ و } \sigma < \sigma_A \quad (2-20)$$

ناحیه II (تغییر شکل غیر خطی): در این ناحیه بر اثر رشد و باز شدن ریزترک‌ها در FPZ سختی نمونه کاهش پیدا کرده و FRCC به صورت الاستیک خطی تغییر شکل می‌دهد.

^۱ Fiber Reinforced Cementitious Composite (FRCC)

$$\text{Zone II: } K_{IC}^C < K_I < K_{IC}^{C*} \text{ و } \sigma_A < \sigma < \sigma_B \quad (21-2)$$

با رسیدن تنش به σ_B ترک موضعی شروع می‌شود. اگر الیاف به اندازه‌ای که بین سطوح ریزترک‌ها در ناحیه FPZ اتصال برقرار کند؛ ریز نباشند، تنش‌های σ_A و σ_B به هم نزدیک شده و مقادیر K_{IC}^C و K_{IC}^{C*} تقریباً با هم برابر می‌شوند.

ناحیه III (رشد پایدار ترک موضعی): با شروع ترک موضعی ناحیه II به پایان می‌رسد. در این مرحله ترک موضعی به راحتی قابل تشخیص می‌باشد. در ناحیه‌ای که ترک موضعی ایجاد شده الیاف بین سطوح ترک اتصال برقرار کرده و مقداری از تنش اعمالی را تحمل می‌کنند. با افزایش تنش، ریزترک‌های جدید در نوک ترک رشد پیدا کرده و ناحیه FPZ بزرگتر می‌شود. ضریب تنش منفی K_b در اثر اتصال ناحیه ترک خورده ناشی از الیاف است. در این مرحله رشد ترک به صورت پایدار می‌باشد.

$$\text{Zone III: } K_I < K_{IC}^{C*} + k_b \text{ و } \sigma_B < \sigma < \sigma_C \quad (22-2)$$

$$\frac{\partial K_I}{\partial a} < \frac{\partial}{\partial a} (K_{IC}^{C*} + k_b) \quad (23-2)$$

رابطه بالا نشان می‌دهد که با افزایش طول ترک تغییرات K_I مربوط به تنش‌های بارگذاری کمتر از نرخ افزایش مقاومت نمونه در مقابل ایجاد ترک می‌باشد. با رسیدن تنش به σ_C (مقاومت کششی حداکثر) این ناحیه به پایان می‌رسد. در این ناحیه برای رشد ترک نیاز به افزایش بار می‌باشد.

ناحیه IV (رشد ناپایدار ترک موضعی): در این مرحله ترک در سراسر عرض نمونه به صورت ناپایدار رشد پیدا کرده و ضریب تمرکز مربوط به بارگذاری برابر مقاومت مصالح در مقابل رشد ترک می‌باشد.

$$\text{Zone IV: } K_I = K_{IC}^{C*} + k_b \text{ و } \sigma_C < \sigma < \sigma_D \quad (24-2)$$

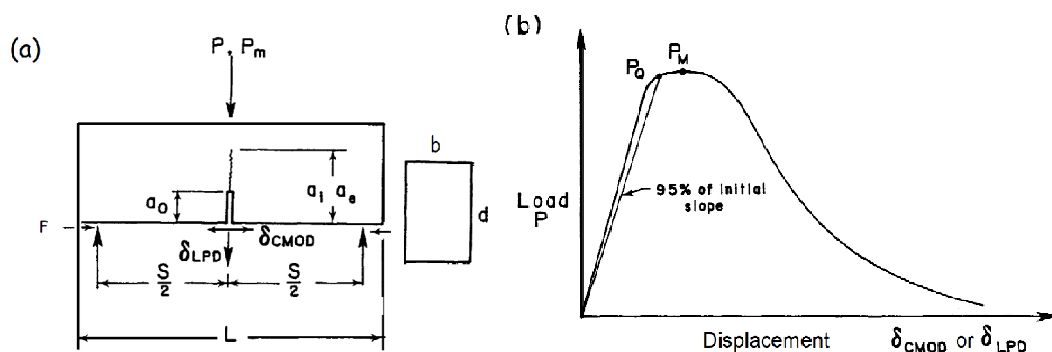
در این مرحله با افزایش طول ترک نرخ افزایش K_I بیش از نرخ تغییرات $K_{IC}^{C*} + k_b$ می‌باشد.

$$\frac{\partial K_I}{\partial a} > \frac{\partial}{\partial a} (K_{IC}^{C*} + k_b) \quad (25-2)$$

ناحیه V (دوزندگی ترک توسط الیاف): با شروع این مرحله تمام نیروی اعمال شده به نمونه توسط الیاف تحمل می‌شود. شکست نمونه با بیرون کشیده شدن الیاف یا گسیختگی آنها همراه است. سرانجام با رسیدن تنش به σ_E نمونه به‌طور کامل توانایی خود را از دست داده و گسیخته می‌شود.

۳-۴-۳-۲ تعیین پارامترهای مکانیک شکست مصالح از طریق آزمایش:

آزمایش خمش روی تیری که در آن یک شکاف (ترک اولیه) ایجاد شده اولین آزمایش استاندارد برای تعیین پارامترهای مکانیک شکست می‌باشد (RILEM 1985) [۶]. این روش نسبت به آزمایشات دیگر ساده‌تر بوده و در حین انجام آن حداقل می‌باشد. در این آزمایش کل انرژی آزاد شده در واحد سطح ترک محاسبه و انرژی شکست G_f نامیده می‌شود. این آزمایش به‌صورت استاندارد روی تیر با بارگذاری سه نقطه‌ای که یک شکاف در وسط دهانه با عمق a_0 در آن تعبیه شده انجام می‌شود (شکل ۲-۱۸).



شکل ۲-۱۸: آزمایش استاندارد تیر ترک‌دار تحت خمش

در این آزمایش انرژی شکست از فرمول زیر به‌دست می‌آید:

$$G_f = \frac{W_0 + mg\delta_0}{b(d-a_0)} \quad (2-26)$$

در این حالت ضریب تنش بر اساس آزمایش خمش بر روی تیر شکافدار به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K_{IC} = \frac{P}{b\sqrt{d}} \Phi(\alpha) \quad , \quad \alpha = a/d \quad (27-2)$$

$$\Phi(\alpha) = 6F(\alpha) \sqrt{\pi a} \quad (28-2)$$

$$F_{\alpha} = \frac{1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{\sqrt{\pi} (1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}} \quad (29-2)$$

با فرض تیرهایی با ضخامت مشابه ولی با اندازه مختلف و با فرض مقدار ثابت برای α از رابطه ۲۷-۲ نتیجه می‌شود که نیروی شکست P متناسب با جذر عمق تیر d افزایش می‌یابد، در حالیکه بر اساس تئوری‌های معمول مقاومت، نیروی شکست متناسب با عمق تیر تغییر خواهد کرد [۳].

فصل سوم:

کامپوزیت سیمانی مهندسی شده
Engineering Cementitious Composite

بتن‌های الیافی پس از گسترش صنعت بتن و مشکلات استفاده از آرماتورهای قطور فولادی و تمایل به کاهش تردی بتن توسعه یافتند. اما همچنان علاقه به ساخت ماده بتنی تقویت‌شده با الیاف که برخلاف بتن الیافی رایج که در آنها با افزایش طاقت شاهد کاهش شکل‌پذیری هستیم؛ شکل‌پذیری کششی بالایی داشته باشد، وجود داشت. به دنبال آن کاربرد انواع متعددی از الیاف همچون شیشه، کربن، مواد سنتزی و الیاف طبیعی گسترش یافت و تحقیقات گسترده‌ای برای دستیابی به این هدف انجام گرفت.

در سالیان اخیر نسل جدیدی از بتن‌های مسلح الیافی با عملکرد بالا تحت عنوان "Engineered Cementitious Composites (ECC)" و یا "کامپوزیت سیمانی مهندسی شده" توسط آقای "Li" ابداع شده است. این کامپوزیت در واقع نوع پیشرفته‌ای از HPFRC بر اساس کاربرد الیاف پلیمری کوتاه از هم جدا با توزیعی تصادفی و در حجمی متوسط است. این کامپوزیت به لحاظ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی هیچ تفاوتی با بتن‌های الیافی معمولی بجز بهبود رفتار کششی با شکل‌پذیری زیاد ناشی از قابلیت ترک خوردگی متعدد^۱ ندارد. توانمند شدن این نوع بتن با خصوصیات ذکر شده قابلیت تحمل تغییر شکل‌های کششی و ارائه رفتار سخت‌شدگی کرنشی را به بتن عرضه داشته و کاربرد آنرا در بسیاری از اعضای سازه‌ای به مرز باور رسانیده است.

بر این اساس هدف از این فصل جمع‌آوری اطلاعات و بررسی مطالعات انجام شده بر روی ECC در نظر گرفته شده است که شامل مواردی همچون تاریخچه پیدایش، مشخصات کلی (شامل پارامترهای کششی، فشاری، خمشی و...)، روند طراحی، پروسه ساخت، کنترل کیفیت، رفتار المان‌های سازه‌ای، دوام، قابلیت خودترمیم‌گری، هزینه تولید، گسترش و دورنمایی از آینده می‌باشد.

^۱ Multiple Cracking

۳-۲ توسعه تاریخی:

توسعه بتن های الیافی چندین مرحله را از سر گذرانده است. در دهه شصت، پژوهشگران اثربخشی الیاف کوتاه فولادی را در کاهش تَرْدی بتن نشان دادند و به دنبال آن انواع متعددی از الیاف دیگر همچون شیشه، کربن، مواد سنتزی و الیاف طبیعی گسترش یافت. در سالیان اخیر استفاده از هیبریدها^۱ که ترکیبی از انواع مختلف الیاف یا طول های مختلف می باشند، گسترش یافته است.

از آغاز دهه 1980، علاقه به ساخت ماده بتنی تقویت شده با الیاف که برخلاف بتن های الیافی رایج که در آنها با افزایش طاقت شاهد کاهش شکل پذیری هستیم؛ شکل پذیری کششی بالایی داشته باشد، گسترش یافت [۱۷]. شکل پذیری در واقع توسط قابلیت تغییر شکل کششی یا همان ظرفیت کرنش کششی سنجیده می شود که مربوط به مصالحی شکل پذیر همانند فولاد است نه مصالح بتنی. تلاش های نخستین آوستون^۲ و بعدتر استانگ^۳ در راستای دستیابی به مصالح بتنی با شکل پذیری کششی؛ نشان دادند که کاربرد الیاف هم راستای پیوسته می تواند شکل پذیری کششی را صدها برابر بتن معمولی افزایش دهد [۱۸ و ۱۹]. در موازات بررسی ها بر روی الیاف غیر پیوسته در حجم بالا (20-4%) و کاربرد آنها در لمینت سیمانی یا بتن الیافی دوغاب زده^۴ منجر به تولید کامپوزیت های بتنی شد که استحکام کششی بالاتری از بتن نرمال داشته و همچون آن ترد نبودند، با این وجود شکل پذیری کمتری نسبت به کامپوزیت های مسلح به الیاف هم راستای پیوسته از خود نشان می دادند [۲۰]. با توجه به پژوهش های انجام شده بر روی شکل پذیری؛ امروزه در حالت کلی بتن های الیافی بر اساس نوع رفتار خود به دو دسته تقسیم می شوند: دسته اول شامل بتن های الیافی است که از خود رفتار نرم شوندگی کرنشی یا کاهش تنش تحمل شده با افزایش ظرفیت کرنشی و در مقابل دسته دوم شامل بتن های الیافی با شکل پذیری بالا است که از خود رفتار سخت شوندگی کرنشی

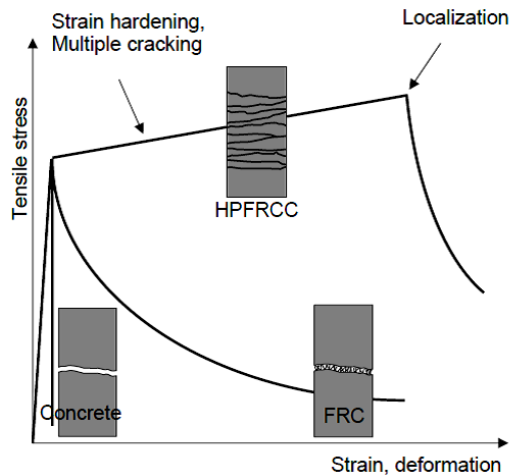
^۱ Hybrids

^۲ Aveston-1971

^۳ Stang-1989

^۴ Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON)

(افزایش تنش تحمل شده همراه با افزایش ظرفیت کرنشی) را از خود نشان می‌دهند. در واقع می‌توان دسته دوم را چسب یا ملات سیمانی مسلح شده به الیاف تلقی کرد. شکل ۱-۳ تفاوت رفتار کششی بتن معمولی، FRC و HPFRC را در آزمایش کشش تک محوری نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: منحنی تنش-کرنش (یا تغییرمکان) کششی برای بتن معمولی، FRC و HPFRC

در واقع این شکل گذار از بتن ترد معمولی به بتن الیافی نیمه‌ترد (نرم‌شوندگی کرنشی) و نهایتاً به بتن الیافی با شکل‌پذیری بالا (سخت‌شوندگی کرنشی) را برجسته می‌سازد. در حین رفتار نرم‌شوندگی کرنشی، تغییرشکل در بازشدگی سطح شکستی واحد نمایان می‌شود. در مقابل؛ حین رفتار سخت‌شوندگی کرنشی تغییرشکل به صورت مجموعه‌ای از بازشدگی‌های ترک‌های ریز و متعدد و نیز کشیدگی الاستیک ماتریس میان این ترک‌ها نمایان می‌شود. در حالیکه HPFRC در مقابل بتن های معمولی و حتی FRCs خواص کششی بسیار مطلوبی را از خود نشان می‌دهند؛ اما تا سالها تنها به آزمایشگاه‌های پژوهشی یا کارکردهایی تخصصی محدود بوده اند. این محدودیت بابت ملزوماتی همچون صرفه‌جویی اقتصادی و قابلیت ساخت آسان در پروژه‌های صنعتی به‌خصوص ساخت بتن‌های کارگاهی بود. در واقع وقتی الیاف پیوسته یا با درصدی بالا در کامپوزیت استفاده می‌شوند، ملزومات را به‌راحتی و یکجا نمی‌توان برآورده کرد. کامپوزیت سیمانی مهندسی‌شده (ECC) که ابتدا در دانشگاه میشیگان ساخته شد نوع پیشرفته‌ای از HPFRCs است که استحکام کششی متوسطی حدود 4 تا 6

مگاپاسکال و کرنش کششی حدود 3-5% را دارد [۲۱ و ۲۲]. در طراحی ECC برخلاف سایر FRCs از علم میکرومکانیک کمک گرفته شده است. در این راستا اندرکنش میان الیاف، ماتریس و لایه میانی آنها برای دستیابی به ظرفیت کرنش کششی بالا با توسعه ترک‌های مویی متعدد و در عین حال کاربرد حداقل الیاف با استفاده از مدل‌های تئوریک بطور دقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. ویژگی‌های منحصر بفرد ECC در مقابل FRC به شرح زیر می‌باشند:

- پروسه ساخت انعطاف‌پذیر - امکان ساخت به صورت پیش‌ساخته یا بتن‌ریزی در محل بدون نیاز به تجهیزات خاص.
- الیاف کوتاه در حجم متوسط - کاهش هزینه و وزن.
- خواص ایزوتروپیک - عدم وجود صفحات ضعیف در بارگذاری چندمحوری در ساختار حجیم.
- کارایی بالا - بهبود مقاومت، شکل‌پذیری، چقرمگی شکست و رفتار سخت‌شوندگی کرنشی.

جدول ۱-۳ مقایسه رفتاری بین FRC، HPFRC و ECC را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۳: مقایسه رفتاری بین FRC، HPFRC و ECC

ECC	HPFRC	FRC	
بر پایه علم میکرومکانیک، مینیم V_f	کاربرد V_f	ندارد	روش طراحی کامپوزیت
الیاف پلیمری $V_f < 2\%$; $d_f \sim 50\mu m$	عموماً فولادی $V_f > 5\%$; $d_f \sim 150\mu m$	هر نوع $V_f < 2\%$; $d_f \sim 500\mu m$	الیاف
سنگدانه بسیار ریز، کنترل شده توسط طاقت و ترک‌های اولیه	سنگدانه ریز دانه	سنگدانه درشت دانه	ماتریس
کنترل شده توسط	عدم کنترل	عدم کنترل	لایه میانی
نرم شوندگی کرنشی	نرم شوندگی کرنشی	نرم شوندگی کرنشی	رفتار کششی
3 - 8%	کمتر از 1.5%	0.1%	ظرفیت کششی
در حالت سخت شوندگی کرنشی عموماً کوچکتر از $100\mu m$	در حدود چندین و در $\epsilon > 1.5\%$ نامحدود	نامحدود	عرض ترک
خود متراکم، قابل روزن‌رانی	عدم خود متراکمی در حجم بالای الیاف و نیاز به ویبره زیاد، قابل روزن‌رانی	خود متراکم، قابل روزن‌رانی ^۱	پروسه ساخت

^۱Extrusion

۳-۳ مشخصات ECC:

۱-۳-۳ مشخصات کلی:

در واقع ECC نماینده بی‌همتای نسلی جدید از کامپوزیت‌های سیمانی تقویت‌شده با حجم الیاف متوسط، شکل‌پذیری و کارایی است. خلاصه‌ای از خواص فیزیکی ECC در جدول ۲-۳ آمده است.

جدول ۲-۳: خواص فیزیکی کلی ECC

Compressive Strength	First crack Strength	Ultimate Tensile Strength	Ultimate Tensile Strain	Young's Modulus	Flexural Strength	Density
20-95 (MPa)	3-7 (MPa)	4-12 (MPa)	1-8 %	18-34 (GPa)	10-30 (MPa)	0.95-2.3

همانگونه که اشاره شد در ECC الیاف پلیمری به کار می‌روند. از الیاف متداولی که در طرح اختلاط ECC به کار می‌روند می‌توان به الیاف پلی‌وینیل الکل، پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن^۱ اشاره کرد. اصل نهفته در پس طراحی ECC عدم وابستگی به نوع الیافی خاص می‌باشد [۲۳ و ۲۴]. در واقع الیافی واجد شرایط هستند که بتوانند معیارهای لازم برای سخت‌شوندگی کرنش را در نسبت حجمی پایین برآورده سازند. تصمیم‌گیری بر سر اینکه کدام الیاف را مورد استفاده قرار دهیم، به مشخصات طبیعی از جمله مشخصات مکانیکی، قطر، خواص سطحی الیاف و همچنین خواص مکانیکی ECC حاصله از جمله دوام، استحکام و خواص مکانیکی مورد انتظار و نیز ملاحظات اقتصادی وابسته است. در واقع ECC در خانواده مصالح با شکل‌پذیری بالا طبقه‌بندی شده که انواع آن عبارتند از:

- کامپوزیت سیمانی مهندسی شده خودتحمیم^۲ [۲۵].

- کامپوزیت سیمانی مهندسی شده با مقاومت اولیه بالا^۳ [۲۶].

^۱ Polypropylene (PP)

^۲ Self Consolidating ECC

^۳ High Early Strength ECC (HES-ECC)

- کامپوزیت سیمانی مهندسی شده سبک^۱ [۲۷].

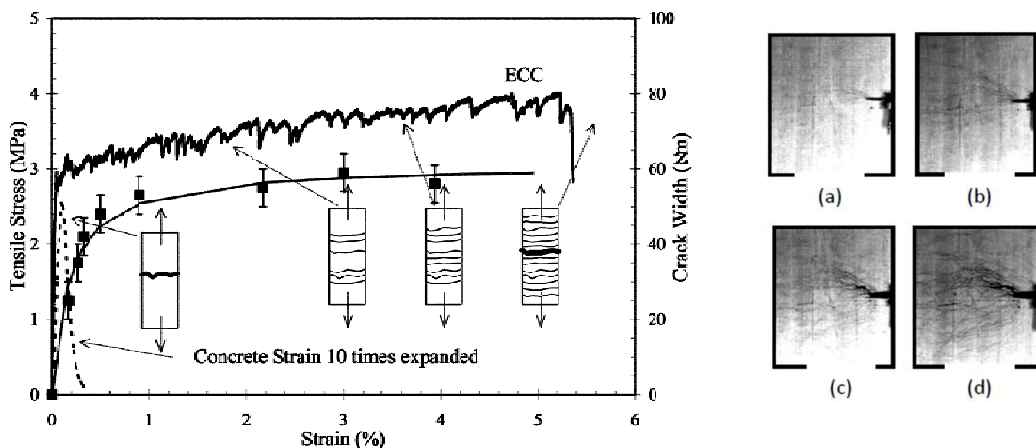
- کامپوزیت سیمانی مهندسی شده سازگار با محیط زیست (سبز) [۲۸].

- کامپوزیت سیمانی مهندسی شده خودترمیم گر^۲ [۲۹].

توضیحات بیشتر در این ارتباط در بخش های بعدی ذکر شده است.

۳-۲-۳ مشخصات کششی:

همان طور که پیشتر اشاره شد، مهم ترین ویژگی ECC شکل پذیری کششی بالای آن است. در یک منحنی تنش-کرنش کششی تک محوری آن؛ ظرفیت کرنشی معادل 5% نمایانده می شود. این رفتار شبه فلزی یک نقطه تسلیم در پایان مرحله الاستیک جائیکه نخستین ریزتر روی نمونه ظاهر می شوند را نشان می دهد. با افزایش بارگذاری، نمونه رفتار سخت شونده گی کرنشی را که همان افزایش تغییر شکل کششی با افزایش بارگذاری است؛ از خود نشان می دهد. شکست نهایی وقتی که یک ترک تشکیل صفحه شکست را دهد؛ رخ می دهد. شکل ۲-۳ رفتار کششی یک ECC را در چهار مرحله بارگذاری نشان می دهد [۳۰].



شکل ۲-۳: نمودار تنش - کرنش کششی ECC در چهار مرحله

^۱ Light Weight ECC (LW-ECC)

^۲ Self Healing ECC (SH-ECC)

همان‌طور که در این شکل نشان داده شده، علی‌رغم اینکه نمونه در مرحله (a) بالاتر از مقاومت ترک اولیه دچار ترک‌خوردگی شده، اما همچنان بار اعمالی را تحمل می‌کند. در مرحله (b) با رسیدن به حدود نیمی از ظرفیت کرنشی، ترک‌های بیشتری در نمونه ایجاد شده؛ اما نمونه هنوز هم قادر به تحمل سطوح بالاتری از بار است. با تحمیل تغییرشکل بیشتر بر نمونه، ترک‌خوردگی‌های بیشتری رخ داده و به اصطلاح حالت ترک‌خوردگی اشباع^۱ اتفاق می‌افتد (مرحله (c)). در نهایت در مرحله (d)، یک ریزترک شروع به باز شدن کرده و نمونه رفتار نرم‌شوندگی را از خود نشان می‌دهد.

این شکل‌پذیری کششی بالا نقش مهمی را در بهبود طراحی در حالت حدی نهایی^۲ بر حسب بارهای سازه‌ای، قابلیت تغییرشکل و نیز جذب انرژی را بازی می‌کند. در واقع در این راستا ECC می‌تواند می‌تواند منجر به بهبود امنیتی سازه‌ای شود. شکل‌گیری ترک مویی متعدد برای دستیابی به شکل‌پذیری کششی بالا در این کامپوزیت ضروری است.

کرنش کششی در بازه‌ای بزرگ از کرنش مورد نیاز برای ترک نخست 0.01% تا 1% و عرض ترک‌ها از 0 تا 60 میکرومتر در حال تغییر است. بارگذاری بیشتر تا حد کرنش بالای 1% منجر به شکل‌گیری ترک‌های بسیار می‌شود در عین حال عرض ترک‌ها از 60 میکرومتر افزایش نیافته و تشکیل ناحیه‌ای مملو از ترک‌های ریز و نزدیک به هم را می‌دهد که اصطلاحاً ناحیه ترک پایا^۳ نامیده می‌شود. ناحیه ترک پایا و وضعیت ثابت عرض ترک‌ها برخلاف بتن معمولی یا FRR است که یک خصوصیت ذاتی ECC به‌شمار می‌آید و مستقل از بارگذاری، اندازه و هندسه نمونه، نوع و مقدار الیاف است. این موضوع در افزایش عمر بتن، بیشینه اندازه اجزاء، به‌صرفه‌بودن و نیز زیبایی‌شناسی اهمیت بسیار دارد [۳۱].

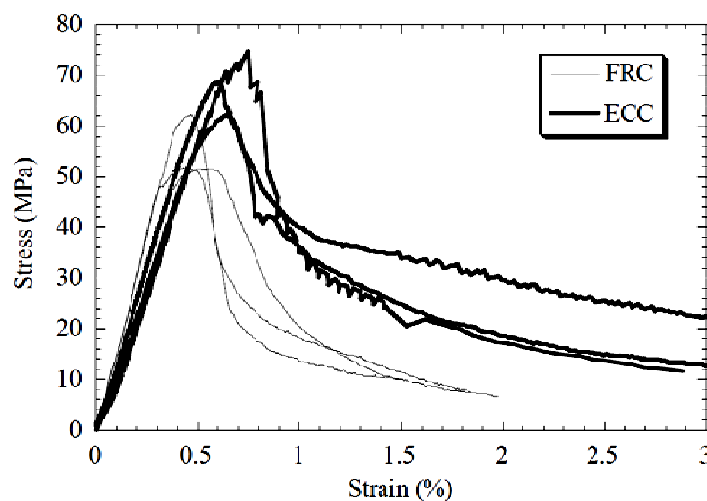
^۱ Saturated Multiple Cracking

^۲ Ultimate Limited State (ULS)

^۳ Steady State

۳-۳-۳ مشخصات فشاری:

مشخصات فشاری ECC تفاوت چشمگیری در مقایسه با بتن‌های معمولی یا FRC را از خود نشان نمی‌دهد. مقاومت فشاری ECC در بازه 20-95 مگاپاسکال در حال تغییر است [۳۰]. مدول ECC همچون بتن معمولی، به مقدار ریزدانه مورد استفاده وابسته است. با این حال، حضور ریزدانه‌ها دیگر خواص ماتریس را در کامپوزیت ECC نیز تغییر می‌دهد. در واقع کنترل دقیق مقدار و اندازه ریزدانه اهمیتی بنیادین در طراحی ECC دارد. مدول پلاستیک ECC در بازه 15-34 گیگاپاسکال در حال تغییر است. همچنین ظرفیت کرنش فشاری نسبت به FRCs کمی بالاتر، و حدود 0.45 تا 0.65% است [۳۲]. منحنی‌های تنش-کرنش فشاری برای ECC و FRC در شکل ۳-۳ نشان داده شده‌اند.

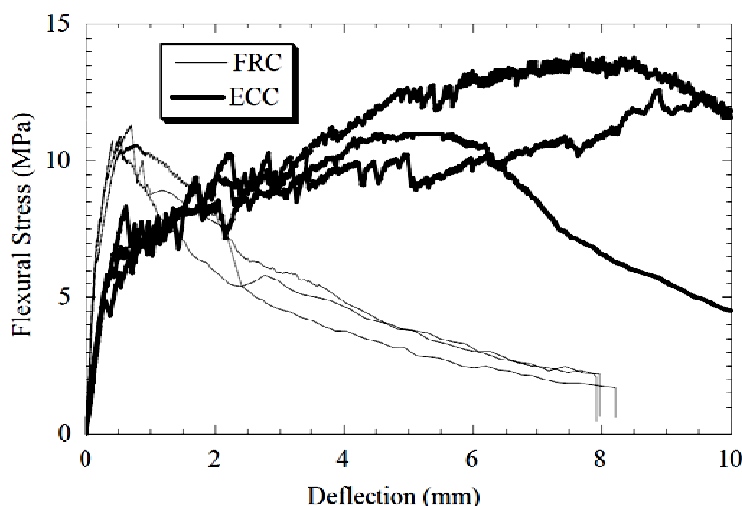


شکل ۳-۳: نمودار تنش - کرنش فشاری ECC و FRC

۴-۳-۳ مشخصات خمشی:

رفتار خمشی ECC نیز متأثر از شکل‌پذیری بالای کششی آن است. در این حالت نیز تشکیل ترک‌های مویی متعدد تحت خمش امکان تغییر شکل‌های بزرگ را فراهم ساخته و زمینه ساخت

«بتن خم‌پذیر»^۱ را فراهم می‌سازد. مقاومت خمشی ECC (مدول راپچر^۲) در بازه 10-15 مگاپاسکال در حال تغییر است [۳۳ و ۳۴]. شکل ۳-۴ رفتار خمشی ECC و FRC را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴: نمودار تنش-تغییرمکان خمشی ECC و FRC

۳-۳-۵ انرژی شکست:

انرژی شکست توسط تکنیک انتگرال J و با آزمایش تیر طره دوگانه^۳ و برای شکاف‌هایی^۴ با طول مختلف به دست می‌آید. در آزمایش انرژی شکست برای ECC دیده شده که علی‌رغم حضور شکافی عمیق، نمونه هنوز در برابر بارگذاری تحمل زیادی از خود نشان داده و در ناحیه اطراف نوک شکاف ترک‌های مویی متعدد شکل می‌گیرند. بنابراین جذب انرژی چشم‌گیر در فرآیند تغییرشکل غیرالاستیک حجمی در خارج از صفحه شکست هستیم [۳۰ و ۳۵]. در مقابل در FRC پیش از رسیدن به نقطه اوج بارگذاری؛ تنها ناحیه غیرخطی کوچکی مشاهده شده و نمونه به شکل شبه‌ترد و با بازشدن یک ریزترک منفرد (که الیاف فولادی آن را دوخته بودند) دچار شکست می‌شود. انرژی شکست برای ECC مقدار 27 KJ/m^2 است که حدود نیمی از این انرژی در فرآیند تغییرشکل

^۱ Bendable Concrete

^۲ Modulus of Rupture (MOR)

^۳ Double Cantilever Beam (DCB)

^۴ Notch

غیرالاستیک مصرف می‌شود و ناحیه‌ای حدود 1150 سانتی‌مترمربع را حول رأس ترک اشغال می‌کند؛ بقیه انرژی نیز صرف بیرون کشیدن الیاف از لبه ترک می‌شود. این در حالی است که انرژی شکست برای FRC در حدود 4.9 KJ/m^2 است.

در پایان، خواص مکانیکی ECC و FRC در جدول ۳-۳ خلاصه شده است [۳۰].

جدول ۳-۳: مقایسه رفتاری ECC و FRC

Flexural	Stiffness	Compressive		Tensile				parameter
		MOR (MPa)	E(GPa)	ε'_c %	f'_c (MPa)	ε_{cu} %	σ_{cu} (MPa)		$\varepsilon_{fc}$ %	$\sigma_{fc}$ (MPa)
25	22	0.67	68.5	5.6	4.6	0.021	2.5	ECC
10.9	32.5	0.48	55	0.035	4.3	0.035	4.3	FRC

۴-۳ ملاحظات طراحی ECC:

اصلی‌ترین مشخصه HPFRCS در حالت کلی و ECC به‌طور خاص؛ شکل‌گیری ترک‌های مویی فزاینده تحت تنش کششی است. لازمه وقوع این رفتار برقراری دو شرط مکمل زیر است [۲۱]:

تنش پل‌بندی^۱ حداکثر ($\sigma_{B, peak}$) که توسط الیاف در قسمت ترک‌خورده اعمال می‌شود، باید از استحکام اولیه ترک‌خوردگی ماتریس (σ_{fc}) بیشتر شود، یعنی:

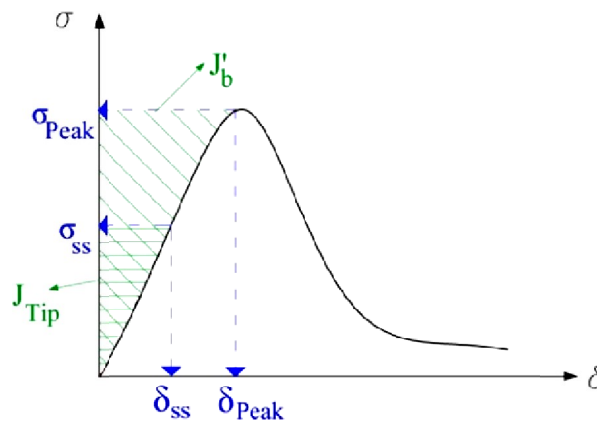
$$\sigma_{B, peak} > \sigma_{fc} \quad (۱-۳)$$

این تنش اعمالی که منجر به ترک‌خوردگی ماتریس پیشین می‌شود؛ توسط الیاف در ترک‌خوردگی ماتریس بعدی تحمل می‌شود. بعلاوه، هنگام شکل‌گیری ترک در ماتریس لازم است تنش و میزان

^۱ Bridging

بازشدگی در محدوده‌ای کمتر از تاب کامپوزیت قرار گرفته تا امکان دستیابی به توزیع تنش یکنواخت و ترک‌خوردگی متوالی فراهم شود (شکل ۳-۵) یعنی [۳۶]:

$$\sigma_{ss} > \sigma_{Peak} \quad (۲-۳)$$



شکل ۳-۵: نمودار تنش- تغییر مکان در کامپوزیت با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی

شرط آخر را می‌توان تعادل انرژی بین کار خارجی (انرژی لازم برای انتشار ترک در ماتریس) و انرژی مصرفی در پلبدی الیاف دانست، یعنی:

$$\sigma_{ss} \cdot \delta_{ss} = J_{tip} + \int_0^{\delta_{ss}} \sigma(\delta) d\delta \quad (۳-۳)$$

که در آن J_{tip} طاقت ماتریس و δ بازشدگی دهانه ترک است. ترکیب این دو شرط با یکدیگر حد بالای طاقت ماتریس یعنی J_{tip} را بدست می‌دهد:

$$J_{tip} < \sigma_{Peak} \cdot \delta_{Peak} - \int_0^{\delta_{ss}} \sigma(\delta) d\delta \quad (۴-۳)$$

در معادله ۳-۴ در حجم کم الیاف (کمتر از ۳٪) به طاقت ماتریس یعنی $(K_m)^2/E_m$ نزدیک می‌شود. بنابراین:

$$\frac{K_m^2}{E_m} < \sigma_{Peak} \cdot \delta_{Peak} - \int_0^{\delta_{ss}} \sigma(\delta) d\delta \equiv J'_b \quad (۴-۳)$$

این معادله نشان می‌دهد به منظور ایجاد حالت ترک‌پایا؛ انرژی ذخیره‌شده در تنش پل‌زنی حداکثر الیاف (σ_{peak}) و بازشدگی متناظر ترک (δ_{peak})؛ با انرژی مصرف‌شده در کشیدگی الاستیک و بیرون کشیدگی الیاف باید تطبیق داشته باشد. یعنی در نوک ترک طاق ماتریس باید از J_{tip} فراتر رود. برای تحقق شروط مذکور و کنترل اندرکنش‌های میان الیاف، ماتریس و لایه میانی لازم است کمترین حجم الیاف در نظر گرفته شود. تعامل و اندرکنش میکرومکانیکی این اجزا؛ مبنای طراحی ECC را می‌سازد. مشخصات منحنی تنش-کرنش در یک سیستم کامپوزیتی مفروض (ورای شکل ترک‌خوردگی) با ارتباط تنش پل‌زنی و بازشدگی ترک و نیز توزیع اندازه ترک‌ها^۱ در ماتریس سیمانی مدیریت می‌شود. از آنجائیکه J'_b انرژی مکمل تنش پل‌زنی الیاف در مقابل بازشدگی ترک است، نسبت J'_b/J_{tip} بعنوان شاخص سخت‌شوندگی کرنشی و میزانی برای سنجش شکل‌پذیری کششی در نظر گرفته می‌شود. مقدار $J'_b/J_{tip} > 1$ برای دست‌یافتن به رفتار سخت‌شوندگی کرنشی ضروری و مقادیر بالاتر آن تضمین‌کننده حالت ترک‌خوردگی اشباع می‌باشد [۳۰]. اندرکنش این ریزسازه‌ها براساس علم میکرومکانیک در فصل چهارم به صورت مفصل توضیح خواهد داده شد.

۳-۵ طرح اختلاط و پروسه ساخت:

جدول ۳-۴ طرح اختلاط رایج در حالت نسبت‌های خشک برای ECC را نشان می‌دهد. نوع، اندازه و مقدار الیاف و مواد سازنده ماتریس، همراه با مشخصات سطح مشترک، جهت ترک‌خوردگی متعدد و عرض ترک کنترل‌شده؛ سازمان یافته‌اند [۲۲].

جدول ۳-۴: طرح اختلاط (kg/m^3) ECC

Fiber (PVA)	Superplasticizer	Water	Fly ash	Sand	Cement
26	13	321	700	467	583

^۱ Flow Size Distribution

اجزا اصلی مخلوط خشک شامل سیمان پرتلند نوع I، خاکستر بادی کلاس F و سنگدانه سیلیسی ریز با حداکثر سایز دانه 300 میکرومتر و سایز متوسط 110 میکرومتر است. استفاده از مقادیر زیاد خاکستر بادی منجر به کاهش کارایی بتن شده که در مقابل با افزایش درصد فوق روان کننده جبران می‌شود. همانگونه که اشاره شد الیاف مختلف پلیمری همانند الیاف PVA، PE و PP می‌توانند در ECC به کار روند. ممکن هر یک از این الیاف خواصی منحصر بفرد داشته باشد اما چنانچه دو شرطی که در بخش قبل ذکر شد را ارضا کنند؛ می‌توانند در ساختار ECC به کار روند. به طور مثال الیاف PVA الیافی آب دوست هستند که در مجاورت آب واکنش داده و مهار شیمیایی^۱ اطراف خود تولید می‌کنند؛ در مقابل الیاف PE الیافی آب گریز هستند که با آب واکنش نمی‌دهند ولی در مقابل دارای مهار اصطکاکی^۲ بالایی در مصالح پایه سیمانی می‌باشند. الیاف مورد استفاده در طرح اختلاط جدول ۳-۴ الیاف PVA بوده که مشخصات آن در جدول ۳-۵ ارائه شده است.

جدول ۳-۵: مشخصات PVA

Nominal Strength	Length	Diameter	Young's Modulus	Elongation	Tenacity	Density
1620 MPa	8 mm	39 μm	42.8 GPa	6 %	1620MPa	1.3 gr/cm ³

۳-۶ کنترل کیفیت:

برای دستیابی به قابلیت خودتراکمی^۳ مخلوط‌های تازه ECC باید بتواند به آسانی تغییر شکل داده و همچنین مقاومت کافی در مقابل جداسازی ذرات^۴ داشته باشند. این مشخصه نیز متاثر از برخی ویژگی‌های ریزساختارها است. در واقع برای خودتراکم بودن ECC لازم به برقراری شروط زیر است [۲۵]:

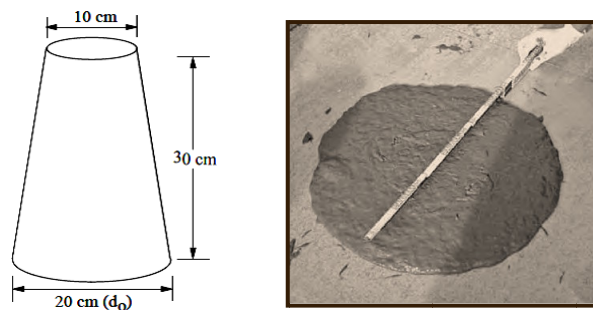
^۱ Chemical Bond

^۲ Frictional Bond

^۳ Self Compactability

^۴ Segregation

- ماتریس تازه باید ویسکوزیته بهینه و تنش تسلیم پایین داشته باشد تا قابلیت تغییر شکل مناسب را به ارمغان آورد، در عین حال از جدایش ذرات جلوگیری می‌کند.
 - حین قالب‌ریزی، سوسپانسیون باید سیالیت اولیه خود را برای پایدارسازی سیستم حفظ کند.
 - خواص سیلانی مخلوط فاقد الیاف با افزودن الیاف به آن باید کمترین تغییر نامطلوب را نشان داده تا از توزیع نامناسب الیاف به‌خاطر نسبت ظاهری بالا و یا حجم بالای آن جلوگیری کند.
 - سطح الیاف باید خیس‌شوندگی بهینه نسبت به مخلوط سیمانی تازه داشته تا مخلوط بتواند به‌طور همگن در خلال آرماتورها یا قالب‌بندی پیچیده بدون جدا شدن فازی سیلان یابد.
- نتیجه آزمایش اسلامپ ECC با استفاده از آزمایش قیف نزولی در شکل ۳-۶ نمایش داده شده است:



شکل ۳-۶: هندسه آزمایش قیف نزولی اسلامپ و نتیجه آن بر ECC

در این روش اسلامپ با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\Gamma = \frac{(D_1 - D_0)}{D_0} \quad (۳-۵)$$

که در آن D_1 میانگین دو شعاع متعامد پس از برداشتن قیف و D_0 قطر قاعده قیف است. برای داشتن یک اختلاط خودمتراکم مناسب، باید Γ مقدار حداقل برابر ۲.۷۵ داشته باشد. جدا از خودمتراکم بودن؛ انواع خاصی از ECC نیز برای روزن‌رانی و یا بتن‌پاشی توسعه یافته‌اند. شکل ۳-۷ شیوه‌های گوناگون پرداخت ECC را نشان می‌دهد [۳۷].

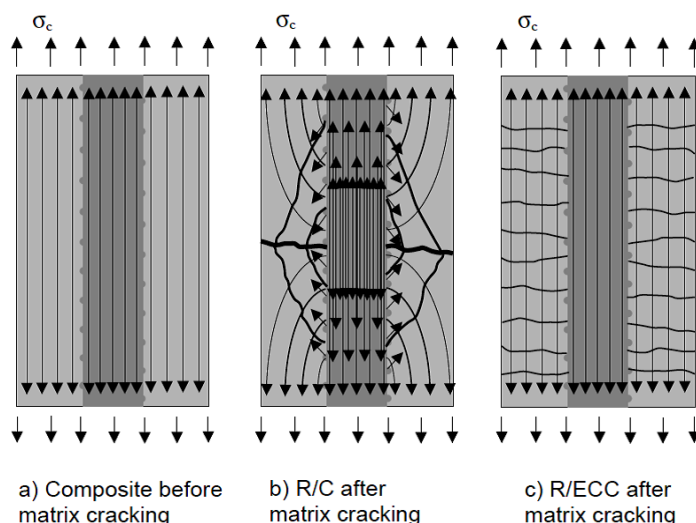


شکل ۴-۷: شیوه‌های پرداخت ECC (a) قالب‌ریزی خودمتراکم، (b) روزن‌رانی، (c) بتن پاشی، (d) پیش‌ساختگی.

۳-۷ برهمکنش ECC و آرماتور فولادی:

یک ECC مسلح با آرماتور فولادی را می‌توان ترکیبی از ECC با در نظر گرفتن خواص ویژه آن و یک عنصر نرم تقویت‌کننده (فولاد) دانست. گواه این رویکرد را می‌توان با بررسی تغییرشکل یک ECC مسلح‌شده با آرماتور فولادی (R/ECC) در تنش تک‌محوری در مقایسه بتن‌آرمه معمولی (R/C) دریافت. سهم ماتریس سیمانی در تغییرشکل R/ECC عموماً با تاثیر سخت‌شوندگی کرنشی توصیف می‌شود [۳۸].

تفاوت R/C و R/ECC به بار کششی تحمل شده توسط ماتریس سیمانی در ترک‌های مایل مربوط است. شکل ۳-۸ تنش و تغییر شکل‌ها را شماتیک در عناصر کامپوزیتی توصیف می‌کند.



شکل ۳-۸: شکل‌گیری ترک و تنش‌های درونی در R/C و R/ECC

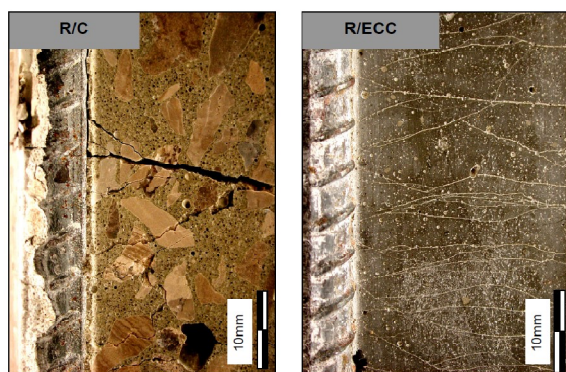
بار اعمالی بر کامپوزیت، پیش از رسیدن به مقاومت اولین ترک، میان آرماتورها و ماتریس به نسبت سختی و حجم آنها تقسیم می‌شود (شکل ۳-۸a). تنش‌ها در هر دو جز به طور یکپارچه در نمونه توزیع شده و با شکل‌گیری ترک مایل در کامپوزیت R/C بازتوزیع تنش در ماتریس و آرماتورها را موجب می‌شود (شکل ۳-۸b). از آنجا که ماتریس بتنی قادر به تحمل بار در طول ترک نیست، اعمالی باید توسط کنش اتصالی به آرماتورها انتقال یابد و تماماً توسط آرماتور در محل ترک تحمل شود. با توجه به تمرکز تنش؛ آرماتور و ماتریس بتنی تفاوت کرنش نسبتاً بزرگی را در تنش‌های پیوندی^۱ و لغزش موضعی را تجربه می‌کنند. در نتیجه، شکست کامپوزیت می‌تواند در حالات مختلفی، همچون شکست لایه میانی، شکل‌گیری ترک‌های مایل (که از سطح مشترک نشأت گرفته) و شکافت طولی ناشی از فشار شعاعی نمود پیدا کند. شکل‌پذیری کششی ماتریس ECC می‌تواند در مقیاس ماکرو تفاوت کرنش بین آرماتور و ماتریس را از بین ببرد. در واقع R/ECC را می‌توان کامپوزیتی متشکل از دو ماده با رفتار الاستیک/پلاستیک دانست که کرنش و مقاومت تسلیم منحصر بفردی دارند. بنابراین دو جز بصورت سازگار تغییر شکل الاستیک یا غیرالاستیک را از خود نشان می‌دهند. ترک خوردگی ECC نشان‌دهنده تسلیم ماتریس است در حالی که آرماتور فولادی در ناحیه الاستیک

^۱ Interfacial Bond

باقی می‌ماند. پس از ترک خوردن، توزیع تنش در R/ECC بدون تغییر باقی می‌ماند (شکل ۳-۸). در اصل، به محض آنکه ترک شکل بگیرد، بار کششی اعمالی بر ماتریس پیش از ترک خوردگی، مستقیماً از طریق پلبندهای الیاف به بخشهای ترک نخورده ماتریس انتقال می‌یابد. در مقیاس ماکرو، تنش‌های پیوندی برای تسهیل این انتقال مورد نیاز نیستند، زیرا بار تحمل‌شده توسط ماتریس نیازی به انتقال به آرماتور ندارد [۳۸].

با این حال، با در نظر گرفتن تاثیرات موضعی در نزدیکی یک ترک منفرد در ماتریس ECC، اندرکنش‌هایی میان الیاف و ماتریس پیش‌بینی می‌شوند که به خواص میکرومکانیکی ماتریس وابسته است. باز شدگی مشخصی لازم است تا تنش پل‌زنی الیاف معادل با تنش پیش از ترک خوردگی ایجاد شود. با توجه به این عدم پیوستگی میکروسکوپی، پیوند سطح مشترک مستقرشده بین آرماتور و ماتریس فعال می‌شود. آرماتورها در مرحله تغییرشکل نهایی جایی که هر دو جز وارد تغییرشکل غیرالاستیک شده، تسلیم می‌شوند.

رفتار سخت‌شوندگی کرنشی از تمرکز تغییرشکل در بخشی خاص جلوگیری کرده و تغییرشکل‌های غیرالاستیک سازگار بین فولاد و ECC را حفظ می‌کند. در این حالت ترک خوردگی متعدد ECC و تسلیم آرماتور به طور یکپارچه در نمونه توزیع می‌شوند. به خاطر حجم بالای مصالح تحت تغییرشکل غیرالاستیک، جذب انرژی به شکلی قابل توجه افزایش یافته می‌یابد در واقع در R/C، فصل مشترک بین بتن و فولاد در اطراف ترک مایل گسیخته می‌شود اما در نمونه R/ECC تسلیم فولاد توأم با ترک خوردگی متعدد ماتریس از فعال‌سازی تنش پیوندی سطح مشترک جلوگیری کرده و در نتیجه، سطح مشترک بین آرماتور فولادی و ماتریس ECC در سرتاسر پروسه الاستیک و غیرالاستیک R/ECC بی‌عیب باقی می‌ماند [۳۸] (شکل ۳-۹).



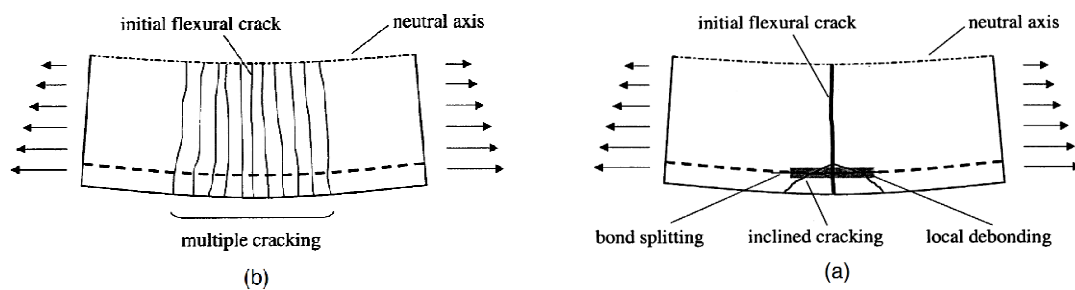
شکل ۳-۹: وضعیت سطح مشترک پس از تسلیم آرماتور فولادی در R/C و R/ECC

۳-۸ رفتار المان‌های سازه‌ای از ECC:

۳-۸-۱ المان‌های خمشی:

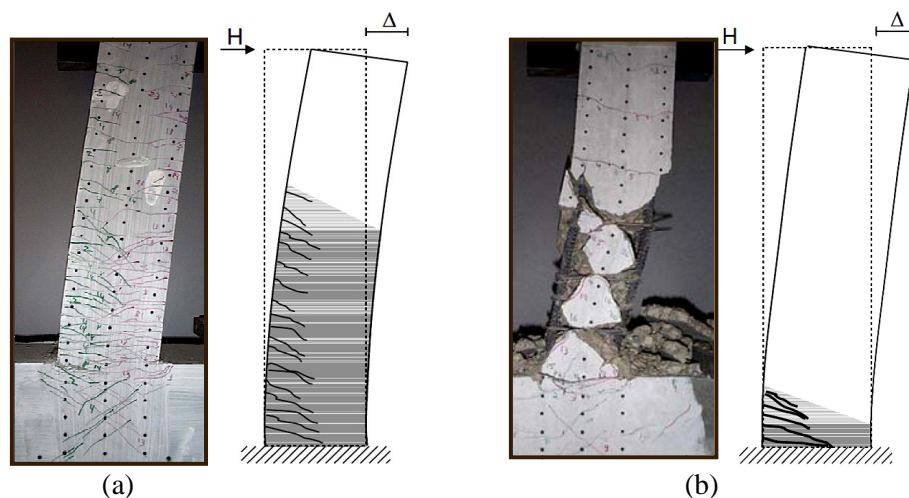
تغییر شکل سازگار ECC و آرماتور طولی مستقیماً جز کششی را تقویت کرده و به‌طور غیرمستقیم تغییر شکل غیرالاستیک اطراف المان خمشی را پایدار می‌سازد. در المان‌های خمشی R/C شکل‌پذیری غیرمستقیم به مقدار و ترکیب آرماتورهای مایل وابسته است. خصوصاً در شرایط بارگذاری متناوب که ساختار ترد بتن منبع اصلی خرابی به‌شمار می‌رود. در عین حال پدیده‌هایی مانند گسیختگی پیوند، ورقه‌ورقه شدن بتن، کاهش مقاومت خمشی ناشی از شکست برشی، شکست فشاری ترد، و پیچش آرماتور طولی نیز به خرابی المان کمک می‌کنند.

نتیجتاً در نواحی بحرانی همچون مفصل پلاستیک ممکن است با تراکم آرماتور مواجه شویم. پاسخ خمشی غیرالاستیک R/ECC را می‌توان با دو مرحله پیش و پس از گذار به مرحله ترک‌خوردگی متعدد توصیف کرد. در هر حال پیش از تسلیح آرماتور رفتار شکل‌پذیر ECC بر پاسخ المان‌های خمشی از طریق توزیع یکپارچه ترک‌خوردگی، کاهش فاصله و میزان بازشدگی ترک‌ها؛ اثر می‌گذارد [۳۹] (شکل ۳-۱۰).



شکل ۳-۱۰: شکل‌گیری ترک خمشی در R/C (a) و R/ECC (b)

پس از تسلیح آرماتور و پیش از تشکیل ترک، انحنای حداکثر در ناحیه مفصل پلاستیک نسبت به R/C کاهش می‌یابد. دلیل این امر کاهش کرنش کششی در آرماتور و تنش فشاری در بتن به واسطه توزیع ترک خوردگی در سرتاسر المان و ورای تسلیم آرماتور طولی است (شکل ۳-۱۱).



شکل ۳-۱۱: تغییر شکل خمشی در R/C (a) و R/ECC (b)

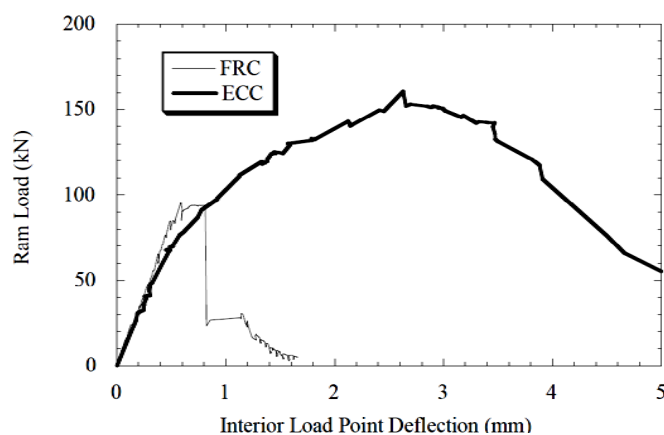
مشابه مکانیزم تغییر شکل در تنش کششی تک‌محوری، توزیع تغییر شکل در خمش نیز به رفتار سخت-شوندگی کرنشی توام ECC و آرماتور مربوط است. بدلیل سازگاری تغییر شکل؛ تنش پیوندی در سطح مشترک و نیروهای جداکننده قابل چشم‌پوشی هستند. در نتیجه، ترک‌های طولی جداکننده ناشی از گسست پیوند سطح مشترک، پوسته پوسته شدن کاور و تغییرات فشار رخ نخواهند داد. در دومین مرحله، در سطح معینی از خمش، ظرفیت کرنشی در تیکه گاه تیر طره به حداکثر رسیده و با موضعی شدن ترک تمرکز تغییر شکل در این ناحیه مشاهده می‌شود. در این مرحله سازگاری تغییر شکل از

رفته، تنش‌های پیوندی سطح مشترک آغاز و رفتار R/ECC مشابه رفتار بتن مسلح معمولی می‌شود. در سرتاسر مراحل دوگانه، ECC در برابر انواع شکست نابهنگام^۱ مقاومت می‌کند [۳۸].

۲-۸-۳ المان‌های برشی:

۱-۲-۸-۳ المان‌های ECC در برش:

شکست برشی عموماً در سازه‌های بتنی ترد است. از آنجا که شکست برشی اغلب ناشی ترک‌های کششی قطری است، پیش‌بینی می‌شود المان‌های ECC شکل‌پذیری مطلوبی را در برش نشان دهند. برای نشان دادن رفتار برشی ECC از آزمایش تیر Ohno استفاده می‌شود [۳۰]. (شکل ۳-۱۲).



شکل ۳-۱۲: منحنی بارضربه‌ای- تغییر مکان آزمایش تیر Ohno برای ECC و FRC

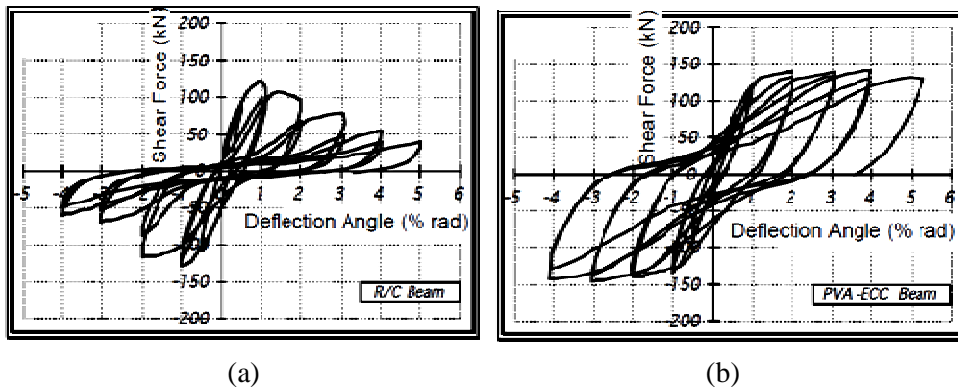
در المان ECC پس از رسیدن به مقاومت اولین ترک، با افزایش تغییر مکان مقدار بار ضربه‌ای هم افزایش می‌یابد و باز هم نمونه رفتار شبه سخت‌شوندگی کرنشی را از خود نشان می‌دهد. در این حالت ترک‌های متعدد مایل با عرض کمتر از 0.1 mm حتی تا بار نهایی، شکل می‌گیرند. در مقابل، در تیر FRC اندکی پس از شکل‌گیری نخستین ترک، با افزایش بار دهانه ترک باز شده و در تنش و

^۱ Premature Failure

کرنشی معادل 3.03 MPa و 0.6% می‌شکند. این در حالی است که این مقادیر برای تیر ECC 5.09 MPa و 2.6 % می‌باشند [۳۰]. پاسخ شکل‌پذیر ECC در مقابل برش پیشنهاد کاربرد آن را در سازه‌هایی که بارگذاری شدید برشی در آنها دیده می‌شود همانند بدنه پل‌های بتنی، عناصر بتنی متصل به تکیه‌گاه فولادی و نواحی تجمع آرماتور برشی؛ مطرح می‌سازد.

۳-۸-۲-۲ المان‌های مسلح ECC در برش:

فوکویاما^۱ آزمایشاتی را بر المان‌های برشی تیر Ohno برای R/C و R/ECC تحت بارگذاری معکوس متناوب انجام داده است که نتایج آن به صورت منحنی‌های هیستریزیس در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است [۳۷]. همانگونه که در شکل مشهود است حلقه‌های هیستریک برای R/ECC دارای ثبات و جذب انرژی بالاتری به نسبت R/C می‌باشند.

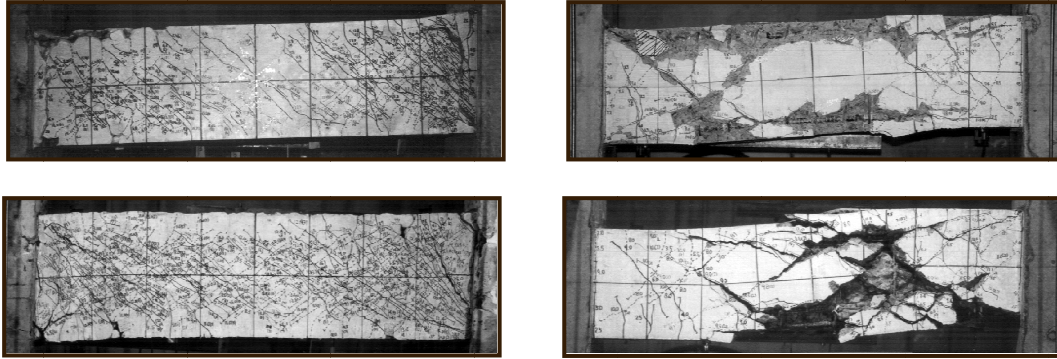


شکل ۳-۱۳: منحنی هیستریزیس آزمایش تیر Ohno برای (a) R/C و (b) R/ECC

نمونه R/C دچار گسیختگی پیوند میان لایه‌ای، پوسته‌پوسته شدن کاور و ترک‌خوردگی‌های عمیق مایل می‌شوند. در مقابل، عنصر برشی R/ECC صدمه‌ای به مراتب کمتر دیده، گسستگی پیوند یا پوسته‌پوسته شدن کاور دیده نمی‌شود و ریزترک‌ها تا 5% زاویه خمش همچنان به تحمل بار ادامه

^۱ Fokuyama

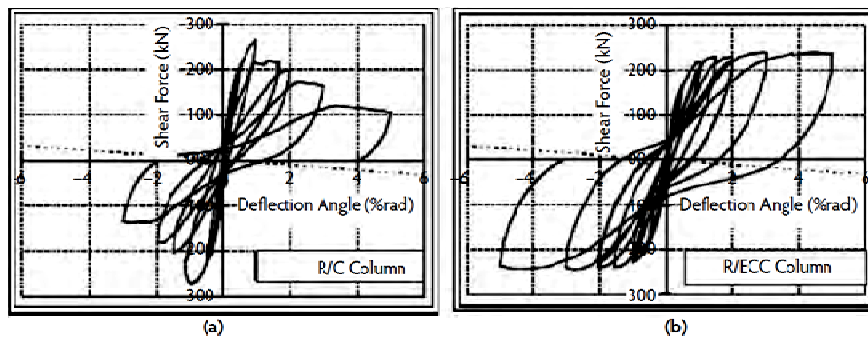
می‌دهند [۳۷]. در واقع ظرفیت برشی یک تیر R/ECC را می‌توان از برهم‌نهی توان ماتریس و آرماتور برشی و محوری با توجه به تغییر شکل سازگار آنها حتی پس از تسلیم فولاد تخمین زد. (شکل ۳-۱۴)



شکل ۳-۱۴: الگوی خرابی در تیر برشی Ohno برای R/C(a) و R/ECC(b)

۳-۸-۳ المان‌های ستونی:

فوکویاما آزمایشاتی را بر روی ستون‌های R/C و R/ECC تحت بارگذاری معکوس متناوب انجام داده است. این ستون‌ها تحت لنگرهای نامتقارن بارگذاری شدند. نیروی محوری اعمالی بر ستون، 20% مقاومت فشاری بدون لحاظ اثر آرماتور در نظر گرفته شده است. نتایج این آزمایشات به صورت منحنی‌های هیستریزس در شکل ۳-۱۵ نمایش داده شده است [۳۷].



شکل ۳-۱۵: منحنی هیستریزس آزمایش ستون برای R/ECC و R/C

همانگونه که در شکل مشهود است؛ ستون‌های R/ECC به نسبت R/C از پایداری و جذب انرژی بالایی برخوردارند. ترک‌های بزرگ ناشی از گسیختگی پیوند در ستون R/C ناشی از برش و بدون تسلیح آرماتورهای طولی دیده می‌شود. در نتیجه نیروی مقاوم برشی در منحنی نیروی برشی-زاویه خمشی؛ با افزایش زاویه خمشی کاهش می‌یابد. در سوی دیگر، در ستون R/ECC گسیختگی پیوند یا برشی دیده نشده و تا پایان با شکل‌گیری ریزترک‌های متعدد رفتاری شکل‌پذیر را نشان می‌دهد.

۳-۸-۴ المان‌های اتصال تیر به ستون:

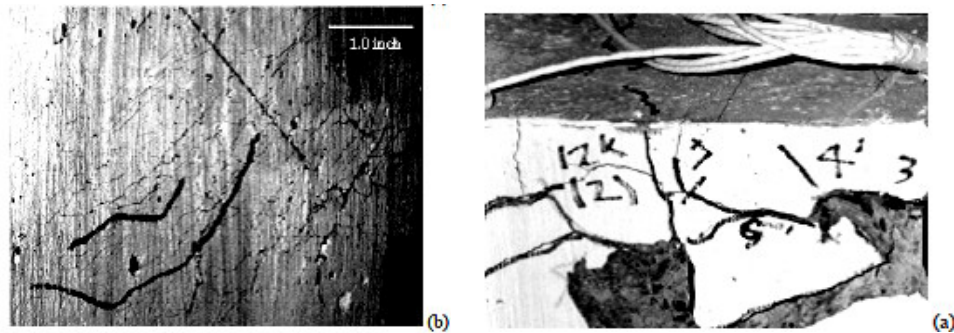
در طراحی لرزه‌ای ملزومات کارآمدی سیستم سازه‌ای را می‌توان بر حسب مینیمم نسبت شکل‌پذیری، تعداد سیکل‌های بارگذاری، توالی کاربرد سیکل‌های بارگذاری و کاهش مقاومت مجاز در پایان بارگذاری تعیین کرد. براین اساس توجه به نکات زیر در طراحی اتصالات تیر به ستون ضروری است:

- رفتار مفصل پلاستیک تحت تنش برشی بالا
 - عدم تراکم آرماتورهای مایل در برش
 - حفظ یکپارچگی بتن تحت بار واژگونی
 - محصورشدن بتن تخریب شده در محل مفصل
- علی‌رغم برخی نتایج امیدوارکننده FRCs نمی‌توان با بتن معمولی به این کارایی‌ها دست یافت. کارایی مطلوب در محل مفصل را نمی‌توان مستقیماً به خواص مواد نسبت داد. در عین حال، می‌توان انتظار داشت که خواص زیر در بتن برای تشکیل مفصل پلاستیک می‌توانند مفید باشند:
- ظرفیت کرنش فشاری بالا برای احتراز از عدم یکپارچگی در بار ضربه‌ای.
 - مقاومت کششی اولین ترک‌خوردگی پایین به منظور شروع خرابی از مفصل پلاستیک.
 - مقاومت برشی و پوسته‌پوسته شدن بالا برای جلوگیری از شکست‌های قطری.

- ارتقا مکانیزم‌های افزایشده مصرف کننده انرژی.

آقای Li آزمایشاتی را برای بررسی رفتار ECC در محل اتصال تیر به ستون انجام داد. برای این منظور از ترکیب ستون قوی- تیرضعیف و بارگذاری جانبی در نمونه‌های PC^۱ و PC/ECC (که در آن تنها در ناحیه مفصل پلاستیک از ECC استفاده شده) کمک گرفت. همانگونه که در شکل ۳-۱۶ نمایش داده شده، الگوی ترک خوردگی آشکارا میان این دو نمونه متفاوت است [۳۱].

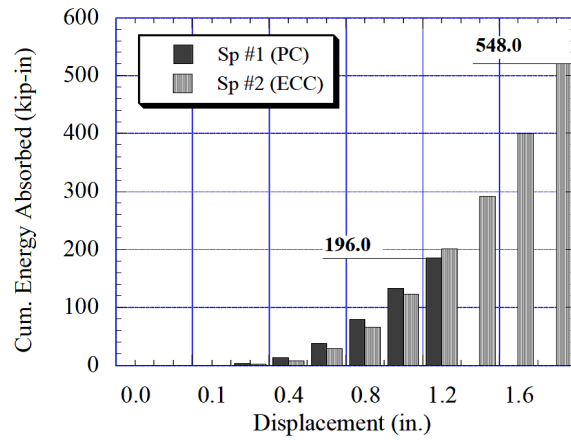
برای PC/ECC در محل مفصل پلاستیک ترک خوردگی به مراتب بیشتر نسبت به ناحیه مشابه در PC یا سراسر نمونه مشاهده می‌شود. همچنین در PC در محل مفصل پلاستیک پوشش بتن کلاً از بین رفته است. این در حالی است که در نمونه PC/ECC بر خلاف PC که دچار شکست قطری برشی شده؛ شکل ترک خوردگی بیشتر به صورت مایل و در راستای عمودی است.



شکل ۳-۱۶: شکست نهایی در محل مفصل پلاستیک برای (a) PC و (b) PC/ECC

شکل ۳-۱۷ مقادیر انرژی جذب شده برای دو نمونه را نشان می‌دهد. تا تغییر مکان 1.2 inch رفتار دو نمونه تقریباً مشابه است اما از این تغییر مکان به بعد نمونه PC/ECC در حدود 2.8 برابر جذب انرژی را نسبت به PC نشان داده است [۳۱].

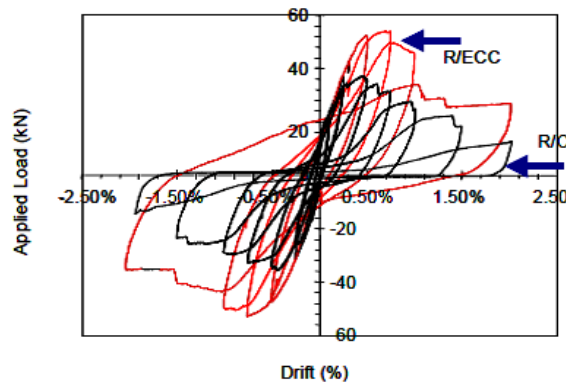
^۱ Plain Concrete (PC)



شکل ۳-۱۷: مقادیر انرژی جذب شده در PC و ECC/PC

۳-۸-۵ المان‌های پانل دیواری:

کسرنر و بیلینگتون^۱ آزمایشاتی را برای بررسی رفتار ECC در پانل‌های دیواری تحت بارگذاری متناوب معکوس انجام دادند. نتایج آزمایشات تأیید کننده رفتار پایدارتر، ظرفیت باربری بالاتر و جذب انرژی بیشتر نمونه‌های R/ECC نسبت به R/C می‌باشد (شکل ۳-۱۸)



شکل ۳-۱۸: تنظیمات و نتایج آزمایش پانل دیواری

۳-۹ نگاه دقیق بر پاسخ المان‌های R/ECC:

نتایج آزمایشات بر المان‌های سازه‌ای R/ECC که به طور خلاصه در بخش پیشین ذکر شد، ویژگی‌های مشترکی از جمله افزایش باربری، ظرفیت تغییرشکل، جذب انرژی و پایداری حلقه

^۱ Kenser & Billington

هیستریزیس را به نمایش گذاشته است. به منظور کاربرد سازه‌ای از این المان‌ها نکات زیر ارائه می‌شوند.

۳-۹-۱ پتانسیل کاهش یا حذف آرماتورهای برشی:

بدلیل شکل‌گیری ترک‌های مویی متعدد و تاخیر در موضعی‌سازی شکست، شکل‌پذیری مورد نیاز در المان‌های R/ECC را می‌توان بدون هیچ‌گونه آرماتور برشی متعارفی بدست آورد. این نکته در المان‌های خمشی و اتصالات تیر به ستون؛ جایی که خاموت‌های برشی کاملاً حذف می‌شوند؛ به بهترین شکل نمایش داده می‌شود [۳۷].

۳-۹-۲ تُلرانس خرابی:

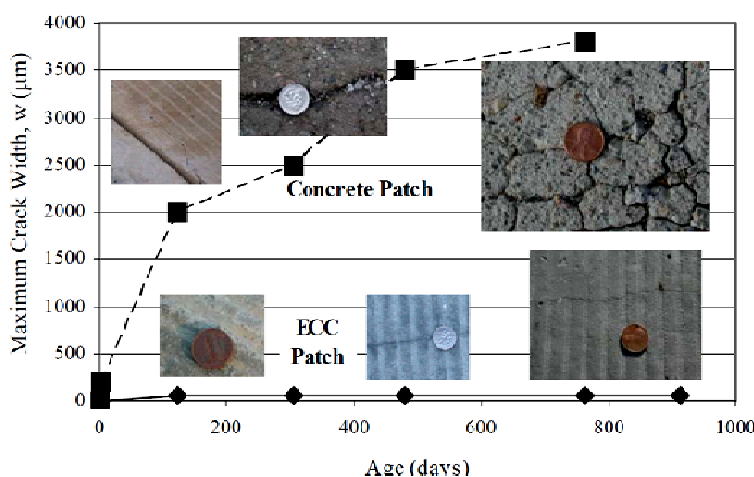
تُلرانس خرابی سنج‌های از مقاومت باقی‌مانده مصالح یا سازه پس از وقوع خرابی به شمار می‌رود. تُلرانس خرابی در ECC از این واقعیت که شکست یا ترک‌های واقعی به نفع تسلیم پلاستیک ECC به صورت ترک‌ها مویی متعدد از بین می‌رود؛ ناشی می‌شود. در واقع این ترک‌ها به‌عنوان ترک‌هایی واقعی تلقی نمی‌شوند و افزایش بار در خلال آنها و حین سخت‌شوندگی کرنشی ECC تحمل شده و منجر به حذف بسیاری از خرابی‌ها همانند شکست‌های برشی در المان‌های R/ECC می‌شوند. در این عناصر صلبیت برشی و بار حداکثر هر سیکل، به دلیل تُلرانس خرابی بهتر R/ECC به نسبت R/C بهبود می‌یابد. پس از بارگذاری المان و مشاهده نخستین ترک، علی‌رغم پایین بودن مدول الاستیک ECC نسبت به بتن، صلبیت سازه‌ای برابر یا حتی بالاتر (بدلیل قابلیت بالای ECC در ادامه به مشارکت در حمل بار با آرماتور فولادی، تا زمانی بسیار بعدتر از شکل‌گیری نخستین ترک) در عناصر R/ECC می‌توان انتظار داشت [۴۱].

۳-۹-۳ سازگاری تغییر شکل میان ECC و آرماتور:

در المان‌های R/ECC هم آرماتور فولادی و هم ECC به‌عنوان مواد الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شوند که قادر به تحمل تغییر شکل بالایی هستند. در نتیجه، این دو ماده حین تسلیم در تغییر شکل سازگارند. تغییر شکل سازگار یعنی هیچ لنگی برشی^۱ میان فولاد و ماتریس وجود نداشته و تنش برشی اعمالی بر آرماتور در سطح مشترک بسیار پایین است. در نتیجه این تنش پایین میان فولاد و ماتریس می‌تواند مستقیماً از طریق پلبندهی الیاف حتی پس از ریزترک خوردگی به ماتریس انتقال یابد [۳۸].

۴-۹-۳ کنترل عرض ترک و حذف آرماتور کنترل ترک:

یکی از مشاهدات معمول در آزمایشات المان‌های سازهای R/ECC وجود ترک‌هایی با عرض بسیار کوچک و در واقع خودکنترلی^۲ بر ترک است. با اینکه حضور آرماتور فولادی عرض ترک را محدودتر می‌کند، اما ECC می‌تواند به آسانی ترک‌هایی با عرض کمتر از 100 میکرومتر که به آرماتور فولادی وابسته نیستند؛ را داشته باشند [۳۷]. این عرض ترک کوچک جهت پایداری و تعیین اینکه یک ساختار پس از بارگذاری زیاد نیازمند تعمیر هست یا خیر، نقشی حیاتی ایفا کند (شکل ۳-۱۹)



شکل ۳-۱۹: ماکزیمم عرض ترک در طول زمان (بتن معمولی پس از 1000 روز تعمیر شده است)

^۱ Shear Lag

^۲ Self Controlle

۳-۹-۵ تبدیل شکل پذیری مصالح به مقاومت سازه:

در طراحی سازه‌های بتن‌آرمه معمولی مهم‌ترین پارامتر، مقاومت فشاری بتن است. اساساً، مصالح با مقاومت بالاتر زمینه دستیابی به مقاومت سازه‌ای بالاست. این مفهوم تنها زمانی درست است که مشخصات مقاومتی مصالح به شیوه‌ای درست شکست را مدیریت کند؛ با این حال اگر شکست کششی رخ دهد، مصالح با مقاومت بالا ضرورتاً معنای استحکام سازه را تامین نمی‌کند.

در مقابل، مصالحی با چقرمگی بالا و در نهایت شکل‌پذیر همانند ECC می‌توانند به مقاومت سازه‌ای بالاتر بیانجامند. مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیل عددی پانل دیواری ساخته شده از ECC مقاومت سازه‌ای سه‌برابر نسبت به FRC را، علی‌رغم استحکام کششی و فشاری یکسان از خود نشان می‌دهد [۳۷].

۳-۹-۶ حفاظت از FRP در مقاوم‌سازی:

استفاده از FRP در المان‌های سازه‌ای R/C اغلب بابت شکست پیش از موعد FRP پس از ترک‌های ترد بتن؛ بخصوص در بارگذاری فشاری و متناوب با دشواری همراه است. این شکست FRP در R/ECC بدلیل عدم ایجاد صفحات شکست عمده و حفظ پوشش بتنی حتی تا حد غیرالاستیک روی نمی‌دهند. نتایج آزمایشگاهی تیرهای R/ECC تقویت شده با FRP، بهبود فوق‌العاده‌ای را در عملکرد خمشی، شکل‌پذیری، قابلیت حمل بار، مقاومت برشی و کنترل تخریب (عرض ترک و پوسته شدن) آشکار می‌سازد که از تیر بتن با مقاومت بالا در همان ترکیب‌بندی آرماتور بهتر است [۴۲].

۳-۱۰-۱ دوام ECC والمان‌های سازه‌ای:

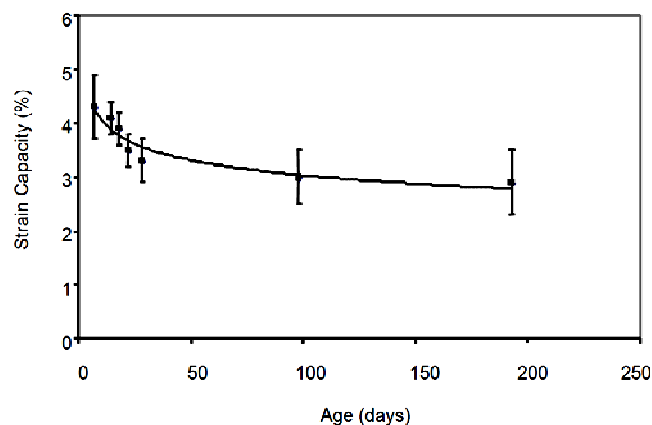
۳-۱۰-۱-۱ دوام مصالح و المان‌ها:

در ارائه یک ماده جدید برای ساخت و ساز، نتایج کوتاه‌مدت صرفاً در اثبات قابل‌قبول بودن آن کافی نیست، بلکه کارایی درازمدت اگرچه سخت بدست می‌آید، به‌خصوص برای یک ماده نسبتاً نو ارزشمندترین خصیصه است. ارزشمندترین خصیصه ECC در شکل‌پذیری کششی برتر آن نهفته است، که زمینه کاربرد آن در سازه‌هایی با تغییرشکل بزرگ را فراهم می‌کند. این یعنی سازه باید قابل استفاده و تعمیرشونده باقی بماند حتی اگر ماده سخت شوندگی کرنشی کششی همراه با ریزترک‌های متعدد را تحمل کند. به همین دلیل، دوام ECC باید در وضعیت ترک‌خورده و تغییرشکل‌یافته بررسی شود. یعنی نمونه ECC باید بارگذاری مقدماتی را تحمل کند تا سطوح کرنشی را تغییر دهد و تخریب مبتنی بر ریزترک‌ها عمداً افزایش یابد [۳۷].

۳-۱۰-۲ دوام ECC در شرایط آب‌وهوایی مختلف:

۳-۱۰-۲-۱ ظرفیت کرنش کششی درازمدت:

برای اینکه یک مصالح ساختمانی ساخت و ساز را بتوان حقیقتاً ماندگار لحاظ کرد، خواص مکانیکی‌اش نباید طی زمان نزول یابد و به مینیمم شاخص‌های طراحی برسد. با توجه به پروسه آب‌کشی دائم مواد سیمانی و تعادل خواص ماتریس سیمانی، الیاف و لایه میانی ECC ظرفیت کرنش آن با گذشت زمان حین عمل‌آوردن تکامل می‌یابد. این امر در شکل ۳-۲۰ به صورت نمودار ظرفیت کرنشی-طول عمر به خوبی نمایان است [۴۳].

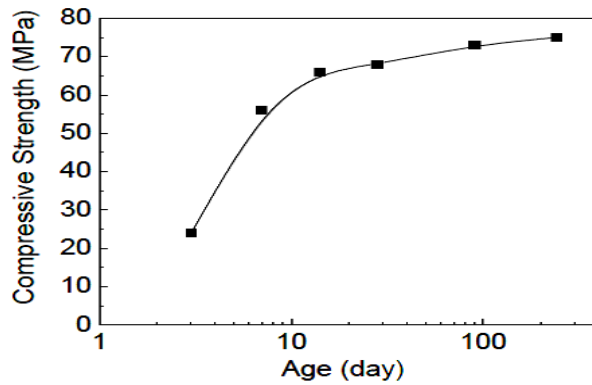


شکل ۳-۲۰: ظرفیت کرنشی - طول عمر ECC پس از قالب‌ریزی

تقریباً دو روز پس از قالب‌ریزی که تعادل بهینه میان خواص ماتریس، الیاف، و لایه میانی ایجاد شد، ظرفیت کرنشی به دست می‌آید. با ادامه هیدراسیون سیمان روند فزاینده چقرمگی ماتریس به کاهش شکل‌پذیری می‌انجامد. در نهایت ECC به ظرفیت کرنش بلندمدت ثابتی معادل 3% می‌رسد که بسیار بالاتر از مقدار مورد نیاز در بسیاری از سازه‌ها است در حالیمه که کرنش اولیه 5% می‌باشد [۴۳].

۳-۱۰-۲-۲ مقاومت فشاری درازمدت:

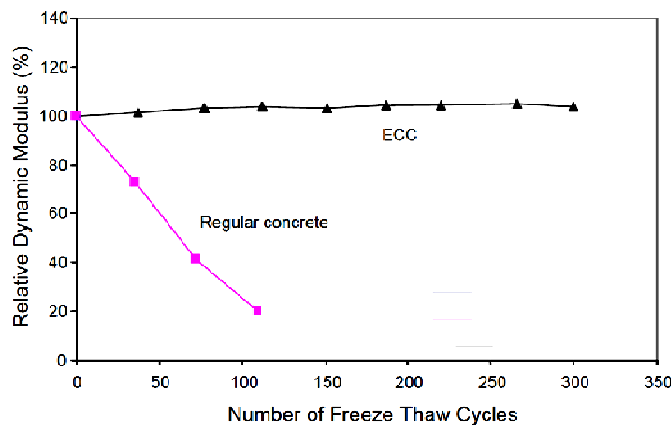
نمودار مقاومت فشاری-طول عمر ECC را می‌توان شبیه به منحنی مقاومت فشاری در بتن نرمال دانست؛ با این حال، از آنجا که روند صعودی یکنواختی ندارد، مقدار بلندمدت آن را برای اهداف طراحی باید مورد استفاده قرار داد. برای ساده شدن می‌توان 90% مقاومت فشاری 28 روزه را بعنوان مقاومت فشاری طراحی قلمداد کرد (شکل ۳-۲۱)



شکل ۳-۲۱: مقاومت فشاری - طول عمر ECC

۳-۱۰-۲-۳ دوام در ذوب و یخزدگی^۱:

با توجه به شکل ۳-۲۲، نتایج آزمایشات انجماد و ذوب‌شدگی برای نمونه‌های بدون هوا نشان می‌دهند که پس از ۱۱۰ چرخه، نمونه‌های بتنی به شدت از بین می‌روند. اما تمامی نمونه‌های ECC تا ۳۰۰ سیکل دوام آوردند بی‌آنکه مدول دینامیکی آنها نزول یابد. بر این اساس نسبت کارایی به فاکتور ماندگاری ۱۰ برای بتن و ۱۰۰ برای ECC به دست می‌آید [۴۴].



شکل ۳-۲۲: مدول دینامیکی در آزمایشات انجماد و یخزدگی برای بتن معمولی و ECC

۳-۱۰-۲-۴ دوام در شرایط گرمسیری:

برای بررسی تاثیرات محیط، آزمایش غوطه‌وری در آب داغ بر روی الیاف منفرد، الیاف مدفون در ماتریس انجام می‌شود. نتایج نشان‌دهنده تغییرات اندک در خواص الیاف همچون مقاومت، مدول

^۱ Frizzing & Thawing

الاستیسیته و قابلیت ازدیاد طول رخ است. با این وجود، ظرفیت کرنشی ECC از 4.5% به 2.75% نشان می‌دهد [۳۷].

۳-۱۰-۲-۵ دوام در معرض یون کلرید:

وقتی ECC در معرض شرایطی محیطی با تمرکز یون کلر بالا قرار بگیرد همانند سایر کامپوزیت‌ها دچار تغییر و خرابی می‌شود. آزمایشات نشان می‌دهند این شرایط، ECC ظرفیت کرنشی کششی را تا بیش از 3% حفظ می‌کند، علی‌رغم اینکه عرض متوسط ترک از 40 میکرومتر به 100 میکرومتر افزایش و استحکام کششی نیز حدود 10% کاهش می‌یابد [۴۵].

۳-۱۰-۲-۶ دوام در معرض یخ‌زدایی با نمک:

نتایج آزمایشات بارگذاری در سیکل‌های انجماد و آب‌شدگی در حضور نمک یخ‌زدا بر روی ECC نشان می‌دهند پس از 50 سیکل؛ درجه شرایط سطحی و جرم کل باقیمانده در محدوده قابل قبولی قرار دارد. نمونه‌ها کاهش اندکی در شکل‌پذیری را نشان داده اما ظرفیت کرنشی کششی بیش از 3% را داشتند. همچنین ریزترک‌ها به‌خاطر بارگذاری مکانیکی در حضور محلول نمکی بهبود یافته و به صلبیت ابتدایی نزدیک شدند. این نتایج تایید می‌کند که ECC چه بی‌ترک و چه با ریزترک، علی‌رغم قرارگرفتن در معرض سیکل‌های انجماد و دوب‌شدگی در حضور نمک یخ‌زدا با دوام باقی می‌ماند [۴۶].

۳-۱۰-۳ دوام R/ECC:

کاربرد ECC به جای بتن معمولی در سازه‌های بتن‌آرمه دارای شرایط زیر است [۳۷]:

- تغییر خواص انتقالی در کاور بتن و تاخیر تماس عوامل مهاجم با آرماتورهای فولادی به واسطه کنترل عرض ترک در ECC

- تغییر ماهیت خوردگی فولاد بدلیل ریزترکها و مقاومت در برابر پوسته پوسته شدن کاور .

این دو تغییر منجر به بهبود چشمگیری در دوام سازه‌های R/ECC بدلیل تاخیر در فاز اول خوردگی فولاد و کاهش سرعت گسترش خوردگی می شود.

۳-۱۱ طبقه بندی اهداف کاربرد:

بسیار مهم است که رابطه‌ای میان خواص ECC و کاربردهای سازه آن برقرار کنیم. تا کنون، مزیت و کاربردهای متعددی پیشنهاد شده اند که را در جدول ۳-۶ خلاصه شده است.

جدول ۳-۶: کاربرد ECC براساس مشخصات و واکنش سازه‌ای

		پاسخ سازه‌ای	پایداری سازه‌ای	
مشخصات مصالح	هندسه ترک	عرض ترک بسیار ریز	کنترل تراوش، خودترمیمی ترک	
		ترک‌های مویی متعدد	عدم خوردگی موضعی آرماتور	
	پاسخ مصالح	مقاومت در برابر پوسته پوسته شدن، تاب‌زدایی در سازه‌های ترمیمی	ترمیم شکل پذیری	
		ظرفیت کرنش بالا	تفرانس خرابی بالا، جذب انرژی بالا، سازگاری تغییر شکل با آرماتور فولادی، شکل پذیری سازه‌ای، قابلیت کاربرد FRP، کاهش یا حذف آرماتور برشی	کمترین نیاز به ترمیم پس از بارگذاری
		رفتار سخت شونده‌گی کرنشی	حاشیه اطمینان و مشخصات بارز	
		مقاومت بالا	مقاومت بالادر سازه‌های سبک، توزیع تنش میان فولاد و بتن	
		مقاومت خستگی بالا		عمر طولانی در بارگذاری متناوب

۳-۱۱-۱ تاسیسات زیربنایی امن:

مهمترین سازه‌هایی که در این گروه قرار می‌گیرند، گروهی از تاسیسات زیربنایی هستند که امکان بازرسی، دسترسی و ترمیم آنها دشوار و یا نگهدارنده و انتقال‌دهنده مواد سمی می‌باشند. با توجه به نتایج آزمایشات R/ECC به دلیل جذب انرژی و شکل‌پذیری بالا می‌توان به کارایی آن در تاسیسات زیرزمینی تحت زلزله‌ها شدید ایمان داشت.

۳-۱۱-۲ تاسیسات زیر بنایی امن تحت شرایط محیطی شدید:

یکی از کاربردها در این مقوله که بیش از همه مورد بررسی قرار گرفته، ترمیم زیرساخت‌ها با استفاده از ECC است. این ترمیم‌ها عبارتند از ترمیم سدها (ژاپن)، بدنه زیرین پل‌ها (ژاپن)، خطوط فاضلاب (کره)، پوشش داخلی تونل (سوئیس) و بدنه بتنی پل (ایالات متحده). به طور کلی ECC می‌تواند جلوی تورق پیش از موعد یا پوسته‌پوسته پوشش را در سیستم ترمیمی ECC/PC را بگیرد و عمر خدمت‌رسانی قطعه را افزایش دهد. با توجه به مقاومت بالا و عرض ترک‌های ریز ECC می‌تواند بعنوان یک پوشش عالی در نواحی ساحلی و سازه‌های دریایی به کار رود [۳۷].

۳-۱۱-۳ قابلیت تولید تاسیسات زیربنایی:

خواص ویژه و مراحل پرداخت انعطاف‌پذیر ECC می‌توان منجر به قابلیت تولید ساخت و ساز پیشرفته شود. یکی از مستقیم‌ترین این روش‌ها، حذف آرماتور برشی در سازه‌های مقاوم در برابر زمین‌لرزه است. همچنین در بسیاری از کاربردهای تعمیراتی یا ساخت بدنه تونل، استفاده از بتن‌پاشی می‌تواند فرآیند ساخت و ساز را تسریع کند. به‌طور مشابه، روزن‌رانی نیز می‌تواند شیوه‌ای پیوسته از ساخت

محصولات ECC با کیفیت بالا و زایدات اندک را فراهم آورد. خود متراکم بودن ECC، نیاز به قالب-بندی افقی یا لوله‌های پر شده بتنی را از بین برده و کاهش چشمگیری در هزینه پدید می‌آورد.

۳-۱۲ ECC خود ترمیم‌گر:

اصطلاح کامپوزیت خود ترمیم‌گر به مصالح یا سیستم‌هایی اطلاق می‌شوند که بتوانند به خودی خود در مقابل خرابی‌های پیش آمده و بدون کمک شخص خارجی ترمیم شوند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند ترک‌های داخل مواد سیمانی قابلیت بستن خویش را با توجه به کاهش هیدراسیون در طی زمان را داشته و چه بسا در موارد حاد، این ترک‌ها کاملاً بسته شده‌اند. همان طور که می‌دانیم حالت ترک پایا با عرض ترک‌هایی حدود 20 میکرومتر، شکل‌پذیری و ظرفیت کرنش و استحکام بالا از مشخصات منحصر بفرد ECC به‌شمار می‌آیند. این مشخصات ECC به همراه وجود خاکستر بادی، زمینه پیدایش یک کامپوزیت بسیار مناسب را برای خود ترمیم بودن پدید می‌آورد [۴۷]. مکانیسم برخورد با خرابی در این کامپوزیت به شرح زیر است:

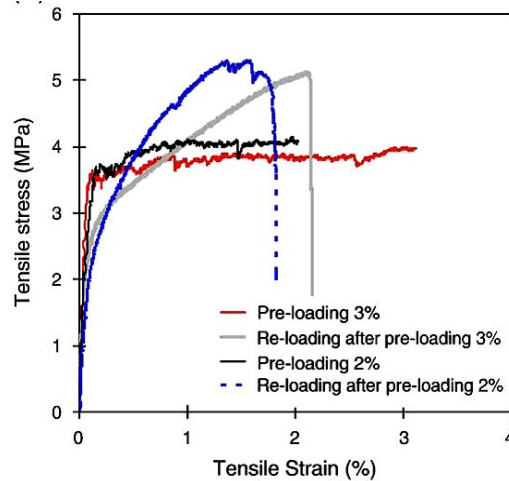
قرار گرفتن نمونه تحت الگوهای تر و خشک شدن متوالی (تداعی کننده روزهای بارانی-آفتابی) منجر به فعال‌سازی خاکستربادی می‌شود. خاکستربادی با Ca(OH)_2 حاصل از هیدراسیون سیمان واکنش داده و ژل C-S-H تولید می‌کند. این ژل، ریزترک‌ها را پوشانده و ECC رفتار خود ترمیم‌کنندگی را نشان می‌دهد [۴۸]. نتایج آزمایشات انجام شده در این راستا می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- با کنترل عرض ترک در کمتر از $150 \mu\text{m}$ می‌توان به درصد قابل قبولی از خود ترمیمی دست

یافت که این درصد در حضور ترک با عرض کمتر از $50 \mu\text{m}$ به 100 می‌رسد.

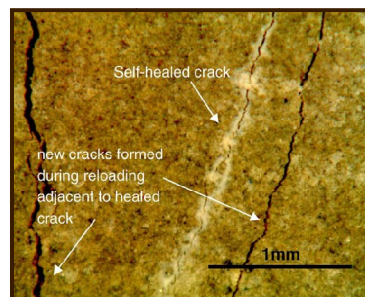
- نمونه هایی که قبلاً در معرض کرنش 2-3 درصد قرار گرفته اند، پس از بارگذاری مجدد قادر به تحمل کرنشی در حدود 1.8- 3.1% بوده که نشان دهنده ترمیمی بین 90% تا 100 است

(شکل ۳-۲۳)



شکل ۳-۲۳: نمودار تنش - کرنش ECC قبل و بعد از خودترمیمی

- شروع ترک خوردگی ناشی از بارگذاری مجدد در مکانی غیر از ترک های ترمیم شده نشان دهنده درصد بالای ترمیم و افزایش مقاومت ترک پس از تکمیل ترمیم است (شکل ۳-۲۴).



شکل ۳-۲۴: ترک خوردگی جدید حین بارگذاری دوباره نمونه

همچنین جایگزینی خاکستر بادی با بخشی از سیمان منجر به دستیابی به نتایج زیر می شود [۴۸]:

- افزایش مقاومت فشاری نمونه پس از ۲۸ روز

- افزایش درصد سیمان هیدراته نمونه پس از ۲۸ روز

- کاهش خاصیت موئینگی نمونه پس از ۲۸ روز

۳-۱۳ هزینه تولید ECC:

هزینه اضافی ECC نسبت به بتن نرمال به دلیل استفاده از الیاف و همچنین بالا رفتن درصد سیمان است. به همین دلیل بهینه‌سازی کامپوزیت برای استفاده از حجم کمتر الیاف بسیار مهم است. الیاف پلیمری مثل PVA در مقایسه با الیاف فولادی که در بسیاری از FRCs استفاده می‌شوند، در واحد جرم گرانتر هستند. با این وجود، الیاف پلیمری چگالی کمتری در حدود 0.88 فولاد داشته و این حجم الیاف و نه جرم آنها است که کارایی کامپوزیت سیمانی را تعیین می‌کند. جایگزینی سیمان با محصولات فرعی صنعتی مثل پوزولان خاکستر بادی نیز می‌تواند هزینه ECC را کاهش دهد. در نهایت، هزینه ECC در مقایسه با دیگر مواد ساخت و سازی با کارایی بالا مثل ملات پلیمری (که هم-اکنون برای تعمیر تاسیسات زیربنایی به کار می‌رود) بسیار کمتر است [۴۹].

در تحلیل نهایی، صرفه اقتصاد ECC را باید مبتنی بر آنالیز هزینه/سوددهی بررسی کرد. فواید بالقوه استفاده از ECC در بخش‌های پیشین مورد بحث قرار گرفت. هزینه طول عمر یک سازه نه تنها هزینه مصالح اولیه بلکه شامل هزینه ساخت و ساز (کار و سرعت)، تعمیر و نگهداری نیز می‌شود.

با کاهش یا حذف آرماتور برشی، ساختن زیرساخت‌ها با ECC سودآور خواهد بود زیرا هم مقدار فولاد و هم میزان کار مورد نیاز در محل ساخت را کاهش می‌دهد و هم فرآیند ساخت و ساز را سرعت می‌بخشد. همچنین استفاده از ECC طول عمر خدمت تاسیسات زیربنایی را گسترش داده و در عین حال هزینه ترمیم و نگهداری را کاهش بخشد. تحلیلی کامل را باید در مورد هزینه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی و منافع آن انجام شود. این برآوردهای چرخه حیات انشعباتی پراهمیت را در تطبیق گسترده ECC و در توسعه این ماده نشان می‌دهند [۴۹].

۳-۱۳ توسعه تکنولوژی ECC:

کامپوزیت جدید ECC ماده نسبتاً جدیدی است که از آزمایشگاه‌ها سربرآورده تا تجهیزات پیش‌ساخته و کارگاه‌های ساخت و ساز را اشغال کند. این کامپوزیت در حال تکامل است و مشخصات نوین و کاربردهای هرچه بیشتر آن هرروزه در حال آشکارشدن است. تا به حال تنها در اندکی از کشورهای پیشرفته از جمله آمریکا، ژاپن، کره، هلند و... موفق به ساخت و کاربرد این کامپوزیت شده‌اند. اما متأسفانه علی‌رغم رفتار منحصر بفرد این بتن؛ تاکنون گزارشی مبنی بر ساخت آن در کشور منتشر نشده است

۳-۱۵ دورنمای ECC:

با اینکه در دهه اخیر پیشرفت‌های زیادی در توسعه تکنولوژیک ECC رخ داده است، باید دهه بعد را دهه‌ای جذاب‌تر در گسترش کاربردی آن دانست. با پیشرفت تحقیقات خصایص مطلوب‌تری از ECC را کشف خواهیم کرد که کاربردهای زیرساختی جدیدی را برای این ماده موجب می‌شوند. می‌توان نسل جدیدی از ECC با مزایای فولاد و بتن را پیش‌بینی کرد که دارای چنین خصوصیتی خواهد بود:

- قابلیت طراحی برای دستیابی به کارایی مطلوب و خاص سازه‌ای
- قابلیت پایداری با توجه به ابعاد زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی
- خودترمیم‌گر بودن پس از تخریب
- کارایی چندعملکردی به منظور مرتفع ساختن ملزوماتی و رای ظرفیت سازه‌ای.

نسل جدیدی از سیستم‌های زیربنایی در ارتباط با این ماده ظهور خواهند کرد که یک یا بیشتر از مشخصات زیر را خواهند داشت:

- امن همراه با حداقل نیازمندی به ترمیم پس از قرارگیری در معرض شرایط بارگذاری سخت.

- هوشمند همراه با قابلیت خود سازگار کردن.
- مقیاس بسیار بزرگ اما بدون اشکالات ناشی از وابستگی به اندازه^۱.
- نیاز به ترمیم در حد صفر حتی در شرایط طاقت فرسا.
- قابلیت ساخت با سرعت بالا و زایدات اندک.

^۱ Size Effect

فصل چهارم:

آنالیز میکرومکانیک

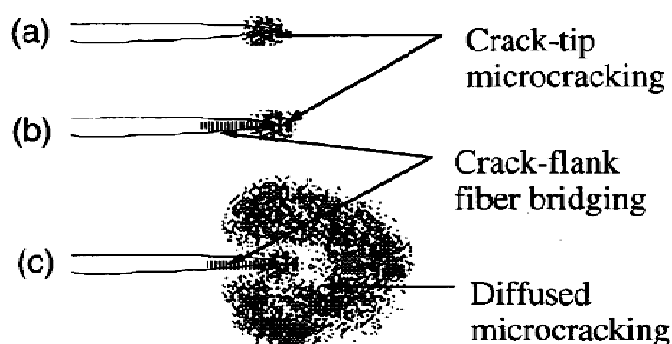
۴-۱ مقدمه:

علم میکرومکانیک بخشی از مکانیک کاربردی است که در سطح ساخت ماده اعمال شده و تعاملات و اندرکنش‌های مکانیکی میان اجزای سازنده را مد نظر قرار می‌دهد. به‌طور ایده‌آل، الگوی میکرومکانیک باید تمام مکانیزم‌های تغییرشکل را در مقیاس‌های میلیمتری، میکرومتری و نانومتری ثبت کند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بنیادی‌ترین خصیصه یک کامپوزیت پایه سیمانی سیمانی تقویت‌شده با الیاف همان ویژگی پل‌زنی الیاف از میان ترک‌های ماتریس و انتقال تنش کششی در میان ترک‌ها است. در واقع میکرومکانیک پیوند میان اجزاء سازنده کامپوزیت (الیاف، ماتریس و سطح مشترک) را با رفتار پل‌زنی الیاف (منحنی σ - ε الیاف مدفون در ماتریس) برقرار می‌سازد. براین اساس برای امکان طراحی ECC لازم است رفتار کامپوزیت‌های پایه سیمانی از لحاظ میکرومکانیکی بررسی شود. بنابراین در این فصل در ابتدا انواع مکانیک شکست مصالح پایه سیمانی بیان می‌شود، سپس با توجه به قوانین میکرومکانیک آنالیز حالت ترک پایا و رفتار کلی کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت با توجه به ملزومات رفتار سخت شونده‌گی کرنشی رفتار ECC توضیح داده می‌شود.

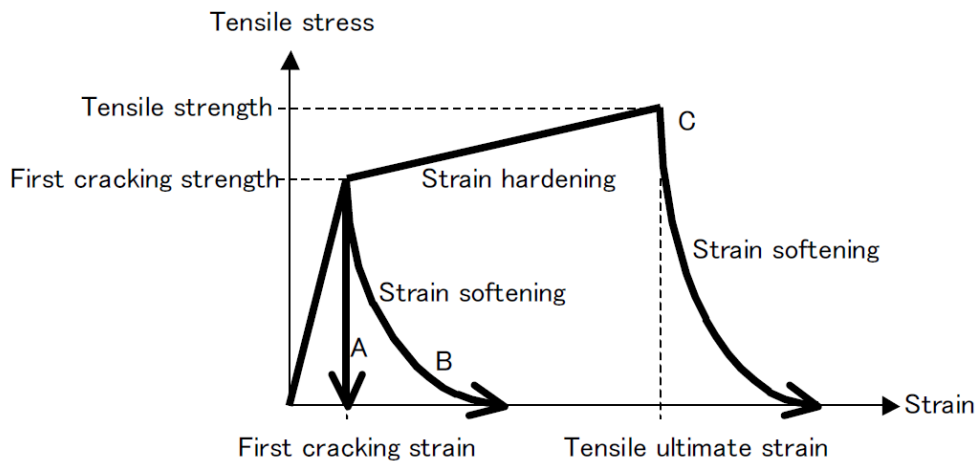
۴-۲ مکانیک شکست مصالح پایه سیمانی:

سه نوع شکست در مصالح پایه سیمانی مشاهده شده است: ترد، شبه-ترد، و نرم [۵۰]. (اشکال ۴-۱ و

(۴-۲)



شکل ۴-۱: منطقه شکست (a) ترد همانند سیمان (b) شبه ترد همانند بتن و (c) شکل‌پذیر همانند ECC



شکل ۲-۴: منحنی تنش-کرنش (a) ترد همانند سیمان (b) شبه ترد همانند بتن و FRC (c) شکل پذیر همانند ECC

۲-۴-۱ شکست ترد:

شکست ترد در ملات‌های سیمانی سخت‌شده مشاهده می‌شود. وجه مشخصه آن ناحیه کوچکی از ریزترک‌ها در مقیاس میلیمتری در رأس ترک است. در این حالت انرژی شکست پائین و حدود 0.01 kJ/m² دارد و منحنی σ - ϵ پس از اولین ترک با شیب بسیار تند به صفر می‌رسد (شکل ۲-۴a) [۵۰].

۲-۴-۲ شکست شبه ترد:

شکست شبه ترد عموماً در بتن و در اغلب سیمان‌های تقویت‌شده با الیاف یا بتن‌های الیافی مشاهده می‌شود. وجه مشخصه آن وجود یک ناحیه دوزنده ترک علاوه بر منطقه ریزترک کوچک در رأس ترک است. عمل پل‌زنی، منجر به جذب انرژی افزوده از خلال ریزدانه در بتن و به‌واسطه پل‌زنی الیاف در FRC می‌شود (شکل ۲-۴b). در این حالت، انرژی شکست در طیفی وسیع، از 0.1 KJ/m² در بتن به چندین KJ/m² در FRC گسترش می‌یابد [۵۱].

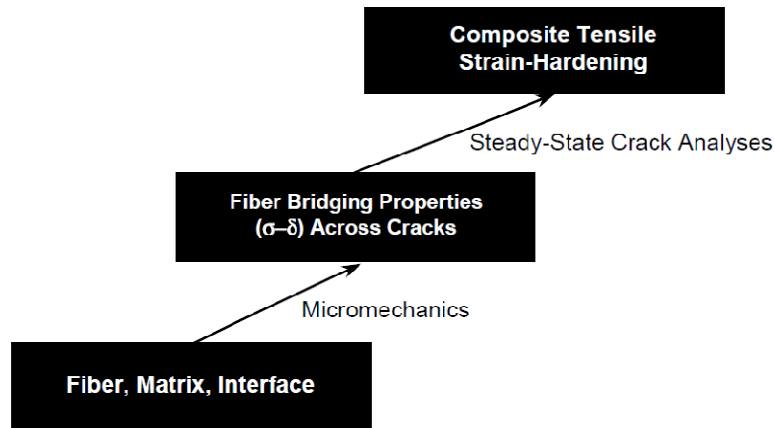
به‌طور متناظر، اندازه ناحیه FPZ از مقیاس میلیمتری به مقیاس سانتیمتری افزایش می‌یابد. منحنی σ - ϵ می‌تواند دارای ناحیه‌ای کوچک و غیرخطی نزدیک اوج بارگذاری با رفتار نرم‌شوندگی چشم‌گیر پس از آن باشد (شکل ۲-۴b).

۳-۲-۴ شکست شکل پذیر:

وجه مشخصه این نوع شکست توسعه ناحیه ریزترک افزون بر ناحیه دوزنده ترک مشاهده شده در شکست شبه ترد است. بعد واقعی این ناحیه خرابی غیرالاستیک تا بیش از 500 سانتی متر مربع مشاهده شده و به جذب انرژی غیرالاستیک گسترده خارج از سطح شکست منجر می شود (شکل ۲-۴c). کل انرژی شکستی که در پل زنی الیاف مصرف و نیز در تغییر شکل غیرالاستیک ماتریس در خارج صفحه شکست جذب می شود، تا 24 KJ/m^2 اندازه گیری شده است [۵۱]. در این حالت منحنی $\sigma-\varepsilon$ پیش از نقطه اوج دارای ناحیه غیر خطی سخت شونده کرنشی و پس از آن نرم شونده می باشد.

۳-۴ میکرو مکانیک:

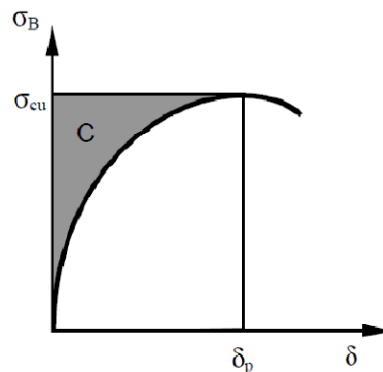
علم میکرو مکانیک بخشی از مکانیک کاربردی است که در سطح ساخت ماده اعمال شده و تعاملات و اندرکنش های مکانیکی میان الیاف، ماتریس و سطح مشترک ماتریس-الیاف را مد نظر قرار می دهد. به طور ایده آل، الگوی میکرو مکانیک باید تمام مکانیزم های تغییر شکل را در مقیاس های میلی متری، میکرومتری و نانومتری ثبت کند. با این حال، فرضیات ساده سازانه ای برقرار می شوند تا معادلات الگویی را مهار و شرایط نتیجه گیری را آسان سازد. پژوهش های جامع نشان داده اند که بنیادی ترین خصیصه یک کامپوزیت پایه سیمانی تقویت شده با الیاف همان ویژگی پل زنی الیاف از میان ترک های ماتریس و انتقال تنش کششی از خلال یک ترک، همزمان با بازگشایی آن است. در واقع میکرو مکانیک پیوند میان اجزاء سازنده کامپوزیت یعنی الیاف، ماتریس و سطح مشترک را با رفتار پل زنی الیاف یعنی منحنی $\sigma-\varepsilon$ الیاف مدفون در ماتریس؛ برقرار می سازد [۵۲]. در حالت بالاتر از طریق آنالیز حالت ترک پایا با رفتار کلی کامپوزیت نیز ارتباط برقرار می کند (شکل ۳-۴). در واقع برای دستیابی به طراحی و ساخت ECC ضروری است رفتار آن را از دیدگاه میکرو مکانیک بررسی نمود [۵۳].



شکل ۳-۴: پیوند میان اجزای سازنده کامپوزیت، رفتار پل زنی الیاف و رفتار کلی کامپوزیت از طریق میکرومکانیک و آنالیز ترک پایا

۳-۳-۱-۳-۴ منحنی $\sigma-\delta$:

بعنوان یک قانون اصلی، در بتن الیافی نحوه پل بندی الیاف در ناحیه ترک خورده یکی از مهمترین پارامترها به شمار می آید که عموماً توسط منحنی $\sigma-\delta$ معرفی می گردد. در واقع این منحنی را می توان قانون فنری دانست که رفتار فنرها (الیاف) را در ارتباط با سطح مقابل یک ترک توصیف می کند. این منحنی میانگین تنش کششی منتقل شده توسط الیاف در ناحیه ترک خورده (σ) را در مقابل عرض بازشدگی (δ) در یک نمونه کششی نشان می دهد [۵۴] (شکل ۴-۴).



شکل ۴-۴: منحنی $\sigma-\delta$ و مفهوم انرژی مکمل

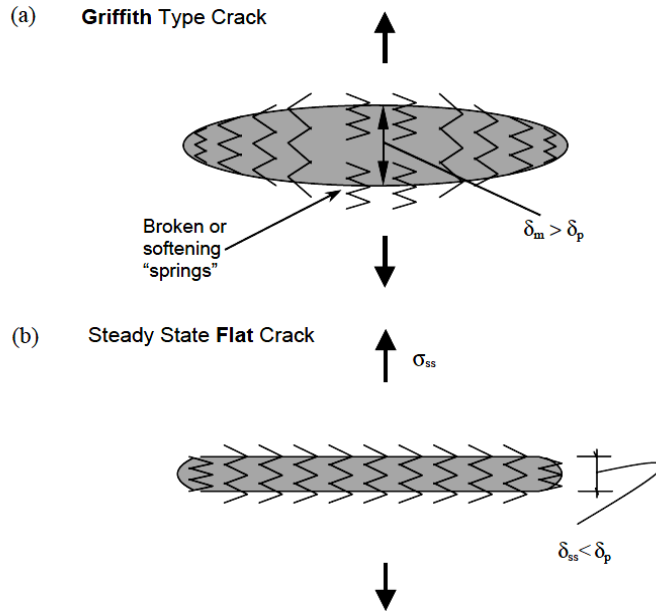
برای دستیابی به رفتاری شکل پذیر، این منحنی بایستی دو معیار مقاومتی و انرژی را تامین سازد. جهت ایجاد پدیده ترک خوردگی متعدد نباید مقاومت ترک خوردگی ماتریس از حداکثر مقدار تنش

پلبندی (σ_{cu}) تجاوز نماید. تامین این معیار تضمین می‌دهد تنش کشش وارده بعد از ترک خوردگی توسط الیاف تحمل شود که به عنوان معیار مقاومتی شناخته می‌شود. بر اساس دومین معیار که بعنوان معیار انرژی شناخته می‌شود؛ لازم است مود گسترش ترک با استفاده از انرژی گسترش ترک کنترل گردد. این حالت با بزرگ یا کوچک بودن انرژی مکمل در منحنی $\sigma-\delta$ (ناحیه C) کنترل می‌شود. چنانچه ناحیه انتقالی ماتریس/الیاف ضعیف باشد، الیاف تحت اثر نیروی کم از ماتریس بیرون کشیده می‌شوند که نتیجه کاهش σ_{cu} است. در حالت دیگر چنانچه ناحیه انتقالی ماتریس/الیاف بسیار قوی باشد، ناحیه ترک خورده توانایی باز شدن را نداشته و شکست در حد پائین δ_p اتفاق می‌افتد [۵۲].

۴-۳-۲ آنالیز حالت ترک پایا:

ایجاد ترک‌های پایا اساس رفتار سخت‌شوندگی را تشکیل می‌دهند. تحلیل‌ها نشان می‌دهند زمانیکه انرژی مکمل در منحنی $\sigma-\delta$ کوچک باشد گسترش ترک خوردگی از نوع گیرفیت می‌باشد. در این حالت تنش در حوزه میانی ترک (δ_m) از حد δ_p فراتر رفته و الیاف در محدوده میانی قادر به باربری بیشتر نمی‌باشند. این امر منجر به بازتر شدن ترک‌ها، رخ دادن نرم‌شوندگی کرنشی و در نهایت امر خرابی می‌گردد. اما زمانیکه انرژی مکمل بیشتر باشد شکل ترک بصورت هموار و مسطح^۱ باقی مانده و میزان باز شدگی در حوزه میانی از δ_p کمتر می‌باشد [۵۳]. در این حالت ظرفیت تحمل تنش کششی پایدار باقی می‌ماند. با پایدار ماندن ظرفیت باربری در این ترک و انتقال بار کششی توسط الیاف به ماتریس مجاور، ماتریس در محل دیگری دچار ترک خوردگی می‌شود و لذا ترک خوردگی متعدد بدون افت میزان ظرفیت باربری کششی در کامپوزیت حاصل خواهد شد (شکل ۴-۵). بنابراین در تعیین اینکه آیا یک کامپوزیت تحت بارگذاری همچون ECC دچار سخت‌شوندگی کرنشی می‌شود یا همانند FRC دچار نرم‌شوندگی کرنشی شده، شکل منحنی $\sigma-\delta$ نقش اساسی را ایفا می‌کند.

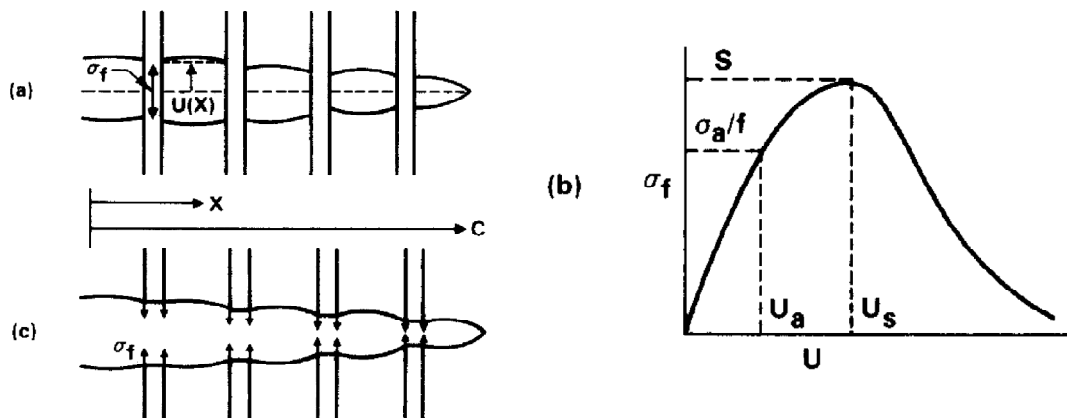
^۱ Flat



شکل ۴-۵: مدل ترک خوردگی در حالت (a) گیریفیث (b) هموار و مسطح

۳-۳-۴ حل حالت ترک پایا برای ماتریس ترک خورده:

میزان بازشدگی ترک وابسته به میزان کش آمدگی^۱ الیاف است. این کش آمدگی در واقع ارتباطی مستقیم بین تنش موجود در الیاف σ_f و تغییر مکان ترک باز شده U برقرار می سازد. شکل ۴-۶ ارتباط میان مکانیسم پلندی الیاف و ماتریس را نشان می دهد [۵۵].



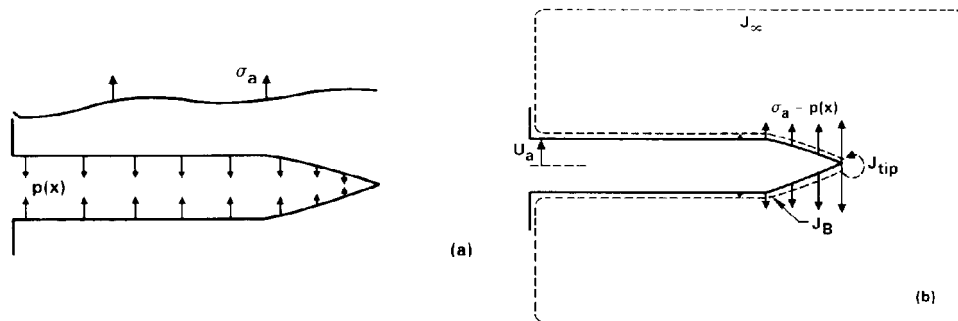
شکل ۴-۶: (a) پلندی الیاف در یک ترک باز شده (b) منحنی شماتیک تنش-جابجایی الیاف

^۱ Stretching

تنش σ_f الیاف تولید نیروی p را در سطوح لبه ترک را می‌کند. این نیرو در نوک لبه ترک برابر صفر است و به تدریج با بازشدگی آن تا دهانه ترک افزایش می‌یابد و از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$P(u) = f \cdot \sigma_f \quad (1-4)$$

که پارامتر f نشاندهنده حجم الیاف در سطح ترک مورد نظر است. مارشال و کوکس^۱ برای آنالیز ترک‌های پایا از روش انتگرال J استفاده کردند. همانگونه که در شکل ۴-۷ نشان داده شده است چنانچه جسم تحت تنش σ_a قرار گیرد تنش در اطراف لبه ترک مساوی $\sigma_a - P(U)$ می‌شود که این مقدار در نوک ترک حداکثر بوده و به تدریج با پیشروی ترک از آن کاسته شده و به صفر می‌رسد [۵۵]:



شکل ۴-۷: (a) توزیع تنش در لبه ترک (b) انتگرال J در حالت ترک پایا

با توجه به شکل در این حالت مسیر بسته انتگرال از سه جز J_{∞} ، J_B و J_{tip} تشکیل شده است. در این حالت J_{∞} شامل سطح تنش صفر بوده و مقداری برابر صفر دارد. مقادیر J_B و J_{tip} با توجه به مطالعات انجام شده به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$J_B = -2 \int_0^{u_a} \sigma(u) du \quad (2-4)$$

$$J_{tip} = K^2(1-\nu^2)/E \quad (3-4)$$

^۱ Marshall and Cox

و در نهایت همانگونه که در فصل قبل اشاره گردید در حالت ترک پایا خواهیم داشت:

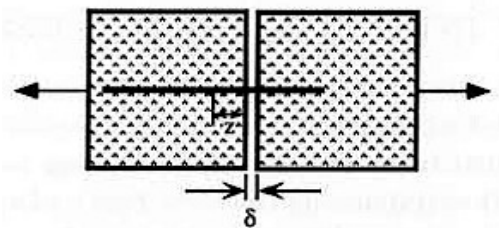
$$\frac{K_m^2}{E_m} < \sigma_{Peak} \cdot \delta_{Peak} - \int_0^{\delta_{ss}} \sigma(\delta) d\delta \equiv J'_b \quad (4-4)$$

این معادله نشان می‌دهد به منظور ایجاد حالت ترک پایا؛ انرژی ذخیره شده در تنش پل زنی حداکثر الیاف (σ_{peak}) و بازشدگی متناظر ترک (δ_{peak})؛ با انرژی مصرف شده در کشیدگی الاستیک و بیرون کشیدگی الیاف باید تطبیق داشته باشد. یعنی در نوک ترک طاقت ماتریس باید از J_{tip} فراتر رود.

۴-۳-۴ میکرومکانیک الیاف:

۱-۴-۳-۴ میکرومکانیک پل زنی تک رشته الیاف صاف:

آنالیز لنگی برشی معمولاً تنش پل زنی در تک رشته الیاف σ_s را به بازشدگی دهانه ترک δ مرتبط می‌سازد [۵۲] (شکل ۴-۸)



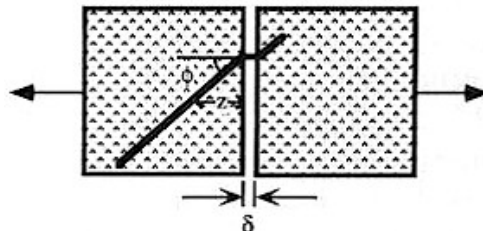
شکل ۴-۸: بیرون کشیدن تک رشته الیاف

$$\sigma_s(\delta, z) = fnc(\delta, z, \text{fiber properties, interface properties}) \quad (5.4)$$

در این حالت تنش دربرگیرنده خواص الیاف شامل مدول، استحکام کششی، طول و قطر الیاف و خواص سطح مشترک شامل استحکام چسبندگی یا اصطکاک مکانیکی است. متغیر z نمایانگر فاصله ابتدایی (در $\delta=0$) بین مرکز جرم الیاف و سطح ترک در ماتریس است.

۲-۴-۳-۴ میکرومکانیک پل زنی تک رشته الیاف مایل:

در کامپوزیت‌ها، الیاف اغلب به صورت زاویه‌دار نسبت به ترک ماتریس پل می‌زنند. در این حالت تنش پل زنی با پیش فرض‌های گوناگون رفتار الیاف و ماتریس تحلیل می‌شود [۵۲] (شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹: بیرون کشیدن تک رشته الیاف مورب

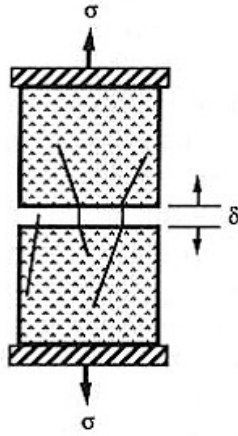
در الیاف انعطاف‌پذیر با حجم بالا (عموماً الیاف پلیمری) رایج است، فاکتور نگهدارنده^۱ بر فشار اعمالی الیاف بر ماتریس در انتهای نوک الیاف، تاثیر می‌گذارد. در الیاف با رفتار الاستیک-پلاستیک (الیاف فولادی) تسلیم پلاستیک موضعی الیاف در انتهای نوک الیاف رخ می‌دهد. در الیاف با رفتار ترد الاستیک (الیاف کربن یا شیشه) شکست الیاف در خمش فزاینده یا ورقه‌ورقه‌شدن موضعی ماتریس ترد زیر الیاف ناشی از آزادسازی تنش پل‌بندی الیاف، رخ می‌دهد [۵۲]. تمام این اندرکنش‌ها میان الیاف/ماتریس با توجه به بیرون کشیده‌شدن الیاف مورب، تنش پل زنی را تغییر خواهد داد و داریم:

$$\sigma_s(\delta, \varphi, z) = fnc(\delta, \varphi, z, \text{fiber properties, interface properties, fiber/matrix interaction}) \quad (۴-۶)$$

۳-۴-۳-۴ میکرومکانیک پل زنی توزیع حجمی از الیاف:

در نهایت در کامپوزیت کلی که با حجمی از الیاف مواجه هستیم، طول و جهت‌گیری تصادفی الیاف مقدار بار حمل‌شونده توسط الیاف پل‌زن را در طول ترک ماتریس تعیین می‌کنند [۵۲] (شکل ۴-۱۰)

^۱ Snubbing Factor



شکل ۴-۱۰: توزیع حجم الیاف در کامپوزیت

در این حالت تابع چگالی احتمال $P(z)$ و $P(\varphi)$ این تاثیرات را توصیف می‌کنند. توزیع حجم الیاف با مرکز جرمی که میان z و $z+dz$ قرار گرفته و با زاویه میان φ و $\varphi+d\varphi$ توسط $V_f P(\varphi) P(z) dz d\varphi$ بدست می‌آیند، جایی که V_f مجموع کسر حجمی الیاف در کامپوزیت است [۵۲].

۴-۳-۵ رابطه σ - δ در کامپوزیت:

تاثیر توزیع الیاف پلزن در ماتریس و اندرکنش آنها باید رابطه $\sigma(\delta)$ کامپوزیت را برآورده سازد:

$$\sigma(\delta) = V_f \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \int_{z=0}^{L_f \cos \varphi} \sigma_s(\delta, \varphi, z) P(\varphi) P(z) dz d\varphi \quad (۷-۴)$$

حد z بالای انتگرال گیری آن الیافی را تضمین می‌کند که واقعاً ترک را پل می‌زنند. در واقع الیاف دور از صفحه ترک یا الیاف نزدیک با زاویه منفرجه که نمی‌توانند از ترک عبور کنند؛ در عمل پلزنی کامپوزیت حساب نمی‌شوند. با فرض توزیع تصادفی سه‌بعدی یکپارچه الیاف و جایگذاری $P(z) = 2/L_f$ ، و $P(\varphi) = \sin \varphi$ ، رابطه $\sigma(\delta)$ به شکل زیر نتیجه می‌شود [۵۲]:

$$\sigma(\delta) \begin{cases} [4\tau(1+\eta) E_f \delta/d_f]^{0.5} e^{f\theta} & \delta \leq \delta_{\text{peak}} \\ [4\tau(1+\delta p - \delta)/d_f]^{0.5} e^{f\theta} & \delta_{\text{peak}} \leq \delta \leq L_f/2 \\ 0 & L_f/2 \leq \delta \end{cases} \quad (۸-۷)$$

با قرار دادن $\eta = (V_f E_f) / (V_m E_m)$ ، در z و زاویه φ ؛ همچنین جایگذاری $l = L_f / 2 - z / \cos\varphi$ و $\delta_p = 4\tau L^2 / [E_f d_f (1 + \eta)]$ (بازشدگی دهانه ترکی که در آن یک رشته الیاف با طول L پل زده)

رابطه نهایی ۹-۴ به دست می‌آید [۳۱]:

$$\sigma(\delta) \begin{cases} \sigma_{\text{peak}} [2(\delta / \delta_{\text{Peak}})^{0.5} - (\delta / \delta_{\text{Peak}})] & \delta \leq \delta_{\text{peak}} \\ \sigma_{\text{peak}} [1 - 2\delta / L_f]^{0.5} & \delta_{\text{peak}} \leq \delta \leq L_f/2 \\ 0 & L_f/2 \leq \delta \end{cases} \quad (9-4)$$

$$\sigma_{\text{peak}} = g\tau V_f L_f / (2d_f) \quad (10-4)$$

$$\delta_0 = \tau L_f^2 / [E_f d_f (1 + \eta)] \quad (11-4)$$

$$g = 2(1 + e^{f\pi/2}) / (4 + f^2) \quad (12-4)$$

در این روابط E_f و V_f ، L_f ، d_f به ترتیب قطر، طول، حجم و مدول الاستیسیته الیاف و V_m و E_m حجم و مدول الاستیسیته ماتریس می‌باشند.

۶-۳-۴ ملزومات رفتار سخت شوندگی کرنشی:

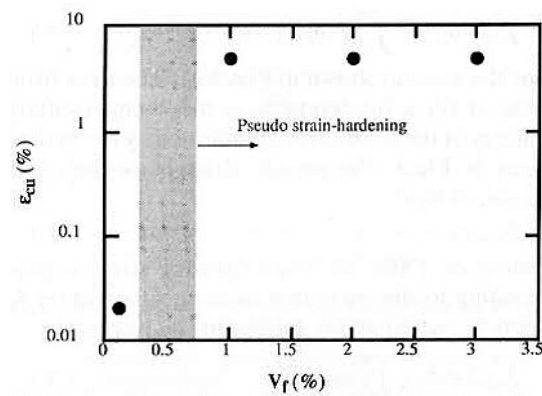
با در نظر گرفتن معادلات ۹-۴ تا ۱۲-۴ در نهایت حجم بحرانی الیاف به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$V_f \geq V_f^{\text{crit}} = \frac{12 J_{\text{tip}}}{g \tau (L_f / d_f) \delta_0} \quad (13-4)$$

این معادله شرط رفتار سخت شوندگی کرنشی را در توزیع حجم بحرانی الیاف V_f^{crit} باز می‌نماید [۵۲]. پارامتر V_f^{crit} دربرگیرنده مشخصات الیاف، ماتریس، سطح مشترک و اندرکنش‌های الیاف/ماتریس بیان می‌شود. برای ساخت کامپوزیتی با رفتار سخت شوندگی کرنشی بهینه بهتر است که با کمترین میزان الیاف یعنی V_f^{crit} کار کنیم. بنابراین J_{tip} پائین، پیوندهای میان سطحی قوی، اصطکاک بالا، طول به عرض بالای الیاف، و δ_0 بالا برای دستیابی به رفتار سخت شوندگی کرنشی مناسبند.

۴-۴ کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC):

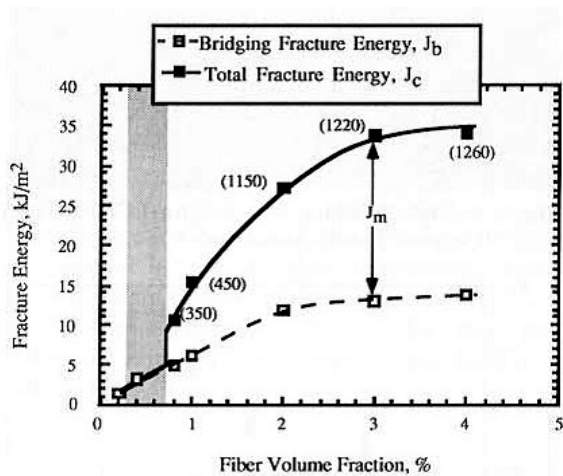
آزمایشات متعدد بر حجم‌های مختلف الیاف در ECC همانگونه که در شکل ۴-۱۱ نمایش داده شده به خوبی تائید کننده معادله ۴-۱۳ برای دستیابی به رفتار سخت‌شوندگی کرنشی است [۵۲].



شکل ۴-۱۱: ظرفیت کرنشی ECC برای حجم گوناگون الیاف. نوار سایه‌خورده نمایانگر V_{crit}^f است.

بنابراین برای ECC حجم بحرانی الیاف در بازه 0.3-0.7% است و برای حجم‌های کمتر از این مقدار کرنش کامپوزیت اساساً با کرنش ملات سیمان یکی خواهد بود. و در مقادیر بالاتر آن؛ ظرفیت کرنشی دو برابر شده و به 6% می‌رسد. در واقع، شکل ۴-۱۰ نشان می‌دهد که حجم الیاف با مقدار بسیار بالاتر از V_{crit}^f به افزایش در ظرفیت کرنشی کامپوزیت نمی‌انجامد. بنابراین به دلایل اقتصادی و تسهیل پرداخت کردن، بهتر است که از حجمی خیلی بالاتری از V_{crit}^f استفاده نشود.

شکل ۴-۱۲ مقادیر انرژی شکست ECC را در سطح آزاد ترک و خارج از آن نمایش می‌دهد. انرژی شکست روی سطح ترک یعنی J_b از سطح زیر نمودار بخش نزولی نمودار تست کششی تک‌محوری تعیین شده است. انرژی شکست خارج از سطح ترک، یعنی J_m از تفاضل کل انرژی شکست (حاصله از تکنیک انتگرال J) از J_b بدست آمده است [۵۲].



شکل ۴-۱۲: انرژی شکست در سطح آزاد ترک و خارج از آن در برابر حجم بحرانی برای ECC

مشاهده می‌شود در حجم الیاف زیر مقدار بحرانی، پارامتر J_m برابر صفر خواهد شد. اما در مقادیر بالاتر، J_m افزایش یافته و به تدریج از انرژی پل زنی الیاف (که در سطح ترک مصرف می‌شود) پیشی می‌گیرد. از این منظر، روشن است که شکست شکل‌پذیر نزدیکی زیادی با شرایط سخت‌شوندگی کرنشی دارد. در واقع J_m را از دل پروسه پیوندزدایی اصطکاکی الیاف آن هم در میان ریزترک‌های خارج از سطح ترک به دست می‌آورند.

فصل پنجم:

فعالیت‌های آزمایشگاهی

۵-۱ مقدمه:

مطابق آنچه در فصول گذشته اشاره شد، ECC یکی از انواع کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف با خصوصیات ویژه و منحصر بفردی از جمله شکل‌پذیری بالا می‌باشد. در این راستا تحقیقات متعددی توسط پژوهشگران در نقاط مختلف جهان جهت شناسایی و بهبود رفتار ECC انجام شده است. اما متأسفانه علی‌رغم رفتار منحصر بفرد این بتن؛ تا بحال در ایران تحقیقاتی برای ساخت آن انجام نشده است. بر این اساس هدف اصلی این پایان‌نامه ساخت این کامپوزیت برای اولین بار در ایران با استفاده از مصالح در دسترس و موجود در نظر گرفته شده است. هدف از این فصل دستیابی به روش ساخت این کامپوزیت با مصالح در دسترس و انجام آزمایشات مختلف برای رسیدن به طرحی بهینه می‌باشد.

۵-۲ مراحل کار آزمایشگاهی:

مراحل کار آزمایشگاهی به شرح زیر می‌باشند:

- جمع‌آوری اطلاعات اولیه در ارتباط با نوع مصالح مصرفی در مقالات
- تهیه مصالح مورد نیاز
- ساخت نمونه‌های مختلف با طرح اختلاط‌های مختلف
- انجام آزمایشات گوناگون بر روی نمونه‌های مختلف از جمله آزمایشات فشاری و خمشی؛ و ثبت مشاهدات

۵-۳ مصالح مصرفی:

همانگونه که در ابتدای پایان‌نامه عنوان گردید؛ به منظور تقویت جنبه کاربردی این تحقیق از مصالح موجود در کشور استفاده شده است (شکل ۵-۱). مشخصات مصالح مصرفی به شرح زیر می‌باشند.



شکل ۵-۱: مصالح مصرفی برای ساخت ECC

۵-۳-۱ سیمان:

انتخاب نوع سیمان مورد استفاده در هر بتنی بخصوص کامپوزیت سیمانی مهندسی شده دارای اهمیت زیادی است. برای یک نوع تیپ سیمان مشخص، محصولات تولید شده توسط کارخانجات مختلف ممکن است خصوصیات متفاوتی داشته باشند. با توجه به طرح اختلاط‌های پیشنهادی در این تحقیق از سیمان تیپ I تولید کارخانه سیمان تهران استفاده شده است (شکل ۵-۲).



شکل ۵-۲: سیمان تیپ I مصرفی برای ساخت ECC

مشخصات این سیمان در جدول ۵-۱ ذکر شده است. قابل ذکر است به منظور بالا بردن کیفیت بتن و از بین بردن گلوله‌های درشت‌دانه‌ای که در اثر وارد آمدن فشار در طی مراحل حمل و انبارکردن ممکن است ایجاد شوند؛ کلیه سیمان‌ها قبل از مصرف از الک شماره 50 رد می‌شوند.

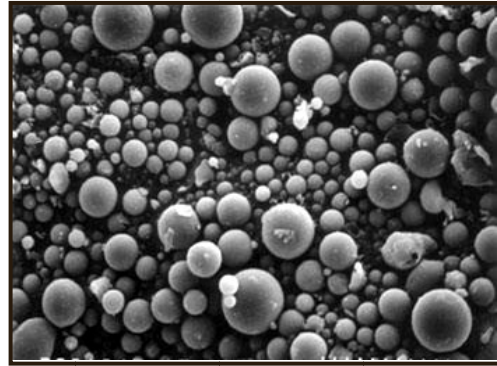
جدول ۵-۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی

Chemical Properties				Physical Properties								
MgO %	L.O.I %	I.R %	Total Alkali %	Specific Surface (cm ² /gr)	Autoclave Expansion	Hardening		Density (gr/cm ³)	Compressive Strength (Kg/cm ²)			
						Primary (min)	final (hr)		3 days	7 days	28 days	
< 5	< 3	< 0.75	< 0.6	2800	0.8	45	6	3.16	120	200	325-525	

۵-۳-۲ خاکستر بادی:

پوزولان‌ها مواد سیلیسی و یا سیلیسی آلومینی هستند که به عنوان یک مکمل سیمان پرتلند معمولی در افزایش خاصیت چسبندگی بتن موثرند. این مواد در حالت معمولی با آب واکنش نمی‌دهند ولی در مجاورت آهک یا سیمان واکنش شیمیایی ایجاد می‌کنند و مقاومت و دوام بتن را در درازمدت افزایش می‌دهند. خاکستر بادی بعنوان یک ماده پوزولانی در طرح اختلاط ECC به کار می‌رود. استفاده از خاکستر بادی عموماً باعث بهبود کارایی بتن شده و با کاهش آب‌انداختگی و جداشدگی؛ پایداری و دوام بتن را افزایش می‌دهد. اثرات خاکستر بادی بستگی زیادی به جایگزینی سیمان با خاکستر بادی در حجم یا وزن مشابه دارد. این ماده پوزولانی باعث بهبود خواص مکانیکی سیمان می‌شود. خاکستر بادی عموماً در کلاس‌های مختلفی ارائه می‌شود که مشهورترین آن کلاس‌های C و F است. در کلاس F کسب مقاومت اولیه در محدوده بسیار زیادی کاهش یافته در مقابل دوام بتن افزایش می‌یابد. در مقابل کاربرد کلاس C منجر به تاخیر در زمان گیرش سیمان می‌شود [24].

در این پایان‌نامه از خاکستر بادی تولید شرکت آبادگران تهران در کلاس C با چگالی 2.15 gr/cm³ استفاده شده است. به منظور از بین بردن گلوله‌های درشت‌دانه احتمالی در خاکستر بادی و افزایش کارایی کامپوزیت قبل از مصرف از الک شماره 100 عبور داده می‌شوند (شکل ۵-۳).



شکل ۳-۵: خاکستریادی کلاس C مصرفی برای ساخت ECC

۳-۳-۵ سنگدانه:

سنگدانه مورد مصرف از نوع ریزدانه و جنس سیلیس می باشد. با توجه به نوع طرح اختلاط ECC و ریزدانه بودن تمامی اجزا سنگدانه‌هایی با قطر 0-300 میکرومتر که در واقع خاک سیلیس می باشند؛ مورد استفاده قرار می گیرند. این سنگدانه‌ها دارای چگالی 2.75 gr/cm^3 بوده و از معدن سیلیس دامغان تهیه شده‌اند.

۳-۳-۵ فوق‌روان‌کننده^۱:

نوع فوق‌روان‌کننده‌ای که در مراجع برای ساخت ECC پیشنهاد می‌شود بر پایه ملامین^۲ یا پلی‌کربوکسیلات^۳ است. پیشنهاد می‌شود که این فوق‌روان‌کننده به صورت محلول در آب و با درصد 20-50 وزنی مورد استفاده قرار بگیرند. بر این اساس از فوق‌روان‌کننده های PCE و M63 محصول شرکت وندشیمی استفاده شده است. همچنین این فوق‌روان‌کننده‌ها به صورت محلول در آب با درصد بهینه 33.3 استفاده می‌شوند. مشخصات کامل این فوق‌روان‌کننده‌ها در پیوست ۱ ذکر شده است.

^۱ Superplasticizer

^۲ Melamine Formaldehyde Sulfonate

^۳ Polycarboxylate

۵-۳-۴-۱ فوق‌روان‌کننده PCE:

فوق‌روان‌کننده PCE نسل جدید فوق‌روان‌کننده است که عموماً در ساخت بتن‌های خودمتراکم به کار می‌رود. با استفاده از مقدار نسبتاً کمی از این فوق‌روان‌کننده به همراه نسبت آب به سیمان پایین کارایی به نحو مطلوبی افزایش پیدا می‌کند. فوق‌روان‌کننده PCE مایعی قهوه‌ای رنگ بر پایه دیسپرسیون پلیمری نمک کربوکسیلیت با وزن مخصوص 1.03 kg/lit است.

۵-۳-۴-۲ فوق‌روان‌کننده M63:

فوق‌روان‌کننده M63؛ فوق‌روان‌کننده و کاهش دهنده مخصوص تولید بتن با کیفیت بالا است. فوق‌روان‌کننده M63 دارای خاصیت دوگانه‌ای است که از یک سو روانی بتن را افزایش داده و از سوی دیگر مقاومت اولیه را افزایش می‌دهد. فوق‌روان‌کننده M63 مایعی قهوه‌ای رنگ با پایه شیمیایی دیسپرسیون پلیمری ملامین سولفونات و وزن مخصوص 1.2 kg/lit می‌باشد که استفاده از آن کارایی بتن را حد زیادی افزایش می‌دهد.

۵-۳-۵ الیاف:

الیاف مورد استفاده در ECC می‌توانند از دو نوع آب‌دوست همانند PVA یا آب‌گریز همانند PE باشند. در این پایان‌نامه از الیاف PVA محصول شرکت Kuralon با نام تجاری REC-15 استفاده شده است (شکل ۵-۴). مشخصات این الیاف در جدول ۵-۲ بیان شده است. مشخصات کامل این الیاف در پیوست ۱ ارائه شده است.



شکل ۵-۴: الیاف پلی وینیل الکل REC-15 مصرفی برای ساخت ECC

جدول ۵-۲: مشخصات الیاف PVA

Type	Length (mm)	Diameter (μm)	Density (gr/cm^3)	Modulus (GPa)	Elongation %	Tenacity (MPa)
REC-15	8	39	1.39	42.8	6	1620

۵-۳-۶ افزودنی قوام آور:

در مصالح پایه سیمانی عموماً از افزودنی های قوام آور^۱ به منظور افزایش همگنی و قوام استفاده می شود. توصیه می شود این افزودنی ها از مشتقات سلولز همانند متیل سلولز^۲، هیدروکسی متیل سلولز^۳، هیدروکسی اتیل سلولز^۴، پروپیل سلولز^۵ و یا کربوکسی متیل سلولز^۶ باشند. این افزودنی ها به صورت محلول در آب و با نسبت وزنی 0.00-0.05 به سیمان مورد استفاده قرار گرفته که در این میان درصد بهینه حدود 0.01 می باشد. همچنین می توان این افزودنی را قبل میکس به فوق روان کننده اضافه نمود. در این پایان نامه از هیدروکسی پروپیل متیل سلولز (HPMC) محصول شرکت کیمیا اکسیر استفاده شده است.

^۱ Thickener

^۲ Methyl Cellulose

^۳ Hydroxymethyl Cellulose

^۴ Hydroxyethyl Cellulose e

^۵ HydroxyPoropyl Cellulose

^۶ Carboxymethyl Cellulose

۴-۵ ساخت نمونه ها:

با توجه به نوع رفتار ECC و نتایج حاصله در فصول قبل؛ چهار طرح اختلاط پایه زیر مبنای انجام کار قرار گرفته است [۳۱ و ۵۶ و ۵۷].

جدول ۳-۵: انواع طرح اختلاط برای ECC (kg/m^3)

	Cement	Water	Fly ash	Sand	Superplasticizer	Fibers
Cast PVA-ECC	941	423.5	141.2	564.6	9.4	26
Mix I	578	319	694	462	17	26
Mix II	570	331	684	455	4.9	26
Mix III	583	298	700	467	19	26

مشاهدات:

- درصد الیاف (2٪ حجمی) در تمام طرح اختلاطها ثابت مانده است.
- اختلاف درصد خاکستربادی به سیمان در Cast ECC مساوی ($\text{FA/C} = 0.15$) و در سایرین ($\text{FA/C} = 1.2$) است.
- اختلاف درصد فوقروان کننده Mix II به مصالح پایه سیمانی ($\text{SP}/(\text{C}+\text{FA})=0.003$) نسبت به سایرین ($\text{Cast ECC} = 0.008$, $\text{Mix I} = 0.013$, $\text{Mix III} = 0.014$) است.

۴-۵-۱ روند کلی اختلاط:

- مخلوط کردن مصالح خشک شامل سیمان، سنگدانه و خاکستربادی
- اضافه کردن درصدی از آب و میکس برای 3 دقیقه
- اضافه کردن HPMC به صورت محلول در آب 1 درصد حجمی و میکس حدود 7 دقیقه
- اضافه کردن فوقروان کننده (محلول در آب 33.3 درصد حجمی) و میکس حدود 8 دقیقه

- اضافه کردن الیاف خیسانده شده در آب و میکس تا زمان دستیابی به مخلوطی همگن

۵-۴-۲ آماده سازی نمونه ها:

در حالت کلی موارد ذکر شده در ASTM-C31 که برای آماده سازی نمونه های بتنی به کار می رود در مورد FRC و به خصوص در مورد ECC قابل کاربرد می باشند [۵۸]. لرزش داخلی و استفاده از میلگرد برای متراکم کردن به دلیل پخش غیریکنواخت الیاف و تغییر راستای تصادفی آنها در ارتباط با بتن الیافی توصیه نمی شود [۵۸]. مناسب ترین روش برای برای متراکم کردن بتن الیافی لرزش خارجی از طریق میز لرزان است. در این پایان نامه برای میکس کردن از دستگاه میکسر ELE و برای متراکم کردن نمونه ها از روش میز لرزان استفاده شده است.

۵-۴-۳ عمل آوری نمونه ها:

در این حالت نیز از روش کلی ASTM-C31 استفاده شده است. نمونه ها پس از 24 ساعت از قالب خارج می شوند و پس از آن در مخزن آب با دمای 20 درجه سانتیگراد به مدت 28 روز عمل آوری می شوند. قابل ذکر است برای جلوگیری از ترک خوردن نمونه های بدون الیاف و ایجاد محیط مرطوب، پس از قالب ریزی نمونه تا زمان قالب برداری با پلاستیک دورپیچ شده است.

۵-۴-۴ جزئیات طرح های مختلف:

با توجه به روند کلی اختلاط و موارد ذکر شده، به منظور دستیابی به طرح بهینه؛ طرح های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته اند که جزئیات و نتایج آنها در پیوست ۲ آورده شده است.

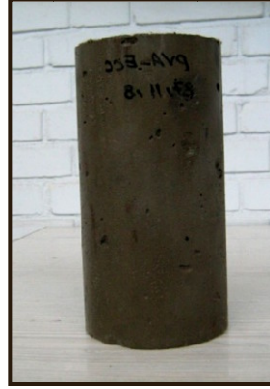
۵-۵ آزمایشات نمونه ها:

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 به‌دست آمده از آزمایشات نیاز به استفاده از روش‌ها و تجهیزات استاندارد برای تعیین خصوصیات یک کامپوزیت سیمانی مسلح به الیاف می‌باشد. کاهش سرعت بارگذاری با افزایش زمان اعمال یک بار افزایشده منجر به مقاومت بیشتر از حالت آزمایش استاندارد می‌گردد. یا چنانچه بار به صورت آنی اعمال شود مقاومت بالاتری ثبت شده و کرنش نظیر گسیختگی کمتر شده که تداعی‌کننده حالت شکننده است. در این بخش توضیحات مختصری در مورد روند انجام آزمایشات مختلف داده می‌شود.

۵-۵-۱ آزمایش مقاومت فشاری:

مقاومت فشاری به عنوان مهمترین معیار جهت تعیین کیفیت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. از نمونه های مکعبی و استوانه ای در ابعاد مختلف برای اندازه گیری مقاومت فشاری بتن استفاده می‌شود. اندازه نمونه ها با توجه به اندازه بزرگترین سنگدانه و مقاومت تخمینی بتن انتخاب می‌شود. همچنین ظرفیت دستگاه آزمایش نیز به عنوان یک عامل محدود کننده در اندازه نمونه ها به شمار می‌رود. در این پژوهش از نمونه های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلیمتری و نمونه های استوانه ای 100×200 میلیمتری استفاده شده است. آزمایش بر اساس ASTM-C39 با کنترل جابجایی^۱ و با سرعت بارگذاری 0.0254 mm/s انجام می‌شود. توضیحات کامل استاندارد ASTM-C39 در پیوست ۳ ذکر شده است (شکل ۵-۵).

^۱ Displacement Control



شکل ۵-۵: قالب و نمونه استوانه ای 100x200 برای آزمایش فشار

۵-۵-۲ آزمایش مقاومت خمشی:

مقاومت خمشی در کامپوزیت های سیمان مسلح به الیاف با آزمایش بارگذاری تیر در نقاط یک سوم دهانه مطابق استاندارد ASTM-C78 یا آزمایش بارگذاری وسط دهانه مطابق استاندارد ASTM-C293 بدست می آید که آزمایش مورد اول دارای مقبولیت بیشتری است.

مقاومت خمشی با توجه به حداکثر بار قابل دستیابی براساس نمودار نیرو-تغییر مکان به دست می آید. در آزمایش خمش، تنش کششی ماکزیمم در تار پائین تیر به وجود آمده که مدول گسیختگی نامیده می شود. چنانچه شکست در دهانه وسطی رخ دهد مدول گسیختگی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (۱-۵)$$

که در آن P حداکثر نیروی وارده ؛ d و b ابعاد مقطع می باشد. چنانچه شکست در خارج از دهانه میانی اتفاق بیافتد و فاصله آن از نقاط یک سوم میانی کمتر از 0.05L باشد نتایج آزمایش معتبر بوده و مدول گسیختگی از رابطه ۵-۲ به دست می آید:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (۲-۵)$$

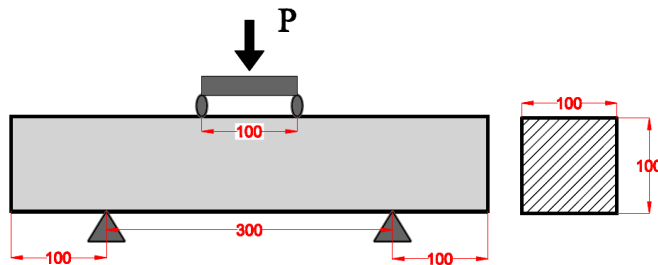
که در آن a فاصله متوسط بین محل ترک و تکیه گاه است. در این پژوهش برای اندازه گیری مقاومت خمشی از ASTM-C78 و تیرهایی با ابعاد $100 \times 100 \times 500$ استفاده شده است (شکل ۵-۶). نحوه بارگذاری تیر در اشکال ۵-۷ و ۵-۸ نمایش داده شده است. جزئیات در پیوست ۳ ذکر شده است.



شکل ۵-۶: قالب و نمونه تیر $100 \times 100 \times 500$ برای آزمایش خمش



شکل ۵-۷: دستگاه یونیورسال جهت انجام آزمایش خمش



شکل ۵-۸: هندسه آزمایش مقاومت خمشی؛ بارگذاری تیر در نقاط یک سوم دهانه

۵-۵-۳ آزمایش اندازه گیری طاقت ماتریس:

برای اندازه گیری میزان مقاوت ماتریس، فاکتور شدت تنش یا همان K_{IC} را برای طرح اختلاط‌های بدون الیاف در نظر می‌گیرند. این مقدار از طریق آزمایش خمشی با بارگذاری در وسط دهانه یا یک سوم دهانه بر روی نمونه‌های تیر فاقدار^۱ و بر اساس استاندارد ASTM-E399 به دست می‌آید. در این پژوهش از تیرهایی با اندازه 100x100x500 و ارتفاع ترک اولیه 45 میلیمتری استفاده شده است.

۵-۵-۴ عکس برداری از الیاف:

در اکثر مقالات که نحوه ساخت ECC را شرح می‌دهند از ماده‌ای پلیمری با نام پارافرمالدئید نام برده می‌شود که در واقع به عنوان اندود^۲ پلیمری الیاف آب‌دوست همانند PVA مورد استفاده قرار می‌گیرد. با اینحال توضیحاتی در ارتباط با درصد این ماده و نحوه عملکرد آن ذکر نشده است. بر این اساس روشی پیشنهادی برای چگونگی افزودن پارافرمالدئید به الیاف PVA در نظر گرفته شد و برای روشن میزان اندود از الیاف در آزمایشگاه آپتیک زمین‌شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود و با بزرگنمایی‌های مختلف عکس برداری شد.

۵-۵-۵ آزمایش انحلال پارافرمالدئید:

با توجه به مطالبی که در بخش قبل اشاره شد به منظور روشن شدن میزان انحلال پارافرمالدئید و انتخاب محلول بهینه با کمک اساتید گروه شیمی در آزمایشگاه شیمی دانشگاه صنعتی شاهرود محلول‌هایی از پارافرمالدئید با درصدهای مختلف حجمی و حلال‌های متفاوت ساخته و عمل خیساندن الیاف در آنها انجام پذیرفت.

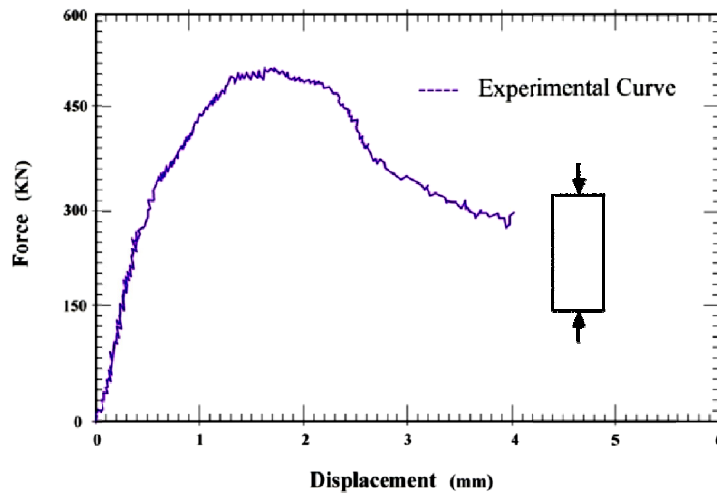
^۱ Notched Beam

^۲ Coat

۵-۶ نتایج آزمایشات:

۵-۶-۱ آزمایش مقاومت فشاری:

نتایج آزمایش مقاومت فشاری به صورت نمودار نیرو-تغییر مکان در شکل ۵-۹ نمایش داده شده است.

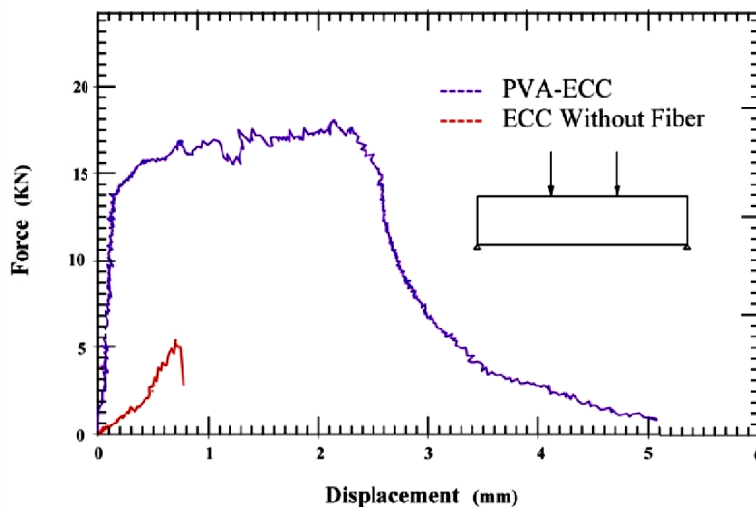


F_{max} (KN)	Δ_m (mm)	σ (Mpa)	ϵ_m (%)
537.1	1.93	68.22	0.965

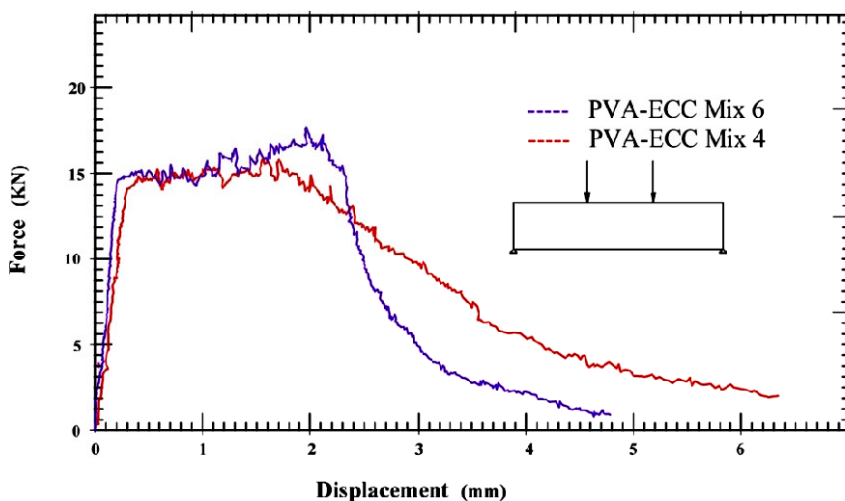
شکل ۵-۹: نتایج آزمایش مقاومت فشاری

۵-۶-۲ آزمایش مقاومت خمشی:

نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای تیرهای 100x100x500 میلیمتری به صورت نمودار نیرو-تغییر مکان در اشکال ۵-۱۰ و ۵-۱۱ نمایش داده شده است. قابل ذکر است تحلیل نتایج به دست آمده و مقایسه آنها با نتایج مقالات در فصول ششم و هفتم به صورت کامل بیان شده است.



شکل ۵-۱۰: نتایج آزمایش مقاومت خمشی برای PVA-ECC , ECC Without Fiber



	F_{max} (KN)	Δ_m (mm)	σ Mpa
Mix 4	20.46	2.03	6.13
Mix 6	18.86	1.44	5.66

شکل ۵-۱۱: نتایج آزمایش مقاومت خمشی برای PVA-ECC Mix 4,6

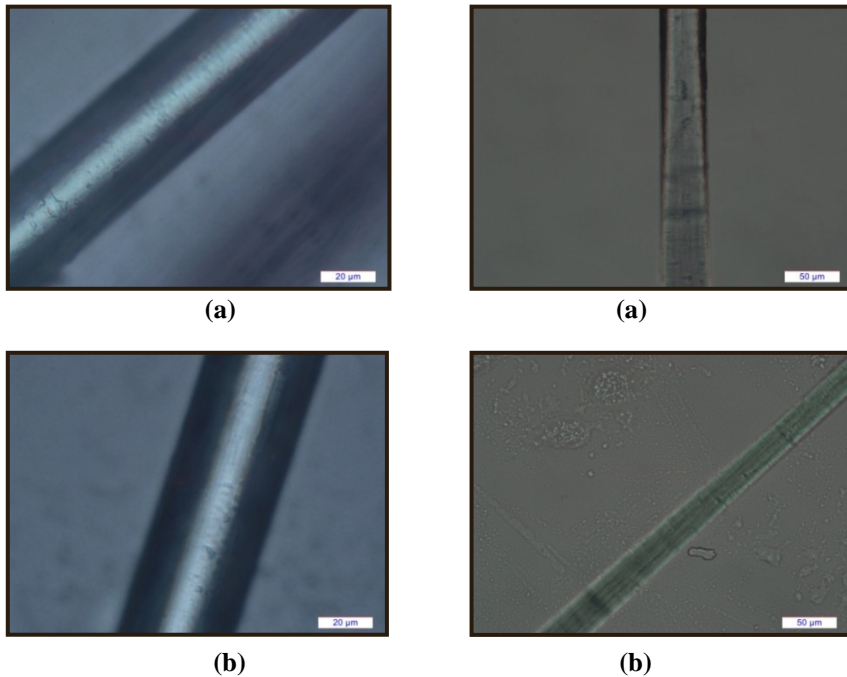
۵-۶-۳ آزمایش اندازه گیری طاقت ماتریس:

بدلیل شکننده بودن بالای ماتریس و درصد انقباض بالای آن امکان انجام آزمایش چقرمگی شکست فراهم نشد. بسیاری از نمونه با نیروی بسیار کمی حتی در حدود 2N که هنگام قالب برداری نمونه به آن وارد می‌شود، شکسته و به دو نیم تقسیم شدند. همچنین نمونه‌های سالم نیز بدلیل بالا بودن

درصد انقباض هنگام عمل‌آوری به دو نیم تقسیم شدند. بنابر این برای تخمین طاقت ماتریس از مقادیر ارائه شده در مقالات و با توجه به طرح اختلاط ماتریس استفاده شده است.

۵-۶-۴ عکس برداری از الیاف:

با توجه به موارد ذکر شده نتایج آزمایش عکس برداری از الیاف در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است. قابل ذکر است که بدلیل دقت پائین نمی توان نتیجه قاطعی در این ارتباط گرفت.



شکل ۵-۱۲: نمونه الیاف پیش از قرارگیری در پارافرمالدئید

۵-۶-۵ آزمایش انحلال پارافرمالدئید:

با توجه به آزمایشات انجام شده بر روی پارافرمالدئید و ساخت محلول هایی با حلال ها و درصدهای مختلف؛ محلول اشباع پارافرمالدئید در آب انتخاب شد. نکته قابل توجه این است که الیاف PVA به صورت تولیدی دارای اندود شیمیایی بوده و نیازی به استفاده از محلول پارافرمالدئید نیست.

فصل ششم:

مدل سازی ECC ساخته شده

Shahrood-ECC

۶-۱ مقدمه:

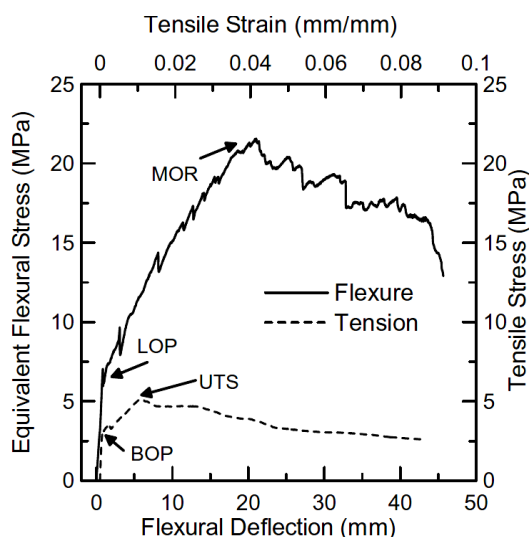
همانگونه که در فصول قبلی ذکر گردید، در سالیان گذشته اقدامات فراوانی در راستای گسترش کامپوزیت‌های سیمانی با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی (SHCCs) انجام شده است. کامپوزیت‌های سیمانی با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی زیر مجموعه‌ای از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف با عملکرد بالا می‌باشند. در واقع شکل‌پذیری؛ بخصوص شکل‌پذیری کششی مهمترین مشخصه در مصالح با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی است. در حالت کلی ظرفیت کرنش کششی SHCCs دربرگیرنده بازه‌ای بزرگ از اعداد در مقابل سایر پارامترهای مکانیکی این مصالح از جمله مقاومت اولین ترک یا ماکزیمم تنش است. بنابراین بیشترین آزمایشات کنترل کیفیت SHCCs منوطاً باید روی ظرفیت کرنش کششی به دلیل اهمیت بسیار زیاد در چگونگی پاسخ سازه و پتانسیل بالای تغییرپذیری آن انجام پذیرد. در این مجموعه کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC) با بالاترین رفتار سخت‌شوندگی کرنشی که از طریق دوختن الیاف، ماتریس و لایه میانی ایجاد می‌شود نمایانگر بیشترین شکل‌پذیری است.

۶-۲ آزمایشات کشش مستقیم و خمشی:

بهترین راه برای نمایش رفتار غیرخطی در FRC استفاده از آزمایشات حلقه بسته و به طور خاص آزمایشات کشش مستقیم (UTT)^۱ و خمش چهارنقطه‌ای (FPBT) است. شکل ۶-۱ نمایانگر منحنی‌های تنش-کرنش در حالت کششی در مقایسه با تنش-تغییر مکان در حالت خمشی برای یک GFRC^۲ است [۵۹].

^۱ Uniaxial Tensile Test

^۲ Glass Fabric Reinforced Composite (GFRC)



شکل ۶-۱ مقایسه نتایج آزمایشات خمش و کشش مستقیم برای یک GFRC

سه پارامتر مهم که پاسخ کششی مصالح را تعیین می‌کنند عبارتند از: مقاومت کششی اولین ترک خوردگی (BOP)^۱، مقاومت کششی نهایی (UTS)^۲ و کرنش کششی نهایی که از آزمایش کشش مستقیم بدست می‌آیند. در مقابل دو پارامتر مهم در تعیین پاسخ خمشی مصالح مقاومت اولین ترک خوردگی با نام حد تناسب (LOP)^۳ و مقاومت نهایی با نام مدول راپچر (MOR)^۴ می‌باشند که از آزمایشات خمش سه و یا چهار نقطه‌ای حاصل می‌شوند. با توجه به شکل ۶-۱ می‌توان به راحتی به ارتباط این پارامترها و در حالت کلی تر به ارتباط بین آزمایشات کشش مستقیم و خمش پی‌برد [۵۹]. بنابراین برای تعیین پاسخ کششی لازم به انجام آزمایش کشش مستقیم است. آزمایش UTT از جمله آزمایشات پیچیده‌ای است که برای انجام آن توجه به نکات زیر ضروری است [۶۰]:

- نیاز به آزمایشگاهی پیشرفته با تجهیزاتی پیشرفته، گرانیقیمت و حساس
- نیاز به نیروی ماهر و آشنا به ست آزمایشگاهی
- کنترل مداوم ست آزمایشگاهی در حین آزمایش

^۱ First Crack Tensile Strength: Bend Over Point (BOP)

^۲ Ultimate Tensile Strength (UTS)

^۳ Limit of Proportionality (LOP)

^۴ Modulus of Rupture (MOR)

- زمانبر بودن آزمایش
- دقت بالای ابعاد نمونه (در حد 0.5 میلیمتر)
- کنترل و جلوگیری از انقباض و تغییر ابعاد نمونه
- کنترل یکنواختی مخلوط هنگام میکس و قالب‌ریزی بمنظور جلوگیری از ایجاد اختلاف تنش در طول نمونه
- کنترل و جلوگیری از ایجاد تمرکز تنش در نقاط تکیه‌گاهی
- عدم ترک‌خوردگی نمونه حتی در مقیاس میکرومتر

با توجه به مطالب ذکر شده انجام آزمایش UTT، آزمایشی پیچیده و نیازمند شرایط و تجهیزات خاصی است که در اغلب آزمایشگاه‌های سازه و یا تکنولوژی بتن وجود ندارند. در مقابل آزمایش پیچیده UTT می‌توان از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای (FPBT) به عنوان روشی جایگزین و ساده استفاده کرد. بر این اساس هدف نهایی از آزمایش FPBT استفاده از نمودارهای لنگر-انحنای^۱ و لنگر-تغییرمکان بمنظور محاسبه پارامترهای کشش محوری از طریق آنالیز معکوس^۲ است. قابل توجه است که انجام آزمایش خمش بدین معنا نیست که آیا مصالح رفتار سخت‌شوندگی یا نرم‌شوندگی از خود نشان می‌دهند؛ بلکه در راستای محاسبه پارامترهای کششی مصالح از جمله ظرفیت کرنش کششی با دقت بسیار بالاست.

۳-۶ آنالیز معکوس:

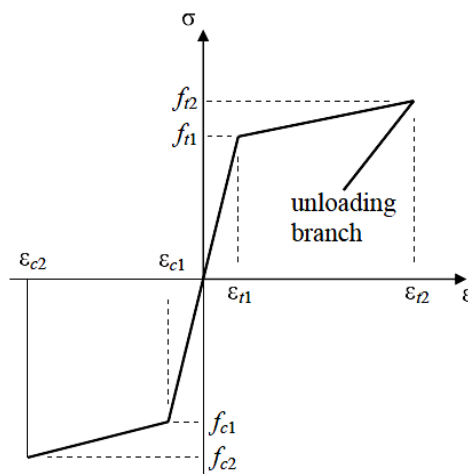
به کارگیری آنالیز معکوس بمنظور استخراج پارامترهای کششی از آزمایش خمش برای اولین بار توسط Ostergarad در دانشگاه Technical University of Denmark (DTU) در سال ۲۰۰۶ و سپس توسط Kanakubo در سال ۲۰۰۷ انجام پذیرفت [۶۱و۶۲].

^۱ Curvature

^۲ Inverse Analysis

۱-۳-۶: Ostergarad

در این روش با استفاده از آنالیز معکوس آزمایش خمش و استفاده از مدل مفصل^۱ مقادیر مقاومت کششی و ظرفیت کرنش کششی محاسبه شده است که نتایج نسبتاً مطلوبی را در مقایسه با آزمایشات Li نشان داده است [۶۱]. نکته قابل توجه در این روش همانگونه که در شکل ۲-۶ مشهود است ساده سازی نمودار تنش-کرنش فشاری به صورت دوخطی و حل روش تنها در نقطه حد نهایی می باشد.

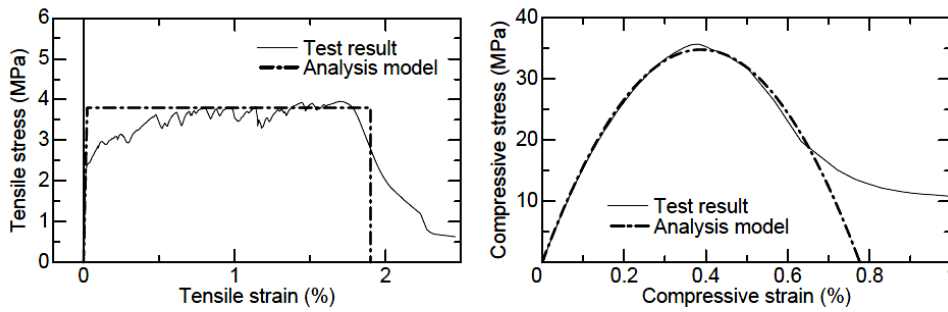


شکل ۲-۶: ساده سازی رفتار کامپوزیت برای فشار و کشش در روش Ostergarad

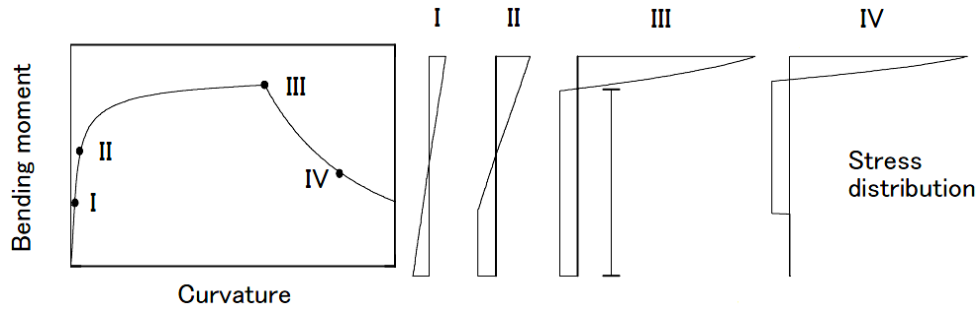
۲-۳-۶: Kanakubo

در این روش نیز با استفاده از آنالیز معکوس آزمایش خمش مقادیر مقاومت کششی و ظرفیت کرنش کششی محاسبه شده و نتایج نسبتاً مطلوبی در مقایسه با آزمایشات Li حاصل شده است. در روش همانگونه که در اشکال ۳-۶ و ۴-۶ مشهود است نمودار تنش-کرنش کششی به صورت دوخطی با شیب صفر و بینهایت ساده سازی شده و باز هم تنها در حالت حد نهایی حل انجام گرفته است [۶۳].

^۱ Hinge Model



شکل ۳-۶: ساده سازی رفتار کامپوزیت برای فشار و کشش در روش Kanakubo

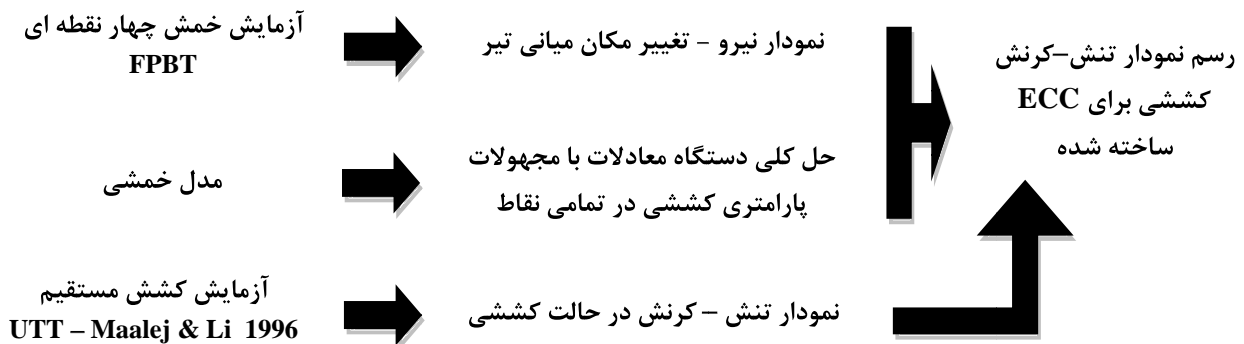


شکل ۴-۶: نقاط آنالیز معکوس در روش Kanakubo

۴-۶ مدلسازی ECC:

۱-۴-۶ چارچوب کلی مدلسازی:

با توجه به نکات ذکر شده در بخش ۲-۶ و امکانات پیچیده برای انجام آزمایش کشش مستقیم؛ در این پایان نامه به منظور تعیین پارامترهای کششی از روش آنالیز معکوس استفاده شده است. چارچوب کلی این مدلسازی در شکل ۵-۶ نمایش داده شده است:

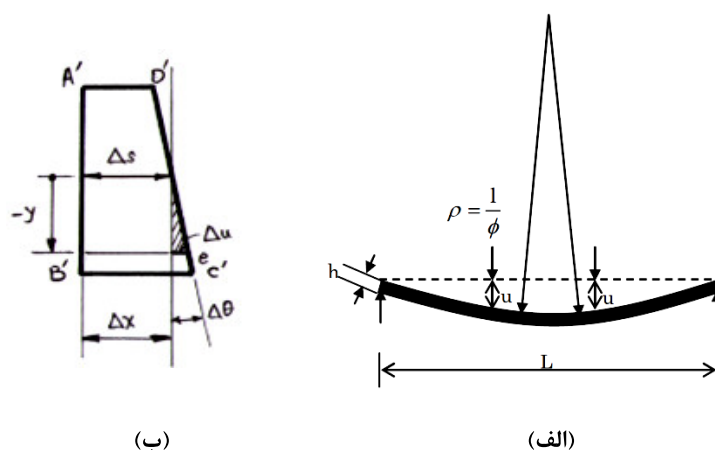


شکل ۵-۶: چارچوب کلی مدلسازی ECC

همانگونه که در شکل مشهود است در مرحله اول آزمایش خمش چهارنقطه‌ای که در فصل پنجم به صورت مفصل شرح داده شد؛ انجام می‌شود. سپس با حل دستگاه معادلات منحصربفرد پیشنهادی و بهره‌گیری از روش آنالیز معکوس برای تمامی نقاط؛ نمودار نیرو-تغییر مکان خمشی به نمودار تنش- کرنش کششی معادل‌سازی می‌شود. در نهایت برای اطمینان از صحت روش، نتایج با آزمایش کشش مستقیم آقای $L1$ مقایسه می‌شود.

۶-۴-۲ مدل رفتار خمشی:

در این پایان‌نامه برای مدل‌سازی رفتار خمشی سخت شونده‌گی کرنشی در آزمایش خمش چهار نقطه ای از روابط دیفرانسیل تغییر شکل استفاده شده است. برای تعیین معادله دیفرانسیل تغییر شکل تیر لازم است یک جز تیر مورد توجه قرار گیرد [۶۴ و ۶۰]. بر اساس فرض اساسی هندسی مقاطع صفحه‌ای عمود بر محور تیر در مدت تغییر شکل به صورت صفحه‌ای باقی می‌مانند همچنین از تغییر شکل برشی تیر صرف‌نظر می‌شود. شکل ۶-۶ حالت تغییر شکل یافته یک تیر مستقیم تحت خمش چهارنقطه‌ای با شعاع انحنا ρ را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۶: (الف) حالت تغییر شکل خمشی تیر (ب) هندسه تغییر شکل جز تیر

همانگونه که در شکل ۶-۶ ب مشهود است در تیر انحنای برداشته، زاویه بین دو مقطع مجاور مساوی $\Delta\theta$ می‌باشد. در این حالت تغییر شکل Δu هر تار دلخواه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta u = -y \Delta\theta \quad (۱-۶)$$

تارهایی که در سطح خنثای انحنای برداشته تیر تغییر شکل یافته قرار دارند تحت هیچ‌گونه کرنشی نمی‌باشند. بنابراین طول قوس Δs ثابت باقی خواهد ماند. بر این اساس خواهیم داشت:

$$\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \Delta u \frac{\Delta u}{\Delta s} = -y \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta s}, \quad \frac{du}{ds} = -y \frac{d\theta}{ds} \quad (۲-۶)$$

مقدار du/ds همان کرنش خطی تیری از تیر می‌باشد که به فاصله y از محور خنثی قرار دارد. بنابراین می‌توانیم بنویسیم:

$$\frac{dy}{ds} = \varepsilon \quad (۳-۶)$$

با توجه به اینکه $\Delta s = \rho \Delta\theta$ است می‌توان نوشت:

$$\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta s} = \frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{\rho} = \Phi \quad (۴-۶)$$

که در آن Φ نمایانگر انحنای^{۱۰} (عکس شعاع انحنای) است. بر اساس مطالب فوق و جایگزینی روابط می‌توان رابطه پایه بین انحنای منحنی تغییر شکل و کرنش خطی را به صورت زیر تعریف نمود:

$$\frac{1}{\rho} = \Phi = \frac{-\varepsilon}{y} \quad (۵-۶)$$

^{۱۰} Curvature

قابل توجه است که چون در برقراری رابطه ۶-۵ از مشخصات مکانیکی مصالح استفاده نشده است، این رابطه هم در مسائل ارتجاعی و هم در مسائل غیرارتجاعی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. بنابراین به راحتی می‌توان برای مدل‌سازی رفتار سخت‌شوندگی کرنشی در ECC از این مدل بهره جست.

۶-۴-۳ تولید دستگاه معادلات:

۶-۴-۳-۱ معادله تغییر مکان:

با توجه به مطالب بیان شده در بخش قبل و در نظر گرفتن مدل تغییرشکل خمشی تیر برای محاسبه تغییرمکان تیر از قضایای لنگر سطح استفاده می‌شود.

قضیه اول لنگر سطح:

تغییر زاویه مماس بر منحنی تغییرشکل تیر بین دو نقطه برابر است با سطح زیر نمودار منحنی $\frac{M}{EI}$ در فاصله بین این دو نقطه.

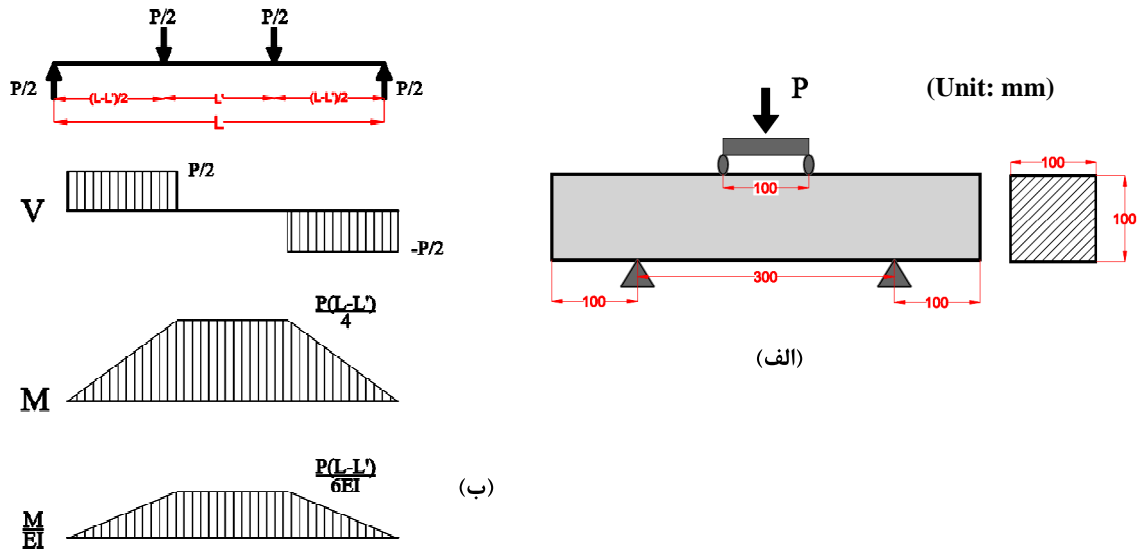
$$d\theta = \frac{M}{EI} dx, \theta_{R/L} = \int_L^R M \frac{M}{EI} dx \quad (6-6)$$

قضیه دوم لنگر سطح:

انحراف قائم از منحنی تغییرشکل تیر نسبت به مماس وارده بر نقطه‌ای دیگر از آن منحنی، برابر است با لنگر اول سطح زیر منحنی $\frac{M}{EI}$ در فاصله بین این دو نقطه، حول محوری که از نقطه اول می‌گذرد.

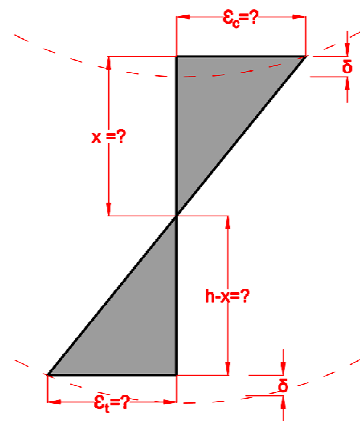
$$d\Delta = x d\theta, \Delta_{L/R} = \int_L^R x \frac{M}{EI} dx \quad (7-6)$$

با توجه به قضیه دوم لنگر سطح برای محاسبه تغییرمکان لازم به رسم دیاگرام $\frac{M}{EI}$ آزمایش خمش چهارنقطه‌ای می‌باشد که در شکل ۶-۷ نمایش داده شده است.



شکل ۶-۷: الف) هندسه آزمایش خمش چهار نقطه ای (ب) مراحل رسم دیاگرام $\frac{M}{EI}$

حال با توجه به دیاگرام $\frac{M}{EI}$ و فرض خطی بودن دیاگرام کرنش و صرف نظر از اختلاف تغییرشکل در تار بالایی و پائینی که در شکل ۶-۸ نمایش داده شده؛ می‌توان معادله تغییرمکان میانی تیر را نوشت.



شکل ۶-۸: دیاگرام کرنش در ارتفاع مقطع

بنابراین معادله تغییرمکان میانی تیر به صورت ساده شده زیر حاصل می‌شود:

$$\Delta_{\text{Cracked}} = \frac{3 P L' (L-L')^3}{8 E_{Cr} b x^4} + \frac{P (L-L')^4}{8 E_{Cr} b x^4} + \frac{3 P L'^2 (L-L')}{8 E_{Cr} b x^4} \quad (8-6)$$

که در آن P نیروی کل وارده بر تیر، L' فاصله بین نقاط اعمال نیرو، L فاصله بین دو تکیه‌گاه، x ارتفاع تارخشی و E_{Cr} مدول الاستیسیته در حالت سخت‌شوندگی کرنشی می‌باشند. در نتیجه تغییر مکان تابعی وابسته به متغیرهای x و P و E_{Cr} است. همچنین قابل ذکر است که در این معادله E_{Cr} به صورت تابعی خطی از x در فاصله $L - L'$ در نظر گرفته شده است.

$$\Delta = f(x, P, E_{Cr}) \quad (9-6)$$

$$E_{Cr} = f(x, L, L') \quad (10-6)$$

معادله تغییرمکان میانی تیر قبل از شکل‌گیری اولین ترک در نمونه و هنگامی که ECC هنوز در حالت خطی است با جایگذاری مدول الاستیسیته خطی به جای E_{Cr} به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\Delta_{\text{Cracked}} = \frac{3 P L' (L-L')^3}{8 E_{UCr} b x^4} + \frac{P (L-L')^4}{8 E_{UCr} b x^4} + \frac{3 P L'^2 (L-L')}{8 E_{UCr} b x^4} \quad (11-6)$$

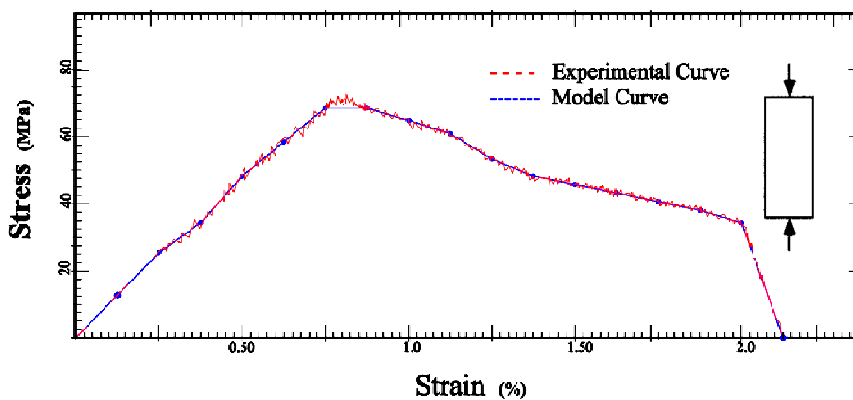
با توجه به آزمایش خمش چهارنقطه‌ای مقدار مدول الاستیسیته $E_{UCr} = 6750 \text{ MPa}$ می‌باشد که با جایگذاری در معادله ۱۱-۶ مقدار تغییرمکان به صورت ساده شده زیر حاصل می‌شود:

$$\Delta_{\text{Cracked}} = \frac{P L' (L-L')^3}{18000 b x^4} + \frac{P (L-L')^4}{54000 b x^4} + \frac{P L'^2 (L-L')}{18000 b x^4} \quad (12-6)$$

با توجه به آزمایش خمش چهارنقطه‌ای مقدار مدول الاستیسیته خطی $E_{UCr} = 6750 \text{ MPa}$ می‌شود.

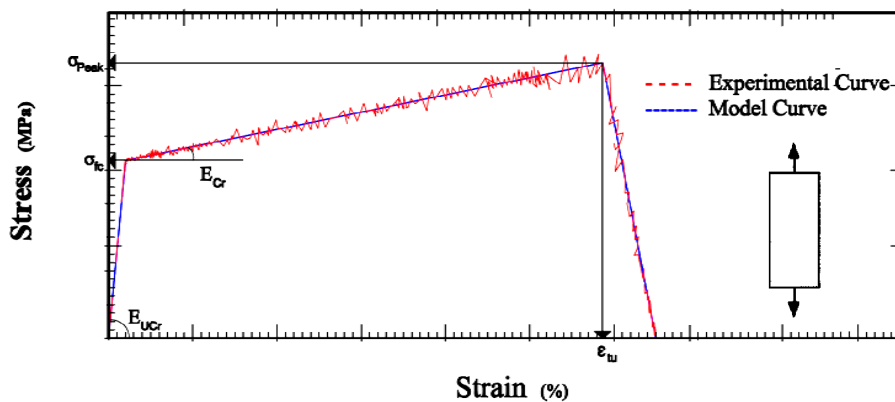
۲-۳-۴-۶ معادله تعادل نیرو:

برای برقراری تعادل نیرویی و بدست آوردن معادله حاکم در ابتدا لازم است نمودارهای تنش-کرنش برای حالات فشاری و کششی معادل سازی شوند. برای نمودار تنش-کرنش از نمودار مستقیم فشاری بدون هیچگونه ساده سازی که از آزمایش فشار بر روی نمونه های استوانه ای مطابق آنچه در فصل پنجم شرح داده شده استفاده شده است. این نمودار در شکل ۹-۶ نمایش داده شده است.



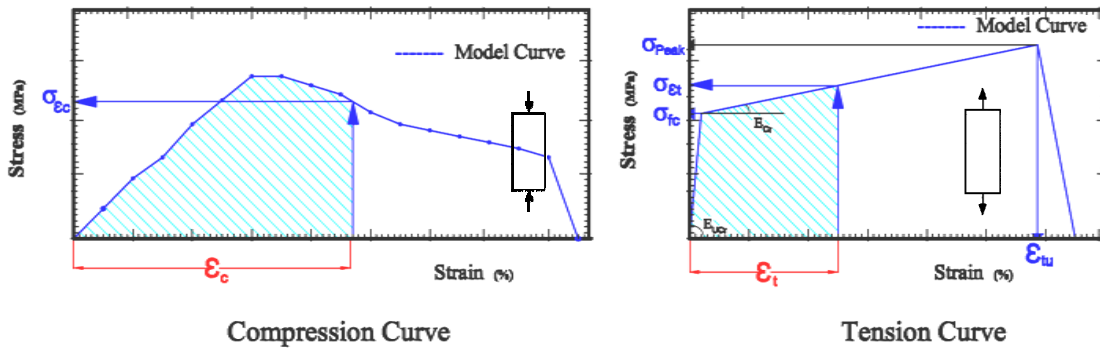
شکل ۹-۶: دیاگرام تنش-کرنش در حالت فشار

برای نمودار تنش-کرنش حالت کشش مستقیم از نموداری دوخطی با شیب های E_{UCr} برای حالت خطی ابتدائی و E_{Cr} برای حالت سخت شوندگی کرنشی مطابق شکل ۱۰-۶ استفاده شده است.

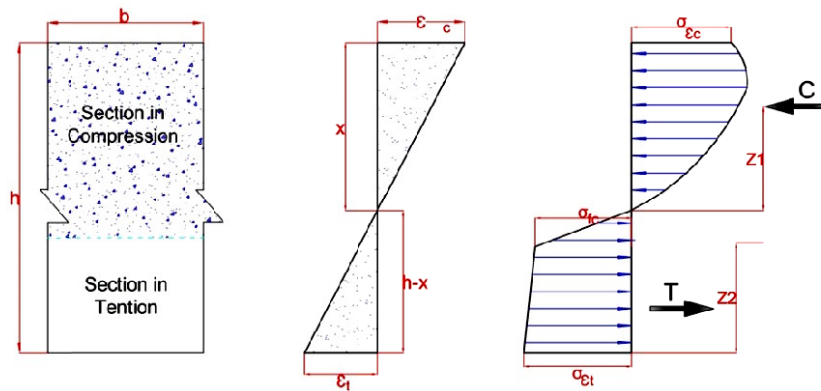


شکل ۱۰-۶: دیاگرام تنش-کرنش در حالت کشش مستقیم

با توجه به نمودارهای در نظر گرفته شده برای حالات کشش و فشار و فرض کردن خطی بودن دیاگرام کرنش می‌توان نمودارهای تنش و کرنش در ارتفاع مقطع و برای هر نقطه دلخواه را معادل سازی کرد. نمودارها و دیاگرام‌های تنش و کرنش برای نقطه‌ای دلخواه در ارتفاع مقطع در اشکال ۱۱-۶ و ۱۲-۶ نمایش داده شده است.



شکل ۱۱-۶: نمودارهای تنش-کرنش فشاری و کششی برای نقطه ای دلخواه



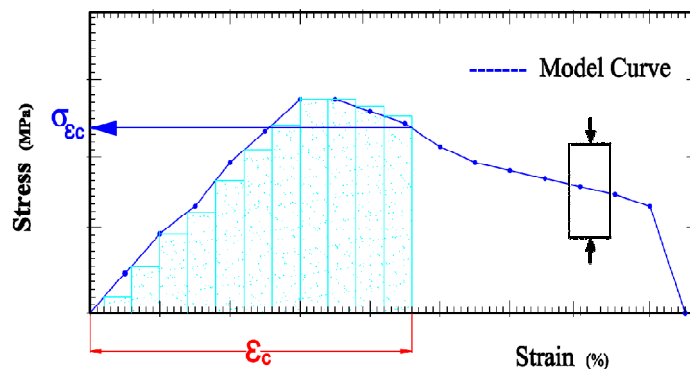
شکل ۱۲-۶: دیاگرام‌های توزیع تنش و کرنش در مقطع تیر

پارامترهای مورد استفاده در این نمودارها عبارتند از:

جدول ۱-۶: پارامترهای مورد استفاده در دیاگرام‌ها

ارتفاع تار خنثی	کرنش کششی	کرنش فشاری	کرنش نهایی کششی	کرنش نهایی فشاری	تنش اولین ترک	تنش کششی	تنش فشاری	تنش حداکثر کششی	نیروی کششی	نیروی فشاری
X	ϵ_t	ϵ_c	ϵ_{tu}	ϵ_{cu}	σ_{fc}	σ_{et}	σ_{ec}	σ_{Peak}	C	T

با توجه به دیاگرام‌های رسم شده مقادیر نیروی فشاری از انتگرال‌گیری منجنی تنش- کرنش فشاری برای هر نقطه دلخواه همانند شکل ۶-۱۳ بدست می‌آید.

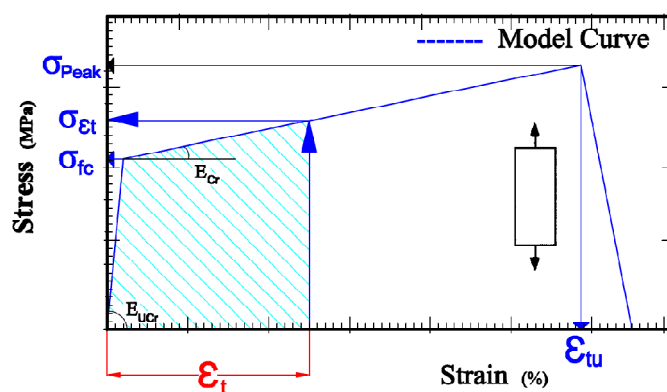


شکل ۶-۱۳: محاسبه نیروی فشاری وارد بر مقطع

بنابراین مقدار نیروی فشار از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C = \int_0^{\epsilon_c} f(\sigma, \epsilon)_{\text{compression}} \cdot \frac{x}{\epsilon_c} \cdot b \quad (12-6)$$

در مقابل نیروی کششی وارد بر مقطع در همان نقطه با توجه به شکل ۶-۱۴ به صورت زیر محاسبه می‌شود:



شکل ۶-۱۴: محاسبه نیروی کششی وارد بر مقطع

$$T = \left[\frac{\sigma_{fc}^2}{2 E_{UCr}} + \sigma_{fc} \left(\varepsilon_t - \frac{\sigma_{fc}}{E_{UCr}} \right) + \left(\frac{E_{Cr}}{2} \right) \left(\varepsilon_t - \frac{\sigma_{fc}}{E_{UCr}} \right)^2 \right] \cdot \frac{(h-x)}{\varepsilon_t} \cdot b \quad (13-6)$$

همانگونه که از معادلات ۱۲-۶ و ۱۳-۶ بر می آید نیروی فشاری تابعی از پارامترهای x ، σ_c ، ε_c و b می باشد و در مقابل نیروی کششی تابعی از پارامترهای x ، σ_{fc} ، ε_t ، σ_{fc} ، E_{UCr} ، E_{Cr} و b است.

$$C = f(x, \varepsilon_c, \sigma_c, b) \quad (14-6)$$

$$T = f(x, \varepsilon_t, \sigma_{fc}, b, E_{UCr}, E_{Cr}, b) \quad (15-6)$$

از آنجائیکه نمودار کرنش خطی فرض شده است می توان رابطه زیر را برای کرنش های فشاری و کششی برقرار ساخت:

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} = \frac{x}{h-x} \quad (16-6)$$

در این حالت خواهیم داشت:

$$T = \left[\frac{\sigma_{fc}^2}{2 E_{UCr}} + \sigma_{fc} \left(\frac{\varepsilon_c (h-x)}{x} - \frac{\sigma_{fc}}{E_{UCr}} \right) + \left(\frac{E_{Cr}}{2} \right) \left(\frac{\varepsilon_c (h-x)}{x} - \frac{\sigma_{fc}}{E_{UCr}} \right)^2 \right] \cdot \frac{(h-x)}{\varepsilon_t} \cdot b \quad (17-6)$$

با توجه به معادله ۱۶-۶ و وابسته بودن ε_c و ε_t و نیز ثابت بودن مقادیر b و σ_{fc} و E_{UCr} می توان نیروهای فشاری و کششی را تابعی از سه مجهول مستقل x و ε_c و E_{Cr} دانست.

$$C = f(x, \varepsilon_c), T = \square(x, \varepsilon_c, E_{Cr}) \quad -6)$$

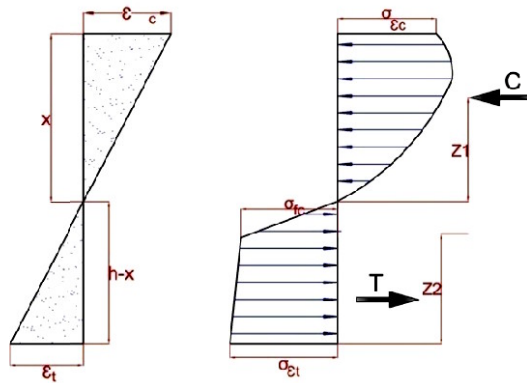
(۱۸)

$$\sum F_x = 0 \quad (19-6)$$

$$\frac{\left[\frac{\sigma_{fc}^2}{2 E_{UCr}} + \sigma_{fc} \left(\frac{\varepsilon_c (h-x)}{x} - \frac{\sigma_{fc}}{E_{UCr}} \right) + \left(\frac{E_{Cr}}{2} \right) \left(\frac{\varepsilon_c (h-x)}{x} - \frac{\sigma_{fc}}{E_{UCr}} \right)^2 \right]}{\int_0^x f(\sigma, \varepsilon_{\text{compression}})} = 1 \quad (20-6)$$

۳-۳-۴-۶ معادله تعادل لنگر:

برای برقراری تعادل لنگر و بدست آوردن معادله حاکم در ابتدا لازم است با توجه به نمودارهای تنش- کرنش حالات فشاری و کششی معادل سازی شده در بخش قبل بازوی نیروها مشخص شوند. با توجه به شکل ۱۵-۶ خواهیم داشت:



شکل ۱۵-۶: بازوی لنگر برای نیروهای فشار و کشش

بنابراین داریم:

$$Z_1 = \frac{\int_0^x f(\sigma, \varepsilon \cdot \frac{x}{\varepsilon_c})_{\text{compression}}}{\int_0^x x \cdot f(\sigma, \varepsilon \cdot \frac{x}{\varepsilon_c})_{\text{compression}}} \quad (21-6)$$

$$Z_2 = \frac{\left[\frac{\sigma_{fc}^3}{3E_{ucr}} + \frac{\sigma_{fc}}{2} \left(\varepsilon_t - \frac{\sigma_{fc}}{E_{UCr}} \right)^2 + \left(\frac{E_{Cr}}{2} \right) \left(\varepsilon_t - \frac{\sigma_{fc}}{E_{UCr}} \right)^2 \left(\frac{2\varepsilon_t}{3} + \frac{\sigma_{fc}}{3E_{UCr}} \right) \right] \cdot \frac{(h-x)}{\varepsilon_t}}{\left[\frac{\sigma_{fc}^2}{2E_{ucr}} + \sigma_{fc} \left(\varepsilon_t - \frac{\sigma_{fc}}{E_{UCr}} \right) + \left(\frac{E_{Cr}}{2} \right) \left(\varepsilon_t - \frac{\sigma_{fc}}{E_{UCr}} \right)^2 \right]} \quad (22-6)$$

و با توجه به معادله ۱۶-۶ خواهیم داشت:

$$Z_2 = \frac{\left[\frac{\sigma_{fc}^3}{3E_{ucr}} + \frac{\sigma_{fc}}{2} \left(\frac{\varepsilon_c (h-x)}{x} - \frac{\sigma_{fc}}{E_{UCr}} \right)^2 + \left(\frac{E_{Cr}}{2} \right) \left(\frac{\varepsilon_c (h-x)}{x} - \frac{\sigma_{fc}}{E_{UCr}} \right)^2 \left(\frac{2\varepsilon_c (h-x)}{3x} + \frac{\sigma_{fc}}{3E_{UCr}} \right) \right] \cdot \frac{(h-x)}{\varepsilon_t}}{\left[\frac{\sigma_{fc}^2}{2E_{ucr}} + \sigma_{fc} \left(\frac{\varepsilon_c (h-x)}{x} - \frac{\sigma_{fc}}{E_{UCr}} \right) + \left(\frac{E_{Cr}}{2} \right) \left(\frac{\varepsilon_c (h-x)}{x} - \frac{\sigma_{fc}}{E_{UCr}} \right)^2 \right]} \quad (23-6)$$

در نهایت ممان مقاوم مقطع از رابطه ۶-۲۴ بدست می آید:

$$M_r = C.Z_1 + T.Z_2 \quad (۲۴-۶)$$

با توجه به نمودارهای برش و لنگر آزمایش خمش چهار نقطه‌ای؛ رسم شده در شکل ۶-۷ لنگر اعمالی بر نقطه میانی $M_u = \frac{P(L-L')}{6}$ است. در نهایت معادله تعادل لنگر به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$M_r = M_u \quad , \quad \frac{P(L-L')}{6} = C.Z_1 + T.Z_2 \quad (۲۵-۶)$$

همانند معادلات قبل Z_1 و Z_2 توابعی وابسته به سه مجهول مستقل x و ϵ_c و E_{Cr} هستند و بالتبع معادله لنگر نیز تابعی وابسته به این سه مجهول است که در آن مقدار نیروی P برای هر نقطه دلخواه مقداری مشخص می‌باشد.

۶-۴-۴ حل دستگاه معادلات:

با توجه به بخش‌های قبلی دستگاه معادلاتی شامل معادلات انحنا، تعادل نیرویی و تعادل لنگر تشکیل شده است. در این معادلات پارامترهای x و ϵ_c و E_{Cr} (ارتفاع تارخنتی، کرنش حداکثر و مدول الاستیسیته ناحیه سخت‌شوندگی کرنشی) بعنوان مجهولات مستقل و پارامترهای ϵ_t و σ_c بعنوان پارامترهای وابسته در نظر گرفته شده اند. برای حل این دستگاه معادلات از برنامه Matlab استفاده شده است. کدهای نوشته شده در این محیط در پیوست ۴ آورده شده است.

۶-۴-۵ نتایج:

دستگاه معادلات برای تمامی نقاط نمودار نیرو-تغییرمکان آزمایش خمش چهارنقطه‌ای که در فصل پنجم شرح داده شده است حل شده و به ازای هر نقطه (P_i, Δ_i) یک دسته جواب $(E_{Cr i}, \epsilon_c, x_i)$

با کمترین تُلرانس و درصد خطا و بالاترین همگرایی حاصل می شود. در این مرحله در واقع برای هر نقطه (P_i, Δ_i) و دسته جواب آن؛ یک نمودار تنش- کرنش فشاری و یک نمودار تنش-کرنش کششی رسم می شود. در نهایت با توجه این نمودارها، منحنی تنش-کرنش ECC برای کشش مستقیم در حالت کلی معادل سازی می شود. جدول ۲-۶ نشان دهنده نقاطی که دستگاه معادلات برای آنها حل شده است و در نهایت جدول ۳-۶ نشانده کلیه پارامترها مجهول و وابسته برای هر دسته معادله است.

جدول ۲-۶ مشخصات نقاط مورد بررسی در مدل سازی

No. Point	1	2	3	4	5	6	7	8
Force (KN)	7.5	13.0	15.0	16.5	17	17.5	18.0	18.5
Displacement (mm)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6

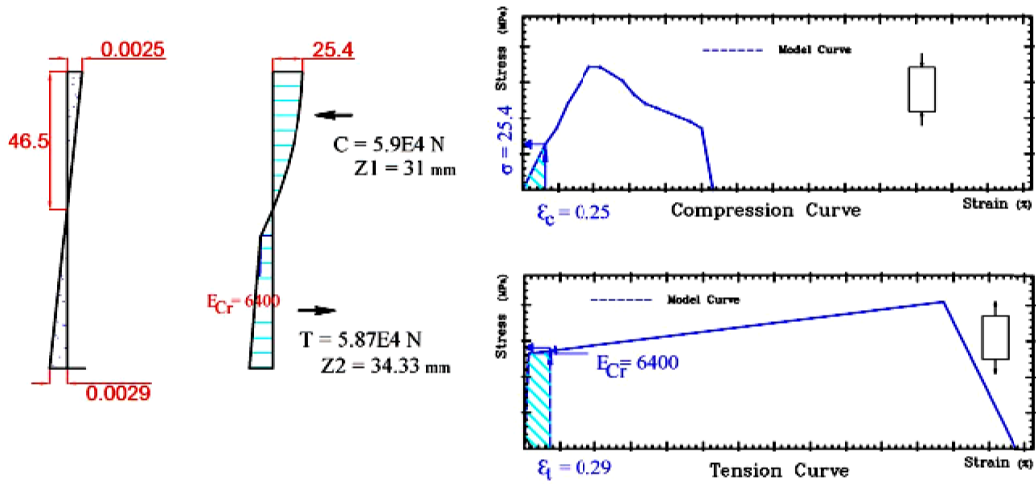
No. Point	13	14	15	16	17	18	19	20
Force (KN)	18.5	19.5	19.5	18	12	9	7	5.5
Displacement (mm)	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3	3.2

جدول ۳-۶: پارامترهای دستگاه معادلات برای نقاط مختلف

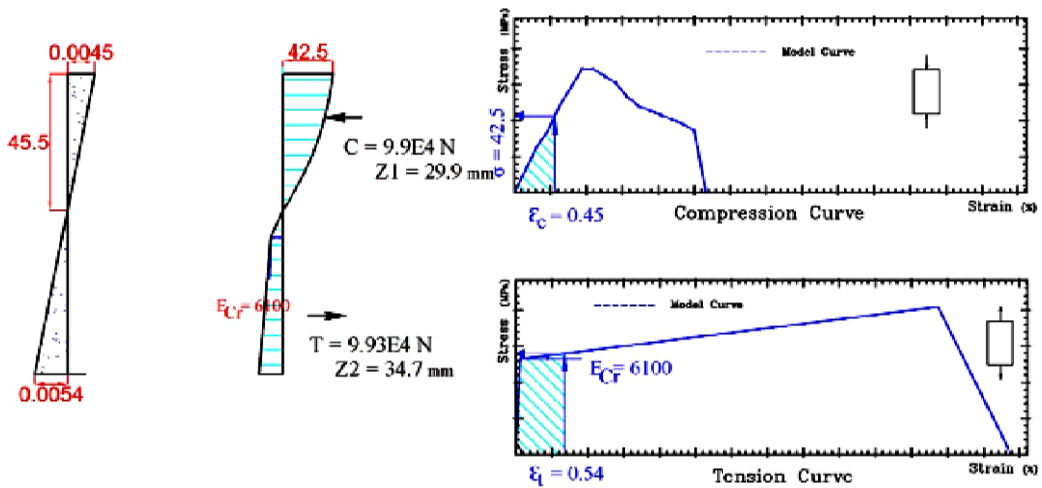
P (N)	D (mm)	C (N)	T (N)	Δ (mm)	X (mm)	ϵ_c	ϵ_t	E_{cr} (Mpa)	Z ₁ (mm)	Z ₂ (mm)	M _u (N.mm)	M _r (N.mm)	Er. Δ (%)	Er. F (%)	Er.M (%)
0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7500	0.20	5.90E+04	5.87E+04	0.205	46.5	0.003	0.003	6400	31	34.33	3.75E+05	3.80E+05	0.51	2.50	1.33
13000	0.40	9.90E+04	9.93E+04	0.399	45.5	0.005	0.005	6100	29.96	34.74	6.50E+05	6.50E+05	0.30	0.18	0.02
15000	0.60	1.17E+04	1.16E+04	0.579	44	0.006	0.007	5400	29.1	36.51	7.50E+05	7.60E+05	0.27	3.50	1.33
16500	0.80	1.34E+05	1.29E+05	0.763	43	0.007	0.009	4800	28.44	37.2	8.25E+05	8.46E+05	3.60	4.61	2.59
17000	1.00	1.29E+05	1.30E+05	0.954	41.5	0.007	0.009	4400	27.45	38.14	8.50E+05	8.50E+05	0.36	4.59	0.03
17500	1.20	1.35E+05	1.36E+05	1.148	40.5	0.007	0.01	4050	26.78	38.8	8.75E+05	8.92E+05	0.69	4.33	1.91
18000	1.40	1.42E+05	1.37E+05	1.342	40	0.008	0.011	3700	26.46.86	39.11	9.00E+05	9.00E+05	3.48	4.17	0.03
18500	1.60	1.39E+05	1.42E+05	1.529	39	0.008	0.011	3600	25.77	39.77	9.72E+05	9.27E+05	2.03	4.44	4.64
18500	1.80	1.58E+05	1.49E+05	1.733	39	0.009	0.013	3350	25.59	39.8	9.75E+05	9.72E+05	6.06	3.73	0.26
19500	2.00	1.58E+05	1.52E+05	1.919	38.5	0.009	0.014	3150	25.12	40.13	9.75E+05	9.94E+05	3.83	4.03	1.95
19500	2.20	1.56E+05	1.50E+05	2.098	38	0.009	0.015	3000	24.79	40.42	9.75E+05	9.78E+05	3.91	4.64	0.26
18000	2.40	1.46E+05	1.39E+05	2.281	37	0.009	0.015	2750	24.28	40.98	9.00E+05	9.07E+05	4.40	4.97	0.78
12000	2.60	1.53E+05	1.89E+05	2.52	37	0.015	0.035	1650	16	39.59	6.00E+05	4.92E+05	6.00	3.08	8.00
9000	2.80	1.47E+05	1.50E+05	2.69	36	0.015	0.038	1200	11.57	41.03	4.50E+05	3.96E+05	2.33	3.93	12.00
7000	3.00	1.24E+05	1.30E+05	2.88	35.5	0.019	0.045	850	11.9	40.5	3.50E+05	2.99E+05	5.01	4.00	14.57
5500	3.20	1.08E+05	1.11E+05	2.99	35	0.024	0.051	600	9.82	39.93	2.75E+05	2.29E+05	-2.78	6.56	16.73
4000	3.40	7.42E+04	8.90E+04	3.2	34	0.03	0.056	350	6.079	38.37	2.00E+05	1.79E+05	19.95	5.88	10.50

۱-۵-۴-۶ رسم دیاگرام های توزیع تنش و توزیع کرنش

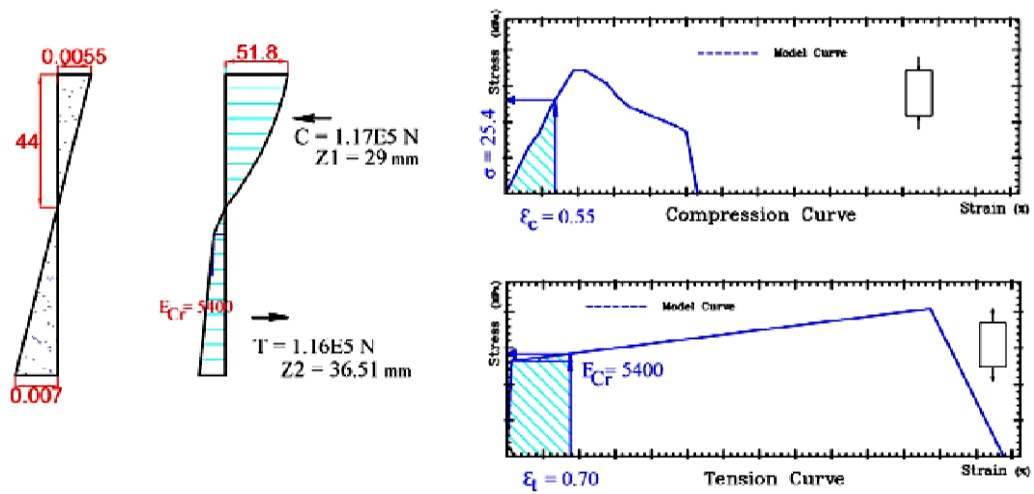
بر این اساس نتایج حاصل از دستگاه معادلات به صورت دیاگرام های توزیع تنش و توزیع کرنش در مقطع، مقادیر نیروی فشاری و کششی به صورت اشکال ۱۶-۶ تا ۳۱-۶ نمایش داده شده است.



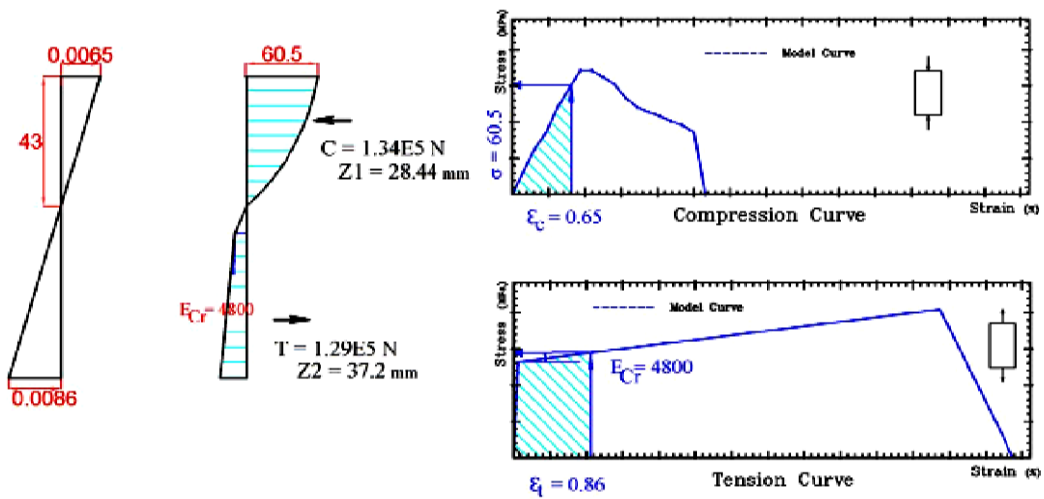
شکل ۱۶-۶: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 7500, \Delta_i = 0.2)$



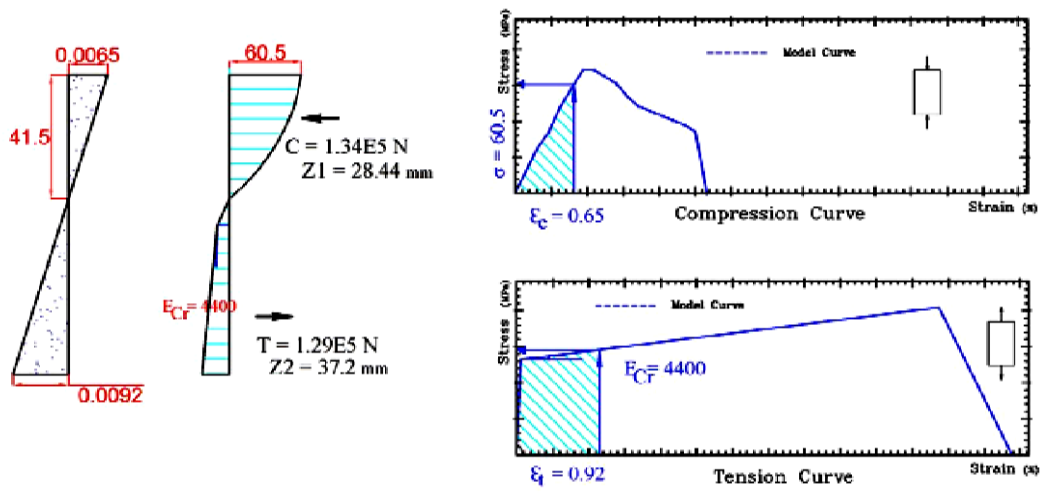
شکل ۱۷-۶: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 13000, \Delta_i = 0.4)$



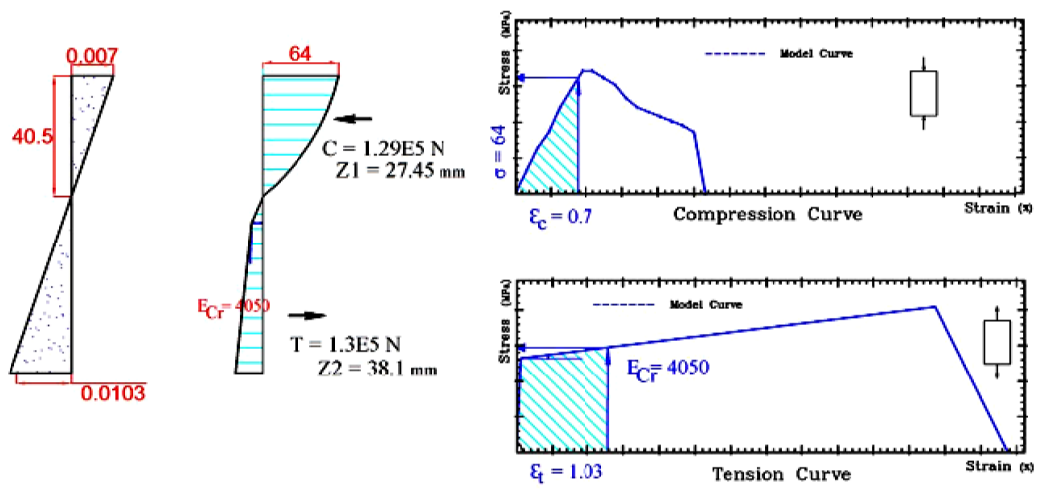
شکل ۶-۱۸: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه ($P_i = 15000$, $\Delta_i = 0.6$)



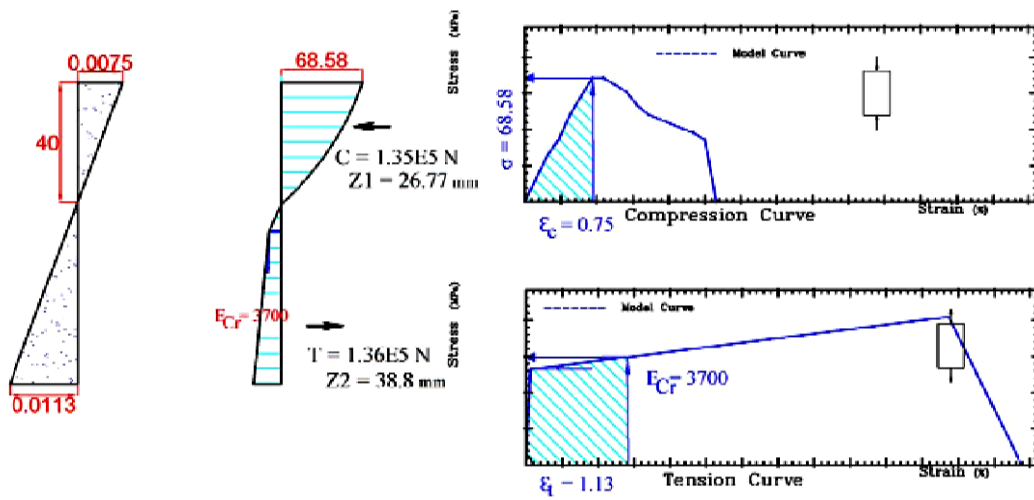
شکل ۶-۱۹: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه ($P_i = 16500$, $\Delta_i = 0.8$)



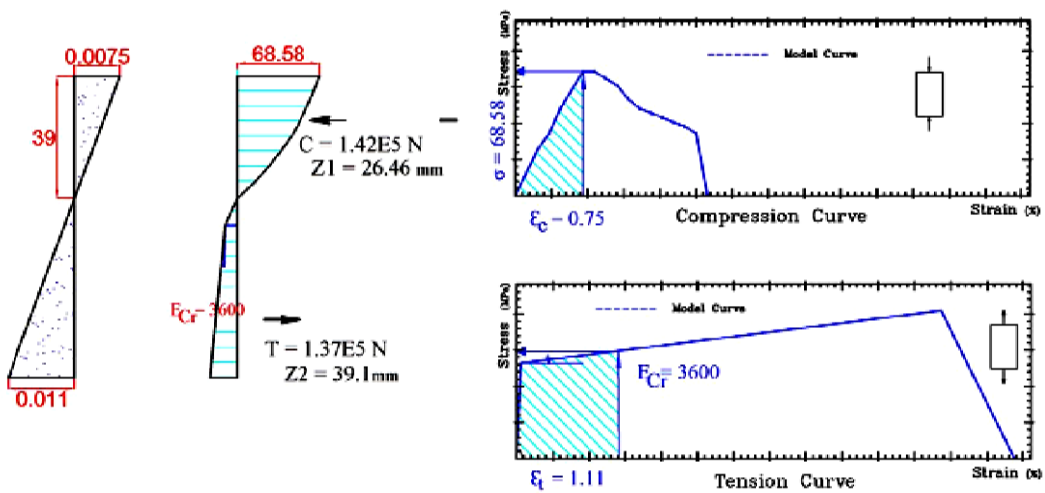
شکل ۶-۲۰: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 17000, \Delta_i = 1.0)$



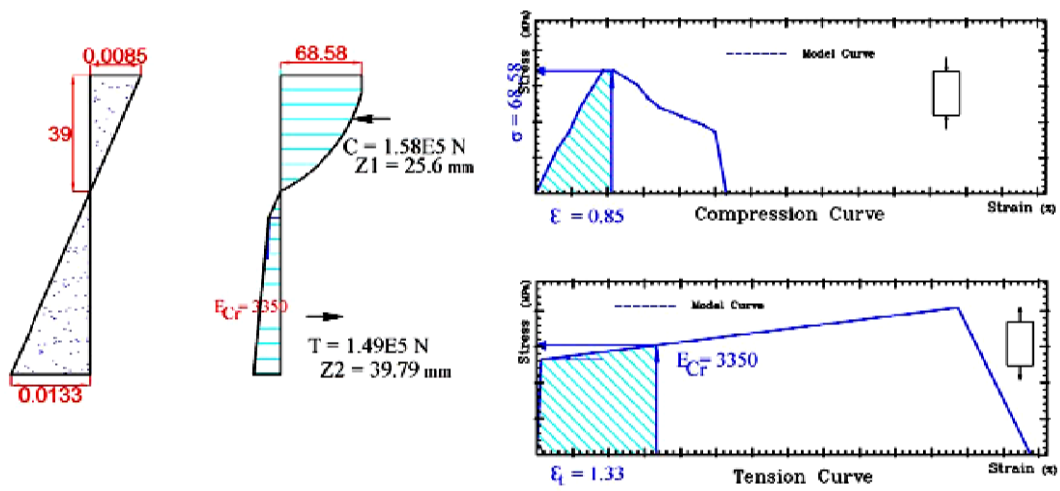
شکل ۶-۲۱: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 17500, \Delta_i = 1.2)$



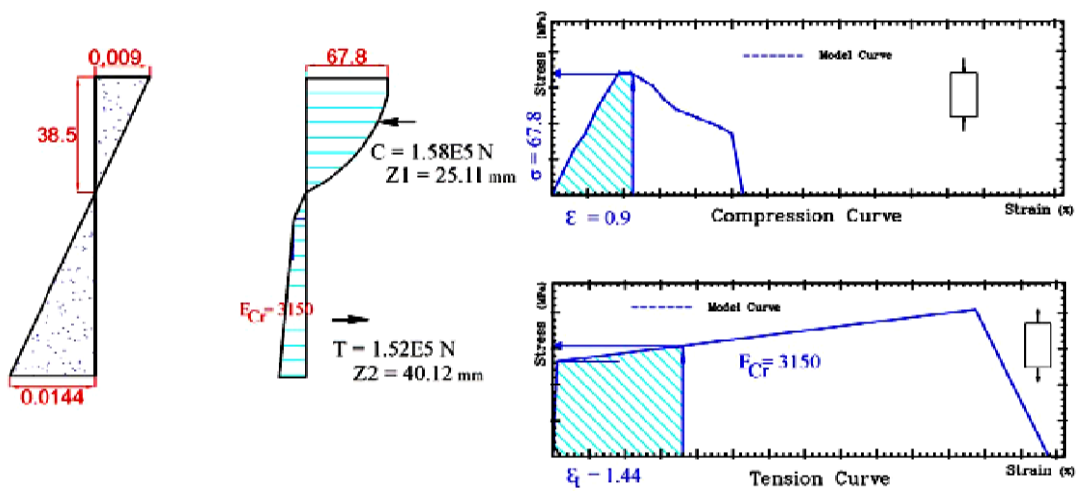
شکل ۶-۲۲: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 18000, \Delta_i = 1.4)$



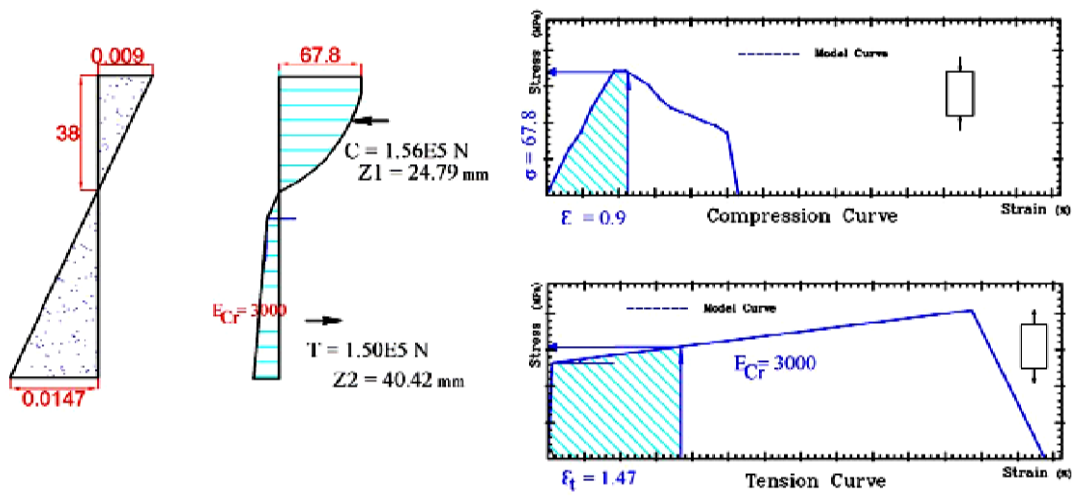
شکل ۶-۲۳: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 18500, \Delta_i = 1.6)$



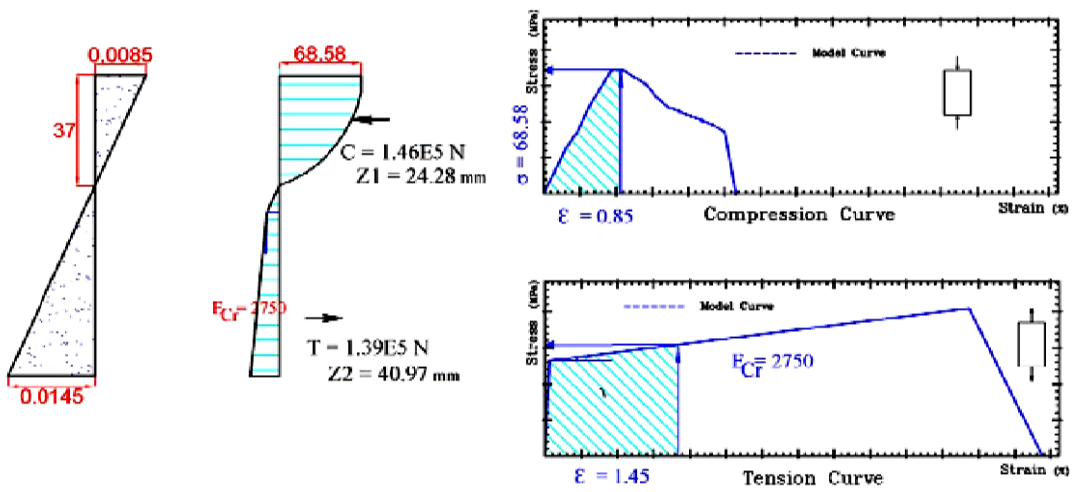
شکل ۲۴-۶: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 18500, \Delta_i = 1.8)$



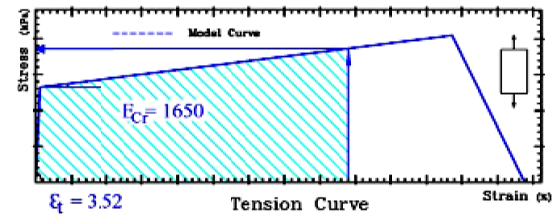
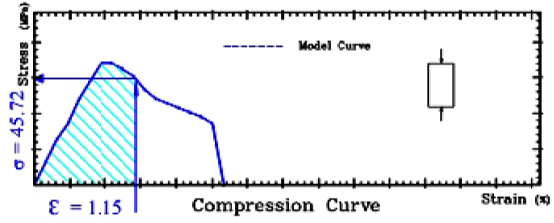
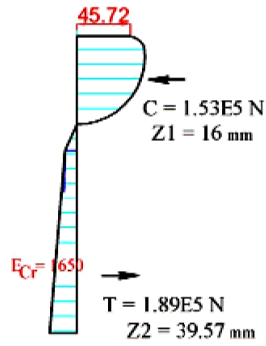
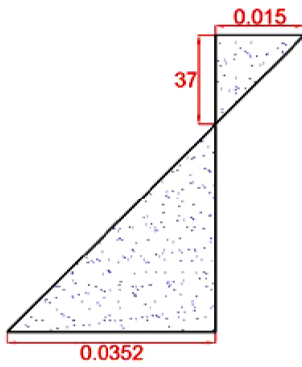
شکل ۲۵-۶: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 19500, \Delta_i = 2.0)$



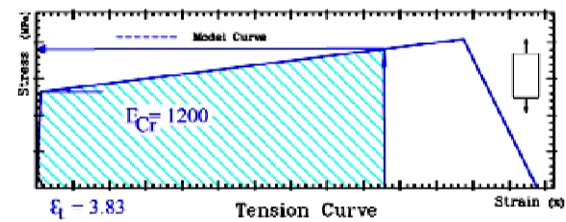
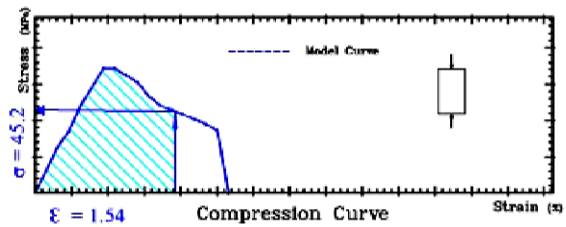
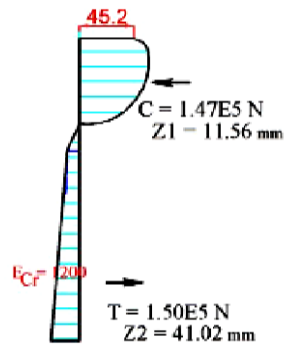
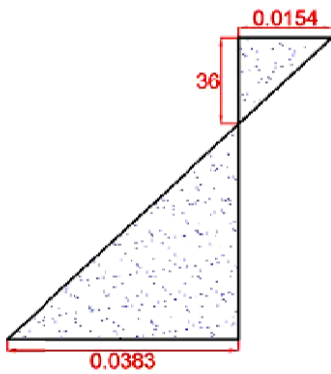
شکل ۶-۲۶: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 19500, \Delta_i = 2.2)$



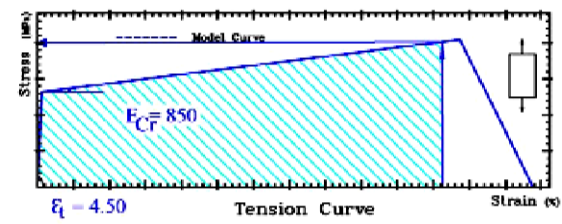
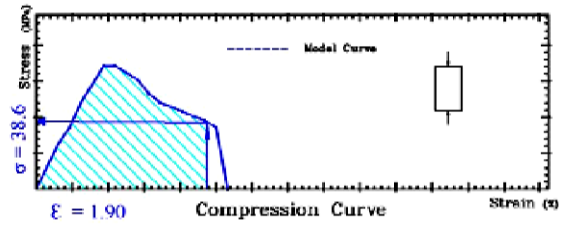
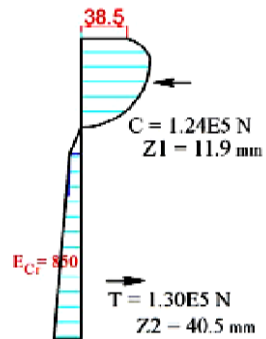
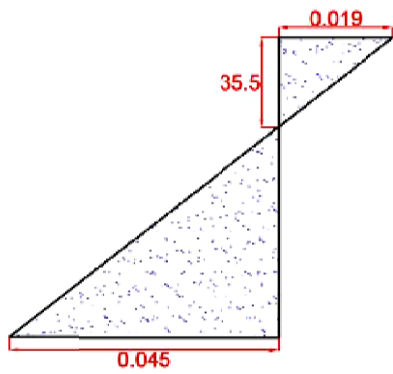
شکل ۶-۲۷: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 18000, \Delta_i = 2.4)$



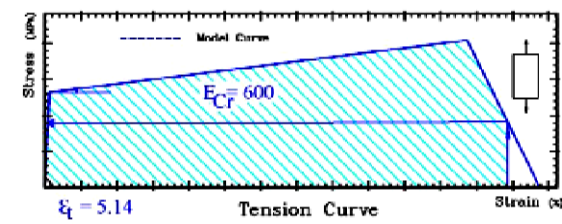
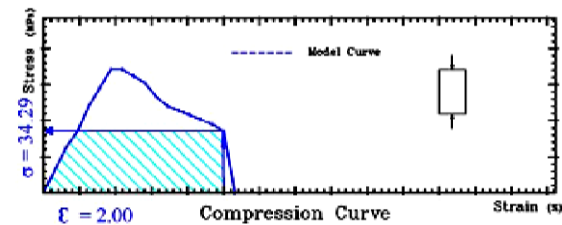
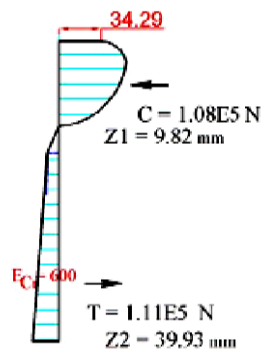
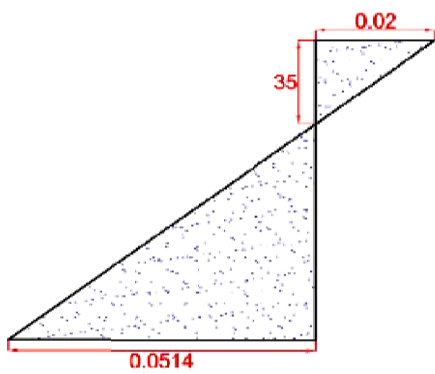
شکل ۶-۲۸: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 12000, \Delta_i = 2.6)$



شکل ۶-۲۹: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 9000, \Delta_i = 2.8)$



شکل ۶-۳۰: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 7000, \Delta_i = 3.0)$



شکل ۶-۳۱: نمودارهای حل دستگاه معادلات برای نقطه $(P_i = 5500, \Delta_i = 3.2)$

۶-۴-۵-۲ بررسی دیاگرام های ترسیم شده:

با توجه به دیاگرام های تنش- کرنش در حالات کششی و فشاری که در اشکال ۶-۱۷ تا ۶-۳۱ رسم شده اند می توان نحوه تغییرات پارامترهای مختلف را به صورت زیر شرح داد:

- پارامتر x یا همان ارتفاع تاریخچه در طی مراحل مختلف در حال کاهش یافتن است که نمایانگر کوچک شدن ناحیه فشاری و بالتبع بزرگ شدن ناحیه کششی در مقطع و افزایش توان کششی می باشد.
- پارامتر ϵ_c یا همان کرنش حداکثر فشاری در طی مراحل مختلف در حال افزایش یافتن است که نمایانگر باز شدن عرض دیاگرام کرنش در ناحیه فشاری و بالتبع افزایش توان فشاری می باشد.
- پارامتر ϵ_t یا همان کرنش حداکثر کششی در طی مراحل مختلف در حال افزایش یافتن است که نمایانگر باز شدن عرض دیاگرام کرنش در ناحیه کششی و بالتبع افزایش توان کششی می باشد.
- پارامتر E_{Cr} یا همان مدول الاستیسیته در حالت سخت شونده گی کرنشی کششی در طی مراحل مختلف در حال کاهش یافتن است که نمایانگر کشیده تر شدن نمودار تنش-کرنش کششی در ناحیه غیرخطی و افزایش توان کششی می باشد.
- پارامتر Z_1 یا همان بازوی لنگر فشاری در حال کاهش یافتن است که با توجه به حرکت رو به بالای ارتفاع تاریخچه منطقی می باشد.
- پارامتر Z_2 یا همان بازوی لنگر کششی در حال افزایش یافتن است که با توجه به حرکت رو به بالای ارتفاع تاریخچه منطقی می باشد.
- پارامتر C یا همان نیروی فشاری در حال افزایش یافتن است. در این میان نقطه قابل توجه غالب بودن حرکت افزایشی ϵ_c بر حرکت کاهش x است.

- پارامتر T یا همان نیروی کششی در حال افزایش یافتن است که با توجه به حرکت رو به بالای ارتفاع تارخنتی و حرکت افزایشی ϵ_t منطقی می‌باشد.
- پارامترهای M_u و M_f یا همان لنگر مقاوم و اعمالی بر مقطع در حال افزایش یافتن هستند. با توجه به حرکت افزایشی پارامترهای T, C, Z_1, Z_2, P منطقی است.

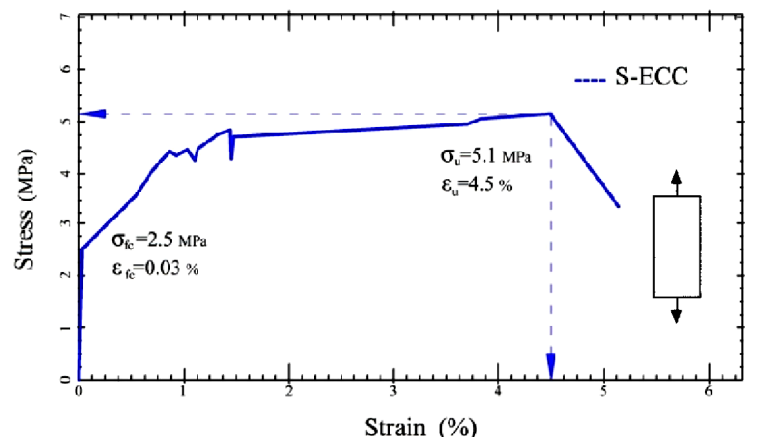
۳-۵-۴-۶ رسم دیاگرام تنش - کرنش کششی:

پس از حل دستگاه معادلات مقادیر تنش و کرنش‌های متناظر برای حالت کشش مستقیم محاسبه شده که در جدول ۴-۶ ذکر شده‌اند.

جدول ۴-۶: مقادیر تنش و کرنش در حالت کشش مستقیم

Tensile Stress (Mpa)	2.5	3.5	4	4.4	4.3	4.4	4.4	4.2	4.7	4.8	4.7	4.2	4.9	5	5.1	3.3
Tensile Strain (%)	0	0.5	0.7	0.9	0.9	1	1.1	1.1	1.3	1.4	1.5	1.5	3.5	3.8	4.5	5.1

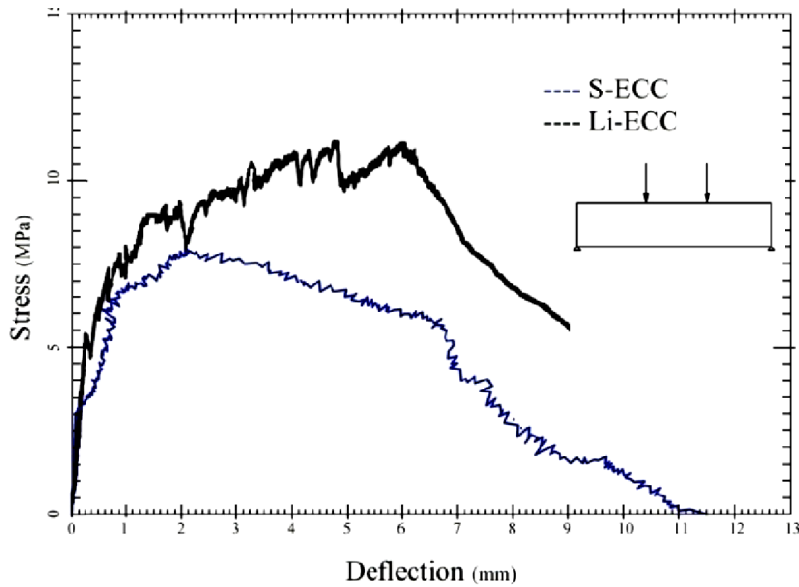
بنابر این نمودار مدل‌سازی شده تنش-کرنش S-ECC برای کشش مستقیم را مطابق شکل ۳۲-۶ رسم می‌شود.



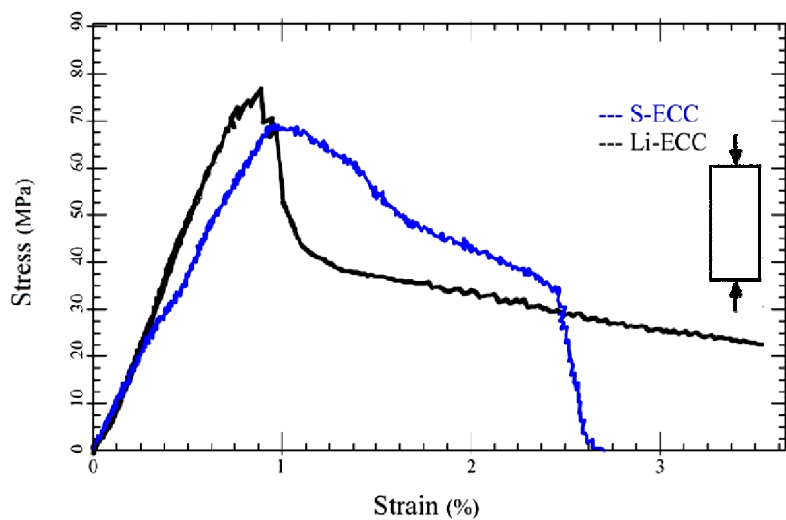
شکل ۳۲-۶: منحنی تنش-کرنش S-ECC برای کشش مستقیم

۴-۵-۴-۶ مقایسه دیاگرام های S-ECC و Li-ECC:

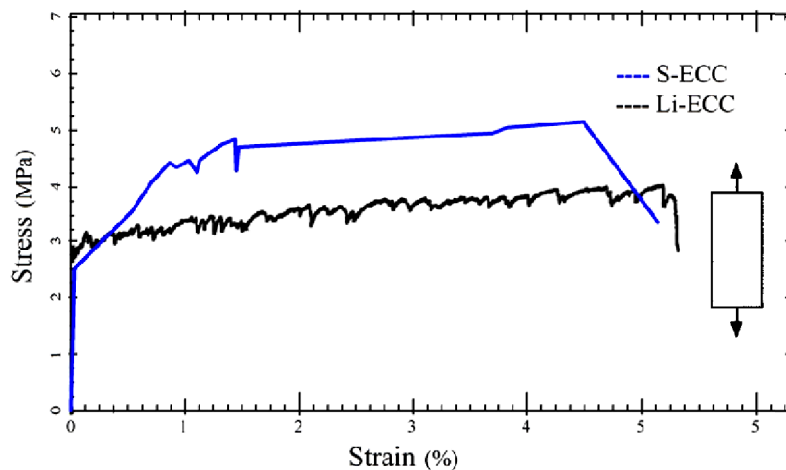
برای مقایسه آزمایشات خمش چهار نقطه ای ، فشاری و همچنین مدل سازی کششی برای S-ECC و آزمایشات Li در اشکال ۳۳-۶ تا ۳۵-۶ رسم شده است.



شکل ۳۳-۶: منحنی های تنش- تغییر مکان خمش برای S-ECC و Li-ECC



شکل ۳۴-۶: منحنی های تنش- کرنش فشاری برای S-ECC و Li-ECC



شکل ۶-۳۵: منحنی های تنش- کرنش کششی برای S-ECC و Li-ECC

نتایج اشکال ۶-۳۳ و ۶-۳۴ و ۶-۳۵ و در واقع مشخصات رفتار کلی S-ECC و Li-ECC برای مقایسه بهتر در جدول ۶-۵ خلاصه شده است.

جدول ۶-۵: مشخصات رفتار کلی S-ECC و Li-ECC و FRC

	Tensile				Compressive		Stiffness	Flexural
	σ_{fc} (MPa)	ϵ_{fc} (%)	σ_{tu} (MPa)	ϵ_{tu} (%)	f'_c (MPa)	ϵ'_c (%a)	E_{ucr} (GPa)	MOR (MPa)
S-ECC	2.5	0.03	5.1	4.5	68.48	0.75	6.75	7.1
Li-ECC	2.5	0.021	4.6	5.6	68.5	0.67	22	13
FRC	4.3	0.035	4.3	0.035	55	0.48	32.5	10.9

با توجه به جدول بالا نتایج زیر حاصل می‌شوند:

الف) رفتار کششی:

- تنش اولین ترک‌خوردگی برای S-ECC و Li-ECC یکسان برابر 2.5 MPa در نظر گرفته شده است.
- کرنش اولین ترک‌خوردگی برای S-ECC مساوی 0.03 % و برای Li-ECC مساوی 0.021 % است. با توجه به نحوه طراحی ECC در افزایش ظرفیت کششی و بالابردن شکنندگی ماتریس؛ کرنش اولین ترک‌خوردگی بالاتر S-ECC نتیجه مطلوبتری را نشان می‌دهد.
- مقاومت کششی نهایی برای S-ECC مساوی 5.1 MPa و برای Li-ECC مساوی 4.6 است. با توجه به نحوه طراحی ECC در افزایش ظرفیت کششی و بالابردن شکنندگی ماتریس تنش نهایی کمتر Li-ECC نتیجه مطلوبتری را نشان می‌دهد.
- کرنش نهایی در حالت سخت‌شوندگی کرنشی برای S-ECC مساوی 4.5 % و برای Li-ECC مساوی 5.6 % است. با توجه به نحوه طراحی ECC در افزایش ظرفیت کششی؛ کرنش نهایی بیشتر Li-ECC نتیجه مطلوبتری را نشان می‌دهد. با این حال در مقایسه با ظرفیت کششی FRC با مقدار 0.035 % بخوبی رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و در واقع ساختار مناسب یک ECC را برای S-ECC نمایان می‌سازد.

ب) رفتار فشاری:

- تنش فشاری برای S, Li-ECC و مقداری تقریباً یکسان برابر 68.5 MPa بدست آمده است.

- کرنش فشاری برای S-ECC مساوی % 0.75 و برای Li-ECC مساوی % 0.67 است. با توجه به نحوه طراحی ECC در افزایش ظرفیت کششی و حتی فشاری؛ و بالا بودن کرنش فشاری S-ECC نتیجه مطلوبتری را نشان می‌دهد.

ج) سختی:

- مقدار سختی یا همان مدول الاستیسیته ماتریس برای S-ECC مساوی 6.75 MPa و برای Li-ECC مساوی 22 GPa است. با توجه به نمودارهای کششی که برای Li-ECC رسم شده است این مقدار برابر 11.9 GPa بدست می‌آید. این اختلاف فاحش برای مقادیر عنوان شده توجیه خاصی ندارد.

د) رفتار خمشی:

- تنش خمشی یا همان مدول راپچر (MOR) برای S-ECC مساوی 7.6 MPa و برای Li-ECC مساوی 13 MPa است. بنابراین تنش خمشی Li-ECC نتیجه مطلوبتری را نشان می‌دهد.

فصل هفتم:

محاسبه پارامترهای میکرومکانیکی

S-ECC

یکی از مهمترین تفاوت‌های رفتاری بین کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف کوچک با توزیع تصادفی معمولی (FRCC) و کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف کوچک با توزیع تصادفی با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی (SH-FRCC)^۱ همانند ECC رفتار غیر الاستیک کششی پس از اولین ترک خوردگی است. همان طور که در فصل قبل نشان داده شد این رفتار کششی به صورت نموداری دوخطی مدل می‌شود. ناحیه خطی اول مربوط به شکل‌گرفتن اولین ترک و ناحیه خطی دوم مربوط به شکل‌گرفتن ترک‌های مویی متعدد و رُخ‌دادن پدیده سخت‌شوندگی کرنشی می‌باشد. برای رسیدن به این رفتار همانگونه که در فصل سوم شرح داده شد؛ لازم است دو معیار مقاومت و انرژی برآورده شوند. در واقع مصالح در حاشیه اطمینان مقاومتی و انرژی قرار بگیرد.

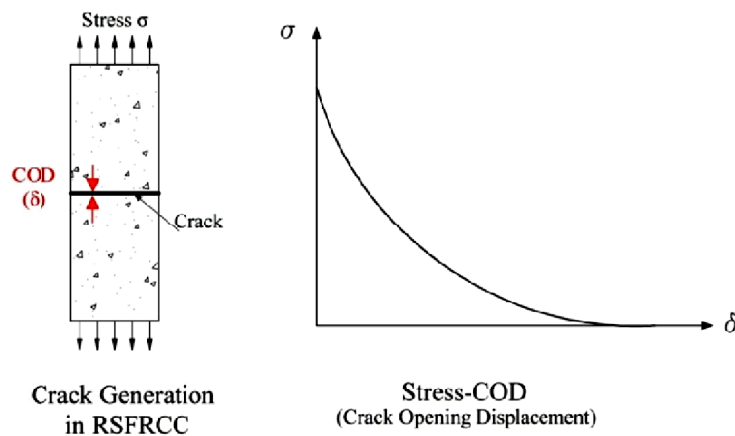
اختلاف در رفتارهای متفاوت بین SH-FRCC ناشی از اختلاف رفتاری در میکروسازه های آنها می‌باشد. این اختلاف در میکروسازه‌ها در واقع وابسته به خواص ماتریس، الیاف و لایه میانی و نیز اندرکنش این اجرا با یکدیگر است. در این راستا برای مدل‌سازی کامل ECC لازم است رفتار هر یک از این اجزا در کامپوزیت مادر را مشخص کرد. برای رسیدن به این هدف آزمایشاتی دشوار همچون بیرون‌کشیدگی تک رشته الیاف PVA لازم است که با توجه به امکانات آزمایشگاهی موجود انجام‌پذیر نیست. بنابراین برای مشخص کردن پیوند میکروسازه‌ها و محاسبه پارامترهای میکرومکانیکی هر یک از اجزا از محاسبات معکوس مدل پیشنهادی آقالی Li استفاده می‌شود [۶۵].

با توجه به آنچه بیان شد هدف از این فصل مشخص کردن رفتار میکروسازه‌ها و همچنین پیوند آنها در S-ECC؛ محاسبه پارامترهای میکرومکانیکی آن و مقایسه نتایج با آزمایشات مستقیم است. در نهایت با توجه به معیارهای مقاومت و انرژی و مقایسه شاخص‌های حاصله با مقادیر پیشنهادی ادعای ساخت کامپوزیت سیمانی مهندسی شده کشور اثبات می‌شود.

^۱ Strain Hardening Random Short Fiber Reinforced Cementitious Composite (SH-RSFRCC)

۲-۷ رفتار کششی در FRCCs:

یکی از مهمترین تفاوت‌های رفتاری بین کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف کوچک با توزیع تصادفی معمولی (FRCC) و کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف کوچک با توزیع تصادفی با رفتار سخت شونده‌گی کرنشی (SH-FRCC) رفتار غیر الاستیک کششی پس از اولین ترک خوردگی است. شکل ۱-۷ نمایشگر نمودار تنش-بازشدگی ترک (COD) یک FRCC در حالت کششی می‌باشد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود پس از اولین ترک نمودار به صورت نزولی پائین آمده و رفتار نرم شونده‌گی را از خود نشان می‌دهد.

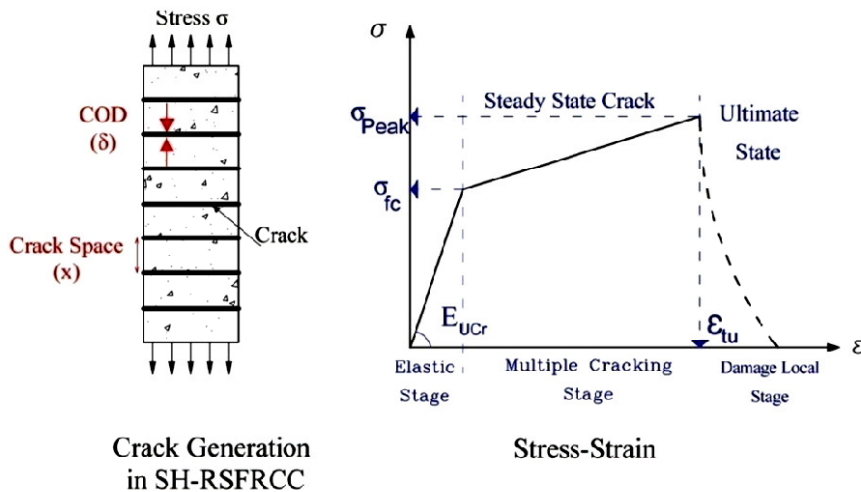


شکل ۱-۷: مدل رفتاری یک RSFRCC تحت کشش

۳-۷ رفتار کششی در SH-FRCCs:

در یک SH-FRCC به ویژه ECC در حالت کشش مطابق آنچه در شکل ۲-۷ نشان داده شده؛ پس از رخ دادن اولین ترک رفتار سخت شونده‌گی کرنشی اتفاق می‌افتد. بنابر این در رسم نمودار؛ پارامتر تنش را برحسب کرنش داریم و در مقابل پس از شکل‌گیری ترک نهایی^۱ و موضعی در ناحیه نهایی پارامتر تنش را بر حسب بازشدگی ترک خواهیم داشت.

^۱ Localize Crack



شکل ۷-۲: مدل رفتاری یک SH-FRCC تحت کشش

همان طور که در شکل واضح است نمودار از دو قسمت خطی تشکیل یافته است. ناحیه اول مربوط به شکل گرفتن اولین ترک و رسیدن تنش به σ_{fc} می‌باشد. در واقع رسیدن به این تنش مرز ورود به ناحیه سخت‌شوندگی کرنشی است که با σ_{ss} یا تنش ناحیه ترک پایا نیز نمایش داده می‌شود. ناحیه دوم مربوط به شکل گرفتن ترک‌های مویی متعدد است که از σ_{ss} شروع شده و تا σ_{Peak} یا تنش حداکثر ادامه دارد. در این ناحیه با رُخ دادن پدیده سخت‌شوندگی کرنشی به کرنش حداکثر ϵ_{tu} خواهد رسید. در نهایت با رسیدن تنش به σ_{Peak} ناحیه ترک‌های مویی پایان یافته و ناحیه نهایی آغاز می‌شود. بنابراین می‌توان نمودار تنش-کرنش کششی را به صورت رابطه زیر خلاصه کرد [۳۷]:

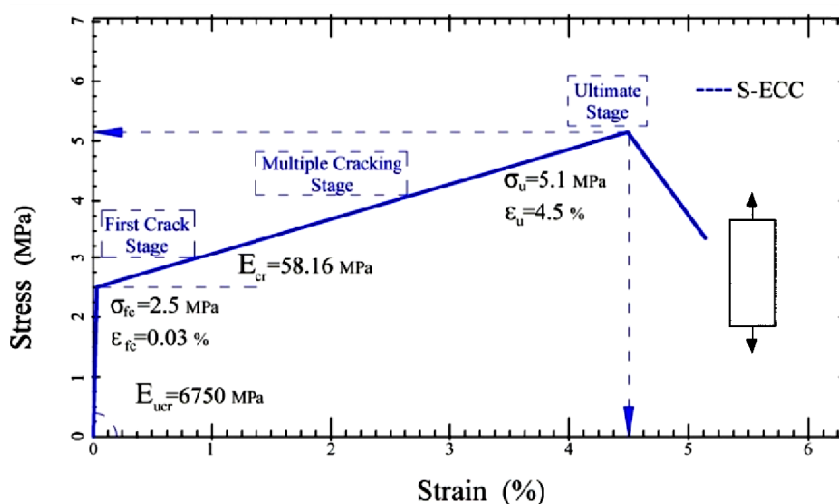
$$\sigma(\epsilon) = \begin{cases} E_{ucr} \cdot \epsilon & \epsilon \leq \sigma_{ss}/E_{ucr} \\ \sigma_{ss} + E_{cr} \cdot \epsilon & \epsilon > \sigma_{ss}/E_{ucr} \end{cases} \quad (1-7)$$

۷-۳-۱ رفتار کششی S-ECC

با توجه به معادلات نوشته شده در بخش قبل منحنی تنش-کرنش S-ECC را می‌توان به صورت رابطه زیر خلاصه کرد:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} 6750 \cdot \varepsilon & \varepsilon \leq 0.03 \% \\ 2.5 + E_{cr} \cdot \varepsilon_{cr} & \varepsilon > 0.03 \% \end{cases} \quad (2-7)$$

و در نهایت نمودار مدل سازی شده مطابق شکل ۳-۷ رسم می شود:



شکل ۳-۷: نمودار تنش-کرنش S-ECC مدل سازی شده در حالت کششی

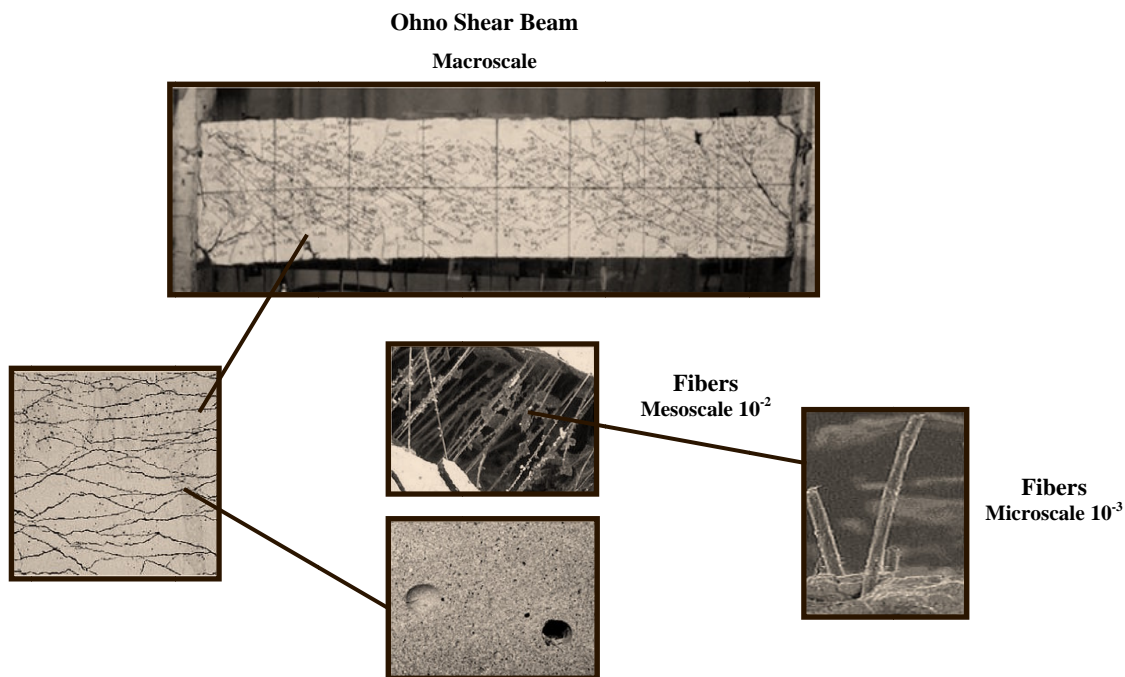
۴-۷ پیوند میکروسازه ها در ECC با رفتار کششی:

اختلاف در رفتارهای متفاوت بین SH-FRCC ناشی از اختلاف رفتاری در میکروسازه‌های آنها می‌باشد. این اختلاف در میکروسازه‌ها وابسته به دو عامل است:

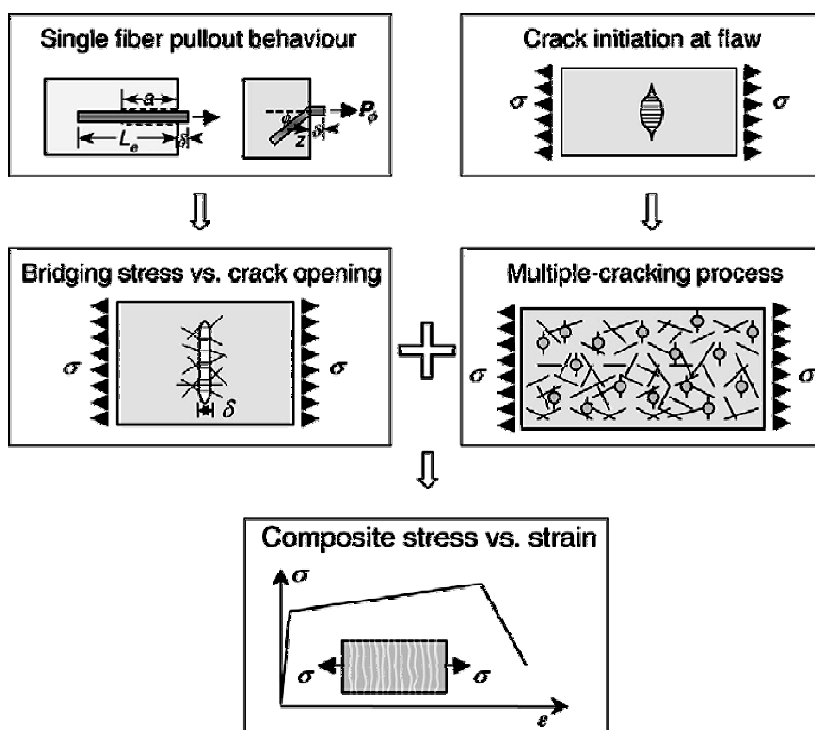
۱- توزیع الیاف ۲- توزیع ترک‌های (عیب و نقص) اولیه در ماتریس.

شکل ۴-۷ ارتباط بین اجزای مختلف یک SH-FRCC در مقیاس‌های متفاوت را نشان می‌دهد [۶۶].

شکل ۵-۷ نیز پیوند بین میکروسازه‌ها و عملکرد کششی یک SH-FRCC و به طور خاص ECC را نشان می‌دهد [۶۷].



شکل ۴-۷: ارتباط اجزای مختلف در مقیاس متفاوت برای ECC

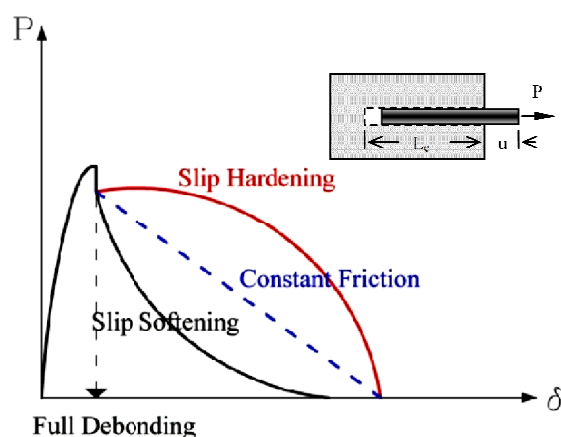


شکل ۵-۷: پیوند بین میکروسازه‌ها و عملکرد کششی ECC

برای یک رشته الیاف تنها رفتار بیرون آمدگی^۱ توسط مشخصات الیاف و لایه میانی کنترل می‌شود. با توزیع تصادفی الیاف در حجم ماتریس؛ توزیع نیروهای پلبدی در دو طرف ترک شکل گرفته و تنش‌های پلبدی مانع بازشدن ترک می‌شوند. چنانچه ماتریس به میزان کافی ضعیف بوده و توانایی شکل‌گرفتن ترک‌هایی مسطح در این توزیع تنش‌ها را داشته باشد؛ حالت ترک‌خوردگی پایا اتفاق می‌افتد. در واقع برای رُخ‌دادن پدیده ترک‌های مویی متعدد توزیع تنش‌های متوالی توسط الیاف و شکل‌گرفتن ترک‌های مسطح متوالی و در پی آن الزامی است. و این پدیده تا زمانی که ظرفیت نیروی پلبدی تمام شود ادامه خواهد یافت. بنابر این برای اطمینان از رُخ‌دادن پدیده ترک‌هایی مویی متعدد لازم به مدل‌سازی رفتار بیرون آمدگی یک رشته الیاف می‌باشد [۶۷].

۱-۴-۷ بیرون کشیدگی الیاف:

همانند رفتار متفاوت FRCCs؛ بیرون آمدگی تک رشته الیاف نیز با توجه به نوع آن؛ رفتاری متفاوت از خود نشان می‌دهد. در واقع چگونگی بیرون آمدگی الیاف است که زمینه‌ساز بروز رفتار کلی FRCCs و پدیده‌های نرم و سخت‌شوندگی کرنشی می‌باشد. شکل ۶-۷ منحنی رفتاری الیاف مختلف را در آزمایش بیرون کشیدگی نشان می‌دهد [۶۵].



شکل ۶-۷: منحنی رفتاری الیاف مختلف در آزمایش بیرون کشیدگی تک رشته الیاف

^۱ Pull Out

همانگونه که در شکل مشهود است یک رشته الیاف ممکن است پس از بیرون کشیدگی کامل^۱ از خود رفتار نرم‌شوندگی لغزشی^۲ یا سخت‌شوندگی لغزشی^۳ را نشان دهد. این نوع رفتار وابسته به نوع الیاف و ارتباط الیاف با ماتریس و میزان چسبندگی این دو بر هم وابسته است. در حالت سخت‌شوندگی کرنشی پس از بیرون‌زدگی کامل مقاومت اصطکاکی افزایش می‌یابد که این پدیده عموماً در الیاف پلیمری دیده می‌شود. به طور خاص الیاف PVA الیافی آبدوست^۴ با مهارشیمیایی بالا هستند. در واقع پس از رُخ‌دادن بیرون‌زدگی این مهارشیمیایی به کمک اصطکاک بین الیاف و ماتریس آمده و منجر به رفتار سخت‌شوندگی لغزشی می‌شود. این درحالی است که برای الیاف فولادی به دلیل وجود اصطکاک مکانیکی به تنهایی شاهد رفتار نرم‌شوندگی لغزشی هستیم.

۷-۴-۲ مدل‌سازی در حالت ترک پایا:

در فصول قبلی رفتار ECC از دیدگاه مکانیک شکست بررسی شده است. همانگونه که اشاره شد؛ در SRFRCs نحوه پلیندی الیاف یکی از مهمترین پارامترها به شمار می‌رود و عموماً این رفتار توسط منحنی رفتاری بیرون کشیدگی که به صورت کامل در بخش قبلی برای الیاف مختلف شرح داده شده؛ کنترل می‌گردد. مود گسترش ترک با بزرگ و کوچک بودن انرژی مکمل در این منحنی کنترل می‌شود. مطابق شکل ۷-۷ زمانی که انرژی مکمل به میزان کافی بزرگ باشد ترک‌ها به صورت مسطح و در حالت ترک پایا باقی مانده و میزان بازشدگی از δ_{Peak} کمتر می‌ماند [۵۳].

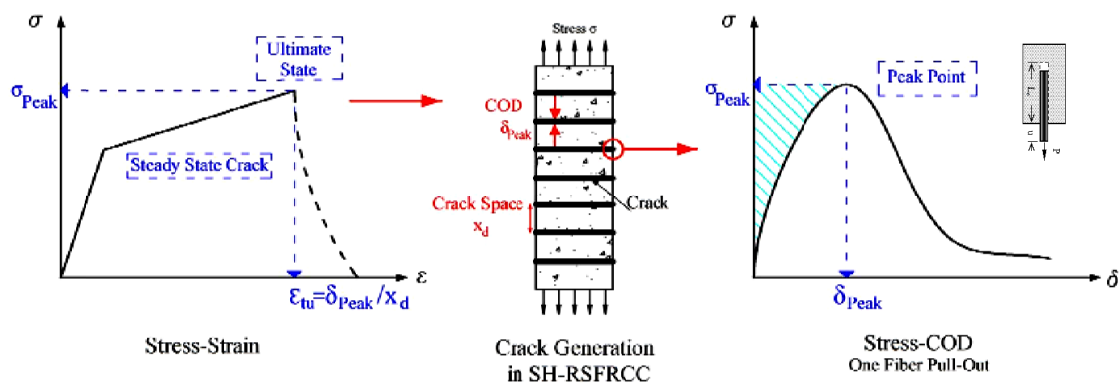
^۱ Full Debonding

^۲ Slip Softening

^۳ Slip Hardening

^۴ Hydrophilic Fiber

در این صورت ظرفیت تحمل تنش های کششی σ_{Peak} پایدار باقی می ماند. با پایدار ماندن ظرفیت باربری در این ترک ها و انتقال بار کششی توسط الیاف به ماتریس مجاور؛ ماتریس در محل دیگری دچار ترک خوردگی می شود که حالت ترک پایا نامیده می شود. شکل گرفتن این ترک های متوالی بدون افت ظرفیت باربری کششی حالت ترک خوردگی مویی متعدد یا اصطلاحاً Multiple Cracking را پدید می آورد [۶۵].



شکل ۷-۷: مدل رفتاری ECC - رفتار کششی، حالت ترک پایا و بیرون کشیدگی الیاف

حالت حد نهایی با به پایان رسیدن قابلیت انتقال بار کششی توسط الیاف و همچنین قابلیت ترک خوردن ماتریس و در واقع پس از اشباع حالت ترک پایا شروع می شود. در این حالت در تمامی ترک ها در نمودار بیرون کشیدگی به نقطه حداکثر خود رسیده و تا δ_{Peak} باز شده اند. فاصله ترک ها در این حالت مقدار تقریباً ثابت X_d است. در این حالت کرنش نهایی کششی کامپوزیت از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\varepsilon_{cu} = \delta_{Peak} / X_d \quad (3-7)$$

بنابراین پارامترهای δ_{Peak} و σ_{Peak} و ε_{tu} به عنوان پارامترهای کنترل کننده تمامی رفتار ECC در نظر گرفته می شوند.

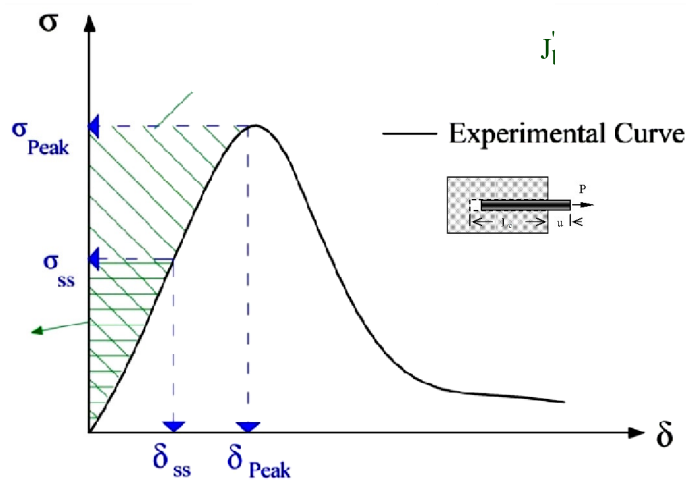
۳-۴-۷ معادلات حاکم در رفتار ECC :

مطابق آنچه در فصل چهارم توضیح داده شد؛ برای رسیدن به رفتار ترک‌های مویی متعدد و حالت ترک‌پایا لازم است دو معیار مقاومت و انرژی برآورده شوند [۳۷]:

$$\sigma_{ss} \leq \sigma_{Peak} \quad (۴-۷)$$

$$J_{Tip} \approx \frac{K_m^2}{E_m} \leq \sigma_{Peak} \cdot \delta_{Peak} - \int_0^{\delta_{Peak}} \sigma(\delta) d\delta = J'_b \quad (۵-۷)$$

که در آن J_{Tip} و J'_b مطابق شکل ۷-۸ انرژی مکمل پلبندی الیاف و طاق ماتریس در نوک ترک می‌باشند.



شکل ۷-۸: منحنی σ - δ الیاف در ECC

بنابراین برای اثبات دستیابی به کامپوزیتی با رفتار حاکم در ECC؛ لازم است دو معیار ذکر شده را برآورده ساخت.

۱-۳-۴-۷ معادلات حاکم در رفتار S-ECC:

۱-۱-۳-۴-۷ معیار مقاومت:

مقاومت ماتریس در حالت پایا σ_{ss} یا در واقع همان مقاومت اولین ترک σ_{fc} با توجه به نمودار کشش در شکل ۳-۷ مقدار 2.5 MPa را داراست. در مقابل تنش حداکثر کششی 5.1 MPa است. با توجه به این مقادیر رابطه ۴-۷ برقرار بوده و ماتریس توانایی بالقوه ترک خوردن را داراست.

۲-۱-۳-۴-۷ معیار انرژی:

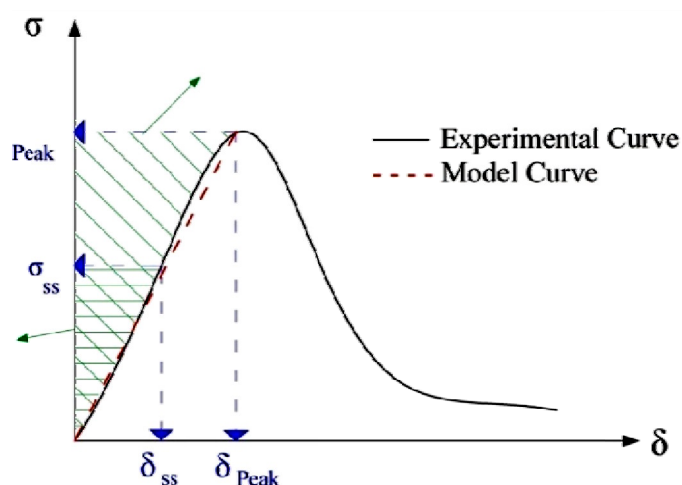
مدول الاستیسیته ماتریس با توجه به شکل ۳-۷ مساوی 6750 MPa است. بدلیل شکننده بودن بالای ماتریس و درصد انقباض بالای آن امکان انجام آزمایش چقرمگی شکست فراهم نشد. بسیاری از نمونه‌ها با نیروی بسیار کمی حتی در حدود 2N که هنگام قالب‌برداری نمونه به آن وارد می‌شود، شکسته و به دو نیم تقسیم شدند. همچنین نمونه‌های سالم نیز بدلیل بالابودن درصد انقباض هنگام عمل‌آوری به دو نیم تقسیم شدند. بنابر این برای تخمین طاقت ماتریس از مقادیر ارائه شده در مقالات و با توجه به طرح اختلاط ماتریس استفاده شده است. این مقادیر در جدول ۱-۷ ارائه شده‌اند:

جدول ۱-۷: مقادیر K_m های ارائه شده در مقالات بر اساس طرح اختلاط

شماره	سختی ماتریس MPa. \sqrt{m}	مشخصات طرح اختلاط					
		سیمان	خاکسترپادی	سنگدانه	میکروسیلیس	آب	فوق‌روان‌کننده
1	0.2	1	1.2	0.8	-	0.55	1
2	0.33	1	-	0.8	0.1 - 0.2	0.32	1-3
3	0.33	1	-	0	0.2	0.32	3
4	0.31	1	-	0.5	0.2	0.45	3
5	0.41	1	-	1	0.2	0.45	3
6	0.57	1	-	2	0.2	0.45	3
7	0.38	1	-	0.5	0.2	0.35	3
8	0.71	1	-	1	0.2	0.35	3
9	0.66	1	-	2	0.2	0.35	3
10	0.33	1	-	0	0.2	0.27	4
11	0.23	1	1	0.8	-	0.42	7

با توجه به نزدیک بودن طرح اختلاط مورد استفاده برای نمونه‌های S-ECC با طرح اختلاط شماره ۱ مقدار $0.2 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ برای چقرمگی شکست ماتریس در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با توجه به رابطه ۵-۷ مقدار طاقت ماتریس و سمت چپ معادله $J_{\text{Tip}} = 5.9 \text{ j/m}^2$ بدست می‌آید.

برای محاسبه سمت راست معادله ۵-۷ و بدست آوردن معادله دقیق؛ نیاز به انجام آزمایش بیرون کشیدگی تک رشته الیاف است. با توجه به قطر بسیار کوچک الیاف PVA ($39 \mu\text{m}$) و همچنین طول ۸ میلی‌متری آن انجام آزمایش دقیق بیرون کشیدگی بسیار دشوار است و این آزمایش تابحال در موارد محدودی انجام شده است. بدین منظور با توجه به نتایج مدل‌سازی آزمایش کشش مستقیم منحنی دقیق به صورت خطی و با تقریبی بالا مطابق شکل ۷-۹ تخمین زده می‌شود.



شکل ۷-۹: منحنی σ - δ الیاف در ECC

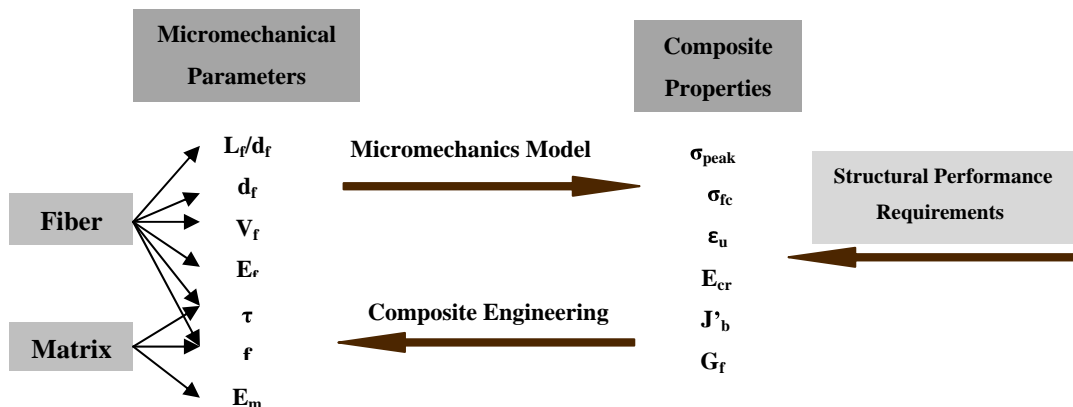
با توجه به عکس‌های گرفته شده از نمونه در حالت نهایی فاصله ترک ها ۲.۵ میلی متر اندازه‌گیری شده است. در این حالت با توجه به روابط ۷-۳ و ۷-۵ مقادیر انرژی پلبدی الیاف و طاقت ماتریس محاسبه می‌شوند:

$$J'_b = 28.6 \text{ J/m}^2 \quad (6-7)$$

$$J_{\text{Tip}} = 5.9 \text{ J/m}^2 \quad (7-7)$$

۵-۷ محاسبه پارامترهای میکرومکانیکی:

همانگونه که در فصل سوم توضیح داده شد؛ میکرومکانیک شاخه ای از علم مکانیک کاربردی است که مشخصات و اندرکنش‌های ریزسازه‌ها را مشخص می‌کند. هدف از کاربرد علم میکرومکانیک در کامپوزیت‌های مسلح سیمانی توجیه اندرکنش‌های میان ماتریس سیمانی، الیاف و لایه‌میانی ماتریس و الیاف است. در واقع هدف نهایی ارائه معادلاتی با پارامترهای مربوط به مشخصات هر جز و نیز پارامترهای وابسته‌کننده اجزا نسبت به هم و در نهایت پیش‌بینی رفتار کلی کامپوزیت است. در این راستا اجزای مستقل و وابسته در ECC و پارامترهای مرتبط اجزا در شکل ۷-۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۷-۱۰: پارامترهای میکرو مکانیکی در ECC و نحوه ارتباط آنها

در این شکل پارامترهای مربوط به الیاف با توجه به انتخاب نوع الیاف در نظر گرفته می‌شوند. پارامترهای مرتبط با ماتریس و لایه میانی توسط منحنی بیرون کشیدگی تک رشته الیاف مطابق آنچه

در بخش ۷-۴-۱ توضیح داده شده کنترل می‌شوند. در نهایت این پارامترها با در نظر گرفتن مدل‌های میکرومکانیکی تعیین کننده رفتار کلی ECC می‌باشند.

۷-۵-۱ مدل پیشنهادی Li:

آقای Li برای کامپوزیت‌های پایه سیمانی مسلح به الیاف کوچک با جهت‌گیری تصادفی و در نظر گرفتن رفتار بیرون کشیدگی به جای گسیختگی برای الیاف در حالت نهایی مدلی را پیشنهاد کرده است که دربرگیرنده تمامی پارامترهای میکرومکانیکی آن می‌باشد. این مدل قابل استفاده برای ECC و توجیه رفتاری آن و قوانین پلبدی الیاف است که به صورت کامل در بخش ۳-۳-۲ توضیح داده شده است. در نهایت رفتار کامپوزیت توسط معادله زیر کنترل می‌شود [۳۷]:

$$\sigma(\delta) \begin{cases} \sigma_{\text{peak}} [2(\delta / \delta_{\text{Peak}})^{0.5} - (\delta / \delta_{\text{Peak}})] & \delta \leq \delta_{\text{peak}} \\ \sigma_{\text{peak}} [1 - 2\delta / L_f]^{0.5} & \delta_{\text{peak}} \leq \delta \leq L_f/2 \\ 0 & L_f/2 \leq \delta \end{cases} \quad (۸-۷)$$

۷-۵-۲ محاسبه پارامترهای میکرومکانیکی S-ECC:

بر اساس معادله ۷-۸ رفتار S-ECC با توجه به مدل پیشنهادی Li به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$\sigma(\delta) \begin{cases} 5.1 [6.1 \delta^{0.5} - 8.9 \delta] & \delta \leq 0.11 \\ \sigma_{\text{peak}} [1 - 2\delta / L_f]^{0.5} & 0.11 \leq \delta \leq 4 \\ 0 & 4 \leq \delta \end{cases} \quad (۹-۷)$$

مطابق توضیحات انجام برخی آزمایشات در تعیین پارامترهای میکرومکانیکی همانند بیرون کشیدگی تک رشته الیاف دشوار است. از آنجائیکه ECC به عنوان یک کامپوزیت مهندسی شده شناخته می‌شود می‌توان با توجه به نتایج آزمایشات روی آن (آزمایشات خمشی، فشاری و کششی) و

بهره‌گیری از روش معکوس پارامترهای مجهول میکرومکانیکی را به‌دست آورد (شکل ۷-۹). در این راستا با توجه به نتایج آزمایشات S-ECC و مدل پیشنهادی Li مقادیر جدول ۷-۲ حاصل می‌شوند:

جدول ۷-۲: مقادیر پارامترهای میکرومکانیکی برای S-ECC

مشخصات الیاف		مشخصات لابه میانی			مشخصات ماتریس	پارامترهای کششی		معیار انرژی				معیار مقاومت
d_f (μm)	L_f (mm)	Oiling quantity (%)	τ (MPa)	f	E_m (GPa)	σ_{fc} (Mpa)	σ_{Peak} (Mpa)	ϵ_{tu} (%)	J_{tip} (j/m^2)	J'_b (j/m^2)	J_{tip}/J'_b	$\sigma_{peak}/\sigma_{fc}$
39	8	1.2	1.4	0.34	6750	2.5	5.1	4.5	5.9	28.6	4.87	2.04

۷-۶- مقایسه نتایج S-ECC و Li-ECC:

همانگونه که توضیح داده شد برای رسیدن به رفتار ترک‌خوردگی مویی متعدد دو معیار مقاومت و انرژی وجود دارد. به بیان دیگر برای رسیدن به این رفتار یک حاشیه اطمینان یا شاخص J'_b / J_{Tip} و $\sigma_{peak}/\sigma_{fc}$ در نظر گرفته می‌شود. مصالحی که در این مرزها قرار می‌گیرند توانایی بالقوه نشان دادن رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و ترک‌خوردگی مویی متعدد را دارند. برای PVA-ECC شاخص مقاومت برابر 1.45 و شاخص انرژی مقدار 3 در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مقادیر بدست آمده در بخش قبل می‌توان دو معیار مقاومت و انرژی حاکم بر رفتار ECC را برای S-ECC برآورده ساخت:

$$(\sigma_{ss}=2.5 \text{ MPa}) \leq (\sigma_{Peak}=5.1 \text{ MPa}) \quad (10-7)$$

$$(J_{Tip} = 5.9 \text{ J/m}^2) \leq (\sigma_{Peak} \cdot \delta_{Peak} - \int_0^{\delta_{Peak}} \sigma(\delta) d\delta = J'_b = 28.6 \text{ J/m}^2) \quad (11-7)$$

بنابراین در S-ECC شاخص مقاومت 2.04 و شاخص انرژی 4.87 است. حال با توجه به ارضا شدن معادلات ۷-۸ و ۷-۹ و قرارگرفتن شاخص‌های مقاومت و انرژی در حاشیه اطمینان می‌توان هدف اصلی این پایان‌نامه یعنی ادعای ساخت کامپوزیت ECC با مصالح موجود در کشور را اثبات کرد.

جدول ۳-۷: مقایسه پارامترهای میکرومکانیکی برای S-ECC و Li-ECC

ECC	مشخصات الیاف			مشخصات لایه میانی			پارامترهای کششی			معیار انرژی			معیار مقاومت
	d_f (μm)	L_f (mm)	E_f (Gpa)	Oiling quantity (%)	τ	f	σ_{fc} (Mpa)	σ_{Peak} (Mpa)	ϵ_{tu} (%)	J_{tip} (j/m^2)	J'_b (j/m^2)	J_{tip}/J'_b	$\sigma_{peak}/\sigma_{fc}$
S-ECC	39	8	42.8	1.2	1.4	0.34	2.5	5.1	4.5	5.9	28.6	4.85	2.04
Li-ECC No 1	39	12	42.8	0.0	2.44	0.5	3.11	4.89	0.99	5	3.6 - 6.6	0.73 - 1.33	1.57
Li-ECC No 2	39	12	42.8	0.3	2.15	0.5	2.63	4.72	1.55	5	5.1 - 13.7	1.03 - 2.76	1.79
Li-ECC No 3	39	12	42.8	0.5	2.14	0.5	2.35	4.09	2.73	5	7.6 - 13.6	1.54 - 2.72	1.74
Li-ECC No 4	39	12	42.8	0.8	1.98	0.5	2.9	4.62	3.81	5	12.5 - 20.7	2.5 - 4.14	1.59
Li-ECC No 5	39	12	42.8	1.2	1.11	0.5	2.92	4.41	4.88	5	24.2 - 38.1	4.84 - 7.62	1.51

فصل هشتم:

نتیجه گیری

۸-۱ جمع‌بندی:

در این فصل با توجه به مطالب ارائه شده در پایان‌نامه می‌توان یک جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کلی ارائه نمود. همان‌طور که ملاحظه شد ECC یا کامپوزیت سیمانی مهندسی شده نوع پیشرفته‌ای از HPFRC بر اساس کاربرد الیاف کوتاه از هم جدا با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ویژه است که در دهه اخیر تنها در برخی از کشورها توسعه یافته است. متأسفانه علی‌رغم رفتار منحصربفرد این بتن؛ تاکنون گزارشی مبنی بر ساخت آن در کشور منتشر نشده است. بر این اساس هدف اصلی پایان‌نامه ساخت این کامپوزیت برای اولین بار در ایران با استفاده از مصالح در دسترس و موجود در نظر گرفته شده است. در این راستا برای بررسی رفتار ECC تحت کشش مستقیم از مدل‌های مختلفی استفاده شده است اما هیچ‌کدام از مدل‌ها برای مدل‌سازی تمامی رفتار آن به‌کار نرفته است. در این پایان‌نامه سعی شده است که رفتار کلی کششی ECC مدل‌سازی شود. به‌طور کلی مطالب و نتایج قابل ذکر در این پایان‌نامه از ابتدا تا انتها را می‌توان در بندهای زیر جمع‌بندی نمائیم:

- بتن به‌عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح در صنعت دارای مزایا و معایب بسیاری است. مشهورترین ضعف بتن، تردشکنی و عدم شکل‌پذیری ذاتی آن است. تلاش‌های نخستین در راستای دستیابی به مصالح بتنی با شکل‌پذیری کششی منجر به کاربرد میلگردهای فولادی در بتن شد. پس از آن تحقیقات نشان دادند استفاده از بتن‌های الیافی می‌تواند شکل‌پذیری کششی را صدها برابر بتن معمولی افزایش دهد.
- بتن‌های الیافی بر اساس نوع رفتار خود به دو دسته با رفتار نرم‌شوندگی کرنشی (کاهش تنش تحمل شده با افزایش ظرفیت کرنشی) و بتن الیافی با شکل‌پذیری بالا (HPFRCC) که از خود رفتار سخت‌شوندگی کرنشی (افزایش تنش تحمل شده همراه با افزایش ظرفیت کرنشی) را از خود نشان می‌دهد؛ تقسیم می‌شود.
- در حالیکه HPFRC در مقابل بتن معمولی خواص کششی بسیار مطلوبی را از خود نشان می‌دهد؛ اما تا سالها بدلیل محدودیت اقتصادی و عدم قابلیت ساخت آسان در پروژه‌های صنعتی (بتن

کارگاهی) ناشی از کاربرد الیاف پیوسته با درصدی بالا؛ تنها به آزمایشگاه‌های پژوهشی یا کارکردهایی تخصصی محدود بوده است

- معیارهای سنتی و متداول مقاومت مصالح به تنهای برای سازه‌های بتنی کافی نبوده و لازم است از علم مکانیک شکست استفاده شود. مکانیک شکست بر روی این فرضیه واقع‌بینانه که تمام مواد دارای نقص‌های شبه‌ترک بوده و این هسته اولیه آغاز شکست است؛ بنا شده است.
- تئوری‌های معمول که برای شکست مصالح تُرد توسعه یافته‌اند شکست بتن را به درستی تشریح نمی‌کنند. در واقع بتن نسبت به مصالح شکننده ایده‌آل به دلیل طبیعت غیرهموزن پیچیدگی بیشتری داشته و بعنوان یک ماده شبه شکننده به‌شمار می‌آید.
- برای کاربرد مکانیک شکست در بتن از مدل‌های مختلفی از جمله مدل ترک مجازی، مدل ترک الاستیک موثر، مدل ترک نواری و... استفاده می‌شود.
- در بتن الیافی مکانیک شکست به اندازه، هندسه، مشخصات مکانیکی الیاف، ماتریس و پیوستگی میان آنها بستگی دارد. در این راستا ناحیه دوزنده ترک FPZ نقش عمده‌ای را بازی می‌کند. برای تعیین پارامترهای مکانیک شکست بتن الیافی از آزمایش خمش تیر شکاف‌دار استفاده می‌شود.
- ECC نوع پیشرفته‌ای از HPFRC بر اساس کاربرد الیاف کوتاه از هم جدا نظیر پلی‌اتیلن یا پلی‌وینیل الکل با توزیعی تصادفی و در حجمی متوسط است. مشخصه اصلی این کامپوزیت به لحاظ خصوصیات بهبود رفتار کششی با شکل‌پذیری زیاد ناشی از قابلیت ترک‌خوردگی متعدد است
- ویژگی‌های منحصر بفرد ECC در مقابل FRC عبارتند از پروسه ساخت انعطاف‌پذیر (پیش‌ساختگی یا بتن‌ریزی در محل)، الیاف کوتاه در حجم متوسط (کاهش هزینه و وزن)، کارایی بالا (بهبود مقاومت، شکل‌پذیری، چقرمگی شکست و رفتار سخت‌شوندگی کرنشی).
- کامپوزیت سیمانی مهندسی شده استحکام فشاری حدود 20-95 MPa، استحکام کششی حدود 4-12 MPa، کرنش کششی حدود 3-8%، مدول الاستیسیته 18-34 GPa و مقاومت خمشی 10-30 MPa را دارد.

- برای طراحی ECC از علم میکرومکانیک استفاده می‌شود. علم میکرومکانیک بخشی از مکانیک کاربردی است که در سطح ساخت ماده اعمال شده و تعاملات و اندرکنش‌های مکانیکی میان اجزای سازنده را مد نظر قرار می‌دهد.
- بنیادی‌ترین خصیصه یک کامپوزیت پایه سیمانی سیمانی مسلح به الیاف ویژگی پل‌زنی الیاف از میان ترک‌های ماتریس و انتقال تنش کششی در میان ترک‌ها است. میکرومکانیک پیوند میان اجزاء سازنده کامپوزیت (الیاف، ماتریس و سطح مشترک) را با رفتار الیاف (منحنی $\sigma-\epsilon$ الیاف مدفون در ماتریس) برقرار می‌سازد و در حالت بالاتر از طریق آنالیز حالت ترک پایا با رفتار کلی کامپوزیت نیز ارتباط برقرار می‌کند.
- لازمه رسیدن به رفتار شکل‌پذیر و شکل‌گیری ترک‌های مویی فزاینده تحت تنش برقراری دو معیار مقاومت و انرژی است.
- بر این اساس تنش پل‌بندی حداکثر که توسط الیاف در قسمت ترک‌خورده اعمال می‌شود، باید از استحکام اولیه ترک‌خوردگی ماتریس بیشتر شود. تامین این معیار تضمین می‌دهد تنش کشش وارده بعد از ترک‌خوردگی توسط الیاف تحمل شود که به عنوان معیار مقاومتی شناخته می‌شود.
- بر اساس معیار انرژی لازم است مود گسترش ترک با استفاده از انرژی گسترش ترک کنترل گردد. این شرط تعادل انرژی بین کار خارجی (انرژی لازم برای انتشار ترک در ماتریس) و انرژی مصرفی در پل‌بندی الیاف را برقرار می‌سازد.
- بهترین راه برای نمایش رفتار غیرخطی در FRC استفاده از آزمایشات کشش مستقیم و خمش چهارنقطه‌ای است. برای تعیین پاسخ کششی لازم به تعیین سه پارامتر مهم مقاومت کششی اولین ترک خوردگی، مقاومت کششی نهایی و کرنش کششی نهایی است که از آزمایش کشش مستقیم بدست می‌آیند.
- آزمایش کشش مستقیم آزمایشی پیچیده است که برای انجام آن توجه به نکاتی از جمله نیاز به آزمایشگاه پیشرفته با تجهیزاتی پیشرفته، گرانیقیمت و حساس، نیاز به نیروی ماهر، کنترل مداوم

ست آزمایشگاهی در حین آزمایش، زمانبر بودن، دقت بالای ابعاد نمونه، کنترل و جلوگیری از انقباض و تغییر ابعاد نمونه، کنترل یکنواختی مخلوط هنگام میکس و قالب، کنترل و جلوگیری از ایجاد تمرکز تنش در نقاط تکیه‌گاهی، عدم ترک خوردگی نمونه حتی در مقیاس میکرومتر ضروری است.

- با توجه به شرایط پیچیده آزمایش کشش مستقیم می‌توان از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای به عنوان روشی جایگزین و ساده استفاده کرد. بر این اساس هدف نهایی از آزمایش FPBT استفاده از نمودارهای لنگر-انحنا و لنگر-تغییر مکان بمنظور محاسبه پارامترهای کشش محوری از طریق آنالیز معکوس است.
- بهترین راه برای نمایش رفتار غیرخطی در FRC استفاده از آزمایشات کشش مستقیم و خمش چهار نقطه‌ای است. برای تعیین پاسخ کششی لازم به تعیین سه پارامتر مهم مقاومت کششی اولین ترک خوردگی، مقاومت کششی نهایی و کرنش کششی نهایی است که از آزمایش کشش مستقیم بدست می‌آیند.
- به کارگیری آنالیز معکوس بمنظور استخراج پارامترهای کششی از آزمایش خمش برای اولین بار توسط Ostergarad و Kanakubo در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ انجام گرفته است.
- در روش Ostergarad از آنالیز معکوس آزمایش خمش و استفاده از مدل مفصل استفاده شده است. در این روش نمودار تنش-کرنش فشاری به صورت دوخطی ساده‌سازی شده و تنها در نقطه حد نهایی حل شده است.
- در روش Kanakubo با استفاده از آنالیز معکوس آزمایش خمش مقادیر مقاومت کششی و ظرفیت کرنش کششی محاسبه شده است. نمودار تنش-کرنش کششی به صورت دوخطی با شیب صفر و بینهایت ساده‌سازی شده و تنها در حالت حد نهایی حل انجام گرفته است.
- تابحال روشی برای مدل‌سازی رفتار ECC به طور کامل انجام نشده است.

۸-۲ فعالیت‌های انجام گرفته:

- بررسی مبانی مکانیک شکست و مکانیک شکست بتن
- بررسی رفتار کلی ECC
- بررسی رفتار ECC از دیدگاه میکرومکانیک
- ساخت ECC با استفاده از مصالح موجود در کشور
- ارائه مدل خمشی برای مدل‌سازی رفتار کششی ECC و استفاده از روش آنالیز معکوس
- حل مدل ارائه شده برای تمامی نقاط و مدل‌سازی رفتار کلی کششی ECC
- برقراری معیارهای مقاومت و انرژی بمنظور اثبات ساخت ECC
- محاسبه پارامترهای میکرومکانیکی ECC ساخته شده و مقایسه با مقادیر مرجع

۸-۳ نتایج حاصله:

- تنش اولین ترک‌خوردگی برای ECC ساخته شده برابر 2.5 MPa در نظر گرفته شده است.
- کرنش اولین ترک‌خوردگی برای ECC ساخته شده مساوی 0.03% است که با توجه به نحوه طراحی ECC در افزایش ظرفیت کششی و بالابردن شکنندگی ماتریس؛ کرنش اولین ترک‌خوردگی بالاتر S-ECC نسبت به حالت مرجع نتیجه مطلوبتری را نشان می‌دهد.
- مقاومت کششی نهایی برای ECC ساخته شده مساوی 5.1 MPa است که نسبت به حالت مرجع نتیجه مطلوبتری را نشان می‌دهد.
- کرنش نهایی کششی در حالت سخت‌شوندگی کرنشی برای ECC ساخته شده مساوی 4.5% است که در مقایسه با ظرفیت کششی FRC با مقدار 0.035% بخوبی رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و در واقع ساختار مناسب یک ECC را برای آن نمایان می‌سازد.

- تنش فشاری برای برای ECC ساخته شده، مقداری تقریباً یکسان برابر مرجع و برابر 68.5 MPa بدست آمده است.
- کرنش فشاری برای برای ECC ساخته شده مساوی % 0.75 است که با توجه به نحوه طراحی ECC در افزایش ظرفیت کششی و حتی فشاری؛ و بالا بودن کرنش فشاری؛ نتیجه مطلوبتری را نسبت به حالت مرجع نشان می‌دهد.
- مقدار سختی یا همان مدول الاستیسیته ماتریس برای برای ECC ساخته شده مساوی 6.75 MPa محاسبه شده است.
- تنش خمشی یا همان مدول راپچر برای برای ECC ساخته شده مساوی 7.6 MPa بدست آمده است.
- برای ECC ساخته شده شاخص مقاومت 2.04 و شاخص انرژی 4.87 بدست آمد. با توجه به حاشیه اطمینان شاخص‌های مقاومت و انرژی یعنی مقادیر 1.45 و 3 می‌توان هدف اصلی این پایان‌نامه یعنی ادعای ساخت کامپوزیت ECC با مصالح موجود در کشور را اثبات کرد.

۴-۸ پیشنهادات:

موارد زیر در راستای بهبود و ادامه این تحقیق پیشنهاد می‌شود:

- ۱- همانگونه که توضیح داده شده به دلیل شکننده بودن ماتریس ECC و درصد بالای انقباض امکان اندازه‌گیری طاقت ماتریس از طریق آزمایش مستقیم امکان‌پذیر نشد، در این راستا طراحی قالبی ویژه بمنظور ایجاد کمترین نیرو هنگام قالب‌برداری و محاسبه مقدار دقیق طاقت ماتریس پیشنهاد می‌شود.

۲- با توجه به شرایط پیچیده آزمایش کشش مستقیم در این پایان‌نامه از روش مدل‌سازی خمشی استفاده شده است. به منظور تصحیح مدل پیشنهادی توصیه می‌شود نتایج مدل با آزمایش کشش مستقیم اعتبارسنجی شده و در صورت نیاز ضرایب تصحیح محاسبه شوند.

۳- با توجه به طرح اختلاط‌های انجام شده توصیه می‌شود برای بهینه شدن مقادیری همانند کرنش کششی از طرح اختلاط‌های بیشتری استفاده شود.

۴- بمنظور دستیابی به هدف نهایی یعنی کاربرد ECC در صنعت، انجام آزمایشات مختلف بر روی المان‌های سازه‌ای از ECC ساخته شده همانند المان‌های ستون، تیر، دیوار برشی و اتصالات تیر به ستون از ECC یا R/ECC توصیه می‌شود.

۵- با توجه به نوپا بودن ساخت ECC تاکنون در بسیاری از زمینه‌های آن همانند قابلیت‌های خودترمیمی، بتن‌پاشی و سازگاری با محیط زیست تحقیقات محدودی انجام گرفته است که با توجه به اهمیت آنها به بررسی این موارد توصیه می‌شود.

۶- پدیده ترک‌هایی مویی متعدد در ECC که پایه‌گذار ویژگی‌های منحصر بفرد این کامپوزیت است تا بحال مدل‌سازی نشده است. با توجه به نوع رفتار ECC؛ مدل‌سازی الگوی ترک‌خوردگی آن در شرایط مختلف بارگذاری با روش Lattice Beam و روش‌های المان محدود پیشنهاد می‌شود.

مراجع:

- ۱- قاجار.رحمت ا...، (۱۳۸۱)، "مقدمه‌ای بر مکانیک شکست"، جلد اول، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، چاپ اول.
- 2- Povics S., (1998), "*Strength and Related Properties of Concrete, A Qualitative Approach*", John Wiley & Sons.Inc.
- 3- Broek D. (1984), "*Elementary Engineering Fracture Mechanics*", 3st ed, Martinus Nijhoff Publishers.
- 4- Groos d. and Seeling T., (2006), "*Fracture Mechanics with an Introduction to Micromechanics*", Springer.
- 5- Gdouts E.E., (2005), "*An Introduction to Fracture Mechanics*", 2st ed. Springer.
- 6- ACI Committee 446.1R, (2004), "*Fracture Mechanics of Concrete: Concepts, Models and Determination of Material Properties*", ACI Manual of Concrete Practice.
- 7- Karihaloo, B.L., (1995), "*Fracture Mechanics and Structural Concrete*", Longman Scientific and Technical.
- 8- Reda M.M and Shrive N.G, (2001), "Fracture Mechanics of Concrete", *Fracture of Civil Engineering Materials*, ENCI617, Fracture of Concrete-Lecture Notes.
- 9- Larbi J.A., (1993), "*Micromestruure of the Interfacial Zone around Aggregate Particles in Concrete*", Heron, Vol.38, No.1.
- 10- Barenblatt G.I., (1962), "*The Mathematical Theory of Equilibrium of Cracks in Brittle Fracture*", Advances in Applied Mechanics, Vol., PP %%-129.
- 11- Hillerborg A. and Modeer M. and Petersson P.E., (1976), "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Element", *Journal of Cement and Concrete Research*, Vol.6, PP.773-782.
- 12- Bazant Z.P. and Oh B.H., (1983), "Crack Band Theory for Fracture of Concrete", *Journal of Materials and Structures*, RILEM, Vol.16, PP.155-177.

13- Jenq Y.S and Shah S.P., (1985), "A Two Parameter Fracture Model for Concrete", *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol.111, No.4, PP.1227-1241.

14- Cotterell B. and ManiY.M, (1996), "*Fracture Mecahnics of Cementitious Materials*", Chapman & Hall, 1st Edition.

۱۵- کاظمی. محمد تقی، (۱۳۸۱)، "مکانیک شکست بتن الیافی"، کنفرانس تخصصی تکنولوژی بتن الیافی، دانشگاه صنعتی شریف.

16- Nelson P.K and Li V.C. and Kamada T, (2002), "Fracture Toughness of Microfiber Reinforced Cement Composite", *Jornal of Advanced Materials in Civil Engineering*, Vol.1, No.1, P384-391.

17- Romualdi N.P. and Batson G.B., (1963), "Mechanics of Crack Arrest in Concrete", *ASCE Engineering Mechanic Journal*, 89(EM3), PP.147-168.

18- Aveston J. and Cooper G.A. and Kelly A., (1971), "Single and multiple fracture in The Properties of Fiber Composites" *IPC Science and Technology Press Guildford U.K Conference*, PP15–24.

19- Krenchel H. and Stang H., (1989), "Stable Microcracking in Cementitious Materials", *In Brittle Matrix Composites 2*, A.M. Brandt and J.H. Marshall, eds., PP.20-33. Elsevier Applied Science.

20- Naaman A.E., (1992), "SIFCON: tailored properties for structural performance", *In High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites*, Reinhardt H.W. and Naaman A.E., Eds., pp.18–38. E&FN Spon, London.

21- Li V.C., (1993), "From Micromechanics to Structural Engineering: The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications", *JSCE J. of Strucural Mechanics and Earthquake Engineering*, Vol 10(2), PP37-48.

22- Fischer G. and Wang S. and Li V.C., (2003), "Design of engineered cementitious composites for processing and workability requirements", *In Proceedings of the Seventh International Symposium on Brittle Matrix Composites*, October 13–15, Warsaw, Poland, PP29–36.

- 23- Li V.C. and Wang S., (2002) “Failure Mode and Structural Ductility of GFRP Reinforced Engineered Cementitious Composite Beams”, *ACI Materials J.* 99(1), PP11.
- 24- Yang E.H. and Yang Y., and Li V.C., (2007), “Use of High Volumes of Fly ash to Improve ECC Mechanical Properties and Material Greenness”, *ACI Material Journal*, 104(6), PP620–628.
- 25- Lepech M.D. and Li V.C. and Robertson R.E. and Keoleian G.A., (2007), “Design of Ductile Engineered Cementitious Composites for Improved Sustainability”, *ACI Material Journal*.
- 26- Wang S. and Li V.C., (2006), “High Early Strength Engineered Cementitious Composites”, *ACI Material Journal*, 103(2), PP97–105.
- 27- Wang S. and Li V.C., (2003), “Materials Design of Lightweight PVA-ECC”, *In Proc., HPFRCC*, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, eds., PP.379-390, Ann Arbor, MI.
- 28- Li V.C. and Lepech M. and Wang S. and Weimann M. and Keoleian G., (2004) “Development of Green ECC for Sustainable Infrastructure Systems”, In *Proceeding, Int’l Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, K. Wang, ed, PP.181-192, Iowa State University.
- 29- Li V.C. and Yang E.H., (2007) “Self-healing in Concrete Materials”, *Self-Healing Materials Conference: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*, van der Zwaag, S., Ed., PP.161-193, Springer, New York.
- 30- Li V.C., (1997), “Engineered Cementitious Composite-Tailored Composites Through Micromechanical Modeling”, *To appear in Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future*, Eds: N. Banthia, A. Bentur, and A. Mufti, Canadian Society of Civil Engineers.
- 31- Li V.C. and H.C. Wu and M. Maalej and D.K. Mishra and T. Hashida, (1996), “Tensile Behavior of Cement Based Composites with Random Discontinuous Steel Fibers”, *Jurnal of American Ceramics Soc.*, 79 (1) 1996, PP.74-78.

- 32- Li V.C. and Mishra D.K. and Wu H.C., (1995), “Matrix Design For Pseudo Strain-Hardening Fiber Reinforced Cementitious Composites”, *RILEM Journal Materials and Structures*, 28 (183), PP.586-595.
- 33- Maalej M. and Li V.C., (1994), “Flexural/Tensile Strength Ratio In Engineered Cementitious Composites”, *ASCE Journal. of Materials in Civil Engineering*, 6(4), PP.513-528.
- 34- Li V.C. and Maalej M. and Lim, Y.M., (1995), “Fracture and Flexural Behavior In Strain- Hardening Cementitious Composites”, *Fracture of Brittle, Disorder Materials: Concrete, Rock and Ceramics*, Eds. G. Baker and B.L. Karihaloo, PP.101-114.
- 35- Maalej M. and Hashida T. and Li, V.C., (1995), “Effect Of Fiber Volume Fraction On The Off-Crack-Plane Fracture Energy In Strain-Hardening Engineered Cementitious Composites”, *ASCE Journal. of Materials in Civil Engineering* 78 (12) 1995, PP3369-3375.
- 36- Li V.C. and Leung C.K., (1992), “Steady State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites”, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 118 (11), PP.2246-2264.
- 37- Li V.C., (2008), “Engineered Cementitious Composites (ECC) – Material, Structural, and Durability Performance,” *Concrete Construction Engineering Handbook*, Chapter 24, Ed. E. Nawy, published by CRC Press.
- 38- Li V.C. and Fischer K.E., (2005), “ Reinforced ECC an Evolution from Materials to Structures”, *1st Fiber Reinforced Composite Conference*.
- 39- Fischer G., and Li V.C., (2003), “Deformation Behavior of Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Engineered Cementitious Composite (ECC) Flexural Members under Reversed Cyclic Loading Conditions” *ACI Structural Journal* 100(1), PP.25-35.
- 40- Kesner K.E. and Billington S.L., (2005), “Investigation of Infill Panels Made from Engineered Cementitious Composites for Seismic Strengthening and Retrofit”, *ASCE Journal Structural Engineering*, 131(11), 712–720.

- 41- Fukuyama H. and Iso M. and Ogawa A. and Suwada, H., (2007), "Mitigation of Damage due to Crack of RC Elements Utilizing High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites", *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites Conference 5 (HPFRCC 5)*, Reinhardt and Naaman, eds., PP.427-435, RILEM Publication S.A.R.L.
- 42- Maalej M. and Leong K.S., (2005), "Engineered Cementitious Composites for Effective FRP-Strengthening of RC Beams", *Journal of composites Science and Technology*.
- 43- Li V.C. and Lepech M., (2004), "Crack-Resistant Concrete Material for Transportation Construction", *In Proceedings of the Transportation Research Board 83rd Annual Meeting, Compendium of Papers CD-ROM*, Paper 04-4680, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- 44- Li V.C. and Fischer G. and Kim Y.Y. and Lepech, M., Qian, S., Weimann, M., Wang, S. (2003), "Durable Link Slabs for Jointless Bridge Decks Based on Strain-hardening Cementitious Composites", *Report for Michigan Department of Transportation RC-1438*.
- 45- Li M. and Şahmaran M. and Li V.C., (2007), "Effect of Cracking and Healing on Durability of Engineered Cementitious Composites under Marine Environment", *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites Conference (HPFRCC5)*, H.W. Reinhardt and A.E. Naaman, eds., PP.313-322, Mainz, Germany.
- 46- Sahmaran M. and Li V.C., (2007) "De-icing salt scaling resistance of mechanically loaded engineered cementitious composites", *Journal of Cement Concrete Research*, 37, PP.1035–1046.
- 47- Yang Y. and Lepech M.d. and Li V.C., (2009), "Autogenous Healing Of Engineered Cementitious Composite Under Wet Dry Cycles", *Elsevier, CemCon-03869*.
- 48- Termkhajornkit, P. and Nawa, T., (2009), "Self-Healing Ability of Fly Ash-Cement System," *Elsevier, CemCon* 198-203.
- 49- Li V.C., (2003), "Reflections on the Research and Development Of ECC", *Advanced Civil Engineering Materials Research Laboratory (ACE-MRL), Department*

of Civil and Environmental Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109- 2125, USA, PhD.

50- Maalej M., Hashida T. and Li, V.C., (1995), "Effect Of Fiber Volume Fraction On The Off-Crack-Plane Fracture Energy In Strain-Hardening Engineered Cementitious Composites", *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites Conference*, 78 (12), pp. 3369-3375.

51- Naaman A. E. and Reinhardt H. W, (1996) "Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites - HPRCC," *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites Conference2 (HPRCC2)*, PP.1-23.

52- Li, V.C, (1993), "From Micromechanics to Structural Engineering –The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications", *JSCE Journal. Of Strucural Mechanics and Earthquake Engineering*, Vol 10(2), PP.37-48.

53- Li V.C, (2003), "On Engineered Cementitious Composite- A Review of the Material and Its Applications", *Journal of Advanced Concrete Technology Japan*, Vol. 1, No. 3, 215-230.

54- Li, V. C. and Leung, C. K. Y. (1992), "Steady State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 118 (11), PP.2246-2264.

55- Marshall D.B and Cox B.N, (1988), "Method for Calculating Steady-State Matrix Cracking Stress in Composite", *Journal of Mechanics of Materials*, Vol7, PP.127-133.

56- Li V.C., (2007), "Integrated Structures and Materials Design", *RILEM Journal of Materials and Structures*, 40(4), PP.387-396.

57- Wang S. and Li V.C., (2006), "Polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites: Material Design and Performances", in *Proc., Int'l RILEM Workshop HPRCC in Structural Applications*, Eds. Fischer, G., and V.C. Li, published by RILEM SARL, PP.65-73.

58- ACI Committee 544.2R, (2004)"Measurment of Properties of Fiber Reinforced Concrete", *ACI Manual of Concrete Practice*.

- 59- Chote Soranakom C. and Mobasher B., (2008), “Correlation of Tensile and Flexural responses of strain softening and Strain Hardening Cement Composites”, *Cement & Concrete Composites Journal*, Vol.30, PP.465–477.
- 60- Qian S. and Li V.C. (2007), “Simplified Inverse Method for Determining the Tensile Strain Capacity of Strain Hardening Cementitious Composites”, *Journal of Advanced Concrete Technology* 5(2), PP.235-246.
- 61- ?stergaard L. and Walter D. and Olesen J.F., (2008), “Method for Determination of Tensile Properties of Engineered Cementitious Composites (ECC)”, *Journal of Technical University of Denmark, Denmark*.
- 62- Kanakubo T. and Shimizu K. and Katagiri, M. and Kandra and T. Fukuyama, (2008), “Tensile Properties for DFRCC”, *Results of Round Robin Test by JCI Technology Committee Proc. JCI Symp. on DFRCC*, PP.101-111.
- 63- Kanakubo T. and Shimizu K. and Katagiri, M. and Kandra and T. Fukuyama, (2007), “Tensile Characteristics Evaluation of DFRCC”, *Results of Round Robin Test by JCI Technology Committee Proc. JCI Symp. on DFRCC*, PP.200-211.
- 64- Qian S. and Li V.C, (2008), “Simple Quality Control Method for the Tensile Strength of Strain Hardening Cementitious Composite”, *Advances in Civil Engineering Materials The 50-year Teaching and Research Anniversary of Prof. Sun Wei*.
- 65- Kanda T. and, Zhong Lin Z. and Li V.C., (2000), Tensile Stress-Strain Modeling of Pseudo Strain Hardening Cementitious Composite”, *ASCE of Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.12, No.2.
- 66- Kabele k., (2007), “Multiscale Framework for Modeling of Fracture in High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites”, *Journal of Engineering Fracture Mechanics* Vol.74, PP194–209.
- 67- Li V.C. and Wang S., (2006), “Microstructure Variability and Macroscopic Composite Properties of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites”, *Journal of Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 21, No.3, PP.201-206.

پیوست الف:

مشخصات مصالح مصرفی

الياف PVA محصول شركة Kuralon:

Mechanical Properties of PVA Fiber

Fiber	Diameter (μ)	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Strain Capacity (%)	Density (g/cm ³)
REC7	26	1560	40	6.5	1.3
REC(S)15	40	1560	40	6.5	1.3
REC(S)100L	100	1230	30	12.5	1.3

High Tensile Strength and High Elastic Modulus

Tensile Strength and elastic modulus of PVA fiber are higher than those of another organic fiber. PVA fiber has enough strength to bridge crack of cementitious matrix.

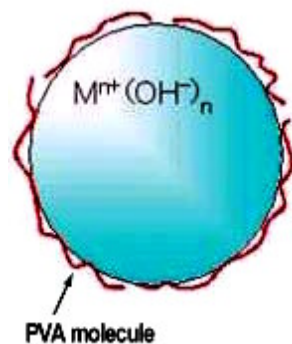
Good Affinity to the Cementitious Matrix

PVA fiber has suitable adhesion to cementitious matrix. Appropriately interaction between fiber and matrix decreases stress localization.

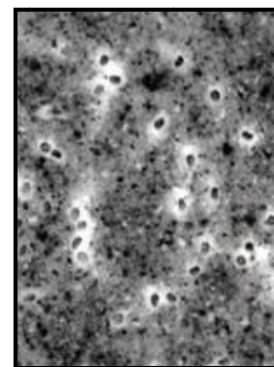
Good Alkaline Resistance

PVA fiber has good alkaline resistance. PVA fiber is hardly damaged by alkaline matrix.

The Mechanism of PVA-fiber's Affinity to Cement

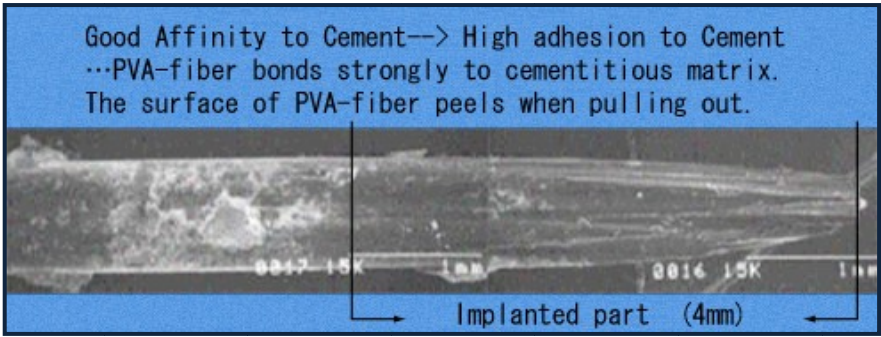


Inspection of the interface of PVA-fiber/
PVA- Matrix with electronic microscope
(fiber's fiber : Kuralon K-IITM REC15
diameter : 0.04mm) Matrix :
cement/water=100/40 (weight)



In alkali environment, PVA molecule
adsorb the corpuscle of is easy to
(H. Yokoi etc., J. Am. hydroxide.
Soc., 108, pp3358-, 1986)

Pull-out behavior of PVA-fiber



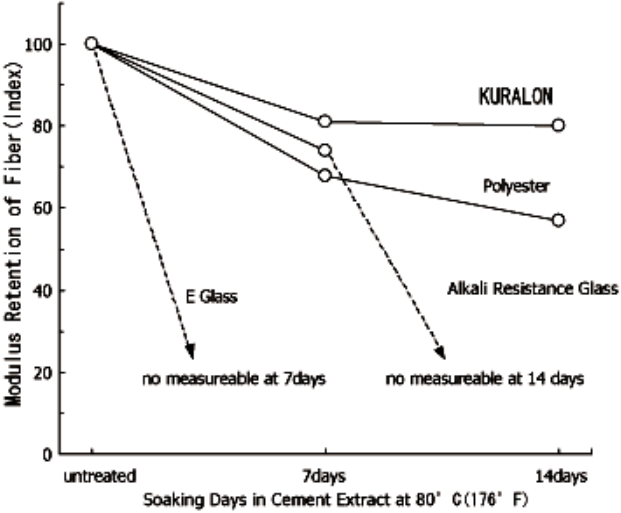
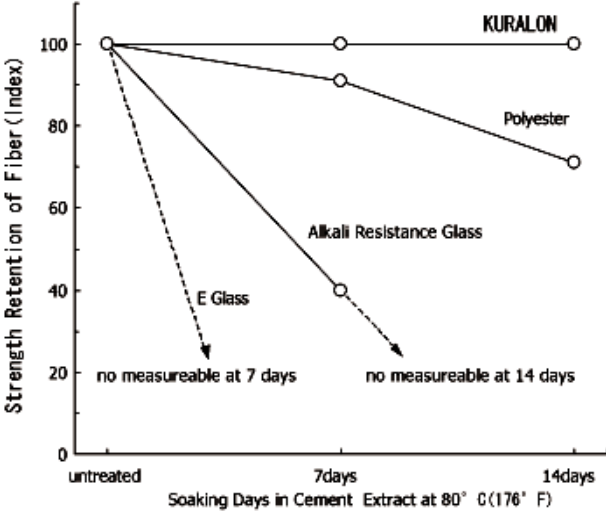
The edge part of PVA-fiber pulled-out from cementitious matrix: electronic microscope picture

Fiber : Kuralon™ RF4000 (fiber's diameter : 0.67mm)

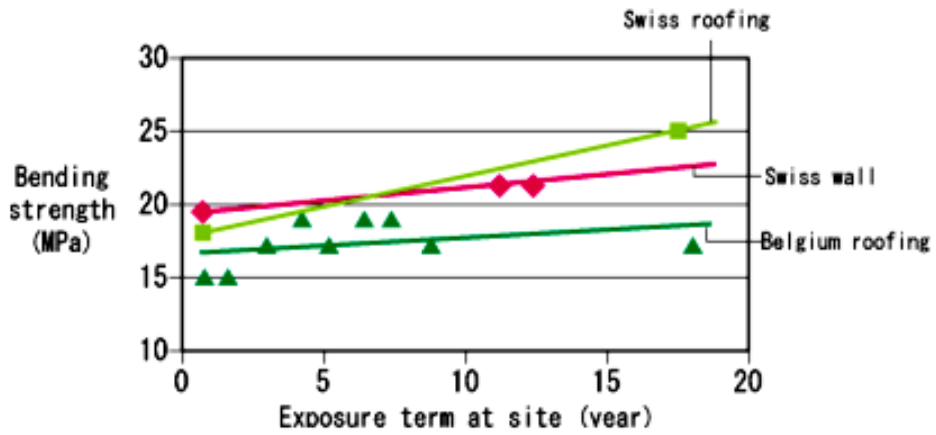
Matrix : cement/water=100/40 (weight)

Durability

*Comparison with other fibers:

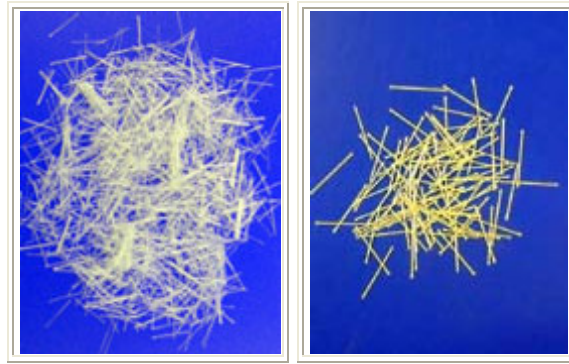


*PVA fibers-reinforced fiber cement boards have survived 20 years in the field without any loss of strength



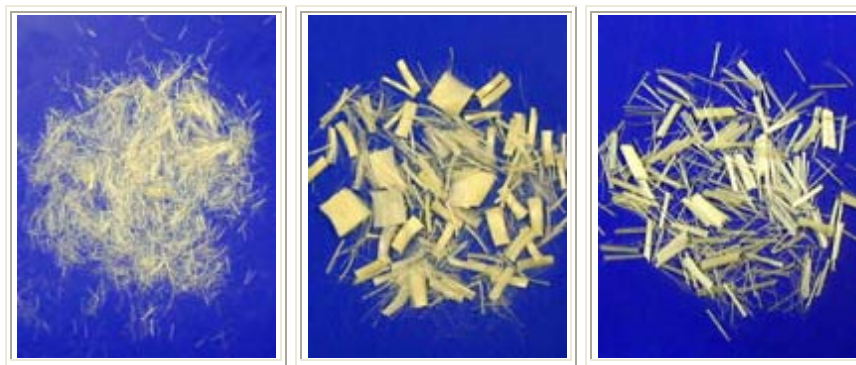
Kuralon™ & Kuralon™ REC Property

Type	Cut length (mm)	Diameter (mm)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Tensile modulus (GPa)	Bag	Main application
RF400	6,12	0.2	1000	8	29	15kg	Mortar, Concrete
RFS400	18	0.2	1000	8	29	15kg	Mortar, Concrete
RF4000	30	0.66	880	7	29	10kg	Concrete
RECS7	6	0.027	1600	6	37	7-9kg	roofing/Mortar
REC15	6,8,12	0.040	1600	6	40	18kg	Mortar
REC100	6,12	0.10	1100	10	25	15kg	Mortar, Concrete
RECS100	12	0.10	1100	10	25	15kg	Mortar, Concrete
RSC15X8	8	0.040	1300	6	30	15kg	Mortar, Concrete



RFS400

RF4000 30mm



RECS7 6mm

REC15 12mm

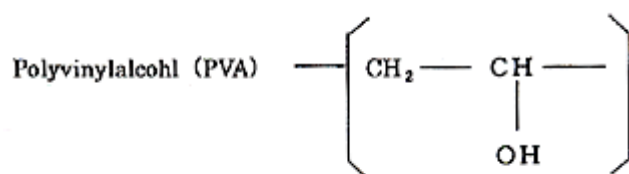
REC100L 12mm

PVA-fiber vs. other fibers

Type	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Tensile modulus (GPa)	Specific Gravity (g/cm ³)	Durability	Affinity to cement	Cost performance	Remarks
PVA-fiber	880-1600	6-10	25-41	1.3	E	E	E	-
PP	600	25	5	0.95	G	N	G	Floats in water
HCPE	2700	5	120	0.98	G	N	N	Expensive
Aramide	3000	4	100	1.4	N	G	N	Expensive
Carbon	3500	0-2	250	1.7	E	N	N	Expensive
Steel	1200	3-4	200	7-8	G	N	G	Heavy, rusts
ARG	2200	0-4	80	2.5	N	N	N	Weak in alkali

Safety

PVA resin, which is the raw material of PVA-fiber, is designated by the F.D.A (U. S. Food and Drug Administration) as a safe material. PVA's chemical structure is based solely on carbon, hydrogen and oxygen. When burned, harmful substances such as dioxin and ammonia are not created.



*This structure is quite different from polyvinyl chloride.

Toxicity

Fiber	The number of living rats					
	5min.	10min.	15min.	20min.	30min.	24hrs.
PVA-fiber	5	5	5	5	5	5
Polyacrylonitrile-fiber	0	-	-	-	-	-
Polyamide-fiber	5	5	5	5	5	4
Metha-alamide-fiber	5	5	5	5	5	0
Wool	5	2	2	1	1	-

Test Method:

- 1) 5 rats were used in each test.
- 2) Each 10g of fiber was heated at 400 deg C in the fireplace and rats were inserted into the smoking gas.
- 3) The number of living rats was checked at every fixed time.

Conclusion) The data clearly demonstrate PVA's superior safety in the event of fire.

Gas density

Gas	CO		CO ₂		NH ₃		HCN		H ₂ S	
	600	400	600	400	600	400	600	400	600	400
Temp. Fiber	600	400	600	400	600	400	600	400	600	400
PVA-fiber	0.45	0.13	0.59	0.13	-	-	-	-	-	-
Polyacrylonitrile-fiber	1.33	0.16	0.15	0	0.06	0.05	0.09	0.02	-	-
Polyamide-fiber	0.88	0.10	0.40	0.01	0.05	traces	0.03	0	-	-
Cotton	4.33	0.46	0.75	0.34	-	-	-	-	-	-
Wool	2.00	0.10	0.59	0.15	0.10	0.06	0.05	0.01	0.04	0.05



KURARAY CO., LTD.

Kuralon for Mortar and Concrete Products

Type	Diameter (micron)	Length (mm)	Tensile strength (GPa)	Modulus (GPa)	Usage	Note
RECS7	26	6	1.6	39	Mortar	Resin-Bundled type
RSC15	40	8	1.4	35	Mortar, Concrete	Cracking Control
REC15	40	8	1.6	42	Mortar	
RECS100	100	12	1.2	29	Mortar	Resin-Bundled type
RF400	200	12	1.0	30	Mortar, Concrete	
RFS400	200	18	1.0	30	Mortar, Concrete	Resin-Bundled type
RF1000	310	15	1.0	29	Mortar, Concrete	
RF4000	660	30	0.8	29	Concrete	



Kuraray Europe GmbH
Sehms-Strasse 68 D-40549
Düsseldorf, Germany
Tel: +49-211-53888 31
FAX: +49-211-5388848
URL: <http://www.kuraray.de>

Vand Superplast PCE

استاندارد مرجع
ASTM C 494
Type F



کد کالا
۵۰۱

فوق روان کننده - پی، سی، پی

نسل جدید فوق روان کننده ها برای تولید بتن خود تراکم
Superplasticizer for Self Consolidating Concrete (SCC)



Vand Superplast PCE ، نسل جدید فوق روان کننده ها ویژه ساخت بتن خود تراکم (SCC) بدون نیاز به ویریه و یا انرژی اضافی جهت تراکم و فاقد هر گونه جداشدگی . امروزه با استفاده از فوق روان کننده های موجود به راحتی می توان بتن های روانی تا قوام و اسلامپ ۲۲ سانتیمتر تولید کرد اما این بتن ها همچنان برای کسب تراکم مطلوب و جایگیری در تمام ابعاد قالب و پیرامون آرماتورها نیاز به عملیات ویریه دارند. فوق روان کننده های نسل جدید مانند Vand Superplast PCE جهت برطرف نمودن این نقیصه تولید و به بازار عرضه شده اند.

موارد مصرف

Vand Superplast PCE موجب ابداع تکنولوژی جدیدی در صنعت ساختمان گردید تا به کمک آن بسیاری از مشکلات موجود در اجرا و استقرار بتن برطرف گردد. این تکنولوژی جدید، ساخت بتن خود تراکم یا Self Consolidating Concrete می باشد با موارد کاربرد:

- مقاطع باریک و با تراکم آرماتور بالا
- دالها و پی های با تراکم آرماتور بالا
- لاینینگ تونل ها
- سرریز سدها
- قطعات پیش ساخته
- سازه های پیش تنیده و پس تنیده

خواص ویژه

Vand Superplast PCE ، بدون نیاز به مصرف آب اضافی کارایی بتن را به میزان قابل توجهی بهبود بخشیده و ساخت بتن خود تراکم (SCC) را ممکن می سازد. خواص ویژه این بتن عبارتند از:

- به هیچ گونه ویریه و یا انرژی جهت تراکم نیاز ندارد
- قوام و چسبندگی مطلوبی دارد
- فاقد جداشدگی می باشد (No Segregation)
- فاقد آب انداختگی می باشد (No Bleeding)
- چسبندگی بین بتن و آرماتور بسیار عالی است.

مقدار مصرف

Vand Superplast PCE ، به میزان ۰/۲ الی ۱/۲ درصد وزن سیمان می تواند مورد استفاده قرار گیرد. میزان مصرف با توجه به نوع اثر مورد انتظار، ویژگیهای مصالح مصرفی و شرایط جوی متغیر می باشد. برای تعیین مقدار دقیق مصرف، تهیه مخلوطهای آزمایشی توصیه می گردد.

روش مصرف

برای ساختن بتن خود تراکم (SCC) با استفاده از Vand Superplast PCE از همان مصالح معمولی ساخت بتن های متداول استفاده می شود اما جهت کسب ویژگیهای مختص بتن خود تراکم به روند و نحوه طرح اختلاط توجه ویژه نمایید. میزان مواد سیمانی و پرکننده ها (فیلرها) درون بتن های خود تراکم (SCC) معمولاً بیشتر از بتن های معمول است. دانمبندی به گونه ای اصلاح می شود که میزان شن تا حدی کاهش یافته ضریب نرمی مصالح افزایش یابد. نسبت آب به سیمان در بتن خود تراکم (SCC) همواره پایین بوده و معمولاً کمتر از ۰/۴۰ می باشد. در غالب موارد جهت افزایش قوام و جلوگیری از جداشدگی استفاده از یک ماده قوام دهنده (VMA) مانند Vand Nano - Cembinder 30 هم توصیه می گردد.

روش کنترل

آزمایش های بتن خود تراکم (SCC) به علت مشخصات ویژه آن نسبت به بتن معمولی متفاوت بوده و از تنوع و تعدد بیشتری برخوردار است. شرح این آزمایش ها در استاندارد ASTM C09 آورده شده است.

از مهمترین تست های بتن خود تراکم که جهت تعیین میزان سیالیت و پرکنندگی آن انجام می شود آزمایش جریان اسلامپ است (Slump Flow) که در آن قطر توده بتن پخش شده مورد سنجش قرار می گیرد. معمولاً حداقل قطر مورد قبول ۶۵۰ میلی متر در نظر گرفته می شود.

مشخصات فنی

شکل ظاهری: مایع، قهوه ای رنگ

پایه شیمیایی: دیسپرسیون پلیمری نمک کربوکسیلیت

وزن مخصوص: ۱/۰۳ Kg/Lit

PH: در حدود ۷

شرایط نگهداری: به دور از یخبندان

مدت نگهداری: در شرایط ایده آل تا دو سال

بسته بندی: در گالن های ۲۰، بشکه های ۲۰۰ کیلو گرمی

ویژگی زیست محیطی: دوستدار محیط زیست



Distributor:

Visit our website at: <http://www.vandchemie.com>

E-mail: info@vandchemie.com

تهران، بالاتر از میدان ونک، خیابان شهید خدایمی (بیژن)، کوی لیلی، بلاک ۷، واحد ۶، کد پستی: ۱۹۹۴۸
صندوق پستی: ۷۹۸۶-۱۵۸۷۵ تلفن: ۰۲۱-۸۷۹۷۴۵۲، ۰۲۱-۸۷۹۰۹۱۲ فاکس: ۰۲۱-۸۷۹۷۴۵۴

Unit 6, No.7, Laylee St., Vanak St., Vanak Sq., Tehran, Iran 19948
P.O. Box: 15875-7986 Tel.: (+9821) 879-0912,3 Fax: (+9821) 879-7454

Vand Superplast M63

استاندارد مرجع
ASTM C 494
Type F



فوق روان کننده - ۶۳،ام

کد کالا
۵۰۳

ملامین، نرمال

Superplasticizer Normal, Melamine



Vand Superplast M63 فوق روان کننده و کاهش دهنده آب، مخصوص تولید بتن با کیفیت بالا. خاصیت دوگانه Vand Superplast M63 از یک سو روانی بتن را افزایش می‌دهد و از سوی دیگر مقاومت‌های اولیه را بالا می‌برد.

موارد مصرف

Vand Superplast M63 بعنوان فوق روان کننده در تولید بتن روان جهت:

- دالها
- دیوارها و ستونها
- مقاطع باریک و پرآرماتور
- تیرچه و سقف‌ها
- محل‌هایی که امکان استفاده از ویراتور در آنها وجود ندارد و به عنوان کاهش دهنده آب در مواردی مصرف می‌شود که مقاومت‌های اولیه و نهایی بالایی مورد نیاز باشد، از جمله در:
 - قطعات بتن پیش تنیده.
 - تولید قطعات پیش ساخته، که مقاومت‌های مکانیکی بالایی از آنها انتظار می‌رود.
 - پلها و سازه‌های بازودار.

مقدار مصرف

Vand Superplast M63 به میزان ۰/۶ - ۲/۵ درصد وزن سیمان مصرفی به بتن اضافه می‌گردد. برای تعیین مقدار دقیق مصرف، تهیه مخلوط‌های آزمایشی توصیه می‌شود. Vand Superplast M63 با کلیه انواع سیمان پرتلند از جمله S.R.C (سیمان ضد سولفات) سازگار و قابل اختلاط است.

روش مصرف

Vand Superplast M63 را می‌توان به آب مصرفی یا به مخلوط آماده اضافه نمود. بهتر آن است که با بخشی از آب اختلاط بتن مخلوط گشته و نهایتاً به بتن اضافه می‌گردد.

تذکر مهم

مصرف بیش از اندازه Vand Superplast M63 گیرش اولیه بتن را به تأخیر می‌اندازد و ممکن است باعث خونریزی داخلی بتن گردد، لیکن هیچگونه هوای اضافی وارد بتن نمی‌کند.

خواص ویژه

- Vand Superplast M63 بدون نیاز به مصرف آب اضافی، کارایی بتن را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد.
- افزایش آب بندی بتن
 - جلوگیری از ایجاد جداشدگی
 - تأثیری در گیرش عادی بتن ندارد
 - کاهش مقدار انقباض و خزش بتن
 - افزایش مقاومت‌های اولیه و نهایی بتن
 - افزایش زیبایی نمای سطحی بتن
 - فاقد کلراید بوده و با آرماتورها کاملاً سازگار است

مشخصات فنی

شکل ظاهری: مایع، قهوه ای رنگ
پایه شیمیایی: دیسپرسیون پلیمری ملامین سولفونات
وزن مخصوص: ۱/۲Kg/Lit
PH: در حدود ۷
شرایط نگهداری: به دور از یخبندان
مدت نگهداری: در شرایط ایده آل بمدت ۲ سال
بسته بندی: در گالن های ۲۰ و بشکه های ۲۰۰ کیلو گرمی
ویژگی زیست محیطی: دوستدار محیط زیست



Distributor:

Visit our website at: <http://www.vandchemie.com>

E-mail: info@vandchemie.com

تهران، بالاتر از میدان ونک، خیابان شهید خدای (بیژن)، کوی لیلی، پلاک ۷، واحد ۶، کد پستی: ۱۹۹۴۸
صندوق پستی: ۷۹۸۶-۱۵۸۷۵ تلفن: ۰۲۱-۸۷۹۷۴۵۲، ۰۲۱-۸۷۹۰۹۱۲ فاکس: ۰۲۱-۸۷۹۷۴۵۴

Unit 6, No.7, Laylee St., Vanak St., Vanak Sq., Tehran, Iran 19948
P.O. Box: 15875-7986 Tel.: (+9821) 879-0912,3 Fax: (+9821) 879-7454

پیوست ب:

استانداردهای آزمایشات



Designation: C 39/C 39M – 03

Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens¹

This standard is issued under the fixed designation C 39/C 39M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers determination of compressive strength of cylindrical concrete specimens such as molded cylinders and drilled cores. It is limited to concrete having a unit weight in excess of 50 lb/ft³ [800 kg/m³].

1.2 The values stated in either inch-pound or SI units are to be regarded separately as standard. The SI units are shown in brackets. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

1.4 The text of this standard references notes which provide explanatory material. These notes shall not be considered as requirements of the standard.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- C 31/C 31M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field²
- C 42/C 42M Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete²
- C 192/C 192M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory²
- C 617 Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens²
- C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials²
- C 873 Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds²

C 1077 Practice for Laboratories Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Laboratory Evaluation²

C 1231/C 1231M Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Concrete Cylinders²

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines³

E 74 Practice for Calibration of Force-Measuring Instruments for Verifying the Load Indication of Testing Machines³

Manual of Aggregate and Concrete Testing²

2.2 *American Concrete Institute:*

CP-16 Concrete Laboratory Testing Technician, Grade I⁴

3. Summary of Test Method

3.1 This test method consists of applying a compressive axial load to molded cylinders or cores at a rate which is within a prescribed range until failure occurs. The compressive strength of the specimen is calculated by dividing the maximum load attained during the test by the cross-sectional area of the specimen.

4. Significance and Use

4.1 Care must be exercised in the interpretation of the significance of compressive strength determinations by this test method since strength is not a fundamental or intrinsic property of concrete made from given materials. Values obtained will depend on the size and shape of the specimen, batching, mixing procedures, the methods of sampling, molding, and fabrication and the age, temperature, and moisture conditions during curing.

4.2 This test method is used to determine compressive strength of cylindrical specimens prepared and cured in accordance with Practices C 31/C 31M, C 192/C 192M, C 617, and C 1231/C 1231M and Test Methods C 42/C 42M and C 873.

4.3 The results of this test method are used as a basis for quality control of concrete proportioning, mixing, and placing

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.61 on Testing Concrete for Strength.

Current edition approved July 10, 2003. Published October 2003. Originally approved in 1921. Last previous edition approved in 2001 as C 39/C 39M – 01.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

⁴ Available from American Concrete Institute, P.O. Box 9094, Farmington Hills, MI 48333-9094.

operations; determination of compliance with specifications; control for evaluating effectiveness of admixtures; and similar uses.

4.4 The individual who tests concrete cylinders for acceptance testing shall have demonstrated a knowledge and ability to perform the test procedure equivalent to the minimum guidelines for certification of Concrete Laboratory Technician, Level I, in accordance with ACI CP-16.

NOTE 1—The testing laboratory performing this test method should be evaluated in accordance with Practice C 1077.

5. Apparatus

5.1 *Testing Machine*—The testing machine shall be of a type having sufficient capacity and capable of providing the rates of loading prescribed in 7.5.

5.1.1 Verify calibration of the testing machines in accordance with Practices E 4, except that the verified loading range shall be as required in 5.3.2. Verification is required under the following conditions:

5.1.1.1 After an elapsed interval since the previous verification of 18 months maximum, but preferably after an interval of 12 months.

5.1.1.2 On original installation or relocation of the machine.

5.1.1.3 Immediately after making repairs or adjustments that affect the operation of the force applying system of the machine or the values displayed on the load indicating system, except for zero adjustments that compensate for the mass of bearing blocks or specimen, or both, or

5.1.1.4 Whenever there is reason to doubt the accuracy of the results, without regard to the time interval since the last verification.

5.1.2 *Design*—The design of the machine must include the following features:

5.1.2.1 The machine must be power operated and must apply the load continuously rather than intermittently, and without shock. If it has only one loading rate (meeting the requirements of 7.5), it must be provided with a supplemental means for loading at a rate suitable for verification. This supplemental means of loading may be power or hand operated.

5.1.2.2 The space provided for test specimens shall be large enough to accommodate, in a readable position, an elastic calibration device which is of sufficient capacity to cover the potential loading range of the testing machine and which complies with the requirements of Practice E 74.

NOTE 2—The types of elastic calibration devices most generally available and most commonly used for this purpose are the circular proving ring or load cell.

5.1.3 *Accuracy*—The accuracy of the testing machine shall be in accordance with the following provisions:

5.1.3.1 The percentage of error for the loads within the proposed range of use of the testing machine shall not exceed $\pm 1.0\%$ of the indicated load.

5.1.3.2 The accuracy of the testing machine shall be verified by applying five test loads in four approximately equal increments in ascending order. The difference between any two successive test loads shall not exceed one third of the difference between the maximum and minimum test loads.

5.1.3.3 The test load as indicated by the testing machine and the applied load computed from the readings of the verification device shall be recorded at each test point. Calculate the error, E , and the percentage of error, E_p , for each point from these data as follows:

$$E = A - B \quad (1)$$

$$E_p = 100(A - B)/B$$

where:

A = load, lbf [kN] indicated by the machine being verified, and

B = applied load, lbf [kN] as determined by the calibrating device.

5.1.3.4 The report on the verification of a testing machine shall state within what loading range it was found to conform to specification requirements rather than reporting a blanket acceptance or rejection. In no case shall the loading range be stated as including loads below the value which is 100 times the smallest change of load estimable on the load-indicating mechanism of the testing machine or loads within that portion of the range below 10% of the maximum range capacity.

5.1.3.5 In no case shall the loading range be stated as including loads outside the range of loads applied during the verification test.

5.1.3.6 The indicated load of a testing machine shall not be corrected either by calculation or by the use of a calibration diagram to obtain values within the required permissible variation.

5.2 The testing machine shall be equipped with two steel bearing blocks with hardened faces (Note 3), one of which is a spherically seated block that will bear on the upper surface of the specimen, and the other a solid block on which the specimen shall rest. Bearing faces of the blocks shall have a minimum dimension at least 3% greater than the diameter of the specimen to be tested. Except for the concentric circles described below, the bearing faces shall not depart from a plane by more than 0.001 in. [0.02 mm] in any 6 in. [150 mm] of blocks 6 in. [150 mm] in diameter or larger, or by more than 0.001 in. [0.02 mm] in the diameter of any smaller block; and new blocks shall be manufactured within one half of this tolerance. When the diameter of the bearing face of the spherically seated block exceeds the diameter of the specimen by more than 0.5 in. [13 mm], concentric circles not more than 0.03 in. [0.8 mm] deep and not more than 0.04 in. [1 mm] wide shall be inscribed to facilitate proper centering.

NOTE 3—It is desirable that the bearing faces of blocks used for compression testing of concrete have a Rockwell hardness of not less than 55 HRC.

5.2.1 Bottom bearing blocks shall conform to the following requirements:

5.2.1.1 The bottom bearing block is specified for the purpose of providing a readily machinable surface for maintenance of the specified surface conditions (Note 4). The top and bottom surfaces shall be parallel to each other. If the testing machine is so designed that the platen itself is readily maintained in the specified surface condition, a bottom block is not required. Its least horizontal dimension shall be at least 3%

greater than the diameter of the specimen to be tested. Concentric circles as described in 5.2 are optional on the bottom block.

NOTE 4—The block may be fastened to the platen of the testing machine.

5.2.1.2 Final centering must be made with reference to the upper spherical block. When the lower bearing block is used to assist in centering the specimen, the center of the concentric rings, when provided, or the center of the block itself must be directly below the center of the spherical head. Provision shall be made on the platen of the machine to assure such a position.

5.2.1.3 The bottom bearing block shall be at least 1 in. [25 mm] thick when new, and at least 0.9 in. [22.5 mm] thick after any resurfacing operations.

5.2.2 The spherically seated bearing block shall conform to the following requirements:

5.2.2.1 The maximum diameter of the bearing face of the suspended spherically seated block shall not exceed the values given below:

Diameter of Test Specimens, in. [mm]	Maximum Diameter of Bearing Face, in. [mm]
2 [50]	4 [105]
3 [75]	5 [130]
4 [100]	6.5 [165]
6 [150]	10 [255]
8 [200]	11 [280]

NOTE 5—Square bearing faces are permissible, provided the diameter of the largest possible inscribed circle does not exceed the above diameter.

5.2.2.2 The center of the sphere shall coincide with the surface of the bearing face within a tolerance of $\pm 5\%$ of the radius of the sphere. The diameter of the sphere shall be at least 75 % of the diameter of the specimen to be tested.

5.2.2.3 The ball and the socket shall be designed so that the steel in the contact area does not permanently deform when loaded to the capacity of the testing machine.

NOTE 6—The preferred contact area is in the form of a ring (described as preferred "bearing" area) as shown on Fig. 1.

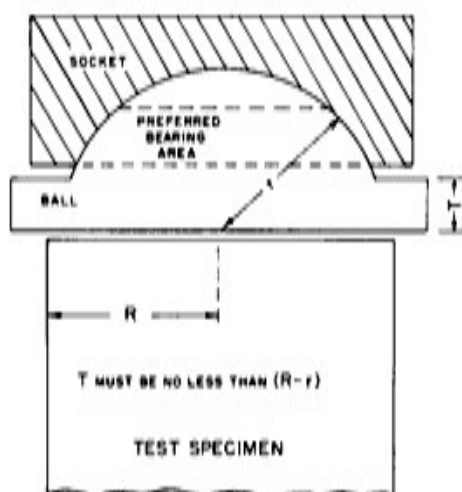
5.2.2.4 The curved surfaces of the socket and of the spherical portion shall be kept clean and shall be lubricated with a petroleum-type oil such as conventional motor oil, not with a pressure type grease. After contacting the specimen and application of small initial load, further tilting of the spherically seated block is not intended and is undesirable.

5.2.2.5 If the radius of the sphere is smaller than the radius of the largest specimen to be tested, the portion of the bearing face extending beyond the sphere shall have a thickness not less than the difference between the radius of the sphere and radius of the specimen. The least dimension of the bearing face shall be at least as great as the diameter of the sphere (see Fig. 1).

5.2.2.6 The movable portion of the bearing block shall be held closely in the spherical seat, but the design shall be such that the bearing face can be rotated freely and tilted at least 4° in any direction.

5.3 Load Indication:

5.3.1 If the load of a compression machine used in concrete testing is registered on a dial, the dial shall be provided with a



NOTE—Provision shall be made for holding the ball in the socket and for holding the entire unit in the testing machine.

FIG. 1 Schematic Sketch of a Typical Spherical Bearing Block

graduated scale that is readable to at least the nearest 0.1 % of the full scale load (Note 7). The dial shall be readable within 1 % of the indicated load at any given load level within the loading range. In no case shall the loading range of a dial be considered to include loads below the value that is 100 times the smallest change of load that can be read on the scale. The scale shall be provided with a graduation line equal to zero and so numbered. The dial pointer shall be of sufficient length to reach the graduation marks; the width of the end of the pointer shall not exceed the clear distance between the smallest graduations. Each dial shall be equipped with a zero adjustment located outside the dialcase and easily accessible from the front of the machine while observing the zero mark and dial pointer. Each dial shall be equipped with a suitable device that at all times, until reset, will indicate to within 1 % accuracy the maximum load applied to the specimen.

NOTE 7—Readability is considered to be 0.02 in. [0.5 mm] along the arc described by the end of the pointer. Also, one half of a scale interval is readable with reasonable certainty when the spacing on the load indicating mechanism is between 0.04 in. [1 mm] and 0.06 in. [2 mm]. When the spacing is between 0.06 and 0.12 in. [2 and 3 mm], one third of a scale interval is readable with reasonable certainty. When the spacing is 0.12 in. [3 mm] or more, one fourth of a scale interval is readable with reasonable certainty.

5.3.2 If the testing machine load is indicated in digital form, the numerical display must be large enough to be easily read. The numerical increment must be equal to or less than 0.10 % of the full scale load of a given loading range. In no case shall the verified loading range include loads less than the minimum numerical increment multiplied by 100. The accuracy of the indicated load must be within 1.0 % for any value displayed within the verified loading range. Provision must be made for adjusting to indicate true zero at zero load. There shall be provided a maximum load indicator that at all times until reset will indicate within 1 % system accuracy the maximum load applied to the specimen.

5.4 Provide a means for containing fragments in the event of explosive rupture of the cylinder during testing.

NOTE 8—The tendency for explosive rupture increases with increasing concrete strength and it is more likely when the testing machine is relatively flexible. Refer to the section on safety precautions in the Manual of Aggregate and Concrete Testing (gray pages) for recommended approaches to contain concrete fragments.

6. Specimens

6.1 Specimens shall not be tested if any individual diameter of a cylinder differs from any other diameter of the same cylinder by more than 2 %.

NOTE 9—This may occur when single use molds are damaged or deformed during shipment, when flexible single use molds are deformed during molding, or when a core drill deflects or shifts during drilling.

6.2 Prior to testing, neither end of test specimens shall depart from perpendicularity to the axis by more than 0.5° (approximately equivalent to 0.12 in. in 12 in. [1 mm in 100 mm]). The ends of compression test specimens that are not plane within 0.002 in. [0.050 mm] shall be sawed or ground to meet that tolerance, or capped in accordance with either Practice C 617 or, when permitted, Practice C 1231/C 1231M. The diameter used for calculating the cross-sectional area of the test specimen shall be determined to the nearest 0.01 in. [0.25 mm] by averaging two diameters measured at right angles to each other at about midheight of the specimen.

6.3 The number of individual cylinders measured for determination of average diameter is not prohibited from being reduced to one for each ten specimens or three specimens per day, whichever is greater, if all cylinders are known to have been made from a single lot of reusable or single-use molds which consistently produce specimens with average diameters within a range of 0.02 in. [0.5 mm]. When the average diameters do not fall within the range of 0.02 in. [0.5 mm] or when the cylinders are not made from a single lot of molds, each cylinder tested must be measured and the value used in calculation of the unit compressive strength of that specimen. When the diameters are measured at the reduced frequency, the cross-sectional areas of all cylinders tested on that day shall be computed from the average of the diameters of the three or more cylinders representing the group tested that day.

6.4 The length shall be measured to the nearest 0.05 *D* when the length to diameter ratio is less than 1.8, or more than 2.2, or when the volume of the cylinder is determined from measured dimensions.

7. Procedure

7.1 Compression tests of moist-cured specimens shall be made as soon as practicable after removal from moist storage.

7.2 Test specimens shall be kept moist by any convenient method during the period between removal from moist storage and testing. They shall be tested in the moist condition.

7.3 All test specimens for a given test age shall be broken within the permissible time tolerances prescribed as follows:

Test Age	Permissible Tolerance
24 h	± 0.5 h or 2.1 %
3 days	2 h or 2.8 %
7 days	6 h or 3.6 %
28 days	20 h or 3.0 %
90 days	2 days 2.2 %

7.4 *Placing the Specimen*—Place the plain (lower) bearing block, with its hardened face up, on the table or platen of the testing machine directly under the spherically seated (upper) bearing block. Wipe clean the bearing faces of the upper and lower bearing blocks and of the test specimen and place the test specimen on the lower bearing block. Carefully align the axis of the specimen with the center of thrust of the spherically seated block.

7.4.1 *Zero Verification and Block Seating*—Prior to testing the specimen, verify that the load indicator is set to zero. In cases where the indicator is not properly set to zero, adjust the indicator (Note 10). As the spherically seated block is brought to bear on the specimen, rotate its movable portion gently by hand so that uniform seating is obtained.

NOTE 10—The technique used to verify and adjust load indicator to zero will vary depending on the machine manufacturer. Consult your owner's manual or compression machine calibrator for the proper technique.

7.5 *Rate of Loading*—Apply the load continuously and without shock.

7.5.1 For testing machines of the screw type, the moving head shall travel at a rate of approximately 0.05 in. [1 mm]/min when the machine is running idle. For hydraulically operated machines, the load shall be applied at a rate of movement (platen to crosshead measurement) corresponding to a loading rate on the specimen within the range of 20 to 50 psi/s [0.15 to 0.35 MPa/s]. The designated rate of movement shall be maintained at least during the latter half of the anticipated loading phase of the testing cycle.

7.5.2 During the application of the first half of the anticipated loading phase a higher rate of loading shall be allowed.

7.5.3 Make no adjustment in the rate of movement of the platen at any time while a specimen is yielding rapidly immediately before failure.

7.6 Apply the load until the specimen fails, and record the maximum load carried by the specimen during the test. Note the type of failure and the appearance of the concrete.

8. Calculation

8.1 Calculate the compressive strength of the specimen by dividing the maximum load carried by the specimen during the test by the average cross-sectional area determined as described in Section 6 and express the result to the nearest 10 psi [0.1 MPa].

8.2 If the specimen length to diameter ratio is 1.75 or less, correct the result obtained in 8.1 by multiplying by the appropriate correction factor shown in the following table Note 11:

L/D:	1.75	1.50	1.25	1.00
Factor:	0.98	0.96	0.93	0.87

Use interpolation to determine correction factors for L/D values between those given in the table.

NOTE 11—Correction factors depend on various conditions such as moisture condition, strength level, and elastic modulus. Average values are given in the table. These correction factors apply to low-density concrete weighing between 100 and 120 lb/ft³ [1600 and 1920 kg/m³] and to normal-density concrete. They are applicable to concrete dry or soaked at the time of loading and for nominal concrete strengths from 2000 to 6000

psi [14 to 42 MPa]. For strengths higher than 6000 psi [42 MPa] correction factors may be larger than the values listed above⁵.

a well-mixed sample of concrete is given for cylinders made in

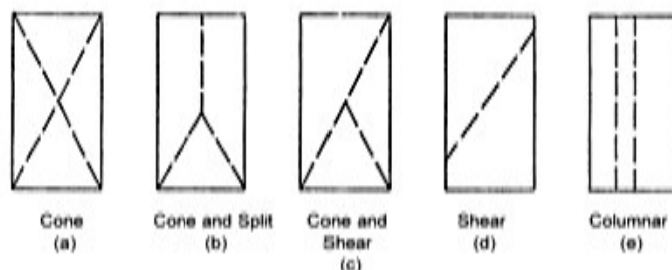


FIG. 2 Sketches of Types of Fracture

9. Report

9.1 Report the following information:

9.1.1 Identification number,

9.1.2 Diameter (and length, if outside the range of 1.8 *D* to 2.2 *D*), in inches [millimetres],

9.1.3 Cross-sectional area, in square inches [square millimetres],

9.1.4 Maximum load, in pounds-force [kilonewtons],

9.1.5 Compressive strength calculated to the nearest 10 psi [0.1 MPa],

9.1.6 Type of fracture, if other than the usual cone (see Fig. 2),

9.1.7 Defects in either specimen or caps, and,

9.1.8 Age of specimen.

10. Precision and Bias

10.1 *Precision*—The single operator precision of tests of individual 6 by 12 in. [150 by 300 mm] cylinders made from

a laboratory environment and under normal field conditions (see 10.1.1).

Single operator	Coefficient of Variation ^A	Acceptable Range of ^A	
		2 results	3 results
Laboratory conditions	2.37 %	6.6 %	7.8 %
Field conditions	2.87 %	8.0 %	9.5 %

^A These numbers represent respectively the (1s) and (d2s) limits as described in Practice C 670.

10.1.1 The values given are applicable to 6 by 12 in. [150 by 300 mm] cylinders with compressive strength between 2000 and 8000 psi [15 to 55 MPa]. They are derived from CCRL concrete reference sample data for laboratory conditions and a collection of 1265 test reports from 225 commercial testing laboratories in 1978.⁶

NOTE 12—Subcommittee C09.03 will re-examine recent CCRL Concrete Reference Sample Program data and field test data to see if these values are representative of current practice and if they can be extended to cover a wider range of strengths and specimen sizes.

10.2 *Bias*—Since there is no accepted reference material, no statement on bias is being made.

⁵ Bartlett, F.M. and MacGregor, J.G., "Effect of Core Length-to-Diameter Ratio on Concrete Core Strength," ACI Materials Journal, Vol 91, No. 4, July-August, 1994, pp. 339-348.

⁶ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR: C09-1006.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Designation: C 78 – 02

Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)¹

This standard is issued under the fixed designation C 78; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the flexural strength of concrete by the use of a simple beam with third-point loading.

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard. The SI equivalent of inch-pound units has been rounded where necessary for practical application.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

C 31 Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field²

C 42 Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete²

C 192 Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory²

C 617 Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens²

C 1077 Practice for Laboratories Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Laboratory Evaluation²

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines³

3. Significance and Use

3.1 This test method is used to determine the flexural strength of specimens prepared and cured in accordance with Test Methods C 42 or Practices C 31 or C 192. Results are calculated and reported as the modulus of rupture. The strength determined will vary where there are differences in specimen size, preparation, moisture condition, curing, or where the

beam has been molded or sawed to size.

3.2 The results of this test method may be used to determine compliance with specifications or as a basis for proportioning, mixing and placement operations. It is used in testing concrete for the construction of slabs and pavements (Note 1).

4. Apparatus

4.1 The testing machine shall conform to the requirements of the sections on Basis of Verification, Corrections, and Time Interval Between Verifications of Practices E 4. Hand operated testing machines having pumps that do not provide a continuous loading in one stroke are not permitted. Motorized pumps or hand operated positive displacement pumps having sufficient volume in one continuous stroke to complete a test without requiring replenishment are permitted and shall be capable of applying loads at a uniform rate without shock or interruption.

4.2 *Loading Apparatus*—The third point loading method shall be used in making flexure tests of concrete employing bearing blocks which will ensure that forces applied to the beam will be perpendicular to the face of the specimen and applied without eccentricity. A diagram of an apparatus that accomplishes this purpose is shown in Fig. 1.

4.2.1 All apparatus for making flexure tests of concrete shall be capable of maintaining the specified span length and distances between load-applying blocks and support blocks constant within ± 0.05 in. (± 1.3 mm).

4.2.2 The ratio of the horizontal distance between the point of application of the load and the point of application of the nearest reaction to the depth of the beam shall be 1.0 ± 0.03 .

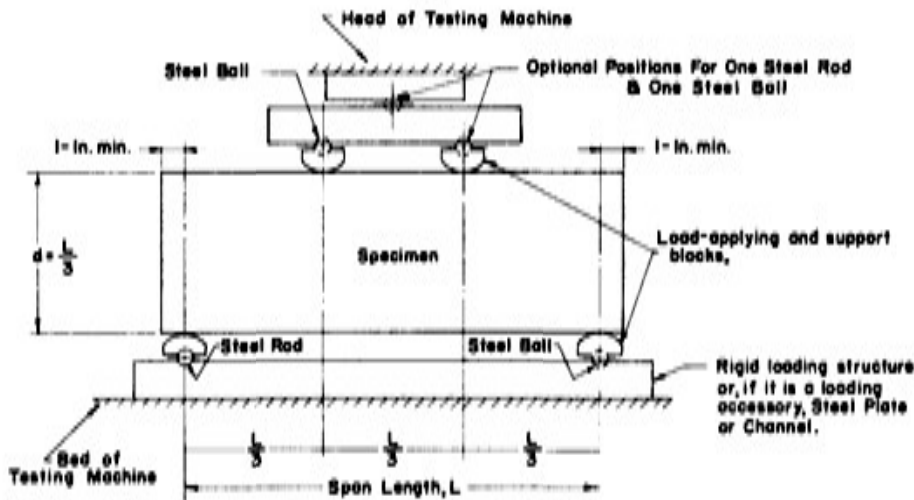
4.2.3 If an apparatus similar to that illustrated in Fig. 1 is used: the load-applying and support blocks should not be more than $2\frac{1}{2}$ in. (64 mm) high, measured from the center or the axis of pivot, and should extend entirely across or beyond the full width of the specimen. Each case-hardened bearing surface in contact with the specimen shall not depart from a plane by more than 0.002 in. (0.05 mm) and shall be a portion of a cylinder, the axis of which is coincidental with either the axis of the rod or center of the ball, whichever the block is pivoted upon. The angle subtended by the curved surface of each block should be at least 45° (0.79 rad). The load-applying and support blocks shall be maintained in a vertical position and in

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.61 on Testing for Strength.

Current edition approved Jan. 10, 2002. Published March 2002. Originally published as C 78 – 30T. Last previous edition C 78 – 00.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.



NOTE 1—This apparatus may be used inverted. If the testing machine applies force through a spherically seated head, the center pivot may be omitted, provided one load-applying block pivots on a rod and the other on a ball.

NOTE 2—1 in. = 25.4 mm.

FIG. 1 Diagrammatic View of a Suitable Apparatus for Flexure Test of Concrete by Third-Point Loading Method

contact with the rod or ball by means of spring-loaded screws that hold them in contact with the pivot rod or ball. The uppermost bearing plate and center point ball in Fig. 1 may be omitted when a spherically seated bearing block is used, provided one rod and one ball are used as pivots for the upper load-applying blocks.

5. Testing

5.1 The test specimen shall conform to all requirements of Test Method C 42 or Practices C 31 or C 192 applicable to beam and prism specimens and shall have a test span within 2 % of being three times its depth as tested. The sides of the specimen shall be at right angles with the top and bottom. All surfaces shall be smooth and free of scars, indentations, holes, or inscribed identification marks.

5.2 The technician performing the flexural strength test should be certified as an ACI Technician—Grade II, or by an equivalent written and performance test program.

NOTE 1—The testing laboratory performing this test method may be evaluated in accordance with Practice C 1077.

6. Procedure

6.1 Flexural tests of moist-cured specimens shall be made as soon as practical after removal from moist storage. Surface drying of the specimen results in a reduction in the measured flexural strength.

6.2 When using molded specimens, turn the test specimen on its side with respect to its position as molded and center it on the support blocks. When using sawed specimens, position the specimen so that the tension face corresponds to the top or bottom of the specimen as cut from the parent material. Center the loading system in relation to the applied force. Bring the load-applying blocks in contact with the surface of the specimen at the third points and apply a load of between 3 and 6 % of the estimated ultimate load. Using 0.004 in. (0.10 mm) and 0.015 in. (0.38 mm) leaf-type feeler gages, determine whether

any gap between the specimen and the load-applying or support blocks is greater or less than each of the gages over a length of 1 in. (25 mm) or more. Grind, cap, or use leather shims on the specimen contact surface to eliminate any gap in excess of 0.004 in. (0.10 mm) in width. Leather shims shall be of uniform 1/4 in. (6.4 mm) thickness, 1 to 2 in. (25 to 50 mm) width, and shall extend across the full width of the specimen. Gaps in excess of 0.015 in. (0.38 mm) shall be eliminated only by capping or grinding. Grinding of lateral surfaces should be minimized inasmuch as grinding may change the physical characteristics of the specimens. Capping shall be in accordance with the applicable sections of Practice C 617.

6.3 Load the specimen continuously and without shock. The load shall be applied at a constant rate to the breaking point. Apply the load at a rate that constantly increases the extreme fiber stress between 125 and 175 psi/min (0.86 and 1.21 MPa/min) until rupture occurs. The loading rate is calculated using the following equation:

$$r = Sbd^2/L \quad (1)$$

where:

r = loading rate, lb/min (MN/min),

S = rate of increase in extreme fiber stress, psi/min (MPa/min),

b = average width of the specimen, in. (mm),

d = average depth of the specimen, in. (mm), and

L = span length, in. (mm).

7. Measurement of Specimens After Test

7.1 To determine the dimensions of the specimen cross section for use in calculating modulus of rupture, take measurements across one of the fractured faces after testing. For each dimension, take one measurement at each edge and one at the center of the cross section. Use the three measurements for each direction to determine the average width and the average depth. Take all measurements to the nearest 0.05 in. (1 mm). If

the fracture occurs at a capped section, include the cap thickness in the measurement.

8. Calculation

8.1 If the fracture initiates in the tension surface within the middle third of the span length, calculate the modulus of rupture as follows:

$$R = PL/bd^2 \quad (2)$$

where:

- R = modulus of rupture, psi, or MPa,
- P = maximum applied load indicated by the testing machine, lbf, or N,
- L = span length, in., or mm,
- b = average width of specimen, in., or mm, at the fracture, and
- d = average depth of specimen, in., or mm, at the fracture.

NOTE 2—The weight of the beam is not included in the above calculation.

8.2 If the fracture occurs in the tension surface outside of the middle third of the span length by not more than 5 % of the span length, calculate the modulus of rupture as follows:

$$R = 3Pa/bd^2 \quad (3)$$

where:

- a = average distance between line of fracture and the nearest support measured on the tension surface of the beam, in., (or mm).

NOTE 3—The weight of the beam is not included in the above calculation.

8.3 If the fracture occurs in the tension surface outside of the middle third of the span length by more than 5 % of the span length, discard the results of the test.

9. Report

9.1 Report the following information:

9.1.1 Identification number,

- 9.1.2 Average width to the nearest 0.05 in. (1 mm),
- 9.1.3 Average depth to the nearest 0.05 in. (1 mm),
- 9.1.4 Span length in inches (or millimeters),
- 9.1.5 Maximum applied load in pound-force (or newtons),
- 9.1.6 Modulus of rupture calculated to the nearest 5 psi (0.05 MPa),
- 9.1.7 Curing history and apparent moisture condition of the specimens at the time of test,
- 9.1.8 If specimens were capped, ground, or if leather shims were used,
- 9.1.9 Whether sawed or molded and defects in specimens, and
- 9.1.10 Age of specimens.

10. Precision and Bias

10.1 *Precision*—The coefficient of variation of test results has been observed to be dependent on the strength level of the beams.⁴ The single operator coefficient of variation has been found to be 5.7 %. Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on beams made from the same batch sample should not differ from each other by more than 16 %. The multilaboratory coefficient of variation has been found to be 7.0 %. Therefore, results of two different laboratories on beams made from the same batch sample should not differ from each other by more than 19 %.

10.2 *Bias*—Since there is no accepted standard for determining bias in this test method, no statement on bias is made.

11. Keywords

11.1 beams; concrete; flexural strength testing; modulus of rupture

⁴ See "Improved Concrete Quality Control Procedures Using Third Point Loading" by P. M. Carrasquillo and R. L. Carrasquillo, Research Report 119-1F, Project 3-9-87-1119, Center For Transportation Research, The University of Texas at Austin, November 1987, for possible guidance as to the relationship of strength and variability.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

پیوست ج:

مجموعه روند طرح اختلاط


Engineered Cementitious Composite

No Specimen		Date of casting	
Properties of Specimens			
Type	Cube	Cylinder	Beam
Number			
Dimensions(cm)			
Volume(cm ³)			
Weight(gr)			
Properties of Materials			
Cement			
Type: I		Density: 3.16 (gr/cm ³)	
Considerations: sieved by #50			
Fly ash			
Type: Class C		Density: 2.15(gr/cm ³)	
Considerations: sieved by #100			
Aggregate			
Type: Silica sand		Density: 2.75(gr/cm ³)	
Considerations: Fine aggregate (0-300μm)			
Super plasticizer			
Type: M63		Density: 1.2(gr/cm ³)	
Considerations: An aqueous solution (33.3 % wt)			
Polymeric Materials			
Type:		Density:	
Considerations:			

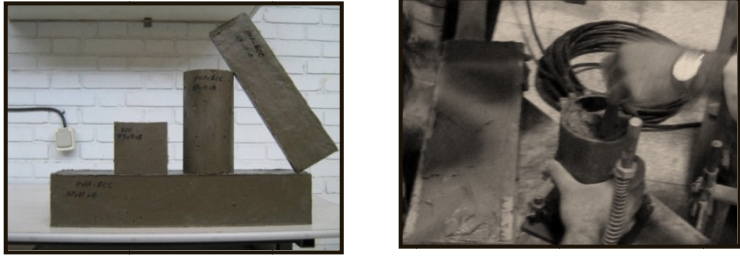
Engineered Cementitious Composite

Fiber properties						
Type	Length	Diameter	Density	Modulus	Elongation	Tenacity
REC-15	8 mm	39 μm	1.3 gr/cm^3	42.8 Gpa	6.0%	1620 Mpa
<p>Considerations: The surfaces of fibers have been coated with 1.2% wt of oiling agent (parformaldehyde). First an aqueous solution (by 1 liter water) of oiling agent has been prepared and then fibers have been presoaked for 30 minutes.</p>						
Mix properties						
Cement	Sand	Fly ash	Water	Super plasticizer	Fiber Vol (%)	
Total Volume		Practical Factor		Practical Volume		
Cement	Sand	Fly ash	Water	Super plasticizer	Fiber Vol (%)	
Curing						
Type			Temperature of Water			
Date of Starting			Date of Ending			
Considerations:						
Mixing Procedure						


جزئیات میکس شماره ۱

					شماره میکس
					1
تاریخ	نوع و تعداد نمونه‌ها				طرح اختلاط
87.11.1	Notched Beam	Beam	Cylinder	Cube	Cast PVA-ECC Without fiber
	-	1	1	1	
اهداف					تعیین پروسه و شرایط اختلاط
ملاحظات					پروسه اختلاط سخت و غیرقابل انتظار
اشکال					


جزئیات میکس شماره ۲

					شماره میکس
					2
تاریخ	نوع و تعداد نمونه‌ها				طرح اختلاط
87.11.8	Notched Beam	Beam	Cylinder	Cube	Cast PVA-ECC
	-	1	1	1	
اهداف					تعیین پروسه و شرایط اختلاط
ملاحظات					پروسه اختلاط سخت و غیرقابل انتظار تصمیم به تعویض طرح اختلاط
اشکال					

جزئیات میکس شماره ۳

					3	شماره میکس
طرح اختلاط	نوع و تعداد نمونه‌ها				تاریخ	
Mix III	Notched Beam	Beam	Cylinder	Cube	88.01.19	
	-	2	-	2		
تعیین پروسه و شرایط اختلاط						اهداف
<p>به دلیل عدم ایجاد میکسی روان ۱ کیلوگرم آب اضافی حین اختلاط به مخلوط اضافه گردید. دلایل احتمالی:</p> <p>پائین بودن کیفیت فوق‌روان کننده M63 بالا بودن نسبت خاکستر بادی پایین بودن درصد آب به مصالح سیمانی ($w/C+FA = 0.23$) این طرح اختلاط با میکسر هوبارت نیز امتحان شد. بدلیل سرعت بالای چرخش میکسر، مخلوطی روانتر حاصل گردید. اما بدلیل تک‌سرعتی بودن میکسر ELE این طرح اختلاط حذف شد.</p>						ملاحظات
						اشکال

جزئیات میکس شماره ۴

					4	شماره میکس
طرح اختلاط	نوع و تعداد نمونه‌ها				تاریخ	
Mix I	Notched Beam	Beam	Cylinder	Cube	88.01.20	
	-	2	-	2		
تعیین پروسه و شرایط اختلاط					اهداف	
مشاهده تفاوت رفتاری فوق روان کننده PCE و M63						
انجام اختلاط با میکسر هوبارت					ملاحظات	
ارزیابی رفتار بسیار مناسب فوق‌روان کننده PCE نسبت به M63 تصمیم به جایگزینی PCE در اختلاط‌های بعدی						
					اشکال	

جدول ۵-۸: جزئیات میکس شماره ۵

					شماره میکس
					5
طرح اختلاط	نوع و تعداد نمونه ها				تاریخ
Mix I	Notched Beam	Beam	Cylinder	Cube	88.01.30
	1	1	-	-	
اهداف					تعیین پروسه و شرایط اختلاط مشاهده تفاوت رفتاری فوق روان کننده PCE و M63
ملاحظات					افزایش سرعت میکسر با اتصال دریل رخ دادن پدیده جداشدگی دانه‌ها، کاهش همگنی مخلوط ایجاد مقداری فوق روان کننده غیراشباع در مخلوط دلایل احتمالی: بالا بودن درصد فوق روان کننده (0.06)

جدول ۵-۹: جزئیات میکس شماره ۶

					شماره میکس
					6
طرح اختلاط	نوع و تعداد نمونه ها				تاریخ
Mix I	Notched Beam	Beam	Cylinder	Cube	88.02.02
	1	1	-	-	
اهداف					تعیین پروسه و شرایط اختلاط مشاهده اثر کاهش درصد فوق روان کننده
ملاحظات					کاهش درصد فوق روان کننده از 0.06 به 0.01 رسیدن به اسلامپ مناسب پس از اضافه کردن الیاف در مرحله نهایی

جزئیات میکس شماره ۷

					شماره میکس
					7
تاریخ	نوع و تعداد نمونه‌ها				طرح اختلاط
88.02.30	Dog bone	Beam	Cylinder	Cube	Mix I
	13	-	-	-	
اهداف					امتحان دستگاه کشش مستقیم
ملاحظات					عدم انجام تست به دلیل دقت پایین دستگاه

جزئیات میکس شماره ۸

					شماره میکس
					8
تاریخ	نوع و تعداد نمونه‌ها				طرح اختلاط
89.01.21	Notched Beam	Beam	Cylinder	Cube	Mix I Without Fiber
	2	-	-	-	
اهداف					اندازه گیری k_{IC} ماتریس
ملاحظات					دو نیم شدن تیرها بهنگام باز کردن قالب دلایل احتمالی انقباض بسیار بالا بدلیل بالا بودن درصد سیمان و نبود الیاف ایجاد تمرکز تنش در نوک لبه ترک هنگام انقباض بدلیل تیز بودن لبه تیغ

جزئیات میکس شماره ۹

					شماره میکس
					9
تاریخ	نوع و تعداد نمونه‌ها				طرح اختلاط
89.02.04	Notched Beam	Beam	Cylinder	Cube	Mix I Without Fiber
	1	-	2	-	
اهداف					اندازه گیری k_{IC} ماتریس اندازه گیری مدول الاستیسیته ماتریس
ملاحظات					دو نیم شدن تیرها بهنگام باز کردن قالب دلایل احتمالی انقباض بسیار بالا بدلیل بالا بودن درصد سیمان و نبود الیاف ایجاد تمرکز تنش در نوک لبه ترک هنگام انقباض بدلیل تیز بودن لبه تیغ

جزئیات میکس شماره ۱۰

					شماره میکس
					10
تاریخ	نوع و تعداد نمونه‌ها				طرح اختلاط
89.06.02	Notched Beam	Beam	Cylinder	Cube	Mix I Without Fiber
	1	-	1	-	
اهداف					اندازه گیری k_{IC} ماتریس اندازه گیری مدول الاستیسیته ماتریس
ملاحظات					دورپیچ کردن نمونه‌ها با کیسه نایلونی و ایجاد محیط مرطوب و کاهش درصد انقباض دو نیم شدن تیرها بهنگام باز کردن قالب دلایل احتمالی انقباض بسیار بالا بدلیل بالا بودن درصد سیمان و نبود الیاف ایجاد تمرکز تنش در نوک لبه ترک هنگام انقباض بدلیل تیز بودن لبه تیغ

جزئیات میکس شماره ۱۱

					شماره میکس
					11
تاریخ	نوع و تعداد نمونه‌ها				طرح اختلاط
89.06.02	Notched Beam	Beam	Cylinder	Cube	Mix I Without Fiber
	1	-	1	-	
اهداف					اندازه گیری k_{IC} ماتریس اندازه گیری مدول الاستیسیته ماتریس
ملاحظات					پهن کردن کمی از لبه تیغه دورپیچ کردن نمونه‌ها با کیسه نایلونی و ایجاد محیط مرطوب و کاهش درصد انقباض دو نیم شدن تیر به هنگام باز کردن قالب دلایل احتمالی کاهش درصد ازدست دادن آب تبخیری بدلیل ایجاد محیطی مرطوب و کاهش تبادلات رطوبتی بین نمونه و محیط (ایجاد حمام) کاهش تمرکز تنش در نوک لبه ترک بدلیل پهن کردن لبه تیغ


جزئیات میکس شماره ۱۲

					شماره میکس
					12
تاریخ	نوع و تعداد نمونه‌ها				طرح اختلاط
89.09.14	Notched Beam	Beam	Cylinder	Cube	Mix I Without Fiber
	1	-	1	-	
اهداف					اندازه گیری k_{IC} ماتریس اندازه گیری مدول الاستیسیته ماتریس
ملاحظات					دورپیچ کردن نمونه‌ها با کیسه نایلونی و ایجاد محیط مرطوب و کاهش درصد انقباض دو نیم شدن تیرها به هنگام باز کردن قالب با وجود اینکه پروسه میکس کاملا مشابه میکس ۱۰ بود، اما تیر به دو نیم تقسیم شد !!

جزئیات میکس شماره ۱۳

					شماره میکس	13
تاریخ	نوع و تعداد نمونه ها				طرح اختلاط	
89.06.24	Cube	Cylinder	Beam	Strip	Mix I	
	6	-	1	2		
اهداف	تعیین پروسه و شرایط اختلاط انجام تست کشش مستقیم و خمش					
ملاحظات	روانی بیش از حد میکس مشاهد انقباض و کاهش حجم شدید نمونه ها خشک نشدن نمونه تیر پس از ۲۴ ساعت دلایل احتمالی بالا بودن نسبت آب و فوق روان کننده قدرت بالای PCE حجم بالای میکس نسبت به حجم میکسر میکس در آزمایشگاه پژوهشگاه زلزله انجام شد					
اشکال						

جزئیات میکس شماره ۱۴

				14	شماره میکس
طرح اختلاط	نوع و تعداد نمونه ها				تاریخ
	Strip	Beam	Cylinder	Cube	
Mix I	2	2	-	6	89.06.25
تعیین پروسه و شرایط اختلاط انجام تست کشش مستقیم و خمش					اهداف
تغییر در روند اختلاط و تولید ژل خاکستر بادی، سنگ دانه و یک سوم سیمان اضافه کردن تدریجی باقی مانده سیمان و مخلوط آب و فوق روان کننده تصمیم گیری حین میکس در مورد درصد آب و فوق روان کننده استفاده از سرعت ۲ میکسر رسیدن به اسلامپ مناسب پس از اضافه کردن الیاف در مرحله نهایی میکس در آزمایشگاه پژوهشگاه زلزله انجام شد					ملاحظات
					اشکال

پیوست د:

متن اصلی برنامه مدل پیشنهادی تحت

MATLAB 2010 نرم افزار


```

clf;
clear;
%% Definitions%% %% %%
B = 100;%% Width of Beam
B = input('enter B(Width of Beam) : ');

H = 100;%% High of Beam
H = input('enter H(High of Beam : ');

L = 300;%% Length of two Support
L = input('enter L(Length of two Support : ');

LL = 100;%% Length of two Force
LL = input('enter LL(Length of two Force : ');

E1 = 6750;%% Modulus of Elasticity at Frist
E1 = input('enter E1(Modulus of Elasticity at Frist : ');

SS = 2.5;%% Frist Crack Stress
SS = input('enter S1(Frist Crack Stress : ');

Puc = 100;
Puc = input('enter P uncracked : ');

hold on;
plot(0:0.00099:0.03,Ase(0:0.00099:0.03,1),'-');
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
%% %% %% UNCRACKED%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
I1 = (B * (H ^3))/12
Dunc = (Puc*((L-LL)^3))/(48 * E1 * I1)+(Puc*(LL^3)*(L-
LL))/(32*E1*I1)+(Puc*LL*((L-LL)^2))/(16*E1*I1)
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
%% %% %% Cracked%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%

```

```

i=0;
while(1)
    i = i+1;
    P(i) = input('enter P : ');
    if(P(i)==0)
        break;
    end
    D(i) = input('enter D : ');

ans1=0;
ans2=0;
ans3=0;

for X=H/2:-0.5:0.5
    for EC=1/1000:5/10000:1/100
        for E2=20000:-100:100
            DD = ((P(i)*((L-LL)^3)/E2/B/8/X/X/X)+(3*P(i)*(L-LL)*(L-
LL)/8/E2/B/X/X/X)+(3*P(i)*LL*LL*(L-LL)/8/E2/B/X/X/X));
            if((abs(D(i)-DD)/D(i))<0.11);
                ans1=1;
            else
                ans1=0;
                '111'
                K1 = (abs(D(i)-DD))/D(i)
                continue;
            end
            A1=@(m)m.*Ase(m,1);
            A2=@(m)Ase(m,1);
            A3=@(m)m.*Ase(m,X/EC);
            A4=@(m)Ase(m,X/EC);
            EE=SS/E1;
            ET=EC*(H-X)/X;
            %plot(0:0.01:X,A2(0:0.01:X),'x');
            C=quad(A2,0,EC)*B*X/EC;

```

```

T=((SS*EE/2)+((ET-EE)*SS)+(E2/2*((ET-EE)^2)))*B*(H-X)/ET;
if(((abs(C-T))/T)<0.07)
    ans2=1;
else
    ans2=0;
    '222'
    K2 = (abs(C-T))/T
    continue;
end
Z1=quad(A3,0,X)/quad(A4,0,X);
Z2=((SS*EE*EE/3)+(SS*(ET-EE)*(ET+EE)/2)+(E2*(ET-EE)*(ET-
EE)/2*(2*ET/3+EE/3)))/((SS*EE/2)+((ET-EE)*SS)+(E2/2*(ET-EE)*(ET-EE)))*(H-
X)/ET;
M=P(i)*(L-LL)/4;
MM=T*(Z1+Z2)/10;
if(((abs(M-MM))/M)<0.07)
    ans3=1;
else
    ans3=0;
    '333'
    K3 = (abs(M-MM))/M

    continue;
end

if((ans1==1)&&(ans2==1)&&(ans3==1))
    Xres(i)=X;
    ECres(i)=EC;
    E2res(i)=E2;
    ETres(i)=ET;
    Cres(i)=C;
    Tres(i)=T;
    break;
end

```

```

end
if((ans1==1)&&(ans2==1)&&(ans3==1))
    break;
end
end
if((ans1==1)&&(ans2==1)&&(ans3==1))
    break;
end
end

if((ans1==1)&&(ans2==1)&&(ans3==1))
    close all;
    clf;

subplot(1,4,1)
l=line([0 0],[X-H X]);
l=line([-ET 0],[X-H X-H]);
l=line([-ET EC],[X-H X]);
l=line([0 EC],[X X]);

text(0,X,'\leftarrow ',...
    'HorizontalAlignment','left','VerticalAlignment','bottom')
text(0,X-H,'\rightarrow ',...
    'HorizontalAlignment','right','VerticalAlignment','top')
text(EC,X,'\rightarrow ',...
    'HorizontalAlignment','right','VerticalAlignment','bottom')
text(-ET,X-H,'\leftarrow ',...
    'HorizontalAlignment','left','VerticalAlignment','top')

text(EC/2,X,'Ec',...
    'VerticalAlignment','bottom')
text(-ET/2,(X-H),'Et',...
    'VerticalAlignment','top')

```

```

text(0,X,'\uparrow ',...
    'HorizontalAlignment','right','VerticalAlignment','top')
text(0,0,'\downarrow ',...
    'HorizontalAlignment','right','VerticalAlignment','bottom')
text(0,0,'\uparrow ',...
    'HorizontalAlignment','left','VerticalAlignment','top')
text(0,X-H,'\downarrow ',...
    'HorizontalAlignment','left','VerticalAlignment','bottom')

```

```

text(0,X/2,'x ',...
    'HorizontalAlignment','right')
text(0,(X-H)/2,' h-x ',...
    'HorizontalAlignment','left')

```

```

xlabel('(a)','Fontname','Times','FontSize',10)
set(1,'MarkerSize',4)
set(gca,'Fontname','Times','FontSize',10)

```

```

subplot(1,4,2)
l=plot(Ase(0:0.1:X,X/EC),0:0.1:X);
l=line([0 -SS],[0 -(SS/E1)*(H-X)/ET],'color','r')
l=line([-SS -(SS+E2*(ET-(SS/E1)))],[-(SS/E1)*(H-X)/ET -(ET)*(H-
X)/ET],'color','k')
l=line([0 0],[X-H X])
l=line([0 Ase(X,X/EC)],[X X],'LineStyle','-.')
l=line([0 -(SS+E2*(ET-(SS/E1)))],[X-H X-H],'LineStyle','-.')

```

```

text(0,X,'\uparrow ',...
    'HorizontalAlignment','right','VerticalAlignment','top')
text(0,0,'\downarrow ',...
    'HorizontalAlignment','right','VerticalAlignment','bottom')
text(0,0,'\uparrow ',...

```

```

    'HorizontalAlignment','left','VerticalAlignment','top')
text(0,X-H,' \downarrow',...
    'HorizontalAlignment','left','VerticalAlignment','bottom')

text(0,X/2,'x ',...
    'HorizontalAlignment','right')
text(0,(X-H)/2,' h-x ',...
    'HorizontalAlignment','left')

text(Ase(X/2,X/EC)/2,X/2,['C = ' num2str(C)],'color','r')
text(-Ase(X/2,X/EC)/2,(X-H)/(3/2),[' T = ' num2str(T)],'color','r')

xlabel('(b)','Fontname','Times','FontSize',10)
set(1,'MarkerSize',4)
set(gca,'Fontname','Times','FontSize',10)

subplot(1,4,3)
l=plot(0:0.00099:.03,Ase(0:0.00099:.03,1));
l=line([EC EC],[0 Ase(EC,1)],'LineStyle','-')
text(EC,Ase(EC,1),['\leftarrow Ec = ' num2str(EC)],...
    'HorizontalAlignment','left')
grid on;
xlabel('(c)','Fontname','Times','FontSize',10)
set(1,'MarkerSize',4)
set(gca,'Fontname','Times','FontSize',10)

subplot(1,4,4)

l=line([0 SS/E1],[0 SS],'color','r')
l=line([SS/E1 ET*1.1],[SS ET*E2*1.1])
l=line([ET ET],[0 ET*E2],'LineStyle','-')
text(SS/E1,SS,['\leftarrow E2 = ' int2str(E2)],...
    'HorizontalAlignment','left')

```

```

text(ET,ET*E2,['Et = ' num2str(ET) '\rightarrow'],...
    'HorizontalAlignment','right')

grid on;
xlabel('gholi','Fontname','Times','FontSize',10)
set(1,'MarkerSize',4)
set(gca,'Fontname','Times','FontSize',10)

set(gcf,'PaperPosition',[0,0,4.5,1.5])
print -dpng plot4.png
end
end

hold off;

```

ASE Function:

```

function y = f(x,z)
E=z*[0 0.00125 0.0025 0.00375 0.005 0.00625 0.0075 0.00875 0.01 0.01125 0.0125
0.0137 0.015 0.01625 0.0175 0.01875 0.02 0.0215];
S=[0 12.7 25.4 34.29 48.26 58.42 68.58 68.58 64.77 60.96 53.34 48.26 45.72 43.18
40.64 38.1 34.29 0];
Ase = [E;S];
%for i = 1:length(Ase(1,:))-1
%   if(x.>=Ase(1,i))&&(x.<Ase(1,i+1))
for j = 1:length(x)
    y(j)=0;
i(j)=find(x(j)>=Ase(1,:),1, 'last' );
if(i<length(Ase(1,:)))

```

```
    y(j)=((Ase(2,i(j))-Ase(2,i(j)+1))/(Ase(1,i(j))-  
Ase(1,i(j)+1))) * x(j) + ((Ase(2,i(j))*Ase(1,i(j)+1)-  
Ase(2,i(j)+1)*Ase(1,i(j)))/(Ase(1,i(j)+1)-Ase(1,i(j))));  
end  
end  
% end  
%end
```

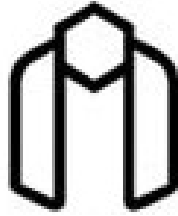

Abstract:

Engineered Cementitious Composite (ECC) is a special class of Fibre Reinforced Cementitious Composite (FRCC) which undergoes strain-hardening, multiple cracking and tensile strain capacity. Material engineering of ECC consists of the relationships between material microstructures, processing, material properties, and performance. And micromechanics provide a rational link between mechanical performance and material properties. Micromechanical parameters associated with fibre, matrix and interface are combined to satisfy a pair of criteria, including the first crack stress criterion and steady state cracking criterion. The satisfaction of these criteria results in a high performance fibre reinforced engineered cementitious composite with strain-hardening behaviour.

While significant advantages have been achieved in the developed countries concrete industry, very limited studies have been carried out on the behaviour of ECC in Iran. The aim of this study is to develop an Engineered Cementitious Composite using local available materials. This thesis discusses in concepts of strain-hardening, multiple cracking, and steady state cracked region. Next, the result of experimental programme designed to evaluate the properties of Shahrood-ECC.

Finally, through the offered method, tension behavior of ECC is modeled and micromechanics Parameters are calculated.

Key Words: Engineered CementitiousComposites, Strain Hardening, Micromechanic, Multiple Cracking



Shahrood University of Technology

Faculty Architecture and Civil Engineering

**Design of PolyvynilAlcohol Engineered
Cementitious Composite with Strain Hardening
& Multiple Cracking**

Setare Bitaraf

Supervisor:

Dr. Farshid Jandaghi Alaei

Consultant:

Prof. Behroz Hasani

Date: Jul 2011