



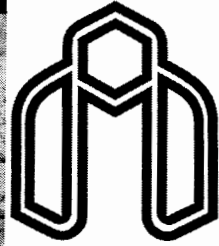
شماره:
تاریخ:
پیوست:

تاییده اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

اعضای هیات داوران نسخه نهائی پایان نامه خانم / آقای سید مرتضی حسینی
تحت عنوان: رسولیه به سبب عدم دسترسی به این فونت دستت گسی در شکل پیوسته

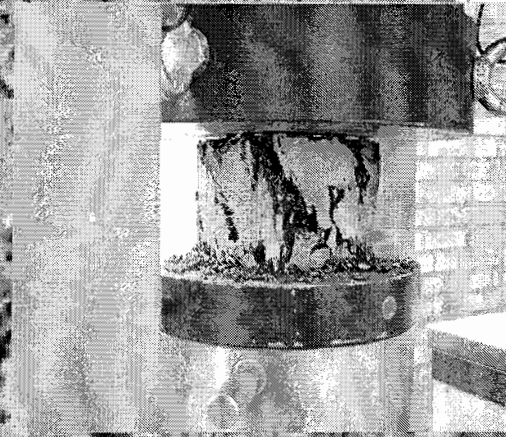
را از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد پیشنهاد می کنند.

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	زینب حسینی	استادیار	
۲- استاد مشاور	علی سجانی	استادیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	زینب حسینی	استادیار	
۴- استاد امتحن	احمد اوی	استادیار	
۵- استاد امتحن	وهدیه رضائیان	استادیار	



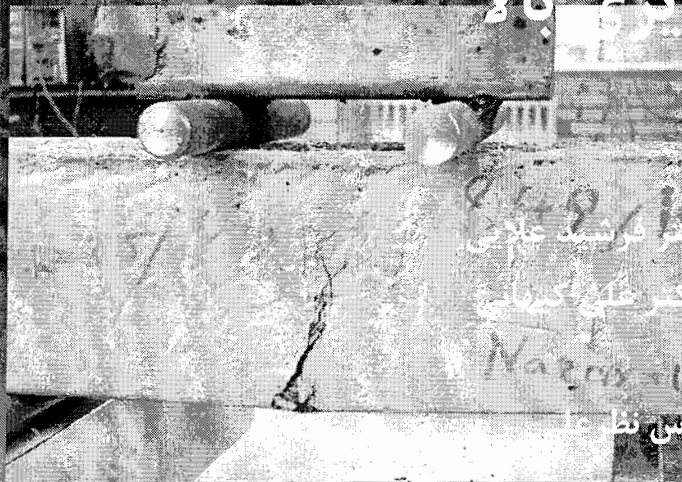
دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری



یابان نامه کارشناسی ارشد عمران گرایش سازه

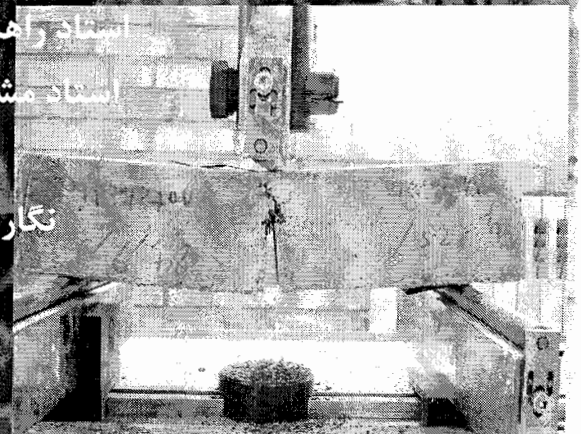
دستیابی به مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با مقاومت کششی و شکل پذیر بالا



استاد راهنما: دکتر فرشته عیلامی

استاد مشاور: دکتر علی کبریانی

نگارش: قدسی نظ علی



خرداد ۱۳۸۵

تقدیم به

پدر و مادرم

که از تمامی وجودشان در ره تکامل من دریغ نکردند

با تشکر و قدر دانی از اساتید ارجمند

جناب آقای دکتر فرشید علایی

جناب آقای دکتر علی کیهانی

چکیده:

بتن به عنوان یکی از مصالح اصلی برای ساخت سازه ها در سراسر جهان مورد استفاده قرار می گیرد. تا کنون پیشرفتهای زیادی در زمینه افزایش مقاومت فشاری و دوام بتن صورت گرفته است. اما معمولا مقاومت کششی و شکل پذیری این بتن ها پایین و شکست آنها بسیار ترد می باشد. بطور کلی روش متداول برای جبران پایین بودن مقاومت کششی و شکل پذیری، مسلح کردن بتن با میلگرد فولادی است. اما میلگردها بصورت موضعی و در امتداد خاصی بتن را تقویت می کنند. ترکها در اعضای بتن مسلح بطور آزاد رشد پیدا کرده تا اینکه به آرماتورها برخورد کنند. جهت کنترل همه جانبه ترک خوردگی در بتن احتیاج به سیستمی است که در تمام جهات بتن تقویت شود. یک راه حل اساسی برای بهبود خصوصیات بتن، مسلح کردن آن با الیاف است. استفاده از الیاف نه تنها باعث بهبود مقاومت کششی می شود، بلکه با کنترل ترک خوردگی و انتقال تنش در بین سطوح ترک خورده باعث بهبود شکل پذیری خواهد شد.

این تحقیق به منظور دستیابی به بتن الیافی با مقاومت کششی و شکل پذیری بالا با استفاده از مصالح موجود در کشور صورت پذیرفت. به طور کلی فعالیتهای انجام شده در این مطالعه را می توان به سه بخش تقسیم نمود: دستیابی به ماتریس پایه سیمانی مناسب برای بتن الیافی، انتخاب شکل الیاف فولادی سازگار با ماتریس و در نهایت دستیابی به بتن الیافی (ماتریس مسلح شده با الیاف) با مقاومت کششی و شکل پذیری بالا.

نتیجه بخش نخست مطالعه دستیابی به ماتریس پایه سیمانی با مقاومت فشاری 1700 kg/cm^2 بود. جهت بهبود مقاومت کششی و شکل پذیری ماتریس الیاف فولادی مجعد با قطر 0.3 mm و طول 20 mm و مقاومت کششی نهایی 18500 kg/cm^2 مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور دستیابی به الیاف سازگار با ماتریس بدست آمده، آزمایشات متعددی بر روی الیاف تک با طول و ارتفاع های موج مختلف انجام گرفت و شکل بهینه الیاف بدست آمد. لازم به ذکر است که برخلاف تحقیقات انجام شده در داخل کشور، الیاف به روش کاملا خودکار با طراحی و ساخت دستگاه کوچکی تولید شد. در نهایت با افزودن ۲ تا ۴ درصد حجمی الیاف فولادی بدست آمده از مرحله دوم مطالعه به ماتریس پایه سیمانی، مقاومت فشاری و کششی بترتیب به 1980 kg/cm^2 و 238 kg/cm^2 و همچنین مقاومت خمشی و انرژی شکست به 232 kg/cm^2 و 9500 N/m افزایش یافت.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

فصل دوم: بتن الیافی

- ۱-۲- مقدمه ۶
- ۲-۲- تاریخچه بتن الیافی ۷
- ۳-۲- مزایای بتن الیافی ۸
- ۴-۲- بتن مسلح به الیاف مصنوعی ۹
- ۱-۴-۲- اکریلیک ۱۰
- ۲-۴-۲- آرمید ۱۱
- ۳-۴-۲- کربن ۱۱
- ۴-۴-۲- نایلون ۱۱
- ۵-۴-۲- پلی استر ۱۲
- ۶-۴-۲- پلی اتیلن ۱۳
- ۷-۴-۲- پلی پروپیلن ۱۳
- ۱-۷-۴-۲- کارایی مخلوط تازه ۱۴
- ۲-۷-۴-۲- مقاومت فشاری ۱۴
- ۳-۷-۴-۲- مدول الاستیسیته ۱۴
- ۴-۷-۴-۲- مدول گسیختگی ۱۴
- ۵-۷-۴-۲- شکل پذیری ۱۵
- ۶-۷-۴-۲- انقباض و ترک خوردگی ۱۶
- ۷-۷-۴-۲- تاثیر افزایش دما بر بتن مسلح با الیاف پلی پروپیلن ۱۷
- ۵-۲- بتن مسلح به الیاف فولادی ۱۷

- ۱۸-۵-۲-۱- خصوصیات مخلوط تازه SFRC..... ۱۸
- ۱۸-۵-۲-۲- خصوصیات مکانیکی SFRC..... ۱۸
- ۱۹-۵-۲-۱- فشار..... ۱۹
- ۱۹-۵-۲-۲- کشش مستقیم..... ۱۹
- ۲۰-۵-۲-۳- برش و پیچش..... ۲۰
- ۲۰-۵-۲-۴- خمش..... ۲۰
- ۲۰-۵-۲-۵- رفتار SFRC تحت بارهای ضربه ای..... ۲۰
- ۲۱-۵-۲-۶- بارهای خستگی..... ۲۱
- ۲۱-۵-۲-۷- طاقت..... ۲۱
- ۲۱-۵-۲-۳- دوام SFRC..... ۲۱
- ۲۱-۵-۲-۱- خوردگی الیاف قبل از ترک خوردگی ماتریس..... ۲۱
- ۲۱-۵-۲-۲- خوردگی الیاف بعد از ترک خوردگی ماتریس..... ۲۱
- ۲۲-۵-۲-۳- انقباض و خزش..... ۲۲
- ۲۲-۵-۲-۴- یخ زدن و ذوب شدن..... ۲۲
- ۲۳-۵-۲-۴- طراحی اعضای SFRC مسلح شده با آرماتور..... ۲۳
- ۲۴-۵-۲-۵- کاربردهای بتن مسلح به الیاف فولادی..... ۲۴
- ۲۵-۵-۲-۶- بتن مسلح به الیاف چند گانه یا ترکیبی..... ۲۵
- ۲۵-۵-۲-۷- نتیجه گیری..... ۲۵

فصل سوم: مکانیک شکست

- ۲۸-۳-۱- مقدمه..... ۲۸
- ۲۹-۳-۲- مکانیک شکست الاستیک خطی..... ۲۹
- ۲۹-۳-۱- تئوری شکست گریفیث..... ۲۹
- ۳۴-۳-۲- محدودیت کاربرد LEFM..... ۳۴

۳۵	۳-۳- تئوری مکانیک شکست غیر خطی
۳۶	۱-۳-۳- مدل ترک مجازی (FCM)
۳۸	۲-۳-۳- مدل (CBM)
۳۹	۴-۳- مکانیک شکست بتن مسلح به الیاف
۴۰	۱-۴-۳- ناحیه دوزنده نوک ترک (FBZ)
۴۱	۲-۴-۳- دوزندگی ترک
۴۳	۳-۴-۳- رفتار FRC تحت تنشهای کششی
۴۶	۵-۳- تعیین پارامترهای مکانیک شکست مصالح از طریق آزمایش
۴۸	۶-۳- شکست ترد و شکست نرم

فصل چهارم: مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با مقاومت و شکل پذیری بالا

۵۰	۱-۴- مقدمه
۵۰	۲-۴- طراحی HPFRCC
۵۲	۱-۲-۴- مقاومت کششی
۵۲	۲-۲-۴- انرژی شکست
۵۳	۳-۲-۴- مقاومت نظیر اولین ترک در ماتریس
۵۴	۴-۲-۴- رفتار سخت شدگی کرنش
۵۵	۳-۴- ساختار ناحیه تماس الیاف و ماتریس
۵۶	۱-۳-۴- الیافی درشت
۵۷	۲-۳-۴- ریز الیاف
۵۷	۳-۳-۴- مکانیزم خرابی
۵۹	۴-۴- تاثیر پارامترهای مختلف در مقاومت کششی و شکل پذیری HPFRCC
۵۹	۱-۴-۴- نسبت حجمی الیاف (V_f)
۵۹	۲-۴-۴- نسبت ظاهری الیاف ($\frac{l}{d}$)

۶۰	..... جهت گیری الیاف..... ۳-۴-۴
۶۲	..... تنشها و کرنشهای جانبی..... ۴-۴-۴
۶۳	..... فاصله و سطح مخصوص الیاف..... ۵-۴-۴
۶۵	..... اندازه الیاف..... ۶-۴-۴
۶۵	..... سرعت بارگذاری و دمای محیط..... ۷-۴-۴
۶۶	..... شکل الیاف..... ۸-۴-۴
۶۶	..... الیاف صاف..... ۱-۸-۴-۴
۶۷	..... الیافی قلابدار..... ۲-۸-۴-۴
۶۹	..... الیافی مجعد..... ۳-۸-۴-۴
۷۰	..... الیافی پیچیده..... ۴-۸-۴-۴
۷۳	..... معرفی چند HPFRCC..... ۵-۴-۴
۷۳	..... ECC..... ۱-۵-۴-۴
۷۴	..... RPC..... ۲-۵-۴-۴
۷۶	..... SIFCON..... ۳-۵-۴-۴
۷۸	..... CARDIFRC [®] ۴-۵-۴-۴
۷۸	..... مقایسه انواع HPFRCC..... ۶-۴-۴
۸۰	..... کاربردهای HPFRCC..... ۷-۴-۴
۸۰	..... اندرکنش HPFRCC و آرماتور در اعضای بتن مسلح..... ۱-۷-۴-۴
۸۳	..... ترمیم سازه های بتنی با استفاده از HPFRCC..... ۲-۷-۴-۴
۸۵	..... میراگرهای HPFRCC..... ۳-۷-۴-۴
۸۶	..... نتیجه گیری..... ۸-۴-۴

فصل پنجم: بتن با مقاومت زیاد

۹۰	..... مقدمه..... ۱-۵
۹۱	..... تعریف بتن با مقاومت زیاد..... ۲-۵

- ۹۲..... ۳-۵- عوامل موثر در مقاومت فشاری بتن.....
- ۹۳..... ۴-۵- مصالح تشکیل دهنده بتن مقاومت بالا.....
- ۹۳..... ۱-۴-۵- سیمان.....
- ۹۴..... ۲-۴-۵- سنگدانه ها.....
- ۹۴..... ۱-۲-۴-۵- سنگدانه های درشت.....
- ۹۴..... ۲-۲-۳-۳- سنگدانه های ریز.....
- ۹۵..... ۳-۴-۵- افزودنی ها.....
- ۹۵..... ۱-۳-۴-۵- فوق روان کننده ها.....
- ۹۶..... ۲-۳-۴-۵- افزودنی های معدنی.....
- ۹۶..... ۱-۲-۳-۴-۵- میکروسیلیس.....
- ۹۸..... ۲-۲-۳-۴-۵- تاثیر میکروسیلیس در بتن تازه.....
- ۹۸..... ۳-۲-۳-۴-۵- تاثیر میکروسیلیس در بتن سخت شده.....
- ۱۰۰..... ۵-۵- خصوصیات بتن مقاومت بالا.....
- ۱۰۰..... ۱-۵-۵- رابطه تنش کرنش تحت بارهای فشاری تک محوری.....
- ۱۰۳..... ۲-۵-۵- شکل پذیری و جذب انرژی.....
- ۱۰۳..... ۳-۵-۵- روند کسب مقاومت.....
- ۱۰۳..... ۴-۵-۵- خود انقباضی.....
- ۱۰۴..... ۵-۵-۵- کارایی و چسبندگی بتن.....
- ۱۰۵..... ۶-۵- معرفی چند نوع بتن با مقاومت زیاد.....
- ۱۰۴..... ۱-۶-۵- DSP.....
- ۱۰۵..... ۲-۶-۵- DCC.....
- ۱۰۶..... ۷-۵- نتیجه گیری.....

فصل ششم: تشریح برنامه آزمایشگاهی

۱۰۹	۱-۶- مقدمه
۱۱۰	۲-۶- مصالح مصرفی
۱۱۱	۱-۲-۶- سیمان
۱۱۲	۲-۲-۶- میکروسیلیس
۱۱۲	۳-۲-۶- فوق روان کننده
۱۱۳	۴-۲-۶- سنگدانه
۱۱۴	۵-۲-۶- الیاف فولادی
۱۱۴	۳-۶- آزمایشهای بتن مسلح به الیاف فولادی (SFRC)
۱۱۶	۱-۳-۶- مقاومت فشاری
۱۱۷	۲-۳-۶- مقاومت کششی دو نیم شدن
۱۱۸	۳-۳-۶- مقاومت خمشی
۱۱۹	۴-۳-۶- طاقت خمشی و مقاومت اولین ترک
۱۲۱	۵-۳-۶- انرژی شکست (G_f)
۱۲۱	۴-۶- دستیابی به ماتریس سیمانی جهت استفاده در بتن الیافی
۱۲۲	۱-۴-۶- روند طراحی بتن با مقاومت بالا
۱۲۳	۲-۴-۶- دانه بندی سنگدانه ها در بتن مقاومت بالا
۱۲۷	۳-۴-۶- ساخت مخلوطهای آزمایشی
۱۲۷	۱-۳-۴-۶- روش ساخت بتن با مقاومت بالا با استفاده از میکسر
۱۳۰	۲-۳-۴-۶- نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوطهای آزمایشی
۱۳۰	MIX-A1 - ۱-۲-۳-۴-۶
۱۳۲	MIX-A2 - ۲-۲-۳-۴-۶
۱۳۲	MIX-A3 - ۳-۲-۳-۴-۶
۱۳۲	MIX-A4 - ۴-۲-۳-۴-۶
۱۳۳	MIX-A5 - ۵-۲-۳-۴-۶

۱۳۳.....	MIX-A6 -۶-۲-۳-۴-۶
۱۳۷.....	MIX-A7 -۷-۲-۳-۴-۶
۱۳۸.....	MIX-A8 -۸-۲-۳-۴-۶
۱۳۸.....	MIX-A9 -۹-۲-۳-۴-۶
۱۳۹.....	MIX-A10 -۱۰-۲-۳-۴-۶
۱۴۰.....	۴-۴-۶- ساخت بتن در حجم زیاد با استفاده از بتونیر.....
۱۴۰.....	۱-۴-۴-۶- روش ساخت بتن با استفاده از بتونیر.....
۱۴۱.....	۲-۴-۴-۶- نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوطهای ساخته شده با بتونیر.....
۱۴۳.....	۵-۶- طراحی هندسه الیاف فولادی سازگار با ماتریس.....
۱۴۳.....	۱-۵-۶- آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی الیافی فولادی.....
۱۴۵.....	۱-۱-۵-۶- روش انجام آزمایش.....
۱۴۶.....	۲-۱-۵-۶- نتایج آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی الیاف فولادی.....
۱۵۰.....	۶-۶- تولید الیاف فولادی.....
۱۵۲.....	۱-۶-۶- دستگاه ساخت الیاف فولادی.....
۱۵۳.....	۷-۶- ساخت نمونه های اصلی بتن الیافی و آزمایشات نهایی.....
۱۵۵.....	۱-۷-۶- روش ساخت بتن الیافی با استفاده از بتونیر.....
۱۵۵.....	۲-۷-۶- نتایج آزمایش مقاومت فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست بتن الیافی.....
۱۵۵.....	۱-۲-۷-۶- آزمایش مقاومت فشاری.....
۱۶۱.....	۲-۲-۷-۶- آزمایش مقاومت خمشی.....
۱۶۶.....	۳-۲-۷-۶- آزمایش انرژی شکست.....
۱۷۲.....	۴-۲-۷-۶- مقاومت کششی دونیم شدن.....

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۷۵.....	۱-۷- نتیجه گیری.....
۱۷۷.....	۲-۷- پیشنهادات.....

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- مکانیزم توقف ترک توسط الیاف در FRC ۹
- شکل ۲-۲- رفتار خمشی بتن مسلح شده با انواع الیافی مصنوعی (نایلون ، اکریلیک و آرامید) ۱۲
- شکل ۳-۲- رفتار بتن مسلح شده با الیاف پلی اتیلن ۱۳
- شکل ۴-۲- مقاومت خمشی بتن مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلن ۱۵
- شکل ۵-۲- رفتار بتن مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلن تحت بارهای خمشی ۱۵
- شکل ۶-۲- رفتار بتن مسلح شده با نوع خاصی الیاف پلی پروپیلن تحت بارهای خمشی ۱۶
- شکل ۷-۲- کاهش عرض ترکها در اثر افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن ۱۶
- شکل ۸-۲- انواع الیاف فولادی ۱۷
- شکل ۹-۲- کاهش عرض ترکها با افزایش درصد الیاف فولادی ۲۲
- شکل ۱۰-۲- فرضیات طراحی تیرهای R/SFRC ۲۳
- شکل ۱-۳- اشکال مختلف ترک خوردگی ۳۰
- شکل ۲-۳- توزیع تنش در نواحی نزدیک نوک ترک خوردگی ۳۱
- شکل ۳-۳- تاثیر بعد سازه در تنش خرابی سازه های مشابه از نظر هندسی ۳۴
- شکل ۴-۳- ناحیه خرابی نوک ترک (FPZ) در بتن ۳۵
- شکل ۵-۳- ناحیه خطی (L)، غیرخطی (N) و FPZ برای مصالح مختلف ۳۶
- شکل ۶-۳- توزیع تنش در FPZ برای مدل‌های مختلف ۳۷
- شکل ۷-۳- FPZ و FBZ در بتن مسلح به الیاف ۴۱
- شکل ۸-۳- ترک تحت تنش σ_a ، بار گسترده دوزنده P و زوج بار شکافنده F ۴۳
- شکل ۹-۳- منحنی شماتیک تنش کششی در مقابل باز شدگی دهانه ترک $CMOD - \sigma$ و مراحل مختلف خرابی کامپوزیت ۴۶
- شکل ۱۰-۳- تیر ترک دار تحت خمش ۴۸

- شکل ۴-۱- مقایسه شماتیک رفتار FRC و HPFRCC تحت تنشهای کششی..... ۵۱
- شکل ۴-۲- تاثیر الیاف مختلف در رفتار FRC بعد از ترک خوردگی ماتریس..... ۵۴
- شکل ۴-۳- ساختار ITZ در اطراف الیاف درشت فولادی..... ۵۷
- شکل ۴-۴- شروع جدا شدگی الیاف از ماتریس..... ۵۸
- شکل ۴-۵- خمش الیاف در اثر ترک خوردگی ماتریس (a) ، نیروهای ایجاد شده در الیاف و ماتریس (b)..... ۶۰
- شکل ۴-۶- تاثیر زاویه تمایل در مقاومت بیرون کشیدگی الیاف شکل پذیر
- (فولاد و پلی پروپیلن) و شکننده (کربن)..... ۶۱
- شکل ۴-۷- تاثیر زاویه تمایل در مقاومت بیرون کشیدگی الیاف ریز و درشت فولادی..... ۶۱
- شکل ۴-۸- تاثیر فاصله الیاف در افزایش مقاومت کششی ماتریس..... ۶۴
- شکل ۴-۹- رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی..... ۶۷
- شکل ۴-۱۰- تاثیر مهار مکانیکی و اصطکاک در مقاومت بیرون کشیدگی الیافی قلابدار..... ۶۸
- شکل ۴-۱۱- مدل سازی مراحل بیرون کشیدگی الیاف فولادی قلابدار..... ۶۹
- شکل ۴-۱۲- رفتار بیرون کشیدگی الیافی مجعد..... ۷۰
- شکل ۴-۱۳- تاثیر زاویه تمایل در مقاومت بیرون کشیدگی الیاف فولادی مختلف..... ۷۰
- شکل ۴-۱۴- انواع الیاف *Torex*..... ۷۲
- شکل ۴-۱۵- مقایسه رفتار FRC های ساخته شده از الیافی فولادی مختلف ، تحت تنشهای کششی مستقیم..... ۷۲
- شکل ۴-۱۶- الیاف *Torex* با سطح مقطع مربعی و مثلثی..... ۷۳
- شکل ۴-۱۷- رفتار ECC تحت تنشهای کششی مستقیم..... ۷۴
- شکل ۴-۱۸- نمودار تنش - کرنش SIFCON در حالت کشش و فشار..... ۷۷
- شکل ۴-۱۹- نمودار تنش - کرنش HPFRCC ها تحت تنش کششی مستقیم..... ۷۹
- شکل ۴-۲۰- شکل گیری ترک و توزیع تنش در اعضای R/C و R/ECC..... ۸۲
- شکل ۴-۲۱- ترمیم و مقاوم سازی تیرهای بتن مسلح با استفاده از ورقه های *cardifrc*..... ۸۵
- شکل ۴-۲۲- نحوه کاربرد میراگرهای HPFRCC در سازه های بتن مسلح..... ۸۶
- شکل ۴-۲۳- آرایش میلگردها در میراگر HPFRCC..... ۸۷

- شکل ۵-۱- خاصیت پرکنندگی میکروسیلیس در خمیر سیمان ۹۹
- شکل ۵-۲- تاثیر پرکنندگی و فعالیت پوزولانی میکروسیلیس در مقاومت فشاری بتن ۱۰۰
- شکل ۵-۳- نمودار تنش- کرنش بتن تحت بارهای فشاری ۱۰۱
- شکل ۵-۴- تغییرات انرژی جذب شده نسبی با افزایش مقاومت فشاری ۱۰۲
- شکل ۵-۵- نمودار تنش- کرنش بتن با مقاومت بسیار زیار تحت شش سیکل بارگذاری و باربرداری ۱۰۲
- شکل ۵-۶- تغییر در ساختار سیمان با افزودن فوق روان کننده و میکروسیلیس ۱۰۵
-
- شکل ۶-۱- دستگاه آزمایش کشش، فشار و خمش برای کنترل کیفیت مصالح ساختمانی ۱۱۵
- شکل ۶-۲- آزمایش خمش در حالت بارگذاری یک سوم دهانه ۱۱۹
- شکل ۶-۳- مقادیر اندیس طاقت با توجه به نمودار نیرو-تغییر مکان در آزمایش خمش ۱۲۰
- شکل ۶-۴- منحنی دانه بندی سنگدانه ها ۱۲۶
- شکل ۶-۵- بتونیر و میکسر ۱۲۹
- شکل ۶-۶- جزئیات آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی الیاف فولادی ۱۴۸
- شکل ۶-۷- دستگاه ساخته شده برای تولید الیاف فولادی ۱۵۳
- شکل ۶-۸- شکست نمونه تیر ساده بتن الیافی تحت خمش ۱۶۱
- شکل ۶-۹- شکست نمونه تیر شکاف دار بتن الیافی تحت خمش ۱۶۷

فهرست نمودارها

- نمودار ۱-۶- تغییر مقاومت فشاری MIX-A1 با افزایش نسبت آب به سیمان ($SP/(C+SF)=2\%$)..... ۱۳۱
- نمودار ۲-۶- تغییر مقاومت فشاری MIX-A1 با افزایش نسبت آب به سیمان ($SP/(C+SF)=1.5\%$)..... ۱۳۲
- نمودار ۳-۶- تغییر مقاومت فشاری MIX-A1 با افزایش نسبت آب به سیمان ($SP/(C+SF)=1.2\%$)..... ۱۳۲
- نمودار ۴-۶- تغییر مقاومت فشاری MIX-A6 با افزایش نسبت آب به سیمان ($SP/(C+SF)=2\%$)..... ۱۳۵
- نمودار ۵-۶- تغییر مقاومت فشاری MIX-A6 با افزایش نسبت آب به سیمان ($SP/(C+SF)=1.5\%$)..... ۱۳۵
- نمودار ۶-۶- تغییر مقاومت فشاری MIX-A6 با افزایش نسبت آب به سیمان ($SP/(C+SF)=1.2\%$)..... ۱۳۶
- نمودار ۷-۶- تغییر مقاومت فشاری MIX-A6 با افزایش نسبت آب به سیمان ($SP/(C+SF)=1\%$)..... ۱۳۶
- نمودار ۸-۶- تغییر مقاومت فشاری MIX-A6 با افزایش نسبت آب به سیمان (۷ روز عمل آوری در دمای $90^{\circ}C$)..... ۱۳۶
- نمودار ۹-۶- نمودار تنش- کرنش MIX-A6 تحت بارهای فشاری (۷ روز عمل آوری در دمای $20^{\circ}C$)..... ۱۳۷
- نمودار ۱۰-۶- نمودار تنش- کرنش MIX-A6 تحت بارهای فشاری (۷ روز عمل آوری در دمای $90^{\circ}C$)..... ۱۳۷
- نمودار ۱۱-۶- نمودار تنش- کرنش مخلوطهای ساخته شده با بتونیر تحت بارهای فشاری در سن ۷ و ۲۸ روزه..... ۱۴۲
- نمودار ۱۲-۶- رفتار MIX-B1 تحت تنش فشاری (بدون الیاف)..... ۱۵۶
- نمودار ۱۳-۶- رفتار SFRC-1 تحت تنش فشاری..... ۱۵۷
- نمودار ۱۴-۶- رفتار SFRC-2 تحت تنش فشاری..... ۱۵۷
- نمودار ۱۵-۶- رفتار SFRC-3 تحت تنش فشاری..... ۱۵۸
- نمودار ۱۶-۶- رفتار SFRC-4 تحت تنش فشاری..... ۱۵۸
- نمودار ۱۷-۶- رفتار SFRC-5 تحت تنش فشاری..... ۱۵۹
- نمودار ۱۸-۶- رفتار SFRC-6 تحت تنش فشاری..... ۱۵۹
- نمودار ۱۹-۶- رفتار SFRC-7 تحت تنش فشاری..... ۱۶۰
- نمودار ۲۰-۶- رفتار SFRC-8 تحت تنش فشاری..... ۱۶۰
- نمودار ۲۱-۶- رفتار خمشی MIX-B1 (بدون الیاف)..... ۱۶۲
- نمودار ۲۲-۶- رفتار خمشی SFRC-1..... ۱۶۲
- نمودار ۲۳-۶- رفتار خمشی SFRC-2..... ۱۶۳

۱۶۳.....	نمودار ۶-۲۴- رفتار خمشی SFRC-3
۱۶۴.....	نمودار ۶-۲۵- رفتار خمشی SFRC-4
۱۶۴.....	نمودار ۶-۲۶- رفتار خمشی SFRC-5
۱۶۵.....	نمودار ۶-۲۷- رفتار خمشی SFRC-6
۱۶۵.....	نمودار ۶-۲۸- رفتار خمشی SFRC-7
۱۶۶.....	نمودار ۶-۲۹- رفتار خمشی SFRC-8
۱۶۸.....	نمودار ۶-۳۰- رفتار خمشی تیر شکاف دار MIX-B1 (بدون الیاف)
۱۶۸.....	نمودار ۶-۳۱- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-1
۱۶۹.....	نمودار ۶-۳۲- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-2
۱۶۹.....	نمودار ۶-۳۳- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-3
۱۷۰.....	نمودار ۶-۳۴- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-4
۱۷۰.....	نمودار ۶-۳۵- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-5
۱۷۱.....	نمودار ۶-۳۶- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-6
۱۷۱.....	نمودار ۶-۳۷- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-7
۱۷۲.....	نمودار ۶-۳۸- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-8

فهرست جداول

- جدول ۱-۲- انواع الیاف مصنوعی و خصوصیات مکانیکی آنها..... ۱۰
- جدول ۱-۴- تنش فشاری و اصطحکاکی ایجاد شده در سطح الیاف در اثر خود انقباضی در خمیر سیمان..... ۶۲
- جدول ۲-۴- طرح اختلاط و خصوصیات مکانیکی cardifrc..... ۷۹
- جدول ۳-۴- انواع HPFRCC و خصوصیات مکانیکی آنها..... ۸۱
- جدول ۱-۵- طبقه بندی بتن های با مقاومت بالا..... ۹۱
- جدول ۱-۶- طرح مخلوط های اولیه..... ۱۱۰
- جدول ۲-۶- طرح مخلوطهای آزمایشی با استفاده از میکسر..... ۱۲۳
- جدول ۳-۶- دانه بندی ماسه سیلیسی 0.1-0.25 میلیمتر(منحنی شماره ۱)..... ۱۲۴
- جدول ۴-۶- دانه بندی ماسه کوارتز 0-4.75 میلیمتر(منحنی شماره ۴)..... ۱۲۴
- جدول ۵-۶- دانه بندی ماسه کوارتز 0-0.3 میلیمتر(منحنی شماره ۲)..... ۱۲۵
- جدول ۶-۶- دانه بندی ماسه کوارتز 0-0.6 میلیمتر(منحنی شماره ۳)..... ۱۲۵
- جدول ۷-۶- دانه بندی ماسه کوارتز 0-4.75 میلیمتر(منحنی شماره ۵)..... ۱۲۵
- جدول ۸-۶- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A1 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده..... ۱۳۱
- جدول ۹-۶- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A2...5 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده..... ۱۳۳
- جدول ۱۰-۶- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A6 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده..... ۱۳۴
- جدول ۱۱-۶- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A6 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده..... ۱۳۴
- جدول ۱۲-۶- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A6 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده..... ۱۳۵
- جدول ۱۳-۶- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A9 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده..... ۱۳۸
- جدول ۱۴-۶- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A9 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده..... ۱۳۹
- جدول ۱۵-۶- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A7&8&10 با مقادیر مختلف آب و

فوق روان کننده	۱۳۹
جدول ۶-۱۶- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷و۲۸ روزه MIX-A6 (ساخته شده با بتونیر) با مقادیر مختلف آب و	
فوق روان کننده	۱۴۲
جدول ۶-۱۷- مشخصات ماتریس بتنی (نسبت وزنی).....	۱۴۶
جدول ۶-۱۸- نتایج آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی الیافی فولادی صاف با قطر 0.3mm	۱۴۷
جدول ۶-۱۹- نتایج آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی الیافی مجعد با قطر 0.3mm و طول مدفون 1cm	۱۴۹
جدول ۶-۲۰- طرح اختلاط بتن الیافی	۱۵۴
جدول ۶-۲۱- میانگین مقاومت فشاری و جذب انرژی نمونه های بتن الیافی در سن ۲۸ روزه	۱۵۶
جدول ۶-۲۲- نتایج آزمایش انرژی شکست نمونه های بتن الیافی در سن ۲۸ روزه	۱۶۷
جدول ۶-۲۳- نتایج آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن نمونه های بتن الیافی در سن ۲۸ روزه	۱۷۳

فصل اول

مقدمه

پیشرفت در تکنولوژی بتن باعث شده است تا امروزه بتن هایی با مقاومت فشاری $100-150\text{ MPa}$ بپراحتی تولید و در پل سازی و ساختمانهای بلند مورد استفاده قرار گیرند. با افزایش مقاومت فشاری، رفتار بتن بسیار ترد می شود و شاخه صعودی و نزولی منحنی تنش کرنش تحت بارهای فشاری با شیب بیشتری نسبت به بتن معمولی تغییر خواهد کرد. مقاومت کششی بتن های با مقاومت بالا نیز نسبت به بتن های معمولی کمتر است. بتن با مقاومت بالا به عنوان مصالحی شکننده، بعد از ترک خوردگی مقاومت و شکل پذیری خود را از دست می دهند. وقتی مصالح شکننده تحت کشش قرار می گیرند ابتدا رفتار الاستیک از خود نشان می دهند، سپس ترکهای ریز شکل می گیرند. با افزایش بار این ترکهای ریز به هم متصل شده و یک ترک موضعی تشکیل می شود و شکست ناگهانی رخ می دهد.

میزان جذب انرژی و مقاومت کششی بتن های مقاومت بالا را می توان بطور قابل ملاحظه ای با استفاده از الیاف بهبود بخشید. افزودن الیاف فولادی باعث بهبود مقاومت خستگی بتن مقاومت بالا می شود. بهبود عملکرد بتن بستگی به کیفیت اتصال و مهار الیاف دارد. از اینرو استفاده از الیاف فولادی تغییر شکل یافته نسبت به الیاف ساده بسیار موثرتر خواهد بود.

بتن الیافی (FRC)^۱ مخلوطی است شامل الیاف کوتاه و منقطع که در جهات مختلف و بصورت تصادفی توزیع شده اند. کامپوزیتهای الیافی دارای خصوصیات مکانیکی بهبود یافته ای نسبت به مصالح شکننده می باشند. استفاده از الیاف بصورت رشته های نازک و کوتاه که در تمام جهات در مصالح سیمانی بصورت تصادفی توزیع می شوند، رفتار آنها را بعد از شکل گیری اولین ترک تحت تأثیر قرار می دهد و باعث بهبود شکل پذیری و مقاومت بتن می شود. شکست FRC تنها با گسیختگی الیاف یا بیرون کشیده شدن آنها از ماتریس همراه است. میزان تأثیر الیاف به عواملی چون مقاومت ماتریس، خصوصیات الیاف و کیفیت اتصال (چسبندگی) الیاف به ماتریس بستگی دارد. معمولاً مقاومت اولین ترک ماتریس با افزودن الیاف، افزایش پیدا نمی کند. در این موارد بیشترین

۱ - Fiber Reinforced Concrete

مکانیزم شکست آنها مورد بررسی قرار می گیرد. در این بخش پارامترهایی نظیر طاقت شکست^۱ (K_{IC}) و انرژی شکست^۲ (G_f) تعریف می شوند.

در فصل چهارم مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با مقاومت کششی و شکل پذیری بالا از بتن الیافی معمولی متمایز می شود. در این فصل تاثیر پارامترهای مختلف مانند نسبت حجمی، نسبت ظاهری، اندازه و شکل، زاویه الیاف و همچنین خصوصیات سطح تماس الیاف و ماتریس در مشخصه های اصلی این مصالح تشریح خواهد شد. در ادامه چند نوع FRC معرفی می شوند و مثالهایی از کاربردهای نوین این مصالح ارائه خواهد شد.

از آنجایی که مقاومت و کارایی ماتریس از عوامل تاثیر گذار در خصوصیات بتن الیافی می باشند، لذا در فصل پنجم بتن با مقاومت زیاد تعریف می شود. در این فصل عوامل موثر در مقاومت فشاری بتن بررسی می شوند. سپس توضیحات مختصری درباره اجزاء تشکیل دهنده بتن مقاومت بالا و همچنین خصوصیات این مصالح ارائه می شود. در پایان این فصل چند نوع بتن با مقاومت بسیار بالا معرفی خواهد شد.

در فصل ششم برنامه آزمایشگاهی این تحقیق تشریح می شود. فعالیتهای آزمایشگاهی به چهار مرحله تقسیم می شود که به ترتیب عبارتند از: ۱- دستیابی به ماتریس با مقاومت فشاری، کارایی و حالت خمیری مناسب جهت استفاده در بتن الیافی. ۲- طراحی هندسه الیاف فولادی سازگار با ماتریس. ۳- تولید الیاف فولادی. ۴- مرحله نهایی ساخت نمونه های اصلی بتن الیافی و انجام آزمایشات مقاومت فشاری، کششی، خمش و انرژی شکست بر روی آنها می باشد.

۱ - Fracture Toughness

۲ - Fracture Energy

۲-۱- مقدمه :

بتن دارای مقاومت زیادی در فشار می باشد، ولی مقاومت کششی بسیار پایین و شکنندگی نسبتاً زیاد آن باعث گردیده که در آیین نامه های طراحی مقاومت کششی برای بتن منظور نشده و مقاومت برشی نیز به اندازه معینی محدود گردد. استفاده از میلگرد یکی از روشهای رایج برای کاهش و کنترل عرض ترکهای حاصل از کشش مستقیم یا برش می باشد. اما از آنجا که میلگرد منحصر به بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می دهد، تصور اینکه مقطع بتن ایزوتروپ و هموزن است، چندان صحیح نخواهد بود [۲]. به منظور ایجاد شرایط ایزوتروپ و کاهش ضعف شکنندگی و تردی بتن و ایجاد سیستمی که بتواند در تمام جهات بطور تقریباً یکنواخت سبب افزایش نرمی شده و مقاومت کششی را نیز حفظ کند، استفاده از رشته های نازک و کوتاه که بصورت تصادفی در تمام جهات در بتن توزیع شود، روش مناسبی به نظر می رسد. این رشته های نازک الیاف^۱ نامیده می شوند که دارای انواع و شکلهای مختلف بوده و کاربردهای متعددی دارند.

بتن مسلح به الیاف یا بتن الیافی^۲ (FRC)، بتنی است که شامل سیمان هیدرولیکی، سنگدانه و الیاف کوتاه و ناپیوسته می باشد. این مصالح ممکن است شامل مواد پوزولانی و افزودنی هایی که در بتن معمولی استفاده می شوند باشد. الیاف معمولاً از جنس فولاد، شیشه و مواد پلیمری (مصنوعی) می باشند که بصورت تصادفی در بتن توزیع شده اند. الیاف طبیعی نیز مانند پنبه نسوز^۳ و کنف برای مسلح کردن بتن بکار می روند. معمولاً طول و قطر الیاف بترتیب بیش از ۷۶ mm و ۱ mm نمی باشد [۶]. ماتریس^۴ بتنی نیز می تواند از جنس ملات یا بتن معمولی و یا بتن های خاص برای کاربردهای ویژه باشد.

۱ - Fiber

۲ - Fiber Reinforced Concrete

۳ - Asbestos (آزبست)

۴ - Matrix

۲-۱- مقدمه :

بتن دارای مقاومت زیادی در فشار می باشد، ولی مقاومت کششی بسیار پایین و شکنندگی نسبتاً زیاد آن باعث گردیده که در آیین نامه های طراحی مقاومت کششی برای بتن منظور نشده و مقاومت برشی نیز به اندازه معینی محدود گردد. استفاده از میلگرد یکی از روشهای رایج برای کاهش و کنترل عرض ترکهای حاصل از کشش مستقیم یا برش می باشد. اما از آنجا که میلگرد منحصر به بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می دهد، تصور اینکه مقطع بتن ایزوتروپ و هموزن است، چندان صحیح نخواهد بود [۲]. به منظور ایجاد شرایط ایزوتروپ و کاهش ضعف شکنندگی و تردی بتن و ایجاد سیستمی که بتواند در تمام جهات بطور تقریباً یکنواخت سبب افزایش نرمی شده و مقاومت کششی را نیز حفظ کند، استفاده از رشته های نازک و کوتاه که بصورت تصادفی در تمام جهات در بتن توزیع شود، روش مناسبی به نظر می رسد. این رشته های نازک الیاف^۱ نامیده می شوند که دارای انواع و شکلهای مختلف بوده و کاربردهای متعددی دارند.

بتن مسلح به الیاف یا بتن الیافی^۲ (FRC)، بتنی است که شامل سیمان هیدرولیکی، سنگدانه و الیاف کوتاه و ناپیوسته می باشد. این مصالح ممکن است شامل مواد پوزولانی و افزودنی هایی که در بتن معمولی استفاده می شوند باشد. الیاف معمولاً از جنس فولاد، شیشه و مواد پلیمری (مصنوعی) می باشند که بصورت تصادفی در بتن توزیع شده اند. الیاف طبیعی نیز مانند پنبه نسوز^۳ و کنف برای مسلح کردن بتن بکار می روند. معمولاً طول و قطر الیاف بترتیب بیش از 76 mm و 1 mm نمی باشد [۶]. ماتریس^۴ بتنی نیز می تواند از جنس ملات یا بتن معمولی و یا بتن های خاص برای کاربردهای ویژه باشد.

۱ - Fiber

۲ - Fiber Reinforced Concrete

۳- Asbestos (آزبست)

۴ - Matrix

بتن دارای مقاومت زیادی در فشار می باشد، ولی مقاومت کششی بسیار پایین و شکنندگی نسبتاً زیاد آن باعث گردیده که در آیین نامه های طراحی مقاومت کششی برای بتن منظور نشده و مقاومت برشی نیز به اندازه معینی محدود گردد. استفاده از میلگرد یکی از روشهای رایج برای کاهش و کنترل عرض ترکهای حاصل از کشش مستقیم یا برش می باشد. اما از آنجا که میلگرد منحصراً بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می دهد، تصور اینکه مقطع بتن ایزوتروپ و هموزن است، چندان صحیح نخواهد بود [۲]. به منظور ایجاد شرایط ایزوتروپ و کاهش ضعف شکنندگی و تردی بتن و ایجاد سیستمی که بتواند در تمام جهات بطور تقریباً یکنواخت سبب افزایش نرمی شده و مقاومت کششی را نیز حفظ کند، استفاده از رشته های نازک و کوتاه که بصورت تصادفی در تمام جهات در بتن توزیع شود، روش مناسبی به نظر می رسد. این رشته های نازک الیاف^۱ نامیده می شوند که دارای انواع و شکلهای مختلف بوده و کاربردهای متعددی دارند.

بتن مسلح به الیاف یا بتن الیافی^۲ (FRC)، بتنی است که شامل سیمان هیدرولیکی، سنگدانه و الیاف کوتاه و ناپیوسته می باشد. این مصالح ممکن است شامل مواد پوزولانی و افزودنی هایی که در بتن معمولی استفاده می شوند باشد. الیاف معمولاً از جنس فولاد، شیشه و مواد پلیمری (مصنوعی) می باشند که بصورت تصادفی در بتن توزیع شده اند. الیاف طبیعی نیز مانند پنبه نسوز^۳ و کنف برای مسلح کردن بتن بکار می روند. معمولاً طول و قطر الیاف بترتیب بیش از 76 mm و 1 mm نمی باشد [۶]. ماتریس^۴ بتنی نیز می تواند از جنس ملات یا بتن معمولی و یا بتن های خاص برای کاربردهای ویژه باشد.

۱ - Fiber

۲ - Fiber Reinforced Concrete

۳- Asbestos (آزبست)

۴ - Matrix

۲-۳- مزایای بتن الیافی :

یکی از بزرگترین مزایای کاربرد الیاف در بتن افزایش خدمت پذیری دراز مدت سازه ها می باشد. خدمت پذیری توانایی حفظ مقاومت، یکپارچگی و عملکرد مورد انتظار در طول عمر مفید سازه می باشد. یکی از جنبه های خدمت پذیری که با افزودن الیاف بهبود می یابد، کنترل ترکها است. ترکهای عریض شکل ظاهری و قابلیت اعتماد سازه را تحت تأثیر قرار می دهد. الیاف مانع ایجاد ترکهای عریض و نفوذ آب و مواد دیگر، و در نتیجه کاهش خوردگی آرماتورها می شود. با استفاده از درصد های بالاتر الیاف مقاومت کششی ماتریس افزایش پیدا می کند. در روشهای متداول مسلح کردن سازه های بتنی هزینه و زمان زیادی صرف آرماتوربندی می شود، در صورتی که استفاده از FRC در اکثر موارد باعث کاهش یا حذف کامل آرماتوربندی می شود.

بطور خلاصه مزایای بتن الیافی در مقایسه با بتن معمولی را می توان به شرح زیر بیان کرد:

- مقاومت در برابر تورق، سایش و هوازگی سطح.
- مقاومت زیاد در برابر تنشهای خستگی.
- مقاومت بسیار بالا در برابر ضربه.
- مقاومت کششی زیاد (ظرفیت پذیرش کرنش زیاد).
- قابلیت باربری زیاد بعد از ترک خوردگی.
- مقاومت خمشی و برشی زیاد.
- طاقت خیلی زیاد (شکل پذیری).

قابلیت انعطافی که بتن الیافی دارد، همانند خواص مواد پلاستیکی باعث می شود که بتن الیافی گسیختگی ناگهانی نداشته باشد. از آنجا که الیاف در جسم بتن بصورت سه بعدی پراکنده می شود، در صورت تشکیل یک ترک در جهات مختلف، الیاف اتصالی را بوجود می آورد و از گسترش ترک جلوگیری می نماید (شکل ۲-۱). بنابراین رشته های الیاف بطور فعال در محدود کردن عرض ترکها

است. الیاف مصنوعی ممکن است در اثر حرارت ذوب یا تجزیه شیمیایی شوند. کیفیت اتصال الیاف به ماتریس بستگی به مدول الاستیسیته و نسبت پواسون الیاف دارد. در ادامه تاثیر انواع مختلف الیاف های مصنوعی روی خواص ماتریسهای سیمانی بطور خلاصه شرح داده می شود.

Fiber type	Equivalent diameter, in. x 10 ⁻³	Specific gravity	Tensile strength, ksi	Elastic modulus, ksi	Ultimate elongation, percent	Ignition temperature, degrees F	Melt, oxidation, or decomposition temperature, degrees F	Water absorption per ASTM D 570, percent by weight
Acrylic	0.5-4.1	1.16-1.18	39-145	2600-2800	7.5-50.0	—	430-455	1.0-2.5
Aramid I	0.47	1.44	425	9000	4.4	high	900	4.3
Aramid II	0.40	1.44	340	17,000	2.5	high	900	1.2
Carbon, PAN HM ^۱	0.30	1.6-1.7	360-440	55,100	0.5-0.7	high	752	nil
Carbon, PAN ET ^۲	0.35	1.6-1.7	500-580	33,400	1.0-1.5	high	752	nil
Carbon, pitch GP ^۳	0.39-0.51	1.6-1.7	70-115	4000-5000	2.0-2.4	high	752	3-7
Carbon, pitch HP ^۴	0.15-0.70	1.80-2.15	220-450	22,000-70,000	0.5-1.1	high	932	nil
Nylon ^۵	0.90	1.14	140	750	20	—	392-430	2.8-5.0
Polyester	0.78	1.34-1.39	33-160	2500	12-150	1100	495	0.4
Polyethylene ^۶	1.0-40.0	0.92-0.96	11-85	725	3-80	—	273	nil
Polypropylene ^۶	—	0.90-0.91	20-100	500-700	15	1200	330	nil

جدول ۱-۲- انواع الیاف مصنوعی و خصوصیات مکانیکی آنها [۶]

۴-۱-۲- اکریلیک^۱: مقاومت کششی این الیاف که در صنایع نساجی مورد استفاده قرار می گیرد در حدود $207-345 MPa$ می باشد. اما نوع خاصی از این الیاف که به عنوان جایگزین الیاف آزبست برای مسلح کردن بتن استفاده می شود، دارای مقاومت کششی $1000 MPa$ می باشد. آزمایشات نشان می دهند که با افزایش درصد حجمی الیاف اکریلیک، حد الاستیک^۲ کاهش می یابد و تاثیر آن در بهبود مقاومت خمشی کامپوزیت ناچیز است [۶].

۱ - Acrylic

۲ - Proportional Elastic Limit

۲-۴-۲- آرامید^۱: استفاده از الیاف آرامید برای مسلح کردن بتن از اواخر دهه ۷۰ شروع شد. آرامید نوعی پلیمر با مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بالا است. این الیاف ۵ برابر مقاوم تر از الیاف فولادی در واحد وزن می باشد. مقاومت آن تا دمای $160^{\circ}C$ تحت تاثیر قرار نمی گیرد و پایداری حجمی آن تا دمای $200^{\circ}C$ حفظ می شود. این الیاف در برابر خزش مقاوم است. بهبود خصوصیات بتن مسلح شده با الیاف آرامید انگیزه محققان را برای تحقیق روی این الیاف بیشتر کرد، ولی قیمت بالای الیاف آرامید استفاده تجاری از آن را محدود کرده است و تنها در زمانی که مقاومت کششی بالا نیاز است مورد استفاده قرار می گیرد. این مصالح تحت تنشهای خستگی خمشی بالاتر از حد الاستیک مقاومت زیادی دارد. تحت یک میلیون سیکل بارگذاری خمشی پایین تر از حد الاستیک به اندازه $15 MPa$ هیچ خرابی در آن ایجاد نمی شود [۶].

۲-۴-۳- کربن^۲: الیاف کربن در ابتدا به دلیل مقاومت و سختی بالا در صنایع هوا-فضا مورد استفاده قرار گرفتند. این الیاف در مقایسه با دیگر الیاف مصنوعی قیمت بالایی دارد و همین عامل استفاده تجاری از آن را محدود کرده است. الیاف کربن علاوه بر مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بالا در برابر بسیاری از عوامل شیمیایی مقاوم است. افزودن الیاف کربن به ماتریس بتنی باعث بهبود مقاومت، شکل پذیری، مقاومت در برابر ضربه و پایداری حجمی و کاهش خزش می شود [۶].

۲-۴-۴- نایلون^۳: الیاف نایلون یکی از اولین الیافهای مصنوعی است که برای تقویت بتن بکار گرفته شد و اولین بار توسط ارتش آمریکا برای ساخت سازه های ضد انفجار مورد استفاده قرار گرفت. الیاف نایلون دارای مقاومت کششی بالا و خاصیت ارتجاعی خوبی می باشد و پایداری نسبتا

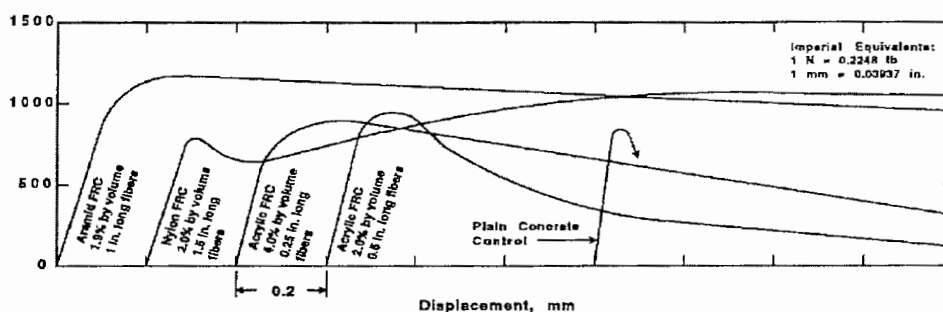
۱ - Aramid

۲ - Carbon

۳ - Nylon

خوبی در برابر حرارت دارد. نایلون ماده ای آبدوست^۱ می باشد و ممکن است تا ۴/۵٪ رطوبت به خود جذب کند. بتن های مسلح شده به این الیاف تحت آزمایشات سالخوردگی تسریع شده^۲ عملکرد خوبی از خود نشان می دهند [۶].

در شکل ۲-۲ رفتار خمشی بتن مسلح شده با انواع الیاف مصنوعی (نایلون، اکریلیک و آرامید) نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزودن ۲-۳ درصد حجمی الیاف نایلون مقاومت خمشی کامپوزیت بعد از ترک خوردگی افزایش می یابد و شکل پذیری و جذب انرژی نیز به مقدار زیادی بهبود پیدا می کند. تاثیر الیاف نایلون در افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن^۳ و مقاومت فشاری بتن ناچیز است. حتی بعضی از محققین نتیجه گرفته اند که افزایش درصد الیاف نایلون باعث کاهش مقاومت فشاری می شود [۶].



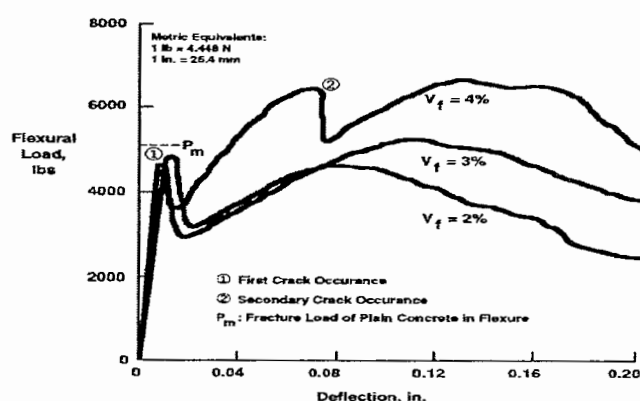
شکل ۲-۲- رفتار خمشی بتن مسلح شده با انواع الیافهای مصنوعی (نایلون ، اکریلیک و آرامید) [۶]

۲-۴-۵- پلی استر^۴: الیاف پلی استر دافع آب^۵ است. از اینرو اتصال آن به خمیر سیمان سخت شده از نوع مکانیکی می باشد. الیاف پلی استر نسبت به افزایش دما حساس است. استفاده از این

- ۱ - Hydrophilic
- ۲ - Accelerated Aging
- ۳ - Splitting Tensile Strength
- ۴ - Polyester
- ۵ - Hydrophobic

الیاف معمولاً به مقدار کم (۱/۰٪ حجمی) در اعضای غیر سازه ای مانند کف سازی ها و بمنظور کنترل ترک خوردگی ناشی از انقباض پلاستیک^۱ می باشد [۶].

۲-۴-۶- پلی اتیلن^۲: بتن های مسلح به الیاف پلی اتیلن تحت بارهای خمشی تا قبل از ایجاد اولین ترک در ماتریس رفتار نسبتاً خطی از خود نشان می دهند و بعد از ترک خوردگی ماتریس بواسطه انتقال تنش از ماتریس به الیاف، ظرفیت باربری دوباره افزایش پیدا می کند تا الیاف گسیخته شوند (شکل ۲-۳). در این حالت ترکهای متعدد در ماتریس ایجاد می شود.



شکل ۲-۳- رفتار بتن مسلح شده با الیاف پلی اتیلن [۶]

۲-۴-۷- پلی پروپیلن^۳: الیاف پلی پروپیلن دافع آب است و اتصال آن به ماتریس سیمانی از نوع مکانیکی می باشد. مدول الاستیسیته و دمای ذوب این الیاف نسبت به دیگر انواع الیافهای مصنوعی پایین است. این خصوصیت گستره کاربرد آن را تا حدی محدود می کند. به عنوان مثال بتن مسلح به الیاف پلی پروپیلن را نمی توان با بخار یا آب داغ عمل آوری کرد.

-
- ۱- Plastic shrinkage
 - ۲- Polyethylene
 - ۳- Polypropylene

۱-۷-۴-۲- کارایی مخلوط تازه: کارایی مخلوط تازه بتن الیافی معمولاً با آزمایش اسلامپ یا مخروط اسلامپ وارونه^۱ مشخص می شود. مخلوط FRC با ۲٪ حجمی الیاف پلی پروپیلن را می توان به کمک فوق روان کننده با نسبت آب به سیمان پایین و کارایی رضایتبخش تولید کرد و به مقاومت خوبی دست یافت.

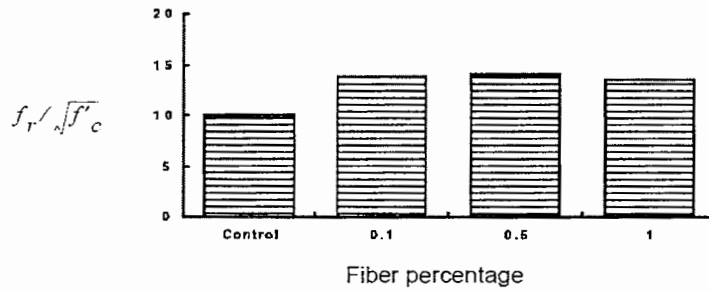
۲-۷-۴-۲- مقاومت فشاری: افزودن مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلن به بتن تاثیر چندانی در مقاومت فشاری آن ندارد. ولی مکانیزم خرابی نمونه های تحت فشار را تحت تاثیر قرار می دهد و شکست نمونه ها تا حد زیادی شکل پذیر می شود. افزایش درصد الیاف ممکن است باعث کاهش کارایی و افزایش تخلخل و در نتیجه کاهش مقاومت بتن نسبت به حالت بدون الیاف شود. در صورت لزوم باید دانه بندی و درصد سنگدانه ها اصلاح شود تا بتوان مقدار زیادی الیاف را به بتن اضافه کرد.

۳-۷-۴-۲- مدول الاستیسیته: با توجه به اینکه افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش مقاومت فشاری کامپوزیت نمی شود، تغییر نسبت حجمی الیاف از ۱ به ۲ درصد نیز باعث افزایش مدول الاستیسیته نخواهد شد. این وضعیت با افزایش سن نمونه بدون تغییر خواهد ماند.

۴-۷-۴-۲- مدول گسیختگی^۲: همانند مقاومت فشاری، افزودن الیاف پلی پروپیلن تغییر قابل ملاحظه ای در مقاومت خمشی و مقاومت نظیر ترک خوردگی ماتریس ایجاد نمی کند. در صورت استفاده از ۱٪ درصد حجمی الیاف پلی پروپیلن مقاومت خمشی به مقدار کمی افزایش پیدا می کند و همچنین افزودن ۲٪ درصد حجمی الیاف باعث کاهش ناچیز مقاومت فشاری خواهد شد. شکل ۴-۲ مقاومت خمشی بتن مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلن را نشان می دهد. با بهینه کردن ساختار ماتریس می توان کاهش مقاومت خمشی را در اثر افزایش درصد الیاف جبران کرد.

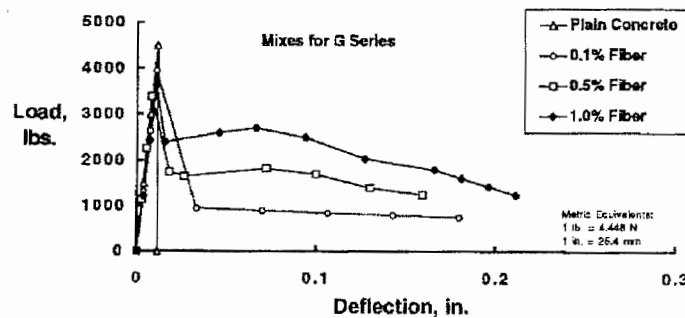
۱ - Inverted Slump Cone

۲ - Modulus Of Rapture



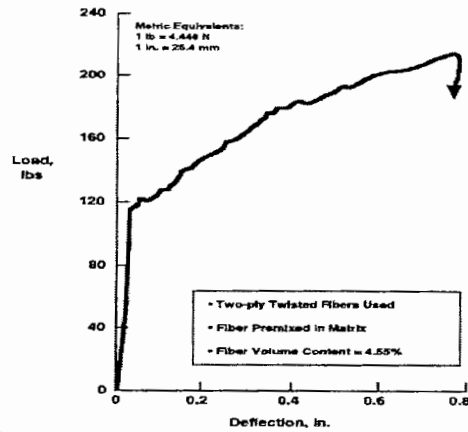
شکل ۲-۴- مقاومت خمشی بتن مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلن [۶]

شکل پذیر: افزودن الیاف پلی پروپیلن باعث بهبود رفتار بتن بعد از ترک خوردگی می شود. آزمایشات نشان می دهد که با افزایش درصد الیاف، میزان افت مقاومت بعد از ترک خوردگی ماتریس کاهش می یابد. بطوری که کاهش مقاومت خمشی تیرهای مسلح شده با ۰/۱ ، ۰/۵ و ۱ درصد الیاف، بعد از ترک خوردگی ماتریس بترتیب ۴۵، ۲۷ و ۲۶ درصد خواهد بود (شکل ۲-۵).



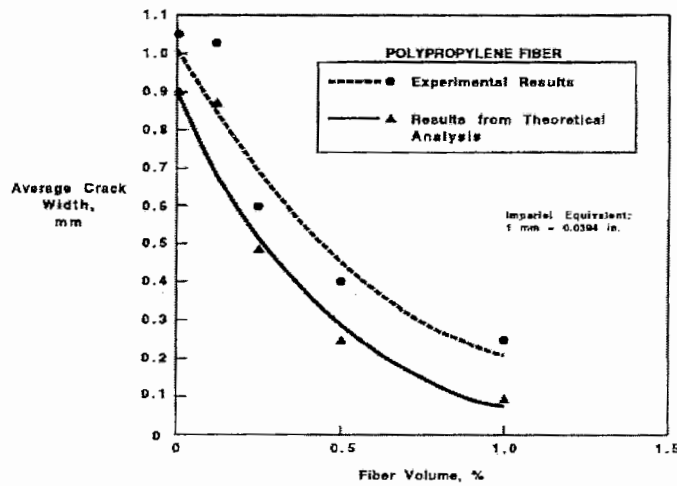
شکل ۲-۵- رفتار بتن مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلن تحت بارهای خمشی [۶]

شکل ۲-۶ رفتار نیرو-تغییر مکان بتن مسلح شده با نوع خاصی الیاف پلی پروپیلن را نشان می دهد. مشاهده می شود مقاومت نمونه بعد از ترک خوردگی ماتریس افزایش پیدا می کند. در این حالت مکانیزم ترک خوردگی متعدد ایجاد می شود.



شکل ۲-۶- رفتار بتن مسلح شده با نوع خاصی الیاف پلی پروپیلن تحت بارهای خمشی [۶]

۲-۴-۷-۶- انقباض و ترک خوردگی: افزایش تعداد الیاف در واحد حجم (fiber count) باعث کاهش ترک خوردگی های ناشی از خشک شدن^۱ و انقباض پلاستیک بتن می شود. افزودن الیاف پلی پروپیلن باعث کاهش قابل ملاحظه اندازه ترکها نسبت به بتن مسلح نشده می شود (شکل ۲-۷).

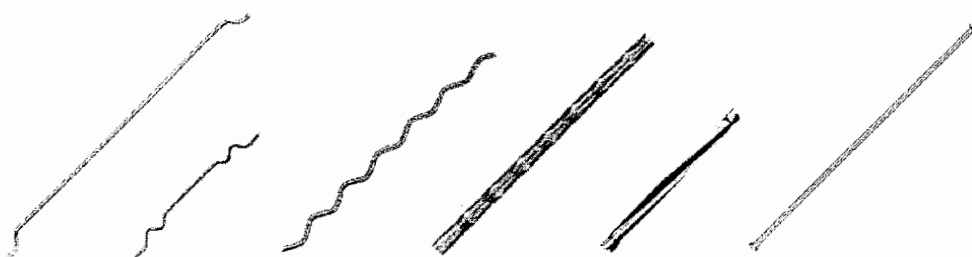


شکل ۲-۷- کاهش عرض ترکها در اثر افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن [۶]

۲-۷-۷-۷- تاثیر افزایش دما بر بتن مسلح با الیاف پلی پروپیلن: الیاف پلی پروپیلن در برابر حرارت ناشی از عمل آوری با بخار از خود نقطه ضعف نشان می دهد. آزمایشات نشان می دهند، شکل پذیری نمونه های بتنی مسلح به الیاف پلی پروپیلن که در دمای $140^{\circ}C$ بمدت ۲۴ ساعت عمل آوری شده اند به شدت پایین می آید، که دلیل آن تجزیه شیمیایی پلی پروپیلن می باشد.

۲-۵- بتن مسلح به الیاف فولادی^۱:

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



شکل ۲-۸- انواع الیاف فولادی .

۱ - Steel FRC(SFRC)

۲-۵-۱- خصوصیات مخلوط تازه SFRC: درجه تراکم SFRC همانند بتن معمولی مقاومت را تحت تاثیر قرار می دهد. از اینرو مخلوط باید دارای کارایی مناسب باشد تا الیاف بطور یکنواخت بدون جداسدگی یا آب انداختگی در سراسر ماتریس توزیع شوند. اگر از الیاف بلند و نازک استفاده شود در هنگام مرتعش کردن مخلوط ممکن است الیاف گلوله شوند و با ایجاد قفل و بست و تشکیل شبکه در مخلوط بطور غیریکنواخت توزیع شوند، در حالیکه الیاف با نسبت ظاهری پایینتر از ۵۰ براحتی از هم جدا شده و در ماتریس توزیع می شوند. از طرف دیگر استفاده از الیاف با نسبت ظاهری بالا باعث بهبود خصوصیات مکانیکی FRC می شود. تمایل الیاف به گلوله شدن در مخلوط تابعی از حداکثر بعد سنگدانه ها و دانه بندی آنها و همچنین نسبت ظاهری، نسبت حجمی و شکل الیاف و چگونگی اضافه کردن آنها به مخلوط می باشد. در صورت استفاده از سنگدانه های درشتتر و الیاف با نسبت ظاهری بالا، نسبت حجمی الیاف برای جلوگیری از گلوله شدن کاهش می یابد.

درمقایسه با بتن معمولی، مخلوط SFRC دارای نسبت آب به سیمان بالاتر، درصد سنگدانه ریز بیشتر و اسلامپ پایینتر به نسبت افزایش درصد الیاف می باشد. در مخلوط SFRC از مواد پوزولانی و افزودنی های شیمیایی مرسوم بمنظور کاهش مقدار آب و کنترل کارایی و جمع شدگی استفاده می شود.

۲-۵-۲- خصوصیات مکانیکی SFRC:

خصوصیات مکانیکی SFRC به نوع الیاف، نسبت ظاهری آن، مقاومت ماتریس، اندازه سنگدانه ها، اندازه و شکل نمونه و همچنین طریقه ساخت و عمل آوری آن وابسته می باشد. مکانیزم مقاوم سازی الیاف انتقال تنش از ماتریس به الیاف از طریق سطح تماس آنها و یا با قفل و بست بین آنها با ایجاد مهارمکانیکی می باشد. تنش کششی نیز تا قبل از ایجاد ترک بین الیاف و ماتریس تقسیم می شود و بعد از ترک خوردگی ماتریس تماما به الیاف منتقل می شود. در کنار ماتریس مهمترین عامل

کنترل کننده خصوصیات SFRC درصد حجمی الیاف و چگونگی عملکرد آنها می باشد. عملکرد الیاف بستگی به مقاومت آنها در برابر بیرون کشیده شدن از ماتریس دارد. بطور کلی اگر سطح مقطع الیاف ثابت در نظر گرفته شود با افزایش طول الیاف، تأثیر آنها در افزایش مقاومت مخلوط بیشتر خواهد بود. از آنجا که مقاومت بیرون کشیدگی الیاف بستگی به اندازه سطح تماس آنها با ماتریس دارد، الیاف با سطح مقطع غیر دایره ای و الیافهای دایره ای با قطر پایین تر بازای درصد حجمی ثابت تأثیر بیشتری در بهبود خصوصیات SFRC دارند. در این صورت شکست عضو زمانی رخ می دهد که الیاف در حین بیرون کشیده شدن از ماتریس به حداکثر مقاومت خود رسیده اند. افزایش مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیدگی به همراه کاهش نسبت ظاهری با ایجاد تغییر شکل در الیاف امکان پذیر است. برای دستیابی به شکل پذیری بالا شکست عضو باید با بیرون کشیده شدن الیاف همراه باشد. این نوع شکست در مقایسه با گسیختگی الیاف تدریجی تر می باشد. درک خصوصیات مکانیکی SFRC و تغییر این خصوصیات با تغییر در نوع و مقدار الیاف کمک زیادی به طراحی این مصالح خواهد کرد.

الیاف فولادی رفتار بتن را در تمام موده‌های بارگذاری تحت تأثیر قرار می دهند، ولی تأثیر آنها در افزایش مقاومت بتن در حالت فشار، کشش، پیچش، خمش و برش متفاوت است.

۲-۵-۲-۱- فشار: در بارهای فشاری مقاومت نهایی بتن الیافی به مقدار کمی تحت تأثیر وجود الیاف

قرار می گیرد. افزایش مقاومت فشاری با افزودن ۱/۵٪ الیاف فولادی تا ۱۵٪ گزارش شده است.

۲-۵-۲-۲- کشش مستقیم: در حالت کشش مستقیم افزایش مقاومت بتن الیاف با افزودن الیاف

قابل ملاحظه است. افزایش مقاومت کششی بتن با اضافه کردن ۱/۵٪ الیاف ۳۰ تا ۴۰ درصد

می باشد.

۲-۵-۳- برش و پیچش: با افزودن الیاف فولادی به بتن مقاومت برشی و کشش قطری تیر افزایش پیدا می کند. تحقیقات نشان می دهد که مقداری از آرماتورهای عرضی را می توان با الیاف جایگزین کرد. در این صورت فاصله کم الیافها و توزیع یکنواخت آنها در تمام حجم بتن و در تمام جهات باعث تغییر در شکل ترک خوردگی و خرابی اعضا می شود. به دلیل اینکه الیافها از باز شدگی ترک جلوگیری می کنند، نیروی قفل و بست بین سنگدانه ها افزایش پیدا کرده و مقاومت برشی اصطکاکی بتن تقویت می شود. با توجه به مطالب فوق شکست اعضای SFRC بیشتر در مود خمشی می باشد تا برشی و شکست خمشی اعضا بصورت تدریجی خواهد بود.

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

۲-۵-۵- رفتار SFRC تحت بارهای ضربه ای: دو پارامتر مهم برای بررسی رفتار FRC تحت بارهای ضربه ای مقاومت و انرژی شکست می باشد. مقاومت SFRC تحت بارهای خمشی ضربه ای تا ۴۰٪ بیش از بتن خالص است. الیافهای فولادی انرژی شکست را تا ۲/۵ برابر برای بتن معمولی و ۳/۵ برابر برای بتن مقاومت بالا نسبت به حالت بدون الیاف افزایش می دهد.

افزایش مقاومت در حالت بارگذاری دینامیکی نسبت به حالت استاتیکی ۲ تا ۳ برابر برای بتن های معمولی و ۱/۵ برابر برای بتن های مقاومت بالا می باشد. افزایش انرژی شکست نیز در حالت دینامیکی نسبت به حالت بارگذاری استاتیکی تا ۵ برابر برای بتن های معمولی و ۴ برابر برای بتن های مقاومت بالا می باشد.

۲-۵-۲-۶- بارهای خستگی: مطالعات آزمایشگاهی نشان می دهد که با افزایش درصد الیاف، افزایش قابل ملاحظه ای در مقاومت خستگی اعضای خمشی ایجاد می شود. مقاومت اعضای SFRC تحت دو میلیون سیکل بارگذاری ۶۵ تا ۹۰ درصد مقاومت خمشی آنها در حالت استاتیکی می باشد.

۲-۵-۲-۷- طاقت: بزرگترین وجه تمایز SFRC با بتن مسلح نشده، طاقت می باشد. پارامتر طاقت با مشاهده رفتار خمشی تیرهای ساده بر اساس ASTM C1018 قابل بررسی است. در تیرهای بتنی مسلح شده با الیاف، خرابی با گسترش تدریجی ترکها و تغییر شکل زیاد همراه خواهد بود. در این حالت یکپارچگی عضو بعد از ترک خوردگی و حتی تغییر شکلهای قابل ملاحظه حفظ می شود. تیرهای مشابه ساخته شده از بتن مسلح نشده با الیاف بطور ناگهانی تحت تغییر شکلهای کم می شکنند و به دو نیم می شود.

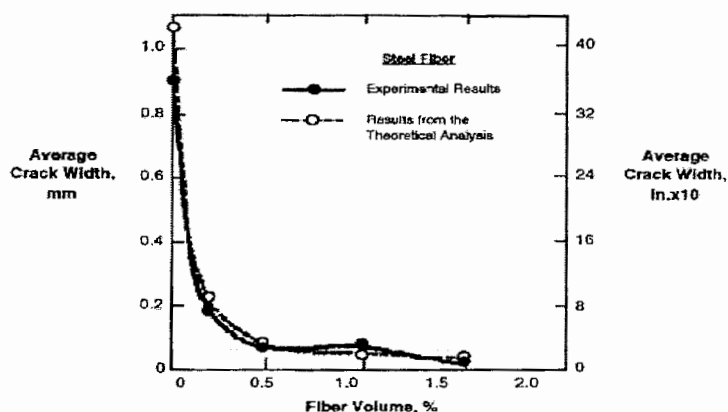
۲-۵-۳- دوام SFRC:

۲-۵-۳-۱- خوردگی الیاف قبل از ترک خوردگی ماتریس: بطور کلی هرچه مقاومت فشاری بتن بیشتر باشد، تراکم آن بیشتر است. چنین بتنی با نسبت آب به سیمان پایین، دارای نفوذپذیری کمی است و خوردگی الیاف محدود به سطح بتن می شود. از آنجایی که الیافها بصورت ناپیوسته می باشند و به ندرت در تماس با یکدیگر هستند، خوردگی الیاف در سطح خارجی به عمق بتن منتقل نمی شود.

۲-۵-۳-۲- خوردگی الیاف بعد از ترک خوردگی ماتریس: بعد از ترک خوردگی، الیاف دوزنده ترک دچار خوردگی می شوند. در صورتی که عرض ترکها کمتر از 0.1 mm باشد، خوردگی الیاف فولادی اتفاق نمی افتد. اگر عرض ترکها بیش از 0.1 mm باشد ولی عمق آنها کم باشد، خوردگی بصورت موضعی ایجاد می شود که معمولا از نظر سازه ای چندان با اهمیت نیست.

۲-۵-۳-۳-۳- انقباض و خزش: میزان انقباض بتن به عوامل زیادی از جمله خصوصیات مصالح، دما و رطوبت نسبی محیط، سن بتن در زمانی که وارد محیط خشک می شود و حجم بتن بستگی دارد. اگر در مقابل انقباض بتن قید ایجاد شود، ترکهای کششی در آن ایجاد می شود. یکی از روشهای مؤثر برای کاهش اثرات منفی جمع شدگی مسلح کردن بتن با الیاف است. آزمایشات نشان می دهند که الیاف فولادی تأثیر کمی در کاهش انقباض آزاد بتن دارد. هرچند در مورد انقباض اعضایی که محدود شده اند استفاده از الیاف فولادی باعث کاهش طول و عرض ترکها می شود. علاوه بر این الیاف باعث انتقال تنش در سطوح ترک می شوند. الیاف فولادی کاهش قابل ملاحظه ای در خزش اعضای فشاری ایجاد نمی کند.

شکل ۲-۹ نشان می دهد که حتی با افزودن ۰/۸ درصد الیاف صاف فولادی عرض ترکهای جمع شدگی به مقدار قابل ملاحظه ای نسبت به حالت بدون الیاف کاهش می یابد.



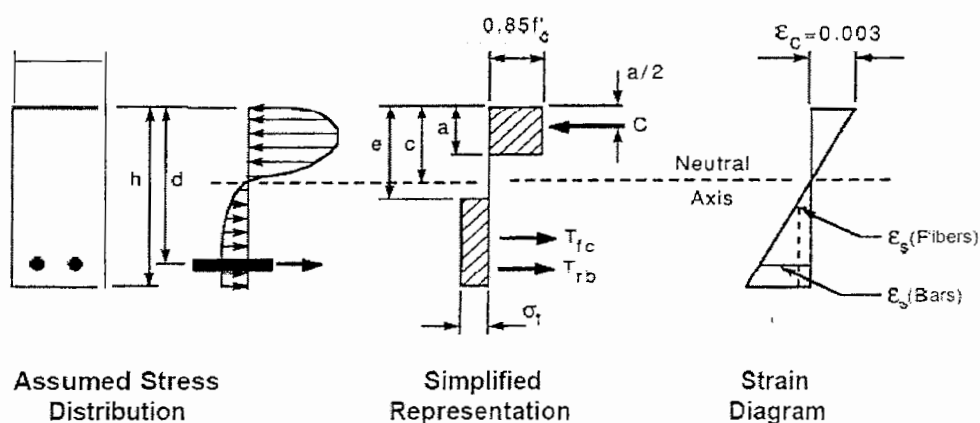
شکل ۲-۹- کاهش عرض ترکها با افزایش درصد الیاف فولادی [۶]

۲-۵-۳-۴- یخ زدن و ذوب شدن: تأثیر الیاف فولادی در مقاومت بتن در مقابل یخ زدن و ذوب شدن قابل ملاحظه نمی باشد. هرچند که شدت پوسته شدن و تخریب بتن را کاهش می دهد، و از ایجاد ترکهای قابل مشاهده جلوگیری می کند. در حقیقت مهمترین عامل در افزایش مقاومت بتن در برابر

یخ زدن و ذوب شدن متوالی ساختار مناسب حفره های هوا در ماتریس می باشد و در این مورد SFRC هیچ فرقی با بتن نخواهد داشت.

۲-۵-۴- طراحی اعضای SFRC مسلح شده با آرماتور^۱:

معمولا در کاربردهای سازه ای الیاف بعنوان تکمیل کننده میلگردهای فولادی مورد استفاده قرار می گیرند. الیاف فولادی از انتشار ترک جلوگیری می کنند و مقاومت عضو در برابر تنشهای حرارتی، جمع شدگی و ضربه را افزایش می دهند. در اعضای غیر سازه ای که وجود آرماتورها بصورت پیوسته مورد نیاز نیست مانند کف سازی ها می توان بمنظور بهبود مقاومت خمشی و ضربه ای از الیاف فولادی بطور مستقل استفاده کرد. در این صورت احتمال کاهش ضخامت لایه بتن وجود دارد. علاوه بر این SFRC عملکرد بهتری نسبت به بتن مسلح معمولی در این موارد خواهد داشت. مواردی از کاربرد SFRC در اعضای سازه ای بدون حضور آرماتور مانند دالها با دهانه کوتاه تجربه شده است. تجربه نشان می دهد که الیافهای فولادی را می توان جایگزین تمام یا بخشی از آرماتورهای عرضی کرد. با افزودن الیاف به تیرهای بتن مسلح معمولی مقاومت خمشی آنها نیز افزایش می یابد (شکل ۲-۱۰) [۹].



شکل ۲-۱۰- فرضیات طراحی تیرهای R/SFRC [۹]

۱ - Reinforced FRC(R/SFRC)

۲-۵-۵- کاربردهای بتن مسلح به الیاف فولادی [۱]:

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

- روسازی بتنی بزرگراهها، جاده ها و فرودگاهها.
- لوله های بتنی.
- کف کارخانه ها، توقفگاهها، جایگاه بنزین، و سالنهای صنعتی.
- دیواره و کف کانالها.
- قطعات پیش ساخته.
- در ساختمان تونلها یا معابر معادن بصورت بتن پاشی.
- سازه های ضد انفجار و ضد حریق.
- تثبیت شیبها و ترانشه های سنگی و ریزشی با بتن پاشی.

در دیگر موارد که می توان الیاف فولادی را در بتن مسلح معمولی و یا پیش ساخته بکار برد، عبارتند از:

- شالوده برای موتورها و ماشین آلات صنعتی بزرگ مثل توربینها، پرسهای بزرگ، ژنراتورهای دیزلی و
- دیوارها حفاظتی، پناه گاهها و آشیانه هواپیماها.
- ساختمان راکتورهای اتمی.
- تیرهای پیش تنیده بتنی.
- شمعههای ضربه گیر.

بطور کلی هدف از کاربرد الیاف فولادی در بتن به شرح زیر است:

- a. تسلیح تکمیلی برای افزایش مقاومت بتن مسلح یا بتن پیش تنیده به منظور کاهش ترک خوردگی و افزایش قدرت جذب انرژی تحت اثر بارهای ضربه ای، موجهای انفجار و وضعیت پیچیده تنش.
- b. جایگزین شدن بجای بتن مسلح معمولی بمنظور کاهش هزینه دستمزد، افزایش در سرعت اجرا و ایجاد جسم یکنواخت و ایزو تروپ به منظور افزایش مقاومت بتن.

۵-۶- بتن مسلح به الیاف چند گانه یا ترکیبی^۱:

استفاده توام از الیاف پلی پروپیلن و فولادی بهبود قابل ملاحظه ای در رفتار کامپوزیت تحت بارهای خمشی ایجاد می کند. همچنین استفاده از ریز الیاف فولادی با قطر $25 \mu m$ و طول $3 mm$ به همراه ریز الیاف کربن با قطر $18 \mu m$ و طول $6 mm$ تا کنون تجربه شده است. استفاده از الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت و الیاف کربن باعث افزایش شکل پذیری خواهد شد و استفاده توام از این دو الیاف بطور همزمان شکل پذیری و مقاومت را بهبود می بخشد [۶].

۵-۷- نتیجه گیری :

معمولا مقاومت اولین ترک ماتریس با افزودن الیاف، افزایش پیدا نمی کند و بیشترین تأثیر الیاف بعد از ترک خوردگی ماتریس است. میزان تأثیر الیاف به عواملی چون خصوصیات ماتریس نظیر مقاومت و اندازه ذرات سنگدانه، و خصوصیات الیاف نظیر نوع الیاف، مدول الاستیسیته، مقاومت، نسبت ظاهری، نسبت حجمی الیاف، شیب الیاف و کیفیت اتصال الیاف به ماتریس بستگی دارد. برای

۱ - Hybrid FRC

دستیابی به شکل پذیری بالا در یک بتن الیافی، گسیختگی عضو باید با بیرون کشیدگی الیاف همراه باشد. این نوع شکست در مقایسه با گسیختگی الیاف تدریجی تر می باشد.

معمولا استفاده از الیاف مصنوعی موجب افزایش مقاومت های فشاری، کششی و خمشی نمی شود. دلیل عمده استفاده از این الیافها جهت افزایش شکل پذیری و همچنین محدود کردن ترک خوردگی و جمع شدگی بتن و ترکیبات سیمانی است. الیاف مصنوعی ممکن است در اثر حرارت ذوب یا تجزیه شیمیایی شوند.

الیاف فولادی به دلیل شکل پذیری و تامین گیرداری در بتن و مقاومت کششی و سختی مطلوب، یکی از پرمصرف ترین و مناسب ترین نوع الیاف است. الیاف فولادی رفتار بتن را در تمام مودهای بارگذاری تحت تأثیر قرار می دهند، ولی تأثیر آنها در افزایش مقاومت بتن در حالت فشار، کشش، پیچش، خمش و برش متفاوت است. الیاف با سطح مقطع غیر دایره ای و الیاف دایره ای با قطر پایین تر به ازای درصد حجمی ثابت تأثیر بیشتری در بهبود خصوصیات SFRC دارند.

تمایل الیاف به گلوله شدن در مخلوط تابعی از حداکثر بعد سنگدانه ها و دانه بندی آنها و همچنین نسبت ظاهری، نسبت حجمی و شکل الیاف و چگونگی اضافه کردن آنها به مخلوط می باشد. در صورت استفاده از سنگدانه های درشت و الیاف با نسبت ظاهری بالا نسبت حجمی الیاف برای جلوگیری از گلوله شدن کاهش می یابد.

اطلاع از نحوه شکست بتن الیافی کمک زیادی به شناخت این مصالح می کند و از آن گذشته نیاز به معرفی پارامترهایی است که در فصلهای آینده مورد استفاده قرار خواهد گرفت. لذا در فصل سوم امکان استفاده علم مکانیک شکست در مطالعه بتن الیافی و نحوه گسترش ترک در این مصالح و نقش الیاف در مکانیزم شکست آنها مورد بررسی قرار می گیرد. در این بخش پارامترهایی نظیر طاقت شکست (K_{IC}) و انرژی شکست (G_f) تعریف می شوند.

فصل سوم

مکانیک شکست

بررسی علل شکست ناگهانی بعضی سازه ها نشان می دهد 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 کار ایجاد شده اند. لذا در اوایل قرن بیستم علم جدیدی بنام مکانیک شکست^۱ پایه گذاری شد که سازه ها را بر مبنای وجود ترک در آنها مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می دهد. در مقاومت مصالح پارامترهای تنش معرف پایداری و تحمل یک عضو در مقابل بارهای وارده می باشند. ولی از آنجا که در مکانیک شکست همیشه فرض بر این است که مصالح دارای عیوب و ترکهای اولیه می باشند، معیارهای تنش به تنهایی برای بیان تحمل یک عضو کافی نیستند. هرچند که شروع ترک بستگی به تنش وارد شده به عضو دارد، در حقیقت شکل گیری ترک نیاز به انرژی مشخصی دارد. بنابر این معیاری مبتنی بر انرژی برای خرابی باید بکار گرفته شود.

تئوری های معمول که برای شکست مصالح ترد توسعه یافته اند شکست بتن را بدرستی تشریح نمی کنند. در واقع بتن نسبت به مصالح شکننده ایده آل پیچیدگی بیشتری دارد و یک ماده شبه شکننده^۲ بشمار می رود [۱۹]. یکی از علل پیچیده بودن مکانیزم شکست بتن طبیعت غیر هموزن آن است. سنگدانه ها همانند یک جسم سخت می باشند که توسط ماده نرمتر ولی شکننده احاطه شده اند. این اختلاف سختی ماتریس و سنگدانه ها باعث ایجاد ناسازگاری در ناحیه تماس بین این دو فاز می شود. ساختار خمیر سیمان سخت شده بسیار پیچیده می باشد. بعنوان مثال حداقل چهار نوع تخلخل در خمیر سیمان وجود دارد (حفره های ژل و موئینه، حبابهای هوای محبوس، ترکهای ناشی از جمع شدگی و فضاهاى خالی ناشی از اختلاط ناقص) [۱۹]. همواره دلیل اصلی شکست بتن ضعف ملات سیمان نیست. ضعف سنگدانه ها یا سطح تماس سنگدانه و خمیر سیمان ممکن است به خرابی بتن منجر شود.

۱ - Fracture Mechanics

۲ - Quasibrittle

این بخش مرور مختصری دارد بر قوانین مکانیک شکست که در بخشهای بعدی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. ابتدا تئوری الاستیک خطی مکانیک شکست^۱ (LEFM) برای مصالح شکننده مورد بررسی قرار می گیرد. سپس در مورد عدم کاربرد LEFM برای بتن بحث می شود و مکانیک شکست غیر خطی^۲ معرفی خواهد شد. در نهایت امکان استفاده این قوانین در مطالعه بتن الیافی و نحوه گسترش ترک در این مصالح و نقش الیاف در مکانیزم شکست آنها مورد بررسی قرار می گیرد.

۳-۲- مکانیک شکست الاستیک خطی :

۳-۲-۱- تئوری شکست گریفیث: قوانین LEFM از نتیجه تحقیقات گریفیث^۳ (۱۹۲۱) بوجود آمد. گریفیث در صدد بیان این مطلب بود که چرا استحکام واقعی مواد بطور قابل ملاحظه ای کمتر از استحکام تئوریک مواد بر اساس نیروی بین اتمی آنهاست. گریفیث به این نتیجه رسید که مواد دارای معایب کوچک و ترکهایی می باشند که استحکام آنها را کاهش می دهد. در مکانیک شکست الاستیک خطی فرض بر این است که تمام فرایندهای خرابی در نوک ترک ایجاد می شود و بقیه قسمتهای عضو در حالت الاستیک باقی می ماند. یک ترک می تواند به سه طریق تحت تنش قرار گرفته و گسترش پیدا کند (شکل ۳-۱):

۱- بازشونده^۴: جابجایی سطوح ترک عمود بر سطح ترک.

۲- لغزشی^۵: جابجایی سطوح ترک در سطح ترک اما عمود بر لبه ترک.

۳- پارگی^۶: جابجایی سطوح ترک در صفحه ترک ولی موازی با لبه ترک.

۱ - Linear Elastic Fracture Mechanics

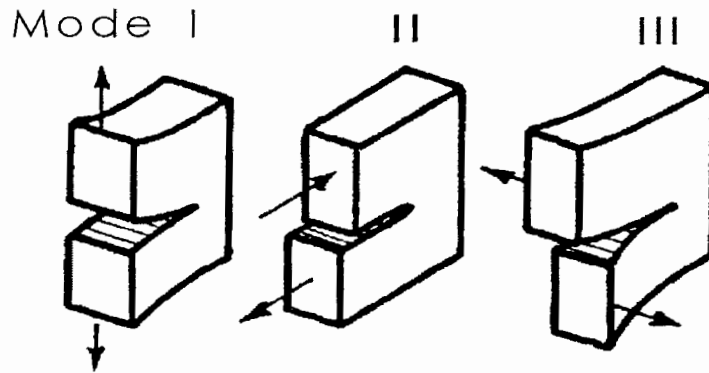
۲ - Nonlinear Fracture Mechanics

۳ - Griffith

۴ - Opening Mode

۵ - Sliding Mode

۶ - Tearing Mode



شکل ۳-۱- اشکال مختلف ترک خوردگی [۱۰]

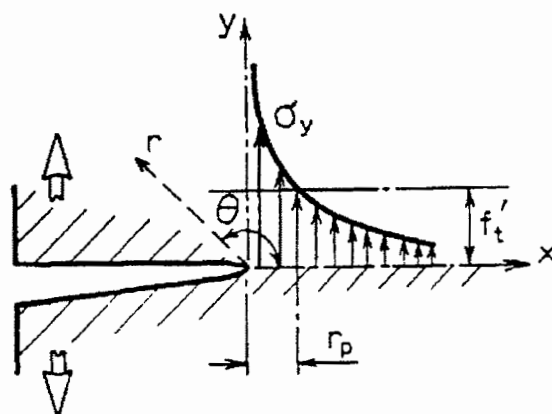
مود ۱ مهمترین حالت گسترش ترک می باشد [۴]. ایجاد مودهای ۲ و ۳ بدلیل اصطکاک بین صفحات ترک نیاز به انرژی زیادی دارد [۳]. در حالت کلی، خرابی ترکیب خطی از این سه نوع ترک خوردگی می باشد [۱۰]. شکل گیری ترک در مصالح الاستیک خطی باعث ایجاد تمرکز تنش در نوک ترک می شود. مستقل از شکل هندسی عضو و چگونگی بارگذاری مولفه های تنش در همسایگی نوک ترک در حالت کلی بصورت زیر تعریف می شوند:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^I &= K_I f_{ij}^I(\theta) (2\pi r)^{-1/2} \\ \sigma_{ij}^{II} &= K_{II} f_{ij}^{II}(\theta) (2\pi r)^{-1/2} \\ \sigma_{ij}^{III} &= K_{III} f_{ij}^{III}(\theta) (2\pi r)^{-1/2} \end{aligned} \quad (1-3)$$

در روابط فوق اندیسهای I، II و III نشان دهنده اشکال مختلف ترک خوردگی می باشند. پارامتر K ضریب شدت تنش^۱ نامیده می شود و تابع f صرفنظر از هندسه جسم و شکل بارگذاری مقادیر مشابهی دارد. برای مثال، $f_{11}^I(\theta) = \cos \alpha (1 - \sin \alpha \sin 3\alpha)$ ، $f_{22}^I(\theta) = \cos \alpha (1 + \sin \alpha \sin 3\alpha)$ ، $f_{12}^I(\theta) = \cos \alpha \sin 2\alpha \cos 3\alpha$ و $\alpha = \theta/2$. شکل ۲-۳ میدان تنش در نوک ترک بطول 2a را نشان می دهد. این ترک در صفحه ای با ابعاد بزرگ که تحت تنش σ در جهت عمود بر صفحه ترک

۱ - Stress Intensity Factor

قرار گرفته، ایجاد شده است. با توجه به معادلات ۱-۳ وقتی r بسمت صفر میل می کند مقادیر تنش بینهایت می شود. عملاً وقتی تنش از حد مشخصی فراتر می رود تغییر شکل پلاستیک رخ می دهد و تنش در نوک ترک ثابت باقی می ماند. بازای مقادیر زیاد r و $\theta = 0$ تنش صفر می شود، در صورتی که باید بسمت σ میل کند. بعبارت دیگر در نوک ترک تابع تنش تکین^۱ می شود [۴]. توزیع تنش σ_y در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳- توزیع تنش در نواحی نزدیک نوک ترک خوردگی [۱۰]

با معلوم بودن پارامتر K میدان تنش در نوک ترک معلوم می باشد. در حالت الاستیک ترکها با طولهای مختلف ولی K یکسان، دارای میدان تنش مشابه می باشند.

این حقیقت که بر مبنای LEFM تنش در نوک ترک حتی در بارهای بسیار کم بسمت بینهایت میل می کند اولین بار توسط گریفیث بیان شد. گریفیث نتیجه گرفت که بر مبنای تئوری الاستیک خطی نمی توان یک معیار تنش برای بیان شرایط خرابی معرفی کرد، و بجای آن خرابی را بر اساس معیار انرژی توصیف کرد.

با انتشار ترک انرژی ذخیره شده در عضو در ناحیه خرابی نوک ترک مستهلک می شود. نرخ آزاد شدن انرژی بصورت زیر بیان می شود [۱۰]:

۱ - Singularity Stress Function

$$G = -\frac{\partial \Pi(a)}{\partial a} \quad (2-3)$$

در این رابطه انرژی پتانسیل عضو (II)، برابر است با تفاضل کار انجام شده توسط بارهای خارجی (W) و انرژی کرنشی عضو (U) که خود تابعی از اندازه ترک می باشد. شرط رشد ترک رسیدن G به یک مقدار بحرانی G_c می باشد. G_c ، انرژی شکست^۱ نامیده می شود و دارای بعد J/m^2 یا N/m و یکی از خصوصیات مصالح بشمار می رود. اگر $G < G_c$ باشد، ترک رشد پیدا نمی کند و اگر $G > G_c$ باشد، تعادل برقرار نیست. در حالتی که $G = G_c$ و $\partial G / \partial a > 0$ باشد، ترک بصورت ناپایدار^۲ رشد پیدا می کند و شکست ایجاد می شود. و چنانچه $G = G_c$ و $\partial G / \partial a < 0$ باشد ترک بصورت پایدار^۳ رشد پیدا می کند [۱۰].

گرفیث براساس میدان تنش در نوک یک ترک بیضوی نرخ آزاد شدن انرژی را بصورت زیر تعریف کرد:

$$G = \frac{2\pi\sigma^2 a}{E} \quad (3-3)$$

با توجه به رابطه ۳-۱، پارامتر G را می توان بصورت تابعی از ضریب شدت تنش بیان کرد:

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (4-3)$$

در حالت ترک خوردگی مود اول، ضریب شدت تنش بصورت زیر بیان می شود:

$$K_I = \frac{P}{bd} \sqrt{\pi a} f(\alpha) = \frac{P}{bd} \sqrt{d} \varphi(\alpha) \quad , \quad \alpha = a/d \quad , \quad \sqrt{\pi a} f(\alpha) = \varphi(\alpha) \quad (5-3)$$

f و φ توابع بدون بعد از α می باشند. b و d ابعاد سازه و $\frac{P}{bd}$ تنش وارد بر عضو و a نصف طول

ترک می باشد. تابع f را می توان در مراجع مختلف یافت. برای حالت خاصی که عضو نامحدود

۱ - Fracture Energy

۲ - Unstable Crack Growth

۳ - Stable Crack Growth

دارای یک ترک بطول $2a$ و تحت تنش در فاصله دور عمود بر صفحه ترک می باشد، $f(\alpha)=1$ است [۱۰].

با توجه به مطالب فوق شرط خرابی را می توان بصورت زیر نیز بیان کرد:

$$K_I = K_{IC} \quad (6-3)$$

K_{IC} ، کمیت بحرانی بنام طاقت شکست^۱ است و یکی دیگر از خصوصیات مصالح بشمار می رود. با جایگزین کردن رابطه ۶-۳ در رابطه ۵-۳، تنش اسمی که در آن رشد ترک شروع و خرابی رخ می دهد بدست می آید:

$$\sigma_N = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a} f(\alpha)} = \frac{K_{IC}}{\sqrt{d} \phi(\alpha)} \quad (7-3)$$

$$\log \sigma_N = -\frac{1}{2} \log d + const. \quad (8-3)$$

معادله ۸-۳ نشان می دهد که نمودار تنش خرابی در مقابل بعد سازه براساس پیشبینی LEFM خط صاف با شیب $-\frac{1}{2}$ می باشد [۱۰] (شکل ۳-۳).

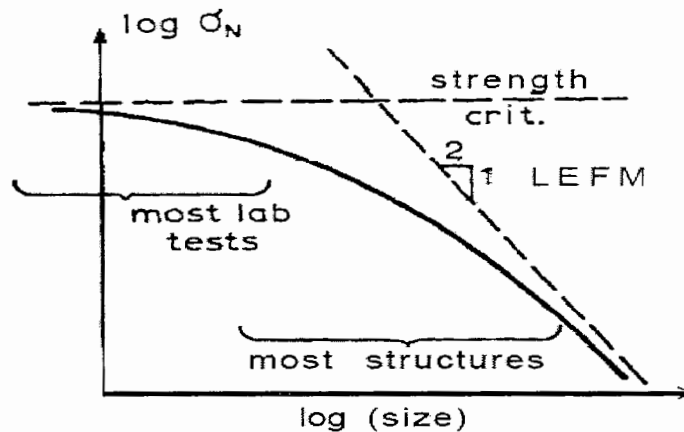
در واقع فرایند خرابی در نوک ترک محدود به یک نقطه نمی شود و محدوده مشخصی بنام منطقه گسترش ترک^۲ (FPZ) را در بر می گیرد. FPZ ناحیه ای است که در آن مصالح رفتار نرم شدگی^۳ (کاهش تنش در ازای افزایش کرنش) از خود نشان می دهند. این منطقه غیر الاستیک شدت تنش را کاهش داده و ادامه یافتن ترک را مشکل می سازد. Irwin (1958) با قرار دادن تنش نرمال در معادله ۱-۳ تخمین ساده ای از اندازه این ناحیه ارائه کرده است:

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \frac{K_{IC}^2}{f_i^2} = \frac{1}{2\pi} \frac{EG_c}{f_i^2} \quad (9-3)$$

۱ - Fracture Toughness

۲ - Fracture Process Zone

۳ - Softening

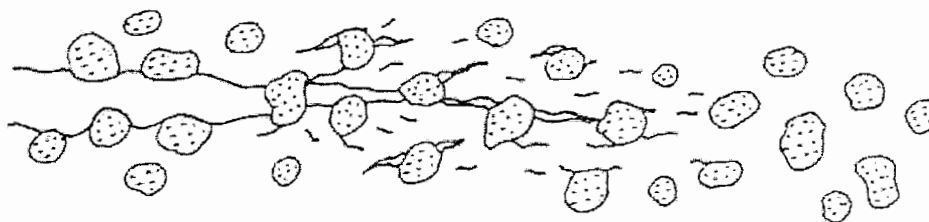


شکل ۳-۳- تاثیر بعد سازه در تنش خرابی سازه های مشابه از نظر هندسی [۱۰]

۳-۲-۲- محدودیت کاربرد LEFM:

بدیهی است که LEFM تنها وقتی کاربرد دارد که r_p نسبت به بعد سازه خیلی کوچک باشد. عدم کاربرد LEFM برای پیشبینی شکست بتن در شکل ۳-۳ بوضوح مشخص می باشد. در این شکل نتایج آزمایشگاهی نسبت به خط صاف با شیب $-\frac{1}{2}$ منحرف شده است. دلیل انحراف رفتار بتن از LEFM گسترش ناحیه نسبتاً بزرگ خرابی در نوک ترک می باشد. مصالح این ناحیه بدلیل شکل گیری ریزترکهها^۱ از خود نرم شدگی نشان می دهند. تأثیر این ترک خوردگی کاهش نرخ آزاد شدن انرژی در نوک ترک و در عین حال افزایش حجم FPZ و افزایش توانایی جذب انرژی در آن می باشد (شکل ۳-۴). از اینرو باید به دنبال تئوری جدیدی بود که قادر به توصیف رفتار نرم شدگی بتن در ناحیه خرابی نوک ترک باشد.

۱ - Micro Crack



شکل ۳-۴- ناحیه خرابی نوک ترک (FPZ) در بتن [۲۰]

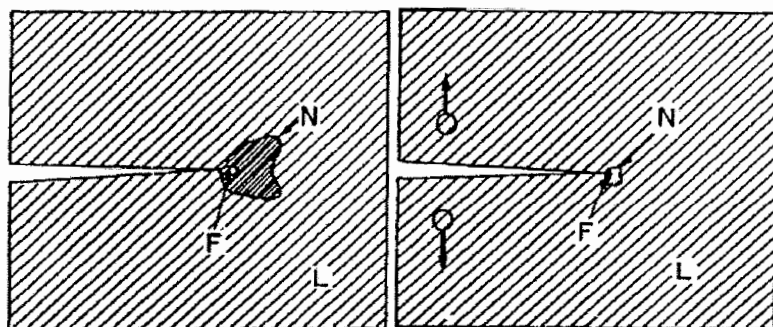
۳-۳- تئوری مکانیک شکست غیر خطی :

دو نوع مکانیک شکست غیر خطی جهت تفسیر رفتار مصالح مختلف وجود دارد. مکانیک شکست غیر خطی برای مصالح شکل پذیر^۱ مانند فلزات، و مصالح شبه شکننده مانند بتن. در مقایسه با مصالح ترد (LEFM) ناحیه غیر خطی برای هر دو مصالح شکل پذیر و شبه شکننده بزرگ می باشد (شکل ۳-۵). مصالح شکل پذیر در ناحیه غیر خطی رفتار سخت شدگی کرنش^۲ یا رفتار پلاستیک کامل^۳ از خود نشان می دهند و ناحیه خرابی هنوز نسبت به ناحیه غیر خطی کوچک می باشد [۱۰]. در مقابل در مصالح شبه شکننده مانند بتن ناحیه خرابی نسبتاً بزرگ می باشد و تقریباً تمام ناحیه غیر خطی را در بر می گیرد. بنابراین تئوریهای شکست فلزات بطور مستقیم برای بتن قابل کاربرد نمی باشند [۱۰].

۱ - Ductile Material
 ۲ - Strain Hardening
 ۳ - Perfect Plasticity

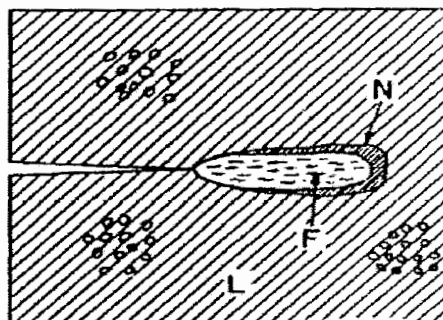
(b) Metals

(a) Linear Fracture



(c) Concrete

شکل ۳-۵- ناحیه خطی (L)،
غیرخطی (N) و FPZ برای مصالح
مختلف [۱۰]

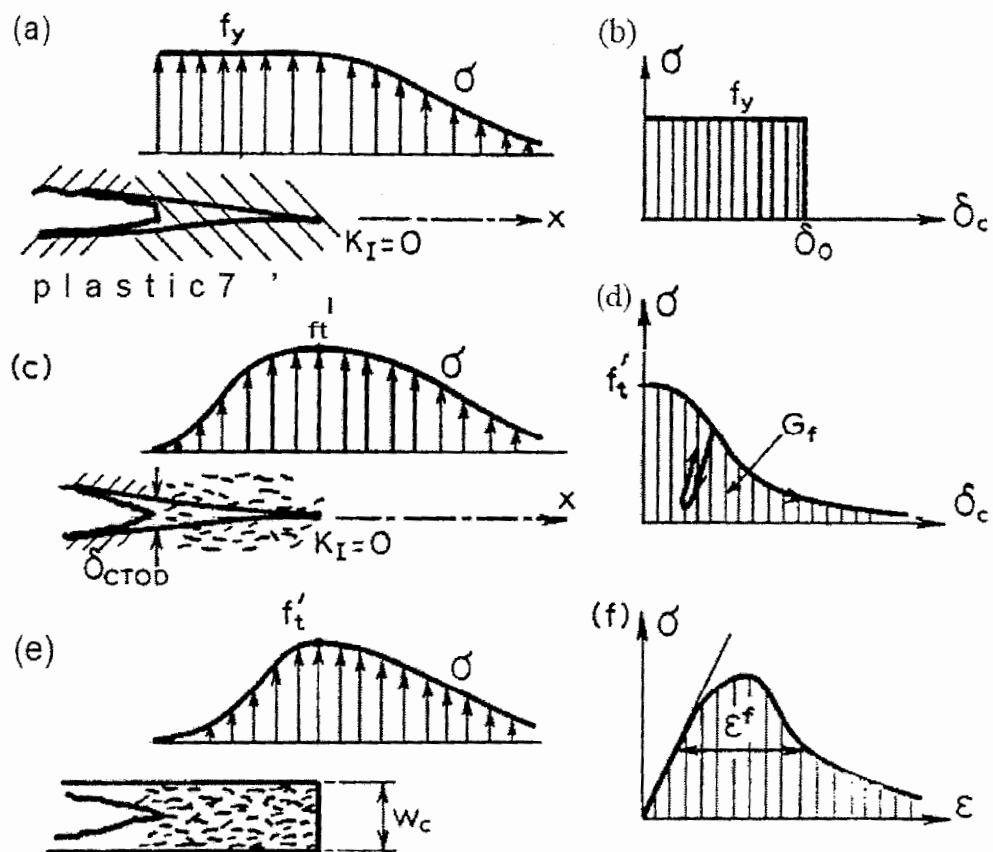


۳-۳-۱- مدل ترک مجازی^۱ (FCM):

در مواد نیمه ترد مانند بتن به علت وجود ترکها و حفره های بسیار ریز و قفل و بست دانه ها در حوالی نوک ترک، ناحیه آسیب دیده هنوز تا حدی مقاومت ایجاد می کند. اگرچه مقاومت در این ناحیه کمتر شده است، ولی هنوز مثل ترک کامل، دو طرف شکاف جدا و بدون اتصال به هم نمی باشد. برای مثال در بتن الیافی دو لبه ترک توسط الیاف به هم دوخته می شوند و شکل پذیری آن افزایش می یابد. Dugdale و Barenblatt پیشنهاد کردند که ناحیه پلاستیک با اندازه مشخص باید در نوک ترک وجود داشته باشد [۴]. طول این ناحیه باید به اندازه ای باشد که تنشهای ایجاد شده در نوک ترک از تکین شدن تابع تنش جلوگیری کنند و به مقدار مشخصی محدود شود ($K_I = 0$) [۱۰]. در این مدل مصالح اطراف ترک طوری رفتار می کنند که گویی ترک از اندازه

۱ - Fictitious Crack Model

واقعی بزرگتر است و لبه های آن در ناحیه خرابی نوک ترک بواسطه جاری شدن مصالح توسط تنش f_y بهم چسبیده اند و چنانچه بازشدگی دهانه ترک به حد مشخصی برسد مصالح مقاومت خود را کاملاً از دست می دهند و تنش صفر می شود (شکل ۳-۶، a و b).



شکل ۳-۶- توزیع تنش در FPZ برای مدل‌های مختلف [۱۰]

اولین تئوری مکانیک شکست غیر خطی توسط Hillerborg (1976) پیشنهاد شد [۱۰]. FCM، اصلاح شده مدل پیشنهادی Dugdale و Barenblatt می باشد. در این مدل تنش در ناحیه خرابی نوک ترک واقعی بتدریجی کاهش پیدا می کند و رفتار مصالح در مقابل باز شدگی دهانه ترک بصورت نرم شدگی تنش می باشد. تنش σ که لبه های ترک مجازی را به هم نزدیک می کند از صفر در لبه ترک واقعی تا مقاومت کششی مصالح (f_t') در نوک ترک مجازی بصورت تدریجی افزایش پیدا

می کند (شکل ۳-۶، c و d). توزیع تنش در لبه ترک تابعی از باز شدگی دهانه ترک مجازی (δ_c) می باشد. در این مدل اطلاع از دو خصوصیت مصالح ضروری می باشد:

- شکل نمودار $\sigma - \delta_c$.
- سطح زیر نمودار $\sigma - \delta_c$ که انرژی شکست (G_f) نامیده می شود.

$$G_f = \int_0^{\infty} \sigma(\delta_c) d\delta_c \quad (10-3)$$

انرژی شکست (G_f) با تقسیم انرژی جذب شده در ناحیه شکست تقسیم بر سطح ایجاد شده در اثر ترک خوردگی بدست می آید. دو پارامتر K_{IC} و G_f را می توان با بارگذاری نمونه های تیر که در آن یک شکاف اولیه^۱ ایجاد شده است، محاسبه کرد. نمونه ها تحت خمش سه نقطه ای قرار می گیرند و با تقسیم سطح زیر نمودار بار- تغییر شکل وسط دهانه بر سطح مقطع خالص، انرژی شکست محاسبه می شود [۱۰].

۳-۳-۲- مدل^۲ (CBM):

در مدل FCM ضخامت ناحیه FPZ ناچیز فرض شده است. این در حالی است که خرابی در نوک ترک لزوماً محدود به یک ناحیه باریک نمی شود. Bazant فرض کرد که شکل گیری ریزترکها در نوک ترک اولیه در ناحیه ای به ضخامت w_c ایجاد می شوند و تئوری غیر خطی CBM را برای شکست بتن پیشنهاد کرد (شکل ۳-۶، f و e) [۱۰]. در این مدل معادله تنش بجای آنکه بر حسب بازشدگی ترک باشد تابعی از کرنش تعریف شده است و انرژی شکست بصورت زیر تعریف می شود:

$$G_f = w_c \int_0^{\infty} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (11-3)$$

۱ - Initial Crack(notch)

۲ - Crack Band Model

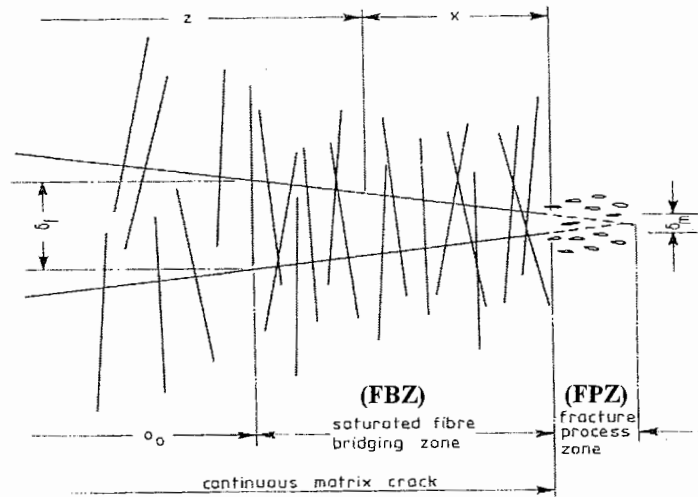
دوم نیروهای دوزنده الیاف که حوزه فشاری شدید در ناحیه نوک ترک ایجاد می کنند و با گسترش ترک مقابله می کنند[۳].

امتداد الیاف در بتن تصادفی می باشد، که این عامل انرژی نظیر بیرون کشیدگی الیاف را تحت تاثیر قرار می دهد. زاویه دار بودن الیاف فولادی نسبت به سطوح شکست (امتداد بارگذاری) باعث افزایش انرژی جذب شده و مقاومت کششی کامپوزیت می شود[۲۰]. در این حالت الیاف در حین بیرون کشیدگی بصورت خمشی تغییر شکل می دهد و اصطکاک الیاف و ماتریس افزایش می یابد[۲۰]. عامل زاویه دار بودن الیاف نسبت به سطح شکست در الیاف شیشه ای بدلیل شکننده بودن آنها در بهبود شکل پذیری تاثیر عکس دارد[۱۰].

۳-۴-۱- ناحیه دوزنده نوک ترک^۱ (FBZ) :

زمانی که یک نمونه FRC حاوی یک ترک یا شکاف اولیه تحت بارگذاری قرار می گیرد، ابتدا ناحیه FPZ در نوک ترک ایجاد می شود و وقتی که باز شدگی نوک ترک به مقدار بحرانی δ_m می رسد، الیاف دو لبه ترک را بهم متصل کرده و در مقابل گسترش آن مانع ایجاد می کنند[۲۰]. طولی از ترک که توسط الیاف دو لبه آن به هم متصل می شود FBZ نامیده می شود. با گسترش این ناحیه الیاف گسیخته شده و یا از ماتریس بیرون کشیده می شوند. اندازه FBZ به پارامترهایی از قبیل ابعاد نمونه، شکل بارگذاری و خصوصیات الیاف بستگی دارد(شکل ۳-۷).

۱ - Fiber Bridging Zone



شکل ۳-۷- FPZ و FBZ در بتن مسلح به الیاف [۲۰]

۳-۴-۲- دوزندگی ترک :

با شناخت رفتار بتن و الیاف و اندرکنش آنها می توان اثر دوزندگی و پل زدن الیاف را در مقابله با گسترش و باز شدن ترک در نظر گرفت. ضریب شدت تنش در نوک ترک بر اثر عوامل خارجی (K_I) معرف عامل گسترش دهنده ترک و ضریب شدت تنش در نوک ترک بر اثر الیاف (K_{If}) معرف عامل مقابله کننده با گسترش ترک می باشد. K_{If} مقداری منفی داشته و واکنش به K_I است. ضریب شدت تنش کل از جمع این دو ضریب بدست می آید:

$$K_I = K_{Ia} + K_{If}$$

معیار گسترش ترک، رسیدن K_I به یک مقدار بحرانی می باشد. برای ترک به طول $2a$ تحت تنش σ_o و زوج بار شکافنده F (شکل ۳-۸) می توان نوشت:

$$K_{Ia} = \sigma_o \sqrt{\pi a} \quad (۱۲-۳)$$

$$K_{If} = \frac{F}{\sqrt{\pi a}} \left(\frac{a+x}{a-x} \right)^{1/2} \quad (۱۳-۳)$$

رابطه ۳-۱۳ ضریب شدت تنش را در نوک A بر اثر زوج نیروی F مشخص می کند. اگر بجای F، بار گسترده $P(\delta x)$ ، وارد بر دو وجه ترک در ناحیه FBZ قرار داده شود، می توان K_{IF} را بدست آورد [۴]:

$$K_{IF} = - \int_{a_0}^a K_{IF} dx \quad (۱۴-۳)$$

a_0 ، موقعیت شروع ناحیه دوزندگی الیاف می باشد (شکل ۳-۷). مقدار بار دوزنده ترک (P) در هر نقطه با مختصات x تابعی از میزان بازشدگی ترک در آن نقطه (δx) می باشد [۳]. در نقطه ای به فاصله r از مبدا مقدار بازشدگی بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$\delta(r) = \delta_a(r) - \int_{a_0}^a \delta_F(r, x) dx \quad (۱۵-۳)$$

در رابطه ۱۵، $\delta_a(r)$ بازشدگی ترک در محل r در اثر عوامل خارجی و $\delta_F(r, x)$ نشانگر باز شدگی ترک در محل r به جهت زوج نیروی شکافنده F در محل x می باشد (شکل ۳-۸). معیار گسترش ترک رسیدن بازشدگی شکاف در محل a_0 به اندازه بحرانی δ_f می باشد. اگر طول ناحیه گسترش ترک ($a - a_0$) در مقایسه با ابعاد سازه و اندازه ترک کوچک باشد و با فرض اینکه نیروی دوزندگی الیاف در ناحیه FBZ ثابت و برابر p_f باشد، میتوان دید که [۳]:

$$c = a - a_0 = \frac{\pi}{8} \left[\frac{K_{Ia} - K_{Ic}}{P_f} \right]^2 \quad (۱۶-۳)$$

$$CTOD = \delta(a_0) = \frac{(K_{Ia} - K_{Ic})^2}{P_f E_m} \quad (۱۷-۳)$$

E_m مدول الاستیسیته مصالح مرکب می باشد. در حالت بحرانی که ترک شروع به گسترش نماید،

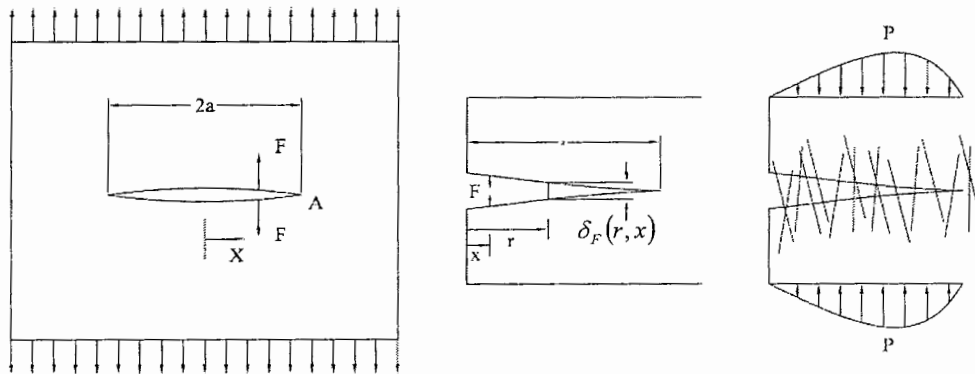
$CTOD = \delta_f$ بوده و بنابراین ضریب شدت تنش مورد نیاز برای گسترش ترک برابر است با:

$$K_{ICE} = (E_m P_f \delta_f)^{1/2} + K_{IC} = K_{ICF} + K_{IC} \quad (۱۸-۳)$$

K_{ICE} ، طاقت شکست معادل مصالح مرکب می باشد 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_{IC} ناچیز بوده و معیار شکست را می توان فقط براساس طاقت الیاف در نظر گرفت:

$$K_{ICE} = K_{ICF} = (E_m P_f \delta_f)^{1/2} = (E_m G_F)^{1/2} \quad (19-3)$$

نتیجه این مدل ساده شده، مشابه مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) گردیده و در آن معیار گسترش ترک رسیدن K_I به مقدار بحرانی $K_{IC} = K_{ICE}$ می باشد. در رابطه ۱۹-۳، G_F معرف انرژی لازم برای بیرون کشیدن الیاف در واحد سطح جدار ترک می باشد و انرژی شکست نامیده می شود.



شکل ۳-۸- ترک تحت تنش σ_n ، بار گسترده دوزنده P و زوج بار شکافنده F

۳-۴-۳- رفتار FRC تحت تنشهای کششی :

ترکها و عیوب اولیه در مصالح کامپوزیت نظیر بتن معمولی و بتن مسلح به الیاف وجود دارند. با افزایش بار، ریزترکها در ناحیه FPZ رشد پیدا کرده و وقتی تراکم آنها به حد اشباع رسید با اتصال آنها ترک موضعی ایجاد می شود. الیاف می توانند مکانیزم شکل گیری ترک را در ناحیه FPZ تحت تاثیر قرار دهند. عملکرد الیاف در این ناحیه نسبت به تاثیر آن در قسمت دوزنده ترک پیچیده تر می باشد. عرض ترک متأثر از سختی، نسبت حجمی و خصوصیات اتصال الیاف به ماتریس می باشد. تاثیر الیاف در مسلح کردن بتن با مقایسه سه پارامتر ضریب شدت تنش بررسی می شود:

- K_{IC}^M : طاقت شکست بتن مسلح نشده.

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

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

این سه پارامتر با ثبت مقادیر تنش در مراحل مختلف شکل گیری ترک بدست می آید. منحنی $\sigma - CMOD$ ^۱ برای مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف^۲ به ۵ ناحیه تقسیم می شود [۲۲]. مراحل مختلف خرابی در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. در ادامه هر کدام از این مراحل با جزئیات بیشتری توضیح داده می شود:

- ناحیه I (رفتار الاستیک خطی): در این ناحیه FRCC بصورت الاستیک خطی تغییر شکل می دهد (شکل ۳-۹a). ریزترکها هنوز رشد پیدا نکرده اند و ضریب شدت تنش کمتر از K_{IC}^C می باشد.

$$\text{zone I : } K_I < K_{IC}^C \quad \& \quad \sigma < \sigma_A$$

K_{IC}^C معمولاً بزرگتر یا مساوی K_{IC} می باشد.

- ناحیه II (تغییر شکل غیر خطی): در این مرحله بر اثر رشد و باز شدن ریز ترکها در FPZ سختی نمونه کاهش پیدا می کند (شیب نمودار $\sigma - CMOD$ کاهش پیدا می کند). در این مرحله ضریب شدت تنش بین دو مقدار K_{IC}^C و K_{IC}^{C*} می باشد.

$$\text{zone II : } K_{IC}^C < K_I < K_{IC}^{C*} \quad \& \quad \sigma_A < \sigma < \sigma_B$$

K_{IC}^{C*} نظیر تنش σ_B می باشد. با رسیدن تنش به این مقدار ترک موضعی شروع می شود. اگر الیاف به اندازه ای ریز نباشد که بین سطوح ریزترکها در ناحیه FPZ اتصال برقرار کند تنشهای σ_A و σ_B به هم نزدیک شده و مقادیر K_{IC}^C و K_{IC}^{C*} تقریباً با هم برابر خواهد بود.

۱ - Crack Mouth Opening Displacement

۲ - Fiber Reinforced Cementitious Composite (FRCC)

- ناحیه III (رشد پایدار ترک موضعی): با شروع ترک موضعی ناحیه II به پایان می رسد. در این مرحله ترک موضعی براحتی قابل تشخیص می باشد. در ناحیه ای که ترک موضعی ایجاد شده الیاف بین سطوح ترک اتصال برقرار کرده و مقداری از تنش اعمال شده را تحمل می کنند. با اعمال تنش بیشتر، ریزترکهای جدید در نوک ترک رشد پیدا کرده و ناحیه FPZ قسمتهای بیشتری از عرض نمونه را در بر می گیرد.

$$\text{zone III: } K_I < K_{IC}^{C*} + K_b \quad \& \quad \sigma_B < \sigma < \sigma_C$$

K_b ، ضریب شدت تنش منفی در اثر اتصال ناحیه ترک خورده در اثر الیاف می باشد. در این مرحله رشد ترک بصورت پایدار می باشد.

$$\frac{\partial K_I}{\partial a} < \frac{\partial}{\partial a} (K_{IC}^{C*} + K_b)$$

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

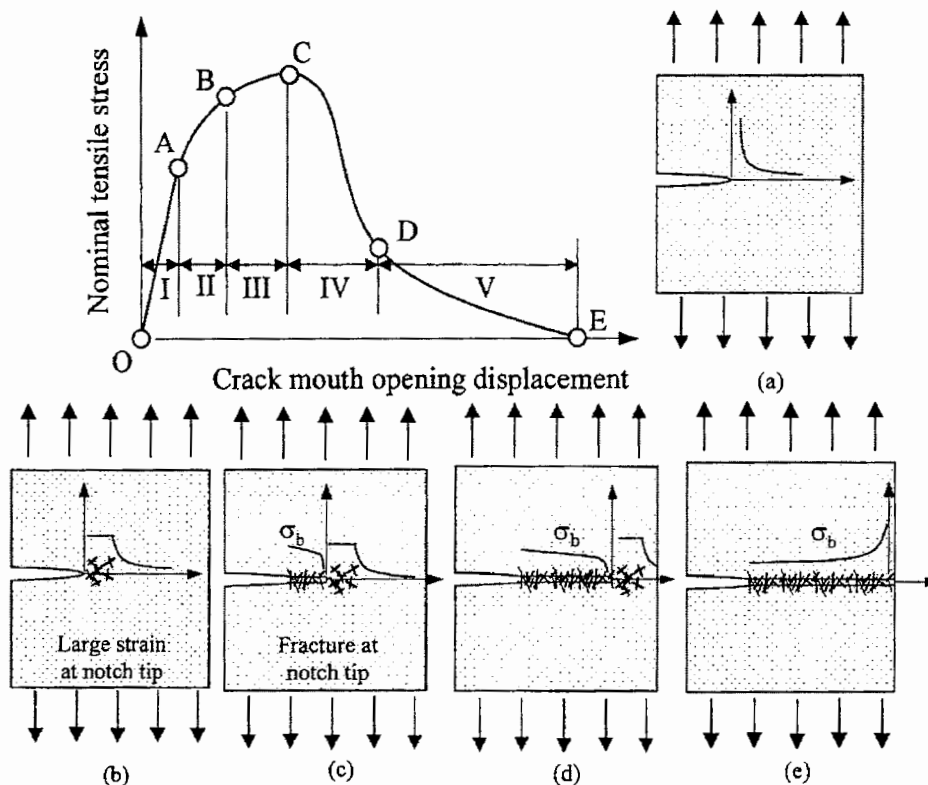
- ناحیه IV (رشد ناپایدار ترک موضعی): در این مرحله ترک در سراسر عرض نمونه بصورت ناپایدار رشد پیدا کرده و ضریب تمرکز تنش مربوط به بارگذاری برابر مقاومت مصالح در مقابل رشد ترک می باشد.

$$\text{zone IV: } K_I = K_{IC}^{C*} + K_b \quad \& \quad \sigma_C < \sigma < \sigma_D$$

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

$$\frac{\partial K_I}{\partial a} > \frac{\partial}{\partial a} (K_{IC}^{C*} + K_b)$$

- ناحیه V (دوزندگی ترک توسط الیاف): با شروع این مرحله تمام نیروی اعمال شده به نمونه توسط الیاف تحمل می شود. شکست نمونه با بیرون کشیده شدن الیاف یا گسیختگی آنها همراه است. سرانجام با رسیدن نمودار $\sigma-CMOD$ به σ_E نمونه بطور کامل توانایی خود را از دست داده و گسیخته می شود.



شکل ۳-۹- منحنی شمایک تنش کششی در مقابل باز شدگی دهانه ترک $\sigma-CMOD$ و مراحل مختلف خرابی کامپوزیت [۲۲]

۳-۵- 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 می باشد (RILEM, 1985) [۱۰]. این روش نسبت به آزمایشات دیگر ساده تر بوده و خطا در حین انجام آن حداقل می باشد. در این آزمایش کل انرژی آزاد شده در واحد سطح ترک محاسبه و انرژی شکست (G_f) نامیده می شود. این آزمایش بصورت

استاندارد روی تیر با بارگذاری سه نقطه ای که یک شکاف در وسط دهانه با عمق a_0 در آن تعبیه شده انجام می شود (شکل ۳-۱۰). بار با نرخ ثابت طوری وارد می شود که در عرض ۱ تا ۱۰ دقیقه خرابی رخ دهد و منحنی بار تغییر مکان^۱ (δ_{LPD}) ترسیم می شود. ابعاد تیر با توجه به بزرگترین بعد سنگدانه انتخاب می شود (حداقل ارتفاع تیر شش برابر بعد سنگدانه). معمولا نسبت S/d برابر ۴ و a_0/d برابر ۰/۵ در نظر گرفته می شود. انرژی شکست از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$G_f = \frac{W_0 + mg\delta_0}{b(d - a_0)} \quad (۱۲-۳)$$

در این رابطه، W_0 سطح زیر نمودار $\sigma - \delta_{LPD}$ تا تغییر مکان δ_0 می باشد. δ_0 تغییر مکانی که بار وارده دوباره به صفر می رسد. mg وزن تیر بین دو تکیه گاه، b و d بترتیب عرض و ارتفاع، و a_0 عمق شکاف می باشند.

ضریب شدت تنش (K_{IC}) براساس آزمایش خمش روی تیر با شکافی به عمق a بصورت زیر محاسبه می شود [۳]:

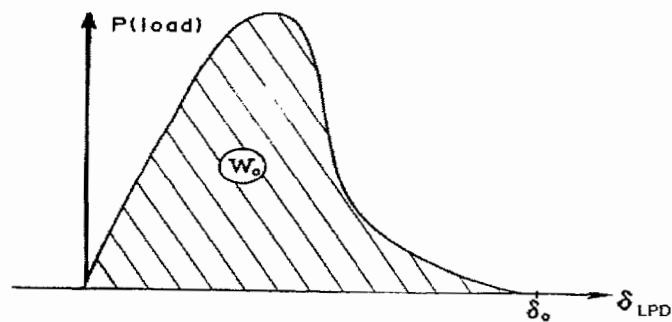
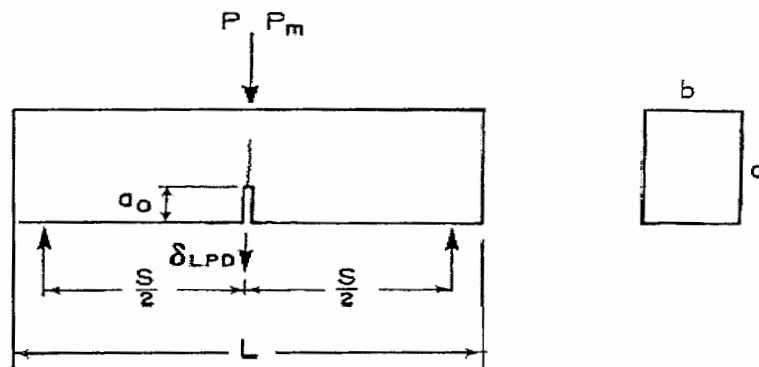
$$K_{IC} = \frac{P}{b\sqrt{d}} \varphi(\alpha), \quad \alpha = a/d \quad (۱۳-۳)$$

$$\varphi(\alpha) = 6F(\alpha)\sqrt{\pi a}$$

$$F(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{\sqrt{\pi}(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}} \quad (۱۴-۳)$$

بافرض تیرهای با ضخامت مشابه ولی با اندازه های مختلف و با فرض مقدار ثابت برای α از رابطه ۳-۱۳ نتیجه می شود که نیروی شکست (P) متناسب با جذر عمق تیر (d) افزایش می یابد، در حالی که براساس تئوری های معمول مقاومت، نیروی شکست متناسب با عمق تیر تغییر خواهد یافت [۳].

۱ - Load Point Deflection



شکل ۳-۱۰- تیر ترک دار تحت خمش [۱۰]

۳-۶- شکست ترد^۱ و شکست نرم^۲:

طاقة معرف توانایی یک ماده در مقابل تغییر شکل پلاستیک و مقدار انرژی جذب شده قبل از خرابی (شکست) می باشد. صفت‌های ترد و نرم برای تشخیص شکست یا مشخصات مواد با طاقته کم یا زیاد می باشد. بعبارت دیگر تغییر شکل پلاستیک و انرژی جذب شده قبل از شکست برای اجسام ترد، کم و برای اجسام نرم، زیاد می باشد. هرچه تمایل جسم برای تغییر شکل کاهش یابد، حساسیت آن نسبت به شکست افزایش می یابد [۳].

۱ - Brittle Fracture

۲ - Ductile Fracture

فصل چهارم

مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف

با مقاومت و شکل پذیری بالا

۴-۱- مقدمه :

در سالهای اخیر پیشرفت های وسیعی در توسعه بتن الیافی^۱ صورت گرفته و تحقیقات زیادی در مورد ارتباط ساختار این مصالح با خصوصیات مکانیکی آنها انجام شده است. با ایجاد تغییر در خصوصیات ماتریس، الیاف و سطح تماس آنها و همچنین روش ساخت این مصالح افزایش چشمگیری در مقاومت و شکل پذیری و بهبود کارایی صورت گرفته است. FRC ها بر اساس پاسخ آنها به نیروهای کششی به دو دسته تقسیم می شوند. FRC های معمولی یا Low Performance و HPFRCC^۲ ها. HPFRCC برای اولین بار توسط Naaman و Reinhardt در سال ۱۹۹۶ از FRC معمولی متمایز شد [۲۷]. FRC های معمولی در مقایسه با بتن دارای شکل پذیری بیشتری می باشند، ولی مقاومت کششی آنها تفاوت چندانی با بتن ندارد. در مقابل HPFRCC ها تحت بارهای کششی رفتار سخت شدگی کرنش از خود نشان داده و دارای مقاومت کششی و شکل پذیری بالایی نسبت به بتن می باشند (شکل ۴-۱). وسعت ناحیه سخت شدگی کرنش در مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف کمتر از فولاد می باشد و از اینرو مکانیزم سخت شدگی کرنش در این مصالح بصورت مجازی^۳ تشکیل می شود [۳۴].

۴-۲- طراحی HPFRCC :

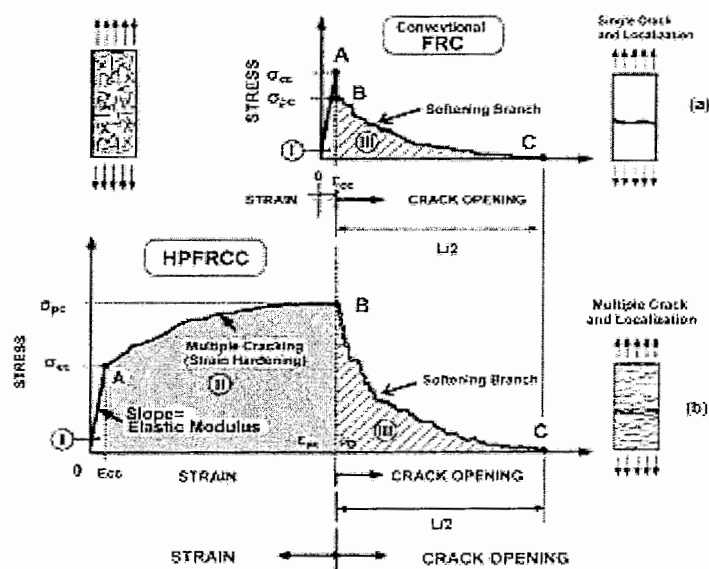
بمنظور بهبود عملکرد مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف دو پارامتر f'_f (مقاومت کششی مستقیم) و G_f (انرژی شکست) باید تا حد امکان افزایش یابند [۳۱]. از اینرو پارامترهای موثر در این دو مشخصه اصلی باید به خوبی تفهیم شوند.

۱- Fiber Reinforced Concrete(FRC)

۲ - High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite(HPFRCC)

۳ - Pseudo Strain Hardening

در مورد اینکه برای بررسی عملکرد HPCFRCC می توان رفتار آن را تحت آزمایش خمش (بجای آزمایش کشش مستقیم) مورد ارزیابی قرار داد یا نه هنوز اختلاف نظر وجود دارد. عده ای معتقدند چنانچه تغییر شکل نمونه های FRC در آزمایش خمش همراه با سخت شدگی کرنش و تشکیل ترکهای متعدد باشد می توان آنها را به عنوان HPCFRCC معرفی کرد [۲۷]. این فرضیه در حقیقت واقعیت را نادیده می گیرد که در حالت بارگذاری خمشی ترکهایی که در ناحیه کششی تیر ایجاد شده اند، با انتشار به سمت ناحیه فشاری تیر پایدار شده و امکان شکل گیری ترک در نواحی دیگر تیر ایجاد می شود. این عامل باعث می شود که در حالت خمش شکل گیری ترکهای متعدد نسبت به حالت کشش مستقیم راحت تر انجام شود. اما از آنجا که انجام آزمایش کشش مستقیم نسبت به آزمایش خمش مشکل تر است و شرایط خاص و کنترل شده ای را می طلبد و از آن گذشته، در واقعیت حالت کشش مستقیم در سازه ها کمتر اتفاق می افتد و اکثر اعضای سازه ای تحت بارهای خمشی می باشند، بنابراین هر دو آزمایش کشش مستقیم و خمش برای اظهار نظر در مورد عملکرد HPCFRCC ها معتبر شناخته شده است.



شکل ۴-۱- مقایسه شماتیک رفتار FRC و HPCFRCC تحت تنشهای کششی [۲۱]

۱ - Multiple Cracking

۴-۲-۱- مقاومت کششی:

حداکثر مقاومت عضو تحت تنشهای کششی مستقیم (f'_t) در حین شکل گیری ترک موضعی در امتداد سطوح شکست ایجاد می شود. در این مرحله قسمتی از نیروی کششی توسط دوزندگی الیاف^۱ و قسمتی هم توسط نواحی بتن ترک نخورده تحمل می شود. مقاومت کششی نهایی کامپوزیت بصورت زیر پیشنهاد شده است [۳۱]:

$$f'_t = \beta_1 \frac{\eta K_{IC,P}}{\sqrt{\pi a_0}} (1 - v_f) + \beta_2 \tau_v v_f \frac{l}{d} \quad (1-4)$$

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

۴-۲-۲- انرژی شکست:

همانطور که در فصل ۳ بحث شد، انرژی شکست (G_f) با تقسیم انرژی جذب شده در ناحیه شکست تقسیم بر سطح ایجاد شده در اثر ترک خوردگی بدست می آید. در هنگامی که ظرفیت باربری عضو به حداکثر مقدار خود می رسد، بازشدگی ترک (w) بسیار ناچیز است و در پایان مرحله نرم شدگی تنش (گسیختگی) باز شدگی ترک بطور متوسط به بیش از نصف طول الیاف خواهد رسید. در حقیقت سهم زیادی از انرژی شکست در اثر بیرون کشیده شدن الیاف بعد از ایجاد ترک سراسری می باشد. رابطه بین باز شدگی ترک و تنش منتقل شده توسط دوزندگی الیاف بصورت زیر می باشد [۳۱]:

$$\sigma(w) = 2hl v_f \alpha \eta K_{IC,P} \sqrt{\frac{1}{d} \frac{E_f}{E_b} \left[\frac{1}{8} - \frac{w}{2l} + \frac{w^2}{2l^2} \right]}$$

۱ - Fiber Bridging

با استفاده از رابطه فوق انرژی شکست را می توان محاسبه کرد :

$$G_f = \int_0^{l/2} \sigma(w) d(w) = \frac{h}{24} l^2 v_f \alpha \eta K_{IC,P} \sqrt{\frac{1}{d} \frac{E_f}{E_b}} \quad (2-4)$$

در این رابطه E_f و E_b به ترتیب مدول الاستیسیته الیاف و ماتریس می باشند. α پارامتری است که با η و $h = \frac{2}{4+f^2}(e^{\pi/2} + 1)$ رابطه دارد. f و h ضرایبی هستند که به اندرکنش الیاف و ماتریس وابسته می باشند (اصطکاک در سطح تماس الیاف و ماتریس و خمش الیاف در زمانی که هم امتداد با جهت تنشهای کششی نیست). در صورت تمایل به داشتن اطلاعات بیشتر درباره رابطه ۲-۴ به مرجع ۳۱ مراجعه شود.

۳-۲-۴- مقاومت نظیر اولین ترک در ماتریس^۱:

مقاومت نظیر شروع اولین ترک در آزمایش خمش از دیگر خصوصیات HPFRCCها می باشد. Naaman با بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف مختلف مدفون در ماتریس سیمانی به این مسئله پی برد که حداکثر مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن بعد از ایجاد لغزش کمی ایجاد می شود. وی نتیجه گرفت که در صورت استفاده از ماتریس سیمانی معمولی و الیاف درشت تا قبل از ترک خوردگی ماتریس، تنش ایجاد شده در الیاف تنها ۲۵٪ مقاومت بیرون کشیدگی حداکثر آنها خواهد بود [۳۳]. استفاده از ۲ و ۱۰ درصد الیاف افزایش مقاومت نظیر اولین ترک در ماتریس نسبت به حالت بدون الیاف به ترتیب به ۱۷ و ۸۰ درصد و در صورتی که امتداد الیاف هم جهت با تنش کششی باشد این مقدار به بیش ۱۰۰٪ خواهد رسید.

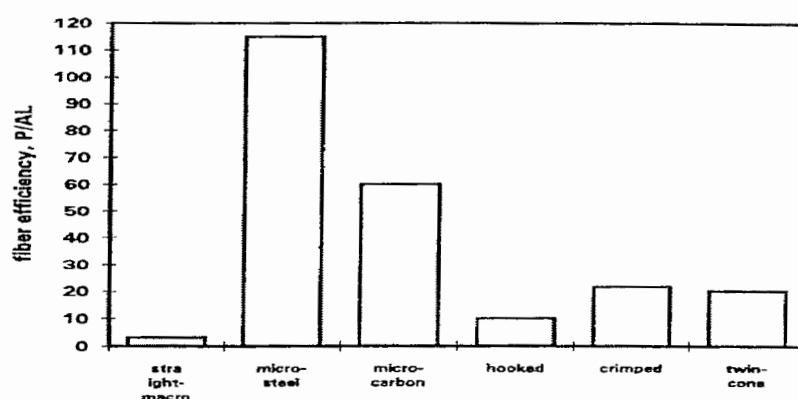
با افزایش مقاومت پیوستگی الیاف به ماتریس مقاومت نظیر اولین ترک بهبود پیدا می کند. در صورت استفاده از الیاف با مدول الاستیسیته پایین مانند پلی پروپیلن امکان افزایش مقاومت نظیر اولین

۱ - First Crack Strength

ترک وجود ندارد. کاهش فاصله و قطر الیاف نیز مقاومت اولین ترک را به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می دهد.

۴-۲-۴- رفتار سخت شدگی کرنش^۱:

بعد از ترک خوردگی ماتریس، اتصال لبه ترک توسط الیاف و مقاومت آنها در برابر بیرون کشیده شدن از ماتریس عامل اصلی ایجاد مقاومت می باشد. تاثیر الیاف مختلف در رفتار کامپوزیت بعد از ترک خوردگی را می توان با اندازه گیری پارامتری که حاصل ضرب مقاومت بیرون کشیدگی الیاف تک در حالت مستقیم و تعداد الیاف در واحد حجم می باشد مورد بررسی قرار داد. تعداد الیاف بطور معکوس با حاصل ضرب سطح مقطع در طول الیاف رابطه دارد. شکل ۴-۲ تاثیر الیاف مختلف بعد از ترک خوردگی ماتریس را با توجه به پارامتر $P/l \cdot A$ نشان می دهد. با توجه به شکل، استفاده از ریز الیاف بیشترین تاثیر را خواهد داشت. عملکرد الیاف درشت را می توان با ایجاد تغییر در هندسه و شکل الیاف بهبود بخشید. الیاف مجعد بدلیل برقراری اتصال قوی با ماتریس سیمانی و جذب انرژی زیاد در اثر بیرون کشیده شدن از ماتریس نسبت به انواع دیگر الیاف تغییر شکل یافته موثرتر است [۳۳].



شکل ۴-۲- تاثیر الیاف مختلف در رفتار FRC بعد از ترک خوردگی ماتریس [۳۳]

۱ - Strain-Hardening Behavior

۳-۴- ساختار ناحیه تماس^۱ الیاف و ماتریس:

ساختار خمیر سیمان در نواحی نزدیک الیاف و سنگدانه ها (ITZ) کاملاً با قسمتهای دیگر ماتریس سیمانی متفاوت است. خصوصیات این ناحیه که خود دارای ساختار غیر یکنواختی می باشد به نوع، جنس و اندازه الیاف و خصوصیات سطح الیاف و همچنین اجزاء تشکیل دهنده ماتریس سیمانی بستگی دارد و ممکن است بین $50-100 \mu m$ ضخامت داشته باشد [۱۹،۳۳]. ضخامت ITZ در مصالح سرامیکی و پلیمری بسیار نازک است. در حالی که در مصالح سیمانی این ناحیه دارای ضخامت و پیچیدگی بیشتری می باشد و ناحیه نسبتاً وسیعی (در حدود ۲۵-۳۵ درصد حجم خمیر سیمان) را در بر می گیرد [۱۹].

برای بررسی ITZ در مصالح پایه سیمانی، الیاف از نظر هندسی به سه دسته تقسیم بندی می شوند [۳۳].

- الیاف درشت^۲: قطر این الیاف به مقدار قابل ملاحظه ای بیشتر از اندازه ذرات سیمان که معمولاً کوچکتر از $70 \mu m$ (با اندازه متوسط $20-10 \mu m$) هستند، می باشد. الیاف درشت که بصورت تجاری بمنظور تقویت ماتریسهای سیمانی قابل دسترس می باشند معمولاً از جنس فولاد و پلی پروپیلن با قطری در حدود ۰/۱ تا ۱ میلیمتر هستند.
- ریز الیاف^۳: قطر این الیاف کمتر از اندازه ذرات سیمان است. اکثر الیاف مصنوعی و شیشه ای با قطر بین $40-5 \mu m$ از جمله این نوع الیاف هستند. الیافی که دارای سطح مخصوص بیش از $20 m^2/kg$ باشند نیز به عنوان ریز الیاف شناخته می شوند. ریز الیاف از جنس فولاد نیز قابل تولید می باشند و در ماتریس سیمانی مورد استفاده قرار گرفته اند.

۱ - Interfacial Transition Zone (ITZ)

۲ - Macro-Fibers

۳ - Micro-Fibers

• الیاف دسته ای^۱ : این نوع الیاف معمولاً دسته ای شامل چند ریز الیاف مصنوعی می باشند. تعداد الیاف موجود در یک رشته ممکن است به چند صد یا چند هزار عدد برسد. بعد از اختلاط در ماتریس سیمانی ممکن است این الیاف از هم جدا شده یا به صورت رشته ای باقی بمانند. الیاف رشته ای معمولاً از جنس شیشه می باشند و در بعضی موارد الیاف کربن، آرامید و پلی پروپیلن هم بصورت رشته ای استفاده شده اند.

۴-۳-۱- الیاف درشت: ساختار ITZ در اطراف الیاف درشت کاملاً شبیه به نواحی اطراف سنگدانه ها در بتن می باشد. نواحی اطراف الیاف شامل لایه ای از ذرات CH_2 با تخلخل زیاد است (شکل ۴-۳). تخلخل زیاد در اطراف سنگدانه ها و الیاف بدلیل تراکم ناکافی ذرات سیمان و نسبت آب به سیمان بالا در این ناحیه می باشد. این عامل با افزایش ابعاد الیاف و سنگدانه ها شدت می گیرد و دلیل اصلی آن پدیده wall effect می باشد [۳۳].

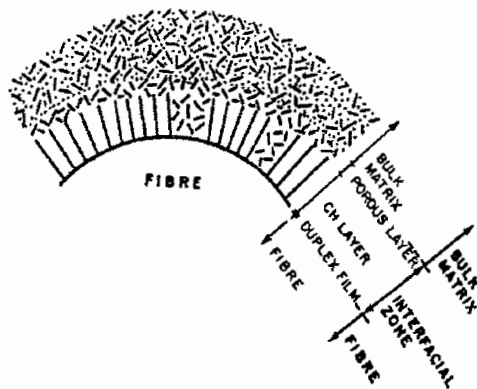
مشاهدات آزمایشگاهی نشان می دهد که جداسدگی الیاف و ماتریس دقیقاً در سطح تماس آنها ایجاد نمی شود و نمی توان آن را با تخریب برشی ساده در سطح تماس توصیف کرد. بلکه ریزترکهای زیادی به همراه تغییر شکل برشی قابل ملاحظه در ناحیه نسبتاً وسیعی به ضخامت $40-70 \mu m$ در اطراف الیاف ایجاد می شود.

استفاده از میکروسیلیس باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه در ITZ می شود. ذرات بسیار ریز میکروسیلیس تراکم این ناحیه را افزایش داده و ضخامت آن را کاهش می دهند. افزودن میکروسیلیس باعث بهبود مقاومت پیوستگی الیاف و ماتریس سیمانی به میزان ۳۵٪ می شود. استفاده از مواد پلیمری مانند اکریلیک و PVA^۲ که قابل حل در آب می باشند باعث بهبود اتصال الیاف و ماتریس به میزان ۱۰۰٪ می شود.

۱ - Bundled-Fibers

۲ - Calcium Hydroxide(CH)

۳ - Polyvinyl Alcohol(PVA)



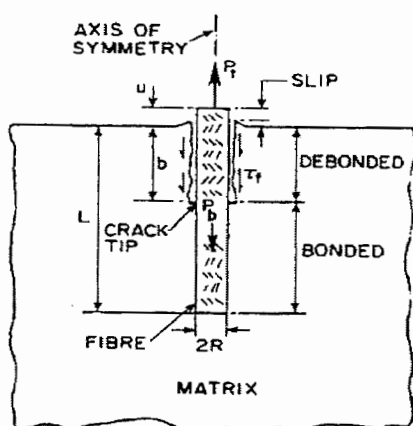
شکل ۴-۳- ساختار ITZ در اطراف الیاف درشت فولادی [۳۳]

۴-۳-۲- ریز الیاف: ساختار خمیر سیمان در اطراف الیاف ریز و درشت تفاوت زیادی باهم دارد. ناحیه انتقال در اطراف الیاف ریز متراکم تر است و ساختار آن تفاوت چندانی با قسمتهای دیگر ماتریس سیمانی نخواهد داشت. علت این اختلاف یکسان بودن اندازه الیاف و ذرات سیمان و از بین رفتن عامل wall effect و کاهش تخلخل در اطراف الیاف می باشد. در مورد بتن های مسلح به ریز الیاف حتی بدون استفاده از میکروسیلیس هم ITZ از تراکم بالایی برخوردار است. به هر حال افزودن میکروسیلیس به بتن های مسلح به ریز الیاف باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی الیاف به میزان ۲۰٪ خواهد شد. استفاده از میکروسیلیس مود خرابی الیاف کربن را از حالت بیرون کشیدگی به گسیختگی الیاف تغییر می دهد [۳۳].

۴-۳-۳- مکانیزم خرابی:

گسترش خرابی در ITZ بعد از جدا شدن الیاف از ماتریس و در حین بیرون کشیده شدن الیاف تاثیر زیادی در رفتار کامپوزیت دارد. مشاهده شده است که در مورد الیاف درشت خرابی در سطح تماس واقعی الیاف و ماتریس ایجاد نمی شود و در تمام عرض ITZ گسترش پیدا می کند [۳۳]. این خرابی در نواحی نزدیک به ترک اصلی بسیار شدید تر است (شکل ۴-۴)

در مورد الیاف درشت مقاومت بیرون کشیدگی معمولاً با افزایش لغزش کاهش پیدا می‌کند. در مقابل مقاومت بیرون کشیدگی ریز الیاف با افزایش لغزش افزوده می‌شود. این رفتار در مورد الیاف آبدوست^۱ مانند نایلون بیش از الیاف دافع آب^۲ مانند پلی پروپیلن به چشم می‌خورد. قطر الیاف آبدوست بعد از اختلاط در ماتریس سیمانی افزایش پیدا می‌کند، که دلیل آن نفوذ آب به داخل الیاف می‌باشد. در نتیجه تورم الیاف تنش فشاری در سطح تماس الیاف و ماتریس ایجاد می‌شود و مقاومت بیرون کشیدگی آنها افزایش پیدا می‌کند.



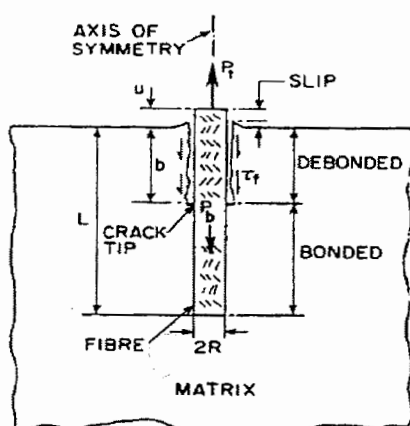
شکل ۴-۴- شروع جدا شدگی الیاف از ماتریس [۳۳]

در مورد الیاف تغییر شکل یافته مانند قلابدار و مجعد نوع خرابی متفاوت می‌باشد. خرابی این الیاف ممکن است با گسیختگی یا تغییرشکل و جاری شدن الیاف و یا تخریب کلی ماتریس همراه باشد. حجم خرابی بستگی به اندازه تغییرشکل ایجاد شده در الیاف (هندسه الیاف) دارد. نوع متفاوت خرابی در مواقعی ایجاد می‌شود که الیاف نسبت به جهت اعمال تنش کششی زاویه دار باشند. در صورت ترک خوردن ماتریس، در این الیاف بصورت موضعی خمش ایجاد می‌شود و ممکن است ماتریس اطراف الیاف بدلیل تنش فشاری ایجاد شده در سطح تماس الیاف و ماتریس تخریب شود. وسعت خرابی ممکن است بیش از ضخامت ITZ باشد.

۱ - Hydrophilic

۲ - Hydrophobic

در مورد الیاف درشت مقاومت بیرون کشیدگی معمولاً با افزایش لغزش کاهش پیدا می‌کند. در مقابل مقاومت بیرون کشیدگی ریز الیاف با افزایش لغزش افزوده می‌شود. این رفتار در مورد الیاف آبدوست^۱ مانند نایلون بیش از الیاف دافع آب^۲ مانند پلی پروپیلن به چشم می‌خورد. قطر الیاف آبدوست بعد از اختلاط در ماتریس سیمانی افزایش پیدا می‌کند، که دلیل آن نفوذ آب به داخل الیاف می‌باشد. در نتیجه تورم الیاف تنش فشاری در سطح تماس الیاف و ماتریس ایجاد می‌شود و مقاومت بیرون کشیدگی آنها افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۴-۴- شروع جدا شدگی الیاف از ماتریس [۳۳]

در مورد الیاف تغییر شکل یافته مانند قلابدار و مجعد نوع خرابی متفاوت می‌باشد. خرابی این الیاف ممکن است با گسیختگی یا تغییرشکل و جاری شدن الیاف و یا تخریب کلی ماتریس همراه باشد. حجم خرابی بستگی به اندازه تغییرشکل ایجاد شده در الیاف (هندسه الیاف) دارد. نوع متفاوت خرابی در مواقعی ایجاد می‌شود که الیاف نسبت به جهت اعمال تنش کششی زاویه دار باشند. در صورت ترک خوردن ماتریس، در این الیاف بصورت موضعی خمش ایجاد می‌شود و ممکن است ماتریس اطراف الیاف بدلیل تنش فشاری ایجاد شده در سطح تماس الیاف و ماتریس تخریب شود. وسعت خرابی ممکن است بیش از ضخامت ITZ باشد.

۱ - Hydrophilic

۲ - Hydrophobic

۴-۴- تاثیر پارامترهای مختلف در مقاومت کششی و شکل پذیری HPFRCC:

در بخش ۲-۴ مشخص شد که پارامترهای متعددی مقاومت کششی و شکل پذیری مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف را تحت تاثیر قرار می دهند. این پارامترها را می توان در سه بخش اصلی خلاصه کرد. مشخصات الیاف، ماتریس و ناحیه تماس آنها. در ادامه به بررسی تاثیر این پارامترها پرداخته می شود.

۴-۴-۱- **نسبت حجمی الیاف (V_f):** روابط ۱-۴ و ۲-۴ نشان می دهند که افزایش نسبت حجمی الیاف باعث افزایش مقاومت کششی و شکل پذیری FRC می شود. معمولاً افزایش درصد الیاف و توزیع یکنواخت آنها در ماتریس مانع از رشد ترکها شده و تغییر شکل‌های موضعی را به تاخیر می اندازد. از طرف دیگر افزایش نسبت حجمی الیاف باعث کاهش کارایی بتن می شود. در حقیقت عامل کارایی نسبت حجمی الیاف را تا حدی محدود می کند. برای بهبود کارایی محدود کردن نسبت حجمی الیاف و تغییر در نسبت اختلاط مصالح تشکیل دهنده ماتریس اجتناب ناپذیر است.

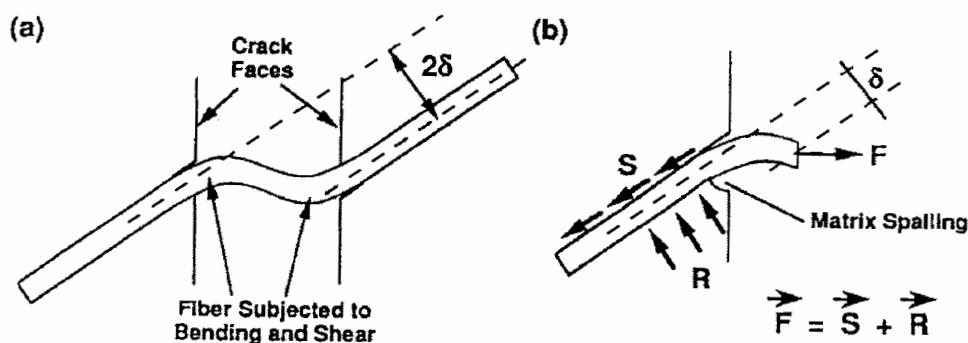
۴-۴-۲- **نسبت ظاهری الیاف^۱ ($\frac{l}{d}$):** نسبت ظاهری برابر نسبت طول به قطر معادل الیاف می باشد. بر اساس روابط ۱-۴ و ۲-۴ افزایش نسبت ظاهری باعث بهبود مشارکت الیاف در مقاومت کششی کامپوزیت می شود. انرژی شکست بطور مستقیم با مربع طول و بطور معکوس با جذر قطر الیاف رابطه دارد. بنابراین افزایش نسبت ظاهری باعث افزایش انرژی شکست هم می شود. با افزایش طول الیاف (نسبت ظاهری)، طول مشخصه^۲ مصالح (l_{ch}) که نشان دهنده اندازه FPZ می باشد، افزایش می یابد. افزایش l_{ch} باعث بهبود شکل پذیری خواهد شد [۳۱].

۱ - Aspect Ratio

۲ - Characteristic Length

۴-۳- جهت گیری الیاف: انحراف الیاف از جهت تنشهای کششی تاثیر قابل ملاحظه ای در مقاومت بیرون کشیدگی آنها خواهد داشت. مدل سازی های تئوریک در دهه ۶۰ میلادی نشان داد که در صورت توزیع الیاف بصورت دو و سه بعدی میزان تاثیر آنها به ترتیب به یک سوم و یک نهم حالت یک بعدی کاهش خواهد یافت [۳۳].

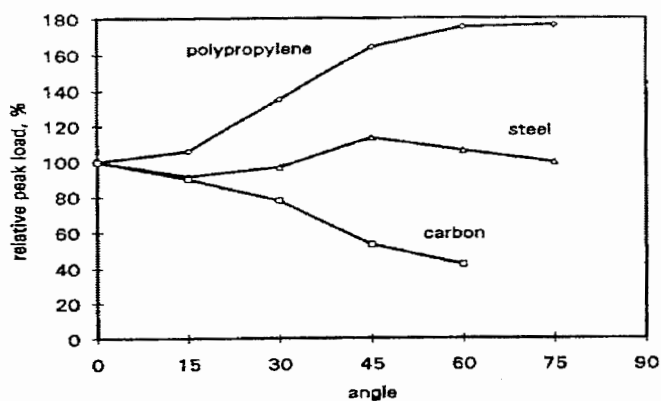
در صورت انحراف الیاف از جهت بارگذاری، در الیاف خمش موضعی ایجاد می شود. این عامل باعث پدید آمدن سیستم پیچیده توزیع تنش در الیاف و ماتریس خواهد شد (شکل ۴-۵). در این حالت رفتار کلی کامپوزیت بستگی به برقراری تعادل بین سختی ماتریس و الیاف دارد. اگر الیاف شکل پذیر و دارای مدول الاستیسیته پایین باشد به راحتی خم می شود و بواسطه عمل شاخه ای، مقاومت بیرون کشیدگی افزایش پیدا می کند. در این صورت کاهش تاثیر الیاف در اثر جهت دار بودن تا حد زیادی جبران می شود. اگر از الیاف با مدول الاستیسیته بالا یا شکننده استفاده شود، ترکیبی از خمش موضعی و نیروی محوری باعث تخریب ماتریس یا شکست الیاف در محل ترک خوردگی خواهد شد.



شکل ۴-۵- خمش الیاف در اثر ترک خوردگی ماتریس (a)، نیروهای ایجاد شده در الیاف و ماتریس (b) [۳۳]

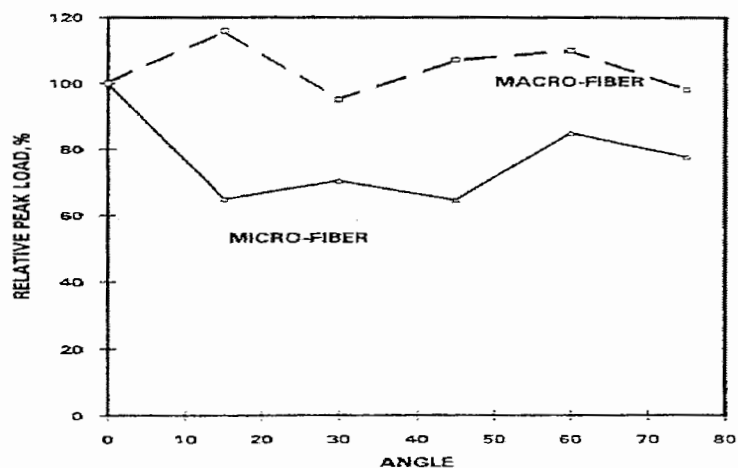
شکل ۴-۶ نشان می دهد مقاومت بیرون کشیدگی الیاف شکل پذیر با افزایش زاویه تمایل افزایش پیدا می کند. ولی در مورد الیاف شکننده افزایش زاویه تمایل باعث کاهش مقاومت بیرون کشیدگی

خواهد شد. در نتیجه با برقراری تعادل بین خصوصیات مکانیکی الیاف و ماتریس رفتار الیاف جهت دار بهینه می شود.



شکل ۴-۶- تاثیر زاویه تمایل در مقاومت بیرون کشیدگی الیاف شکل پذیر (فولاد و پلی پروپیلن) و شکننده (کربن) [۳۳]

تاثیر زاویه دار بودن الیاف نسبت به جهت تنشهای کششی در مورد ریز الیاف متفاوت با الیاف درشت متفاوت است. در صورت افزایش زاویه تمایل در ریز الیاف فولادی، مقاومت بیرون کشیدگی آنها نسبت به الیاف درشت کاهش می یابد (شکل ۴-۷).



شکل ۴-۷- تاثیر زاویه تمایل در مقاومت بیرون کشیدگی الیاف ریز و درشت فولادی [۳۳]

مصنوعی نشان می دهد که مقاومت بیرون کشیدگی الیاف پلی اتیلن و پلی پروپیلن که مدول الاستیسیته پایین دارند نسبت به انواع دیگر کمتر می باشد [۳۳].

اثر تنشهای جانبی نیز رفتار بیرون کشیدگی الیاف را تحت تاثیر قرار می دهد. به عنوان مثال در صورت ایجاد ترک برشی در تیرهای ساخته شده از بتن الیافی، تغییر شکل‌های برشی و بازشدگی ترک بطور همزمان اتفاق می افتد. در آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن^۱ نیز الیافی که دو لبه ترک را به هم متصل می کنند، تحت فشار جانبی زیادی هستند.

۴-۴-۵- فاصله و سطح مخصوص الیاف:

فاصله الیاف و سطح مخصوص^۲ آنها پارامترهایی هستند که کارایی بتن تازه و خصوصیات مکانیکی بتن سخت شده را تحت تاثیر قرار می دهند. سطح مخصوص برابر است با سطح کل الیاف موجود در واحد حجم بتن. فاصله الیاف تابعی از سطح مقطع، نسبت حجمی و زاویه تمایل آنها می باشد. فاصله متوسط الیاف به تعداد الیافی بستگی دارد که از واحد سطح اختیاری در کامپوزیت عبور می کنند. در صورتی فاصله الیاف کم باشد، انرژی بیشتری برای اختلاط و تراکم بتن نسبت به حالتی که از الیاف درشت تر و با فاصله بیشتر استفاده شود، نیاز می باشد. سطح مخصوص الیاف عامل موثری در کاهش فاصله و بازشدگی ترکها بشمار می رود. با افزایش سطح مخصوص الیاف ترکهای مویی با فاصله کم تشکیل می شوند. توانایی الیاف برای جلوگیری از رشد ترک بستگی به فاصله الیاف در سطوح ترک خورده دارد. کاهش فاصله الیاف باعث افزایش مقاومت ماتریس در برابر ترک خوردگی خواهد شد. باتوجه به شکل ۴-۸ مقاومت نظیر شکل گیری اولین ترک در ماتریس با کاهش فاصله الیاف نسبت به ماتریس مسلح نشده افزایش پیدا می کند. فاصله الیاف در FRC به روشهای مختلف قابل محاسبه است [۱۷]:

۱ - Splitting Tensile Strength

۲ - Specific Surface

$$S = 13.8d_f \sqrt{\frac{l}{\rho}} \quad , \quad S = 3\sqrt{\frac{v}{\rho}} \quad , \quad S = 13.8d_f \frac{\sqrt{l}}{\rho}$$

در این روابط، d_f : قطر الیاف، ρ : نسبت حجمی الیاف، v : حجم یک عدد الیاف و l : طول الیاف می باشد.

برای درصد حجمی ثابت و با طول برابر، با این فرض که الیاف بصورت ایده آل در تمام حجم بتن توزیع شده باشند، تعداد الیاف در واحد حجم^۱ بطور معکوس با مربع قطر الیاف تغییر می کند:

$$FC_1 = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 FC_2$$

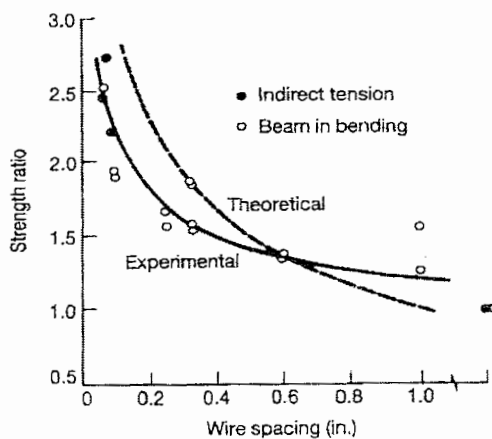
FC_1 و FC_2 : تعداد الیاف در واحد حجم کامپوزیت.

d_1 و d_2 : قطر معادل الیاف.

سطح مخصوص الیاف با طول و نسبت حجمی مشخص بطور معکوس با قطر الیاف تغییر خواهد کرد:

$$FSS_1 = \frac{d_1}{d_2} FSS_2$$

FSS : سطح مخصوص الیاف.



شکل ۴-۸- تاثیر فاصله الیاف در افزایش مقاومت کششی ماتریس [۱۷]

آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی همزمان الیاف فولادی که در دو حالت مستقیم و با زاویه 60° در ماتریس سیمانی با مساحت $625m^2$ و با فاصله های $4-10mm$ مدفون شده اند نشان می دهد

۱ - Fiber Count

مقاومت بیرون کشیدگی با افزایش تراکم الیاف کاهش می یابد [۳۱]. مقاومت بیرون کشیدگی الیاف با زاویای ۰° و ۶۰° در متراکم ترین حالت بترتیب ۸۶٪ و ۶۳٪ مقاومت الیاف تک می باشد. کاهش مقاومت بدلیل افزایش حجم خرابی ماتریس می باشد و این عامل در صورت زاویه دار بودن الیاف تشدید می شود.

۴-۴-۶- اندازه الیاف: معمولا فرض بر این است که رفتار FRC در ناحیه الاستیک (قبل از ترک خوردگی ماتریس) فقط تحت تاثیر مقاومت کششی ماتریس است و وقتی که ماتریس ترک می خورد الیاف با اتصال سطوح ترک خورده در مقاومت کامپوزیت مشارکت می کنند. الیاف این قابلیت را دارند که با اتصال لبه ریزترکها رفتار FRC در ناحیه الاستیک را نیز تحت تاثیر قرار دهند. میزان تاثیر الیاف بستگی به نسبت حجمی، طول، قطر و خصوصیات ماتریس دارد. استفاده از ریز الیاف قادر است مقاومت کششی و شکل پذیری ماتریس را بصورت ذاتی بهبود می بخشد. ریز الیاف باعث افزایش مقاومت ماتریس در برابر ترک خوردگی یا افزایش طاقت شکست ($K_{IC,P}$) می شود [۳۱]. بر اساس روابط ۴-۱ و ۴-۲ افزایش $K_{IC,P}$ منجر به بهبود مقاومت کششی و شکل پذیری می شود.

۴-۴-۷- سرعت بارگذاری و دمای محیط: تغییر در سرعت بارگذاری و دمای محیط مقاومت بیرون کشیدگی الیاف را تحت تاثیر قرار می دهد. در دمای پایین ($50^{\circ}C$ -) مقاومت بیرون کشیدگی الیاف افزایش پیدا می کند و رفتار آنها ترد می شود. این عامل در ماتریس های مقاومت بالا که حاوی میکروسیلیس می باشند شدیدتر است.

تغییر در سرعت بارگذاری در مقاومت بیرون کشیدگی الیاف صاف تاثیر چندانی ندارد. اما در مورد الیاف تغییر شکل یافته تغییر در سرعت بارگذاری تاثیر قابل ملاحظه ای در رفتار آنها خواهد داشت.

تحت بارهای ضربه ای الیاف تغییر شکل یافته مقاومت بیشتری نشان می دهند و انرژی بیشتری جذب خواهند کرد [۳۳].

۴-۴-۸- شکل الیاف:

بمنظور بهبود خصوصیات مکانیکی FRC درک رفتار الیاف در هنگام بیرون کشیده شدن از ماتریس با اهمیت می باشد. مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن از ماتریس ناشی از دو عامل اصطکاک و مهار مکانیکی آنها می باشد. اصطکاک بستگی به کیفیت سطح تماس الیاف و ماتریس و خصوصیات مصالح ناحیه تماس دارد. این عامل نقش مهمی در مقاومت بیرون کشیدگی الیاف دارد، ولی با افزایش لغزش تا حد زیادی از بین می رود. مهار مکانیکی ناشی از هندسه الیاف و ایجاد تغییر شکل در آنها می باشد. از جمله الیاف تغییرشکل یافته می توان به الیاف پیچیده، مجعد و انتها قلابدار اشاره نمود. این عامل بعد از جداسازی الیاف از ماتریس و بعد از لغزش اندکی فعال شده و بسته به کیفیت مهار تا تغییر شکلهای زیاد مقاومت خود را حفظ می کند.

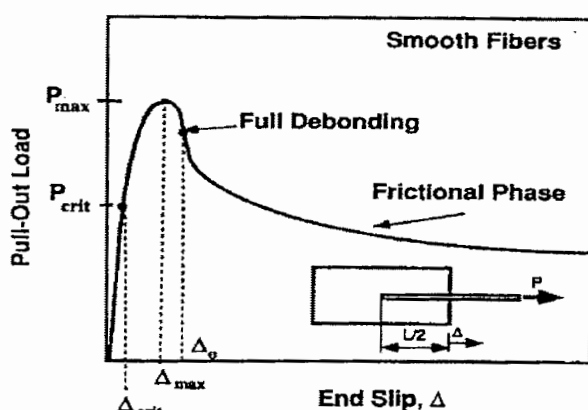
۴-۴-۸-۱- الیاف صاف^۱:

شکل ۴-۹ رفتار بیرون کشیدگی الیاف صاف فولادی را نشان می دهد. با رسیدن نیروی بیرون کشیدگی به P_{crit} و زمانی که مقدار لغزش به Δ_{crit} می رسد، جداسازی الیاف از ماتریس آغاز می شود. در این مرحله تنش برشی الاستیک در سطح تماس الیاف و ماتریس از مقاومت پیوستگی بیشتر می شود و ناحیه جداسازی به تدریج تمام طول الیاف را در بر می گیرد. بین Δ_0 و Δ_{crit} مقاومت بیرون کشیدگی ترکیبی از تنش چسبندگی و اصطکاک می باشد. با رسیدن تغییر مکان به Δ_0 ، الیاف به طور کامل از ماتریس جدا شده و مقاومت بیرون کشیدگی بطور کامل توسط اصطکاک

۱ - Straight Fiber

تامین می شود. با افزایش لغزش، مقاومت بیرون کشیدگی الیاف فولادی که در ماتریس معمولی مدفون شده اند کاهش پیدا می کند. اما در مورد الیاف مصنوعی مقاومت ناشی از اصطکاک با لغزش الیاف افزوده می شود که دلیل آن خراشیده شدن سطح آنها می باشد. چنانچه از ماتریس سیمانی با مقاومت بالا استفاده شود، میزان افت مقاومت بیرون کشیدگی ناشی از اصطکاک کاهش پیدا می کند [۳۳].

Naaman در سال ۱۹۹۱ مدل تئوریک برای تخمین مقاومت بیرون کشیدگی الیاف صاف فولادی که بصورت مستقیم در ماتریس سیمانی مدفون شده اند پیشنهاد کرد [۲۵].



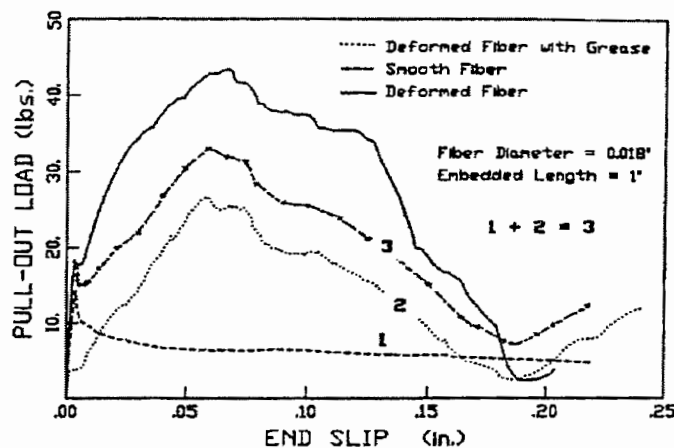
شکل ۹-۴- رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی صاف [۳۳]

۴-۴-۸-۲- الیاف قلابدار^۱:

برای بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی قلابدار سه نوع آزمایش انجام می شود [۲۵]. اولین سری آزمایشات، بیرون کشیدن الیاف قلابدار از مکعب بتنی می باشد. این آزمایش برای بررسی ترک خوردگی بتن با استفاده از تکنیک Acoustic Emission انجام می گیرد. دومین سری آزمایشات، بیرون کشیدن الیافی است که قلاب انتهای آن بریده شده است. مقصود از اینکار جدا کردن تاثیر هندسه الیاف از چسبندگی الیاف و ماتریس می باشد. در نهایت آزمایش بر روی الیاف قلابدار که

۱ - Hooked Fiber

سطح آنها به روغن^۱ آغشته شده و سپس در اپوکسی مدفون شده اند. هدف از این آزمایش حذف تاثیر چسبندگی الیاف و ماتریس می باشد [۲۵]. در این آزمایش به دلیل شفاف بودن اپوکسی تغییر شکل الیاف و ماتریس در طول آزمایش مستقیماً قابل مشاهده است (شکل ۴-۱۰).

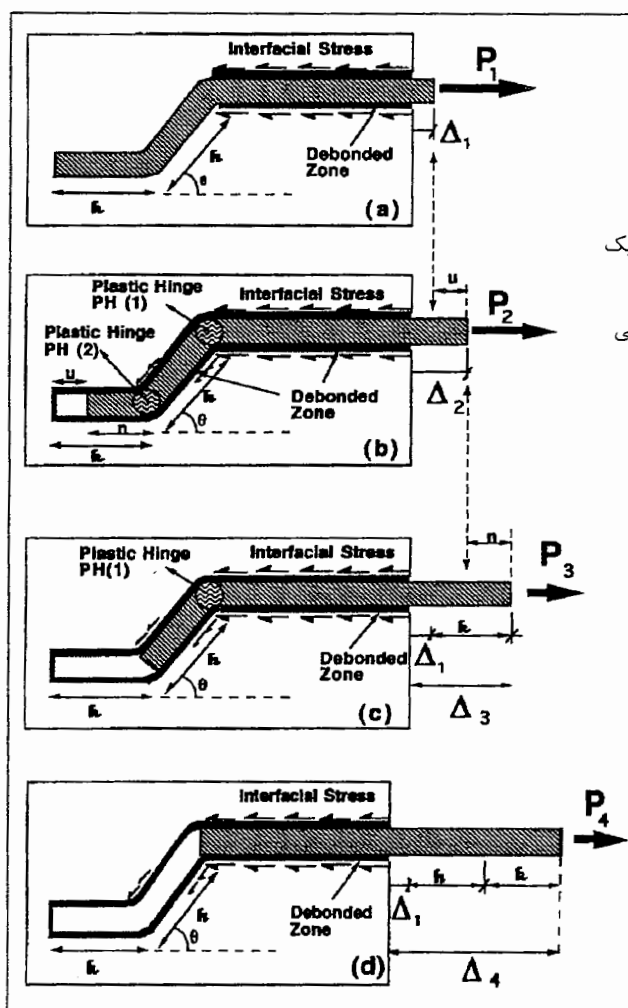


شکل ۴-۱۰- تاثیر مهار مکانیکی و اصطکاک در مقاومت بیرون کشیدگی الیاف قلابدار [۳۳]

با توجه به مطالب بخش قبل، بیرون کشیده شدن الیاف صاف شامل سه مرحله است. ۱-مرحله الاستیک (قبل از Δ_{crit})، ۲-جداشدگی جزئی (بین Δ_{crit} و Δ_0) و ۳-جداشدگی کامل الیاف و بیرون کشیدگی اصطکاکی. در مورد الیاف قلابدار دو مرحله اول (مرحله الاستیک و جداشدگی جزئی) بخوبی مطابق با الیاف صاف است. ولی قبل از فرا رسیدن مرحله سوم (بیرون کشیدگی اصطکاکی) مرحله مهار مکانیکی قلاب انتهایی فرا می رسد. در این مرحله الیاف شروع به تغییر شکل و حرکت در ماتریس می کند. تغییر شکل اعمال شده در الیاف باعث ایجاد مفصل پلاستیک می شود و در حین بیرون کشیدگی الیاف این مفاصل پلاستیک جابجا خواهند شد. برای مثال در شروع مرحله مذکور دو مفصل پلاستیک ایجاد می شود و بعد از مقدار مشخصی بیرون کشیدگی یک مفصل پلاستیک حذف شده و تنها یک مفصل پلاستیک باقی می ماند. ایجاد مفصل پلاستیک باعث افزایش مقاومت الیاف در مقابل بیرون کشیده شدن می شود. شکل ۴-۱۱ مدل پیشنهادی Naaman را نشان

۲ - Grease (Liquid Wax)

می دهد. مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از مطابقت خوب نتایج این مدلسازی با نتایج آزمایش می باشد [۲۵].



شکل ۴-۱۱- مدل سازی مراحل بیرون کشیدگی الیاف فولادی قلابدار [۲۵]

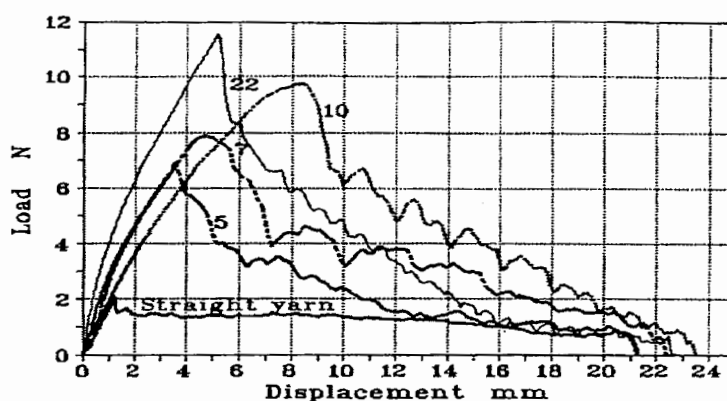
(a) شروع جداسازی الیاف از ماتریس
 (b) لغزش الیاف و تشکیل دو مفصل پلاستیک
 (c) حذف یک مفصل پلاستیک
 (d) جداسازی کامل الیاف و بیرون کشیدگی اصطکاکی

۴-۸-۳- الیاف مجعد^۱:

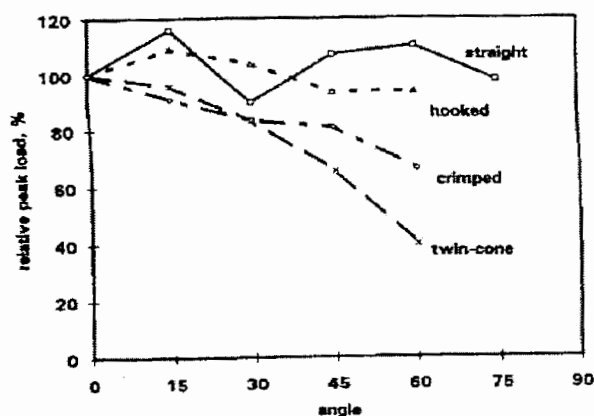
مقاومت الیاف مجعد و انرژی جذب شده در حین بیرون کشیده شدن از ماتریس تابعی از طول و ارتفاع موجها می باشد. اگر طول موج کم و یا ارتفاع موجها زیاد باشد علیرغم افزایش مقاومت بیرون کشیدگی، انرژی جذب شده (شکل پذیری) کاهش پیدا کرده و امکان گسیختگی الیاف یا ماتریس اطراف آن وجود دارد (شکل ۴-۱۲).

^۱ - Crimped Fiber

شکل ۴-۱۳ تاثیر زاویه تمایل در مقاومت بیرون کشیدگی الیاف های فولادی مختلف را نشان می دهد. مشاهده می شود که الیاف فولادی مجعد نسبت به قلابدار حساسیت بیشتری در برابر افزایش زاویه تمایل از خود نشان می دهند [۳۳].



شکل ۴-۱۲ رفتار بیرون کشیدگی الیاف مجعد (اعداد روی نمودار نشان دهنده تعداد موج در هر سانتی متر می باشند) [۳۳]



شکل ۴-۱۳ تاثیر زاویه تمایل در مقاومت بیرون کشیدگی الیاف های فولادی مختلف [۳۳]

۴-۴-۸-۴ الیاف پیچیده^۱:

استفاده از الیافی که رفتار سخت شدگی کرنش از خود نشان می دهند موثرترین روش برای دستیابی به HPRCC می باشد. الیاف با سطح مقطع غیر دایره ای که حول محور طولی خود

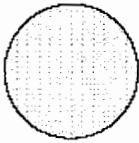
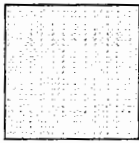
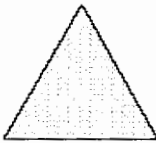
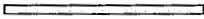
۱ - Twisted Fiber

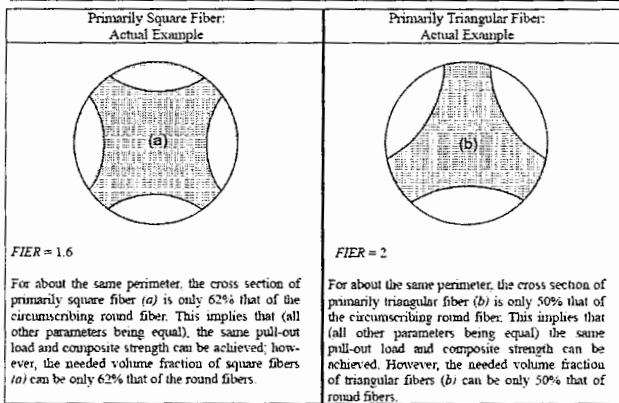
پیچیده شده اند از جمله این نوع الیاف می باشند. الیاف جدید بنام *Torex* نتیجه تحقیقات Naaman در دانشگاه Michigan می باشد. الیاف *Torex* از فولاد با مقاومت زیاد ساخته می شود. این الیاف طوری طراحی شده است که در هنگام بیرون کشیده شدن از ماتریس و با افزایش لغزش مقاومت آن افزایش پیدا می کند. آزمایشات انجام شده بر روی این نوع الیاف عملکرد بسیار خوب آن را نسبت به الیاف فولادی معمولی به اثبات رسانده است [۲۱].

مقاومت کششی کامپوزیت بعد از ترک خوردگی ماتریس بطور مستقیم با $FIER^1 = \frac{\psi \cdot L}{A}$ رابطه دارد [۲۱]. در این رابطه، ψ ، A و L به ترتیب محیط، سطح مقطع معادل و طول الیاف می باشند. بنابراین استفاده از الیاف با سطح مقطع غیر دایره ای به دلیل دارا بودن سطح تماس بیشتر در ازای سطح مقطع یکسان مقاومت بیرون کشیدگی بیشتری دارند. با توجه به شکل ۴-۱۴، FRC های ساخته شده از الیاف با سطح مقطع مربعی و مثلثی از نظر تنوریک به ترتیب دارای ۱۲٪ و ۲۸٪ مقاومت کششی بیشتر نسبت به الیاف با سطح مقطع دایره ای در نسبت حجمی یکسان هستند. به همین ترتیب الیاف a و b به ترتیب ۶۰٪ و ۱۲۰٪ موثرتر از الیاف دایره ای خواهند بود (شکل ۴-۱۴). روش متداول برای ایجاد مهار مکانیکی استفاده از الیاف قلابدار و مجعد می باشد. یکی دیگر از مؤثرترین روشها برای ایجاد مهار مکانیکی در الیاف فولادی پیچاندن آنها در امتداد طول می باشد، بطوری که شکل آنها بصورت پیچ یا مته شود. اینکار در مورد الیاف با مقطع غیر دایره ای به راحتی انجام می شود. این الیاف علاوه بر اینکه دارای مقادیر $\frac{\psi}{A}$ بالاتری نسبت به الیاف دایره ای هستند که باعث بهبود پیوستگی آنها با ماتریس می شود و در هنگام بیرون کشیده شدن از ماتریس ایجاد لنگر پیچشی می کنند و قابلیت نگهداری مقاومت بیرون کشیدگی را تا مقادیر زیاد لغزش دارا می باشند. آزمایشات انجام شده بر روی مصالح سیمانی مسلح شده با انواع مختلف الیاف نشان می دهد که

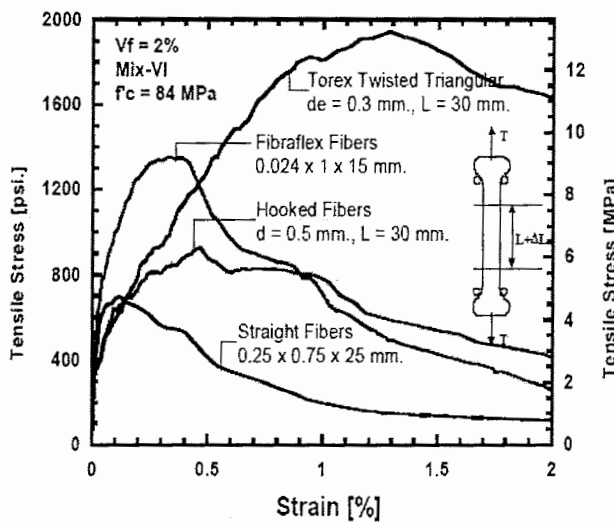
۲ - Fiber Intrinsic Efficiency Ratio

استفاده از الیاف *Torex* بهترین روش برای بهبود شکل پذیری و مقاومت کششی FRC می باشد (شکل ۴-۱۵).

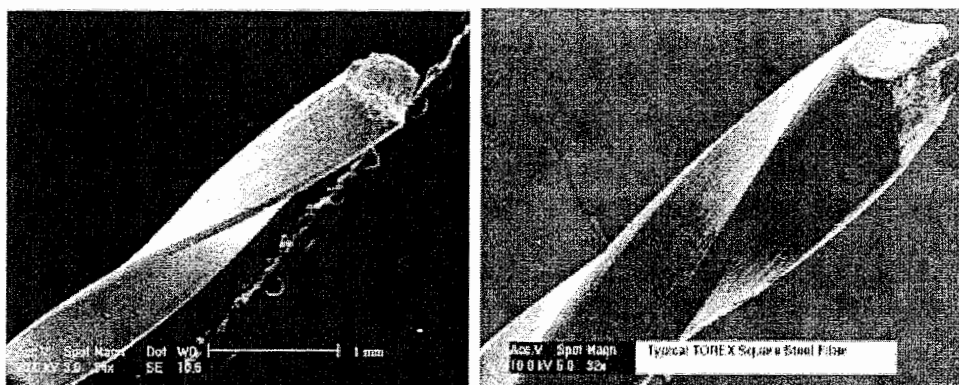
Section Shape				
Relative FIER	1	1.12	1.28	> 1.28



شکل ۴-۱۴- انواع الیاف *Torex* [۲۱]



شکل ۴-۱۵- مقایسه رفتار FRC های ساخته شده از الیاف فولادی مختلف، تحت تنشهای کششی مستقیم [۲۱]



شکل ۴-۱۶- الیاف Torex با سطح مقطع مربعی و مثلثی [۲۱]

۴-۵- معرفی چند HPFRCC :

۴-۵-۱- ECC^۱ :

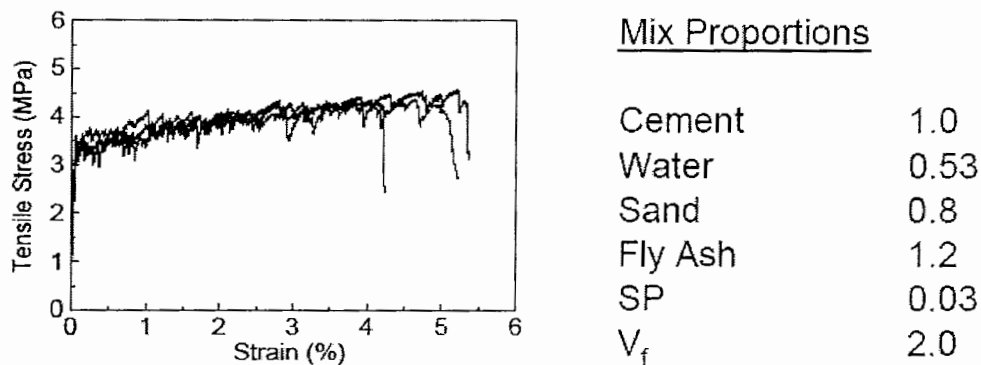
ECC نوعی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف پلیمری با شکل پذیری بسیار بالا (DFRCC)^۲ می باشد [۳۴]. در طراحی ECC برخلاف انواع معمولی FRC از علم مایکرومکانیک کمک گرفته شده است. به این معنی که اندرکنش بین الیاف و ماتریس و سطح تماس آنها برای دستیابی به خصوصیات مورد نظر با استفاده از مدل تئوریک بطور دقیق بررسی شده است [۳۶]. در مقایسه با بتن یا FRC معمولی که در آن خرابی با تشکیل یک ترک موضعی و گسترش آن ایجاد می شود، ECC دارای خاصیت منحصر بفردی می باشد که تحت تنشهای کششی، بعد از مرحله الاستیک، ترکهای متعدد با عرض و فاصله بسیار کم تشکیل می شود. این رفتار باعث تغییر شکل غیر خطی و جذب انرژی زیاد در حین خرابی عضو خواهد شد. مشخصه این مصالح سخت شدگی کرنش تحت تنشهای کششی مستقیم با ظرفیت کرنش ۳-۷ درصد می باشد و این درحالی است که مقدار الیاف کمتر از ۲٪ نگه داشته می شود [۳۵]. عرض ترکها بستگی به نوع الیاف و خصوصیات سطح تماس الیاف و ماتریس دارد. در زمانی که از الیاف PVA استفاده می شود در طی مرحله سخت شدگی کرنش عرض ترکها

۱ - Engineered Cementitious Composites (ECC)

۲ - Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites

در طول ناحیه کششی به $60 \mu m$ و فاصله ترکهای متوالی به $3 mm$ محدود می شود. عرض ترکها تا کرنش ۱٪ افزایش پیدا می کند و بعد از آن با افزایش کرنش به حالت نسبتاً پایدار باقی می ماند [۳۴]. شکل ۴-۱۷ رفتار ECC را تحت تنش کششی مستقیم نشان می دهد. این ماده با ظرفیت کرنش ۵٪ دارای جذب انرژی بیش از ۵۰۰ برابر بتن یا FRC معمولی می باشد [۳۶].

ECC نسبت به مصالح مشابه با هزینه کمتری قابل تولید است و از اینرو در کارهای حجیم قابل کاربرد می باشد [۳۶]. انواعی از ECC که دارای خاصیت خود متراکم شونده، بتن پاشی، زود سخت شونده و وزن کم هستند، قابل تولید می باشد.



شکل ۴-۱۷- رفتار ECC تحت تنشهای کششی مستقیم [۳۶]

۴-۵-۲- RPC^۱:

RPC نوعی بتن با مقاومت و شکل پذیری بسیار بالا و تخلخل پایین می باشد. اجزاء تشکیل دهنده آن، سیمان، میکروسیلیس، سنگدانه کوارتزی با دانه بندی $0.15-0.4 mm$ ، الیاف فولادی و فوق روان کننده، به همراه نسبت پایین آب به سیمان می باشد. استفاده از سنگدانه های ریز بمنظور کاهش ناهمگنی بین ماتریس سیمانی و سنگدانه می باشد. بهمین علت مقدار سیمان در این مصالح تا $1000 kg/m^3$ افزایش پیدا می کند [۲۶]. دانه بندی و نسبت حجمی اجزاء تشکیل دهنده RPC

۱ - Reactive Powder Concrete(RPC)

بنحوی می باشد که حداکثر نسبت مصالح خشک در واحد حجم و تراکم قابل دستیابی باشد. در RPC ذرات ماسه بزرگترین اندازه را دارا می باشند، بعد از آن دانه های سیمان با بعد $100-10\ \mu m$ و کوچکترین ذرات، میکروسلیس می باشند که اندازه آنها حدود $0.1\ \mu m$ است. اعمال فشار به مخلوط تازه بعد از قالب ریزی (در حالت تازه) و عمل آوری با آب گرم از دیگر عوامل افزایش مقاومت RPC می باشد [۲۶].

RPC دارای مقاومت فشاری $800-2000\ MPa$ ، مدول گسیختگی $140-250\ MPa$ ، انرژی شکست^۱ $30000-40000\ J/m^2$ و وزن مخصوص $2500-3000\ kg/m^3$ می باشد. کرنش کششی نهایی RPC، 0.007 و مدول الاستیسیته آن معمولاً $50\ GPa$ است که تا $75\ GPa$ قابل افزایش می باشد [۳۰، ۲۶، ۳۱]. مدول الاستیسیته این مصالح در نهایت با مدول الاستیسیته سنگدانه های کوارتز برابر بوده که این عامل باعث کاهش تأثیرات منفی اختلاف خصوصیات مکانیکی بین اجزاء تشکیل دهنده و سازگاری تغییر شکل آنها می شود. با افزودن الیاف فولادی ریز^۲، شکل پذیری RPC بهبود پیدا می کند و مدول گسیختگی آن تا $141\ MPa$ قابل افزایش است [۲۶]. با اعمال فشار به مخلوط در حالت تازه که باعث خارج شدن حبابهای هوا و آب و تراکم بیشتر آن و همچنین جبران نقطه ضعف بتن در اثر انقباض شیمیایی خمیر سیمان می شود و عمل آوری در دمای $400\ ^\circ C$ مقاومت فشاری تا $800\ MPa$ قابل افزایش است [۲۶].

RPC بعنوان یک UHPC^۳ دارای پتانسیل رقابت با فولاد در کاربردهای سازه ای می باشد. این مصالح در مقایسه با بتن معمولی و حتی HPC^۴ گرانقیمتر می باشند، ولی قیمت آنها در واحد حجم نسبت به فولاد بسیار پایینتر است. درحالی که مقاومت فشاری آن با فولاد برابری می کند. مقاومت بسیار بالا باعث کاهش ابعاد سازه و کاهش بار مرده و محدودیت در شکل ظاهری می شود. اعضای ساخته

۱- انرژی شکست متناسب است با سطح زیر منحنی تنش خمشی - تغییر مکان

۲- Fine Steel Fiber

۳- Ultra High Performance Concrete

۴- High Performance Concrete

شده از RPC بعلت وزن پایین و شکل پذیری بالا و جذب انرژی زیاد عملکرد خوبی در بارهای لرزه ای از خود نشان می دهند.

نقطه ضعف RPC وزن مخصوص بالای آن می باشد. با افزایش درصد میکروسیلیس علاوه بر اینکه وزن مخصوص را می توان تا 1900 kg/m^3 پایین آورد، مقاومت فشاری هم افزایش پیدا می کند. مصالح جدید^۱ LWRPC نامیده می شود [۲۶].

۴-۵-۳ SIFCON^۲:

SIFCON نوعی FRC با مقاومت و شکل پذیری بالا است که روش ساخت آن با انواع دیگر مصالح مشابه تفاوت کلی دارد. به این ترتیب که ابتدا الیاف فولادی به صورت کاملاً تصادفی در داخل قالب جای می گیرد و سپس ماتریس که خمیری با روانی و کارایی بسیار بالا است به داخل الیاف تزریق می شود. ممکن است کارایی ماتریس به حدی بالا است که ارتعاش خارجی برای جایگیری آن بین الیاف کافی می باشد.

SIFCON علاوه بر روش ساخت آن دو تفاوت کلی با دیگر FRC ها دارد [۶]:

- درصد حجمی الیاف که معمولاً بین ۸-۱۲ درصد می باشد و در موارد خاص تا ۲۵٪ هم استفاده می شود.

- حجم مصالح سیمانی در ماتریس بسیار بالا است و در صورت نیاز از سنگدانه با دانه بندی بسیار ریز استفاده می شود.

نسبت وزنی سیمان، خاکستر بادی و سنگدانه در SIFCON بین ۹۰/۱۰/۰ و ۳۰/۲۰/۵۰ متغیر است و با استفاده از فوق روان کننده، نسبت آب به سیمان به ۰/۲ تا ۰/۴۵ می رسد [۱۷].

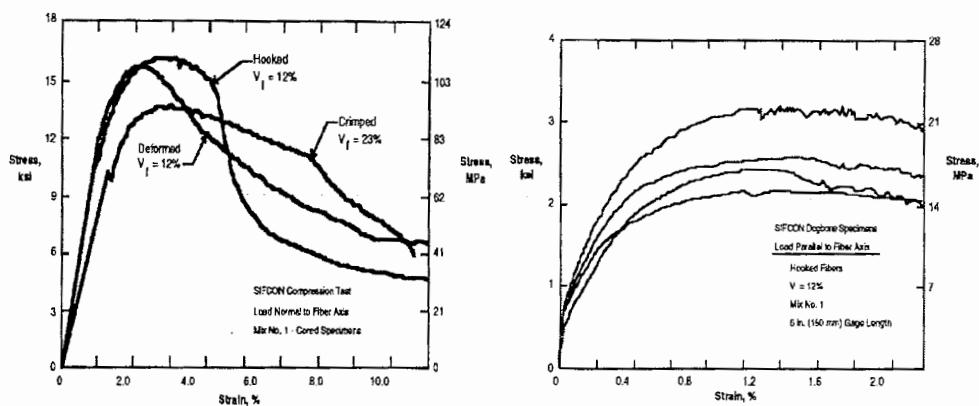
بطور خلاصه خصوصیات مکانیکی SIFCON را می توان به این صورت بیان کرد [۳۴،۶]:

۱ - Light Weight Reactive Powder Concrete

۲ - Slurry Infiltrated Fiber Concrete

- مقاومت فشاری 210 MPa .
- میزان جذب انرژی (سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان در آزمایش خمش) به بیش از ۱۰۰۰ برابر ماتریس مسلح نشده می رسد.
- میزان جذب انرژی (سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان در آزمایش فشار) به بیش از ۵۰ برابر ماتریس مسلح نشده و ظرفیت کرنش آن به ۱۰٪ می رسد.
- مقاومت کششی 41 MPa و ظرفیت کرنش کششی ۲٪ گزارش شده است.
- مدول گسیختگی به 90 MPa می رسد.

SIFCON به دلیل حجم بالای الیاف یک مصالح گرانیقیمت نسبت به انواع دیگر FRC می باشد. از اینرو در مواردی که مقاومت و شکل پذیری بالا مورد نیاز است، مانند سازه های ضد انفجار و سازه هایی که در معرض ضربه های شدید هستند، قابل کاربرد می باشد. شکل ۴-۱۸ نمودار تنش-کرنش SIFCON در حالت کشش و فشار را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۸- نمودار تنش - کرنش SIFCON در حالت کشش و فشار [۶]

۴-۵-۴ - CARDIFRC® [۳۲]:

CARDIFRC® نوعی بتن مسلح به الیاف با مقاومت کششی و شکل پذیری بالا می باشد. دانه بندی سنگدانه ها در این مصالح به گونه ای تغییر داده شده که با وجود حجم بالای الیاف و نسبت آب به سیمان پایین کارایی مخلوط مناسب است. در CARDIFRC® از دو نوع الیاف فولادی با قطر 0.16 mm و طولهای 6 mm و 13 mm استفاده می شود. الیاف از جنس فولاد با روکش برنج^۱ می باشد تا از خوردگی آنها جلوگیری شود.

دو نمونه از طرح اختلاط CARDIFRC® به همراه خصوصیات مکانیکی آن در جدول ۴-۲ ارائه شده است. این مصالح دارای ۶ درصد حجمی الیاف فولادی می باشد. MIX I حاوی ۵٪ الیاف کوتاه و ۱٪ الیاف بلند و MIX II حاوی ۴/۵٪ الیاف کوتاه و ۱/۵٪ الیاف بلند می باشد. عمل آوری نمونه ها به مدت ۷ روز در آب 90°C صورت گرفته است که در نهایت مقاومت آنها معادل ۲۸ روز عمل آوری در شرایط استاندارد (دمای 20°C) می باشد. مدول الاستیسیته CARDIFRC® برابر 50 GPa و مقاومت کششی مستقیم آن در حدود $12-13/5\text{ MPa}$ است. شکست CARDIFRC® تحت تنشهای کششی مستقیم همراه با شکل گیری ترکهای متعدد بصورت موازی می باشد.

۴-۶- مقایسه انواع HPFRCC :

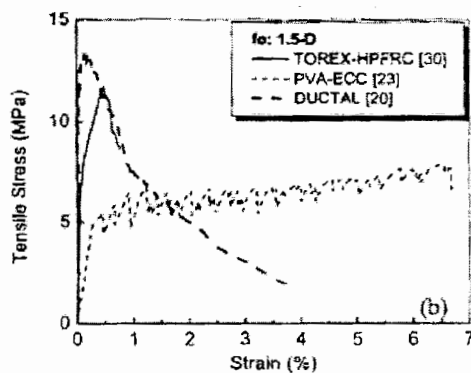
جدول ۴-۳ شامل اطلاعات مختصری درباره خصوصیات مکانیکی هشت نوع HPFRCC تحت تنشهای کششی مستقیم می باشد [۲۷]. انواع مختلف HPFRCC دارای مقاومت و شکل پذیری متفاوت می باشند. به عنوان مثال Ductal و Torex HPFRCC دارای مقاومت بالا و شکل پذیری پایین و ECC دارای مقاومت پایین و شکل پذیری بالا هستند. ECC و Ductal هر دو دارای ۲٪ الیاف می باشند. مقاومت Ductal در کشش ۳-۲ برابر و در فشار ۵-۲ برابر ECC می باشد، درحالی

۱ - Brass Coated

kg/m ²	MIX 1	MIX 2
cement	855	744
microsilica	214	178
Quartz sand		
9-300 μ m	470	166
250-600 μ m	470	--
212-1000 μ m	--	335
1-2mm	--	672
Water	188	149
Superplasticizer	28	55
Fiber: -6mm	390	351
-13mm	78	117
water/cement	0.22	0.2
water/binder	0.18	0.16
Indirect tensile strength(MPa)	24	25
Fracture energy(J/m ²)	17000	21000
Compressive strength(MPa)	207	185

جدول ۲-۴- طرح اختلاط و خصوصیات مکانیکی CARDIFRC[®] [۳۲]

که شکل پذیری ECC حدود ۱۰ برابر Ductal است (شکل ۴-۱۹ و جدول ۴-۳). هر کدام از این مصالح دارای کاربردهای متفاوت هستند. به عنوان مثال Ductal در مواردی که ظرفیت باربری و سختی زیاد در ناحیه الاستیک مورد نظر است، مناسب می باشد و ECC در مواردی که عضو در معرض تغییرشکل غیرخطی زیاد می باشد مورد استفاده قرار می گیرد. در نواحی اتصال اعضای فولادی به بتن و یا نواحی اتصال دالهای بتنی در پلها که ظرفیت کرنش بالا مورد نیاز است به دلیل ترد بودن بتن می توان از ECC استفاده کرد.



شکل ۴-۱۹- نمودار تنش - کرنش HPFRCC ها تحت تنش کششی مستقیم [۲۷]

در مطالعه جدول ۳-۴ پارامتر f_0 (زاویه تمایل الیاف نسبت به جهت اعمال تنشهای کششی) باید مورد توجه قرار گیرد. زاویه تمایل تابعی از طول الیاف و ابعاد نمونه می باشد. هرچه f_0 کمتر باشد خصوصیات مکانیکی گزارش شده نسبت به حالت واقعی به طور مجازی بیشتر خواهد بود. یکی دیگر از موارد مهم در جدول ۳-۴ روش ساخت و عمل آوری^۲ می باشد. در انتخاب نوع HPFRCC برای کاربردهای عملی به این نکته باید توجه شود.

۴-۷- کاربردهای HPFRCC :

۴-۷-۱- اندرکنش HPFRCC و آرماتور در اعضای بتن مسلح :

در این بخش به بررسی تأثیر الیاف بر رفتار اعضای سازه ای تحت بارهای کششی و خمشی پرداخته می شود. مصالح مورد بررسی در این بخش از نوع HPFRCC می باشد، که رفتار سخت شدگی کرنش و ترکهای متعدد را تحت بارهای کششی تک محوری از خود نشان می دهد و ظرفیت کرنش نهایی بالایی دارد. در اعضای متشکل از ECC که با میلگرد فولادی مسلح شده اند به علت ماهیت شکل پذیر ECC و همچنین میلگردها رفتار سازه ای نسبت به اعضای بتن مسلح معمولی بهبود پیدا می کند. تفاوت رفتار اعضای R/ECC^3 و R/C^4 با مقایسه آنها در آزمایش کشش مشخص می شود (شکل ۴-۲۰).

ایجاد اولین ترک در اعضای R/C سبب بازتوزیع تنشها در ماتریس و میلگرد می شود. از آنجا که در مقطع ترک خورده ماتریس قادر به انتقال تنشهای کششی نیست، در نتیجه تنشها از ماتریس به میلگرد منتقل شده و در محل ترک تمام نیرو توسط میلگرد تحمل می شود. به علت تمرکز تنش ایجاد شده در میلگرد در نزدیکی ناحیه ترک خورده، میلگرد و همچنین ماتریس کرنشهای نسبتاً

۱ - Fiber Orientation

۱ - Processing Route

۲ - Reinforced Engineered Cementitious Composite

۳ - Reinforced Concrete

Material	σ_f (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)	E (GPa)	σ_c (MPa)	ϵ_c (%)	MC ?	cs (mm)	gl (mm)	w (μ m)	V_f (%)	d_f (μ m)	L_f (mm)	Specimen shape	x-sect (mm x mm)	f_o	Processing Route
Cardifrc	NR	10-15	NR	50	207	NR	NR	NR	NR	NR	6	160	6 (5% V_f) 13 (1% V_f)	Dog bone	100 x 35 ^a	3D	Casting
Densit-CRC	6-7	14	0.08 ^b	46	140	NR	NR	NR	NR	NR	6	400	12	Notched dumbbell	Dia. 40	3D	Casting
Ductal	11.5	12.2	0.06 ^c	58.0	160-240	0.39	Y	NR	150	NR	2.0	200	13-15	Prism	70 x 70	3D	Casting
Ductal (Taiheiyō)	10.3	13.6	0.3 ^d	NR	>200	NR	Y	NR	100	NR	2.0	200	15	Dog bone	50 x 10	1.5D	Casting, cured at 90 °C
PE-ECC	4.5	6.0	3.8	22	80	0.5	Y	4.1	120	150	1.5	39	19	Dog bone	78 x 43	2.5D	Normal casting
	3.5	6.5	4.0	23	78	0.45	Y	1.0	180	60	2.0	40	12	Plate	76 x 13	2D	Self-compacting
PVA-ECC	4.5	7.0	6.7	NR	NR	NR	Y	NR	80	NR	2.0	40	12	Dumbbell	30 x 13	1.5D	Normal casting
	2.8	4.2	2.1	14.6	31.5	0.47	Y	NR	100	NR	1.9	40	12	Prism	100 x 100	3D	Normal casting
	3.0	4.8	4.1	19.4	47.7	0.45	Y	NR	80	NR	2.0	40	12	Dog bone	30 x 13	1.5D	Sprayed
SIFCON	7	14	1.3 ^e	26.9	60-210	0.7-2.6	N	-	113	No MC	7	500	50	Dog bone	51 x 19	1.5D ^f	
	NR	15.6	1.25	45.8	56-120	0.8-1.5	NR	NR	152.4	NR	12	500	30	Dog bone	76 x 38	1.5D ^g	Slurry infiltration
SIMCON	NR	16.0	1.12	20.4	NR	NR	Y	NR	108	NR	5.4	334	241	Plate	76 x 32	1-1.5 D	
Torex-	2.5	13.4	1.3	NR	84	NR	Y	7.7	75	NR	2.0	300	30	Dog bone	25 x 25	1-1.5 D	
HPFRC	2.5	11.7	0.46	NR	84	NR	Y	9.0	200	NR	2.0	300	30	Plate	50 x 12.5	1.5 D	Casting

σ_f = first crack strength, σ_u = ultimate tensile strength, ϵ_u = ultimate tensile strain, E = Young's modulus, σ_c = compressive strength, ϵ_c = compressive strain, MC = multiple cracking, cs = crack spacing, gl = gage-length, w = crack width at peak load, V_f = fiber content, L_f = fiber length, x-sect = specimen cross-section, fo = fiber orientation; NR = not reported, Y = yes, N = no, D = dimension.

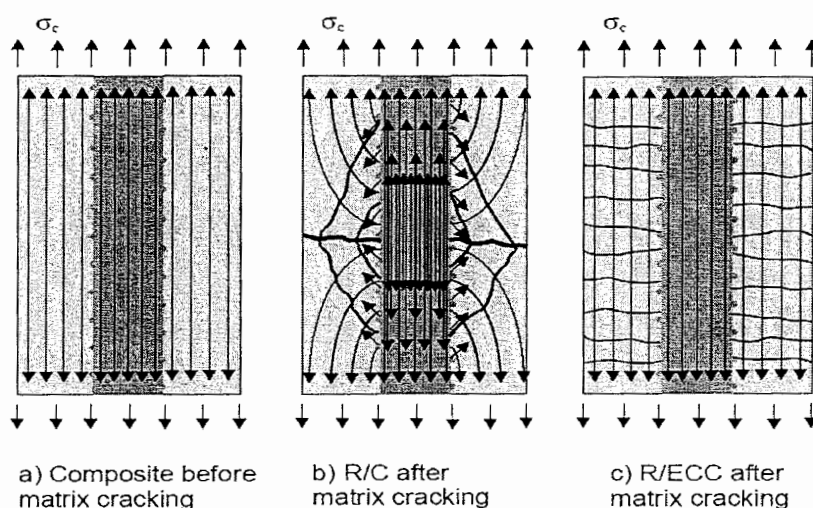
جدول ۳-۴ انواع HPRFRC و خصوصیات مکانیکی آنها [۲۷]

زیادی متحمل می شوند و این عامل باعث ایجاد لغزش بین ماتریس و میلگرد می شود. در نتیجه این عوامل اتصال ماتریس و میلگرد از بین می رود و ترکها از سطح تماس میلگرد و ماتریس شروع می شوند و بصورت مایل رشد پیدا می کنند. همچنین در اثر لغزش میلگرد (آجدار) تنشهای جانبی ایجاد می شود که باعث تخریب ماتریس اطراف آن خواهد شد.

شکل پذیری ماتریس ECC باعث کاهش ناسازگاری تغییرشکلها بین میلگرد و ماتریس می شود. اعضای R/ECC متشکل از دو ماده با رفتار الاستوپلاستیک و مقاومت متفاوت می باشند. به همین دلیل این اعضا در ناحیه الاستیک و پلاستیک بصورت سازگار تغییر شکل می دهند. بعد از شروع ترک در ماتریس ECC توزیع تنش بدون تغییر باقی می ماند چراکه ماتریس هنوز توانای تحمل تنش کششی را دارد. به همین دلیل بین ماتریس ECC و میلگرد جداسدگی ایجاد نمی شود. جاری شدن آرماتورها آخرین مرحله تغییر شکل اعضای R/ECC می باشد. با توجه به اینکه رفتار هر دو مصالح ECC و میلگرد بصورت سخت شدگی کرنش می با شد حتی در حالت پلاستیک نیز تغییر شکل آنها بصورت موضعی و در یک مقطع خاص ایجاد نمی شود و تغییر شکل آنها سازگار است. ترک در اعضای R/ECC در سراسر نمونه توزیع می شود و به علت اینکه حجم زیادی از عضو بصورت پلاستیک تغییر شکل می دهد جذب انرژی بهبود قابل توجهی پیدا می کند. ماتریس ECC به علت انعطاف پذیری و ظرفیت کرنش زیاد حتی در تغییرشکلهای زیاد خاصیت باربری خود را حفظ می کند.

انعطاف پذیری اعضای بتن مسلح بطور غیرمستقیم به مقدار و چگونگی تقویت آنها با آرماتورهای عرضی وابسته است. این آرماتورها باعث محدود کردن هسته بتن و افزایش مقاومت برشی مقطع می شوند و همچنین از کماتش آرماتورهای طولی در هنگام اعمال بار جلوگیری می کنند. نارسایی اعضای بتن مسلح مانند لغزش آرماتورها، پوسته شدن پوشش بتن، تخریب برشی اعضا، شکست ترد بتن تحت فشار و کماتش آرماتورهای طولی با افزودن آرماتورهای عرضی و محدود کردن بتن تحت

فشار قابل جبران است. از طرف دیگر با افزایش آرماتور عرضی در مقاطع بحرانی سازه از قبیل مفاصل پلاستیک و گره ها مشکلات جدیدی ایجاد می شود. چراکه تأمین آرماتور عرضی لازم در این مناطق باعث تراکم بیش از حد و دشواری عملیات بتن ریزی و مسائل متعدد دیگر خواهد شد. از این گذشته هنوز مشکلات ذاتی استفاده از اعضای R/C بجای خود باقی است (تغییر شکل ترد بتن، اندرکنش بتن و میلگرد و از بین رفتن اتصال بتن و میلگرد). در مقایسه با اعضای R/C، اعضای R/ECC بعد از ایجاد ترک موضعی دارای قدرت محدود کنندگی بیشتر و مقاومت بیشتر در برابر پوسته شدن و لغزش آرماتورها هستند.



شکل ۴-۲۰- شکل گیری ترک و توزیع تنش در اعضای R/C و R/ECC [۲۴]

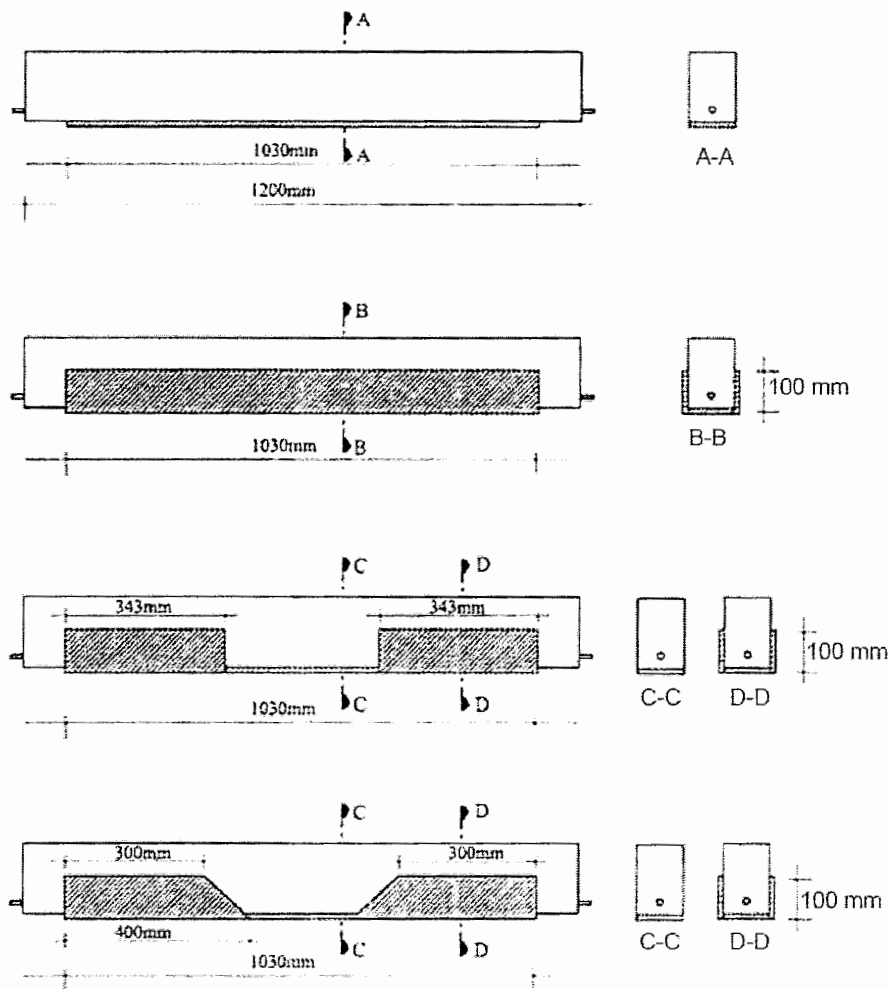
۴-۷-۲- ترمیم سازه های بتنی با استفاده از HPFRCC :

ترمیم سازه های بتنی با استفاده از HPFRCC ها یکی از جدیدترین کاربردهای این مصالح بشمار می رود. HPFRCC ها از نظر فیزیکی و مکانیکی از جمله سازگارترین مصالح با بتن محسوب می شوند. روشهای مرسوم برای ترمیم سازه های بتنی استفاده از پلیتهای فولادی یا ورقه های FRP^۱

۱ - Fiber Reinforced Plastic

می باشد که به دلیل سرعت اجرا و دارا بودن ضخامت کم رواج زیادی پیدا کرده اند. مشکل عمده این روشها اختلاف مقاومت کششی و سختی آنها یا به طور کلی ناسازگاری با بتن می باشد.

استفاده از CARDIFRC® روش منطقی برای ترمیم و مقاوم سازی تیرهای بتن آرمه و بهبود رفتار برشی و خمشی و همچنین خدمت پذیری این سازه ها می باشد [۳۰،۳۲]. در این روش ورقه های پیش ساخته CARDIFRC® به وجه کششی و در صورت لزوم به وجوه دیگر تیر چسبانده می شوند (شکل ۴-۲۱). اطمینان از تخریب تدریجی تیرها در مود خمشی، بدون جداشدگی مصالح ترمیم و لایه بتن قبلی از دیگر مزایای این روش می باشد. CARDIFRC® بدلیل متراکم بودن ساختار آن مصالحی با دوام می باشد و از آن می توان به منظور بهبود دوام سازه های بتن مسلح استفاده کرد.



شکل ۴-۲۱- ترمیم و مقاوم سازی تیرهای بتن مسلح با استفاده از ورقه های HPFRCC [۳۱]

۴-۷-۳- میراگرهای HPFRCC [۲۸]:

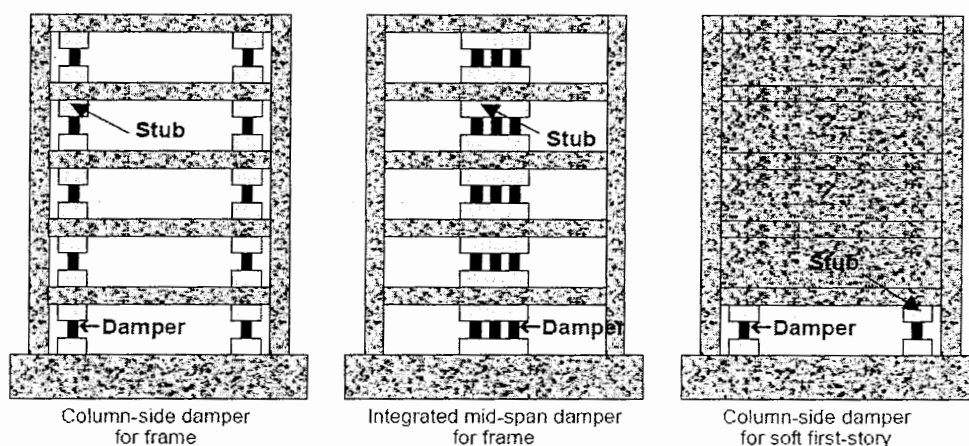
خصوصیات ممتاز HPFRCC به همراه تولید آسان و اقتصادی نسبت به مصالح سازه ای دیگر موجب گسترش کاربرد آن شده است. یکی دیگر از کاربردهای نوین HPFRCC ها ساخت میراگر به منظور کنترل عملکرد لرزه ای سازه های بتنی می باشد (شکل ۴-۲۲). میراگرهای HPFRCC بصورت ستونهای کوتاه در نقاط مناسب نصب می شوند. طول کم میراگرها باعث افزایش سختی و جذب

۱ - HPFRCC Damper

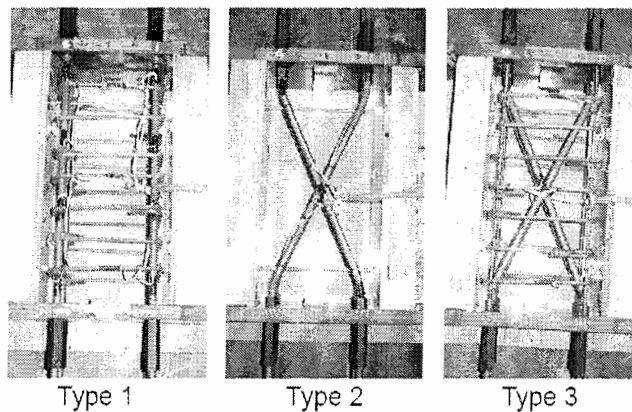
انرژی زیاد در تغییر مکانهای کم خواهد شد. مقاومت، سختی و شکل پذیری این میراگرها را می توان با تغییر در شکل و خصوصیات اجزاء تشکیل دهنده، تغییر داد و طراحی آنها با توجه به نوع سازه انجام می شود.

میراگرهای HPFRCC با هزینه بسیار کمتری نسبت به میراگرهای دیگر قابل ساخت و نصب هستند. در این سیستم ترکیب HPFRCC و میلگرد فولادی باعث افزایش قابل ملاحظه جذب انرژی می شود (شکل ۴-۲۳). در هنگام دوران (تغییر شکلهای جانبی) تنشهای فشاری زیادی به این میراگرها وارد می شود. ویژگی منحصر بفرد آنها تحمل تنشهای فشاری و بخشی از بارهای قائم می باشد.

به منظور بررسی عملکرد لرزه ای و مکانیزم خرابی، میراگرهای HPFRCC بصورت همزمان تحت بارگذاری سیکلی قائم و جانبی قرار گرفته اند. آزمایشات نشان می دهند که این میراگرها حتی در زمانی که در اثر دوران تنشهای فشاری زیادی به آنها وارد می شود، شکل پذیری بالایی از خود نشان می دهند و قادر به تحمل تنشهای برشی 6 mpa و رانش ۱۰٪ می باشند.



شکل ۴-۲۲- نحوه کاربرد میراگرهای HPFRCC در سازه های بتن مسلح [۲۸]



شکل ۴-۲۳- آرایش میلگردها در
میراگر HPFRCC [۲۸]

۴-۸- نتیجه گیری :

بمنظور بهبود عملکرد مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف دو پارامتر مقاومت کششی و انرژی شکست باید تا حد امکان افزایش یابند. مقاومت نظیر شروع اولین ترک در آزمایش خمش و رفتار سخت شدگی کرنش نیز از دیگر خصوصیات HPFRCCها می باشد.

افزایش درصد الیاف و مقاومت پیوستگی الیاف به ماتریس باعث بهبود مقاومت نظیر اولین ترک در ماتریس نسبت به حالت بدون الیاف خواهد شد. در صورت استفاده از الیاف با مدول الاستیسیته پایین مانند پلی پروپیلن امکان افزایش مقاومت نظیر اولین ترک وجود ندارد. کاهش فاصله و قطر الیاف نیز مقاومت اولین ترک را به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می دهد.

افزایش نسبت حجمی و نسبت ظاهری الیاف باعث افزایش مقاومت کششی و انرژی شکست می شود. کاهش قطر و ایجاد تغییر شکل در الیاف تاثیر زیادی در رفتار HPFRCC بعد از ترک خوردگی ماتریس و مرحله سخت شدگی کرنش خواهد داشت. الیاف مجعد بدلیل برقراری اتصال قوی با ماتریس سیمانی و جذب انرژی زیاد در اثر بیرون کشیده شدن از ماتریس نسبت به انواع دیگر الیاف تغییر شکل یافته موثرتر است. مقاومت الیاف مجعد و انرژی جذب شده در حین بیرون کشیده شدن از ماتریس تابعی از طول و ارتفاع موجها می باشد.

کاهش قطر الیاف و استفاده از میکروسیلیس باعث متراکم شدن ITZ و بهبود مقاومت پیوستگی الیاف و ماتریس سیمانی خواهد شد. در ماتریسهای حاوی میکروسیلیس به علت پدیده خود انقباضی، مقاومت بیرون کشیدگی الیاف بیشتر می باشد.

مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن از ماتریس ناشی از دو عامل اصطکاک و مهار مکانیکی می باشد. اصطکاک با افزایش لغزش تا حد زیادی از بین می رود، ولی مهار مکانیکی ناشی از هندسه الیاف و ایجاد تغییر شکل در آنها می باشد که بعد از جداسازی الیاف از ماتریس و بعد از لغزش اندکی فعال شده و بسته به کیفیت مهار تا تغییر شکلهای زیاد مقاومت خود را حفظ می کند. در صورت استفاده از الیاف شکل پذیر مانند فولاد با افزایش زاویه تمایل، مقاومت بیرون کشیدگی افزایش پیدا می کند.

از آنجایی که مقاومت و کارایی ماتریس از عوامل تاثیر گذار در خصوصیات بتن الیافی می باشند، لذا در فصل پنجم بتن با مقاومت زیاد و کارایی مناسب به عنوان ماتریس بتن الیافی معرفی می شود. در این فصل عوامل موثر در مقاومت فشاری بتن بررسی می شوند. سپس توضیحات مختصری درباره اجزاء تشکیل دهنده بتن مقاومت بالا و همچنین خصوصیات این مصالح ارائه می شود. در پایان این فصل چند نوع بتن با مقاومت بسیار بالا معرفی خواهد شد.

فصل پنجم

بتن با مقاومت زیاد

۵-۱- مقدمه :

مقاومت ماتریس عامل بسیار موثری در بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی FRC می باشد و رفتار کلی کامپوزیت بستگی به برقراری تعادل بین سختی ماتریس و الیاف دارد. بطور کلی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی FRC وابسته به خصوصیات الیاف، ماتریس و سطح تماس آنها می باشد.

مقاومت فشاری FRC به مقدار کمی تحت تأثیر وجود الیاف قرار می گیرد. تأثیر الیاف در افزایش مقاومت کششی و شکل پذیری FRC است و این خصوصیات نیز بستگی به مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن از ماتریس و برقراری تعادل بین خصوصیات مکانیکی الیاف و ماتریس دارد. افزودن میکروسیلیس به بتن های الیافی باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی الیاف خواهد شد.

وجود الیاف کاهش قابل ملاحظه ای در محدود کردن کرنشهای ناشی از خزش در اعضای فشاری ایجاد نمی کند و تأثیر آنها در مقاومت بتن در مقابل یخ زدن و ذوب شدن نیز قابل ملاحظه نمی باشد. در حقیقت مهمترین عامل در افزایش مقاومت بتن در برابر یخ زدن و ذوب شدن متوالی ساختار مناسب حفره های هوا در ماتریس می باشد و در این مورد FRC تفاوت قابل ملاحظه ای بتن نخواهد داشت.

درمقایسه با بتن معمولی، مخلوط FRC دارای نسبت آب به سیمان بالاتر، درصد سنگدانه ریز بیشتر می باشد. در مخلوط FRC از مواد پوزولانی و افزودنی های شیمیایی مرسوم بمنظور کاهش مقدار آب و کنترل کارایی و جمع شدگی نیز استفاده می شود. هرچه مقاومت فشاری بتن بیشتر باشد، تراکم آن بیشتر است. چنین بتنی با نسبت آب به سیمان پایین، دارای نفوذپذیری کمی است و خوردگی الیاف محدود به سطح بتن می شود.

۵-۲- تعریف بتن با مقاومت زیاد :

در حال حاضر کاربرد بتن با مقاومت^۱ (HSC) بالا گسترش زیادی پیدا کرده و در بسیاری از کشورها از این مصالح استفاده می شود. تا آنجاکه ساخت بسیاری از سازه ها بدون استفاده و دستیابی به این مصالح امکانپذیر نیست. در سالهای اخیر بتن هایی با مقاومت فشاری نزدیک به 138 MPa در اروپا و آمریکا بصورت درجا برای ساخت سازه های بلند مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱].

بر اساس تعریف ACI 363 بتن های با مقاومت فشاری 41 MPa و بیشتر در صورتی که در ساخت آنها از مصالح یا تکنیکهای غیر معمول و ناشناخته و مصنوعی استفاده نشود به عنوان بتن با مقاومت بالا شناخته می شود. اگرچه بتن با مقاومت بالا به عنوان مصالح جدید شناخته می شود، ولی گسترش آن بصورت تدریجی و در طی سالیان متمادی ایجاد شده و تعریف آن به مرور زمان تغییر پیدا کرده است. جدول ۵-۱ طبقه بندی بتن های با مقاومت بالا را نشان می دهد [۱۷].

Parameter	High Strength	Very High Strength	Ultrahigh Strength
Strength [psi (MPa)]	6000–14,500 (42–100)	14,500–21,750 (100–150)	> 21,750 (150)
W/(C + P) ratio	0.45–0.30	0.30–0.24	< 0.24
Chemical admixture ^a	WRA/HRWR	HRWR	HRWR
Mineral admixture	Fly ash or combined with SF	Silica fume ^b	Silica fume ^b
Permeability coefficient (cm/s)	10^{-11c}	10^{-12}	< 10^{-14}
Freeze–thaw protection	Air entrainment	Air entrainment	No freezable water

^aWRA, water-reducing agent; HRWR, high-range water reducer (superplasticizer).

^bMay also contain fly ash.

^cCoefficient for normal-strength concrete = 10^{-10} .

جدول ۵-۱- طبقه بندی بتن های با مقاومت بالا [۱۷]

۵-۳- عوامل موثر در مقاومت فشاری بتن :

اگرچه طرح اختلاط مناسب مهمترین عامل برای دستیابی به مقاومت مورد نظر می باشد، ولی پارامترهای مهم دیگری برای افزایش مقاومت بتن باید در نظر گرفته شود. معمولا بتن مقاومت بالا دارای سنگدانه های قوی تر، مقدار سیمان بیشتر و نسبت آب به سیمان کمتر می باشد. برای دستیابی به بتن مقاومت بالا، مقاومت سنگدانه ها باید حداقل برابر خمیر سیمان باشد. استفاده از فوق روان کننده و مواد پوزولانی نیز رواج زیادی پیدا کرده است.

اصول کلی برای افزایش مقاومت بتن، متراکم کردن ماتریس سیمانی تا حد امکان و ایجاد ناحیه انتقال قوی بین سنگدانه ها و خمیر سیمان می باشد. افزایش یکنواختی بتن با حذف سنگدانه های درشت و استفاده از مواد پوزولانی مخصوصا میکروسیلیس از دیگر روشهای افزایش مقاومت بتن می باشند.

بطور کلی به منظور افزایش مقاومت فشاری بتن عوامل اصلی زیر باید در نظر گرفته شود:

- کیفیت و مقدار سیمان.
- نسبت آب به مصالح سیمانی.
- کیفیت سنگدانه ها و اندرکنش سنگدانه ها و خمیر سیمان.
- استفاده از افزودنی های شیمیایی و معدنی.
- روند و مدت زمان اختلاط مصالح (روش ساخت بتن).
- عمل آوری در دمای بالا که باعث بهبود ساختار خمیر سیمان می شود.
- کنترل کیفیت مصالح تشکیل دهنده و محصول نهایی (بتن).

بطور خلاصه این عوامل مقاومت خمیر سیمان و سنگدانه ها، و اندرکنش بین سنگدانه ها و کیفیت اتصال سنگدانه ها و خمیر سیمان را تحت تاثیر قرار می دهند.

۴-۵- مصالح تشکیل دهنده بتن مقاومت بالا :

معمولا بتن مقاومت بالا علاوه بر سیمان، مصالح سنگی و آب، شامل فوق روان کننده و ترکیبات سیمانی تکمیلی نیز می باشد که مجموعا افزودنی های بتن را تشکیل می دهند. تولید بتن مقاومت بالا که بطور همزمان باید دارای کارایی و مقاومت بالاتری نسبت به بتن با مقاومت پایین تر باشد، نیازمند ایجاد شرایط و بکارگیری مواد اولیه خاص می باشد.

۴-۵-۱- سیمان :

سیمان پرتلند نوعی سیمان هیدرولیکی است که با آب واکنش می دهد و بعد از مدتی به حالت پایدار رسیده و در مقابل آب مقاوم می شود. سیمانهای غیر هیدرولیکی مانند گچ و آهک می باشند که بعد از سخت شدن، آب زیادی به خود جذب می کنند. وزن مخصوص سیمان پرتلند بین ۱۶/۳-۱۲/۳، و ابعاد ذرات آن بین ۱۵-۱۰ μm می باشد [۱۷].

بعد از ترکیب آب با سیمان، آهک^۱ از اجزاء تشکیل دهنده سیمان آزاد می شود. مقدار آهک تولید شده در طی فرایند هیدراسیون تقریبا ۲۰٪ وزن سیمان می باشد. این آهک تحت شرایط نامساعد باعث تخریب بتن می شود. در صورت نفوذ آب به داخل بتن آهک با آب شسته شده و از بتن بیرون می آید و بصورت شوره در سطح بتن ظاهر می شود و فضای خالی در خمیر سیمان سخت شده باقی خواهد ماند. با افزودن مواد پوزولانی مانند خاکستر بادی و میکروسیلیس تاثیر منفی آهک کاهش پیدا می کند.

اندازه ذرات سیمان تاثیر زیادی در شدت واکنش آن با آب دارد. با کاهش ابعاد ذرات سیمان سطح مخصوص آن افزایش یافته و در نتیجه سرعت واکنش و سخت شدگی سیمان بیشتر می شود.

۱ - Calcium Hydroxide ($Ca(OH)_2$)

افزایش ریزدانه‌گی سیمان با تسریع عمل هیدراسیون، مقاومت اولیه را بالا می‌برد و منجر به افزایش افت بتن می‌شود [۱۱].

حجم بالای سیمان در HSC باعث افزایش حرارت هیدراسیون تا بیش از 40°C نسبت به دمای محیط می‌شود [۱۱]. افزودن مواد پوزولانی باعث کاهش حرارت هیدراسیون می‌شود.

۵-۴-۲- سنگدانه ها :

سنگدانه ها قسمت اعظم حجم بتن را تشکیل می‌دهند. معمولا حجم سنگدانه ها ۸۰-۶۰٪ حجم کل بتن می‌باشد. بنابراین دانه بندی آنها باید طوری باشد که محصول نهایی مانند یک جسم صلب، یکنواخت و متراکم با حداقل فضای خالی عمل کند. افزایش حجم سنگدانه ها باعث اقتصادی تر شدن طرح می‌شود و در مقابل، کارایی بتن کاهش پیدا می‌کند.

۵-۴-۲-۱- سنگدانه های درشت: مطالعات زیاد نشان می‌دهد که برای دستیابی به مقاومت فشاری بالا حداکثر بعد سنگدانه ها باید تا حد امکان کاهش یابد [۱۱]. با افزایش مساحت سنگدانه ها و کاهش تنش در سطح تماس سنگدانه و خمیر سیمان مقاومت افزایش می‌یابد. در مقابل استفاده سنگدانه های ریز بدلیل کاهش تمرکز تنش در سطح آنها منجر به مقاومت بالاتری خواهد شد [۱۱]. این تمرکز تنش بدلیل اختلاف مدول الاستیسیته خمیر سیمان و سنگدانه ایجاد می‌شود. بتن های ساخته شده از سنگدانه های شکسته مقاومت بیشتری نسبت به بتن های ساخته شده از سنگدانه های گردگوشه دارند [۱۱]. بنظر می‌رسد دلیل آن وجود زوایای متعدد در سنگدانه باشد.

۳-۲-۲- سنگدانه های ریز: ریز دانه ها ذرات پرکننده بین درشت دانه ها می‌باشند. اندازه آنها بین الکه‌های ۴ تا ۱۰۰ استاندارد می‌باشد. بمنظور کاهش آب مصرفی درصد سنگدانه های عبور کرده از الک ۵۰ و ۱۰۰ باید پایین نگه داشته شود [۱۷]. افزایش مدول نرمی در بعضی موارد سودمند می‌باشد. بعنوان مثال استفاده از ماسه با مدول نرمی $2/5$ مقاومت و کارایی کمتری نسبت به ماسه با

مدول نرمی^۳ نشان می دهد. با این وجود بدلیل بالا بودن حجم مصالح سیمانی در بتن مقاومت بالا دانه بندی مصالح سنگی از اهمیت کمتری نسبت به بتن معمولی برخوردار می باشد[۱۱].

۵-۴-۳- افزودنی ها :

طبق استاندارد ASTM C125 مواد افزودنی^۱، موادی به غیر از آب، سنگدانه ها و خمیر سیمان هستند که به بتن یا ملات قبل و یا در هنگام ساخت آن اضافه می شوند.

۵-۴-۳-۱- فوق روان کننده ها:

فوق روان کننده ها مواد آلی یا ترکیبی از مواد آلی و معدنی هستند. ترکیبات اصلی روان کننده ها، موادی با سطح فعال^۲ است که در فصل مشترک دو فاز غیر قابل اختلاط جمع می شوند و نیروهای فیزیکی و شیمیایی را در این سطح تماس داخلی تغییر می دهند. این مواد روی دانه های سیمان جذب شده و به آنها بار منفی می دهد که سبب دفع شدن (دور شدن) این ذرات از هم و تثبیت حالت پخش شدگی آنها می شود. حبابهای هوا نیز دفع شده و نمی توانند به ذرات سیمان بچسبند. بعلاوه بار منفی سبب بوجود آمدن پوسته ای منظم از ملکولهای آب دور هر ذره شده و در نتیجه موجب جداشدگی ذرات از هم می شود. چون آزادی بیشتری برای حرکت ذرات وجود دارد و آبی که در اثر سیستم فولکوله شدن تحت قید است آزاد می شود و برای روانسازی مخلوط مورد استفاده قرار می گیرد، در نتیجه کارایی مخلوط افزایش پیدا می کند.

فوق روان کننده ها موجب افزایش مقاومت مخصوصا در ۲۴ ساعت اول می شوند. مصرف بالاتر از حد مجاز ممکن است باعث افزایش مقاومت شود، ولی افزایش زمان گیرش را بدنبال خواهد داشت. با

۱ - Admixture

۲ - Surface Active

استفاده از فوق روان کننده می توان باعث افزایش مقاومت در اسلامپ ثابت، یا افزایش اسلامپ در مقاومت ثابت شد.

روش اضافه کردن فوق روان کننده به بتن کارایی و مقاومت آن را تحت تاثیر قرار می دهد. مصرف فوق روان کننده باید طوری باشد که در سراسر حجم بتن بصورت یکنواخت توزیع شود. مدت زمان اختلاط نیز باید به اندازه کافی باشد.

روش مشخصی برای تعیین مقدار فوق روان کننده وجود ندارد و به ناچار باید به روش آزمون و خطا مقدار آن را تعیین کرد. اصولا اگر مقاومت بعنوان معیار اولیه در نظر گرفته شود، باید تا حد امکان نسبت آب به سیمان را کاهش و مقدار فوق روان کننده را افزایش داد.

یکی از کاربردهای فوق روان کننده تولید بتن مقاومت بالا می باشد. ساخت بتن مقاومت بالا بدون استفاده از فوق روان کننده غیر ممکن است. میزان آب لازم برای هیدراسیون کامل سیمان پرتلند حدود ۲۸-۲۶٪ وزن سیمان است. با وجود این در عمل برای رسیدن به کارایی مناسب از آب بیشتری استفاده می شود. آب اضافی بصورت واکنش نیافته باقی مانده و باعث کاهش مقاومت و دوام بتن می شود. با استفاده از فوق روان کننده مناسب می توان آب مورد نیاز برای دستیابی به بتنی با کارایی مناسب را ۳۵-۲۵٪ کاهش داد و در عین حال انسجام و چسبندگی بتن بدون آب انداختگی و جداسازی اجزاء تشکیل دهنده آن حفظ می شود [۵].

۵-۴-۳-۲- افزودنی های معدنی :

در اغلب بتن های مقاومت بالا حداقل از یک نوع افزودنی معدنی تکمیلی استفاده می شود. افزودنی های معدنی معمولا مواد پوزولانی می باشند. پوزولانها موادی هستند که بخودی خود دارای خاصیت چسبندگی نیستند، اما در اثر ترکیب با آهک و در مجاورت آب بصورت مواد پایدار که دارای خاصیت چسبندگی می باشند درمی آیند. پوزولانها با توجه به منشا آنها دارای ترکیبات مختلفی هستند، ولی

بطور کلی تمام آنها دارای درصد نسبتا بالایی سیلیس می باشند، افزودنی های معدنی مورد استفاده در بتن عمدتا شامل خاکستر بادی^۱، میکروسیلیس^۲ و سرباره آهنگذاری^۳ می باشند. مقاومت فشاری بتن های حاوی خاکستر بادی و سرباره آهنگذاری معمولا کمتر از 80 MPa می باشد.

۱-۲-۳-۴-۵- میکروسیلیس: میکروسیلیس نوع جدیدی از افزودنی های معدنی است که در زمینه تحقیقاتی و کاربردی توجه زیادی به آن شده است. میکروسیلیس بدلیل ریزی زیاد و مقادیر فراوان سیلیکا یک ماده با فعالیت پوزولانی شدید است و مصرف آن در تولید بتن مقاومت بالا از سال ۱۹۸۰ در کشورهای اسکاندیناوی و نروژ آغاز شده است. این ماده یک محصول مصنوعی است که با جمع آوری گازهای حاصل از کوره های قوس الکتریکی در جریان تولید فلز سیلیسیم در کارخانجات سیلیس و آلیاژهای آن حاصل می شود و در صورت جمع آوری نشدن در هنگام خروج همراه با گازهای متصاعد کوره های این کارخانجات، تاثیر مخرب بر محیط زیست دارد. میکروسیلیس دارای سیلیس فراوان به میزان ۹۸-۸۵٪ است که میزان آن بستگی به نوع محصول و کوره کارخانه تولید سیلیس دارد. رنگ میکروسیلیس بستگی به کیفیت تولید یا حرارت و میزان کربن در آن ممکن است روشن یا خاکستری باشد. این ماده عمدتا کروی با حالت کریستال بوده و قطر متوسط ذرات آن در حدود $0.1-0.2 \mu\text{m}$ ، یعنی حدودا ۱۰۰ برابر کوچکتر از ذرات سیمان است. سطح مخصوص میکروسیلیس $20000 \text{ m}^2/\text{kg}$ و وزن مخصوص آن $2.2-2.5$ می باشد. وزن مخصوص میکروسیلیس در حالت فله $160-320 \text{ kg}/\text{m}^3$ می باشد. میزان مصرف میکروسیلیس در بتن معمولا ۲۰-۵٪ وزن سیمان است و در موارد خاص تا ۳۰٪ و بالاتر هم مصرف می شود.

با افزایش مقدار میکروسیلیس میزان آب مصرفی به شدت افزایش پیدا می کند که با استفاده از فوق روان کننده می توان مقدار آب مورد نیاز را کاهش داد. سرعت کسب مقاومت بتن های حاوی

۱ - Fly Ash

۲ - Silica Fume

۳ - Granulated Graded Blast Furnace Slag

میکروسیلیس تا سن ۳ و ۷ روز بسیار شدید است و با افزایش سن نمونه تا ۲۸ روز سرعت کسب مقاومت حتی از بتن های معمولی هم کمتر است. افزودن میکروسیلیس به بتن باعث افزایش مقاومت و در نتیجه مدول الاستیسیته می شود.

تجارب آزمایشگاهی و کارگاهی نشان می دهد که بتنهای حاوی میکروسیلیس نسبت به بتن معمولی دارای انقباض بیشتری در سنین اولیه می باشند. بنابراین سطح این بتن ها باید پوشیده شود تا از تبخیر سریع آب از سطح آنها جلوگیری شود.

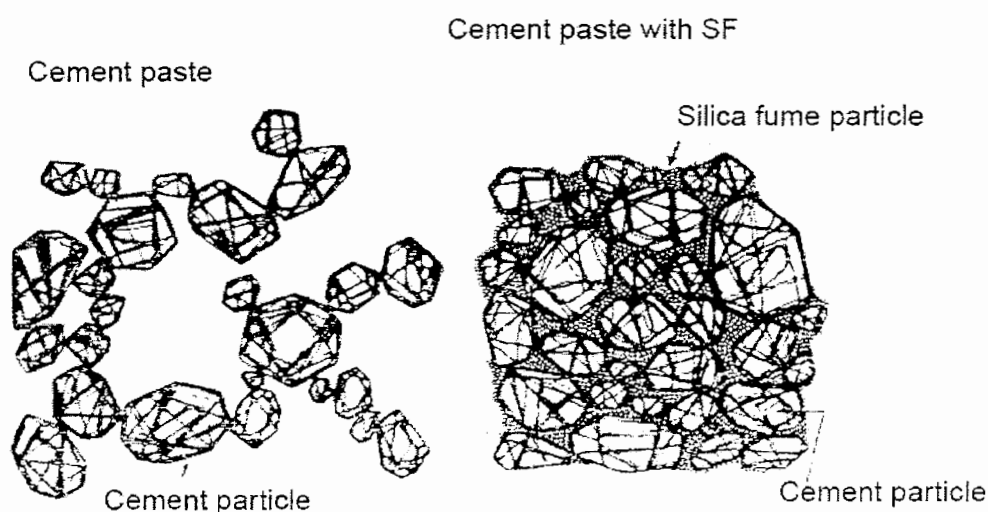
۲-۳-۴-۵- تاثیر میکروسیلیس در بتن تازه: ذرات میکروسیلیس بعلت ریز بودن و شکل کروی آنها فضای بین ذرات سیمان را که قبلا با آب اشغال شده بود، پر می کنند. با وجود اینکه استفاده از میکروسیلیس باعث توزیع بهتر دانه بندی در خمیر سیمان می شود، بدلیل سطح مخصوص بالای میکروسیلیس مصرف آب به شدت افزایش پیدا می کند. با افزایش مقدار مصرف میکروسیلیس به ۱۶٪، مقدار آب مصرفی ۴۰٪ افزایش پیدا می کند. استفاده از فوق روان کننده مناسب نیاز به افزایش آب مصرفی را کاهش می دهد. در صورت استفاده از میکروسیلیس به همراه فوق روان کننده و نسبت آب به سیمان پایین چسبندگی و پیوستگی مخلوط بشدت افزایش یافته و آب انداختگی به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش پیدا می کند. فوق روان کننده باعث جدا شدن ذرات سیمان و میکروسیلیس و کاهش تماس بین ذرات و لخته شدن آنها می شود.

۳-۲-۳-۴-۵- تاثیر میکروسیلیس در بتن سخت شده: کاهش نفوذ پذیری و افزایش مقاومت دو دلیل اصلی استفاده از میکروسیلیس در بتن می باشد (شکل ۵-۱). جایگزین کردن ۱۰٪ وزنی سیمان با میکروسیلیس نفوذپذیری آن را از $1.6 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ به $4 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ کاهش می دهد. با افزودن ۲۵-۲۰٪ میکروسیلیس نفوذپذیری بتن تقریبا صفر می شود [۱۷]. تاثیر میکروسیلیس در بهبود کیفیت بتن را می توان بصورت زیر خلاصه کرد:

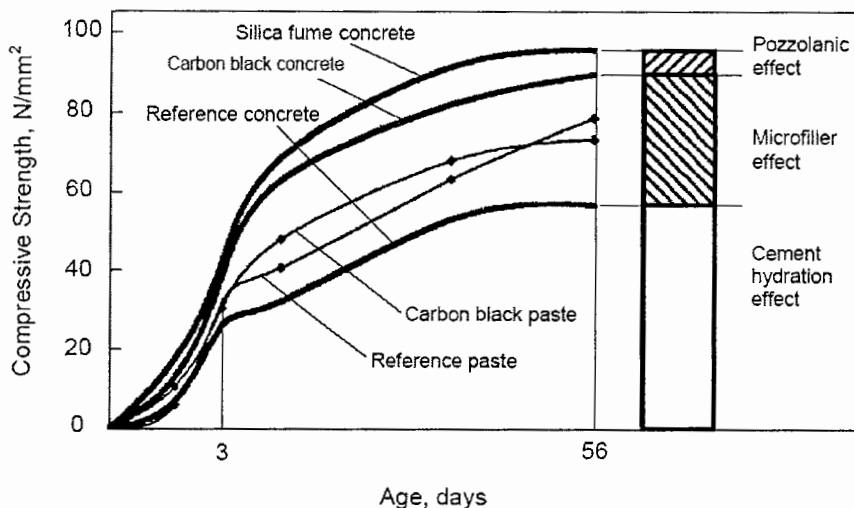
- کاهش نفوذپذیری.

- افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی.
- در نسبت آب به مصالح سیمانی ثابت انقباض ناشی از خشک شدن در بتن های حاوی میکروسیلیس کمتر از بتن های بدون میکروسیلیس است.
- تغییر شکل های ناشی از خزش $40-70\%$ بتن های بدون میکروسیلیس است.
- افزایش مقاومت پیوستگی به آرماتورهای فولادی $50-100\%$ می باشد.
- خوردگی آرماتور به حداقل می رسد.
- مقاومت بیشتر در برابر یخ زدن و ذوب شدن متوالی (بهیود دوام).

میکروسیلیس با ایجاد واکنش های پوزولانی با آهک موجود در بتن و خاصیت پرکنندگی بین ذرات سیمان موجب تغییر در خصوصیات بتن می شود. مصرف 18% وزنی آن برای مصرف کامل ذرات آهک کافی می باشد. با توجه به خاصیت پرکنندگی آن، مقدار بهینه مصرف میکروسیلیس معمولاً $25-30\%$ درصد می باشد. تجارب آزمایشگاهی نشان می دهند که تاثیر پرکنندگی ذرات میکروسیلیس از فعالیت پوزولانی آن در بتن اهمیت بیشتری دارد (شکل ۵-۲).



شکل ۵-۱- خاصیت پرکنندگی میکروسیلیس در خمیر سیمان [۳۰]



شکل ۵-۲- تاثیر پرکنندگی و فعالیت پوزولانی میکروسلیس در مقاومت فشاری بتن [۳۰]

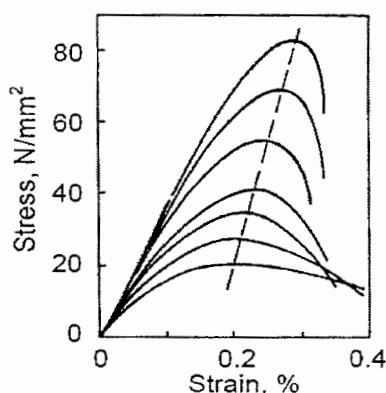
۵-۵- خصوصیات بتن مقاومت بالا:

قبل از انتخاب نوع بتن و مواد تشکیل دهنده، خصوصیات آن باید بخوبی شناخته شود. خصوصیات مکانیکی بتن نظیر رابطه تنش کرنش، مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و برشی و مقاومت پیوستگی بر اساس نتایج آزمایشگاهی بتنهای با مقاومت کمتر از 41 MPa بنا شده اند. لذا صحت این روابط برای بتن های با مقاومت بالاتر باید مورد بررسی قرار می گیرد.

۵-۵-۱- رابطه تنش کرنش تحت بارهای فشاری تک محوری :

شاخه صعودی منحنی تنش-کرنش برای بتن های مقاومت بالا بصورت خطی و با شیب بیشتر است و کرنش نظیر تنش حداکثر با افزایش مقاومت فشاری در تمام حالات بارگذاری (فشار، کشش، خمش و پیچش) افزایش پیدا می کند [۳۰]. شاخه نزولی نیز برای بتنهای مقاومت بالا با شیب بیشتری نسبت به بتن های با مقاومت پایینتر است (شکل ۵-۳). در بتنهای مقاومت بالا ریزترکهای کمتری نسبت به بتن های معمولی در ازای کرنش برابر تشکیل می شود، بنابراین کرنش جانبی در

بتن های مقاومت بالا کمتر است. مدول الاستیسیته نیز به نسبت افزایش مقاومت فشاری با سرعت کمتری افزایش پیدا می کند.



شکل ۳-۵- نمودار تنش-کرنش بتن تحت بارهای فشاری [۳۰]

تحت تنشهای فشاری انرژی جذب شده برابر با سطح زیر نمودار تنش-کرنش می باشد. اگر تنش و کرنش روی شاخه صعودی منحنی به ترتیب بر f'_c و ϵ_{cu} تقسیم شوند، نمودار جدیدی حاصل می شود که سطح زیر این نمودار برابر انرژی جذب شده نسبی^۱ می باشد (شکل ۴-۵). پارامتر انرژی جذب شده نسبی به صورت زیر تعریف می شود:

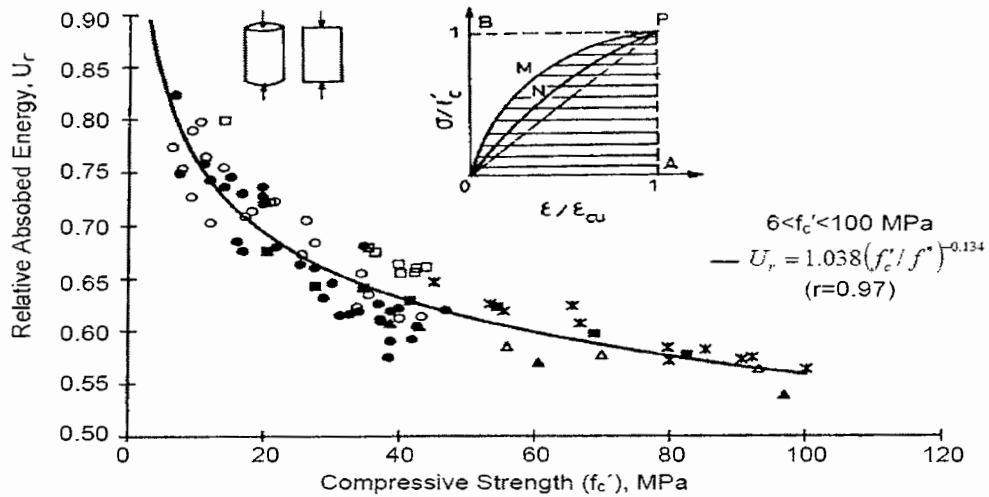
$$U_r = \frac{\int_0^{\epsilon_{cu}} \sigma(\epsilon) \cdot d\epsilon}{f'_c \cdot \epsilon_{cu}}$$

با توجه به شکل ۴-۵ اگر منحنی منطبق بر خط OP منطبق باشد، رفتار مصالح کاملاً الاستیک خطی^۲ خواهد بود و اگر منحنی منطبق بر مسیر OBP منطبق باشد، رفتار مصالح کاملاً پلاستیک^۳ می باشد. بنابراین U_r بین ۰/۵ و ۱ متغیر است. چنانچه منحنی رفتار مصالح مسیر ONP را بجای مسیر OMP طی کند نشان دهنده شکننده تر بودن آن است. شکل ۴-۵ نشان می دهد با افزایش f'_c انرژی جذب شده نسبی به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش می یابد [۳۰].

۱ - Relative Absorbed Energy

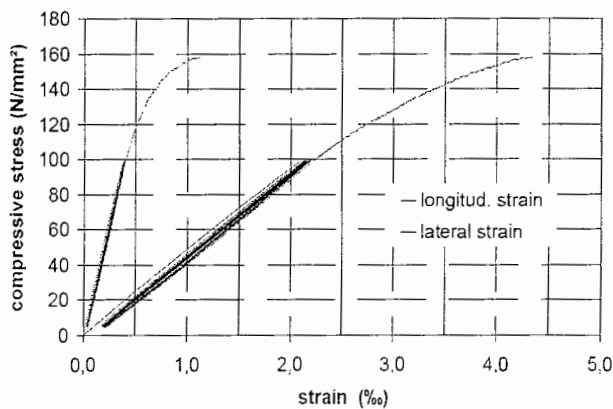
۲ - Perfectly Linear-Elastic

۳ - Perfectly Plastic



شکل ۵-۴- تغییرات انرژی جذب شده نسبی با افزایش مقاومت فشاری [۳۰]

شکل ۵-۵ رفتار نمونه های بتن با مقاومت بیش از 150 mpa تحت سیکلهای بارگذاری و باربرداری تا 65% مقاومت فشاری حداکثر را نشان می دهد. مشاهده می شود که تا 65% مقاومت فشاری حداکثر منحنی ها کاملا بر هم منطبق هستند و بنابراین ریزترکهای کمی در بتن تشکیل می شود. نسبت پواسون نیز در بتنهای با مقاومت بسیار زیاد، کم و برابر 0.18 می باشد. این خصوصیت به دلیل اتصال خوب بین سنگدانه ها و خمیر سیمان می باشد. این نسبت تا 70% مقاومت فشاری ثابت می ماند و در تنشهای بالاتر ریزترکها به سرعت رشد کرده و باعث شکست ترد و ناگهانی تحت بارهای فشاری می شوند [۲۹].



شکل ۵-۵- نمودار تنش-کرنش بتن با مقاومت بسیار زیاد تحت شش سیکل بارگذاری و باربرداری [۲۹]

۵-۵-۲- شکل پذیری و جذب انرژی :

پیشرفت در تکنولوژی بتن باعث شده است تا امروزه بتن هایی با مقاومت فشاری $100-150 MPa$ براحتی تولید و در پل سازی و ساختمانهای بلند مورد استفاده قرار گیرند. با افزایش مقاومت فشاری، رفتار بتن بسیار ترد می شود و شاخه صعودی و نزولی منحنی تنش کرنش تحت بارهای فشاری با شیب بیشتری نسبت به بتن معمولی تغییر خواهد کرد.

میزان جذب انرژی بتنهای مقاومت بالا را می توان بطور قابل ملاحظه ای با استفاده از الیاف فولادی بهبود بخشید. افزودن الیاف فولادی باعث بهبود مقاومت خستگی بتن مقاومت بالا می شود. بهبود عملکرد بتن بستگی به کیفیت اتصال و مهار الیاف دارد. از اینرو استفاده از الیاف فولادی مجعد یا قلابدار نسبت به الیاف ساده بسیار موثرتر خواهد بود.

۵-۵-۳- روند کسب مقاومت :

روند کسب مقاومت برای بتن های مقاومت بالا سریعتر از بتن های معمولی است. ولی با افزایش سن نمونه، مقاومت با سرعت کمتری افزایش پیدا می کند. میکروسیلیس فرایند هیدراسیون سیمان را در سنین اولیه تسریع می بخشد. استفاده از میکروسیلیس باعث کاهش تاثیر کندگیر کننده ها در شرایط عمل آوری استاندارد می شود. تاثیر فعالیت پوزولانی میکروسیلیس در افزایش مقاومت در طی ۴ تا ۷ روز اول رخ می دهد. مقاومت ۷ روزه به ۲۸ روزه برای بتن های مقاومت بالا بین ۰/۸ تا ۰/۹، و برای بتن های معمولی در حدود ۰/۷ تا ۰/۷۵ می باشد. نسبت مقاومت ۷ روزه به ۹۵ روزه نیز برای بتن های معمولی در حدود ۰/۶۵ تا ۰/۶۵، و برای بتن های مقاومت بالا ۰/۷۳ گزارش شده است [۱۱]. افزایش سرعت کسب مقاومت در بتن های مقاومت بالا بدلیل افزایش حرارت هیدراسیون سیمان و نزدیکی ذرات سیمان هیدراته شده بدلیل نسبت آب به سیمان کم می باشد.

۵-۵-۴- خود انقباضی^۱ :

در اثر انقباض شیمیایی در فرایند هیدراسیون سیمان و خشک شدن بتن در ساعتهای اولیه پدیده خود انقباضی بوجود می آید. این عامل در بتن های با مقاومت بسیار بالا به دلیل مقدار سیمان زیاد و نسبت آب به سیمان کم شدید تر از بتن معمولی است. دلیل آن مصرف آب در فرایند هیدراسیون می باشد. انقباض در صورتی که در مقابل آن محدودیت ایجاد شود، باعث ایجاد ترکهای عمیق در ماتریس سیمانی می شود. پوشاندن قالب با ورقه های پلاستیک از ترک خوردگی جلوگیری می کند. چنانچه مقدار آب اضافه شده به بتن از مقدار مورد نیاز برای فرایند هیدراسیون بیشتر باشد تاثیر این عامل کاهش می یابد. میزان جمع شدگی ناشی از خود انقباضی را می توان با جلوگیری از خشک شدن نمونه تخمین زد. خود انقباضی با فراهم کردن آب کافی و اسلایپ مناسب تا حد زیادی کنترل و در عرض چند هفته متوقف می شود.

۵-۵-۵- کارایی و چسبندگی بتن :

بتن توانمند باید دارای جسم متراکم و بدون فضای خالی باشد و اتصال آن با آرماتورها بخوبی برقرار شود. این مصالح باید از قابلیت متراکم شدن و روانی کافی برخوردار باشند تا با حداقل انرژی بین انبوه آرماتورها جایگیرند. برای استفاده از بتن های با کارایی پایین از تجهیزات ویژه برای ایجاد ارتعاش خارجی و یا فشرده کردن به منظور متراکم کردن استفاده می شود.

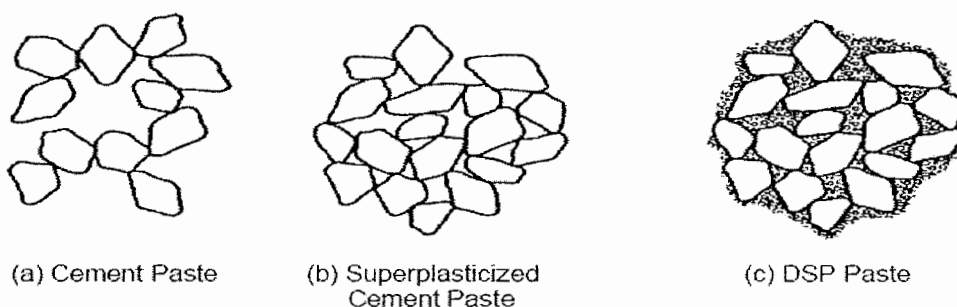
استفاده از میکروسیلیس در افزایش مقاومت و چسبندگی بتن تاثیر چشمگیری دارد. میکروسیلیس بدلیل ریزی ذراتش باعث متراکم شدن و پر شدن فضاهای خالی بتن می شود. در صورت استفاده از میکروسیلیس افزودن فوق روان کننده برای دستیابی به کارایی مناسب ضروری می باشد. فوق روان

۱ - Autogenous Shrinkage

کننده مناسب باید در مقابل افزایش زمان اختلاط و افزایش دمای بتن خاصیت خود را تا حد امکان حفظ کند.

۵-۶- معرفی چند نوع بتن با مقاومت زیاد:

۵-۶-۱-DSP^۱: نوع جدیدی از مصالح پایه سیمانی است که اولین بار در کشور دانمارک تولید شد. DSP شامل سیمان، میکروسیلیس، فوق روان کننده و سنگدانه ریز می باشد. این مصالح با نام تجاری Densit همانند شیشه بسیار ترد می باشد و بطور مستقل مصالح سازه ای مناسب بشمار نمی رود. بدلیل وجود میکروسیلیس اتصال بسیار قوی با الیاف فولادی ایجاد می کند و افزودن الیاف فولادی شکل پذیری آن را به نحو مطلوبی افزایش می دهد. در صورت استفاده از سنگدانه مناسب مقاومت فشاری آن به بیش از $130 MPa$ خواهد رسید. شکل ۵-۶ ساختار خمیر سیمان را در DSP با بتن معمولی مقایسه می کند [۳۰].



شکل ۵-۶- تغییر در ساختار سیمان با افزودن فوق روان کننده و میکروسیلیس [۳۰]

۵-۶-۲-DCC^۲: اگر پودر سیمان در حالت مرطوب با نسبت آب به سیمان $0.05-0.1$ تحت فشار زیاد متراکم و به نحو مطلوبی عمل آوری شود، DCC با تخلخل پایین و مقاومت فشاری بالا بدست می آید. با متراکم کردن این مصالح تحت فشار $350 MPa$ و عمل آوری در دمای $250^{\circ}C$ ، تخلخل کمتر از 2% و مقاومت فشاری $665-700 MPa$ قابل دستیابی است. به دلیل نسبت آب به سیمان

۱ - Densified System Containing Homogenously Arranged Ultra-Fine Particles(DSP)

۲ - Damp Compacted Cement

پایین هیدراته شدن تمام ذرات سیمان ممکن نیست و دانه های سیمان هیدراته نشده به عنوان سنگدانه ریز عمل می کنند. استفاده از این مصالح به دلیل اینکه تکنولوژی ساخت آن آزمایشگاهی می باشد جنبه کاربردی ندارد [۳۰].

۵-۷- نتیجه گیری :

تولید بتن مقاومت بالا که بطور همزمان باید دارای کارایی و مقاومت بالاتری نسبت به بتن معمولی باشد، نیازمند ایجاد شرایط و بکارگیری مواد اولیه خاص است. اگرچه طرح اختلاط مناسب مهمترین عامل برای دستیابی به مقاومت مورد نظر می باشد، ولی پارامترهای مهم دیگری برای افزایش مقاومت بتن باید در نظر گرفته شود. معمولا بتن مقاومت بالا دارای سنگدانه های قوی تر، مقدار سیمان بیشتر و نسبت آب به سیمان کمتر می باشد. برای دستیابی به بتن مقاومت بالا، مقاومت سنگدانه ها باید حداقل برابر خمیر سیمان باشد. افزایش یکنواختی بتن با حذف سنگدانه های درشت و استفاده از فوق روان کننده و مواد پوزولانی مخصوصا میکروسیلیس از دیگر روشهای افزایش مقاومت بتن می باشند. مقدار بهینه مصرف میکروسیلیس معمولا ۲۵-۳۰ درصد است. روش ساخت بتن و عمل آوری در دمای بالا از دیگر عوامل تاثیر گذار در مقاومت بتن می باشند. سرعت کسب مقاومت بتن های حاوی میکروسیلیس تا سن ۳ و ۷ روز بسیار شدید و با افزایش سن نمونه تا ۲۸ روز سرعت کسب مقاومت حتی از بتن های معمولی هم کمتر است. تجارب آزمایشگاهی و کارگاهی نشان می دهد که بتن های حاوی میکروسیلیس نسبت به بتن معمولی دارای انقباض بیشتری در سنین اولیه می باشند. بنابراین سطح این بتن ها باید پوشیده شود تا از تبخیر سریع آب از سطح آنها جلوگیری شود.

شکل پذیری بتن های مقاومت بالا را می توان بطور قابل ملاحظه ای با استفاده از الیاف فولادی بهبود بخشید. افزودن الیاف فولادی باعث بهبود مقاومت خستگی بتن مقاومت بالا می شود. از اینرو استفاده از الیاف فولادی مجعد یا قلابدار نسبت به الیاف ساده بسیار موثرتر خواهد بود.

فصل ششم

تشریح برنامه آزمایشگاهی

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

افزایش نسبت حجمی، نسبت ظاهری، کاهش قطر و ایجاد تغییر شکل در الیاف باعث بهبود عملکرد بتن الیافی خواهد شد. الیاف مجعد بدلیل برقراری اتصال قوی با ماتریس سیمانی و جذب انرژی زیاد در اثر بیرون کشیده شدن از ماتریس نسبت به انواع دیگر الیاف تغییر شکل یافته موثرتر است. به دلیل شکل پذیری و تامین گیرداری در ماتریس و مقاومت کششی و سختی مطلوب، در این تحقیق از الیاف فولادی مجعد استفاده می شود.

برای افزایش کارایی و جلوگیری از گلوله شدن الیاف، حداکثر بعد سنگدانه ها در ماتریس کاهش پیدا می کند. انتخاب دانه بندی مناسب و افزایش حجم مصالح خمیری (سیمان+ میکروسیلیس) در ماتریس و همچنین استفاده از میکروسیلیس جهت بهبود مقاومت پیوستگی الیاف و ماتریس سیمانی از اهمیت زیادی برخوردار است.

به عنوان طرح اولیه ماتریس از ترکیبات دو FRC با نام های RPC و DSP (که در فصلهای گذشته با آنها آشنا شدیم) کمک گرفته می شود (جدول ۶-۱) [۳۱]. در طی مراحل مختلف کار آزمایشگاهی با توجه به امکانات و مصالح موجود و قابل دسترس در روش ساخت، عمل آوری و ترکیب آنها تغییرات اساسی ایجاد خواهد شد.

مراحل اصلی برنامه آزمایشگاهی به شرح زیر می باشد:

- دستیابی به ماتریس با مقاومت فشاری، کارایی و حالت خمیری مناسب جهت استفاده در بتن الیافی.

- طراحی هندسه الیاف فولادی سازگار با ماتریس.
- تولید الیاف فولادی.
- ساخت نمونه های اصلی بتن الیافی و آزمایشات نهایی.

جدول ۶-۱- طرح مخلوط های اولیه (kg/m^3)

Constituent	DSP	RPC	
Portland Cement	744	855	
Fine Quartz Sand (230 μm)	----	940	
Fine Quartz Sand (0-0.25 mm)	166	----	
Fine Quartz Sand (0.25-1 mm)	335	----	
Fine Quartz Sand (1-4 mm)	672	----	
Silica Fume	178	214	
Superplasticizer	56	20	
Water	133	235	
Steel Fiber	L=6 mm & D=0.16 mm	452(5.8%)	312(4%)
Water/Cement	0.18	0.28	
Water/(Cement+Silica Fume)	0.15	0.22	

۶-۲- مصالح مصرفی:

همانطور که در ابتدای پایان نامه عنوان گردید، به منظور تقویت جنبه کاربردی این تحقیق از مصالح موجود در کشور استفاده شده است.

۶-۲-۱- سیمان:

انتخاب نوع سیمان مورد استفاده در بتن مقاومت بالا اهمیت زیادی دارد. برای یک تیپ(نوع) مشخص، محصولات تولید شده توسط کارخانجات مختلف ممکن است خصوصیات متفاوتی داشته

باشند. چنانچه مقاومت در کوتاه مدت مورد نظر باشد، استفاده از سیمان پرتلند نوع III توصیه می شود. اگر در مخلوط بتن با مقاومت بالا از درصد سیمان زیاد استفاده می شود، به علت تولید حرارت زیاد، بهتر است از سیمان پرتلند نوع II استفاده شود [۱۷].

سازگاری نوع سیمان مصرفی با افزودنی های مورد استفاده در بتن مقاومت بالا نیز اهمیت زیادی دارد. از آنجایی که اثر مواد افزودنی کاهنده آب در مقاومت، بطور قابل ملاحظه ای تابع ترکیبات سیمان است، بیشترین افزایش مقاومت نظیر سیمانهایی است که مواد قلیایی کمتر یا C_3A^1 کمتری داشته باشند. وجود C_3A باعث افزایش نسبت آب به سیمان و کاهش کارایی می شود. از اینرو بکار بردن سیمان تیپ II توصیه می شود. چراکه در ساخت این نوع سیمان سعی می شود تا حد امکان از مقدار C_3A کاسته و به C_2S^2 افزوده شود [۱۵].

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ II تولید کارخانه سیمان شاهرود استفاده شده است. وزن مخصوص آن براساس ASTM C187، $3/16 \text{ gr/cm}^3$ تخمین زده شد و در طرح مخلوط بتن مورد استفاده قرار گرفت. در اثر وارد آمدن فشار در طی مرحله حمل و انبار کردن، سیمان دارای گلوله های درشت می باشد. لذا به منظور بالا بردن کیفیت بتن کلیه سیمانها قبل از استفاده از الک ۵۰ رد می شوند.

۶-۲-۲- میکروسیلیس:

از دو نوع میکروسیلیس محصول کارخانجات فروسیلیس سمنان و ازنا در این پایان نامه استفاده شد. با وجود ریزدانه بودن میکروسیلیس، ولی دارای ذرات درشت غیر قابل اختلاط هم می باشند. بنابراین کلیه میکروسیلیس مورد استفاده قبل از مصرف الک می شود.

۱ - Tricalcium Aluminate

۲ - Dicalcium Silicate

میکروسیلیس ازنا در حالت خشک متراکم تر و دارای وزن مخصوص فله بیشتری است. به علت وجود ذرات درشت بیشتر، از الک نمره ۵۰ استفاده می شود. در مقابل به نظر می رسد که میکروسیلیس سمنان دارای خلوص بیشتر و ذرات درشت کمتر می باشد و در مورد آن استفاده از الک نمره ۱۶ کافی است. وزن مخصوص این میکروسیلیس در حالت فله کمتر از میکروسیلیس ازنا می باشد. برای ساخت مخلوطهای آزمایشی در داخل محیط آزمایشگاه معمولاً از میکروسیلیس ازنا و در هنگام ساخت بتن با استفاده از بتونیر در خارج از محیط آزمایشگاه از میکروسیلیس سمنان استفاده می شود. به طور کلی بعد از ساخت مخلوطهای زیاد تفاوت چندانی بین خصوصیات بتن های ساخته شده از این دو نوع میکروسیلیس در حالت تازه و سخت شده مشاهده نشد.

وزن مخصوص میکروسیلیس در طرح مخلوط بتن $2/35 \text{ gr/cm}^3$ در نظر گرفته می شود.

۶-۲-۳- فوق روان کننده :

از سه نوع فوق روان کننده PCE و NSF محصول شرکت وندشیمی و seko dense محصول کلینیک ساختمانی ایران، در این پایان نامه استفاده شده است.

فوق روان کننده PCE نسل جدید فوق روان کننده ویژه ساخت بتن خود متراکم^۱ می باشد. با استفاده از مقدار نسبتاً کمی از این فوق روان کننده به همراه نسبت آب به سیمان پایین کارایی به نحو مطلوبی افزایش پیدا می کند. PCE مایعی قهوه ای رنگ می باشد و پایه شیمیایی آن دیسپرسیون پلیمری و نمک کربوکسیلیت است. وزن مخصوص PCE، $1/03 \text{ kg/lit}$ و مقدار مصرف آن $1/2-0/2$ درصد وزنی سیمان توصیه شده است.

۱ - Self Consolidating Concrete

فوق روان کننده NSF مایعی به رنگ قهوه ای سوخته می باشد. پایه شیمیایی آن نفتالین فرمالدهاید سولفونات و وزن مخصوص آن $1/2 \text{ kg/lit}$ است. مصرف فوق روان کننده NSF به میزان $3-0/8$ درصد وزنی سیمان توصیه شده است.

فوق روان کننده seko dense از نظر ظاهری مشابه NSF می باشد و همچنین خصوصیات بتن های ساخته شده از آن در حالت تازه و سخت شده شباهت زیادی به بتن های ساخته شده از NSF دارد.

۶-۲-۴- سنگدانه :

سنگدانه مورد مصرف از نوع ریزدانه و جنس کوارتز با حداکثر ابعاد ذرات $4/75 \text{ mm}$ می باشد. مطالعات نشان می دهد که در بتن با مقاومت بسیار زیاد معمولا از سنگدانه کوارتز استفاده می شود که دلیل آن سازگاری با خمیر سیمان می باشد $(32,31,30,29,26)$. در نهایت مخلوط سیمان، میکروسیلیس و سنگدانه کوارتز بصورت یک جسم یکپارچه و همگن تغییر شکل می دهند. همانند میکروسیلیس، کوارتز هم دارای درصد بالایی (95%) سیلیس (SiO_2) است. البته وجود سیلیس را نمی توان به تنهایی علت واکنش شیمیایی دانست. در کوارتز، سیلیس به صورت کریستال است و تنها در دمای بالا نظم کریستالی آن بهم خورده و با آهک موجود در سیمان ترکیب می شود (5) . به طور تقریبی دانه بندی سنگدانه کوارتز موجود در آزمایشگاه به این صورت می باشد:

0-0.6mm	25%
0.6-1.2mm	0%
1.2-4.75mm	75%

با توجه به اینکه دانه بندی سنگدانه های موجود با دانه بندی مورد نیاز برای طرح مخلوط های این پایان نامه تفاوت نسبتا زیادی دارد بنابراین تمامی سنگدانه ها پس از خشک شدن کامل به آزمایشگاه دانشکده معدن منتقل شده و در دو مرحله با استفاده از سنگ شکن خرد می شدند و پس از آن با توجه به نوع طرح اختلاط، دانه بندی صورت می گیرد. وزن مخصوص سنگدانه کوارتز براساس ASTM C128، $2/75 \text{ gr/cm}^3$ تخمین زده شد.

از سنگدانه سیلیسی با دانه بندی $0/1-0/25\text{mm}$ به عنوان مکمل استفاده شد. این نوع سنگدانه در صنایع ریخته گری کاربرد دارد و در حقیقت سنگدانه کوارتز است که بعد از خرد شدن، فرآوری، و حذف ناخالصی ها، خشک و دانه بندی می شود. ماسه سیلیسی حاوی مقادیری اکسید فلزات به منظور افزایش دمای ذوب می باشد. به هر حال در مورد کاربرد این مصالح برای ساخت بتن باید بررسی بیشتری صورت گیرد.

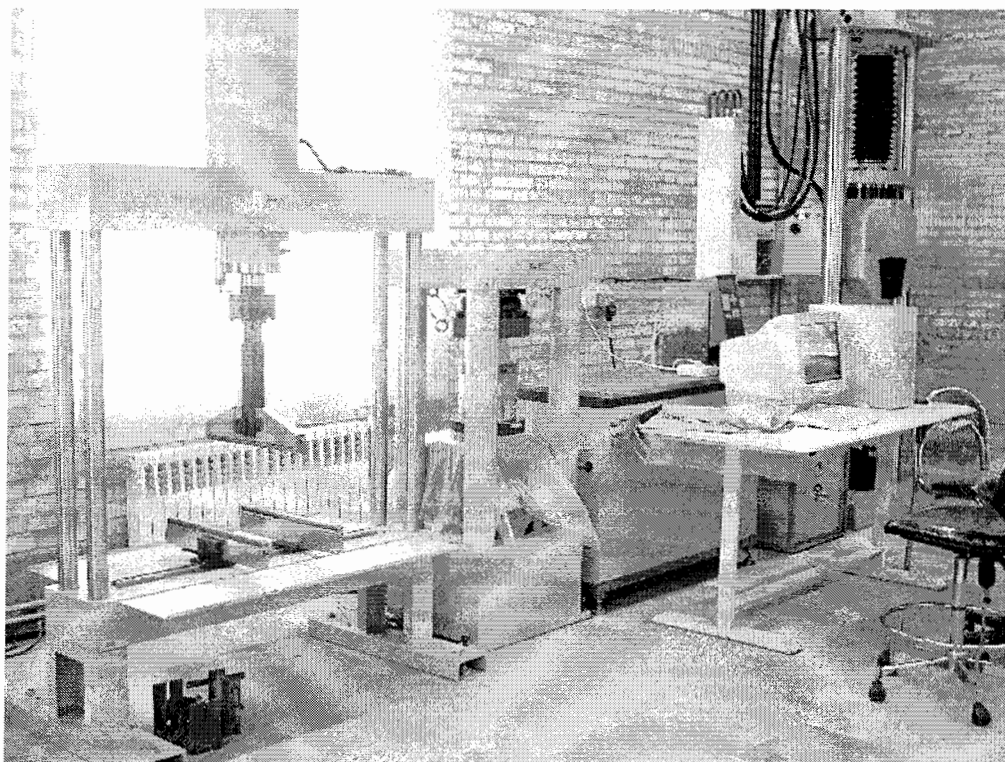
۶-۲-۵- الیاف فولادی :

الیاف مورد مصرف در این پایان نامه از سیم فولادی پرکربن با مقاومت کششی نهایی $18000-19000\text{ kg/cm}^2$ ساخته شد. قطر سیم $0/3\text{ mm}$ می باشد و بعلت مقاومت بالا در صنایع فنر سازی کاربرد دارد. جزئیات بیشتر در مورد تصمیم گیری درباره هندسه الیاف و تولید آن در بخشهای آینده ارائه خواهد شد.

۶-۳- آزمایشهای بتن مسلح به الیاف فولادی (SFRC):

مقاومت نمونه های بتنی تحت تأثیر عوامل ثانویه نظیر سرعت بارگذاری، اندازه نمونه و شرایط نگهداری تغییر می کند. علاوه بر این به منظور قابل قیاس بودن نتایج بدست آمده از آزمایشات انجام شده در تحقیقات مختلف نیاز به استفاده از روشها و تجهیزات استاندارد برای تعیین خصوصیات FRC می باشد. کاهش سرعت بارگذاری یا افزایش زمان اعمال یک بار افزاینده منجر به مقاومت بیشتر از حالت آزمایش استاندارد می گردد. اگر بار آنی وارد شود مقاومت بالاتری ثبت می شود و کرنش نظیر گسیختگی کمتر می باشد (حالت شکننده). در این بخش توضیح مختصری در مورد آزمایشهای مقاومت فشاری، خمشی، کشش دو نیم شدن، طاقت خمشی و همچنین انرژی شکست (G_f) داده می شود. این روشهای آزمایش علاوه بر بتن و SFRC در مورد بتن مسلح شده با

انواع دیگر الیاف نیز کاربرد دارند. جهت بارگذاری نمونه ها از دستگاهی که قابلیت اعمال بارهای کششی، فشاری و خمشی با سرعت مشخص و ثبت دقیق مقاومت آنها در زمانهای کوتاه را دارا می باشد استفاده خواهد شد (شکل ۶-۱).



شکل ۶-۱- دستگاه آزمایش کشش، فشار و خمش برای کنترل کیفیت مصالح ساختمانی

بطور کلی مواد ذکر شده در ASTM C 31 که برای آماده سازی نمونه های بتنی بکار می روند در مورد FRC نیز قابل کاربرد می باشند [۷]. لرزش داخلی و استفاده از میلگرد برای متراکم کردن به دلیل اینکه باعث پخش غیر یکنواخت الیاف و تغییر جهت آنها از حالت تصادفی می شود در مورد بتن الیافی مناسب نمی باشند [۷]، هرچند که آیین نامه ACI 544-4R ارتعاش داخلی را برای SFRC مجاز دانسته است. مناسب ترین روش برای متراکم کردن بتن الیافی لرزش خارجی با استفاده از میز لرزان است. توصیه می شود کوچکترین بعد قالب حداقل سه برابر طول الیاف و بزرگترین بعد سنگدانه باشد. در غیر این صورت الیاف در جهات خاصی متمایل شده و توزیع آنها غیر تصادفی می شود [۸].

روشهای مختلفی برای تخمین کارایی بتن در ASTM پیشنهاد شده است که از جمله آنها می توان آزمایش اسلامپ (ASTM C143) و آزمایش زمان جریان از میان مخروط اسلامپ وارونه^۱ (ASTM C995) را نام برد. ارجحیت آزمایش دوم نسبت به آزمایش اسلامپ این است که قابلیت روانی بتن در اثر لرزش را بخوبی نشان می دهد. چراکه برای بتن معمولی و FRC با اسلامپ برابر، FRC دارای کارایی بهتری می باشد [۷].

۶-۳-۱- مقاومت فشاری: مقاومت فشاری به عنوان مهمترین معیار جهت تعیین کیفیت بتن مورد استفاده قرار می گیرد. از نمونه های مکعبی و استوانه ای در ابعاد مختلف برای اندازه گیری مقاومت فشاری بتن استفاده می شود. اندازه نمونه ها بستگی به اندازه بزرگترین سنگدانه و مقاومت بتن دارد (ظرفیت دستگاه آزمایش یک عامل محدود کننده برای اندازه نمونه می باشد). بر اساس ASTM C 39 برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه های استوانه ای $152 \times 305 \text{ mm}$ استفاده می شود (در زمانی که ابعاد بزرگترین سنگدانه کمتر از 50 mm باشد). برای بتن های با مقاومت بالا (معمولا بالاتر از 700 kg/cm^2) و اندازه بزرگترین سنگدانه 25 mm و کمتر می توان از استوانه های $10 \times 20 \text{ cm}$ و یا از مکعبهای $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ استفاده کرد. در این پایان نامه کلیه نمونه های مقاومت فشاری از نوع مکعبی و اندازه $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ بودند.

در آزمایش مقاومت فشاری نیرو با سرعت مشخص به نمونه بتنی وارد می شود تا خرابی اتفاق بیافتد. سرعت اعمال بار برای نمونه های فشاری $1/3 \text{ mm/min}$ یا 0.34 MPa/sec - 0.14 می باشد. سرعت بارگذاری در نمونه های بتنی باید طوری باشد تا در حدود ۲ الی ۳ دقیقه بارگذاری، بتن به مقاومت نهایی خود برسد. بارگذاری که در کمتر از ۳۰ ثانیه تا شکست انجام شود حدود ۲ تا ۳ درصد

۱ - Time of flow through inverted slump cone (ASTM C 995)

مقاومت بالاتری را از مقاومت واقعی نتیجه می دهد. دلیل این امر عدم امکان تجربه پدیده خزش در بتن است.

نمونه های مکعبی نیاز به کپ^۱ ندارند، ولی نمونه های استوانه ای باید حتما کپ شوند. اگر مدول الاستیسیته و مقاومت مصالح کپ کمتر از نمونه اصلی باشد، نیروی وارد شده بطور یکنواخت به نمونه منتقل نمی شود. علاوه بر این استفاده از مصالح ضعیف برای کپ با ضخامت زیاد، به دلیل پدید آمدن کرنش جانبی در لایه کپ و ایجاد تنشهای کششی در دو انتهای نمونه، مقاومت فشاری کاهش پیدا می کند. برای بتن مقاومت بالا ضخامت $3-1/5$ mm برای لایه کپ مناسب می باشد و به دلیل مسائل اجرایی و عملی آن را می توان تا 6 mm افزایش داد [۱۱].

وجود الیاف در بتن باعث کاهش شکنندگی آن و تغییر مود شکست نمونه می شود. مقاومت فشاری بعد از ترک خوردگی ماتریس از بین نمی رود و تغییر شکل نظیر بار حداکثر افزایش قابل ملاحظه ای دارد. به هر حال اضافه کردن الیاف به بتن مقاومت فشاری آنرا به مقدار زیادی تحت تأثیر قرار نمی دهد.

۶-۳-۲- مقاومت کششی دو نیم شدن: مقاومت کششی بتن با روشهای غیر مستقیم یعنی آزمایش خمش و آزمایش دو نیم شدن مشخص می شود. این روشها به مقاومتهایی منجر می شوند که از مقاومت واقعی تحت بار کشش محوری بیشتر است. روشهای آزمایش مقاومت کششی بتن خالی (بدون الیاف) به نتایج عددی متفاوت منجر می شوند [۱۸]:

کشش خمشی < کشش دو نیم شدن < کشش مستقیم

دلایل این تفاوتها دو مورد است: ۱- حجم بتن تحت کشش به ترتیب نشان داده شده در فوق کاهش می یابد، ۲- در روشهای آزمایش دونیم شدن و خمش توزیع تنش های غیر یکنواخت ایجاد

۱ - Caping

می شود که توسعه ترکها و در نتیجه گسیختگی را به تعویق می اندازد. در کشش مستقیم توزیع تنش یکنواخت است.

در آزمایش کشش دونیم شدن (ASTM C496) از نمونه های آزمایش فشاری استفاده می شود. نمونه های مورد استفاده در این پایان نامه از نوع استوانه ای و اندازه $10 \times 20 \text{ cm}$ می باشند. این نمونه ها طوری در دستگاه آزمایش قرار می گیرند که محور آن عمود بر جهت بارگذاری باشد. بار افزایش می یابد تا شکست بصورت دو نیم شدن در امتداد قطر استوانه در صفحه قائم اتفاق بیافتد. برای جلوگیری از تمرکز تنش بار از طریق نوارهای باریک نچندان سخت مانند چوب و ... به نمونه وارد می شود. مقاومت کششی دونیم شدن توسط رابطه زیر بدست می آید.

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi LD}$$

۳-۳-۶- مقاومت خمشی: مقاومت خمشی FRC با آزمایش بارگذاری تیر در نقاط یک سوم دهانه مطابق ASTM C 78 یا آزمایش بارگذاری در وسط دهانه مطابق ASTM C 293 بدست می آید، که مورد اول دارای مقبولیت بیشتری است. مقاومت خمشی با توجه به حداکثر بار قابل دستیابی بر اساس نمودار نیرو-تغییر مکان بدست می آید (شکل ۶-۲). در آزمایش خمشی، تنش کششی ماکزیمم در تارهای پایین تیر بوجود می آید که مدول گسیختگی نامیده می شود. در صورتی که طول الیاف و حداکثر بعد سنگدانه ها عامل محدود کننده نباشد، استفاده از نمونه های $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ بدلیل وجود اطلاعات وسیع جهت مقایسه با نتایج دیگر محققان ارجحیت دارد. نمونه ها با همان موقعیتی که قالب ریزی می شوند در دستگاه قرار می گیرند.

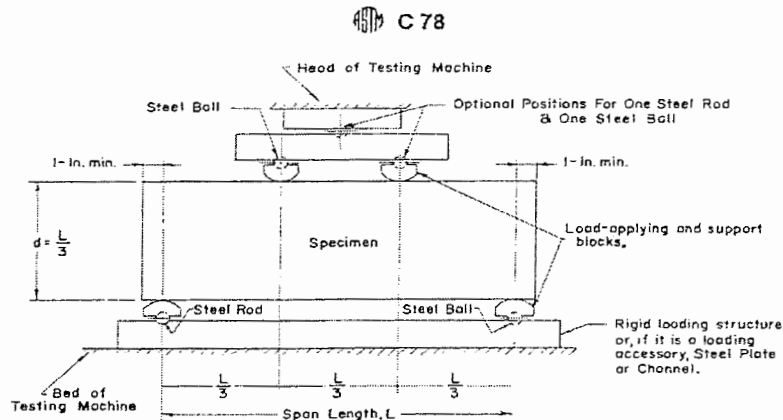
اگر شکست در دهانه وسطی رخ دهد مدول گسیختگی از رابطه زیر بدست می آید:

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

اگر شکست در خارج از دهانه میانی اتفاق بیافتد و فاصله آن از نقاط یک سوم میانی کمتر از $0.05L$ باشد نتایج آزمایش معتبر خواهد بود. در این حالت مدول گسیختگی از رابطه زیر بدست می آید:

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

a: فاصله متوسط بین محل ترک و تکیه گاه می باشد.



شکل ۶-۲- آزمایش خمش در حالت بارگذاری یک سوم دهانه.

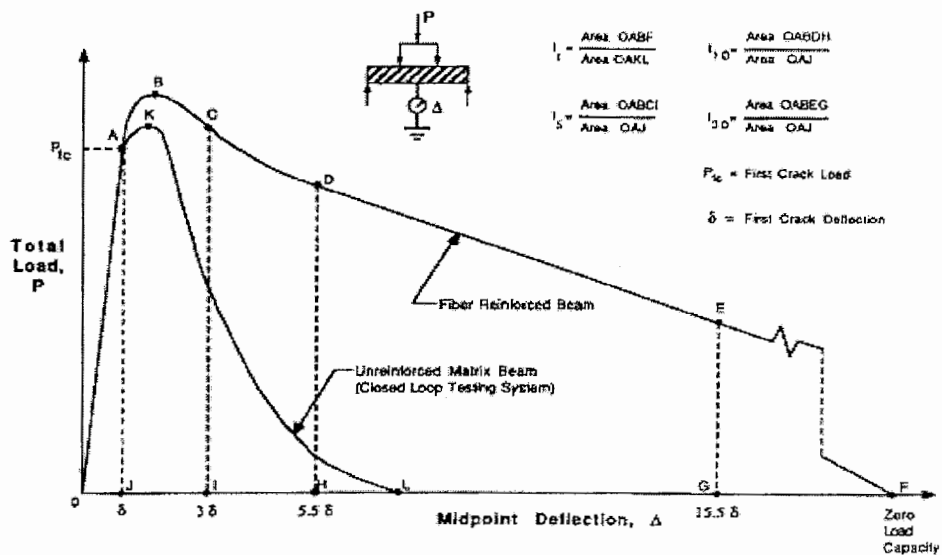
۴-۳-۶- طاق خمشی و مقاومت اولین ترک: طاق نشان دهنده ظرفیت جذب انرژی مصالح

و توانایی مقاومت آنها در مقابل خرابی در اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی می باشد. اندازه گیری طاق و مقاومت اولین ترک با استفاده از آزمایش بارگذاری تیر در نقاط یک سوم دهانه مطابق ASTM C1018 صورت می گیرد. از این آزمایش همچنین می توان برای بدست آوردن مقاومت خمشی بتن استفاده کرد. از اینرو تمام موارد ذکر شده در ASTM C78، در این آزمایش نیز رعایت می شود.

انرژی جذب شده توسط نمونه برابر سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان می باشد. این نمودار بستگی به ابعاد نمونه، چگونگی اعمال بار و سرعت بارگذاری دارد و پارامتر ثابتی نیست. برای برآورد میزان انرژی جذب شده توسط نمونه های FRC پارامتر دیگری پیشنهاد شده است. این پارامتر با تقسیم انرژی جذب شده توسط نمونه ساخته شده از FRC به انرژی جذب شده توسط تیر با همان ابعاد که از ماتریس مسلح نشده با الیاف ساخته شده است بدست می آید. این پارامتر بدون بعد نشان دهنده بهبود خواص مصالح در اثر مسلح شدن با الیاف می باشد. با توجه به مطالب فوق و با فرض اینکه

افزودن الیاف در مقاومت اولین ترک نقشی ندارد، اندیس های طاقت^۱ که برابر سطح زیر نمودار P-Δ تا تغییر مکان مشخص تقسیم بر سطح زیر نمودار تا تغییر مکان نظیر اولین ترک در ماتریس می باشند، تعریف می شوند. اندیسهای I_5 ، I_{10} و I_{30} که به ترتیب نظیر ۳، ۵/۵ و ۱۵/۵ برابر تغییر مکان اولین ترک می باشند در شکل ۳-۶ نشان داده شده اند. اندیسهای طاقت دارای مقدار حداقل ۱ برای رفتار الاستیک شکننده و مقادیر حداکثر ۵، ۱۰ و ۳۰ برای رفتار الاستو پلاستیک می باشند.

طاقت بتن مسلح شده به الیاف همانند آزمایش خمش توسط نمونه های تیر $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ بدست می آید. دستگاه آزمایش باید قادر به ایجاد تغییر مکان با نرخ ثابت باشد. در این آزمایش برای تشکیل منحنی نیرو تغییر مکان، افزایش نیرو مناسب نمی باشد چراکه ثبت اطلاعات بعد از بار حد اکثر با مشکل مواجه می شود. ثبت تغییر مکان در نقاط اعمال بار یا در وسط دهانه انجام می شود. در این پایان نامه بار با سرعت 0.5 mm/min بصورت دو نقطه ای در نقاط یک سوم دهانه وارد می شود.



شکل ۳-۶- مقادیر اندیس طاقت با توجه به نمودار نیرو-تغییر مکان در آزمایش خمش.

۱ - Toughness Indexes(I)

۶-۳-۵- انرژی شکست (G_f):

همانطور که در بخش ۳-۵ گفته شد به منظور اندازه گیری پارامتر G_f برای بتن الیافی از نمونه های خمشی با بارگذاری سه نقطه ای که یک شکاف در وسط دهانه آن تعبیه شده استفاده می شود. ابعاد نمونه ها $10 \times 10 \times 50$ cm (فاصله تکیه گاهها 40 cm) و عمق شکاف ایجاد شده برابر 5 cm می باشد. بار بصورت یک نقطه ای در وسط دهانه با سرعت 1 mm/min اعمال می شود. انرژی شکست با محاسبه سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان و تقسیم آن بر سطح مقطع خالص بدست می آید. در محاسبه G_f از وزن نمونه صرف نظر می شود.

۶-۴- دستیابی به ماتریس سیمانی جهت استفاده در بتن الیافی:

هدف از انجام این مرحله از کار آزمایشگاهی دستیابی به بتنی با کارایی مناسب و مقاومت بالا می باشد. به این منظور با ایجاد تغییر در طرح مخلوطهای اولیه چند طرح جدید انتخاب و از هر کدام نمونه های متعدد ساخته شد. با اعمال روشهای مختلف اختلاط سعی شد تا حد امکان نسبت آب به سیمان کاهش و در عین حال کارایی افزایش یابد. برای ساخت مخلوط های آزمایشی از میکسر استفاده شد و در نهایت یک طرح که حداکثر مقاومت و کارایی مناسب را دارا می باشد، برای تولید بتن با حجم بیشتر با استفاده از بتونیر انتخاب خواهد شد. مبنای پذیرش مخلوط های آزمایشی مقاومت فشاری 7 روزه می باشد.

نمونه ها بعد از حدود $20-24$ ساعت از قالب باز می شوند و عمل آوری در آب با دمای $20^\circ C$ تا زمان شکست ادامه پیدا می کند. عمل آوری تعداد محدودی از نمونه ها با استفاده از آب داغ^۱ انجام می گیرد. در این روش نمونه ها بعد از باز شدن از قالب به مدت 24 ساعت در آب $20^\circ C$ عمل آوری می شوند. سپس دمای آب با نرخ $5^\circ C/h$ تا $90^\circ C$ افزایش پیدا می کند. عمل آوری به مدت 7

۱ - Hot Curing

روز ادامه پیدا می کند و بعد از آن درجه حرارت آب با نرخ 10°C/h کاهش داده می شود. بعد از دوره عمل آوری ۱۱ روزه نمونه ها تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار می گیرند.

۶-۴-۱- روند طراحی بتن با مقاومت بالا:

همانطور که توضیح داده شد برای طراحی بتن با مقاومت زیاد نیاز به مصالحی مانند سیمان، میکروسیلیس، سنگدانه کوارتز و فوق روان کننده است. هرچه مقاومت فشاری بیشتر برای بتن مورد نظر باشد، لازم است نسبت به انتخاب نوع مصالح و کیفیت آنها توجه بیشتری شود و چون مصالح موجود در مناطق مختلف می توانند متفاوت باشند از اینرو روش استاندارد می تواند مانند بتن معمولی روش مشخص برای طراحی بتن مقاومت بالا ارائه داد وجود ندارد. بنابراین بهترین و مطمئن ترین روش برای طراحی و ساخت بتن با مقاومت بالا این است که ابتدا با مصالح موجود و طرح اختلاط اولیه نمونه های آزمایشی ساخته شود، آنگاه با توجه به نتایج بدست آمده در صورت نرسیدن به مقاومت مورد نظر با تغییر یک یا چند جزء می توان به نتیجه مطلوب دست یافت.

نسبت وزنی اجزاء مختلف در طرح مخلوط های اولیه به صورت زیر می باشند:

نسبت وزنی اجزاء تشکیل دهنده	Agg/C	SF/C	W/(C+SF)	SP/(C+SF)
RPC	1.1	0.25	0.22	0.019
DSP	1.58	0.24	0.15	0.06

در طی مرحله اول با توجه به امکانات و مصالح موجود تعداد ۱۰ گروه طرح اختلاط مورد آزمایش قرار گرفت. در هر گروه با ثابت نگه داشتن مصالح خشک تشکیل دهنده (سیمان، میکروسیلیس و سنگدانه) مخلوطهای متعدد با نسبتهای $W/(C+SF)$ و $SP/(C+SF)$ متغیر ساخته شد. نسبت اختلاط مصالح و همچنین دانه بندی سنگدانه های استفاده شده در هر گروه در جدول ۶-۲ خلاصه

شده است. با معلوم بودن نسبت اختلاط مصالح تشکیل دهنده بتن و وزن مخصوص آنها می توان به راحتی وزن آنها را در یک مترمکعب محاسبه نمود.

۶-۴-۲- دانه بندی سنگدانه ها در بتن مقاومت بالا:

برای ساخت بتن با مقاومت بالا استفاده از معیارهای پیشنهاد شده دانه بندی از سوی آیین نامه های مختلف امکان پذیر نیست. برای ساخت این گونه بتن ها در محیط آزمایشگاه باید با استفاده از سنگدانه ها با دانه بندی مشخص مخلوطهای آزمایشی ساخت آنگاه دانه بندی مربوط به نتیجه مطلوب را جهت استفاده در مخلوط نهایی مورد استفاده قرار داد. دانه بندی سنگدانه های مورد استفاده در مخلوطهای آزمایشی در جداول ۶-۳ تا ۶-۷ خلاصه شده است. منحنی دانه بندی آنها نیز در شکل ۶-۴ ترسیم شده است.

جدول ۶-۲- طرح مخلوطهای آزمایشی با استفاده از میکسر

نام طرح اختلاط		MIX-A1	MIX-A2	MIX-A3	MIX-A4
نسبتهای اختلاط	AGG/C	1.1	2	1.1	1.1
	S.F/C	0.25	0.25	0.15	0.25
	AGGREGATE	50% (0.1-0.25mm)	50% (0.1-0.25mm)	50% (0.1-0.25mm)	100% (0-0.6mm)
		50% (0-0.3mm)	50% (0-0.3mm)	50% (0-0.3mm)	----
		----	----	----	----
----		----	----	----	

ادامه جدول ۶-۲- طرح مخلوطهای آزمایشی با استفاده از میکسر

نام طرح اختلاط		MIX-A5	MIX-A6	MIX-A7
نسبتهای اختلاط	AGG/C	1.34	1.58	1.58
	S.F/C	0.25	0.25	0.15
	AGGREGATE	50% (0-0.3mm)	14% (0-0.3mm)	14% (0-0.3mm)
		50% (0.3-1.2mm)	28.5% (0.3-1.2mm)	28.5% (0.3-1.2mm)
		----	57.5% (1.2-4.75mm)	57.5% (1.2-4.75mm)
----		----	----	

ادامه جدول ۶-۲- طرح مخلوطهای آزمایشی با استفاده از میکسر

نام طرح اختلاط		MIX-A8	MIX-A9	MIX-A10
نسبتهای اختلاط	AGG/C	2.5	2.9	2.9
	S.F/C	0.15	0.15	0.15
	AGGREGATE	14% (0-0.3mm)	10% (0-0.3mm)	7% (0-0.3mm)
		28.5% (0.3-1.2mm)	25% (0.3-1.2mm)	10% (0.3-1.2mm)
		57.5% (1.2-4.75mm)	65% (1.2-4.75mm)	10% (1.2-2.4mm)
----		----	73% (2.4-4.75mm)	

جدول ۶-۳- دانه بندی ماسه سیلیسی 0.1-0.25 میلیمتر (منحنی شماره ۱) [Fineness Modulus(F.M)=0.54]

شماره و اندازه الک (ASTM)	جرم مانده روی الک (gr)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی مانده روی الک	درصد تجمعی مصالح عبور کرده
~50(0.297mm)	~0	~0	~0	~100
~70(0.21mm)	~258.1	~18.52	~18.52	~81.48
~100(0.149mm)	~493	~35.38	~53.9	~46.1
~140(0.105mm)	~573.9	~41.18	~95.08	~4.92
~170(0.088mm)	~29	~2.08	~97.16	~2.85
~200(0.074mm)	~23.6	~1.69	~98.85	~1.15
Pan	15.9	~1.14	~100	~0
Sum	~1393.5	~100	~	~

جدول ۶-۴- دانه بندی ماسه کوارتز 0-4.75 میلیمتر (منحنی شماره ۴)

[Fineness Modulus(F.M)=3.35] (MIX-A6&7&8)

شماره و اندازه الک (ASTM)	جرم مانده روی الک (gr)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی مانده روی الک	درصد تجمعی مصالح عبور کرده
~4(4.75mm)	~0	~0	~0	~100
8(2.38mm)	689.1	35	35	65
10(2mm)	151	7.67	42.67	57.33
12(1.68mm)	94.6	4.8	47.47	52.53
16(1.19mm)	165.3	8.4	55.87	44.13
20(0.841)	257.8	13.1	68.97	31.03
30(0.595mm)	193.2	9.8	78.77	21.23
35(0.5mm)	16.2	0.82	79.59	20.41
40(0.42mm)	80.3	4.08	83.67	16.33
~50(0.297mm)	20.9	1.06	84.73	15.27
~70(0.21mm)	~102	~5.18	~89.91	~10.09
~100(0.149mm)	~18.8	~0.95	~90.86	~9.14
~140(0.105mm)	~141.2	~7.17	~98.03	~1.97
~170(0.088mm)	~11.9	~0.6	~98.63	~1.37
~200(0.074mm)	~8.6	~.44	~99.07	~0.93
Pan	17.59	~0.89	~100	~0
Sum	~1968.49	~100	~	~

جدول ۶-۵- دانه بندی ماسه کوارتز 0-0.3 میلیمتر (منحنی شماره ۲) [Fineness Modulus(F.M)=0.38]

شماره و اندازه الک (ASTM)	جرم مانده روی الک (gr)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی مانده روی الک	درصد تجمعی مصالح عبور کرده
~50(0.297mm)	~0	~0	~0	~100
~70(0.21mm)	~186	~31.1	~31.1	~68.9
~100(0.149mm)	~39.7	~6.64	~37.74	~62.26
~140(0.105mm)	~76.5	~12.79	~50.53	~49.47
~170(0.088mm)	~76.3	~12.76	~63.29	~36.71
~200(0.074mm)	~44.3	~7.41	~70.7	~29.3
Pan	175	~29.27	~100	~0
Sum	~597.8	~100	~	~

جدول ۶-۶- دانه بندی ماسه کوارتز 0-0.6 میلیمتر (منحنی شماره ۳)

[Fineness Modulus(F.M)=1.03] (MIX-A4)

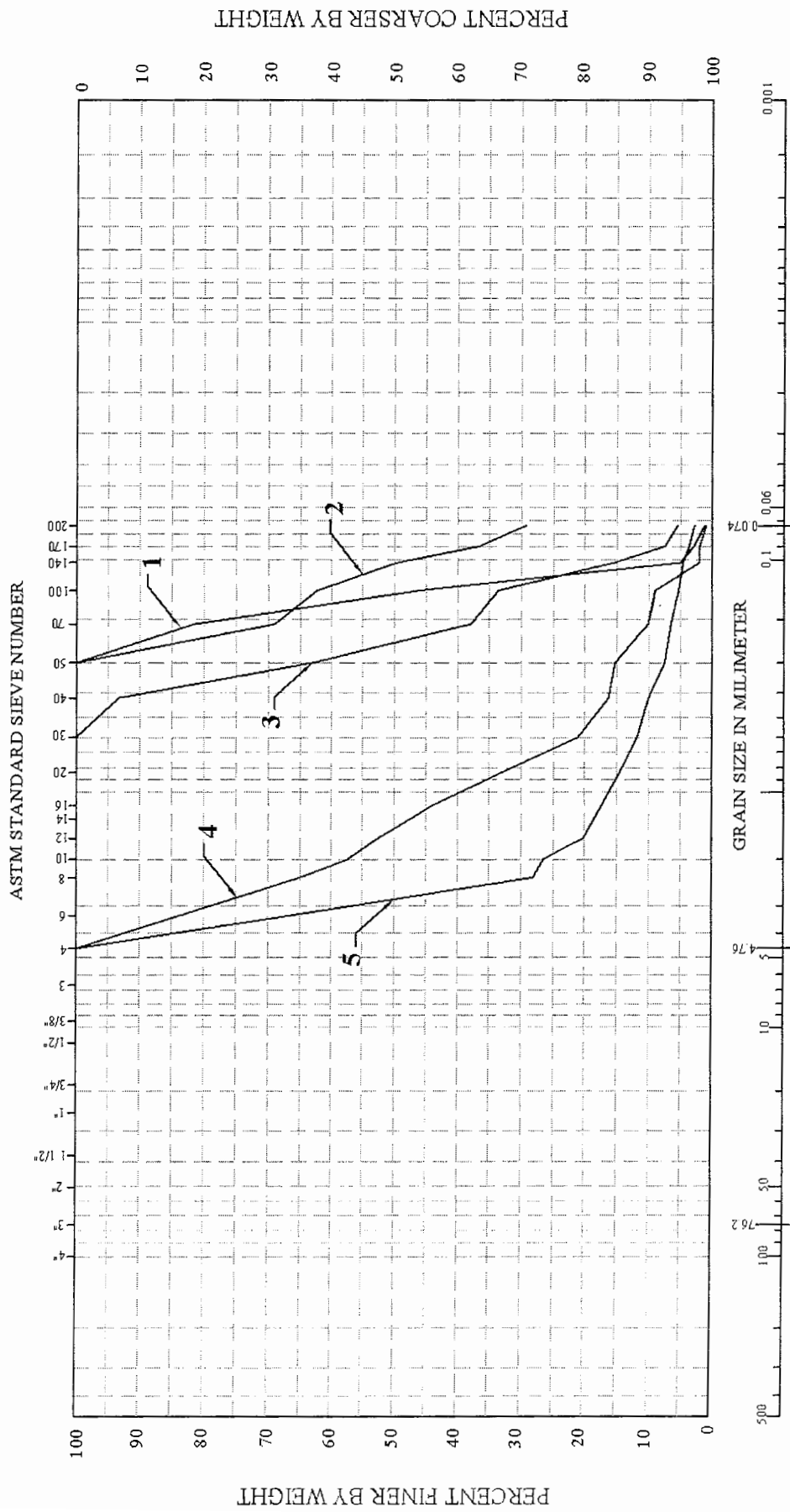
شماره و اندازه الک (ASTM)	جرم مانده روی الک (gr)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی مانده روی الک	درصد تجمعی مصالح عبور کرده
~30(0.595mm)	~0	~0	~0	~100
40(0.42mm)	156.4	6.68	6.68	93.32
~50(0.297mm)	709.3	30.3	36.98	63.02
~70(0.21mm)	~585	~24.97	~61.95	~38.05
~100(0.149mm)	~103.7	~4.42	~66.37	~33.63
~140(0.105mm)	~425.8	~18.2	~84.57	~15.43
~170(0.088mm)	~185.6	~7.9	~92.47	~7.53
~200(0.074mm)	~48.2	~2.05	~94.52	~5.48
Pan	128.7	~5.5	~100	~0
Sum	~2342.7	~100	~	~

جدول ۶-۷- دانه بندی ماسه کوارتز 0-4.75 میلیمتر (منحنی شماره ۵)

[Fineness Modulus(F.M)=4.27] (MIX-A10)

شماره و اندازه الک (ASTM)	جرم مانده روی الک (gr)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی مانده روی الک	درصد تجمعی مصالح عبور کرده
~4(4.75mm)	~0	~0	~0	~100
8(2.38mm)	1362.5	71.92	71.92	28.08
10(2mm)	30.7	1.62	73.54	26.46
12(1.68mm)	119.7	6.32	79.86	20.14
16(1.19mm)	52.5	2.77	82.63	17.37
20(0.841)	53.0	2.8	85.43	14.57
30(0.595mm)	52.7	2.78	88.21	11.79
40(0.42mm)	38.6	2.04	90.25	9.75
~50(0.297mm)	44.0	2.32	92.57	7.43
~70(0.21mm)	18.2	~0.96	~93.53	6.47
~100(0.149mm)	21.8	~1.15	~94.68	~5.32
~140(0.105mm)	13.5	~0.71	~95.39	~4.61
~170(0.088mm)	16.7	~0.88	~96.27	~3.73
~200(0.074mm)	18.4	~0.97	~97.24	~2.76
Pan	52.3	~2.76	~100	~0
Sum	~1894.6	~100	~	~

شکل ۴-۶- منحنی دانه بندی سنگدانه ها



۶-۴-۳- ساخت مخلوطهای آزمایشی:

۶-۴-۳-۱- روش ساخت بتن با مقاومت بالا با استفاده از میکسر:

در این بخش درباره چگونگی ساخت و روند اختلاط بتن پایه بحث می شود. ساخت طرحهای آزمایشی با استفاده از میکسر^۱ انجام می شود و در نهایت طرحهای منتخب با حجم بیشتر توسط بتونیر^۲ ساخته خواهند شد (شکل ۶-۵). سیستم اختلاط مصالح در میکسر و بتونیر با هم تفاوت دارد و بنابراین برای هر کدام باید روش متفاوتی بکاربرد. با تغییر در روش کار، خصوصیات بتن در حالت تازه و مقاومت آن دچار تغییر زیادی می شود. هدف بکار بردن روشی است که بتوان با حداقل نسبت آب به سیمان و مقدار فوق روان کننده محدود بهترین کارایی را بدست آورد. در بتن های با مقاومت بالا نسبت آب به مصالح سیمانی پایین است و رساندن آب به تمام قسمتهای بتن و دستیابی به کارایی مناسب براحتی امکانپذیر نیست. نسبت آب به مصالح سیمانی مهمترین پارامتر موثر در مقاومت فشاری بتن می باشد. به عنوان مثال در مورد MIX-A6 (جدول ۶-۱۰) چنانچه نسبت آب به سیمان کمتر از ۲۰٪ نگه داشته شود مقاومت فشاری ۷ روزه بیش از 1000 kg/cm^2 قابل دستیابی است و چنانچه این نسبت به ۲۴٪ افزایش یابد مقاومت به شدت کاهش پیدا می کند. مقدار مصرف فوق روان کننده نیز باید محدود شود. با افزایش مقدار فوق روان کننده برای دستیابی به مقاومت یکسان باید نسبت آب به سیمان کاهش پیدا کند.

برای ساخت بتن با میکسر از دو روش استفاده می شود. در ادامه هر کدام از این دو روش توضیح داده می شود.

روش A: اختلاط مصالح خشک و اضافه کردن محلول آب و فوق روان کننده: در این روش ابتدا

ماسه های دانه بندی شده به داخل جام میکسر ریخته می شوند. بعد از مخلوط شدن ماسه ها و یکنواخت شدن دانه بندی آنها میکروسیلیس اضافه می شود. ذرات میکروسیلیس بدلیل ریز بودن

۱ - Planar Mixer

۲ - Drum Mixer

معمولا به بدنه جام می چسبند و یا اینکه ته نشین می شوند و باید مصالح به داخل جام دیگری ریخته شوند. دانه های ماسه به پراکنده شدن ذرات میکروسیلیس در تمام قسمتها کمک می کنند. بعد از اختلاط کامل ماسه و میکروسیلیس سیمان به آنها اضافه می شود. در این مرحله نیز بمنظور اختلاط کامل مصالح باید به جام دیگری منتقل می شوند تا میکروسیلیس ته نشین شده با مصالح دیگر کاملا مخلوط شود. سپس محلول ۷۰٪ آب و تمام فوق روان کننده بسیار آهسته و بتدریج در دو یا سه مرحله به مصالح خشک افزوده می شود. در این مرحله نیز مقداری مصالح خشک در ته جام باقی می ماند که باید آن را تعویض کرد. با این مقدار آب و فوق روان کننده بتن بصورت پودر نمناک در می آید. آب و فوق روان کننده به تمام قسمتهای مصالح خشک رسیده اند، ولی برای چسباندن ذرات به یکدیگر آب بیشتری نیاز است. با افزودن ۳۰٪ آب باقیمانده ذرات بتن به هم می چسبند و کارایی لازم بدست می آید. هرچه زمان اختلاط بیشتر می شود فوق روان کننده بیشتر تاثیر می گذارد. بدلیل بالا بودن حجم خمیر و چسبنده بودن افزایش زمان اختلاط باعث کاهش یکنواختی و جداسازی ذرات نمی شود.

روش B: ساخت ژل سیمان و میکروسیلیس و سپس اضافه کردن سنگدانه ها: برای ساخت ژل سیمان و میکروسیلیس دو روش مورد آزمایش قرار گرفت. ترتیب اختلاط مصالح در این دو روش عبارتند از:

- روش اول: سیمان ← آب و فوق روان کننده ← میکروسیلیس
- روش دوم: میکروسیلیس ← آب و فوق روان کننده ← سیمان

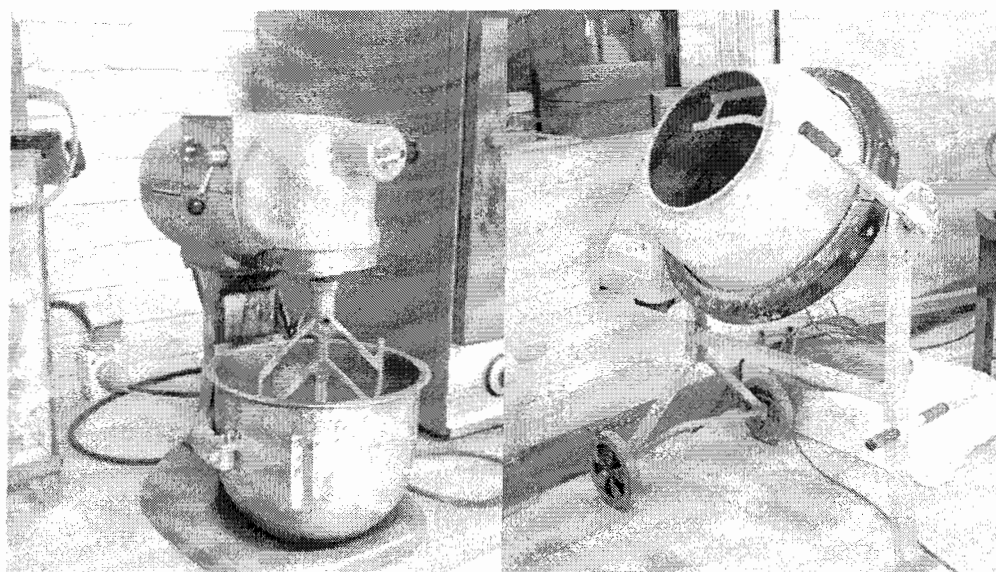
هر کدام از این دو روش با مقدار مصالح (سیمان، میکروسیلیس، آب و فوق روان کننده) کاملا برابر مورد آزمایش قرار گرفتند.

در روش اول ابتدا سیمان و بعد محلول آب و فوق روان کننده به میکسر اضافه شد. آب و فوق روان کننده بعد از ۱ تا ۲ دقیقه اختلاط با دور زیاد کاملا روی ذرات سیمان تاثیر می گذارد. در مرحله

بعد میکروسیلیس به آهستگی در جام میکسر ریخته می شود. به این ترتیب ژل سیمان و میکروسیلیس بصورت مایع بسیار چسبنده و کاملاً روان ساخته می شود. در مرحله آخر مقداری ماسه با دانه بندی مشخص به این ژل اضافه می شود. ماسه بخوبی با ژل مخلوط می شوند و بتن با کارایی نسبتاً خوب حاصل می شود.

در روش دوم تولید ژل ابتدا میکروسیلیس و بعد از آن محلول آب و فوق روان کننده به آهستگی به داخل جام میکسر ریخته می شود. در این مرحله ژل میکروسیلیس با روانی نچندان خوب و چسبندگی زیاد تولید خواهد شد. در ادامه سیمان به آهستگی به ژل میکروسیلیس اضافه می شود. پس از مدت زمان زیادی مخلوط بشکل پودر خشک که اصلاً حالت مایع و روان ندارد در می آید. بنابراین این روش اختلاط رد می شود و روش اول برای ساخت ژل بکار گرفته می شود.

روش اول برای تولید ژل نسبت به روش اول مناسبتر است، چراکه با مقدار آب و فوق روان کننده مشخص کارایی مناسب بدست می آید و روش دوم بدلیل اختلاط ناقص مناسب نمی باشد. بنظر می رسد که فوق روان کننده تاثیر فیزیکی کمی روی ذرات میکروسیلیس داشته باشد. اضافه کردن محلول آب و فوق روان کننده یا آب خالص به میکروسیلیس تفاوت چندانی نمی کند.



شکل ۶-۵- بتونیر و میکسر

در صورت افزودن محلول آب و فوق روان کننده به سیمان بعد از چند ثانیه بتدریج تاثیر فوق روان کننده روی ذرات سیمان شدت می گیرد. در اضافه کردن آب نباید تعجیل کرد، چراکه تاثیر فوق روان کننده بتدریجی و با تاخیر همراه است. در روش دوم ابتدا آب و فوق روان کننده جذب ذرات میکروسیلیس می شوند در حالیکه فوق روان کننده روی میکروسیلیس تاثیر چندانی ندارد. بعد از اضافه کردن سیمان فوق روان کننده کافی در اختیار ذرات سیمان قرار نمی گیرد و مخلوط بسیار خشک است.

مطالب فوق تاثیر قابل ملاحظه ترتیب اختلاط مصالح بروی کارایی و مقدار آب مورد نیاز و در نتیجه

مقاومت بتن را نشان می دهد .

بنابر این روش تولید ژل بصورت زیر خلاصه می شود :

ابتدا سیمان و محلول ۷۰٪ آب و تمام فوق روان کننده بخوبی با هم مخلوط می شوند و بعد از آن میکروسیلیس به آهستگی به آنها اضافه می شود. پس از تولید ژل کاملا روان و چسبنده سیمان و میکروسیلیس ماسه اضافه می شود. پس از گذشت چند دقیقه ذرات ماسه توسط ژل به هم چسبیده می شوند و مخلوط کاملا یکپارچه تولید می شود. در نهایت اگر بتن کارایی لازم را نداشت ۳۰٪ آب باقیمانده به آن اضافه خواهد شد.

با ساخت مخلوط های متعدد این نتیجه حاصل شد که در نسبت آب به سیمان ثابت، بین مقاومت بدست آمده از روش A و B تفاوت چندانی وجود ندارد. به جز اینکه در روش A می توان با نسبت آب به سیمان کمتر به کارایی بهتری دست یافت.

۶-۴-۳-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوطهای آزمایشی:

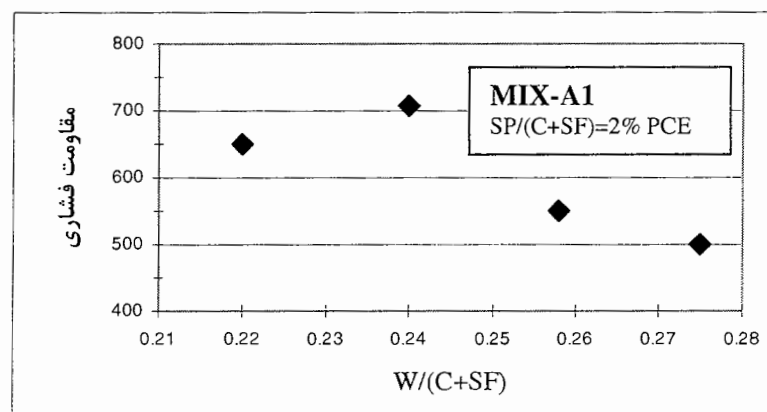
۶-۴-۳-۱- MIX-A1: این مخلوط شباهت زیادی به RPC دارد. RPC به دلیل حجم بالای

سیمان و میکروسیلیس و همچنین ریز بودن دانه بندی سنگدانه ها دارای حالت خمیری بسیار عالی

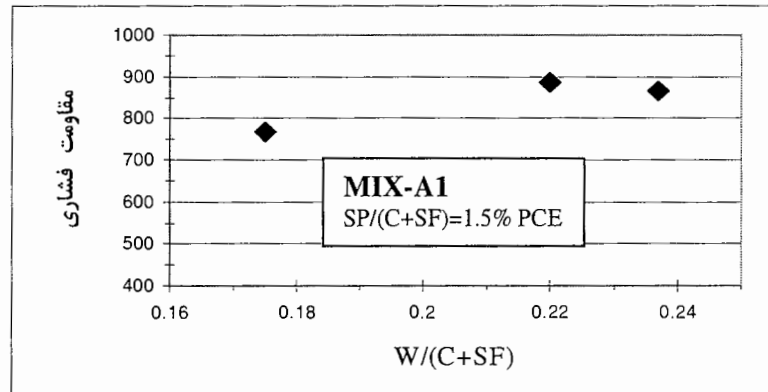
می باشد. دانه بندی سنگدانه ها در MIX-A1 مطابق منحنی های ۱ و ۲ در شکل ۶-۴ می باشد. در جدول ۶-۸ نتایج آزمایش مقاومت فشاری چند نمونه طرح اختلاط MIX-A1 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده نشان داده شده است. نمودارهای ۶-۱، ۶-۲ و ۶-۳ نیز تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه با افزایش نسبت آب به مصالح سیمانی به ازای ۲، ۱/۵ و ۱/۲ درصد فوق روان کننده را نشان می دهند. با ملاحظه نمودارها مشخص می شود که در نسبت آب به مصالح سیمانی پایین به علت کم بودن کارایی و تراکم ناکافی نمونه ها، مقاومت کاهش پیدا می کند. بنابراین یک مقدار بهینه برای آب مورد نیاز وجود دارد که حداکثر مقاومت و کارایی مناسب قابل دستیابی است.

جدول ۶-۸- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A1 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده (kg/m^3)

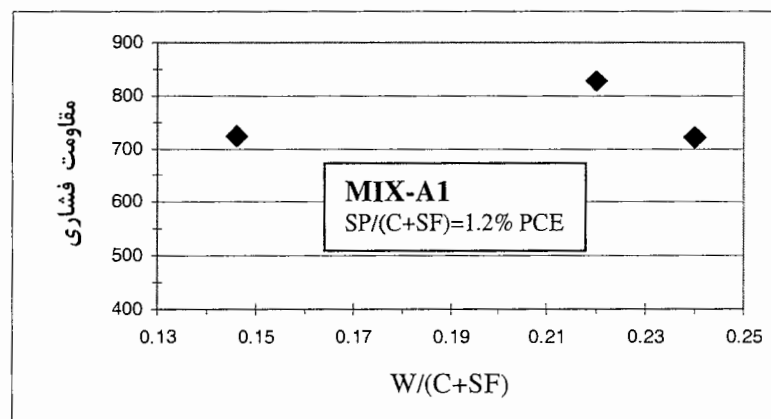
Portland Cement	941	817	896	899
Fine Quartz Sand(0.1-0.25 mm)	518	478	493	495
Fine Quartz Sand(0-0.3 mm)	518	478	493	495
Silica Fume	235	218	224	225
Superplasticizer(PCE)	28.8	21.8	16.8	13.5
Water	198	261	246	247
W/C	0.21	0.3	0.275	0.275
W/(C+S.F)	0.168	0.24	0.22	0.22
S.P/(C+S.F)	2.45%	2%	1.5%	1.2%
مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm^2)	560	706	887	827



نمودار ۶-۱- تغییر مقاومت فشاری MIX-A1 با افزایش نسبت آب به سیمان ($SP/(C+SF)=2\%$)



نمودار ۶-۲- تغییر مقاومت فشاری MIX-A1 با افزایش نسبت آب به سیمان (SP/(C+SF)=1.5%)



نمودار ۶-۳- تغییر مقاومت فشاری MIX-A1 با افزایش نسبت آب به سیمان (SP/(C+SF)=1.2%)

۶-۴-۲- MIX-A2 : در MIX-A2 حجم سنگدانه ها نسبت به MIX-A1 افزایش پیدا کرده ولی دانه بندی آنها بدون تغییر مانده است. با این تغییر کارایی و حالت خمیری به شدت کاهش پیدا می کند و تراکم به راحتی امکان پذیر نیست. افزایش مقدار فوق روان کننده و نسبت آب به مصالح سیمانی در این مخلوط باعث کاهش مقاومت شده است. طرح اختلاط MIX-A2 در جدول ۶-۹ نشان داده شده است.

۶-۴-۳- MIX-A3 : در این مخلوط مقدار میکروسیلیس نسبت به MIX-A1 کاهش پیدا کرده ولی دانه بندی سنگدانه ها بدون تغییر مانده است. حالت خمیری و مقاومت فشاری مخلوط با این تغییر تا حدی کم شد. طرح اختلاط MIX-A3 در جدول ۶-۹ نشان داده شده است.

۴-۶-۳-۲-۴-۶ MIX-A4 : در MIX-A4 دانه بندی سنگدانه ها نسبت به MIX-A1 درشت تر است. منحنی شماره ۳ در شکل ۴-۶ دانه بندی سنگدانه ها در MIX-A4 را نشان می دهد. با این تغییر حالت خمیری و کارایی مخلوط چندان تغییر پیدا نمی کند، ولی مقاومت مقداری کاهش می یابد. طرح اختلاط MIX-A4 در جدول ۹-۶ نشان داده شده است.

۴-۶-۳-۲-۵-۴-۶ MIX-A5 : این مخلوط ترکیبی از RPC و Densit می باشد. در MIX-A5 حجم سنگدانه ها نسبت به RPC کاهش و نسبت به Densit افزایش پیدا کرده است. حجم مصالح سیمانی نیز در آن کمتر از RPC و بیشتر از Densit می باشد. با این تغییرات کارایی مخلوط نسبتا خوب است ولی مقاومت فشاری بهبود پیدا نمی کند.

جدول ۹-۶- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A2...5 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده

	MIX-A2	MIX-A3	MIX-A4	MIX-A5
Portland Cement	635	936	917	863
Fine Quartz Sand	635 (0.1-0.25mm)	514 (0.1-0.25mm)	1008 (0-0.6mm)	386 (0-0.3mm)
	635 (0-0.3mm)	514 (0-0.3mm)	---	771 (0.3-1.2mm)
	---	---	---	---
	---	---	---	---
Silica Fume	159	140	229	216
Superplasticizer(PCE)	15.9	12.9	17.2	16.2
Water	254	257	229	199
W/C	0.4	0.275	0.25	0.23
W/(C+S.F)	0.325	0.239	0.2	0.185
S.P/(C+S.F)	2%	1.2%	1.5%	1.5%
مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm^2)	614	723	731	730

۴-۶-۳-۲-۶-۴-۶ MIX-A6 : این مخلوط تا حدودی شبیه به Densit است. منحنی شماره ۴ در شکل ۴-۶ دانه بندی سنگدانه ها در MIX-A6 را نشان می دهد. این مخلوط با مقادیر مختلف آب و انواع فوق روان کننده مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج تعدادی از آنها در جداول ۶-۱۰ تا ۶-۱۲ خلاصه شده است. مصرف ۱/۵٪ فوق روان کننده PCE و ۴-۵٪ فوق روان کننده NSF و

Sekodense کارایی بتن را به یک میزان بالا می برد. و این درحالی است با استفاده از PCE حتی در نسبت آب به سیمان پایین نیز می توان به مخلوطی با کارایی قابل قبول و مقاومت بالا دست پیدا کرد. با توجه به نمودارهای ۴-۶ تا ۸-۶ مشاهده می شود که حداکثر مقاومت در صورت مصرف ۱/۵٪ فوق روان کننده PCE و در نسبت آب به مصالح خمیری ۱۲/۷-۱۴/۸٪ می باشد. مقاومت ۷ روزه بتن در شرایط عمل آوری استاندارد و عمل آوری در آب داغ به ترتیب به 1270 kg/cm^2 و 1688 kg/cm^2 رسیده است (نمودارهای ۶-۹ و ۶-۱۰).

جدول ۶-۱۰- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A6 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده (kg/m^3)

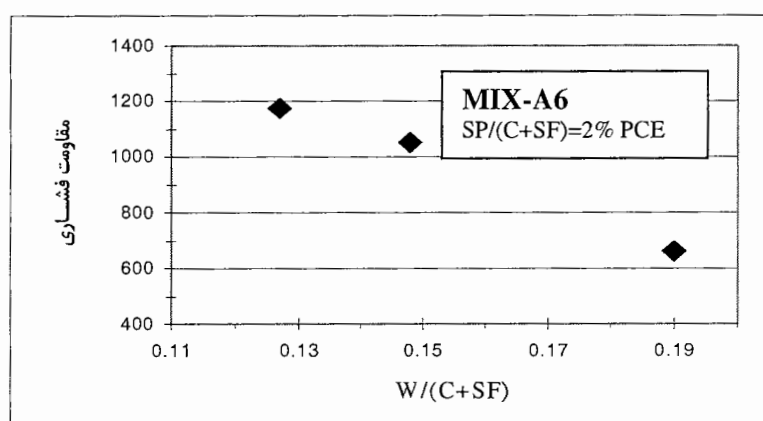
Portland Cement	804	847	852	833	826	811	773
Fine Quartz Sand(0-0.3 mm)	181	191	192	188	186	183	174
Fine Quartz Sand(0.3-1.2 mm)	363	383	385	376	372	366	349
Fine Quartz Sand(1.2-4.75 mm)	726	766	769	752	744	733	698
Silica Fume	200	213	213	209	206	203	193
Superplasticizer(PCE)	39.2	21.2	16	15.6	12.4	10.1	6.8
Water	161	134	135	154	166	181	223
W/C	0.2	0.158	0.158	0.185	0.202	0.223	0.288
W/(C+S.F)	0.16	0.127	0.127	0.148	0.161	0.179	0.233
S.P/(C+S.F)	3.9%	2%	1.5%	1.5%	1.2%	1%	0.7%
مقاومت فشاری ۷ روزه kg/cm^2 20°C	680	1172	1270	1125	1073	1005	620
	---	---	---	1688	1647	1546	---
90°C	---	---	---	1688	1647	1546	---

جدول ۶-۱۱- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A6 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده (kg/m^3)

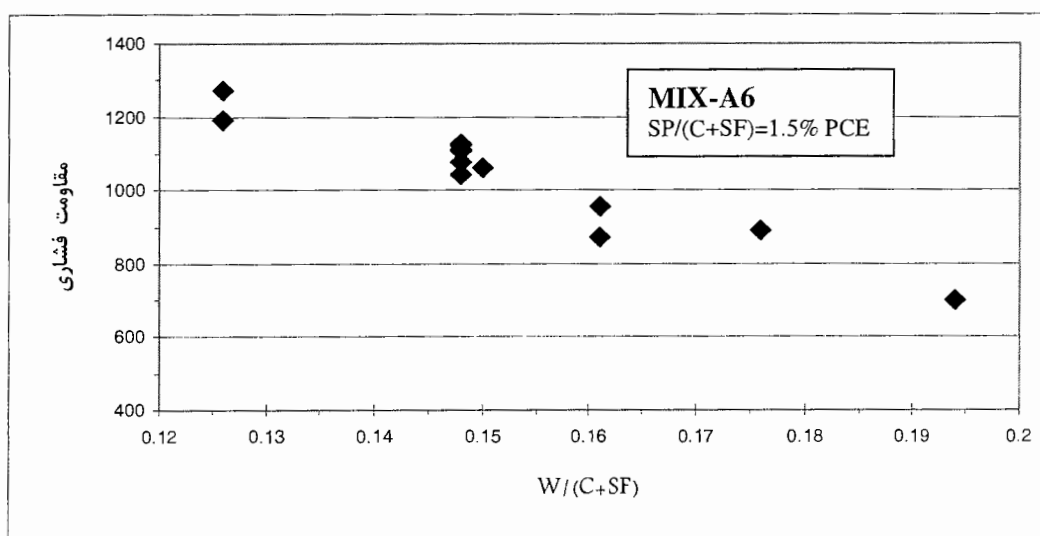
Portland Cement	792	807	807	790	790	788
Fine Quartz Sand(0-0.3 mm)	179	182	182	178	178	177.7
Fine Quartz Sand(0.3-1.2 mm)	357	365	364	357	357	355
Fine Quartz Sand(1.2-4.75 mm)	715	729	729	714	714	711
Silica Fume	198	202	202	198	198	198
Superplasticizer	19.8(NSF)	30.3(NSF)	40.4(NSF)	49.4(NSF)	23.7(PCE+NSF)	39.4(PCE+NSF)
Water	194	169	161	171	190	179
W/C	0.245	0.21	0.2	0.216	0.24	0.227
W/(C+S.F)	0.196	0.17	0.163	0.174	0.193	0.183
S.P/(C+S.F)	2%	3%	4%	5%	0.6%(PCE)&1.8%(NSF)	1%(PCE)&3%(NSF)
مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm^2)	670	820	820	850	810	750

جدول ۶-۱۲- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A6 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده (kg/m^3)

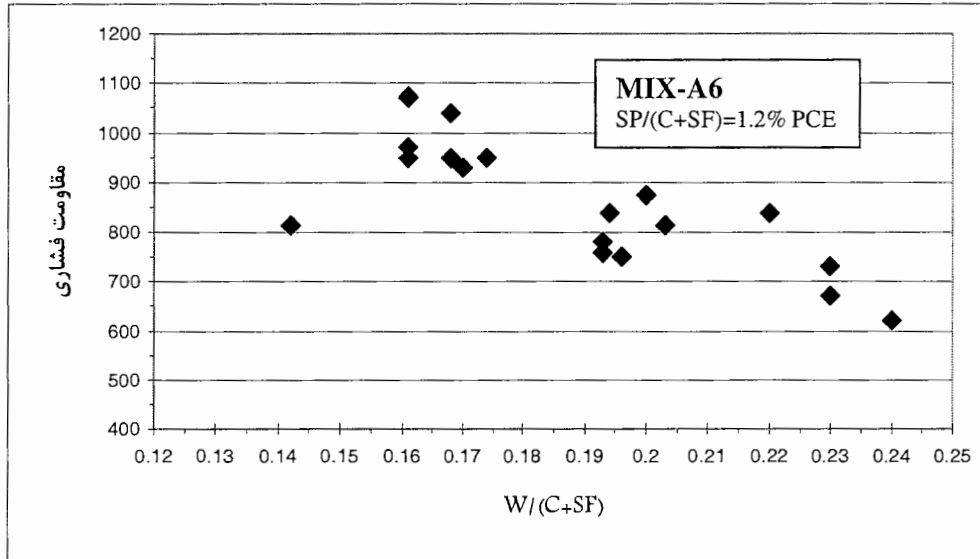
Portland Cement	811	779	801	794
Fine Quartz Sand(0-0.3 mm)	183	176	181	179
Fine Quartz Sand(0.3-1.2 mm)	366	352	361	359
Fine Quartz Sand(1.2-4.75 mm)	732	703	723	717
Silica Fume	203	195	200	199
Superplasticizer(Sekodense)	15.2	24.3	30	39.7
Water	178	207	176	175
W/C	0.22	0.26	0.22	0.22
W/(C+S.F)	0.176	0.21	0.176	0.176
S.P/(C+S.F)	1.5%	2.5%	3%	4%
مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm^2)	---	700	800	830



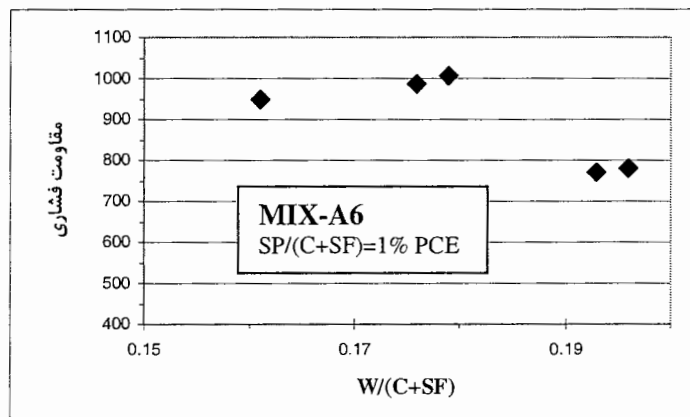
نمودار ۴-۶- تغییر مقاومت فشاری MIX-A6 با افزایش نسبت آب به سیمان ($SP/(C+SF)=2\%$)



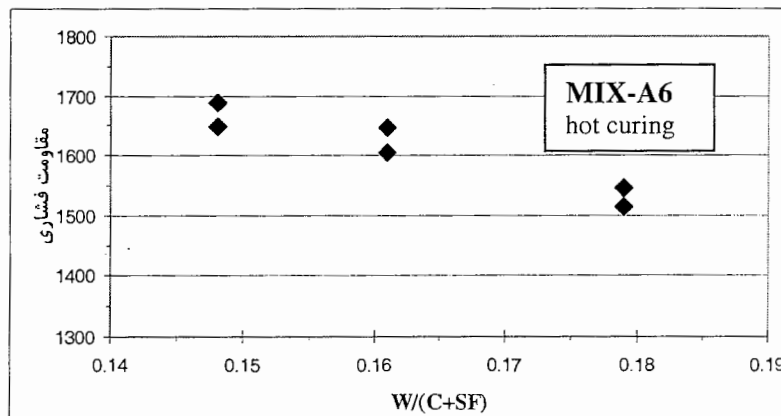
نمودار ۵-۶- تغییر مقاومت فشاری MIX-A6 با افزایش نسبت آب به سیمان ($SP/(C+SF)=1.5\%$)



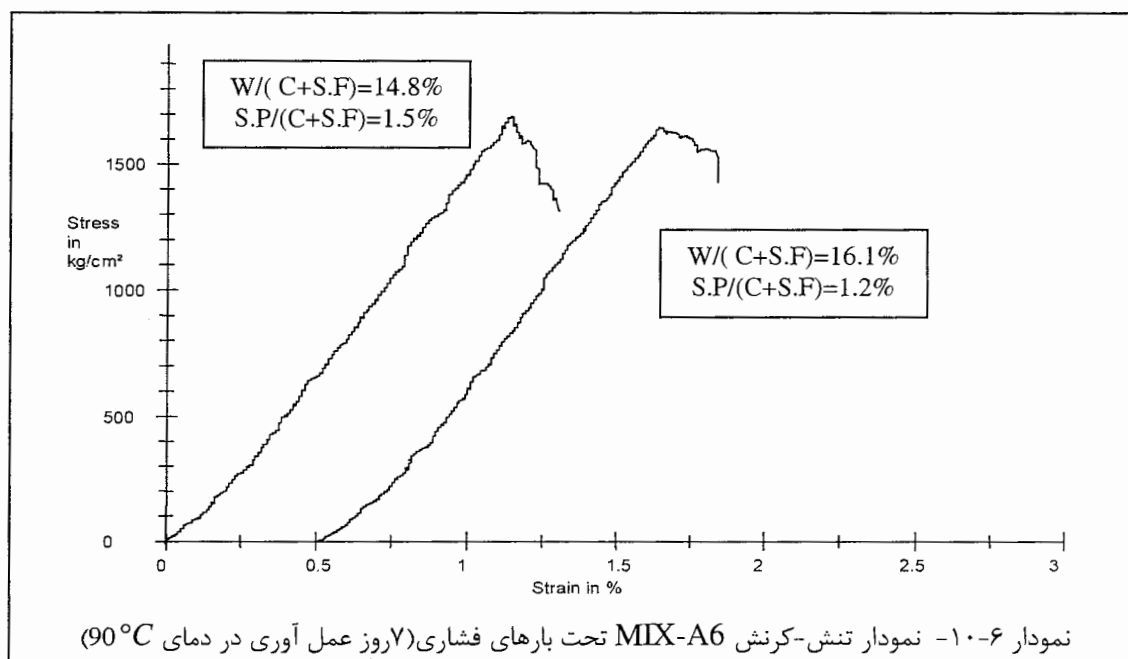
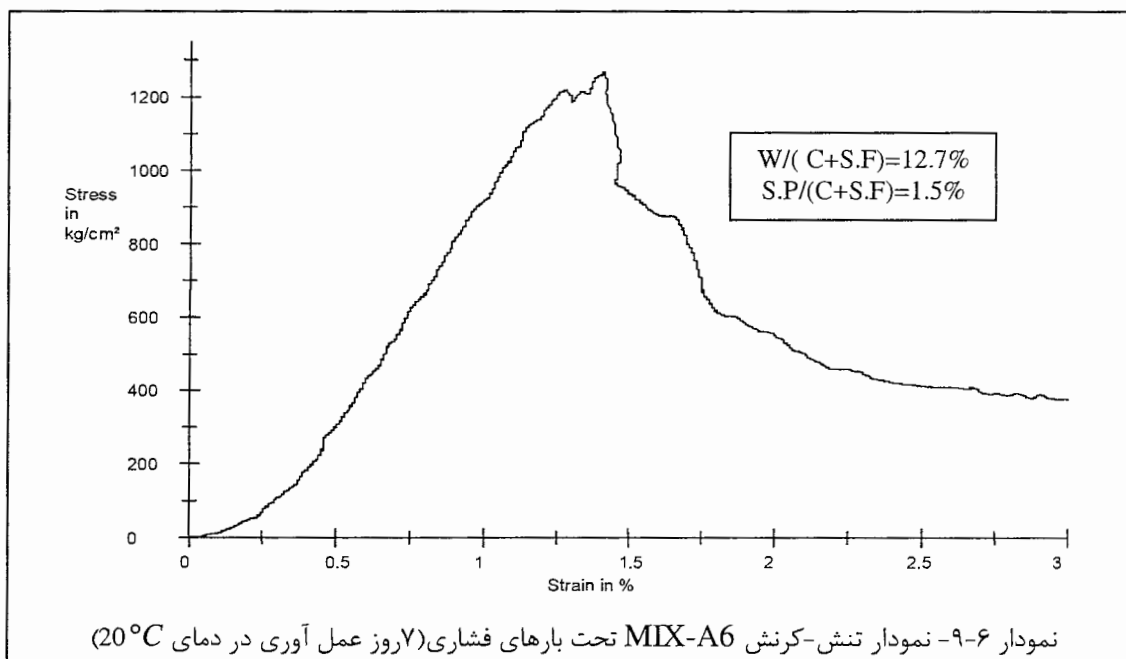
نمودار ۶-۶- تغییر مقاومت فشاری MIX-A6 با افزایش نسبت آب به سیمان (SP/(C+SF)=1.2%)



نمودار ۶-۷- تغییر مقاومت فشاری MIX-A6 با افزایش نسبت آب به سیمان (SP/(C+SF)=1%)



نمودار ۶-۸- تغییر مقاومت فشاری MIX-A6 با افزایش نسبت آب به سیمان (۷ روز عمل آوری در دمای 90°C)



۶-۴-۳-۲-۷- MIX-A7 : در این مخلوط مقدار میکروسیلیس نسبت به MIX-A6 کاهش پیدا کرده ولی دانه بندی سنگدانه ها بدون تغییر مانده است. با این تغییر حالت خمیری و مقاومت فشاری مخلوط تا حدی کم شد. طرح اختلاط MIX-A7 در جدول ۶-۱۵ نشان داده شده است.

۶-۴-۳-۲-۸ - MIX-A8 : دانه بندی سنگدانه ها در MIX-A8 نسبت به MIX-A6 تغییر داده نشده ولی حجم سنگدانه ها افزایش و از مقدار میکروسیلیس کاسته شده است. با ایجاد این تغییرات مقاومت افزایش پیدا نمی کند. کارایی و حالت خمیری نیز کاهش می یابد. طرح اختلاط MIX-A8 در جدول ۶-۱۵ نشان داده شده است.

۶-۴-۳-۲-۹ - MIX-A9 : در MIX-A9 دانه بندی سنگدانه ها نسبت به MIX-A6 کمی تغییر داده شده و همچنین حجم سنگدانه ها افزایش و از مقدار میکروسیلیس کاسته شده است. با ایجاد این تغییرات کارایی و حالت خمیری تا حد زیادی کاهش می یابد به طوری که تراکم بتن به راحتی امکان پذیر نیست. در جداول ۶-۱۳ و ۶-۱۴ طرح اختلاط MIX-A9 با مقادیر مختلف آب و انواع فوق روان کننده نشان داده شده است. ملاحظه می شود که حتی با استفاده از درصد بالای فوق روان کننده بهبود کارایی امکان پذیر نیست.

جدول ۶-۱۳ - طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A9 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده

Portland Cement	603	605	599
Fine Quartz Sand(0-0.3 mm)	175	176	174
Fine Quartz Sand(0.3-1.2 mm)	437	439	434
Fine Quartz Sand(1.2-4.75 mm)	1138	1141	1130
Silica Fume	90	91	89.9
Superplasticizer(PCE)	13.9	10.4	8.3
Water	121	121	132
W/C	0.2	0.2	0.22
W/(C+S.F)	0.174	0.174	0.194
S.P/(C+S.F)	2%	1.5%	1.2%
مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm^2)	930	850	922

جدول ۶-۱۴- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A9 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده (kg/m^3)

Portland Cement	598	598	594	594
Fine Quartz Sand(0-0.3 mm)	173	173	173	173
Fine Quartz Sand(0.3-1.2 mm)	433	433	433	433
Fine Quartz Sand(1.2-4.75 mm)	1126	1126	1125	1125
Silica Fume	90	90	89	89
Superplasticizer	27.5(NSF)	27.5(Sekodense)	34(NSF)	34.2(Sekodense)
Water	119	119	119	119
W/C	0.2	0.2	0.2	0.2
W/(C+S.F)	0.174	0.174	0.174	0.174
S.P/(C+S.F)	4%	4%	5%	5%
مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm^2)	900	800	860	780

۶-۴-۳-۲-۱۰- MIX-A10 : در MIX-A10 حجم سنگدانه مصرفی و مصالح سیمانی نسبت به MIX-A9 بدون تغییر است ولی دانه بندی سنگدانه ها درشت تر شده است(افزایش مدول نرمی). منحنی ۵ در شکل ۴-۶ دانه بندی سنگدانه ها را در MIX-A10 نشان می دهد. کارایی و حالت خمیری این مخلوط بسیار کم می باشد. به طوری که برای تراکم، بتن در چند لایه ریخته و با استفاده از میله پهن کوبیده شد. طرح اختلاط MIX-A10 در جدول ۶-۱۵ نشان داده شده است.

جدول ۶-۱۵- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ روزه MIX-A7&8&10 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده (kg/m^3)

	MIX-A7	MIX-A8	MIX-A10
Portland Cement	856	652	598
Fine Quartz Sand	189 (0-0.3mm)	228 (0-0.3mm)	121 (0-0.3mm)
	385 (0.3-1.2mm)	457 (0.3-1.2mm)	173 (0.3-1.2mm)
	778 (1.2-4.75mm)	913 (1.2-4.75mm)	173 (1.2-2.4mm)
	---	---	1265 (2.4-4.75mm)
Silica Fume	128	98	90
Superplasticizer(PCE)	11.8	30(NSF)	27.5(NSF)
Water	171	134	119
W/C	0.2	0.205	0.2
W/(C+S.F)	0.174	0.177	0.174
S.P/(C+S.F)	1.2%	4%	4%
مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm^2)	844	700	760

۶-۴-۴- ساخت بتن در حجم زیاد با استفاده از بتونیر:

در بخش ۶-۴-۳ با ساخت مخلوطهای آزمایشی متعدد و آزمایش مقاومت فشاری آنها مشخص شد که MIX-A6 با مقادیر $W/(C+S.F)=.۱۲/۷-۱۴/۸$ و $S.P/(C+S.F)=.۱/۵$ دارای بیشترین مقاومت ۷ روزه و کارایی مناسب می باشد. بنابراین طرح مذکور به عنوان طرح اختلاط اصلی برای تولید بتن در حجم زیاد با استفاده از بتونیر انتخاب می شود. در این مرحله نیز براساس طرح اصلی چند طرح اختلاط با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده در حجم زیاد با استفاده از بتونیر تولید و آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه های ۷ و ۲۸ روزه انجام خواهد شد.

۶-۴-۴-۱- روش ساخت بتن با استفاده از بتونیر :

سیستم اختلاط بتونیر و میکسر با هم متفاوت است. در میکسر جام ثابت است و پره همزن با دوران حول دو محور عمودی، فشار زیادی به بتن وارد می کند که این عمل باعث تاثیر بیشتر فوق روان کننده می شود. در مقابل سیستم اختلاط بتونیر به این صورت است که جام حول محور تقریباً افقی دوران می کند و مصالح در داخل جام می غلتند. در واقع مصالح به علت غلتیدن روی هم مخلوط می شوند. زمان اختلاط با بتونیر طولانی تر است و تبخیر آب در آن قابل ملاحظه می باشد. در مقایسه با میکسر برای رسیدن به کارایی یکسان باید آب بیشتری در هنگام اختلاط با بتونیر به بتن اضافه کرد. قسمتی از این آب اضافی تبخیر می شود و مقداری از آن به مصالحی که قبلاً در بتونیر مانده اند جذب می شوند. بهمین دلیل این آب اضافی کارایی را بهبود نمی بخشد و باعث کاهش مقاومت نمی شود. در هنگام اختلاط مصالح با بتونیر زاویه بتونیر تا حد امکان باید افقی باشد. در غیر این صورت مصالح در ته آن جمع می شوند و بی حرکت باقی می مانند.

ترتیب اختلاط مصالح با استفاده از بتونیر به این صورت می باشد که ابتدا ماسه و سپس میکروسیلیس کاملاً با هم مخلوط می شود. سپس سیمان به آنها اضافه شده و اختلاط ادامه پیدا

می‌کند. اختلاط مصالح خشک تولید گرد زیادی می‌کند و باید در این مرحله دهانه بتونیر پوشیده شود. بعد از اختلاط کامل مصالح خشک مشاهده می‌شود که یک لایه میکروسیلیس دور سنگدانه های درشت تر تشکیل شده است. این عامل تاثیر مثبتی دارد، چراکه بیشترین تاثیر میکروسیلیس تقویت ناحیه تماس ماتریس سیمان و سنگدانه می‌باشد. روش اضافه کردن آب به مصالح خشک مهمترین مرحله در اختلاط با بتونیر می‌باشد. اگر مقدار زیادی آب در یک نقطه ریخته شود بدلیل غلتیدن مصالح در بتونیر گلوله های بزرگ تشکیل می‌شود. در این حالت مصالح به دو قسمت، یکی مصالح گلوله شده که آب زیادی به خود جذب کرده اند و قسمت دیگر مصالح خشک تبدیل می‌شوند. در این حالت برای دستیابی به کارایی لازم و اختلاط کامل آب زیادی مصرف می‌شود ($w/c \approx 0.30$) که کاهش مقاومت را بدنبال خواهد داشت. بهمین دلیل محلول آب و فوق روان کننده بصورت جت آب باریک و با شدت به نقاط مناسب روی مصالح خشک که در حال اختلاط هستند پاشیده می‌شود. در این روش مقدار آب مصرفی کاهش قابل ملاحظه ای دارد ($w/c \approx 0.20$). بعد از اینکه 0.70% آب و تمام فوق روان کننده به مصالح خشک پاشیده شد بتن بصورت پودر نمناک به همراه گلوله های کوچک با قطر تقریبی 5mm در می‌آید. در این مرحله اگر بتن به شدت هم زده شود، این گلوله ها از بین می‌روند و مخلوط کاملاً یکدست می‌شود. 0.30% آب باقی مانده برای دستیابی به کارایی لازم کافی می‌باشد.

۶-۴-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوطهای ساخته شده با بتونیر:

در جدول ۶-۱۶ مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه MIX-A6 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده نشان داده شده است. کارایی این مخلوط در نسبت آب به مصالح سیمانی $0.17/2\%$ بسیار خوب و تراکم آن به راحتی و با حداقل انرژی امکان پذیر است. بنابراین مخلوط MIX-A6 با مقادیر $W/(C+S.F)=0.17/2$ و $S.P/(C+S.F)=0.1/5$ که دارای بیشترین مقاومت ۷ و ۲۸ روزه و کارایی

مناسب می باشد به عنوان طرح اختلاط اصلی برای تولید ماتریس بتن الیافی انتخاب خواهد شد. در

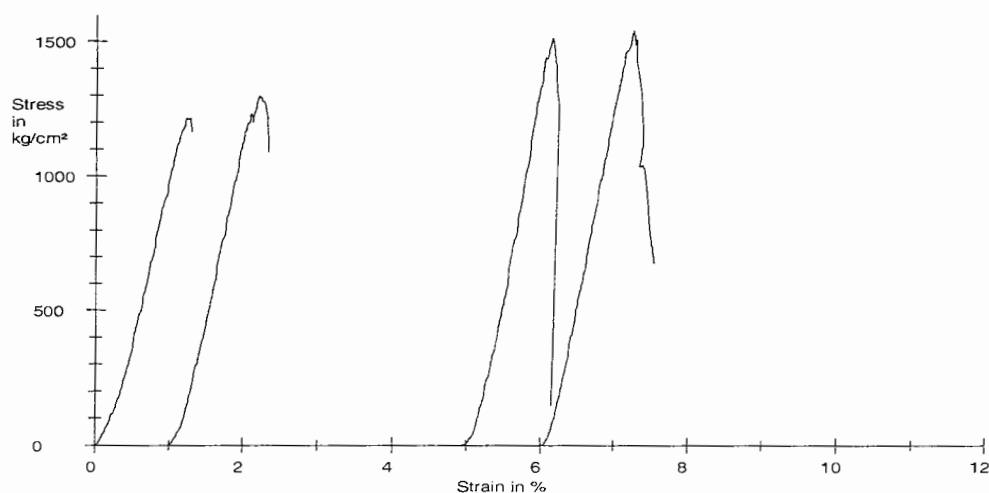
نمودار ۱۱-۶ رفتار MIX-A6 در سنین ۷ و ۲۸ روزه تحت تنشهای فشاری نشان داده شده است.

جدول ۱۶-۶- طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه MIX-A6 (ساخته شده با بتونیر)

با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده (kg/m^3)

Portland Cement	786	801	834	834	826	<u>813</u>
Fine Quartz Sand(0-0.3mm)	178	181	188	188	186	<u>183</u>
Fine Quartz Sand (0.3-1.2mm)	355	362	377	376	373	<u>367</u>
Fine Quartz Sand (1.2-4.75mm)	709	723	753	752	746	<u>734</u>
Silica Fume	196	200	208	208	207	<u>203</u>
Superplasticizer(PCE)	9.8	12	14.1	15.6	15.5	<u>15.2</u>
Water	207	189	154	154	160	<u>175</u>
W/C	0.263	0.236	0.185	0.185	0.194	<u>0.215</u>
W/(C+S.F)	0.21	0.189	0.148	0.148	0.155	<u>0.172</u>
S.P/(C+S.F)	1%	1.2%	1.35%	1.5%	1.5%	<u>1.5%</u>
مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm^2)	1031	1157	1154	1157	1215	1281
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm^2)	1287	1350	1405	1350	1511	1539

Specimen number	σ_m kg/cm ²	ϵ_m mm	W_m Nm
(mix-A6) 1	1215.8	---	---
(mix-A6) 2	1281.6	1.21	737.2
(mix-A6) 3	1511.3	---	---
(mix-A6) 4	1539.3	1.21	886.7



نمودار ۱۱-۶- نمودار تنش- کرنش مخلوطهای ساخته شده با بتونیر تحت بارهای فشاری در سن ۷ و ۲۸ روزه

۶-۵- طراحی هندسه الیاف فولادی سازگار با ماتریس :

در بخش ۶-۴ جزئیات فعالیتهای انجام شده برای دستیابی به ماتریس مناسب جهت استفاده در بتن الیافی تشریح شد. از آنجایی که شکل الیاف یکی از پارامترهای موثر در کیفیت بتن الیافی است در این بخش به ارائه روشی برای تعیین هندسه بهینه الیاف فولادی موجدار سازگار با ماتریس بدست آمده در بخش قبل و همچنین مقاومت کششی نهایی سیم فولادی مورد استفاده برای ساخت الیاف پرداخته می شود. در صورت استفاده از الیاف تغییر شکل یافته در مقدار الیاف مصرف شده صرفه جویی می شود. همچنین سطح زیر منحنی بار- تغییر شکل نمونه های ساخته شده از الیاف تغییر شکل یافته بیشتر از الیاف صاف با درصدهای برابر خواهد بود که نشان دهنده جذب انرژی بیشتر می باشد.

۶-۵-۱- آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی الیاف فولادی:

بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس یا گسیخته شدن آنها در حالت نهایی در نوع رفتار FRC تعیین کننده می باشد. اگر شکست با گسیخته شدن الیاف همراه باشد نمونه مقاومت کششی زیادی را تحمل می کند ولی رفتار آن ترد خواهد بود و چنانچه الیاف از ماتریس بیرون کشیده شوند، بدلیل تدریجی بودن این نوع شکست رفتار نمونه شکل پذیر می باشد. برای دستیابی به هر دو پارامتر مقاومت کششی و شکل پذیری بالا تحت تنشهای کششی و خمشی و در نتیجه بیشترین میزان جذب انرژی باید هندسه الیاف بگونه ای طرح شود تا الیاف در حالت نهایی در آستانه گسیختگی قرارگیرند، ولی قبل از گسیختگی از ماتریس بیرون کشیده شوند در این صورت هر دو پارامتر مقاومت کششی و شکل پذیری بالا قابل دستیابی می باشد.

در ایجا تنها حالتی بررسی می شود که الیاف هم جهت با تنش کششی اعمال شده (عمود بر سطح ترک) قرار گرفته باشند. در این حالت وقتی الیاف در مخلوط بتن تحت کشش قرار می گیرند، چنانچه طول الیاف از طول بحرانی (LC) کمتر باشد بدلیل از بین رفتن پیوستگی حتما از ماتریس

بیرون کشیده می شوند. در صورتی که طول الیاف از L_c بیشتر باشد احتمال اینکه الیاف در حالت نهایی گسیخته شود وجود دارد.

در صورت استفاده از الیاف صاف تنها عوامل موثر نسبت ظاهری $(\frac{L}{d})$ و قطر الیاف می باشد. در این میان استفاده از الیاف با قطر پایینتر بدلیل توزیع بهتر و افزایش تعداد الیاف در واحد حجم (fiber count) باعث می شود که ترکهای بیشتری توسط الیاف مهار شوند که این عامل باعث افزایش مقاومت کششی و شکل پذیری FRC می شود. چنانچه از الیاف موجدار استفاده شود پارامترهای دیگری علاوه بر قطر و نسبت ظاهری اهمیت پیدا می کند. از جمله این پارامترها طول و ارتفاع موجها می باشد. در مورد الیاف صاف تنش چسبندگی و اصطحاکاکی در سطح تماس الیاف و ماتریس کنترل کننده رفتار الیاف می باشد. ولی در مورد الیاف تغییر شکل یافته مثلا موجدار عامل سومی اهمیت پیدا می کند که مهار مکانیکی می باشد. در این موارد الیاف در حین بیرون کشیده شدن در نواحی تغییر شکل یافته جاری شده و تغییر شکل پلاستیک می دهند که باعث ایجاد نیروی مقاوم و جذب انرژی زیاد می شود. کیفیت مهار بستگی به هندسه این موجها و مقاومت ماتریس دارد.

از جمله مهمترین عوامل محدود کننده انتخاب هندسه الیاف، می توان طول و نسبت ظاهری آن را نام برد. طول الیاف باید از یک سوم کوچکترین بعد نمونه کمتر باشد. با توجه به اینکه در آزمایشات مربوط به این تحقیق از قالب هایی با بعد مینیمم 10 cm استفاده می شود، بنابراین طول الیاف باید کمتر از 3 cm باشد. در مورد نسبت ظاهری نیز باید متذکر شد که افزایش نسبت ظاهری باعث کاهش کارایی و توده شدن الیاف و عدم توزیع یکنواخت و تصادفی آنها در تمام حجم ماتریس و در نتیجه افت کیفیت بتن الیافی می شود. با انجام آزمایشات تجربی می توان نسبت ظاهری بهینه را بدست آورد. استفاده از الیاف با نسبت ظاهری بیش از ۱۰۰ اصلا توصیه نمی شود. نسبت ظاهری الیاف صاف و دو انتها قلابدار معمولا بین ۸۵ تا ۴۰ می باشد. باتوجه به اینکه الیاف مجعد نسبت به

الیاف قلابدار دارای مهار مکانیکی بهتری می باشند، لذا این الیاف را می توان با نسبت ظاهری کمتر نیز تولید کرد.

پارامتر دیگر قطر الیاف می باشد. در این تحقیق الیاف از سیمهای فولادی با قطر 0.3 mm ساخته شده اند. این سیمها دارای مقاومت کششی بسیار بالا می باشند و یکی از موارد مصرف آنها تولید فنر است. سیمهای با قطر 0.2 mm نیز در بازار تهران موجود می باشد که بدلیل بالا بودن قیمت واحد وزن آنها نسبت به سیمهای با قطر بالاتر از انتخاب آن صرف نظر شد.

آخرین پارامتر های هندسی الیاف مجعد ارتفاع موج و طول موج می باشد. با توجه به امکانات، طول موج الیاف 2 mm در نظر گرفته می شود. برای دستیابی به مناسب ترین حالت، طول، قطر و طول موج الیاف ثابت در نظر گرفته شد و آزمایشاتی روی الیاف با ارتفاع موجهای مختلف انجام گرفت و در آخر ارتفاع موجی که در آن رفتار الیاف بهتر می باشد به عنوان حالت بهینه معرفی و الیاف بصورت انبوه تولید می شود. انتظار می رود که نمونه های ساخته شده با این الیاف که در حالت تک رفتار خوبی از خود نشان می دهد، مقاومت و شکل پذیری خوبی داشته باشند.

۶-۵-۱-۱- روش انجام آزمایش :

روش استاندارد و کلاسیک انجام آزمایشات مقاومت بیرون کشیدگی الیاف، استفاده از دستگاههای بسیار دقیق با ظرفیت پایین و توانایی اعمال تغییر مکان با نرخ ثابت و ثبت دقیق شاخه صعودی و نزولی نمودار نیرو- تغییر مکان (میزان لغزش الیاف) می باشد. در این حالت با مقایسه رفتار الیاف مختلف می توان الیافی که بیشترین مقدار جذب انرژی (سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان) را دارد به عنوان حالت بهینه معرفی کرد. بدلیل عدم دسترسی به اینگونه دستگاهها بارگذاری الیاف به روش دستی انجام می شود. بار بصورت تدریجی به گونه ای وارد می شود تا در عرض دو تا سه دقیقه بارگذاری خاتمه یابد. انجام این آزمایشات بدلیل پایین بودن قطر سیمها و نیروی قابل تحمل توسط

آنها باید بدقت انجام شود. سیمها باید بصورت کاملا عمودی و با طولهای مشخص در بتن مدفون شوند. سیمهای مورد مصرف در این تحقیق آغشته به روغن هستند و قبل از انجام آزمایش باید حتما با ماده شوینده مناسب شسته شوند. برای هر آزمایش چهار عدد سیم مطابق شکل ۶-۶ در مکعب های بتنی مدفون می شوند. بدلیل کوچک بودن ابعاد مکعبها سنگدانه های $1/2-4/75 mm$ حذف شده اند. قالبها بعد از ۲۴ ساعت باز می شوند و سیمها در نواحی که بیرون از قالب مانده اند و در ناحیه تماس با سطح بتن بخوبی روغنکاری می شوند تا در حین عمل آوری در شرایط استاندارد زنگ نزنند. عمل آوری بمدت ۶ روز بعد از باز شدن قالبها ادامه پیدا می کند. بارگذاری باید بگونه ای انجام شود که هیچگونه لنگر موضعی و تمرکز تنش به سیمها وارد نشود. بعد از انجام آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی، مکعبهای بتنی تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار می گیرند و نتایج آزمایش ثبت می شود. توضیحات بیشتر درباره نحوه انجام آزمایش در شکل ۶-۵ نشان داده شده است. جدول ۶-۱۷ طرح اختلاط ماتریس سیمانی را نشان می دهد.

جدول ۶-۱۷- مشخصات ماتریس بتنی (نسبت وزنی)

Agg/cement	SF/cement	Quartz sand		W/B	SP/B
		0-0.3mm	0.3-1.2mm		
1.58	0.25	33%	67%	15.5-19%	1.5%

۶-۵-۱-۲- نتایج آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی الیاف فولادی:

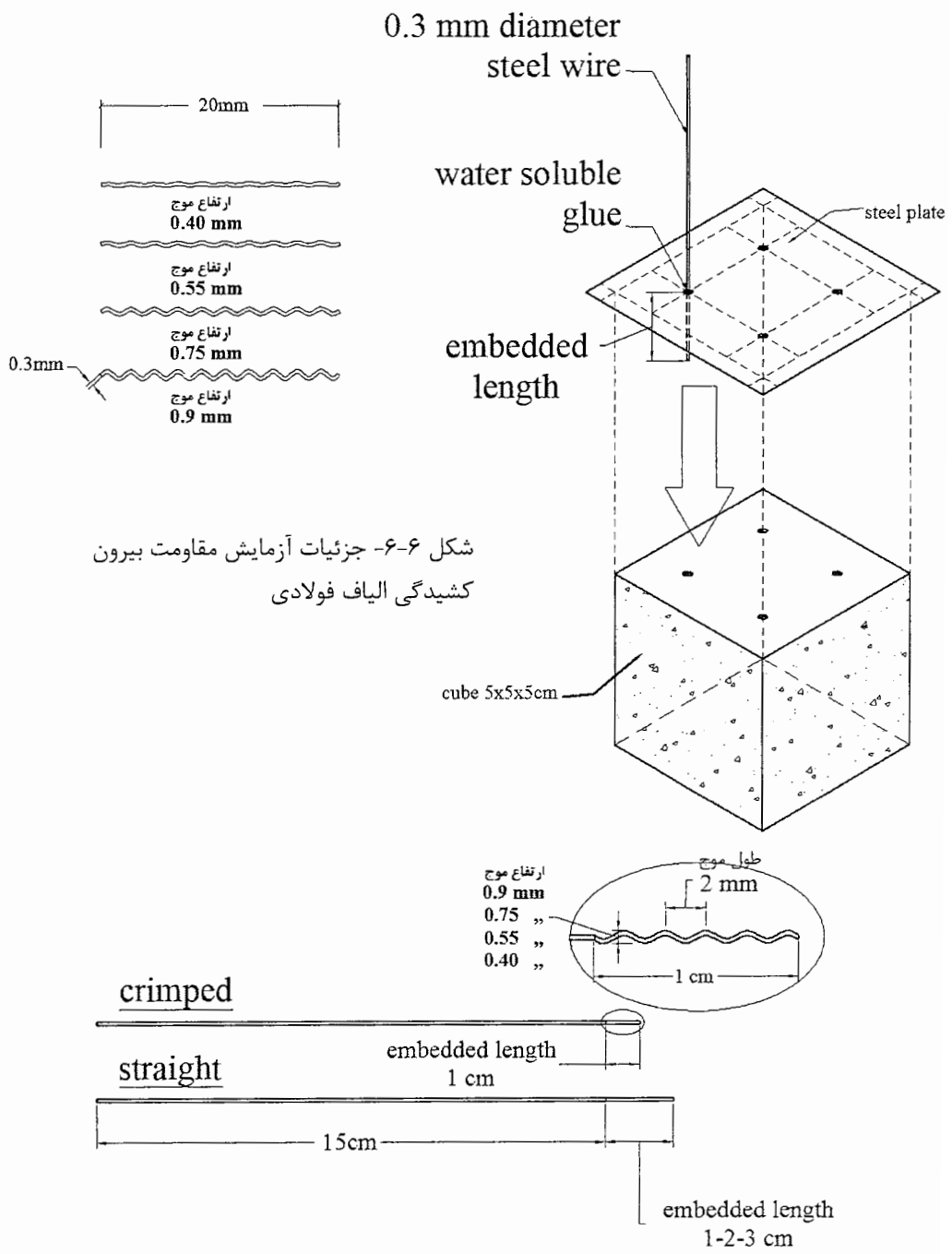
نتایج آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی روی الیاف صاف و مجعد با طولهای مختلف در جداول ۶-۱۸ و ۶-۱۹ خلاصه شده است.

الیاف صاف با سه طول مدفون متفاوت در ماتریس بتنی مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج این آزمایشات به این ترتیب می باشند:

- الیاف صاف با طول مدفون 1 cm با نیروی متوسط $6/32\text{ kg}$ از ماتریس بیرون کشیده می شوند، و چنانچه طول مدفون به 2 cm افزایش پیدا کند نیروی بیرون کشیدگی به $11/2\text{ kg}$ می رسد. در صورتیکه الیاف صاف 3 cm در داخل ماتریس مدفون شوند قبل از بیرون کشیده شدن از ماتریس گسیخته خواهد شد.
- با توجه به نتایج آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی روی الیاف صاف با طول مدفون 2 و 3 سانتیمتر که گسیخته شده اند، مقاومت کششی نهایی سیم فولادی 18570 kg/cm^2 تخمین زده می شود.

جدول ۶-۱۸- نتایج آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی الیاف فولادی صاف با قطر 0.3mm (سن ماتریس بتنی ۷ روز)

مقاومت فشاری cube 5x5x5 :			مقاومت فشاری cube 5x5x5 :			مقاومت فشاری cube 5x5x5 :		
1207 kg/cm^2			1157 kg/cm^2			1150 kg/cm^2		
طول مدفون (cm)	نیروی تحمل شده (kgf)	مود گسیختگی	طول مدفون (cm)	نیروی تحمل شده (kgf)	مود گسیختگی	طول مدفون (cm)	نیروی تحمل شده (kgf)	مود گسیختگی
1	6.39	pullout	2	11.72	pullout	3	13.27	Fiber failure
1	5.79	pullout	2	12.75	Fiber failure	3	13.50	Fiber failure
1	6.65	pullout	2	11.75	pullout	3	12.88	Fiber failure
1	6.45	pullout	2	10.50	pullout	3	13.25	Fiber failure



شکل ۶-۶- جزئیات آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی الیاف فولادی

جدول ۶-۱۹- نتایج آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی الیاف مجعد با قطر 0.3mm و طول مدفون 1cm (سن ماتریس بتنی ۷ روز)

مقاومت فشاری cube 5x5x5 :			مقاومت فشاری cube 5x5x5 :		
742 kg/cm ²			1156 kg/cm ²		
ارتفاع موج (mm)	نیروی تحمل شده (kgf)	مود گسیختگی	ارتفاع موج (mm)	نیروی تحمل شده (kgf)	مود گسیختگی
0.9	12.95	Fiber failure	0.9	10.10	Fiber failure
0.9	13.14	Fiber failure	0.9	10.25	Fiber failure
0.9	12.75	Fiber failure	0.9	11.50	Fiber failure
0.9	12.62	Fiber failure	0.9	10.50	Fiber failure
مقاومت فشاری cube 5x5x5 :			مقاومت فشاری cube 5x5x5 :		
764 kg/cm ²			1149 kg/cm ²		
ارتفاع موج (mm)	نیروی تحمل شده (kgf)	مود گسیختگی	ارتفاع موج (mm)	نیروی تحمل شده (kgf)	مود گسیختگی
0.55	12.10	pullout	0.55	12.58	Fiber failure
0.55	13.15	Fiber failure	0.55	11.75	Fiber failure
0.55	6.23	pullout	0.55	13.16	Fiber failure
0.55	10.27	pullout	0.55	11.52	Fiber failure
مقاومت فشاری cube 5x5x5 :			مقاومت فشاری cube 5x5x5 :		
958 kg/cm ²			1135 kg/cm ²		
ارتفاع موج (mm)	نیروی تحمل شده (kgf)	مود گسیختگی	ارتفاع موج (mm)	نیروی تحمل شده (kgf)	مود گسیختگی
0.75	13.12	Fiber failure	0.40	13.51	Fiber failure
0.75	8.35	Fiber failure	0.40	13.24	Fiber failure
0.75	12.57	Fiber failure	0.40	12.56	pullout
0.75	11.54	Fiber failure	0.40	12.72	pullout

الیاف مجعد با طول مدفون 1 cm و چهار ارتفاع موج مختلف در ماتریس با مقاومت فشاری های متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند نتایج آزمایشات به این ترتیب می باشند:

- الیاف مجعد با ارتفاع موج 0.9 mm در تمام حالات گسیخته می شود. محل این گسیختگی عموماً در اولین موج، نزدیک سطح بتن می باشد. با افزایش مقاومت فشاری ماتریس این نیروی گسیختگی کاهش پیدا می کند (نیروی گسیختگی کمتر از مقاومت کششی نهایی می باشد).
- الیاف مجعد با ارتفاع موج 0.55 mm چنانچه در ماتریس با مقاومت پایین مدفون شوند با نیروی بالایی (نیروی نزدیک به مقاومت کششی نهایی) بیرون کشیده می شوند و چنانچه مقاومت ماتریس افزایش یابد گسیخته می شوند.
- الیاف مجعد با ارتفاع موج 0.4 mm که در ماتریس با مقاومت زیاد مدفون شده اند با نیروی نزدیک به مقاومت کششی نهایی بیرون کشیده می شوند.
- الیاف مجعد با ارتفاع موج 0.75 mm نیز در حالت نهایی گسیخته می شوند. محل این گسیختگی عموماً در اولین موج، نزدیک سطح بتن می باشد.
- در مواردی که الیاف مجعد بیرون کشیده شده اند، تخریب ماتریس در هیچکدام از موارد دیده نشد و موجها تقریباً صاف شده اند.

باتوجه به اینکه مقاومت فشاری ماتریس مورد استفاده در این تحقیق بیش از 1200 kg/cm^2 می باشد، در نهایت مشخصات الیاف فولادی مجعد مورد استفاده به این ترتیب می باشد:

طول الیاف = 20 mm ، قطر = 0.3 mm ، طول موج = 2 mm ، ارتفاع موج = 0.40 mm

۶-۶- تولید الیاف فولادی:

علیرغم پیشرفتهای اساسی در زمینه تکنولوژی ساخت بتن الیافی و کاربرد وسیع آن در اکثر نقاط جهان، متأسفانه در کشور ما بجز در مواردی خواص و محدود از این مصالح استفاده چندانی

نمی شود. دلایل اصلی آن عدم شناخت کافی در زمینه بتن الیافی و عدم وجود امکانات کافی و مناسب برای ساخت آن می باشد.

در کشوری همچون ترکیه، بکارگیری بتن الیافی به جای روش‌های سنتی، مقرون به صرفه تر از کشور ماست، که ریشه های آن را در سرمایه‌گذاری و تلاش سازمان‌یافته جهت اقتصادی نمودن استفاده از این تکنولوژی جدید می توان یافت. اما اگر از روی آوردن به فناوری جدید به علت ریسک سرمایه‌گذاری پرهیز شود، تکنولوژی سنتی در غیاب بهره‌گیری از فناوری نوین، رقم بسیار بالایی از سرمایه‌ها را به هدر خواهد داد، و اگر قرار باشد تمام این تکنولوژی صرفاً در سطح یک محصول آماده، به کشور وارد شود، طبیعی است که متحمل هزینه‌های سنگینی خواهیم شد و محصول نهایی نیز به صرفه نخواهد بود.

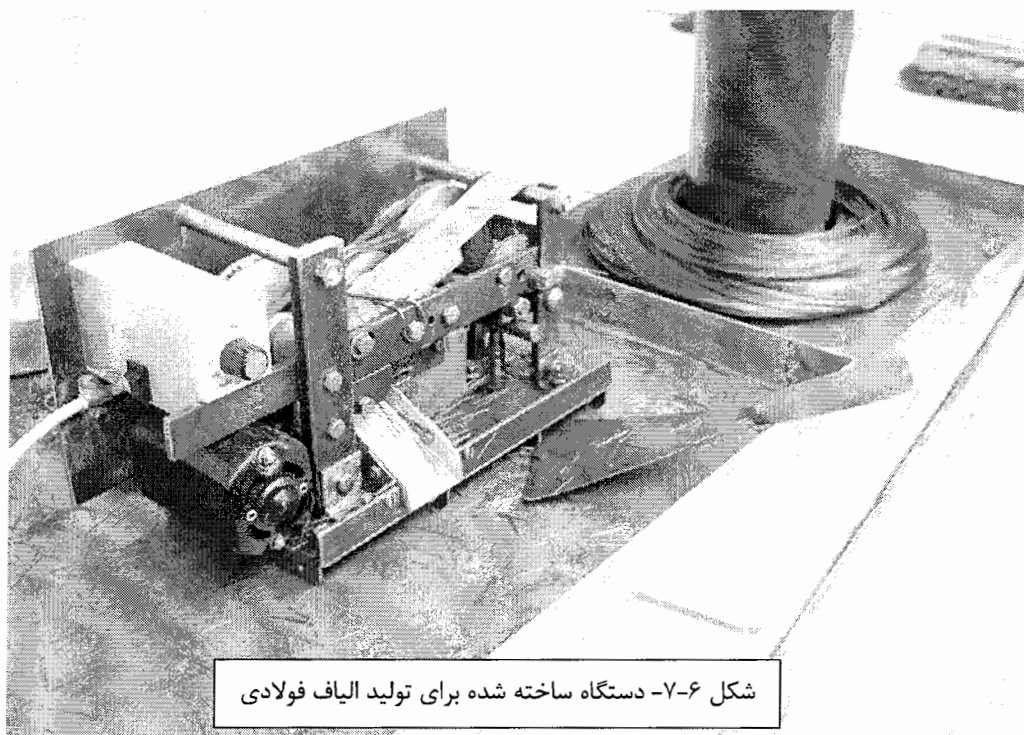
هم اکنون بتن الیافی با الیاف تقویت‌کننده پلی پروپیلن به بازار مصرف ایران راه یافت و در انجام پروژه‌هایی به کار گرفته شد. اما استفاده از این نوع الیاف تنها در کنترل ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی بتن سودمند می باشد و مقاومت کششی، خمشی و فشاری بتن افزایش چندانی نشان نمی دهد. یکی از پرمصرف‌ترین و بهترین نوع الیاف، الیاف فولادی است، که به دلیل شکل‌پذیری و تامین‌گیرداری در بتن و مقاومت کششی و سختی مطلوب، نظر اکثر طراحان را در سراسر جهان به خود جلب کرده است.

در حال حاضر بسیاری از دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی علاقه مند به تحقیق در زمینه بتن الیافی می باشند. اما با توجه به مشکلات موجود جهت تامین الیاف فولادی مورد نیاز، از قبیل هزینه خرید، حمل، گمرک، ارزبری، زمان بری و... تحقیقات انجام شده در زمینه بتن الیافی در کشور بسیار محدود است. از اینرو نیاز به ارئه روشی برای تولید سریع و اقتصادی الیاف فولادی احساس می شود. تا با توسعه این تکنولوژی موجبات تبدیل این صنعت از حالت لوکس و پرهزینه به صنعت بومی فراهم شود.

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن برای اولین بار در ایران، در سال ۱۳۷۴ اقدام به تولید الیاف فولادی نمود. شکل الیاف بصورت مجعد و با سطح مقطع دایره ای با قطر ۰/۵ و ۱ میلیمتر انتخاب گردید. برای شکل دادن به مفتولها فولادی از دستگاهی متشکل از دو چرخ دنده با قطرهای متفاوت استفاده شد. یکی از چرخ دنده ها به الکتروموتور وصل بوده و قابلیت دوران دارد و بر اثر چرخش آن، مفتولهای فولادی مستقیم از بین چرخ دنده عبور کرده و بصورت موجدار شکل داده می شود. به همین منظور ابتدا دسته های مفتول شامل چند رشته به طول یک متر تهیه و سپس از بین چرخ دنده ها عبور داده می شود. و در نهایت توسط گیوتین و با استفاده از شابلن به اندازه دلخواه برش داده می شود. بعد از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تحقیقات دیگری در تعدادی از دانشگاهها نظیر دانشگاه مازندران، شیراز، تهران و خواجه نصیر طوسی از روش مشابه برای تولید الیاف فولادی استفاده کردند.

۶-۶-۱- دستگاه ساخت الیاف فولادی:

با کاهش قطر الیاف، طول آن در واحد وزن افزایش پیدا می کند. به عنوان مثال طول یک کیلوگرم الیاف فولادی با سطح مقطع دایره ای به قطر یک میلیمتر برابر ۱۶۰ متر است. درحالی که یک کیلوگرم الیاف فولادی با قطر ۰/۳ میلیمتر، ۱۸۰۰ متر طول دارد. از آنجایی که کاهش قطر الیاف تاثیر مثبتی در بهبود عملکرد بتن الیافی دارد، لذا تولید دستی آن روش مناسبی به نظر نمی رسد و نیاز به طراحی سیستمی خودکار برای خم کردن و برش الیاف است. در این تحقیق به منظور تولید سریع و دقیق الیاف فولادی دستگاه کوچکی طراحی و ساخته شد. این دستگاه در هر ساعت قادر به تولید ۲-۱/۵ کیلوگرم الیاف مجعد مطابق با مشخصات ذکر شده در بخش ۶-۵ می باشد، و همچنین قابلیت تنظیم برای ساخت انواع دیگری الیاف با طول، قطر، ارتفاع موج و طول موج مختلف را دارا می باشد(شکل ۶-۷).



شکل ۶-۷- دستگاه ساخته شده برای تولید الیاف فولادی

۶-۷- ساخت نمونه های اصلی بتن الیافی و آزمایشات نهایی:

پس از دستیابی به ماتریس مناسب برای ساخت بتن الیافی با استفاده از بتونیر و همچنین ساخت الیاف فولادی سازگار با آن، اقدامات اولیه برای ساخت نمونه های اصلی بتن الیافی و تعیین خصوصیات مکانیکی آنها صورت گرفته است. در این مرحله با توجه به طرح اختلاط نهایی بدست آمده در بخش ۶-۴ تعداد ۸ مخلوط بتن الیافی با مقادیر آب، فوق روان کننده و الیاف فولادی توسط بتونیر ساخته می شود. با هر بار اختلاط تعداد یک تیر شکاف دار (۵۰X۱۰X۱۰) برای آزمایش انرژی شکست، یک تیر (۴۰X۱۰X۱۰) برای آزمایش خمش چهار نقطه ای، دو استوانه (۱۰X۲۰) برای آزمایش کشش دونیم شدن و دو یا سه نمونه مکعبی (۱۰X۱۰X۱۰) برای تعیین مقاومت فشاری ساخته خواهد شد.

طرح اختلاط مخلوطهای بتن الیافی و ماتریس بدست آمده در بخش ۴-۶، در جدول ۶-۲۰ خلاصه شده است. همان طور که مشاهده می شود، در مخلوطهای SFRC-1 تا SFRC-5 نسبت آب به سیمان برابر و مقدار فوق روان کننده افزایش پیدا می کند و در مخلوطهای SFRC-6 تا SFRC-8 مقدار فوق روان کننده ثابت و نسبت آب به سیمان تغییر می کند.

جدول ۶-۲۰- طرح اختلاط بتن الیافی (kg/m^3)

نام مخلوط	MIX-A6	SFRC-1	SFRC-2	SFRC-3	SFRC-4
Portland Cement	813	796	791	787	782
Fine Quartz Sand(0-0.3mm)	183	180	179	178	176
Fine Quartz Sand (0.3-1.2mm)	367	359	357	355	353
Fine Quartz Sand (1.2-4.75mm)	734	719	715	710	706
Silica Fume	203	199	198	197	195
Superplasticizer(PCE)	15.2	14.9	15.8	16.7	17.6
Water	175	171	170	169	168
Steel Fiber(volume percent)	Without fiber	157(2%)	196(2.5%)	236(3%)	275(3.5%)
W/C	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215
W/(C+S.F)	0.172	0.172	0.172	0.172	0.172
S.P/(C+S.F)	1.5%	1.5%	1.6%	1.7%	1.8%

ادامه جدول ۶-۲۰- طرح اختلاط بتن الیافی (kg/m^3)

نام مخلوط	SFRC-5	SFRC-6	SFRC-7	SFRC-8
Portland Cement	777	770	779	787
Fine Quartz Sand(0-0.3mm)	175	174	176	177
Fine Quartz Sand (0.3-1.2mm)	351	347	351	355
Fine Quartz Sand (1.2-4.75mm)	702	695	703	710
Silica Fume	194	192	195	197
Superplasticizer(PCE)	18.5	14.4	14.6	14.7
Water	167	183	179	176
Steel Fiber(volume percent)	314(4%)	275(3.5%)	236(3%)	196(2.5%)
W/C	0.215	0.238	0.23	0.224
W/(C+S.F)	0.172	0.19	0.184	0.179
S.P/(C+S.F)	1.9%	1.5%	1.5%	1.5%

۶-۷-۱- روش ساخت بتن الیافی با استفاده از بتونیر :

ساخت بتن الیافی به روش مشابه با بتن خالی در بخش ۴-۶ انجام می شود. به این ترتیب که ابتدا ماسه و سپس میکروسیلیس کاملاً با هم مخلوط می شود و سپس سیمان به آنها اضافه می شود. پس از اختلاط کامل مصالح خشک، محلول ۷۰٪ آب و تمام فوق روان کننده موجود در طرح اختلاط به نقاط مناسب روی مصالح خشک که در حال مخلوط شدن هستند پاشیده می شود. در این مرحله بتن بصورت پودر نمناک به همراه گلوله های کوچک در می آید که باید به شدت هم زده شود تا گلوله ها از بین بروند و مخلوط کاملاً یکدست شود. سپس الیاف به آرامی با استفاده از الک "3/4" روی مصالح داخل بتونیر که در حال اختلاط هستند پاشیده می شود. در مرحله آخر نیز ۳۰٪ آب باقیمانده به مخلوط اضافه می شود و اختلاط تا مدت زمان نسبتاً زیاد (در حدود ۳۰ دقیقه) تا دستیابی به کارایی مناسب ادامه پیدا می کند.

۶-۷-۲- نتایج آزمایشات مقاومت فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست بتن الیافی:

۶-۷-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری:

نتایج آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه های مکعبی بتن الیافی در جدول ۶-۲۱ خلاصه شده است. به منظور مقایسه با حالت بدون الیاف، مقاومت فشاری مخلوط MIX-A6 نیز در این جدول آمده است. در اثر افزودن الیاف مقاومت فشاری تنها به میزان ۶ تا ۲۸ درصد افزایش پیدا می کند، اما انرژی جذب شده تحت تنشهای فشاری ۱۲ تا ۱۵ برابر حالت بدون الیاف است. لازم به ذکر است که در مورد MIX-A6 به دلیل اینکه بعد از مقاومت فشاری حداکثر نمونه بطور کامل تخریب می شود، انرژی جذب شده در ناحیه نرم شدگی کرنش ناچیز است و از آن صرف نظر شده است.

نمودارهای ۶-۱۲ تا ۶-۲۰ رفتار نمونه های مکعبی بتن الیافی و MIX-A6 را تحت تنشهای فشاری نشان می دهند. در این نمودارها اطلاعات اضافی دیگری از قبیل کرنش و جذب انرژی تا نقطه

حداکثر مقاومت فشاری ارائه شده است. مشاهده می شود که نمونه های بتن الیافی حتی تا بعد از ۱۰٪ کرنش فشاری مقاومت قابل ملاحظه ای از خود نشان می دهند. کرنش و جذب انرژی نظیر بار حداکثر نیز در مورد بتن الیافی نسبت به حالت بدون الیاف به ترتیب ۴۰-۱۶۰ و ۹۰-۱۵۰ درصد افزایش نشان می دهد.

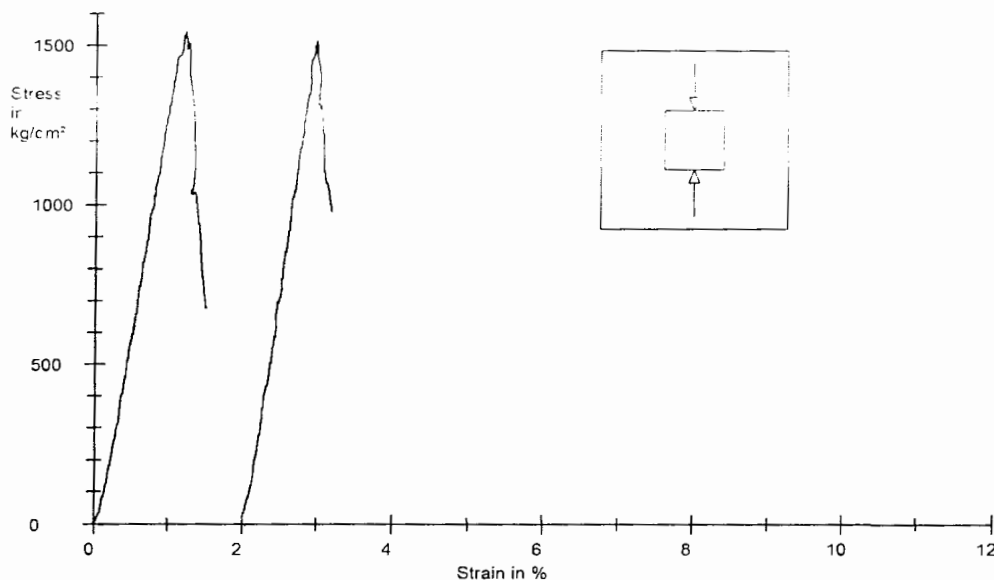
جدول ۶-۲۱- میانگین مقاومت فشاری و جذب انرژی نمونه های بتن الیافی در سن ۲۸ روزه

نام مخلوط	MIX-A6	SFRC-1	SFRC-2	SFRC-3	SFRC-4
مقاومت فشاری (kg/cm^2)	1513	1761.8	1759	1790.3	1807.3
سطح زیر نمودار تا کرنش ۱۰٪ ($N.m$)	686	8035.4	8144.6	8648.7	9442.9

ادامه جدول ۶-۲۱- میانگین مقاومت فشاری و جذب انرژی نمونه های بتن الیافی در سن ۲۸ روزه

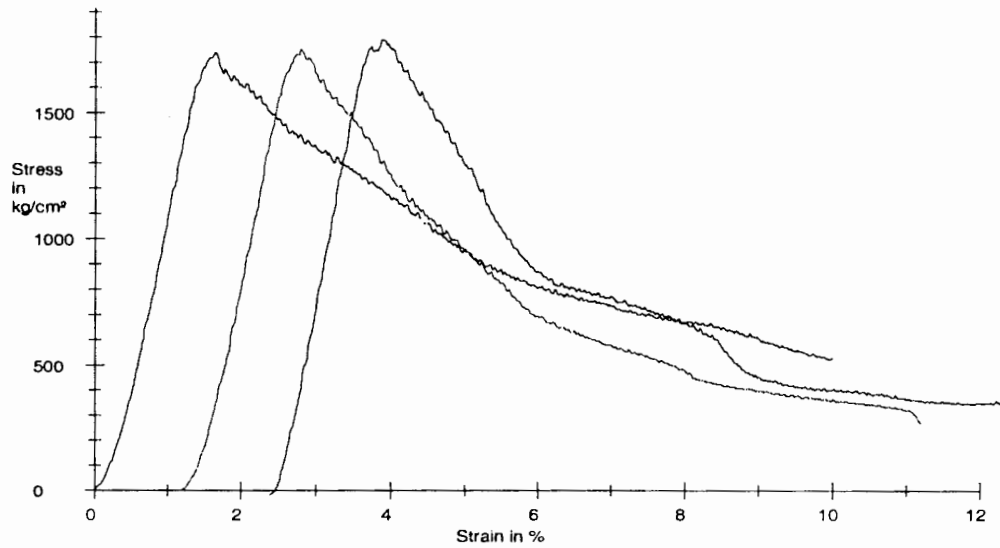
نام مخلوط	SFRC-5	SFRC-6	SFRC-7	SFRC-8
مقاومت فشاری (kg/cm^2)	1935.8	1732.8	1732	1616.7
سطح زیر نمودار تا کرنش ۱۰٪ ($N.m$)	10065.2	9256.5	8006.3	8309.1

Specimen number	σ_m kg/cm^2	ϵ_m %	W_m Nm
1	1539.3	1.21	886.7
2	1513.2	1.06	686.2



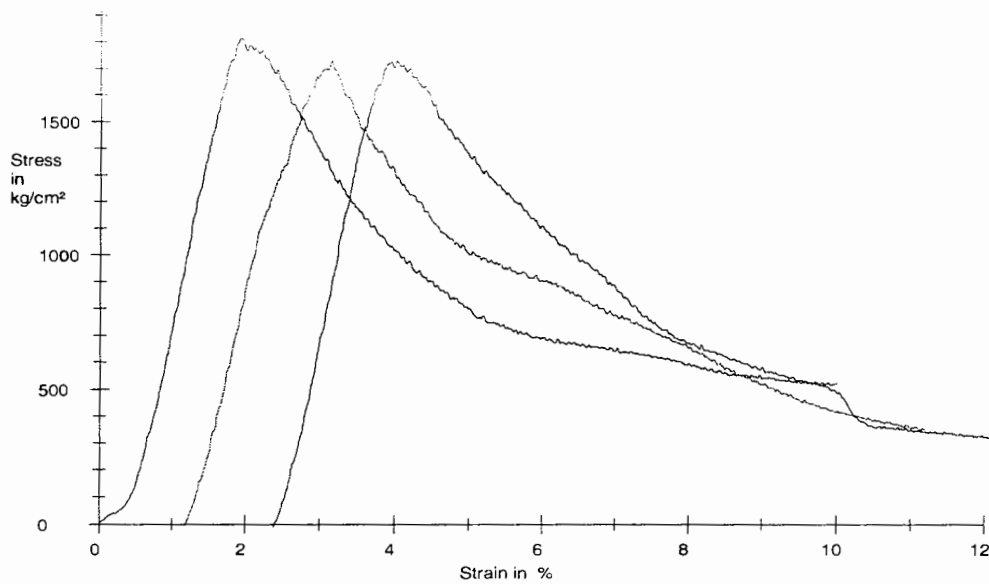
نمودار ۶-۱۲- رفتار MIX-A6 تحت تنش فشاری (بدون الیاف)

Specimen number	σ_m kg/cm ²	ϵ_m %	W_m Nm	W_{end} Nm
1	1740.0	1.7	1316.3	9100.3
2	1753.8	1.6	1317.4	7289.2
3	1791.6	1.5	1652.6	7716.8



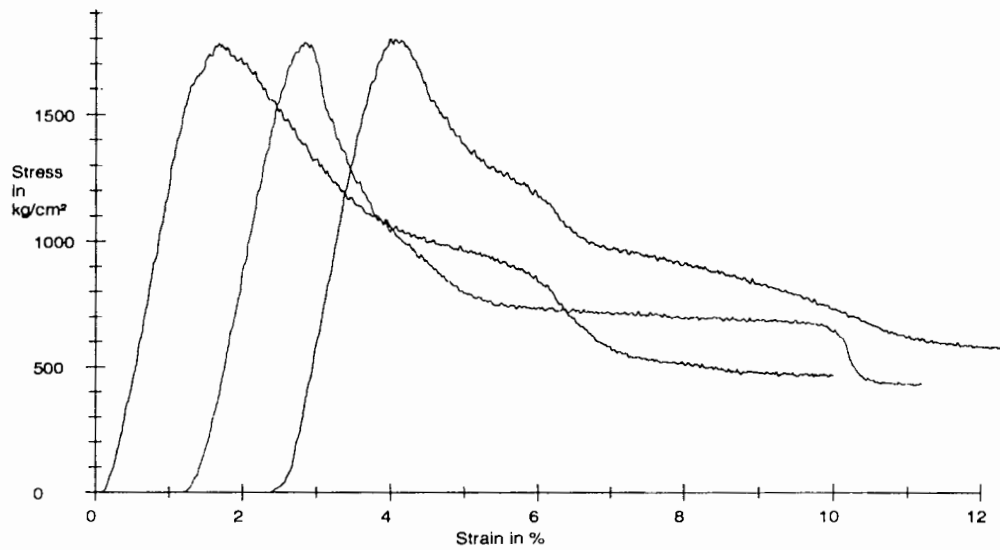
نمودار ۶-۱۳- رفتار SFRC-1 تحت تنش فشاری

Specimen number	σ_m kg/cm ²	ϵ_m %	W_m Nm	W_{end} Nm
1	1816.8	1.9	1373.0	8186.9
2	1730.3	1.9	1836.6	8144.9
3	1730.0	1.6	1716.8	8102.0



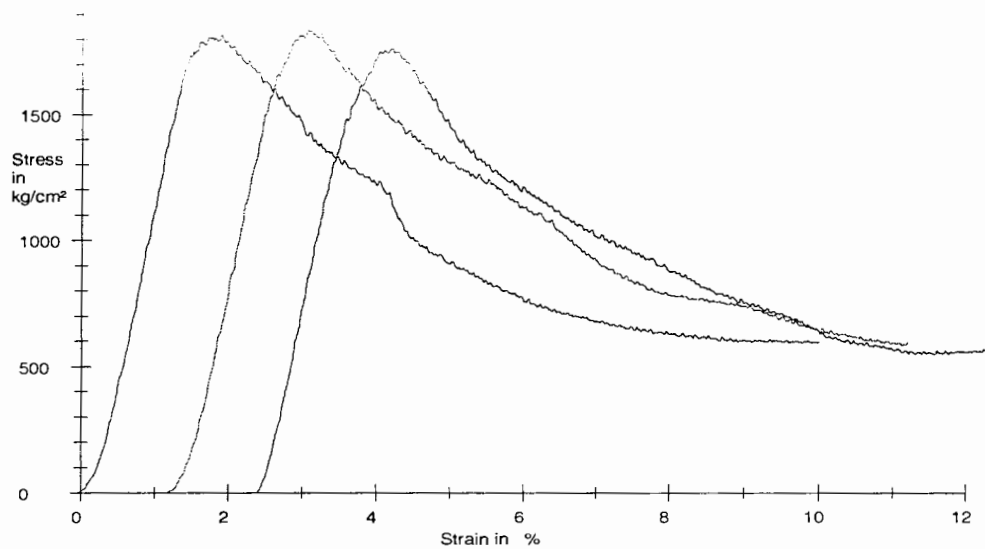
نمودار ۶-۱۴- رفتار SFRC-2 تحت تنش فشاری

Specimen number	σ_m kg/cm ²	ϵ_m %	W_m Nm	W_{end} Nm
1	1783.3	1.7	1529.4	8757.1
2	1786.0	1.6	1418.0	7922.3
3	1801.6	1.6	1381.3	9266.2



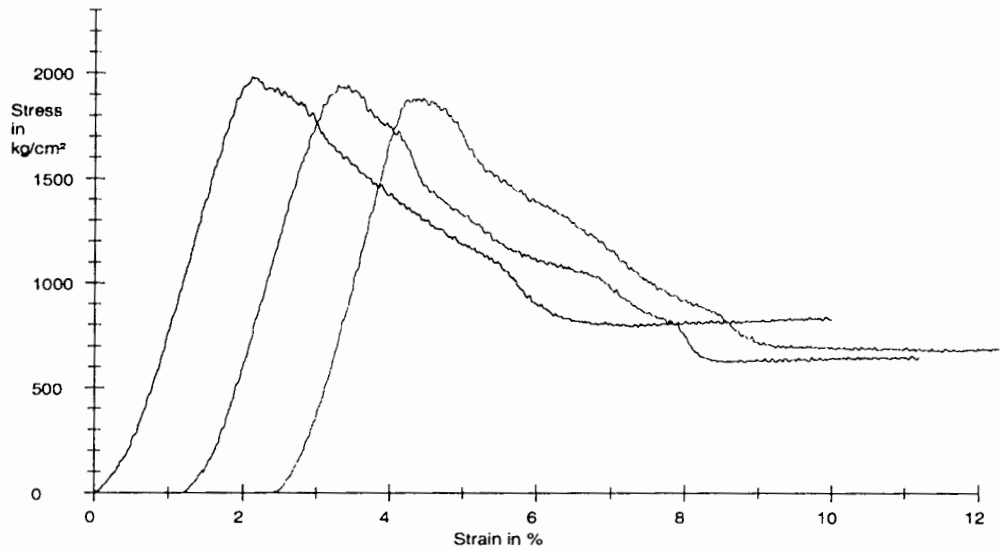
نمودار ۶-۱۵- رفتار SFRC-3 تحت تنش فشاری

Specimen number	σ_m kg/cm ²	ϵ_m %	W_m Nm	W_{end} Nm
1	1819.0	1.9	1815.2	9259.8
2	1836.9	1.9	1717.0	9829.4
3	1765.7	1.8	1823.9	9239.5



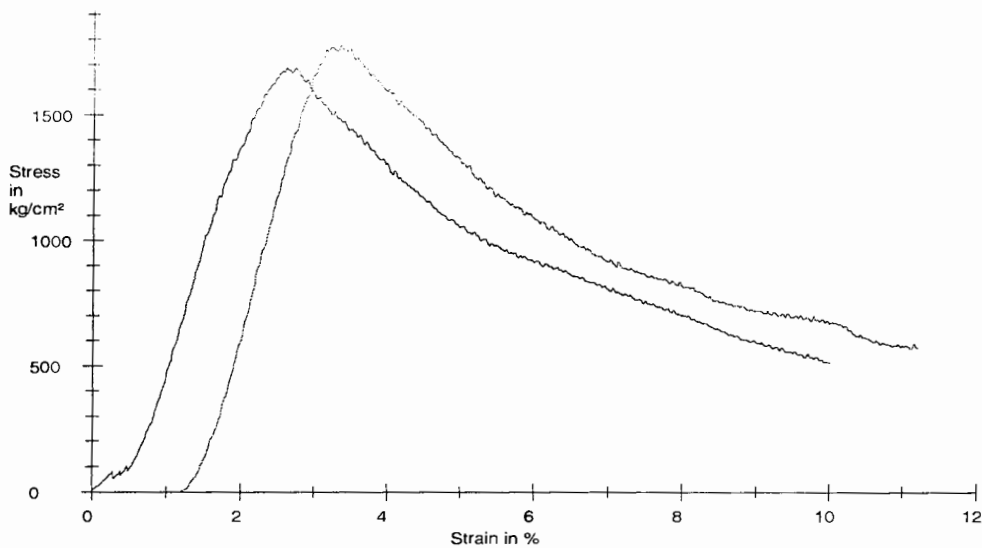
نمودار ۶-۱۶- رفتار SFRC-4 تحت تنش فشاری

Specimen number	σ_m kg/cm ²	ϵ_m %	W_m Nm	W_{end} Nm
1	1982.6	2.1	2007.2	10718.1
2	1942.9	2.1	1948.1	9789.9
3	1881.8	2.1	1859.4	9687.5



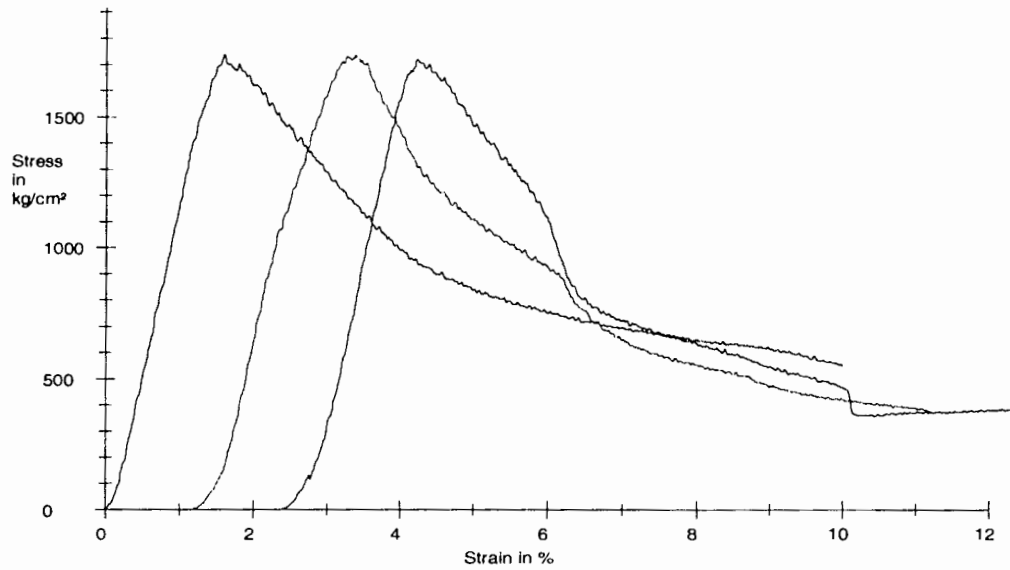
نمودار ۶-۱۷- رفتار SFRC-5 تحت تنش فشاری

Specimen number	σ_m kg/cm ²	ϵ_m %	W_m Nm	W_{end} Nm
1	1687.1	2.6	2014.2	8931.8
2	1778.6	2.1	1919.4	9580.7



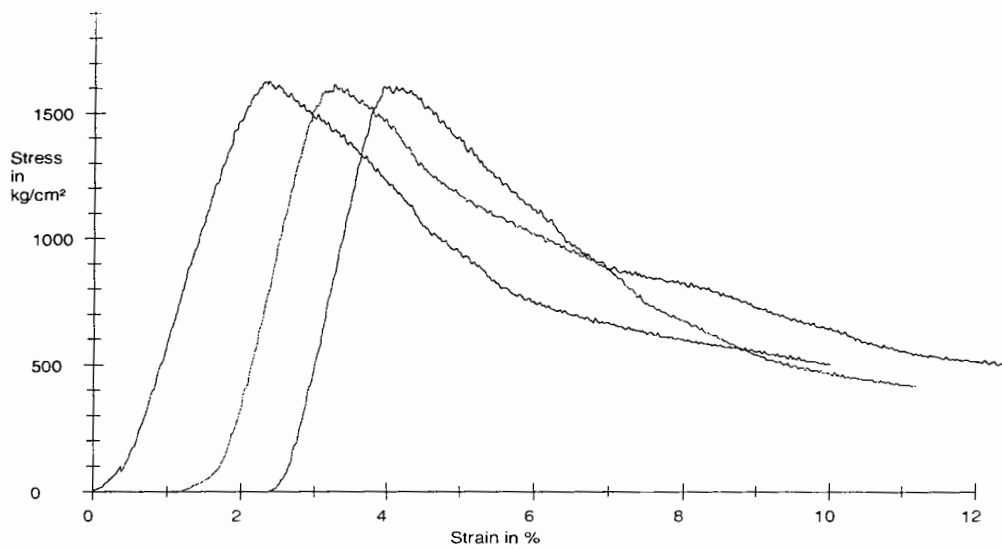
نمودار ۶-۱۸- رفتار SFRC-6 تحت تنش فشاری

Specimen number	σ_m kg/cm ²	ϵ_m %	W_m Nm	W_{end} Nm
1	1738.8	1.6	1390.5	8813.7
2	1736.0	2.2	1941.8	7886.0
3	1720.5	1.8	1356.4	7319.0



نمودار ۶-۱۹- رفتار SFRC-7 تحت تنش فشاری

Specimen number	σ_m kg/cm ²	ϵ_m %	W_m Nm	W_{end} Nm
1	1627.6	2.4	1798.8	8349.5
2	1615.2	2.1	1408.0	8129.4
3	1607.3	1.7	1378.0	8448.4

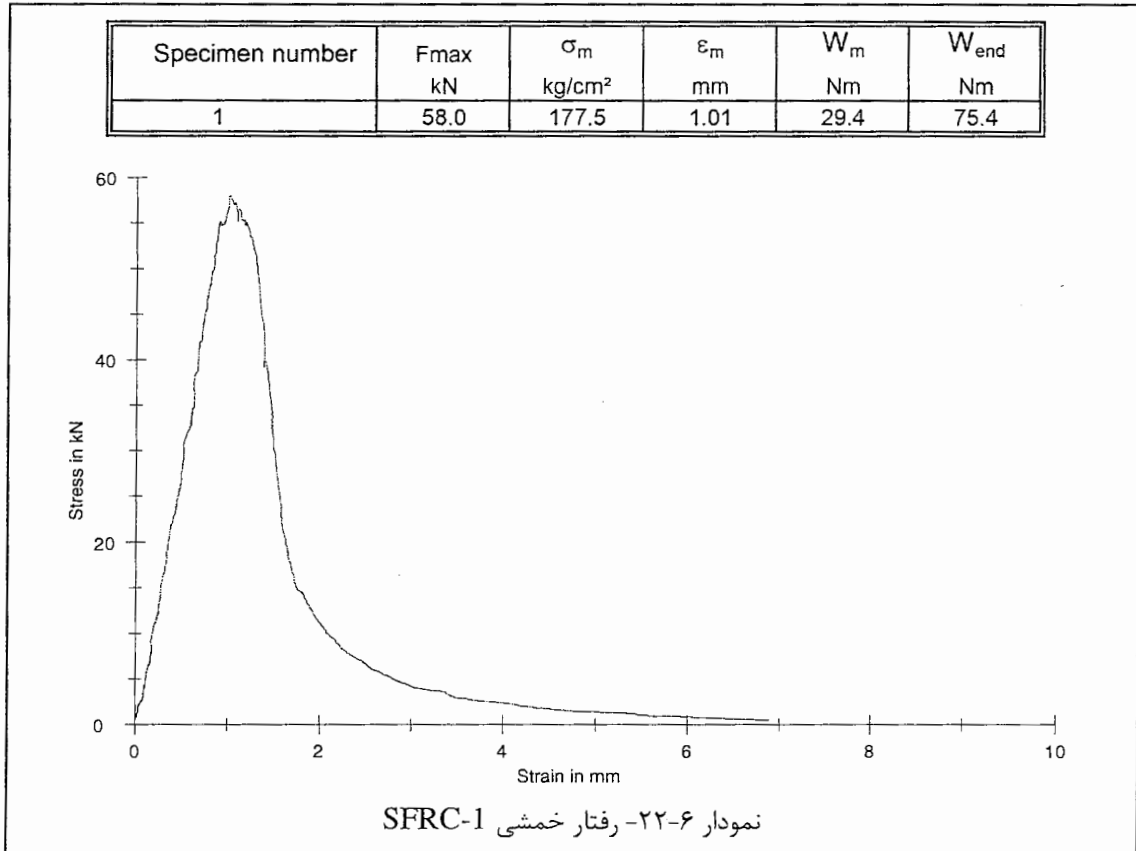
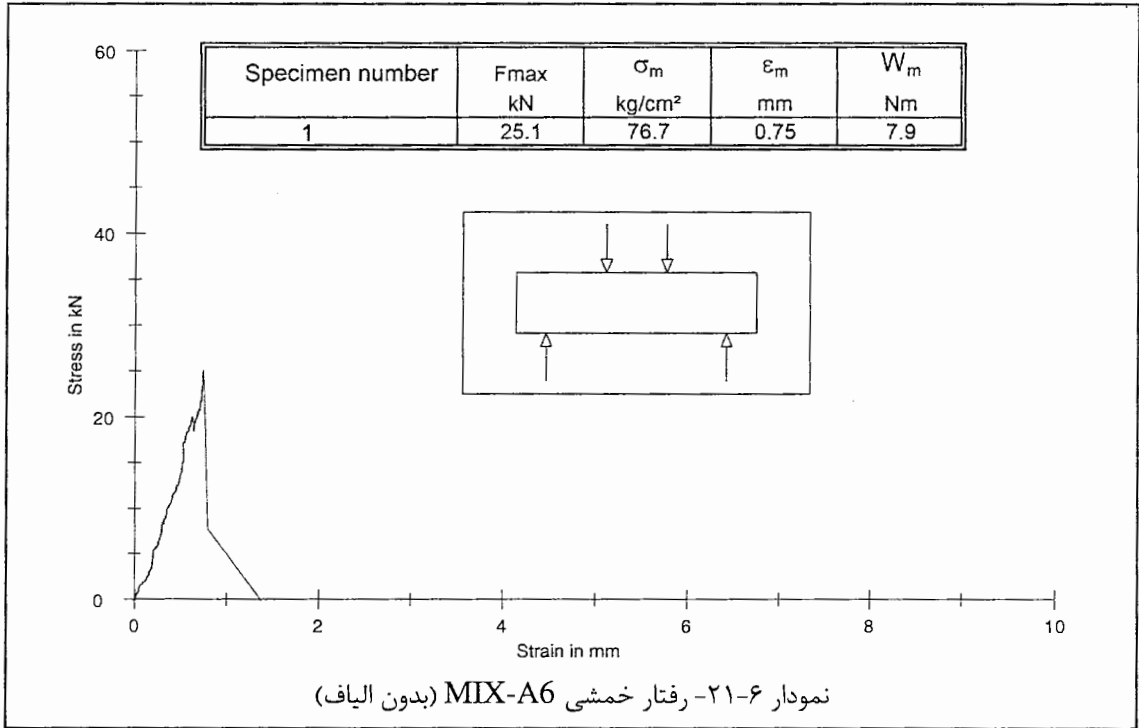


نمودار ۶-۲۰- رفتار SFRC-8 تحت تنش فشاری

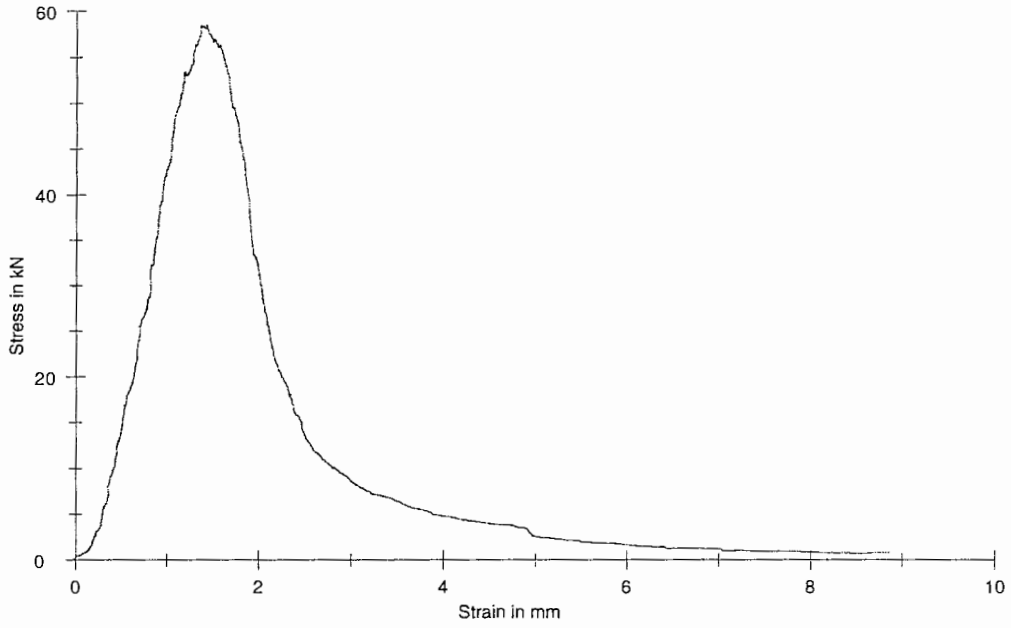
۶-۷-۲-۲- آزمایش مقاومت خمشی:

نمودارهای ۶-۲۱ تا ۶-۲۹ رفتار نمونه های خمشی بتن مسلح شده با درصد های مختلف الیاف در آزمایش خمش چهار نقطه ای را نشان می دهند. در این نمودارها علاوه بر کل بار وارد شده و مقاومت خمشی اطلاعات دیگری مانند، تغییر مکان و جذب انرژی نظیر بار حداکثر و میزان جذب انرژی تا ۱۰ میلیمتر تغییر مکان (نقطه ای که ظرفیت باربری تیر تقریباً صفر است) ارائه شده است. مشاهده می شود که شکست نمونه بدون الیاف با ایجاد اولین ترک، بطور کاملاً ناگهانی رخ می دهد، اما مقاومت نمونه های مسلح شده با الیاف بعد از ایجاد چند ترک در ناحیه کششی تا حدی افزایش پیدامی کند و بعد ترکها به بصورت تدریجی رشد پیدا می کنند و مقاومت نمونه کاهش پیدا می کند (شکل ۶-۸). نتایج آزمایش نشان می دهد که تغییر مکان و جذب انرژی نظیر بار حداکثر نسبت به حالت بدون الیاف به ترتیب ۲۵۰-۳۵ درصد و ۱۴-۴ برابر افزایش پیدا می کند. مقاومت خمشی و کل انرژی جذب شده نسبت به حالت بدون الیاف نیز به ترتیب ۳-۲ و ۳۰-۱۰ برابر شده است.



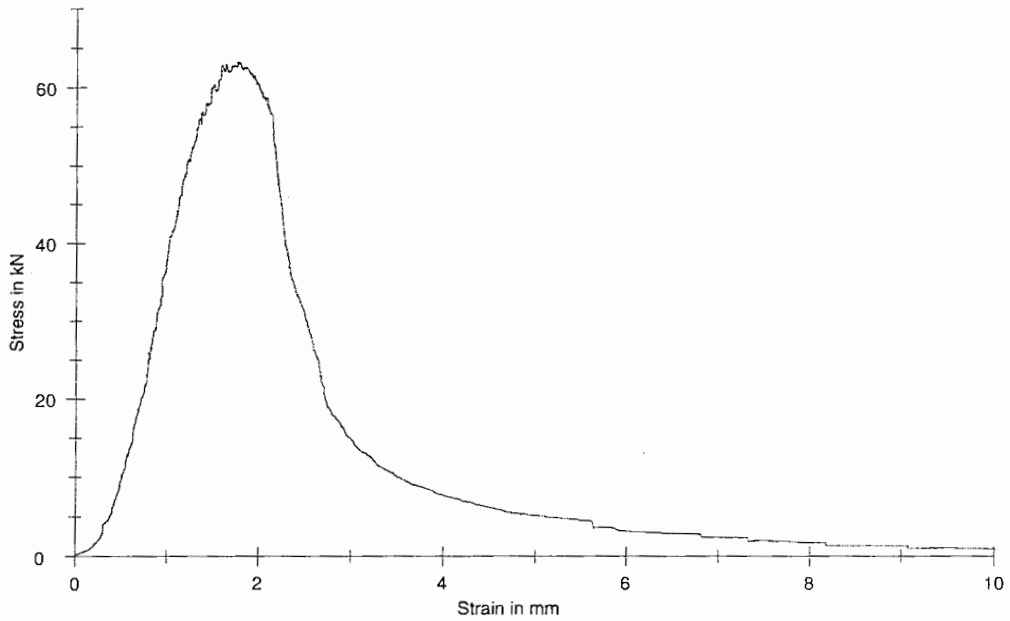


Specimen number	Fmax kN	σ_m kg/cm ²	ϵ_m mm	W_m Nm	W_{end} Nm
1	58.5	179.0	1.42	38.4	97.2



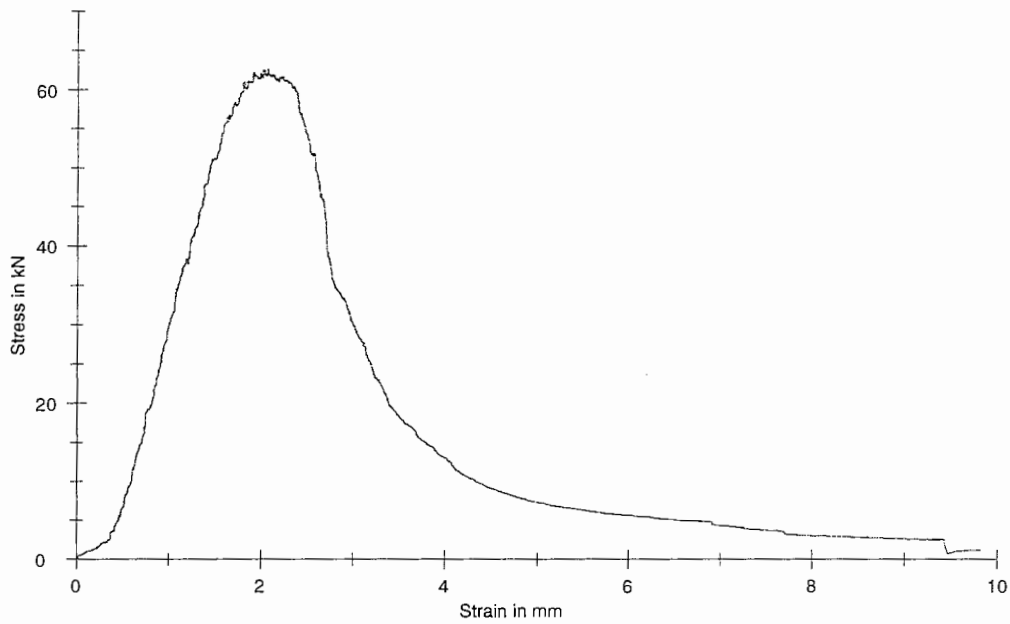
نمودار ۶-۲۳- رفتار خمشی SFRC-2

Specimen number	Fmax kN	σ_m kg/cm ²	ϵ_m mm	W_m Nm	W_{end} Nm
1	63.3	193.7	1.76	54.1	131.7



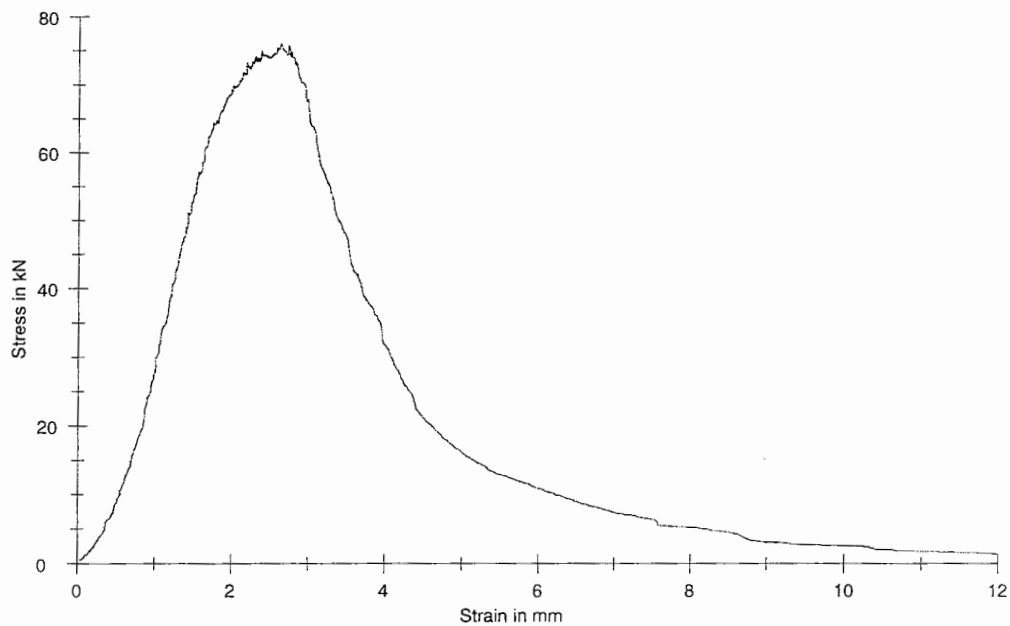
نمودار ۶-۲۴- رفتار خمشی SFRC-3

Specimen number	Fmax kN	σ_m kg/cm ²	ϵ_m mm	W_m Nm	W_{end} Nm
1	62.6	191.6	2.07	63.8	157.9



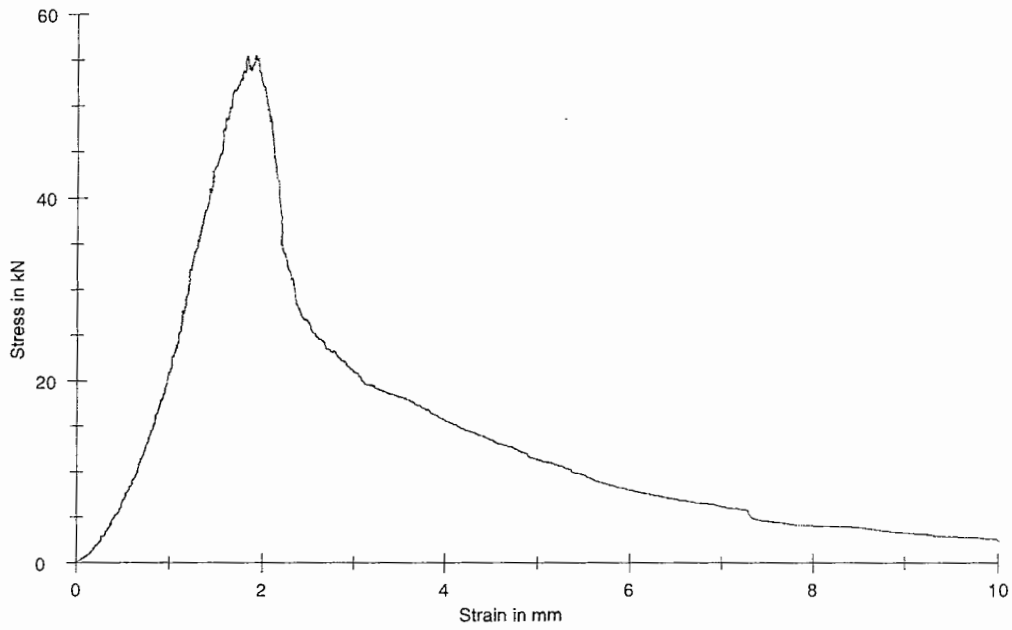
نمودار ۶-۲۵- رفتار خمشی SFRC-4

Specimen number	Fmax kN	σ_m kg/cm ²	ϵ_m mm	W_m Nm	W_{end} Nm
1	76.1	232.7	2.64	108.6	247.2



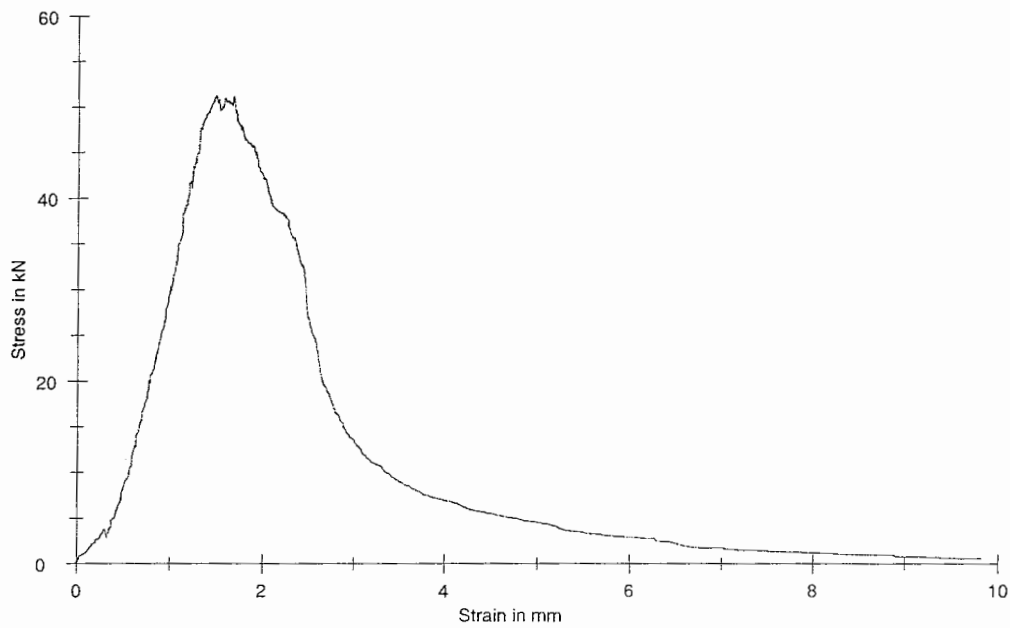
نمودار ۶-۲۶- رفتار خمشی SFRC-5

Specimen number	F _{max} kN	σ_m kg/cm ²	ϵ_m mm	W _m Nm	W _{end} Nm
1	55.5	169.8	1.92	45.6	147.3



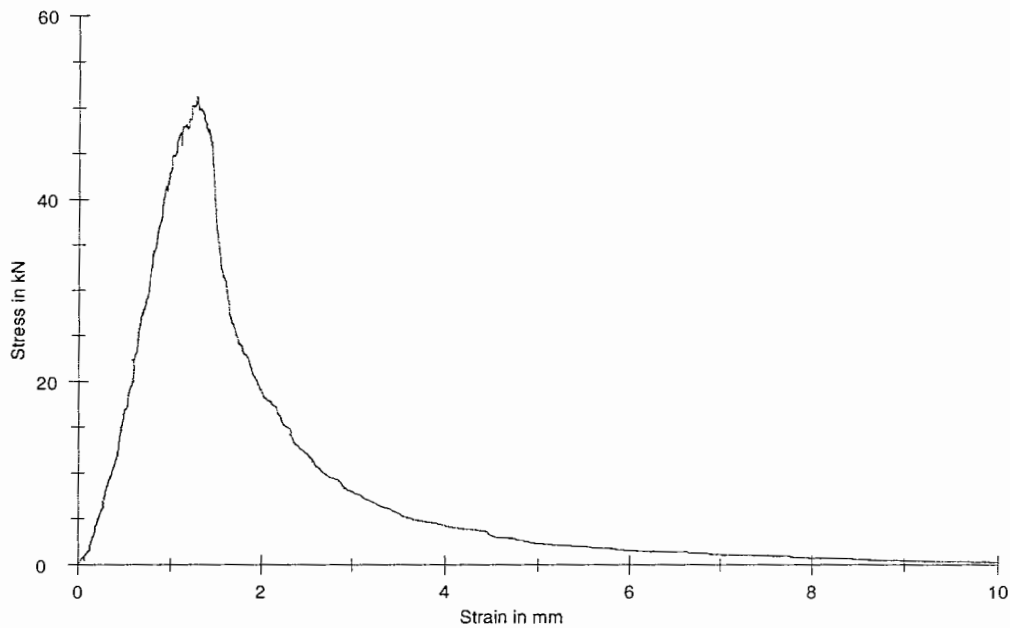
نمودار ۶-۲۷- رفتار خمشی SFRC-6

Specimen number	F _{max} kN	σ_m kg/cm ²	ϵ_m mm	W _m Nm	W _{end} Nm
1	51.2	156.7	1.49	31.5	107.0



نمودار ۶-۲۸- رفتار خمشی SFRC-7

Specimen number	F _{max} kN	σ_m kg/cm ²	ϵ_m mm	W _m Nm	W _{end} Nm
1	51.2	156.6	1.28	31.5	81.8



نمودار ۶-۲۹- رفتار خمشی SFRC-8

۶-۷-۲-۳- آزمایش انرژی شکست:

نمودارهای ۶-۳۰ تا ۶-۳۸ رفتار خمشی تیرهای شکافدار^۱ مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف، تحت بار وسط دهانه را نشان می دهند. نتایج آزمایش در جدول ۶-۲۲ خلاصه شده است. مشاهده می شود که انرژی شکست با افزودن الیاف بین ۵۰ تا ۱۶۰ برابر نسبت به حالت بدون الیاف افزایش پیدا می کند. همانند آزمایش فشار و خمش، تغییر مکان و انرژی جذب شده تا نقطه حداکثر ظرفیت باربری نسبت به حالت بدون افزایش قابل ملاحظه ای نشان می دهد.

لازم به ذکر است برخلاف آزمایش خمش، شکست نمونه های تیر شکافدار که با الیاف مسلح نشده اند کاملاً ناگهانی نیست. بطوری که قبل از تخریب کامل نمونه ترک در محل شکاف ایجاد شده، قابل مشاهده است. از اینرو در این آزمایش برای حالت بدون الیاف نمونه بعد از نقطه ماکزیمم مقداری

^۱- Notched Beam

انرژی جذب می کند ($W_m < W_{end}$). همانطور که در بخش ۳ گفته شد، بتن مصالحی نیمه ترد است.

جدول ۶-۲۲- نتایج آزمایش انرژی شکست نمونه های بتن الیافی در سن ۲۸ روزه

نام مخلوط	MIX-A6	SFRC-1	SFRC-2	SFRC-3	SFRC-4
($N.m$) سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان	0.3	16.1	30	39	39.2
(N/m) انرژی شکست (G_f)	60	3220	6000	7800	7840

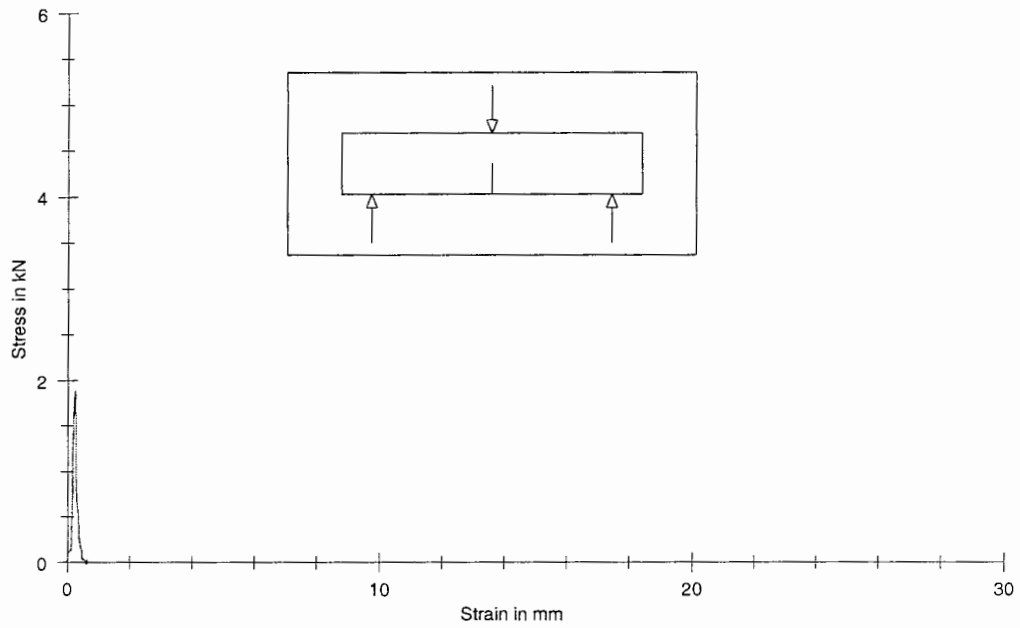
ادامه جدول ۶-۲۲- نتایج آزمایش انرژی شکست نمونه های بتن الیافی در سن ۲۸ روزه

نام مخلوط	SFRC-5	SFRC-6	SFRC-7	SFRC-8
($N.m$) سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان	47.5	38.2	33.8	23.7
(N/m) انرژی شکست (G_f)	9500	7640	6760	4740



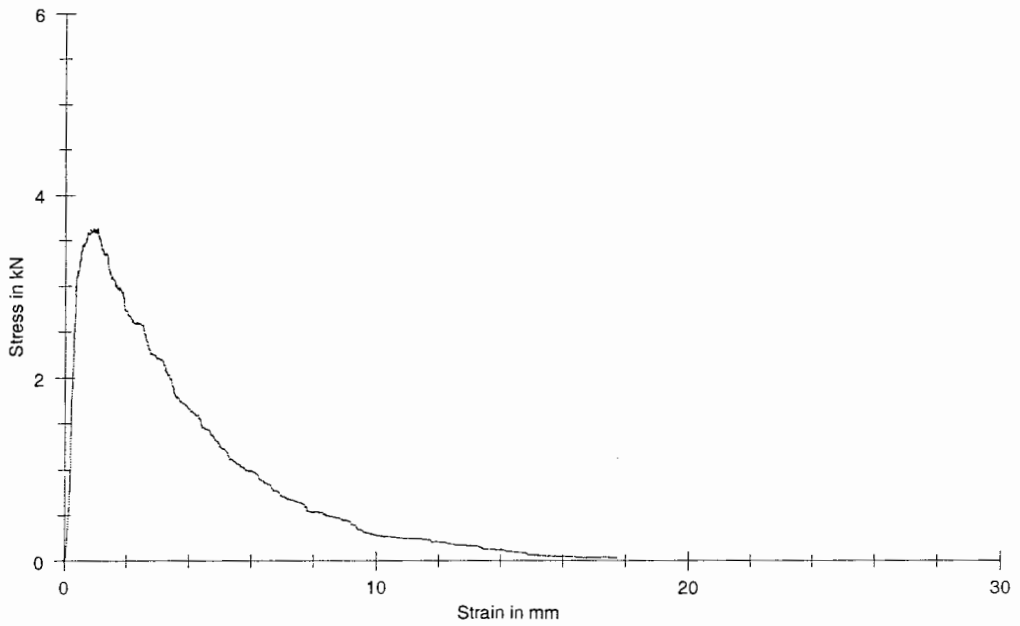
شکل ۶-۹- شکست نمونه تیر شکاف دار بتن الیافی تحت خمش

Specimen number	F _{max} kN	ε _m mm	W _m Nm	W _{end} Nm
1	1.9	0.13	0.2	0.3



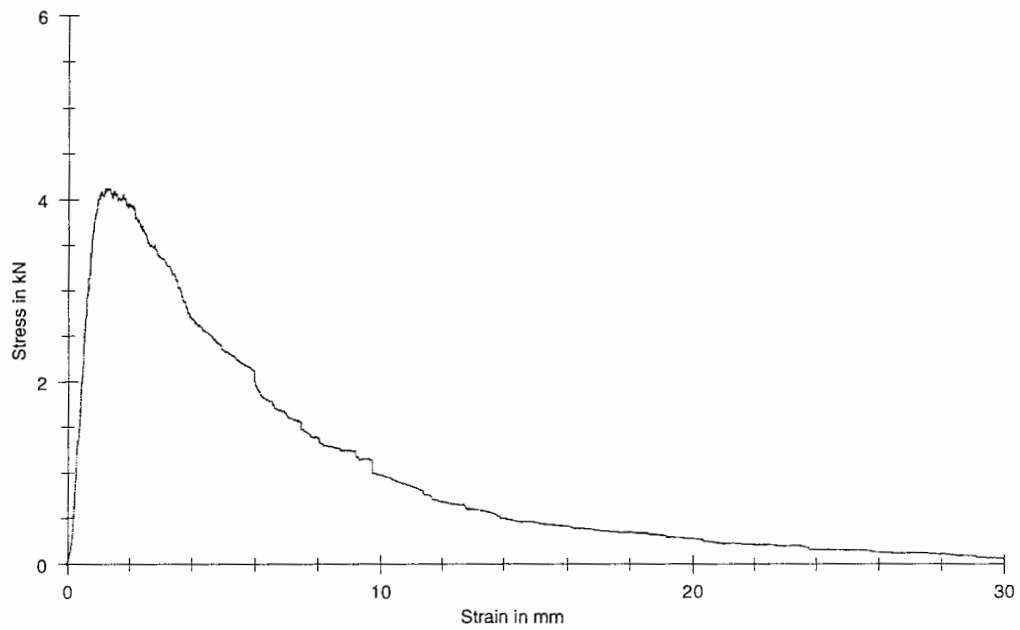
نمودار ۶-۳۰- رفتار خمشی تیر شکاف دار MIX-A6 (بدون الیاف)

Specimen number	F _{max} kN	ε _m mm	W _m Nm	W _{end} Nm
1	3.6	1.04	2.8	16.1



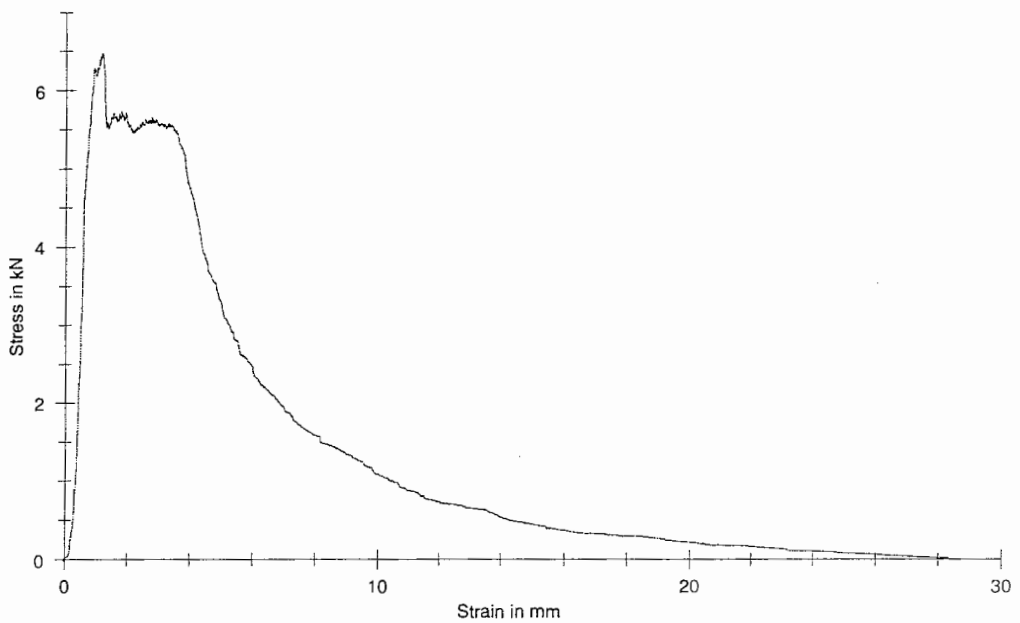
نمودار ۶-۳۱- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-1

Specimen number	F _{max} kN	ε _m mm	W _m Nm	W _{end} Nm
1	4.1	1.33	3.5	30.0



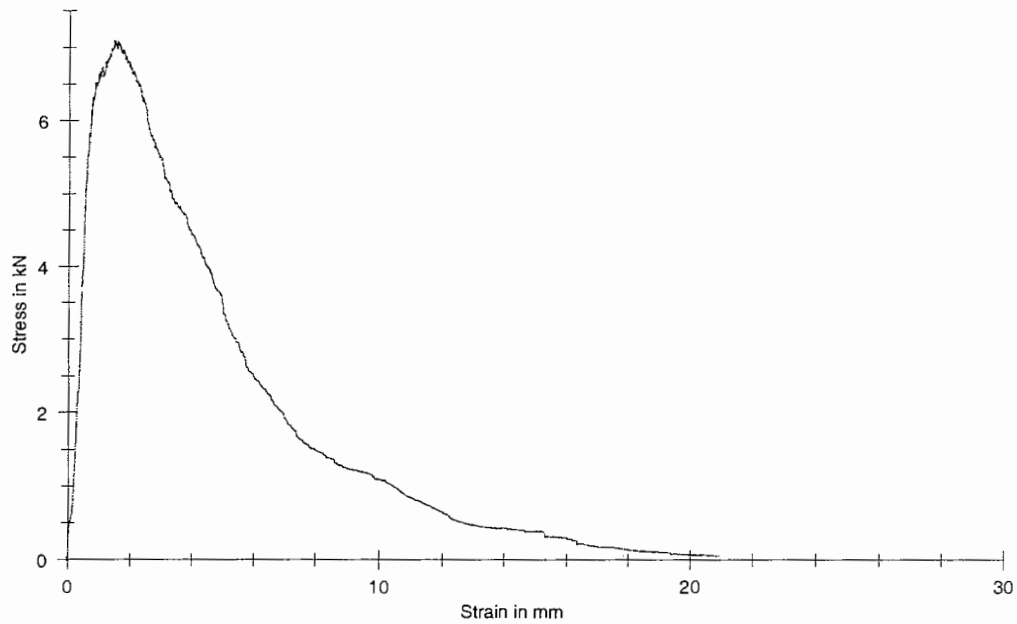
نمودار ۶-۳۲- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-2

Specimen number	F _{max} kN	ε _m mm	W _m Nm	W _{end} Nm
1	6.5	1.17	4.1	39.0



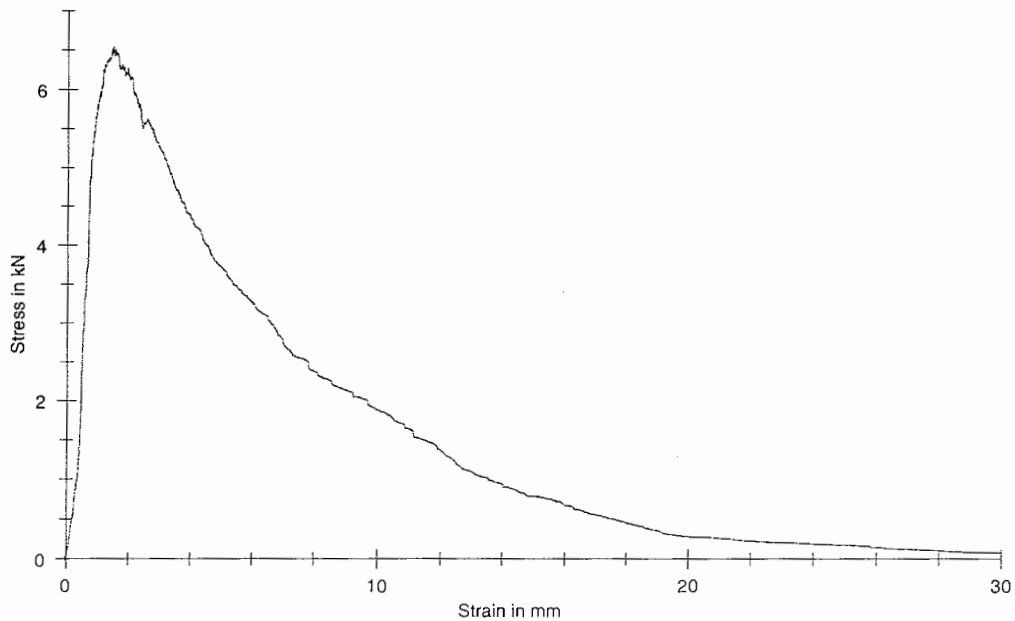
نمودار ۶-۳۳- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-3

Specimen number	F _{max} kN	ε _m mm	W _m Nm	W _{end} Nm
1	7.1	1.46	7.0	39.2



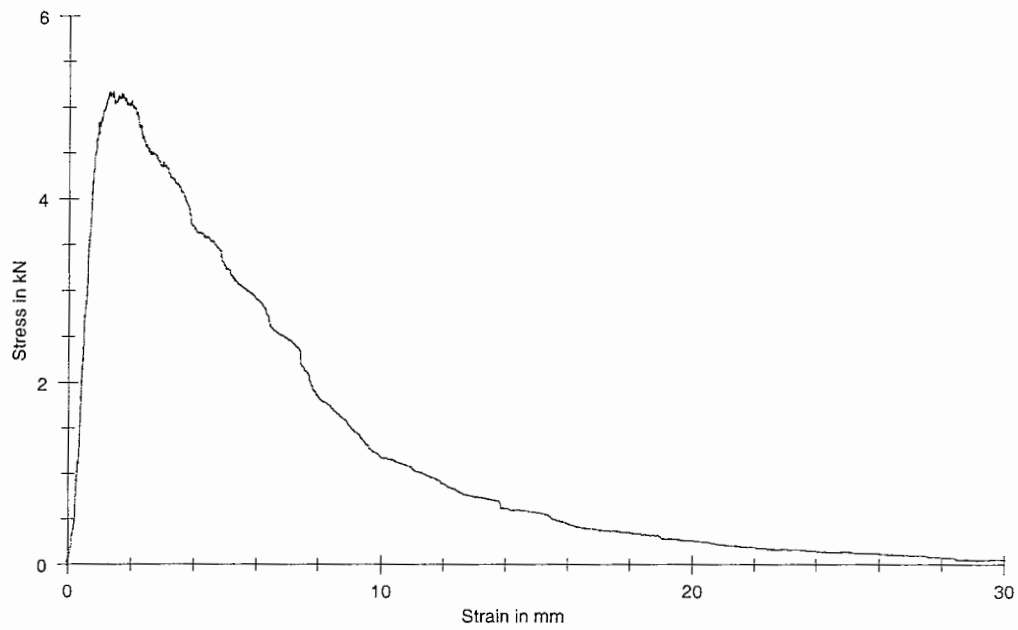
نمودار ۶-۳۴- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-4

Specimen number	F _{max} kN	ε _m mm	W _m Nm	W _{end} Nm
1	6.5	1.46	5.6	47.5



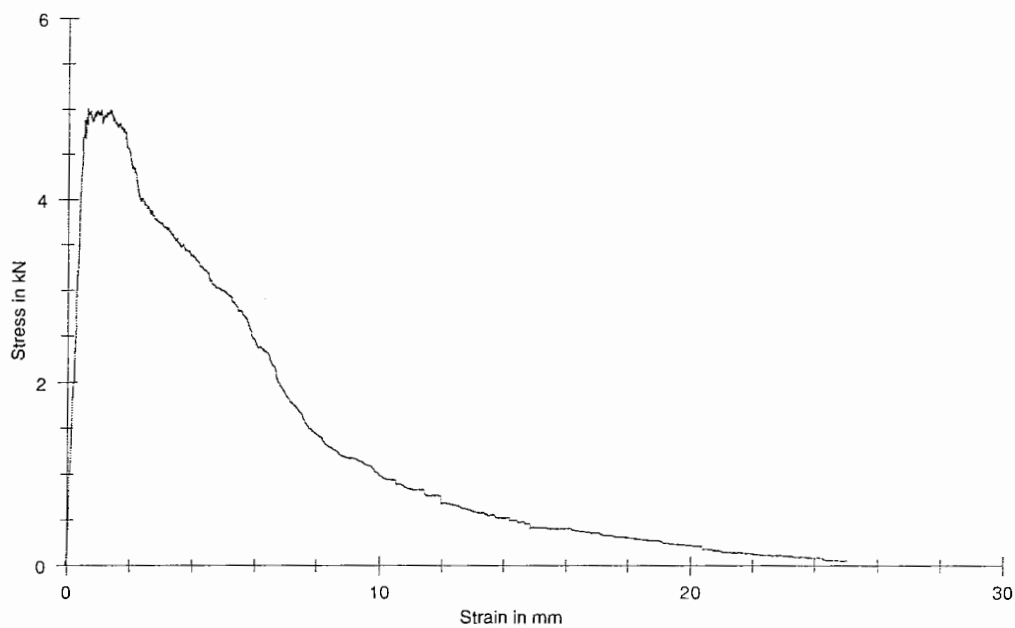
نمودار ۶-۳۵- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-5

Specimen number	F _{max} kN	ε _m mm	W _m Nm	W _{end} Nm
1	5.2	1.40	4.5	38.2



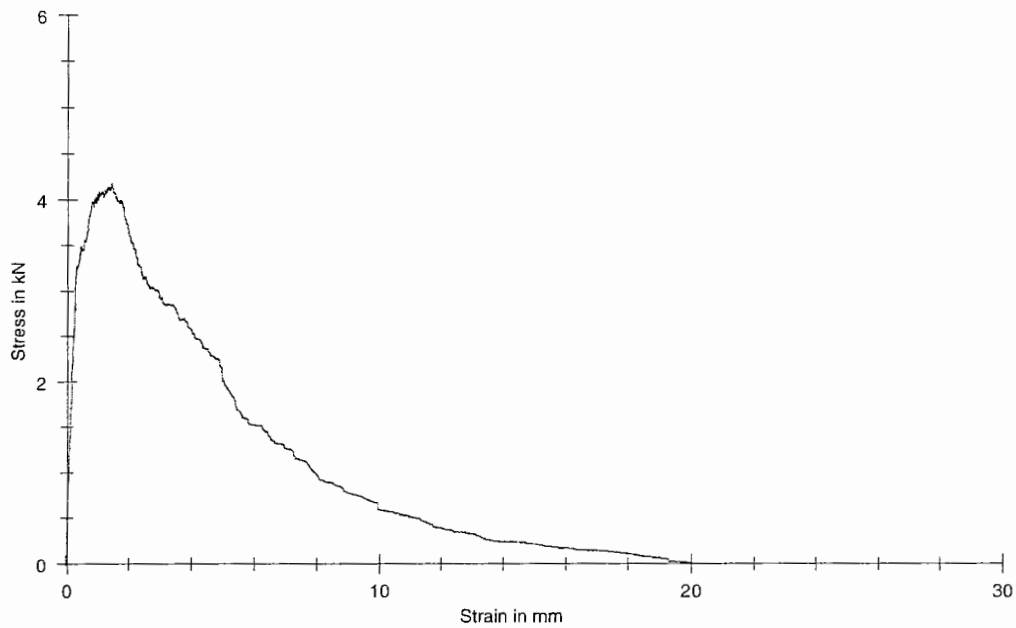
نمودار ۶-۳۶- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-6

Specimen number	F _{max} kN	ε _m mm	W _m Nm	W _{end} Nm
1	5.0	0.63	1.9	33.8



نمودار ۶-۳۷- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-7

Specimen number	F _{max} kN	ε _m mm	W _m Nm	W _{end} Nm
1	4.2	1.43	4.9	23.7



نمودار ۶-۳۸- رفتار خمشی تیر شکاف دار SFRC-8

۶-۷-۲-۴- مقاومت کششی دونیم شدن:

نتایج آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن نمونه های بتن الیافی در جدول ۶-۲۳ خلاصه شده است. به منظور مقایسه با حالت بدون الیاف، مقاومت کششی MIX-A6 نیز در این جدول ارائه شده است. مشاهده می شود که در اثر افزودن مقادیر مختلف الیاف مقاومت کششی دونیم شدن ۲/۵ تا ۳ برابر شده است.

جدول ۶-۲۳- نتایج آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن نمونه های بتن الیافی در سن ۲۸ روزه

نام مخلوط	شماره نمونه	نیروی گسیختگی (KN)	مقاومت کششی دو نیم شدن (kg/cm ²)	میانگین مقاومت کششی دو نیم شدن (kg/cm ²)
MIX-A6 (without fiber)	1	233.3	75.7	77.0
	2	240.8	78.2	
SFRC-1	1	515.7	167.4	189.1
	2	649.3	210.8	
SFRC-2	1	593.56	192.7	200.2
	2	639.68	207.7	
SFRC-3	1	556.7	180.7	204.4
	2	702.7	228.1	
SFRC-4	1	629.92	204.5	207.1
	2	645.75	209.6	
SFRC-5	1	697.09	226.3	232.4
	2	734.43	238.4	
SFRC-6	1	667.7	216.8	204.7
	2	593.09	192.5	
SFRC-7	1	604.89	196.4	194.1
	2	590.77	191.8	
SFRC-8	1	632	205.2	190.4
	2	541.2	175.7	

فصل هفتم

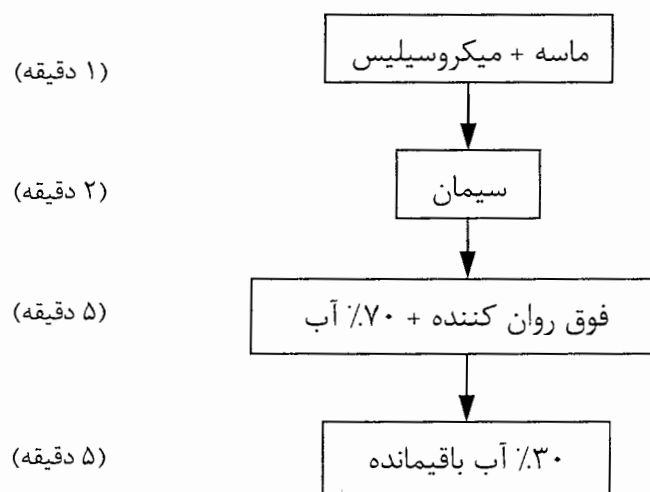
نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه گیری :

این پایان نامه به منظور دستیابی به بتن الیافی با مقاومت کششی و شکل پذیری بالا با استفاده از مصالح موجود در کشور صورت پذیرفت. به طور کلی فعالیتهای آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق را می توان به چهار بخش تقسیم نمود: دستیابی به بتن با مقاومت بسیار بالا و کارایی مناسب برای استفاده به عنوان ماتریس بتن الیافی، انتخاب شکل الیاف فولادی سازگار با ماتریس، تولید الیاف فولادی و در نهایت دستیابی به بتن الیافی (ماتریس مسلح شده با الیاف) با مقاومت فشاری، کششی و شکل پذیری بالا.

پس از انجام مراحل مختلف کار آزمایشگاهی نتایج زیر حاصل شد :

۱- روند اختلاط مصالح در مقاومت و کارایی بتن بسیار موثر است. در مرحله ابتدای کار آزمایشگاهی به منظور ساخت مخلوط مناسب برای استفاده به عنوان ماتریس بتن الیافی، روشهای متعدد مورد بررسی قرار گرفت که بهترین حالت بدلیل مصرف کمترین مقدار مصرف آب و دارا بودن کارایی مناسب به صورت زیر خلاصه می شود:



۲- به منظور افزایش مقاومت فشاری ماتریس تعداد ۱۰ طرح اختلاط اصلی با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده مورد آزمایش قرار گرفت و در نهایت MIX-A6 که دارای کارایی مناسب و مقاومت

بسیار بالا است به عنوان ماتریس مناسب برای بتن الیافی مورد استفاده قرار گرفت. MIX-A6 با نسبت آب به مجموع سیمان و میکروسیلیس (مصالح خمیری) $17/2\%$ و نسبت فوق روان کننده به مصالح خمیری $1/5\%$ در شرایط عمل آوری استاندارد دارای مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه 1281 kg/cm^2 و 1539 kg/cm^2 می باشد و با ۷ روز عمل آوری در دمای 90°C ، مقاومت آن به 1688 kg/cm^2 افزایش پیدا می کند.

۳- در مرحله دوم برنامه آزمایشگاهی به منظور تعیین شکل الیاف فولادی سازگار با ماتریس بدست آمده در بخش قبل، آزمایش مقاومت بیرون کشیدگی انجام شد. در نهایت الیاف فولادی مجعد با طول 20 mm ، قطر $0/3 \text{ mm}$ ، طول موج 2 mm و ارتفاع موج $0/4 \text{ mm}$ برای استفاده در بتن الیافی مناسب تشخیص داده شد. الیاف فولادی مطابق با شرایط فوق، با نیروی نزدیک به مقاومت کششی نهایی از ماتریس بیرون کشیده شده و موجها تا حد زیادی صاف شدند.

۴- با توجه به پایین بودن قطر الیاف مورد استفاده در این تحقیق، روش تولید دستی برای ساخت الیاف مناسب نیست. به این منظور دستگاه کوچکی طراحی و ساخته شد که قادر به تولید خودکار الیاف با سرعت و دقت بالا است.

۵- مرحله پایانی برنامه آزمایشگاهی ساخت نمونه های اصلی بتن الیافی می باشد. در این مرحله تعداد ۸ طرح اختلاط بتن الیافی ساخته و آزمایشات فشار، خمش، کشش و انرژی شکست روی نمونه های ۲۸ روزه انجام گرفت. در تمامی آزمایشات مخلوط SFRC-5 با ۴ درصد حجمی الیاف دارای بیشترین مقاومت می باشد که نتایج آن به صورت زیر است:

- میانگین مقاومت فشاری نمونه های SFRC-5 برابر 1936 kg/cm^2 می باشد که نسبت به حالت بدون الیاف ۲۸٪ افزایش نشان می دهد. میزان جذب انرژی تا کرنش ۱۰٪ نیز برابر

می باشد، که نسبت به حالت بدون الیاف ۱۵ برابر شده است. کرنش و جذب انرژی نظیر بار حداکثر نیز در مورد SFRC-5 نسبت به حالت بدون الیاف به ترتیب ۹۰ و ۱۵۰ درصد افزایش نشان می دهد.

- مدول گسیختگی SFRC-5 برابر 233 kg/cm^2 و کل انرژی جذب شده برابر 247 N.m می باشد، که نسبت به حالت بدون الیاف به ترتیب ۳ و ۳۰ برابر شده است. تغییر مکان و جذب انرژی نظیر بار حداکثر نیز نسبت به حالت بدون الیاف به ترتیب $3/5$ و ۱۴ برابر افزایش پیدا می کند.

- انرژی شکست SFRC-5 برابر 9500 N/m می باشد که ۱۶۰ برابر حالت بدون الیاف است.
- مقاومت کششی دونیم شدن SFRC-5 برابر 232 kg/cm^2 می باشد که ۳ برابر حالت بدون الیاف است.

۷-۲- پیشنهادات :

موارد زیر برای بهتر شدن نتایج تحقیق پیشنهاد می شوند:

۱- عمل آوری در دمای بالا روشی است برای بهبود کیفیت مصالح پایه سیمانی که باعث انجام بهتر هیدراسیون سیمان و تشدید فعالیت پوزولانی میکروسیلیس می شود. در این تحقیق تنها عمل آوری تعداد کمی از نمونه های فشاری در دمای بالا (90°C) انجام شد. به منظور بهبود خصوصیات بتن الیافی پیشنهاد می شود، عمل آوری سایر نمونه ها نیز در دمای بالا صورت گیرد.

۲- در بتن حتی قبل از شروع بارگذاری ریزترکهایی با ابعاد چند میکرون وجود دارند که بعد از اعمال بارهای خارجی این ریزترکهها به هم پیوسته شده و ترکهای بزرگتر شکل می گیرند. از آنجایی

که الیاف فولادی مورد استفاده در این تحقیق از نظر اندازه درشت محسوب می شود، در صورت افزودن درصد پایینی ریز الیاف می توان در مقابل رشد ریزترکها مانع ایجاد کرد. در این صورت رفتار بتن الیافی بهبود پیدا می کند. با توجه به تولید انبوه الیاف پلی پروپیلن می توان از این الیاف استفاده کرد.

۳- در این تحقیق برای دستیابی به الیاف سازگار با ماتریس آزمایشات مقاومت بیرون کشیدگی روی الیافهای تک انجام شد. به منظور قضاوت در مورد هندسه بهینه الیاف پیشنهاد می شود بارگذاری الیاف با سیستم تغییر مکان کنترل انجام شود که قابلیت ثبت نمودار مقاومت بیرون کشیدگی در برابر میزان لغزش الیاف را دارا می باشد. در این صورت الیافی که دارای بالاترین سطح زیر نمودار باشد برای مسلح کردن بتن مناسب خواهد بود.

۴- در حال حاضر بسیاری از دانشگاهها و مراکز تحقیقاتی علاقه مند به تحقیق در زمینه بتن الیافی می باشند. اما با توجه به مشکلات موجود جهت تامین الیاف فولادی مورد نیاز، از قبیل هزینه خرید، حمل، گمرک، ارزبری، زمان بری و ... تحقیقات انجام شده در زمینه بتن الیافی در کشور بسیار محدود است. از اینرو نیاز به ارائه روشی برای تولید سریع و اقتصادی الیاف فولادی احساس می شود. تا با توسعه این تکنولوژی موجبات تبدیل این صنعت پرهزینه به صنعت بومی فراهم شود. امید است با نتایجی که از این طرح پژوهشی بدست آمده، بحث تولید انبوه الیاف فولادی در داخل کشور بصورت جدی مطرح شده و طراحان بیش از پیش با کاربردها و مزایای استفاده از آن آشنا گردند.

مراجع :

- ۱- حسنی.ابوالفضل، محمد.سعید، "تاثیر الیاف فولاد در کنترل ترکهای کششی بتن"، وزارت مسکن و شهر سازی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۸.
- ۲- باقری.علیرضا، قدوسی.پرویز، پرهیزگار.طیبه، طاهری.افشین، "کاربرد الیاف در بتن و فراورده های سیمانی"، وزارت مسکن و شهر سازی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۸.
- ۳- کاظمی.محمدتقی، "مکانیک شکست بتن الیافی"، کنفرانس تخصصی تکنولوژی بتن الیافی، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۷۸.
- ۴- قاجار.رحمت ا...، "مقدمه ای بر مکانیک شکست"، جلد اول، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، چاپ اول، ۱۳۸۱.
- ۵- رضانیانپور.علی اکبر، پرهیزگار.طیبه، طاهری.افشین، "مواد افزودنی و پوزولانی و کاربردهای آن در بتن"، وزارت مسکن و شهر سازی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۶.
- 6-ACI Committee 544.1R, "State of the art report on fiber reinforced concrete", ACI manual of concrete practice, 2004.
- 7-ACI Committee 544.2R, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete", ACI manual of concrete practice, 2004.
- 8-ACI Committee 544.3R, "Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing, steel fiber reinforced concrete", ACI manual of concrete practice, 2004.
- 9-ACI Committee 544.4R, "Design consideration for steel fiber reinforced concrete", ACI manual of concrete practice, 2004.
- 10-ACI Committee 446.1R, "Fracture Mechanics of Concrete: Concepts, Models and Determination of Material Properties", ACI manual of concrete practice, 2004.
- 11-ACI Committee 363, "State of the art report on high strength concrete", ACI manual of concrete practice, 2004.
- 12-ASTM standard C31, "standard practice for making and curing concrete test specimens in the field", ASTM vol 04.02, 1993.

- 13-ASTM standard C39, "standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", ASTM vol 04.02, 1993.
- 14-ASTM standard C78, "standard test method for flexural strength of concrete(using simple beam with third-point loading", ASTM vol 04.02, 1993.
- 15-ASTM standard C995, "standard test method for time of flow of fiber reinforced concrete through inverted slump cone", ASTM vol 04.02, 1993.
- 16-ASTM standard C1018, "standard test method for flexural toughness and first crack strength of fiber-reinforced concrete(using beam with third point loading", ASTM vol 04.02, 1993.
- 17-Nawy.E.G, "Fundamentals of High Performance Concrete", 2nd ed, John Wiley&Sons, Inc, 2001.
- 18-Neville.A.M&Brooks.J.J,"concretetechnology",1sted,Longman scientific&technical ,1987.
- 19-POPVICS.SANDOR, "Strength and Related Properties of Concrete, a qualitative approach", John Wiley&Sons.Inc, 1998.
- 20-Cotterell.B&Mai.Y.M, "Fracture Mechanics of Cementitious Materials", Chapman&Hall,1st ed, 1996.
- 21-Naaman.A.E, "Engineered steel fiber with optimal properties for reinforcement of cement composites", Journal of advanced concrete technology, Vol.1.no.3, p241-252, November 2003.
- 22-Nelson.P.K&Li.V.C&ASCE.F&Kamada.T, "Fracture Toughness of Microfiber Reinforced Cement Composites", Journal of advanced materials in civil engineering, p384-391, September/October 2002.
- 23-Li.V.C&Fischer.G, "Effect of fiber reinforcement on the response of structural members", Fracture mechanics of concrete structures, p831-838, 2004.
- 24-Li.V.C&Fischer.G, "Reinforced ECC-an evolution from materials to structures", proceedings of the 1st fib congress, p105-122, 2004.
- 25-Alwan.J.A&Naaman.A.E&Guerrero.P, "Effect of mechanical clamping on the pull-out response of hooked steel fibers embedded in cementitious matrices", concrete science and engineering, vol.1,p15-25, march 1999.
- 26-Sadrekarimi.A, "development of light weight reactive powder concrete", Japan concrete institute, Journal of advanced concrete technology, vol.2, no.3, p409-417, 2004.

27-Li.V.C&Wang.S, "On high performance fiber reinforced cementitious composites", Japan concrete institute, p13-23, 2003.

28-Fukuyama.H&Suwada.H, "Experimental response of HPFRCC dampers for structural control", Journal of advanced concrete technology, vol.1, no.3, p317-326, november 2003.

29-Ma.J&Schneider.H, "Properties of Ultra-High-Performance Concrete", LACER, no.7, p25-32, 2002.

30-Tasdemir.M.A&Karihaloo.B.L&Bayramov.F&Yerlikaya.M&Sonmez.R,"HS/HPC, HPFRCC, and SCC for repair and retrofiting of concrete structures", 2003.

31-Alaee.F.J, "Retrofitting of concrete structures using high performance fiber reinforced cementitious composites(HPFRCC)", thesis submitted for the degree of PHD, 2002.

32-B.L.Karihaloo,S.D.P.Benson,F.J.Alaee, "CARDIFRC[®]-Properties and application to retrofiting",Proceedings of the fifth international conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures, USA, 12-16 April, 2004.

33-A.E.Naaman&H.W.Reinhardt, "High performance fiber reinforced cement composites 2", E&FN Spon, 1996.

34-JCI-DFRCC Committee, "DFRCC terminology and application concepts", Journal of advanced concrete technology, vol.1, no.3, p335-340, november 2003.

35-Victor.C.Li,H.Horii,P.Kabele,T.Kanda,Y.M.Lim, "repair and retrofit with engineered cementitious composites", engineering fracture mechanics, p317-334, 2000.

36-Victor.C.Li, "On Engineered Cementitious Composites(ECC)-A Review of the Material and Its Applications", Journal of advanced concrete technology, vol.1, no.3, p215-230, november 2003.

Abstract:

Nowadays, concrete is one of the most common materials for the construction of structures. A great number of investigations have been conducted on the compressive strength and durability of concrete. However, concrete with high compressive strength usually suffers from the lack of tensile strength and ductility. Reinforcement with steel bars is the most common method to compensate the low tensile strength & ductility of concrete. However, steel bars only reinforce concrete locally in their own directions. One of the main solutions to improve the concrete properties in all directions and to make a homogeneous material is to reinforce concrete by fibers. The tensile strength and ductility of concrete can be simultaneously improved with incorporating fibers in concrete.

The aim of this study is to develop a steel fiber reinforced cementitious composite with high tensile strength and ductility using available materials in Iran. This research is divided into three stages:

- To develop a suitable cement-based material to be the matrix for steel fibers;
- To find an appropriate and compatible shape of steel fibers;
- And finally, to reach a fiber reinforced concrete with high tensile strength and ductility.

In the first stage, after casting of 140 mixes, a cement based material with compressive strength of 1700 Kg/cm^2 was found to be suitable as the matrix. In the second stage, to make deformed (crimped) fibers, from continuous straight steel fibers automatically, an innovative machine was developed. Having produced crimped fibers, pull-out tests on single fibers (0.3mm diameter, 20mm length, 2mm wave length) with different amplitudes were carried out and fibers with 0.4mm amplitude were found to be the most efficient ones and compatible with the matrix.

Finally, by adding 2-4 percent (by volume) of the achieved steel fibers to the matrix, the compressive and tensile strength were improved up to 1980 Kg/cm^2 and 238 Kg/cm^2 , respectively. In addition, the rupture modulus and fracture energy as high as 232 Kg/cm^2 and 9500 J/m^2 , respectively, were achieved.