

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شاهرود

دانشکده عمران و معماری

گروه عمران - سازه

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار و تاثیر آن بر مشخصات مکانیکی بتن الیافی

منصور جامعی

استاد راهنما :

دکتر فرشید جندقی علایی

زمستان ۱۳۹۱

دانشگاه شاهرود

دانشکده : عمران و معماری

گروه : عمران - سازه

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای منصور جامعی

تحت عنوان: بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار و اثر آن بر مشخصات مکانیکی بتن الیافی

در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۳۰ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
			نام و نام خانوادگی : دکتر فرشید جندقی علایی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : دکتر سعید گلپان		نام و نام خانوادگی : دکتر علی کیهانی
			نام و نام خانوادگی : دکتر وحیدرضا کلات جاری

تقدیم ہے :

ہمسر و دختر عزیزتر از جانم

قدردانی

بر خود لازم می‌دانم که از زحمات، پشتیبانی بی‌دریغ و راهنمایی‌های صبورانه استاد محترم و معزز جناب

آقای دکتر فرشید علایی که راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده داشته‌اند تشکر و قدردانی داشته باشم.

بدون شک انجام این تحقیق مدیون حمایت و پشتیبانی ایشان است.

هم‌چنین از پدر عزیزم که پیشنهادها و راهکارهایشان در مراحل مختلف انجام این پایان‌نامه، همواره

گروه‌کشی مسائل و مشکلات پیش‌رو بوده و از خداوند متعال طول عمر و سلامتی را برای ایشان مسالت

دارم. در انتها از کلیه دوستان بویژه جناب آقای مهندس ابوالفضل عسکری که در مراحل مختلف

این پایان نامه مرایاری نمودند سپاس گزارم، و موفقیت ایشان در مراحل مختلف زندگی را از خداوند

متعال خواستارم.

تعهد نامه

اینجانب منصور جامعی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران - سازه دانشکده عمران و معماری دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی رفتار بیرون کشیده شدن ایاف قلابدار و اثر آن بر مشخصات مکانیکی بتن الیافی تحت راهنمایی دکتر فرشید جندقی علایی متعهد می شوم :

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

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

هدف اصلی این تحقیق بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف فولادی قلابدار و تاثیر آن بر خصوصیات مکانیکی بتن الیافی می‌باشد. بدین منظور در گام اول خصوصیات ماتریس بکار رفته شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدن و مقاومت خمشی تعیین شده‌اند. الیاف بکار رفته در این تحقیق الیاف فولادی قلابدار می‌باشد. در گام دوم رفتار الیاف به کمک انجام آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف منفرد مورد بررسی قرار گرفته است. چیدمان این آزمایش به کمک مقایسه نتایج بدست آمده و تصویربرداری اشعه ایکس صحت‌سنجی گردیده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که الیاف قلابدار دارای رفتار سخت‌شدگی لغزشی می‌باشند که این امر به دلیل ایجاد مفصل پلاستیک در انتهای قلابدار الیاف بوده و این رفتار باعث افزایش مقاومت پیوستگی و انرژی لازم برای بیرون کشیده شدن الیاف می‌گردد. در گام سوم رفتار بیرون کشیده شدن الیاف به کمک مدل‌سازی آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف منفرد در نرم‌افزار ANSYS مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به پیچیدگی رفتار الیاف، سعی شده است رفتارهای غیرخطی موجود شامل اصطکاک، تماس الیاف و ماتریس، تغییرشکل‌های بزرگ و رفتار پلاستیک مصالح در این مدل‌سازی منظور گردد. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی به کمک نتایج بدست آمده از نمونه‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده‌اند. تشکیل مفصل پلاستیک در انتهای قلابدار الیاف و تغییرشکل آن نیز در مدل‌سازی مشاهده گردیده و باعث بروز رفتار سخت‌شدگی-لغزشی می‌گردد که این امر با رفتار واقعی الیاف مطابقت دارد. در گام آخر درصد حجمی الیاف مورد نیاز برای دستیابی به رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی به کمک نتایج بدست آمده از آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف، تعیین شده است. رفتار خمشی ماتریس مسلح به ۱ و ۲ درصد حجمی الیاف از طریق انجام آزمایش خمش چهار نقطه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته و پارامترهای مربوطه شامل مقاومت خمشی معادل، مقاومت نظیر اولین ترک‌خوردگی و طاقت مصالح تعیین و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج بدست آمده بروز رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی در نمونه‌های مسلح به ۲

درصد الیاف و رفتار نرم‌شدگی تغییرمکانی در نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که بروز رفتار سخت‌شدگی باعث افزایش مقاومت خمشی شده و همچنین تاثیر چشمگیری در قابلیت جذب انرژی مصالح و در نتیجه شکل‌پذیری آن دارد.

واژگان کلیدی : الیاف قلابدار، سخت‌شدگی لغزشی، درصد حجمی، سخت‌شدگی تغییرمکانی، جذب انرژی

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- اهمیت پژوهش.....	۳
۳-۱- اهداف و فعالیت‌ها.....	۳
۴-۱- ساختار پایان‌نامه.....	۴
فصل دوم: بتن الیافی.....	۷
۱-۲- تاریخچه بتن الیافی.....	۸
۲-۲- بتن الیافی.....	۸
۳-۲- بتن مسلح به الیاف فولادی.....	۱۰
۱-۳-۲- خصوصیات مخلوط تازه SFRC.....	۱۱
۲-۳-۲- خصوصیات مکانیکی SFRC.....	۱۲
۳-۳-۲- دوام SFRC.....	۱۵
۱-۳-۳-۲- یخ زدن و ذوب شدن.....	۱۵
۲-۳-۳-۲- خوردگی الیاف قبل از ترک خوردگی ماتریس.....	۱۵
۳-۳-۳-۲- خوردگی الیاف بعد از ترک خوردگی ماتریس.....	۱۵
۴-۳-۳-۲- ترک خوردگی ناشی از انقباض.....	۱۶
۴-۳-۲- طراحی اعضای SFRC مسلح شده با آرماتور.....	۱۷
۵-۳-۲- کاربردهای بتن مسلح به الیاف فولادی.....	۱۸
فصل سوم: مروری بر ادبیات فنی پیشین.....	۲۱
۱-۳- مقدمه.....	۲۲
۲-۳- تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف فولادی از ماتریس	
سیمانی.....	۲۲

- ۳-۳- تحقیقات انجام شده در زمینه مدل سازی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف فولادی ۲۶
- ۴-۳- تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی خصوصیات مصالح پایه سیمانی با عملکرد بالا..... ۳۰
- فصل چهارم: ارزیابی خصوصیات الیاف و بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار... ۳۹**
- ۴-۱-۱- مصالح..... ۴۰
- ۴-۱-۱-۱- سیمان..... ۴۰
- ۴-۱-۲- میکروسیلیس..... ۴۱
- ۴-۱-۳- سنگدانه..... ۴۲
- ۴-۱-۴- فوق روان کننده..... ۴۳
- ۴-۱-۵- الیاف..... ۴۳
- ۴-۲- طرح اختلاط و روند اختلاط..... ۴۴
- ۴-۳- ارزیابی طرح اختلاط..... ۴۶
- ۴-۴- ارزیابی خصوصیات مکانیکی ماتریس سیمانی..... ۴۹
- ۴-۴-۱- نحوه ساخت و آماده سازی نمونه ها..... ۴۹
- ۴-۴-۲- عمل آوری نمونه ها..... ۵۱
- ۴-۴-۳- مقاومت فشاری..... ۵۲
- ۴-۴-۴- مقاومت کششی دو نیم شدن..... ۵۳
- ۴-۴-۵- مقاومت خمشی..... ۵۵
- ۴-۵-۱- نتایج..... ۵۷
- ۴-۵-۱-۱- نتایج مقاومت فشاری..... ۵۷
- ۴-۵-۲- نتایج مقاومت کششی دو نیم شدن..... ۵۷
- ۴-۵-۳- نتایج مقاومت خمشی..... ۵۸
- ۴-۶- بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار از ماتریس سیمانی..... ۶۰

۶۰	۷-۴- مکانیزم و انرژی بیرون کشیده شدن.....
۶۱	۸-۴- انرژی بیرون کشیده شدن الیاف و مقاومت پیوستگی معادل.....
۶۲	۹-۴- نحوه انجام آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف
۶۵	۱-۹-۴- ارزیابی چیدمان آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف
۶۵	۲-۹-۴- آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف قلاب دار Dramix
۶۹	۱۰-۴- بررسی رفتار بیرون شکیده شدن الیاف Durocem.....
۶۹	۱۱-۴- نتایج آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف Durocem.....
۷۳	فصل پنجم: مدل سازی بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس.....
۷۴	۱-۵- مقدمه.....
۷۴	۲-۵- تحلیل غیر خطی.....
۷۴	۱-۲-۵- غیرخطی هندسی.....
۷۴	۲-۲-۵- رفتار غیر خطی مصالح.....
۷۵	۳-۲-۵- تغییر وضعیت سازه.....
۷۵	۳-۵- حل مسائل غیرخطی در ANSYS.....
۷۷	۴-۵- چگونگی انجام تحلیل در نرم افزار ANSYS.....
۷۷	۱-۴-۵- مدل سازی.....
۷۷	۱-۱-۴-۵- المان (Element).....
۷۸	۲-۱-۴-۵- خصوصیات مصالح.....
۷۸	۳-۱-۴-۵- ثابت‌های حقیقی.....
۷۸	۵-۵- نکات قابل توجه در مدل سازی بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس سیمانی.....
۷۹	۶-۵- مدل سازی الیاف و ماتریس سیمانی در نرم افزار ANSYS.....
۷۹	۱-۶-۵- المان Solid 187.....

- ۸۰-۶-۲-۵- مصالح (مدل رفتاری) مورد استفاده در شبیه سازی الیاف ۸۰
- ۸۰-۶-۲-۱- ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic) ۸۰
- ۸۰-۶-۲-۲- ایزوتروپیک چند خطی (Multilinear Isotropic Hardening Plasticity) ۸۰
- ۸۰-۶-۳- مدل سازی سطح مشترک الیاف و ماتریس سیمانی ۸۰
- ۸۱-۶-۴- المان COMBIN39 ۸۱
- ۸۲-۶-۵- المان CONTA174 و TARGET170 ۸۲
- ۸۴-۵-۷- مراحل مدل سازی بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس ۸۴
- ۸۶-۵-۸- مدل سازی بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار از ماتریس سیمانی ۸۶
- ۸۷-۵-۸-۱- مشخصات مصالح به کار رفته در مدل سازی ۸۷
- ۸۷-۵-۸-۲- نکات کلی مدل سازی الیاف قلابدار ۸۷
- ۸۹-۵-۸-۳- داده های ورودی اجزاء محدود ۸۹
- ۸۹-۵-۸-۳-۱- ماتریس بتنی ۸۹
- ۹۱-۵-۸-۳-۲- داده های ورودی الیاف ۹۱
- ۹۱-۵-۸-۳-۳- داده های ورودی سطح مشترک الیاف و ماتریس بتنی (Interface) ۹۱
- ۱۰۱-۴-۸-۴- شبکه بندی مدل ۱۰۱
- ۱۰۴-۵-۸-۵- بارگذاری و شرایط تکیه گاهی ۱۰۴
- ۱۰۵-۵-۸-۶- روش تحلیل ۱۰۵
- ۱۰۶-۵-۸-۷- نتایج بدست آمده از تحلیل اجزای محدود و مقایسه آن ها با نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی موجود ۱۰۶
- ۱۱۱- فصل ششم: دستیابی به مصالح با رفتار سخت شدگی تغییر مکانی ۱۱۱
- ۱۱۲-۶-۱- مقدمه ۱۱۲
- ۱۱۲-۶-۲- سخت شدگی کرنشی و سخت شدگی تغییر مکانی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف ۱۱۲

- ۱۱۴-۳-۶- درصد حجمی مورد نیاز الیاف برای دستیابی به رفتار سخت‌شدگی کرنشی.....
- ۱۱۶-۴-۶- درصد الیاف مورد نیاز به منظور دستیابی به رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی
- ۱۱۸-۵-۶- تشریح برنامه آزمایشگاهی
- ۱۱۸-۱-۵-۶- مصالح و آماده‌سازی نمونه‌ها.....
- ۱۱۹-۲-۵-۶- مقاومت فشاری.....
- ۱۱۹-۳-۵-۶- آزمایش مقاومت خمشی.....
- ۱۱۹-۱-۳-۵-۶- پارامترهای توصیف‌کننده رفتار خمشی.....
- ۱۲۱-۲-۳-۵-۶- چیدمان و نحوه انجام آزمایش مقاومت خمشی.....
- ۱۲۳-۶-۶- نتایج آزمایشات.....
- ۱۲۳-۱-۶-۶- نتایج آزمایش مقاومت فشاری.....
- ۱۲۵-۲-۶-۶- رفتار خمشی.....
- ۱۳۰-۳-۶-۶- ظرفیت باربری (تنش‌های خمشی معادل).....
- ۱۳۱-۴-۶-۶- جذب انرژی.....
- ۱۳۲-۵-۶-۶- تغییرمکان.....
- ۱۳۳- فصل هفتم: نتیجه‌گیری.....
- ۱۳۴-۱-۷- نتیجه‌گیری.....
- ۱۳۴-۱-۱-۷- نتایج حاصله از رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلاب‌دار.....
- ۱۳۵-۲-۱-۷- نتایج حاصله از مدل‌سازی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف
- ۱۳۵-۳-۱-۷- نتایج حاصله از تاثیر افزودن الیاف و افزایش درصد حجمی آن.....
- ۱۳۶-۴-۱-۷- نتایج حاصله از بررسی رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی.....
- ۱۳۷-۲-۷- پیشنهادات.....
- ۱۳۸- مراجع:

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ اهداف و فعالیت های تحقیق..... ۶
- شکل ۱-۲ مدل مصالح مرکب با دو جزء اصلی الیاف و ماتریس..... ۹
- شکل ۲-۲ دسته‌بندی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف..... ۱۰
- شکل ۲-۳ انواع الیاف فولادی..... ۱۰
- شکل ۲-۴ تاثیر افزودن درصد کمی الیاف صاف فولادی بر کاهش عرض ترک [۱]..... ۱۶
- شکل ۲-۵ فرضیات اساسی روش طراحی ارائه شده توسط Henager و Doherty [۱]..... ۱۷
- شکل ۴-۱ مخلوط‌کن‌های بکار رفته در ساخت نمونه‌ها..... ۴۵
- شکل ۴-۲ روند طرح اختلاط..... ۴۶
- شکل ۴-۳ قالب های مورد استفاده قبل و بعد از بتن ریزی..... ۵۰
- شکل ۴-۴ نمونه ها پس از بازکردن قالب ها و نام گذاری..... ۵۰
- شکل ۴-۵ نمودار دوره عمل آوری نمونه ها و تغییرات دمای آب در این دوره..... ۵۱
- شکل ۴-۶ مخزن ساخته شده برای عمل آوری نمونه ها در دمای بالا..... ۵۲
- شکل ۴-۷ نمونه فشاری در انتهای روند بارگذاری..... ۵۳
- شکل ۴-۸ چیدمان آزمایش دونیم شدن..... ۵۴
- شکل ۴-۹ تجهیزات و نحوه بار گذاری آزمایش دونیم شدن..... ۵۴
- شکل ۴-۱۰ چیدمان آزمایش مقاومت خمشی..... ۵۶
- شکل ۴-۱۱ تجهیزات و نحوه بارگذاری آزمایش مقاومت خمشی..... ۵۶
- شکل ۴-۱۲ حالت گسیختگی نمونه در آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن..... ۵۸
- شکل ۴-۱۳ حالت گسیختگی نمونه‌های تیر در انتهای آزمایش خمشی..... ۵۹
- شکل ۴-۱۴ رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلاب‌دار فولادی..... ۶۱
- شکل ۴-۱۵ انرژی بیرون کشیده شدن الیاف و مقاومت پیوستگی معادل..... ۶۲

- شکل ۴-۱۶ هندسه قالب‌های آزمایش بیرون کشیدن الیاف..... ۶۳
- شکل ۴-۱۷ قالب آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف..... ۶۴
- شکل ۴-۱۸ مراحل قرار دادن الیاف در داخل قالب..... ۶۴
- شکل ۴-۱۹ نمونه ساخته شده آزمایش بیرون کشیدن الیاف..... ۶۶
- شکل ۴-۲۰ تصویربرداری از نمونه با اشعه ایکس..... ۶۶
- شکل ۴-۲۱ چیدمان آزمایش بیرون کشیدن الیاف..... ۶۷
- شکل ۴-۲۲ مقایسه نتایج تحقیق با نتایج Kim..... ۶۸
- شکل ۴-۲۳ نمونه‌های آزمایش بیرون کشیدن الیاف..... ۶۹
- شکل ۴-۲۴ منحنی نیرو-تغییر مکان آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف قلاب‌دار..... ۷۰
- شکل ۴-۲۵ منحنی تنش-تغییر مکان آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف قلاب‌دار..... ۷۰
- شکل ۴-۲۶ منحنی تنش پیوستگی-تغییر مکان آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف قلاب‌دار..... ۷۱
- شکل ۴-۲۷ تغییر شکل الیاف فولادی در حین بیرون کشیده شدن از ماتریس..... ۷۱
- شکل ۵-۱ مراحل حل مسئله به روش نیوتن-رافسون..... ۷۵
- شکل ۵-۲ مفهوم گام بارگذاری و زیر گام..... ۷۷
- شکل ۵-۳ هندسه، موقعیت گره ها و دستگاه مختصات المان Solid187 [۲۶]..... ۷۹
- شکل ۵-۴ موقعیت گره ها و دستگاه مختصات المان COMBIN139 [۲۶]..... ۸۱
- شکل ۵-۵ نمودار نیرو-تغییر مکان المان COMBIN39 [۲۶]..... ۸۲
- شکل ۵-۶ هندسه و موقعیت نقاط المان [۲۶]..... ۸۳
- شکل ۵-۷ رابطه بین تنش برشی و تنش قائم وارد بر سطح تماس دو جسم [۲۶]..... ۸۴
- شکل ۵-۸ ابعاد و هندسه ی الیاف نمونه..... ۸۷
- شکل ۵-۹ هندسه ی الیاف و ماتریس مدل سازی شده در نرم افزار ANSYS..... ۸۸
- شکل ۵-۱۰ مدل رفتاری تنش-کرنش بتن..... ۹۰

- شکل ۵-۱۱ منحنی تنش- کرنش تعریف شده برای نرم افزار..... ۹۰
- شکل ۵-۱۲ منحنی تنش- کرنش الیاف..... ۹۱
- شکل ۵-۱۳ نحوه اتصال المان ها به ماتریس بتنی..... ۹۲
- شکل ۵-۱۴ منحنی نیرو- لغزش بیرون کشیدگی الیاف مستقیم..... ۹۳
- شکل ۵-۱۵ نمودار تنش برشی پیوستگی..... ۹۴
- شکل ۵-۱۶ المان های Combin39 در سطح مشترک ماتریس و الیاف..... ۹۵
- شکل ۵-۱۷ المان های Contact و Target..... ۹۷
- شکل ۵-۱۸ جهت گیری مناسب بردارهای قائم المان های Contact و Target..... ۹۷
- شکل ۵-۱۹ منحنی تغییرات ضریب اصطکاک..... ۱۰۱
- شکل ۵-۲۰ رابطه‌ی دقت حل اجزا محدود با تعداد المان ها..... ۱۰۲
- شکل ۵-۲۱ تراکم شبکه بندی الیاف..... ۱۰۳
- شکل ۵-۲۲ تراکم شبکه بندی ماتریس بتنی..... ۱۰۳
- شکل ۵-۲۳ محل تکیه گاه و اعمال باگذاری..... ۱۰۴
- شکل ۵-۲۴ صفحه اعمال شرایط تکیه گاهی تقارن..... ۱۰۵
- شکل ۵-۲۵ نمودار نیرو- لغزش حاصل از تحلیل اجزای محدود..... ۱۰۷
- شکل ۵-۲۶ تغییر شکل الیاف در لغزش ۵ میلی‌متر..... ۱۰۸
- شکل ۵-۲۷ کرنش های پلاستیک در مراحل بارگذاری..... ۱۰۹
- شکل ۶-۱ منحنی تنش- کرنش یا تنش- تغییر طول تحت بارهای کششی [۲۸]..... ۱۱۳
- شکل ۶-۲ دسته‌بندی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف بر اساس رفتار تحت بارهای کششی و رفتار خمشی [۲۸]..... ۱۱۴
- شکل ۶-۳ درصد حجمی الیاف مورد نیاز برای دستیابی به رفتار سخت‌شدگی کرنشی..... ۱۱۶
- شکل ۶-۴ درصد حجمی الیاف مورد نیاز برای دستیابی به رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی..... ۱۱۷

- شکل ۶-۵ منحنی نیرو- تغییرمکان مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف [۱۵]..... ۱۲۰
- شکل ۶-۶ هندسه نمونه‌ها و چیدمان آزمایش مقاومت خمشی..... ۱۲۲
- شکل ۶-۷ تاثیر الیاف بر مقاومت فشاری ماتریس..... ۱۲۵
- شکل ۶-۸ منحنی نیرو- تغییرمکان و تنش - تغییرمکان نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف..... ۱۲۵
- شکل ۶-۹ منحنی نیرو- تغییرمکان و تنش - تغییرمکان نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف..... ۱۲۶
- شکل ۶-۱۰ مقایسه رفتار نمونه‌های مسلح به ۱ و ۲ درصد الیاف..... ۱۲۹
- شکل ۶-۱۱ نحوه ترک‌خوردگی نمونه‌ها..... ۱۲۹
- شکل ۶-۱۲ نحوه تعیین نیرو و تغییرمکان نظیر ایجاد اولین ترک..... ۱۳۰
- شکل ۶-۱۳ تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف بر تنش‌های خمشی معادل..... ۱۳۰
- شکل ۶-۱۴ تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف در میزان جذب انرژی..... ۱۳۱
- شکل ۶-۱۵ تاثیر درصد حجمی الیاف در تغییرمکان نظیر نقاط MOR و LOP..... ۱۳۲

فهرست جداول

- جدول ۴-۱ ترکیبات شیمیایی سیمان..... ۴۰
- جدول ۴-۲ ترکیبات شیمیایی میکروسلیس..... ۴۲
- جدول ۴-۳ دانه بندی سنگدانه کوارتز..... ۴۲
- جدول ۴-۴ مشخصات الیاف..... ۴۳
- جدول ۴-۵ طرح اختلاط اولیه ماتریس سیمانی..... ۴۴
- جدول ۴-۶ دانه بندی سنگدانه های کوارتز در طرح اختلاط..... ۴۴
- جدول ۴-۷ طرح اختلاط..... ۴۷
- جدول ۴-۸ طرح اختلاط نهایی ماتریس سیمانی..... ۴۸
- جدول ۴-۹ طرح اختلاط نهایی..... ۴۹
- جدول ۴-۱۰ نتایج آزمایش مقاومت فشاری..... ۵۷
- جدول ۴-۱۱ نتایج آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن..... ۵۸
- جدول ۴-۱۲ نتایج آزمایش مقاومت خمشی..... ۵۹
- جدول ۴-۱۳ نتایج آماری آزمایش بیرون کشیدگی الیاف..... ۷۲
- جدول ۵-۱ مقادیر پیشنهادی ثوابت حقیقی برای المان CONTA174..... ۹۹
- جدول ۵-۲ مقادیر پیشنهادی گزینه های المان CONTA174..... ۱۰۰
- جدول ۵-۳ تعداد المان های به کار رفته در مدل سازی..... ۱۰۲
- جدول ۶-۱ نتایج مقاومت فشاری نمونه های مسلح به ۱ درصد حجمی الیاف..... ۱۲۴
- جدول ۶-۲ نتایج مقاومت فشاری نمونه های مسلح به ۲ درصد حجمی الیاف..... ۱۲۴
- جدول ۶-۳ جزئیات نتایج آزمایش نمونه های مسلح به ۱ درصد الیاف..... ۱۲۷
- جدول ۶-۴ جزئیات نتایج آزمایش نمونه های مسلح به ۲ درصد الیاف..... ۱۲۸

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

در سال‌های اخیر روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌ها به سرعت توسعه یافته است. از جمله دلایل این توسعه می‌توان به افزایش نیازهای طراحی، الزامات جدید معماری و وقوع فجایع انسانی اشاره نمود. یکی از راه‌حل‌های مناسب در راستای نیل به هدف مقاوم‌سازی، استفاده از مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با عملکرد بالا^۱ می‌باشد. این مصالح در مقایسه با بتن معمولی یا بتن‌های الیافی متداول شکل‌پذیری، دوام و قابلیت جذب انرژی بالاتری دارند. اصطلاح عملکرد بالا دلالت بر خصوصیات بهینه‌شده‌ی این مصالح مانند رفتار سخت‌شدگی کرنشی، کاهش عرض ترک و بهبود مقاومت، شکل‌پذیری، جذب انرژی، دوام و مقاومت در برابر خوردگی، می‌نماید. زمانی که بتن یا بتن الیافی^۲ تحت کشش قرار می‌گیرد، همراه با ایجاد ترک قابلیت انتقال تنش‌های کششی در سطح ترک را از دست می‌دهد. درحالی‌که مصالح پایه سیمانی با عملکرد بالا پس از ایجاد اولین ترک، رفتار سخت‌شدگی و ترک‌خوردگی‌های متعدد را از خود نشان می‌دهد. یعنی پس از ایجاد اولین ترک همچنان مقاومت مصالح افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر بیشینه‌ی مقاومت پس از ترک‌خوردگی از مقاومت نظیر ایجاد اولین ترک بیشتر است. توانایی مصالح پایه سیمانی با عملکرد بالا در بروز رفتار سخت‌شدگی کرنشی به مشخصات ماتریس، الیاف و خصوصیات پیوستگی الیاف و ماتریس وابسته است. به کمک تغییر و بهبود خصوصیات ماتریس، الیاف و پیوستگی این دو می‌توان به رفتار سخت‌شدگی کرنشی دست یافت. محققان بسیاری با افزودن الیاف به ماتریس سیمانی توانسته‌اند خصوصیات مصالح را بهبود بخشند.

با ایجاد ترک، الیاف موجود در سطح ترک با پل زدن بین سطوح ترک می‌توانند تنش‌های کششی را انتقال دهند. بسته به نحوه‌ی پیوستگی الیاف و ماتریس، الیاف می‌توانند دو رفتار متمایز را از خود بروز دهند. در صورتی که مقاومت پیوستگی الیاف بالا باشد، الیاف گسیخته خواهند شد. درحالی‌که مقاومت

^۱High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC)

^۲Fiber Reinforced Concrete (FRC)

پیوستگی کم، منجر به بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس می‌گردد. بنابراین رفتار کلی مصالح تا حد زیادی وابسته به پیوستگی الیاف و ماتریس می‌باشد.

۱-۲- اهمیت پژوهش

هرچند استفاده از الیاف در بتن به منظور بهبود خصوصیات آن، راه حل مناسبی می‌باشد، با این حال رفتار الیاف منفرد و علی‌الخصوص ارتباط آن با رفتار کل ماتریس می‌بایست بهتر درک شده و مورد بررسی قرار گیرد. این تحقیق به بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف و ارتباط آن با رفتار کل مصالح می‌پردازد.

۱-۳- اهداف و فعالیت‌ها

هدف کلی این تحقیق بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس سیمانی و تاثیر آن بر رفتار کلی مصالح می‌باشد. بدین منظور چهار هدف اصلی تعیین گردیده است که همراه با فعالیت‌های مربوطه در ادامه و در شکل ۱-۱ آورده شده است.

هدف ۱: بررسی خصوصیات ماتریس سیمانی

خصوصیات ماتریس سیمانی مورد استفاده مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدن و مقاومت خمشی ماتریس در این بخش تعیین می‌شوند. بدین منظور نمونه‌های آزمایشگاهی مربوطه ساخته شده و تحت آزمایش قرار خواهند گرفت. نتایج حاصل شده از این آزمایشات در بخش‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند (فصل چهارم).

هدف ۲: بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف

بدین منظور ابتدا می‌بایست قالب‌هایی خاص با قابلیت مدفون نمودن الیاف با طول معین، طراحی و ساخته شوند. سپس عملکرد قالب‌ها در حفظ موقعیت الیاف به کمک تصویربرداری با استفاده از اشعه ایکس بررسی گردد. با انجام آزمایش بیرون کشیدگی بر روی الیافی که نمودار نیرو-لغزش آن موجود

است، دقت چیدمان آزمایش ارزیابی شده و سپس نمونه‌های اصلی آزمایش بیرون کشیده شدن، ساخته شده و نتایج لازم استخراج گردند (فصل چهارم).

هدف ۳: مدل‌سازی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف

به منظور بررسی و درک بهتر رفتار الیاف در حین بیرون کشیده شدن، این آزمایش به کمک نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی می‌گردد. به کمک انجام آزمایش بیرون کشیدگی الیاف مستقیم، رفتار پیوستگی الیاف در ابتدای آزمایش بیرون کشیدگی تعیین شده و به عنوان خصوصیات المان‌های مربوطه به کار برده می‌شوند. علاوه بر این نتایج به دست آمده در بخش‌های قبل در مدل‌سازی منظور می‌گردد. نتایج حاصله از مدل‌سازی به وسیله‌ی نتایج به دست آمده در آزمایشگاه، صحت‌سنجی می‌گردند (فصل پنجم).

هدف ۴: تاثیر رفتار الیاف در حین بیرون کشیده شدن بر رفتار کلی مصالح پایه سیمانی

در این بخش ابتدا درصد الیاف لازم برای دستیابی به رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی محاسبه شده و نمونه‌های آزمایشگاهی با درصد الیاف محاسبه‌شده، ساخته و مورد آزمایش خمشی قرار می‌گیرند. به منظور مقایسه بهتر رفتار مصالح، نمونه‌هایی با درصد الیاف کمتر ساخته شده و مورد آزمایش خمشی قرار می‌گیرند. علاوه بر این رفتار فشاری نمونه‌های استوانه‌ای مسلح به الیاف نیز، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۴- ساختار پایان‌نامه

با توجه به اهداف و وظایف شرح داده شده، این پایان‌نامه در هفت فصل تدوین گردیده است. در ادامه مباحث ارائه‌شده در فصل‌ها توضیح داده می‌شود.

در فصل اول این پایان‌نامه، به بیان مقدمه و کلیات پرداخته می‌شود.

در فصل دوم، بتن الیافی معرفی گردیده و خصوصیات و کاربردهای متفاوت آن از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل سوم، پیشینه تحقیقات انجام‌شده بیان گردیده است. این فصل دارای سه بخش کلی می‌باشد.

- پیشینه تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار از ماتریس سیمانی

- پیشینه تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مدل‌سازی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف

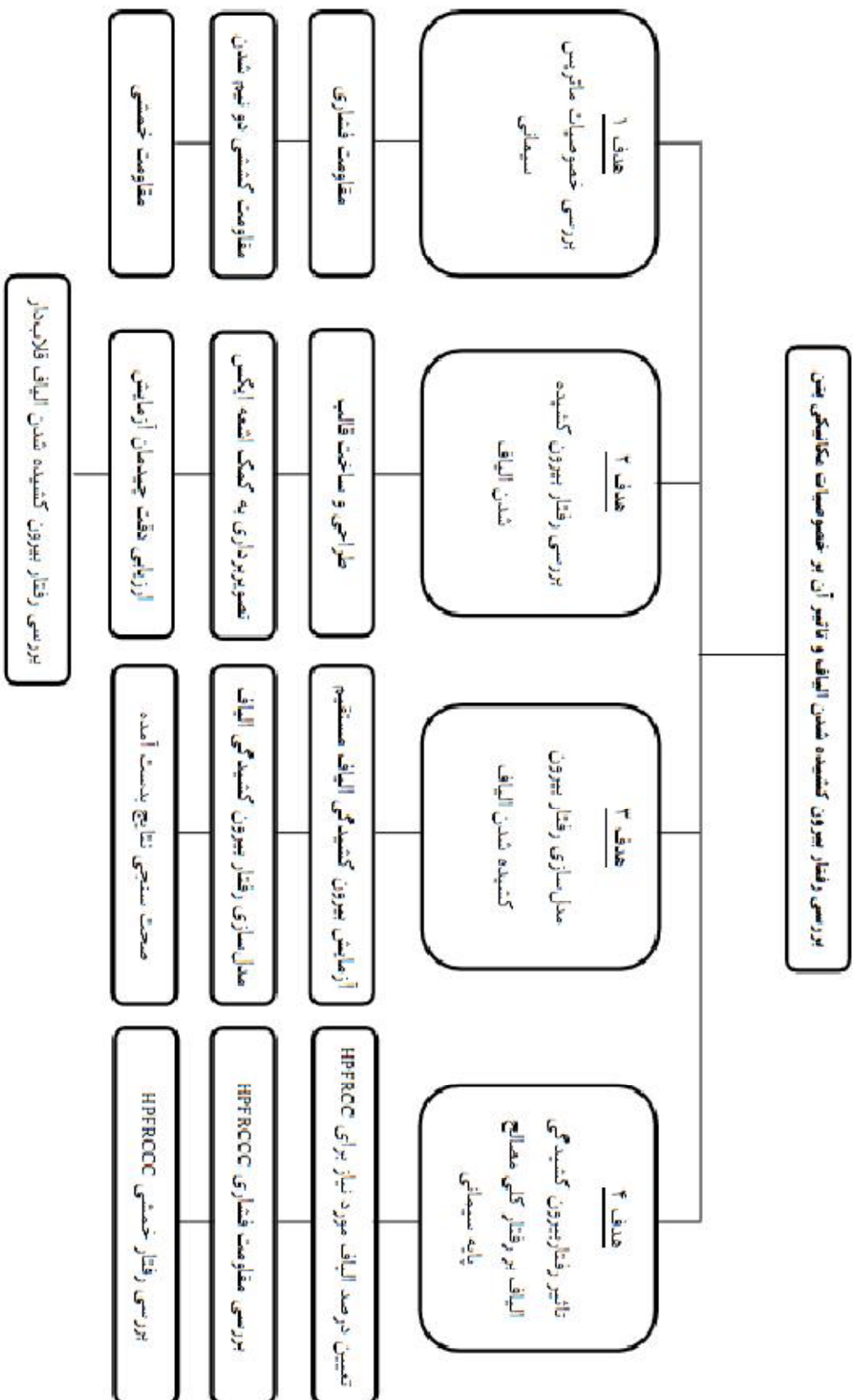
- پیشینه تحقیقات انجام شده در زمینه ارزیابی خصوصیات HPFRCC

فصل چهارم این پایان‌نامه به بیان برنامه‌ی آزمایشگاهی به منظور تعیین خصوصیات ماتریس سیمانی و بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار می‌پردازد. ابتدا مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدن و مقاومت خمشی ماتریس سیمانی به دست آمده و سپس با انجام آزمایش بیرون کشیدگی الیاف، رفتار آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل پنجم به مدل‌سازی آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار پرداخته خواهد شد. الیاف مدفون در ماتریس سیمانی مدل‌سازی شده و نمودار نیرو- لغزش به عنوان اصلی‌ترین خروجی مدل‌سازی استخراج می‌گردد.

فصل ششم به بررسی آزمایشگاهی خصوصیات HPFRCC اختصاص یافته است. در این فصل ابتدا نحوه‌ی دستیابی به HPFRCC بیان شده و سپس خصوصیات آن شامل مقاومت فشاری و رفتار خمشی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

در فصل هفتم نتایج به دست آمده از این تحقیق بیان گردیده و پیشنهادهایی در خصوص فعالیت‌های پژوهشی آتی، ارائه شده است.



شکل ۱-۱ اهداف و فعالیت‌های تحقیق

فصل دوم

بتن الیافی

۲-۱- تاریخچه بتن الیافی

استفاده از الیاف به منظور مسلح نمودن مصالح ترد، از زمان‌های گذشته رواج داشته است. کاه و موی اسب از جمله قدیمی‌ترین الیاف مورد استفاده توسط بشر می‌باشند. استفاده از الیاف پنبه نسوز^۱ در ماتریس سیمانی از سال ۱۸۹۸ شروع شد. لیکن به دلیل مضر بودن این الیاف برای سلامتی انسان، انواع دیگر الیاف در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ مورد استفاده قرار گرفتند. مطالعات آزمایشگاهی به منظور کاربرد الیاف فولادی در بهبود خصوصیات بتن از سال ۱۹۱۰ آغاز گردید. تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. اولین تلاش‌ها به منظور استفاده از الیاف شیشه^۲ در بتن در دهه ۱۹۵۰ انجام شد، که به دلیل دوام کم این الیاف در محیط قلیایی ماتریس سیمان موفقیت‌آمیز نبود. در ادامه، الیاف شیشه مقاوم در برابر محیط‌های قلیایی، تولید و در مسلح‌سازی بتن به کار برده شد. استفاده از الیاف مصنوعی^۳ مانند نایلون^۴ و پلی‌پروپیلن^۵ برای مسلح‌سازی بتن، همانند الیاف فلزی و شیشه موفقیت‌آمیز نبود؛ هرچند درک بهتر مفهوم مسلح‌سازی به وسیله الیاف، روش‌های جدید تولید الیاف و الیاف‌های جدید تولیدشده از مواد آلی، تاثیر مثبت الیاف مصنوعی و طبیعی در مسلح‌سازی بتن را اثبات نمود. انتشار مقالات و برگزاری سمینارهای مختلف حاکی از آن است که تحقیقات و کاربردهای مختلف بتن الیافی در سراسر جهان در حال توسعه است [۱].

۲-۲- بتن الیافی

بتن‌های الیافی یا مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف به‌عنوان یک ماده‌ی مرکب^۶ با دو جزء تشکیل‌دهنده الیاف و ماتریس تعریف می‌شوند. منظور از ماتریس، خمیر^۷، ملات^۸، دوغاب^۹ و یا بتنی است که شامل سنگدانه‌ها و تمامی مواد افزودنی می‌شود. هرچند که در این تعریف، ماتریس که به‌عنوان جزء اصلی بتن الیافی در نظر گرفته شده، خود یک نوع ماده‌ی مرکب محسوب می‌شود. الیاف

¹ Asbestos Fibers

² Glass Fibers

³ Synthetic Fibers

⁴ Nylon

⁵ Polypropylene

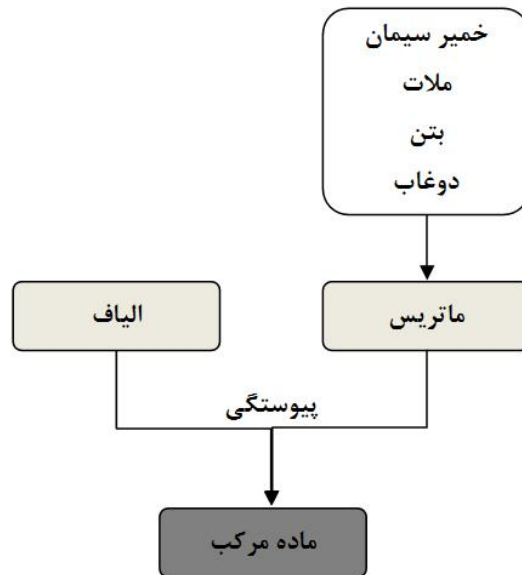
⁶ Composite

⁷ Paste

⁸ Mortar

⁹ Slurry

به عنوان دومین جزء بتن الیافی معمولاً منقطع بوده و توزیع آن در حجم به طور تصادفی است. مکانیزم پیوستگی^۱ موجود بین الیاف و ماتریس، عملکرد این دو جزء را مرتبط کرده و یکی از پارامترهای مهم در رفتار مصالح به شمار می‌رود (شکل ۱-۲).



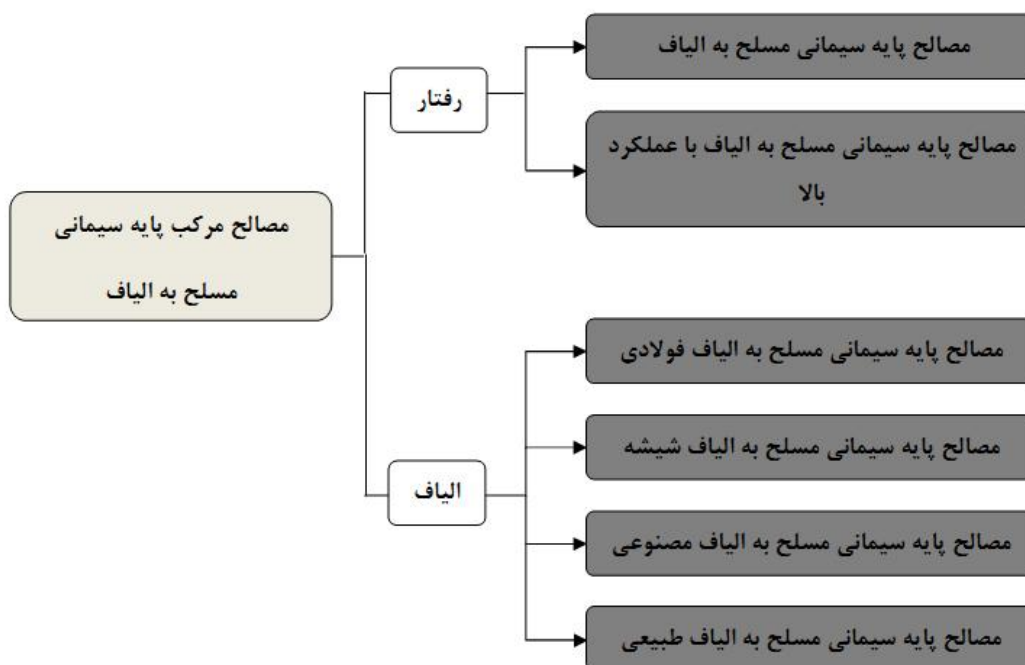
شکل ۱-۲ مدل مصالح مرکب با دو جزء اصلی الیاف و ماتریس

با توجه به تاثیر نوع الیاف در رفتار و خصوصیات مصالح پایه سیمانی، این مصالح را می‌توان بر اساس این ویژگی دسته‌بندی نمود. الیاف گوناگونی برای مسلح‌سازی مصالح پایه سیمانی به کار می‌روند که می‌توان آن‌ها را به چهار گروه اصلی الیاف فولادی، الیاف شیشه، الیاف مصنوعی و الیاف طبیعی تقسیم نمود. مصالح تولیدشده به کمک هر یک از این الیاف نیز با نام الیاف شناخته می‌شوند. علاوه بر نوع الیاف، رفتار مصالح تحت تنش‌های کششی نیز یکی از خصوصیات متمایز مصالح پایه سیمانی به شمار می‌رود. نرم‌شدگی کرنشی^۲ و سخت‌شدگی کرنشی^۳ دو مشخصه در رفتار این مصالح می‌باشند. بروز و یا عدم بروز رفتار سخت‌شدگی کرنشی تحت تنش‌های کششی، این مصالح را به دو گروه مصالح مرکب پایه سیمانی مسلح به الیاف و مصالح مرکب پایه سیمانی مسلح به الیاف با عملکرد بالا تقسیم می‌کند.

^۱ Bond

^۲ Strain-Softening

^۳ Strain-Hardening



شکل ۲-۲ دسته‌بندی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف

شکل ۲-۲ نحوه‌ی تقسیم و نامگذاری مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف بر اساس نوع الیاف و رفتار مصالح را نشان می‌دهد.

۲-۳- بتن مسلح به الیاف فولادی^۱

خصوصیات منحصربه‌فرد الیاف فولادی مانند مقاومت و مدول الاستیسیته نسبتاً بالا، مقاومت در برابر خوردگی در محیط‌های قلیایی و قابلیت افزایش مکانیزم پیوستگی از طریق ایجاد مهار مکانیکی، الیاف فولادی را به یکی از مناسب‌ترین و متداول‌ترین نوع الیاف تبدیل کرده است.



شکل ۲-۳ انواع الیاف فولادی

¹Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)

الیاف فولادی مورد استفاده برای مسلح کردن بتن از نوع کوتاه و ناپیوسته با نسبت ظاهری^۱ (نسبت طول به قطر الیاف) ۲۰ تا ۱۰۰ می‌باشد. سطح مقطع الیاف می‌تواند دایره‌ای، مستطیلی یا نامنظم باشد. الیاف فولادی با سطح مقطع دایره‌ای دارای قطر ۰/۲۵ تا ۱ میلی‌متر هستند. ضخامت الیاف فولادی با سطح مقطع مستطیلی ۰/۱۵ تا ۰/۶۴ میلی‌متر و عرض آن‌ها ۰/۲۵ تا ۲ میلی‌متر می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۲-۳ قابل مشاهده است علاوه بر سطح مقطع، شکل ظاهری الیاف فولادی نیز می‌تواند متفاوت باشد. ایجاد تغییر شکل در الیاف مانند مجعد کردن الیاف در تمامی طول آن، ایجاد انحنای و پهن کردن انتهای الیاف باعث افزایش مکانیزم پیوستگی الیاف می‌گردد [۱].

۲-۳-۱- خصوصیات مخلوط تازه SFRC^۲

در SFRC نیز همانند بتن معمولی^۳، میزان تراکم، مقاومت و دیگر خصوصیات مکانیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد؛ بنابراین کارایی مخلوط باید به اندازه‌ای باشد که بتن‌ریزی^۴، تراکم^۵ و پرداخت سطح^۶ به‌سادگی انجام شده و همراه با توزیع یکنواخت الیاف، جداشدگی^۷ و آب‌انداختگی^۸ مخلوط به حداقل برسد. در بتن‌ریزی‌های متداول به‌طور معمول درصد حجمی الیاف^۹ بین ۰/۲۵ تا ۱/۵ درصد مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزودن الیاف به مخلوط باعث افت اسلامپ^{۱۰} به میزان ۲۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر می‌شود. از این‌رو همواره توصیه می‌شود که متراکم کردن مخلوط از طریق ایجاد ارتعاش^{۱۱} انجام شود. علاوه بر مسائل فوق، گلوله شدن الیاف^{۱۲} در حین اضافه کردن و در مرحله ارتعاش مخلوط، می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. جمع شدن الیاف بلند و نازک با نسبت ظاهری بزرگ‌تر از ۱۰۰ باعث قفل و بست دسته‌ای از الیاف در یکدیگر شده که باز شدن آن بسیار دشوار است. استفاده از الیاف با نسبت ظاهری کمتر از ۵۰ این مشکل را حل نموده ولیکن بهبود هرچه بیشتر خصوصیات مکانیکی SFRC از

^۱Aspect Ratio

^۲Fresh Mix

^۳Plain Concrete

^۴Placement

^۵Consolidation

^۶Finishing

^۷Segregation

^۸Bleeding

^۹Fiber Volume Fraction

^{۱۰}Slump

^{۱۱}Vibration

^{۱۲}Fiber Balling

طریق کاربرد الیاف با نسبت ظاهری بالاتر امکان‌پذیر است. تمایل الیاف به گلوله شدن تابع دانه‌بندی، بزرگ‌ترین بعد سنگدانه، نسبت ظاهری الیاف، درصد حجمی الیاف، هندسه الیاف و روش افزودن آن‌ها به مخلوط است. با افزایش بعد سنگدانه و نسبت ظاهری، درصد حجمی کمتری از الیاف را می‌توان به مخلوط اضافه کرد [۱].

۲-۳-۲- خصوصیات مکانیکی SFRC

خصوصیات مکانیکی SFRC به نوع الیاف، نسبت ظاهری آن، مقاومت ماتریس، اندازه سنگدانه‌ها، اندازه و شکل نمونه و همچنین طریقه‌ی ساخت و عمل‌آوری آن وابسته می‌باشد. مکانیزم مقاوم‌سازی الیاف، انتقال تنش از ماتریس به الیاف از طریق سطح تماس آن‌ها می‌باشد. قبل از ترک‌خوردگی ماتریس، تنش‌های کششی موجود، بین الیاف و ماتریس تقسیم شده و بعد از ترک‌خوردگی، تمامی این تنش‌ها به الیاف منتقل می‌شود. درصد حجمی الیاف و چگونگی عملکرد آن‌ها از مهم‌ترین پارامترهای کنترل‌کننده‌ی خصوصیات SFRC محسوب می‌شوند. چگونگی عملکرد الیاف به مقاومت آن‌ها در برابر بیرون کشیده شدن از ماتریس بستگی دارد. بطور کلی اگر سطح مقطع الیاف ثابت در نظر گرفته شود، با افزایش طول الیاف، تاثیر آن‌ها در افزایش مقاومت SFRC بیشتر است. بازای درصد حجمی ثابت، الیاف با سطح مقطع غیردایره‌ای و الیاف دایره‌ای با قطر کمتر، تاثیر بیشتری در بهبود خصوصیات SFRC خواهند داشت [۱].

در صورت استفاده از الیاف مناسب، شکست عضو زمانی رخ می‌دهد که الیاف در حین بیرون کشیده شدن از ماتریس به حداکثر مقاومت خود رسیده‌اند. با ایجاد تغییر شکل در الیاف می‌توان مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن را افزایش و نسبت ظاهری را نیز کاهش داد. برای دستیابی به شکل‌پذیری بالا شکست عضو می‌بایست با بیرون کشیده شدن الیاف همراه باشد. این نوع شکست در مقایسه با گسیختگی الیاف، تدریجی‌تر می‌باشد. از طریق درک رفتار SFRC و تغییر در مقدار و نوع الیاف می‌توان مصالحی با خصوصیات متفاوت طراحی نمود. الیاف فولادی رفتار بتن را در تمامی حالات بارگذاری تحت تاثیر قرار می‌دهند، لیکن تاثیر آنها در افزایش مقاومت بتن در حالت فشار، کشش، پیچش، برش و خمش متفاوت است [۱].

فشار: تحت بارهای فشاری وجود الیاف مقاومت نهایی بتن الیافی را به مقدار کمی تحت تاثیر قرار می‌دهد. با افزودن ۱/۵ درصد الیاف فولادی مقاومت فشاری تا ۱۵ درصد افزایش می‌یابد [۱].

کشش مستقیم: افزایش مقاومت کششی در این حالت قابل ملاحظه است و با اضافه کردن ۱/۵ درصد الیاف فولادی می‌توان مقاومت کششی بتن را به میزان ۳۰ تا ۴۰ درصد بهبود بخشید [۱].

برش و پیچش: با افزودن الیاف فولادی به بتن مقاومت برشی و پیچشی افزایش پیدا می‌کند. افزایش مقاومت SFRC تحت برش خالص به نحوی آزمایش مقاومت برشی و جهت‌گیری الیاف در ناحیه‌ی گسیختگی برشی وابسته است. با افزودن ۱ درصد الیاف فولادی می‌توان مقاومت را تا ۳۰ درصد افزایش داد [۱].

استفاده از الیاف فولادی همراه با آرماتورهای عرضی و یا به‌صورت جایگزین آن‌ها مزایایی به همراه خواهد داشت. با توزیع یکنواخت و تصادفی الیاف در تمام حجم بتن فواصل آن‌ها در مقایسه با آرماتورهای برشی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر خواهد شد، لذا با جلوگیری از تشکیل ترک‌های موضعی، باعث کاهش اندازه‌ی ترک‌ها می‌گردد. افزودن الیاف، مقاومت ترک‌خوردگی بتن و مقاومت کششی نهایی بتن را افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه الیاف از بازشدگی ترک جلوگیری می‌کند، نیروی ناشی از قفل و بست بین سنگدانه‌ها و بیرون کشیده شدن تدریجی الیاف در سطح ترک، مقاومت برشی-اصطکاکی بتن را افزایش می‌دهد. استفاده از الیاف با مقدار و هندسه‌ی مناسب، رفتار گسیختگی تیر را از حالت برشی (ناشی از ترک‌های قطری) به حالت خمشی تغییر خواهد داد [۱].

خمش: افزایش مقاومت خمشی تیر در مقایسه با دیگر حالات بارگذاری مانند کشش و فشار، بیشتر است. این امر به دلیل رفتار شکل‌پذیر SFRC در وجه کششی تیر می‌باشد. این رفتار باعث تغییر توزیع تنش و کرنش در مقطع شده که در نهایت منجر به تغییر محل تار خنثی به سمت ناحیه فشاری می‌گردد. تحقیقات نشان داده است که با افزودن ۴ درصد الیاف به بتنی با سنگ‌دانه‌های ریز، مقاومت خمشی نسبت به حالت بدون الیاف بیش از دو برابر خواهد شد. در صورت استفاده از

سنگدانه‌های درشت درصد حجمی الیاف از نظر عملی به $1/5$ تا 2 درصد محدود می‌گردد. در این حالت افزایش مقاومت خمشی بیش از 70 درصد نمی‌باشد [۱].

رفتار SFRC تحت بارهای ضربه‌ای: دو پارامتر مهم برای بررسی رفتار بتن تحت بارهای ضربه‌ای، مقاومت و انرژی شکست می‌باشند. رفتار SFRC تحت بارهای ضربه‌ای را به دو صورت می‌توان مورد مطالعه قرار داد:

الف- مقایسه رفتار SFRC و بتن معمولی تحت بارهای ضربه‌ای: مقاومت SFRC تحت بارهای خمشی ضربه‌ای تا 40 درصد بیشتر از بتن معمولی است. الیاف فولادی انرژی شکست را تا $2/5$ برابر برای بتن معمولی و $3/5$ برابر بتن مقاومت بالا نسبت به حالت بدون الیاف افزایش می‌دهند [۱].

ب- مقایسه رفتار SFRC تحت بارهای ضربه‌ای و بارهای استاتیکی: مقاومت بتن در این حالت نسبت به حالت استاتیکی 2 تا 3 برابر برای بتن‌های معمولی و $1/5$ برابر برای بتن‌های با مقاومت بالا می‌باشد. افزایش انرژی شکست نیز نسبت به حالت استاتیکی تا 5 برابر برای بتن‌های معمولی و 4 برابر برای بتن‌های مقاومت بالا می‌باشد [۱].

رفتار SFRC تحت بارهای خستگی^۱: مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش درصد حجمی الیاف، مقاومت خستگی اعضای خمشی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. مقاومت اعضای ساخته شده از SFRC تحت دو میلیون سیکل بارگذاری 65 تا 90 درصد مقاومت خمشی آن‌ها در حالت استاتیکی می‌باشد. علاوه بر این، افزودن الیاف به تیرهای بتن مسلح همراه با افزایش عمر خستگی و باعث کاهش عرض ترک نیز می‌گردد [۱].

خزش^۲ و انقباض^۳: مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد در صورتی که درصد حجمی الیاف فولادی کمتر از 1 درصد باشد، تاثیر چندانی بر خزش و انقباض بتن نخواهد داشت [۱].

مدول الاستیسیته و ضریب پواسون: در صورت استفاده از درصد حجمی الیاف کمتر از 2 درصد، می‌توان مدول الاستیسیته و ضریب پواسون SFRC را همانند بتن بدون الیاف در نظر گرفت [۱].

¹ Fatigue Behavior

² Creep

³ Shrinkage

طاعت^۱: بزرگ‌ترین وجه تمایز SFRC با بتن بدون الیاف، طاعت می‌باشد. این پارامتر از طریق مشاهده رفتار خمشی تیرهای ساده بر اساس ASTM C1018 قابل بررسی است. در تیرهای مسلح شده با الیاف فولادی، خرابی با گسترش تدریجی ترک‌ها و تغییرشکل زیاد همراه خواهد بود. در این حالت یکپارچگی عضو بعد از ترک‌خوردگی و حتی تغییرشکل‌های قابل ملاحظه حفظ می‌شود. در حالی که در تیرهای ساخته شده از بتن بدون الیاف، خرابی به طور ناگهانی و همراه با تغییر شکل‌های کم بوده و عضو با از دست دادن یکپارچگی خود، دو نیم می‌شود [۱].

۲-۳-۳- دوام SFRC

۲-۳-۳-۱- یخ زدن و ذوب شدن^۲

تاثیر الیاف فولادی در مقاومت بتن در مقابل یخ زدن و ذوب شدن قابل ملاحظه نمی‌باشد. هرچند که شدت پوسته شدن و تخریب بتن را کاهش می‌دهد و از ایجاد ترک‌های قابل مشاهده جلوگیری می‌کند. در حقیقت مهم‌ترین عامل در افزایش مقاومت بتن در برابر یخ زدن و ذوب شدن متوالی ساختار مناسب حفره‌های هوا در ماتریس می‌باشد که در این مورد ساختار SFRC مشابه بتن است [۱].

۲-۳-۳-۲- خوردگی الیاف قبل از ترک‌خوردگی ماتریس

افزایش مقاومت فشاری بتن نشان دهنده تراکم مناسب آن است. کاهش نسبت آب به سیمان و استفاده از مواد پوزولانی با افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری، مانع از انتقال خوردگی الیاف به عمق بتن می‌شود. در این حالت خوردگی الیاف تا عمق ۲/۵ میلی‌متر از سطح بتن گسترش خواهد یافت. این وضعیت بدلیل کوتاه و ناپیوسته بودن الیاف و همچنین تماس کم آن‌ها با یکدیگر است. در صورت وجود یون‌های کلر بصورت اشباع در بتن، نیز شرایط خوردگی مشابه خواهد بود [۱].

۲-۳-۳-۲- خوردگی الیاف بعد از ترک‌خوردگی ماتریس

انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های ترک خورده‌ی SFRC که در معرض یون کلر نیز قرار گرفته‌اند، حاکی از خورده شدن الیاف موجود در ترک است. اگرچه در صورتی که عرض ترک کم‌تر از

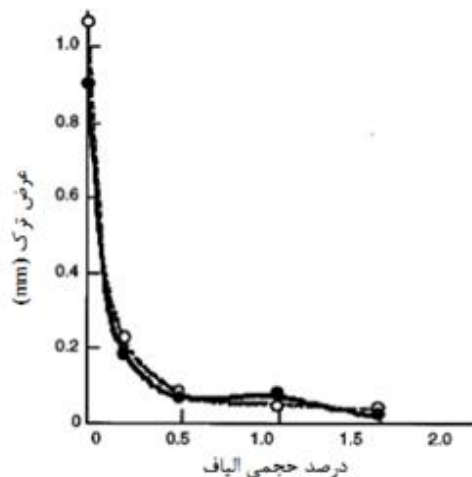
¹Toughness

²Freezing and Thawing

۰/۱ میلی‌متر باشد خوردگی رخ نخواهد داد. علاوه بر این در شرایطی که عرض ترک‌ها بیشتر از ۰/۱ میلی‌متر بوده ولی عمق آن‌ها کم باشد، خوردگی الیاف به صورت موضعی ایجاد شده و از نظر سازه‌ای چندان با اهمیت نمی‌باشد. با این حال ترک خوردگی کششی و خمشی SFRC می‌تواند شرایط سازه‌ای بحرانی را بوجود آورد. بنابراین خوردگی الیاف موجود در ترک می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. به منظور کاهش خوردگی الیاف و جلوگیری از زنگ‌زدگی سطوح، استفاده از الیاف ساخته شده از آلیاژهای فولاد پرکربن، فولاد ضدزنگ و الیاف فولادی گالوانیزه موثر است [۱].

۲-۳-۳-۴- ترک خوردگی ناشی از انقباض

خشک شدن بتن باعث انقباض آن شده و مقدار آن به عواملی مانند خصوصیات مصالح، دما، رطوبت نسبی محیط، سن بتن در حین خشک شدن و حجم بتن وابسته است. در صورت وجود قید در مقابل انقباض بتن، تنش‌های کششی و در نتیجه ترک‌های کششی در آن ایجاد می‌شود. یکی از روش‌های موثر برای کاهش اثرات منفی جمع شدگی بتن، مسلح کردن آن به الیاف فولادی است. این الیاف با ایفای سه نقش مهم، رفتار ترک خوردگی ناشی از انقباض را بهبود می‌بخشد. اولاً با گسترش ترک‌ها از ایجاد ترک‌های موضعی جلوگیری می‌نمایند [۱].



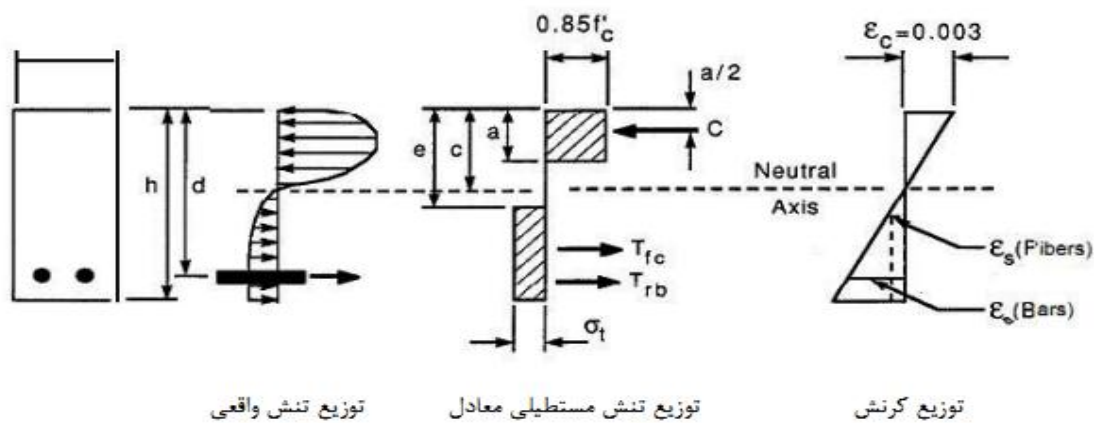
شکل ۲-۴ تاثیر افزودن درصد کم الیاف صاف فولادی بر کاهش عرض ترک [۱]

ثانیا در صورت ترک خوردن ماتریس، تنش‌ها از طریق الیاف موجود در ترک منتقل می‌شوند. ثالثا انتقال تنش برای مدت زمان طولانی باعث ترمیم و بسته شدن ترک‌ها می‌شود. در حالیکه افزودن الیاف فولادی بطور کلی جمع شدگی بتن را کاهش نمی‌دهد ولی با افزایش تعداد ترک‌ها باعث کاهش

عرض ترک می‌گردد. شکل ۲-۴ نشان می‌دهد که با افزودن درصد کمی الیاف صاف فولادی، عرض ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۱].

۲-۳-۴- طراحی اعضای SFRC مسلح شده با آرماتور

به منظور طراحی اعضای مسلح شده با الیاف فولادی و آرماتور، Henager و Doherty در سال ۱۹۷۶ روشی را مشابه به روش آیین‌نامه‌ی ACI ارائه دادند..



شکل ۲-۵ فرضیات اساسی روش طراحی ارائه شده توسط Henager و Doherty [۱]

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + \sigma_t b (h - e) \left(\frac{h}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (1-2)$$

$$e = [\epsilon_s(\text{fibers}) + 0.003] c / 0.003 \quad (2-2)$$

$$\sigma_t = 0.00772 l / d_f \rho_f F_{be} \quad (3-2)$$

در روابط فوق:

l : طول الیاف

d_f : قطر الیاف

ρ_f : درصد حجمی الیاف

F_{be} : ضریب تاثیر پیوستگی الیاف که با توجه به خصوصیات آن بین ۱ تا ۱/۲ در نظر گرفته می‌شود.

a : ارتفاع بلوک تنش مستطیلی

b : عرض تیر

c : فاصله‌ی تار خنثی تا دورترین تار فشاری

d : عمق موثر مقطع

e : فاصله‌ی دورترین تار فشاری تا بالای بلوک تنش کششی

ϵ_s : کرنش کششی موجود در فولادها

ϵ_c : کرنش نظیر خرابی بتن

f_c : مقاومت فشاری بتن

f_y : تنش جاری شدن آرماتورها

C : نیروی فشاری

h : ارتفاع مقطع تیر

σ_t : تنش کششی در بتن الیافی

E_s : مدول الاستیسیته‌ی فولاد

T_{fc} : نیروی کششی بتن الیافی

T_{rb} : نیروی کششی آرماتورها

می‌باشند.

۲-۳-۵- کاربردهای بتن مسلح به الیاف فولادی

بتن مسلح به الیاف فولادی را می‌توان به تنهایی یا به همراه بتن مسلح بکار برد. مواردی که می‌توان

بتن الیافی را به تنهایی به کار گرفت عبارتند از:

- روسازی بتنی بزرگراه‌ها، جاده‌ها و فرودگاه‌ها
- لوله‌های بتنی
- کف کارخانه‌ها، توقف‌گاه‌ها و سالن‌های صنعتی
- دیواره و کف کانال‌ها
- قطعات پیش‌ساخته
- در ساختمان تونل‌ها یا معادن بصورت بتن‌پاشی^۱
- سازه‌های ضدانفجار و ضدحریق

¹Shotcrete

- تثبیت شیب‌ها و ترانسه‌های سنگی و ریزشی با بتن پاشی
- مواردی که می‌توان الیاف فولادی را در بتن مسلح و یا پیش‌تنیده به‌کار برد، عبارتند از:
- شالوده ماشین‌آلات صنعتی
 - دیوارهای حفاظتی، پناهگاه‌ها و آشیانه هواپیماها
 - ساختمان راکتورهای اتمی
 - تیرهای بتنی
 - شمع‌ها

فصل سوم

مروری بر ادبیات فنی

پیشین

۳-۱- مقدمه

در فصل گذشته، خصوصیات و ویژگی‌های بتن مسلح به الیاف فولادی، مطرح گردید. در این فصل تحقیقات و مطالعات پیشین صورت گرفته در زمینه بتن الیافی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با توجه به اهداف تعیین شده در فصل اول، تحقیقات پیشین به سه بخش مجزا تقسیم می‌گردند:

۱. بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف فولادی از ماتریس بتنی

۲. مدل‌سازی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف فولادی

۳. بررسی خصوصیات مصالح پایه سیمانی با عملکرد بالا

۳-۲- تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف فولادی

از ماتریس سیمانی

تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف فولادی صورت گرفته است. تنوع وسیع اشکال الیاف فولادی نیز بر وسعت دامنه این تحقیقات افزوده است. بررسی رفتار بیرون کشیده شدن این الیاف از ماتریس سیمانی پس از ایجاد ترک، دلیل اصلی این تحقیقات بوده است.

در سال ۲۰۰۰، Guerrero و همکارانش تاثیر کاهش اندازه ذرات و کاربرد مصالح چسبنده بر رفتار بیرون کشیده شدن الیاف فولادی را مورد بررسی قرار دادند. سه نوع الیاف فولادی شامل مستقیم، قلاب‌دار و پیچیده مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. ابعاد سنگ‌دانه‌های مورد استفاده به دو محدوده تقسیم شده است. در ماتریس اول اندازه ذرات بین ال‌ک‌های ۵۰ تا ۷۰ و در ماتریس دوم سنگ‌دانه‌هایی با ابعاد کوچک‌تر از ۲۷۰ میکرومتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. چهار نوع مواد افزودنی شامل خاکستر بادی، Latex، Metakaolin و پلی‌وینیل‌الکل به ماتریس افزوده شده و تاثیر آن در رفتار بیرون کشیده الیاف مورد ارزیابی قرار گرفته است. براساس نتایج بدست آمده، کاهش ابعاد سنگ‌دانه‌ها باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. همچنین استفاده از خاکستر بادی و کاهش ابعاد ذرات، موجب بهبود رفتار بیرون کشیده شدن الیاف گشته است [۲].

در سال ۲۰۰۱، Robins و همکاران تحقیقات کامل و جامعی بر روی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف فولادی قلابدار انجام دادند. در این تحقیق الیاف با زوایا یا جهت‌گیری‌های مختلف در ماتریس مدفون گردیده و آزمایش بیرون‌کشیدگی بر روی آن انجام شده است. علاوه بر جهت‌گیری‌های متفاوت، تاثیر طول مدفون الیاف نیز مورد بررسی قرار گرفته است. الیاف با زوایای صفر، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه در ماتریس مدفون گردیده‌اند. با افزایش زاویه جهت‌گیری الیاف، حالت رفتاری آن‌ها تغییر نموده به طوری که الیاف با زوایای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه گسیخته گردیده‌اند. هم‌چنین افزایش زاویه جهت‌گیری منجر به افزایش نیروی لازم برای بیرون کشیده الیاف شده است [۳].

Markovich و همکاران نیز در سال ۲۰۰۱ رفتار بیرون کشیده شدن الیاف را بررسی نموده‌اند. با این تفاوت که ماتریس بکار رفته نیز مسلح به الیاف بوده و تاثیر میزان درصد حجمی الیاف در مقاومت پیوستگی آن‌ها ارزیابی گردیده است. علاوه بر این تاثیر خصوصیات ماتریس نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش درصد حجمی الیاف، رفتار الیاف بهبود یافته و نیروی لازم برای بیرون کشیده شدن الیاف نیز افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت ماتریس سبب افزایش نیروی بیرون کشیدگی الیاف گردیده است [۴].

در سال ۲۰۰۳، Naaman توانست با ارائه‌ی ایده‌ی نو الیافی با خصوصیات بهینه رفتار بیرون کشیده شدن را توسعه دهد. این الیاف که الیاف Torex نامیده می‌شوند، عملکرد سخت‌شدگی لغزشی^۱ را تا پایان لغزش^۲ خود ادامه می‌دهند. این خصوصیت الیاف باعث افزایش چشم‌گیر مقاومت پیوستگی آن شده و کاربرد این الیاف را برای سازه‌هایی تحت بارگذاری‌های دینامیکی مانند زلزله و انفجار پراهمیت می‌سازد. عملکرد این الیاف ۲ تا ۳ برابر نسبت به الیاف فولادی پیشین بهبود یافته و دلیل آن استفاده از انرژی تغییرشکل پلاستیک فولاد می‌باشد. Naaman با تعریف نسبت کارایی برای الیاف توانست سطح مقطع الیاف را نیز بهینه نماید. علاوه بر این ایجاد پیچش در الیاف باعث مهار مکانیکی مناسب

^۱ Slip-Hardening Behavior

^۲ Slip

آن در ماتریس گشته و بدین ترتیب می‌توان از تغییرشکل فولاد در تمام طول لغزش الیاف استفاده نمود [۵].

انجام آزمایش بیرون کشیدگی بر روی این الیاف، رفتار بهینه آن‌ها را اثبات نمود. این الیاف حتی در ماتریسی با مقاومت پایین نیز همین رفتار را داشته و کاهش مقاومت ماتریس تاثیری بر رفتار این الیاف ندارد. با استفاده از این الیاف Naaman توانست به مقاومت خمشی نزدیک به ۴۰ مگاپاسکال دست یابد [۵].

رابطه‌ی میان رفتار الیاف و رفتار ماتریس توسط Kim در سال ۲۰۰۷ مورد بررسی قرار گرفت. وی توانست به کمک ارزیابی رفتار ماتریس‌های مسلح به الیاف متفاوت و بررسی رفتار بیرون کشیدگی هر یک از این الیاف به همبستگی میان رفتار الیاف و رفتار ماتریس پی ببرد. در این تحقیق رفتار الیاف قلاب‌دار و الیاف Torex مقایسه گردیده و تاثیر عملکرد این الیاف در رفتار کلی ماتریس به کمک انجام آزمایش کشش مستقیم بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که الیاف Torex با ایجاد رفتار سخت‌شدگی لغزشی باعث رفتار سخت‌شدگی کرنشی ماتریس می‌گردند. لازم به ذکر است که درصد حجمی الیاف بکار رفته نسبتاً پایین بوده و این نشان دهنده رفتار مناسب الیاف مذکور می‌باشد. الیاف قلاب‌دار نیز توانستند ماتریس را به رفتار سخت‌شدگی کرنشی برسانند با این تفاوت که محدوده این رفتار در دو ماتریس متفاوت است. از این گذشته نحوه ترک‌خوردگی ماتریس‌ها نیز از الگوی متفاوتی نسبت به یکدیگر تبعیت می‌نمایند. در ماتریس مسلح به الیاف Torex تعداد ترک‌ها بیشتر و فواصل و بازشدگی ترک‌ها کمتر است [۶].

Kim در سال ۲۰۰۸ تاثیر افزایش نرخ تغییرمکان بیرون کشیدگی الیاف بر رفتار آن را مورد بررسی قرار داد. بدین طریق وی توانست تاثیر بارگذاری‌های دینامیکی بر رفتار ماتریس مسلح به الیاف را مورد ارزیابی قرار دهد. الیاف به کار رفته الیاف Torex و قلاب‌دار بودند که با نرخ تغییرمکان‌های ۰/۰۱۸، ۰/۱۸، ۱/۸ و ۱۸ میلی‌متر بر ثانیه از ماتریس بیرون کشیده شده‌اند. الیاف قلاب‌دار وابستگی

زیادی به نرخ تغییرمکان نشان نداده درحالیکه الیاف Torex نسبت به افزایش نرخ تغییرمکان حساس بوده‌اند[۷].

Kim و Naaman در سال ۲۰۱۰ تاثیر مقاومت ماتریس بر رفتار الیاف فولادی را مورد مطالعه قرار دادند. الیاف بکار برده شده الیاف Torex و قلاب‌دار بوده و مقاومت ماتریس‌های سیمانی به ترتیب ۲۸، ۵۶ و ۸۴ مگاپاسکال بوده است. هر دو الیاف همراه با افزایش مقاومت ماتریس نیروی بیشتری را در حین بیرون کشیده شدن تجربه نموده‌اند. الیاف Torex حساسیت بیشتری نسبت به افزایش مقاومت فشاری ماتریس نشان داده‌اند. بطورکلی الیاف Torex کارایی بیشتری در ماتریس پرمقاومت داشته‌اند[۸].

Abu-Lebdeh و همکاران نیز در سال ۲۰۱۱ تاثیر مقاومت فشاری بر مقاومت بیرون کشیدگی الیاف را بررسی نمودند. با این تفاوت که ماتریس بکار رفته در رده ماتریس‌های با مقاومت فشاری خیلی بالا دسته‌بندی می‌گردد. ماتریس‌های بکار رفته دارای مقاومت فشاری ۱۵۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال می‌باشند. به منظور مقایسه بهتر رفتار بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس با مقاومت ۵۴ مگاپاسکال نیز استفاده گردید. علاوه بر این دو نوع الیاف فولادی شامل الیاف قلاب‌دار و الیاف با انتهای تخت مورد آزمایش قرار گرفتند. حداکثر نیروی لازم برای بیرون کشیده شدن الیاف و انرژی نظیر آن با افزایش مقاومت، افزایش چشمگیری داشته است[۹].

در سال ۲۰۱۲ Kim و همکاران به بررسی اثر ابعاد ذرات بر رفتار بیرون کشیدگی الیاف و همچنین تاثیر نسبت ریزدانه به درشت‌دانه بر این رفتار پرداختند. الیاف بکار رفته در این تحقیقات الیاف مستقیم، قلاب‌دار و Torex فولادی می‌باشند. ۴ نوع ماسه ریزدانه با دانه‌بندی‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. کاهش ابعاد ذرات باعث بهبود عملکرد ذرات می‌گردد. به خصوص الیاف Torex که حساسیت زیادی به این تغییر نشان داده‌اند و علاوه بر این افزایش نسبت ریزدانه به درشت‌دانه نیز باعث بهبود عملکرد الیاف Torex گردید؛ در حالیکه الیاف قلاب‌دار متاثر از این موضوع نبوده‌اند[۱۰].

۳-۳- تحقیقات انجام شده در زمینه مدل‌سازی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف

فولادی

تا کنون تحقیقات بسیاری در زمینه مدل‌سازی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف انجام شده است. تحقیقات انجام گرفته در این زمینه را می‌توان بر اساس روش بکار گرفته شده در مدل‌سازی به دو دسته تقسیم نمود:

- روش تحلیلی^۱
- روش عددی^۲ (اجزای محدود)

با توجه به پیچیدگی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف تغییرشکل یافته، روش تحلیلی در اغلب موارد در مورد الیاف مستقیم بکار گرفته شده و جنبه‌های مختلف رفتار الیاف در حین بیرون کشیده شدن مورد بررسی قرار گرفته و روابطی نیز برای آن‌ها ارائه شده است.

استفاده از روش عددی اجزای محدود این امکان را فراهم می‌سازد که بتوان کلیه پیچیدگی‌های رفتار بیرون کشیده شدن الیاف تغییرشکل یافته را در مدل‌سازی منظور نمود و بر همین اساس، روش اجزای محدود به عنوان روش مدل‌سازی انتخاب گردیده است. در ادامه، تحقیقات انجام گرفته در این زمینه با استفاده از روش اجزای محدود را مرور می‌نماییم.

مدل‌سازی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف به کمک روش اجزای محدود برای اولین بار توسط Li و Mobasher در سال ۱۹۹۷ انجام شده است. در این تحقیق الیاف مستقیم فولادی مورد استفاده قرار گرفته است. هدف از این مدل‌سازی بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف و استخراج منحنی نیرو-لغزش می‌باشد. در این مدل‌سازی سطح مشترک الیاف و ماتریس سیمانی بعنوان مصالحی با سختی و مقاومت کمتر در نظر گرفته شده است. معیار گسیختگی در سطح مشترک الیاف و ماتریس، بوسیله

¹Analytical Method

²Numerical Method

سطوح گسیختگی که توسط تنش‌های عمودی و برشی تعریف می‌شوند، در نظر گرفته شده است. پس از گسیختگی از مدل اصطکاکی Coulomb برای مدل‌سازی رفتار اصطکاکی الیاف در حین بیرون کشیده شدن استفاده شده است. تاثیر پارامترهایی همچون مقاومت پیوستگی در سطح مشترک الیاف و ماتریس، طول الیاف و تنش‌های عمودی موجود در سطح الیاف مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱].

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که حداکثر نیرو در حین بیرون کشیده شدن الیاف زمانی رخ می‌دهد که گسیختگی موضعی در سطح مشترک الیاف و ماتریس بوجود آمده است. نحوه توزیع تنش‌های برشی در طول الیاف نیز نشان می‌دهد که گسیختگی سطح مشترک الیاف و ماتریس از انتهای بارگذاری شده الیاف آغاز می‌گردد. همچنین نمودارهای نیرو-لغزش بدست آمده از این مدل‌سازی در مرحله بعد بعنوان خصوصیات الیافی که در سطح ترک در آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار دارند، مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که سختی سطح مشترک الیاف نقش اساسی در نحوه توزیع ترک در ماتریس ایفا می‌کند [۱۱].

در سال ۲۰۰۳ Qin و همکاران تاثیر ابعاد نمونه بر روی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف را به کمک روش اجزا محدود شبیه‌سازی کردند. تنش‌های برشی و تنش‌های عمودی دو پارامتر مورد نظر در این تحقیق بوده‌اند. در این مدل‌سازی سطح مشترک بین الیاف و ماتریس کاملاً پیوسته در نظر گرفته شده است. علاوه بر این رفتار مصالح، الاستیک و خطی در نظر گرفته شده و از تاثیر تنش‌های حرارتی و اصطکاک در سطح ترک صرف‌نظر شده است. تاثیر طول مدفون الیاف در ماتریس و ضخامت ماتریس بر روی تنش‌های پیوستگی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل‌سازی الیاف مستقیم بوده و با استفاده از تقارن مدل‌سازی بصورت دوبعدی انجام شده است. مدل‌سازی در چهار حالت انجام شده و در هر یک از این حالات یک پارامتر متغیر بوده است [۱۲].

- تاثیر طول مدفون الیاف بر روی تنش‌های پیوستگی (طول مدفون الیاف متغیر و ضخامت ماتریس ثابت)

- تاثیر ضخامت ماتریس (طول مدفون الیاف ثابت و ضخامت ماتریس متغیر)
- تاثیر طول مدفون الیاف بر روی فرآیند گسیختگی در سطح مشترک الیاف و ماتریس
- تاثیر ضخامت ماتریس بر روی فرآیند گسیختگی در سطح مشترک الیاف و ماتریس

نتایج بدست آمده حاکی از وجود تمرکز تنش در ابتدا و انتهای الیاف بوده و میزان تمرکز تنش با افزایش طول الیاف متغیر است. تمرکز تنش در ابتدای الیاف مستقل از طول الیاف بوده در حالیکه در انتهای الیاف با افزایش طول مدفون میزان تمرکز تنش کاهش می‌یابد. همچنین حداکثر مقدار تنش‌های عمودی در ابتدای الیاف رخ می‌دهد که می‌تواند بدلیل گسیختگی سطح مشترک الیاف و ماتریس باشد [۱۲].

در سال ۲۰۱۰ Mistakidis و همکاران آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار فولادی از ماتریس بتنی با مقاومت بالا را به کمک روش اجزا محدود مدل‌سازی نمودند. علاوه بر مدل‌سازی بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار، نمونه‌های آزمایشگاهی نیز ساخته شده و از نتایج بدست آمده به منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی استفاده شده است. الیاف بکار رفته در این تحقیق الیاف قلابدار فولادی بوده که به ترتیب دارای طول و قطر ۲۸.۴ و ۰.۴ میلی‌متر می‌باشند. ماتریس بتنی دارای مقاومت فشاری ۱۰۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی ۸ مگاپاسکال می‌باشد. آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف در حالت کنترل نیرو انجام شده از این‌رودر نمودارهای نیرو-لغزش ترسیم شده، بخش نزولی نمودار قابل ثبت نبوده است. به منظور بررسی خصوصیات پیوستگی سطح مشترک الیاف و ماتریس، الیاف مستقیم نیز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و خصوصیات سطح مشترک الیاف و ماتریس نیز از این آزمایش استخراج شده است. نتایج بدست آمده از این آزمایش در مدل‌سازی رفتار سطح مشترک الیاف و ماتریس مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳].

مدل‌سازی بصورت سه بعدی انجام شده و ماتریس و الیاف و سطح مشترک این دو در مدل‌سازی منظور شده است. با توجه به وجود تقارن در مسأله و با اعمال شرایط مرزی مناسب، نیمی از هندسه

کل مدل‌سازی شده است. علاوه بر این ابعاد ماتریس سیمانی نیز کوچک‌تر از نمونه‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شده تا بتوان زمان حل مسأله را کاهش داد. در حل مسأله از روش نیوتن-رافسون استفاده شده که باعث افزایش مدت زمان حل مسأله گشته با این حال بدلیل وجود رفتارهای غیرخطی استفاده از این روش بسیار موثر است. با توجه به اهمیت ضریب اصطکاک در رفتار بیرون کشیده شدن الیاف، مقادیر مختلفی به این کمیت اختصاص داده شده و نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است [۱۳].

در این تحقیق تاثیر هندسه الیاف بر رفتار بیرون کشیده شدن آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر الیاف قلابدار مورد بررسی، دو الیاف قلابدار دیگر با هندسه متفاوت مدل‌سازی شده‌اند. مدل‌سازی سه بعدی انجام شده از دقت بالایی برخوردار بوده و لیکن زمان حل مسأله بسیار زیاد می‌باشد. به همین دلیل با استفاده از روابط کرنش صفحه‌ای یک مدل دوبعدی ساده ولیکن دقیق برای حل مسأله نیز ارائه شده است [۱۳].

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تمامی الیاف‌های مدل‌سازی شده بدون رسیدن به حداکثر مقاومت‌شان از ماتریس بیرون کشیده می‌شوند. هم‌چنین می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از ضریب اصطکاک ۰.۱ می‌توان با دقت مناسبی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک شد. هندسه الیاف تاثیر زیادی بر رفتار بیرون کشیده شدن الیاف داشته و قلاب‌های انتهایی الیاف باعث افزایش چشمگیر روی مقاومت بیرون کشیده شدن آن‌ها می‌گردد. مدل دو بعدی ارائه شده از دقت کافی برای حل مسأله برخوردار بوده و نتایج قابل اطمینانی را ارائه می‌دهد [۱۳].

مدل‌سازی رفتار بیرون کشیده الیاف فولادی در سال ۲۰۱۲ توسط Chin و Xiao انجام شده و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی نیز صحت‌سنجی گردیده است. در این تحقیق ۵ نوع الیاف فولادی با هندسه و خصوصیات متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته و مدل‌سازی شده‌اند. الیاف فولادی بکار رفته

شامل الیاف ورقه‌ای مجعد، الیاف با انتهای پهن شده، الیاف قلابدار، الیاف مجعد و الیاف با دو قسمت پهن شده در انتها می‌باشد [۱۴].

مدل‌سازی بصورت سه بعدی و به کمک نرم‌افزار ANSYS انجام شده است. در این مدل‌سازی رفتار پلاستیک الیاف فولادی به کمک معیار Von Mises و گسیختگی ماتریس سیمانی به کمک مدل Willam and Warnke شبیه‌سازی شده است. به منظور شبیه‌سازی رفتار سطح مشترک الیاف و ماتریس از مدل اصطکاک Coulomb استفاده شده است [۱۴].

نتایج بدست آمده حاکی از این است که مدل‌سازی انجام شده بخوبی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس سیمانی را شبیه‌سازی می‌کند. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که رفتار الیاف در حین بیرون کشیده شدن به خصوصیات هندسی و مکانیکی الیاف وابسته است. از مدل‌سازی انجام شده می‌توان به منظور بهینه‌سازی هندسه، طول، و سطح مقطع الیاف استفاده نمود [۱۴].

۳-۴- تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی خصوصیات مصالح پایه سیمانی با

عملکرد بالا

رفتار کششی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف به عوامل متعددی مانند ماتریس، خصوصیات الیاف و پیوستگی میان این دو وابسته است. بر خلاف مصالح پایه سیمانی متداول، مصالح پایه سیمانی با عملکرد بالا بوسیله رفتار سخت‌شدگی کرنشی تحت تنش‌های کششی و ترک خوردگی‌های متعدد شناخته می‌شوند که این خصوصیات باعث افزایش شکل‌پذیری، دوام و میزان جذب انرژی این مصالح می‌گردد. استفاده از الیاف فولادی تغییر شکل یافته برای دستیابی به مصالح پایه سیمانی با عملکرد بالا توسط محققین زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است.

در سال ۲۰۰۳ Naaman با طراحی الیاف فولادی جدید به نام Torex توانست به مصالح پایه سیمانی با عملکرد بالا دست یابد. این الیاف با بهینه‌سازی سطح مقطع الیاف طراحی شده و قابلیت بروز رفتار

سخت‌شدگی لغزشی در تمامی طول مدفون خود را دارند. این ویژگی الیاف این امکان را بوجود می‌آورد که با استفاده از درصد حجمی پایین الیاف، بتوان مصالحی با رفتار سخت‌شدگی تولید نمود [۵].

در این تحقیق با انجام آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف بر روی الیاف مستقیم، قلابدار و Torex و مقایسه نتایج بدست آمده، عملکرد منحصر بفرد این الیاف اثبات شده است. علاوه بر این، رفتار بیرون کشیده شدن الیاف در ماتریس‌های با مقاومت فشاری مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد این الیاف در ماتریس‌های با مقاومت فشاری پایین نیز تضمین شده است [۵].

به منظور بررسی رفتار خمشی مصالح، دو نمونه خمشی با ضامت‌های ۱۲.۵ و ۳۷.۵ میلی‌متر ساخته شده و با الیاف Torex و قلابدار مسلح شده‌اند. مقایسه رفتار این نمونه‌ها نشان دهنده تاثیر الیاف Torex در رفتار خمشی و بروز رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی در نمونه‌ها می‌باشد [۵].

علاوه بر بررسی تاثیر الیاف بر رفتار خمشی نمونه‌ها، آزمون کشش مستقیم نیز انجام شده و رفتار نمونه‌های ساخته شده با الیاف Torex، قلابدار و مستقیم نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۵].

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از درصد حجمی پایین (در حدود ۲ درصد) از الیاف Torex به مصالحی پایه سیمانی با عملکرد بالا دست یافت. این الیاف در مقایسه با الیاف قلابدار باعث بهبود شکل‌پذیری، مقاومت کششی و میزان جذب انرژی مصالح می‌گردد [۵].

در سال ۲۰۰۷ Kim و همکارانش رفتار بیرون کشیدگی الیاف منفرد و ارتباط آن با رفتار مصالح پایه سیمانی با عملکرد بالا را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از دو نوع الیاف فولادی با مقاومت بالا (الیاف Torex و قلابدار) استفاده شده و با ارائه تعریف جدیدی از مکانیزم و انرژی بیرون کشیدگی الیاف، به بررسی خصوصیات پیوستگی الیاف پرداخته شده است [۶].

هر دو الیاف بکار رفته در این تحقیق رفتار سخت‌شدگی لغزشی را از خود بروز می‌دهند. این رفتار در الیاف قلابدار بدلیل ایجاد مفصل پلاستیک در انتهای الیاف می‌باشد؛ در حالیکه در الیاف Torex باز شدن پیچ‌های الیاف باعث بروز این رفتار می‌شود. این تفاوت مکانیزم در دو الیاف، باعث افزایش چشمگیر انرژی لازم برای بیرون کشیده شدن الیاف شده که این افزایش، بهبود قابلیت جذب انرژی مصالح را به همراه دارد. این محقق با ثابت فرض نمودن مقاومت پیوستگی الیاف و محاسبه آن از طریق انرژی لازم برای بیرون کشیده شدن الیاف توانست مقاومت نظیر ترک‌خوردگی و مقاومت بعد از ترک‌خوردگی مصالح را محاسبه نموده و رفتار مصالح را پیش‌بینی نماید [۶].

رفتار بیرون کشیده شدن الیاف Torex و قلابدار به کمک انجام آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف منفرد از ماتریس سیمانی مورد بررسی قرار گرفته و از نتایج آن برای محاسبه انرژی و مقاومت پیوستگی الیاف در حین بیرون کشیده شدن، استفاده شده است [۶].

رفتار ماتریس پایه سیمانی مسلح به الیاف نیز از آزمایش کشش مستقیم که بر روی نمونه‌هایی با مقطع مستطیلی انجام شده، بدست می‌آید. چیدمان این آزمایش به نحوی انتخاب شده که بتوان پارامترهایی مانند مقاومت نظیر اولین ترک‌خوردگی، مقاومت بعد از ترک‌خوردگی، ظرفیت کرنش‌پذیری، رفتار ترک‌خوردگی و انرژی کرنشی نظیر تنش حداکثر را بدست آورد [۶].

نتایج بدست آمده از آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف منفرد نشان دهنده رفتار متفاوت الیاف Torex شده که باعث افزایش انرژی بیرون کشیده شدن الیاف شده است و در نتیجه مقاومت پیوستگی معادل را افزایش می‌دهد. هر چند این انرژی در الیاف قلابدار نسبت به الیاف Torex کم بوده، ولیکن قابلیت ایجاد رفتار سخت‌شدگی و ترک‌خوردگی های متعدد را دارد [۶].

نتایج بدست آمده از آزمایش کشش مستقیم نشان دهنده بروز رفتار سخت‌شدگی و ترک‌خوردگی‌های متعدد نمونه‌های ساخته شده با هر دو نوع الیاف می‌باشد. همانطور که از نتایج آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف پیش‌بینی شده، الیاف Torex عملکرد بهتری نسبت به الیاف قلابدار بروز داده و نمونه‌های

ساخته شده با این الیاف ظرفیت باربری و کرنش‌پذیری بالاتری را از خود نشان می‌دهند. همچنین الیاف Torex نحوه بروز ترک‌خوردگی را نیز تغییر می‌دهند. نمونه‌های دارای این الیاف ترک‌های بیشتر (حدوداً ۴ برابر الیاف قلابدار) با عرض ترک کمتر را بروز می‌دهند [۶].

در سال ۲۰۰۸ همین محقق به همراه همکارانش رفتار خمشی مصالح پایه سیمانی مسلح به چهار نوع الیاف متفاوت را بررسی کردند. رفتار خمشی نمونه‌ها بر اساس ASTM C1018-97 و ASTM C1609-05 بررسی شده و پارامترهای توصیف‌کننده رفتار خمشی، نیرو، تغییرمکان و سختی در نظر گرفته شده است. همچنین رفتار خمشی به دو دسته کلی نرم‌شدگی و سخت‌شدگی تغییرمکانی دسته‌بندی شده است. ماتریس سیمانی بکار رفته دارای مقاومت فشاری ۵۶ مگاپاسکال بوده و الیاف مورد استفاده Torex، قلابدار، پلی‌اتیلن (SP) و پلی‌وینیل‌الکل (PVA) می‌باشند. از دو درصد حجمی الیاف ۰.۴ و ۱.۲ برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. ابعاد نمونه‌های ساخته شده بر اساس ASTM ۱۰۰×۱۰۰×۳۵۰ میلی‌متر و دهانه خالص بارگذاری ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری تغییرمکان از دو تغییرمکان‌سنج استفاده شده و رفتار خمشی نمونه‌ها از نمودار نیرو-تغییرمکان بررسی شده است [۱۵].

تمامی نمونه‌های ساخته شده با ۱.۲ درصد الیاف رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی را بروز دادند. در بین نمونه‌های با ۰.۴ درصد الیاف، الیاف پلی‌وینیل‌الکل رفتار نرم‌شدگی تغییرمکانی و دیگر الیاف رفتار سخت‌شدگی را بروز داده‌اند. در بین نمونه‌ها، الیاف Torex بالاترین ظرفیت باربری را داشته است. با این حال الیاف پلی‌اتیلن بیشترین تغییرمکان در حداکثر ظرفیت باربری را از خود نشان داده است [۱۷]. همچنین تمامی نمونه‌ها به جز نمونه‌های با ۰.۴ درصد الیاف پلی‌وینیل‌الکل دارای ترک‌خوردگی‌های متعدد بوده‌اند که بدلیل رفتار سخت‌شدگی می‌باشد [۱۵].

نمونه‌های دارای الیاف Torex و پلی‌اتیلن دارای بیشترین تعداد ترک و نمونه‌های دارای الیاف پلی‌وینیل‌الکل تنها ۲ یا ۳ ترک ریز و یک ترک اصلی بوجود آمده است. نتایج بدست آمده نشان

می‌دهد که مقاومت نظیر اولین ترک‌خوردگی به نوع الیاف وابسته نبوده و پس از ایجاد اولین ترک در ماتریس تاثیر بیشتری دارد [۱۵].

در این تحقیق قابلیت دو استاندارد ASTM در بررسی رفتار مصالح دارای سخت‌شدگی تغییرمکانی مورد بررسی قرار گرفته است. هرچند ASTM 1609 در بسیاری از جنبه‌ها دارای پیشرفت بوده است، ولیکن در مورد مصالحی که دارای رفتار سخت‌شدگی هستند نمی‌تواند بخوبی میزان جذب انرژی این مصالح را ارزیابی نماید. همچنین تعیین مقاومت نظیر اولین ترک‌خوردگی برای این مصالح با استفاده از این استاندارد ممکن نمی‌باشد [۱۵].

در سال ۲۰۰۸ PuI به بررسی مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مقاومت کششی دو نیم شدن بتن با مقاومت بالا پرداخت و ارتباط میان این خصوصیات با مقاومت فشاری را ارزیابی نمود. نمونه‌های بکار رفته دارای مقاومت‌های متفاوت بین ۴۸ تا ۸۱ مگاپاسکال بوده است. مقاومت فشاری و کششی دونیم شدن آنها به کمک نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. مقاومت خمشی به کمک تیرهایی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۴۰۰ و آزمایش کشش مستقیم بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۷۵×۱۵۰ میلی‌متر انجام شده است. برای ساخت نمونه‌ها از ۱۲ طرح اختلاط متفاوت استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مختلف روابط زیر تعیین شده است [۱۶]:

$$f_t = 0.026f_c^{1.223} \quad ۱-۳$$

$$f_{sp} = 0.106f_c^{0.948} \quad ۲-۳$$

$$f_{fl} = 0.034f_c^{1.286} \quad ۳-۳$$

در همین راستا در سال ۲۰۰۹ Xu و Shi ارتباط میان خصوصیات مکانیکی بتن معمولی و بتن الیافی را بررسی کردند. الیاف بکار رفته شامل الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف شیشه و الیاف فولادی بوده و مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدن و مقاومت خمشی بعنوان پارامترهای بیان‌کننده خصوصیات

مکانیکی، در نظر گرفته شده‌اند. این محققین با جمع‌آوری اطلاعات ارائه شده در مقالات دیگر به بررسی ارتباط میان خصوصیات مکانیکی بتن الیافی پرداختند. با توجه به حجم بالای مقالات انتشار یافته در این زمینه و متفاوت بودن جنبه‌های مختلف تحقیقات، فقط تعدادی از آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این مقالات ارائه شده، فقط مقالاتی که از نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد 150×300 میلی‌متر برای ارزیابی مقاومت فشاری و کششی دو نیم شدن استفاده کرده‌اند، در نظر گرفته شده‌اند. همچنین نمونه‌های خمشی با ابعاد $150 \times 150 \times 500$ میلی‌متر نیز بعنوان نمونه‌های خمشی در نظر گرفته شده‌اند. برای تعیین ارتباط میان خصوصیات مکانیکی از روش درونیابی استفاده شده و روابط زیر پیشنهاد گردیده است [۱۷]:

$$f_{spt} = 0.21f_c^{0.83} \quad 4-3$$

$$f_{ft} = 0.39f_c^{0.59} \quad 5-3$$

در سال ۲۰۱۰ Kim و همکارانش به مقایسه رفتار الیاف Torex با دیگر الیاف فولادی و مصنوعی مانند الیاف مستقیم، قلابدار، پلی اتیلن و پلی‌وینیل‌الکل پرداختند. مقایسه رفتار الیاف به کمک انجام آزمایش بیرون کشیده شدن و در دو حالت مختلف انجام شده است. در حالت اول رفتار الیاف تحت بارگذاری استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته و در حالت دوم رابطه میان رفتار الیاف و افزایش نرخ کرنش بررسی شده است. علاوه بر انجام آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف منفرد، رفتار ماتریس سیمانی مسلح به الیاف نیز به کمک آزمایش کشش مستقیم بررسی شده است. به منظور مقایسه بهتر رفتار الیاف، از سه نوع ماتریس سیمانی متفاوت با مقاومت‌های فشاری ۲۸ و ۵۶ و ۸۴ مگاپاسکال استفاده شده است [۸].

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که الیاف Torex نسبت به الیاف دیگر (قلابدار، پلی‌اتیلن و پلی‌وینیل‌الکل) از مقاومت پیوستگی بیشتری برخوردار هستند. همچنین رابطه میان رفتار بیرون کشیده شدن الیاف منفرد و رفتار کششی ماتریس مسلح به الیاف نیز قابل اثبات است. با افزایش

مقاومت ماتریس، الیاف Torex رفتار بهتری را بروز می‌دهند و افزایش مقاومت ماتریس تاثیر بیشتری در رفتار این الیاف دارد [۸].

رفتار الیاف Torex به نرخ افزایش کرنش حساس بوده و با افزایش آن مقاومت پیوستگی الیاف نیز افزایش می‌یابد؛ در حالیکه رفتار الیاف قلابدار بطور قابل‌توجهی به افزایش نرخ کرنش حساس نمی‌باشد. این مسأله در مورد ماتریس سیمانی مسلح به الیاف (Torex و قلابدار) نیز قابل مشاهده است [۸].

در سال ۲۰۱۰ همین محققین (Kim و همکارانش) به توصیف همبستگی میان رفتار کششی و خمشی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف پرداختند. این محققین سه هدف اصلی را در این تحقیق دنبال می‌کرده‌اند:

- ارتباط میان رفتار کششی و خمشی نمونه‌هایی با سطح مقطع مشابه
- اثبات بروز رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی در مصالحی با رفتار سخت‌شدگی کرنشی
- صحت‌سنجی ارتباط میان مقاومت کششی ماتریس بعد از ترک‌خوردگی و مقاومت کششی

دو نوع الیاف فولادی با مقاومت بالا (قلابدار و Torex) در ماتریس سیمانی با مقاومت فشاری ۸۴ مگاپاسکال بکار برده شده‌اند. نمونه‌های خمشی و کششی مسلح به ۱ درصد حجمی الیاف برای ارزیابی رفتار این مصالح مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نمونه‌های خمشی در سه اندازه مختلف (کوچک، متوسط و بزرگ) $۵۰ \times ۲۵ \times ۳۰۰$ و $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۳۰۰$ و $۱۵۰ \times ۱۵۰ \times ۴۵۰$ میلی‌متر آماده شده‌اند [۱۸].

از نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های ساخته شده با هر دو الیاف قلابدار و Torex رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی را بروز می‌دهند. با این حال نمونه‌های مسلح به الیاف Torex از مقاومت خمشی بالاتری برخوردار هستند. مقاومت خمشی نمونه‌های کوچک ($۵۰ \times ۲۵ \times ۳۰۰$) در حدود سه برابر مقاومت کششی بعد از ترک‌خوردگی نمونه‌های کشش مستقیم بوده و این مسأله با نتایج تحلیلی نیز مطابقت دارد [۱۸].

با کاهش ابعاد نمونه، مقاومت خمشی و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. نسبت مقاومت خمشی به مقاومت کششی در تمامی نمونه‌ها بین ۲.۲ تا ۳ برابر می‌باشد. علاوه بر موارد فوق نتایج نشان می‌دهد که امکان پیش‌بینی رفتار کششی از طریق بررسی رفتار خمشی و بدون در نظر گرفتن تاثیر ابعاد نمونه، دهانه بارگذاری، و نسبت ارتفاع مقطع به دهانه وجود ندارد [۱۸].

در سال ۲۰۱۲ Park و همکارانش به بررسی تاثیر ترکیب الیاف مختلف بر روی مقاومت کششی بتن الیافی پرداختند. در این تحقیق از ماتریس سیمانی با مقاومت بسیار بالا در حدود ۲۰۰ مگاپاسکال استفاده شده است. مصالح مورد استفاده در ساخت این ماتریس سیمانی شامل سیمان، میکروسیلیس، سنگدانه سیلیسی، آب و فوق‌روان‌کننده می‌باشد. علاوه بر این از پودر شیشه با قطر متوسط ۱۰ میکرومتر نیز به عنوان پرکننده استفاده شده است. دو دسته الیاف فولادی مختلف شامل الیاف ماکرو و الیاف میکرو مورد استفاده قرار گرفته است. چهار نوع الیاف ماکرو شامل الیاف مستقیم، دو نوع الیاف قلابدار و الیاف Torex و یک نوع الیاف فولادی مستقیم با قطر ۰.۲ میلی‌متر و طول ۱۳ میلی‌متر در ساخت نمونه‌ها بکار برده شده است. به منظور حفظ کارایی، درصد حجمی الیاف ماکرو به مقدار ۱ درصد محدود شده است. در صد الیاف میکرو متغیر بوده و به مقادیر ۰، ۰.۵ و ۱ و ۱.۵ درصد مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور ارزیابی تاثیر همزمان الیاف میکرو و ماکرو بر روی رفتار کششی از آزمایش کشش مستقیم استفاده شده است. سطح مقطع نمونه‌ها ۵۰×۱۰۰ میلی‌متر و طول مورد بررسی نمونه‌ها ۱۷۵ میلی‌متر می‌باشد [۱۹].

نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که شکل منحنی تنش-کرنش به نوع الیاف ماکرو بکار رفته وابسته است و الیاف میکرو تاثیر کمی بر شکل این منحنی دارند. بهترین رفتار کششی مربوط به الیاف Torex و بدترین رفتار مربوط به الیاف مستقیم می‌باشد. همچنین تمامی نمونه‌ها با ۱ درصد الیاف ماکرو و حداقل ۰.۵ درصد الیاف میکرو، رفتار سخت‌شدگی کرنشی را بروز داده‌اند و این رفتار به نوع الیاف وابسته نمی‌باشد [۱۹].

الگوی ترک خوردگی نمونه‌ها نیز به نوع الیاف ماکرو وابسته است. با این حال اضافه کردن الیاف میکرو باعث افزایش تعداد ترک‌ها می‌گردد و این رفتار با افزایش درصد حجمی الیاف میکرو رابطه مستقیم دارد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که افزودن الیاف میکرو تاثیر مثبتی بر روی رفتار سخت‌شدگی کرنشی و ترک‌خوردگی‌های متعدد دارد [۱۹].

در سال ۲۰۱۲ Kim و همکارانش تاثیر نسبت ریزدانه به درشت‌دانه بر روی مقاومت پیوستگی الیاف فولادی را مورد بررسی قرار دادند. هدف اصلی این تحقیق توسعه بتن الیافی برای ساختمان‌های نیروگاه‌های هسته‌ای می‌باشد که دارای مقاومت کافی در برابر بارهای انفجار و ضربه‌ای داشته باشد. بدین منظور برنامه آزمایشگاهی بر اساس بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف تدوین شده است. سه نوع الیاف فولادی شامل الیاف مستقیم، Torex و قلابدار مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در ساخت ماتریس نسبت ریزدانه به درشت‌دانه متغیر در نظر گرفته شده تا بتوان تاثیر آن را بر روی رفتار الیاف منفرد در حین بیرون کشیده شدن بررسی نمود. سه طرح اختلاط با نسبت ریزدانه به درشت‌دانه متفاوت شامل ۰/۴۴۴ و ۰/۵۱۵ و ۰/۶۱۵ در ساخت نمونه‌ها بکار رفته است [۱۰].

به منظور تفسیر نتایج از نمودار نیرو-لغزش و همچنین برای بررسی میکروسکوپی ترکیبات ماتریس در اطراف الیاف از عکس‌برداری الکترونی استفاده شده است [۱۰].

نتایج بدست آمده حاکی از این است که با افزایش نسبت ریزدانه به درشت‌دانه رفتار الیاف Torex بهبود یافته؛ درحالی‌که این افزایش در مورد الیاف قلابدار و مستقیم تاثیر چندانی ندارد. علاوه بر این افزایش نسبت ریزدانه به درشت‌دانه باعث کاهش میزان تخلخل ماتریس در اطراف الیاف شده و می‌تواند باعث بهبود رفتار بیرون کشیده شدن الیاف منفرد گردد [۱۰].

فصل چهارم

ارزیابی خصوصیات الیاف و

بررسی رفتار بیرون

کشیده شدن الیاف

قلاب‌دار

۴-۱- مصالح

۴-۱-۱- سیمان

انتخاب سیمان مورد استفاده در بتن مقاومت بالا از اهمیت خاصی برخوردار است. در این نوع بتن به دلیل درصد سیمان بالا و تولید حرارت زیاد، استفاده از سیمان تیپ II توصیه می‌شود. سازگاری نوع سیمان با افزودنی‌های بکار رفته در بتن نیز حائز اهمیت است. تاثیر مواد کاهنده آب (فوق روان کننده) بطور قابل ملاحظه‌ای تابع ترکیبات سیمان است. سیمان‌هایی که مواد قلیایی کمتری داشته، بیشترین افزایش مقاومت را خواهند داشت زیرا وجود مواد قلیایی باعث افزایش نسبت آب به سیمان شده و کارایی مخلوط را نیز کاهش می‌دهند. از آن جایی که در تولید سیمان تیپ II درصد مواد قلیایی به حداقل مقدار ممکن می‌رسد، این سیمان می‌تواند انتخاب مناسبی برای ساخت بتن مقاومت بالا باشد.

در این تحقیق سیمان پرتلند تیپ II تولید شده در کارخانه سیمان شاهرود مورد استفاده قرار گرفته که ترکیبات شیمیایی آن به کمک آزمایش جذب اتمی مواد تعیین گردیده و در جدول ۴-۱ ارائه شده است.

جدول ۴-۱ ترکیبات شیمیایی سیمان

Chemical Composition	Content (%)
Silica(SiO ₂)	۱۹/۰۳
Alumina(Al ₂ O ₃)	۴/۴۵
Iron Oxide(Fe ₂ O ₃)	۴/۰۲
Lime(CaO)	۶۳/۳۵
Magnesia(MgO)	۱/۵۴
Sulphuric anhydride(SO ₃)	۲/۷۰
Ratio of Alumina/Iron Oxide	۱/۱۰

وزن مخصوص سیمان نیز ۳/۱۶ در نظر گرفته شده است. در اثر وارد آمدن فشار در طی مراحل حمل و انبار کردن، سیمان دارای گلوله‌هایی می باشد لذا به منظور بالا بردن کیفیت بتن، قبل از استفاده آن را از الک ۵۰ عبور می‌دهیم.

۴-۱-۲- میکروسیلیس

میکروسیلیس یک افزودنی معدنی است که به دلیل قطر بسیار کم ذرات و مقادیر فراوان سیلیکا یک ماده با فعالیت پوزولانی شدید می‌باشد. این ماده به خودی خود دارای خاصیت چسبندگی نیست، ولیکن در اثر ترکیب با آهک و در مجاورت آب به ماده‌ای پایدار با خاصیت چسبندگی تبدیل می‌شود. این ماده یک محصول مصنوعی است که از جمع‌آوری گازهای حاصل از کوره‌های قوس الکتریکی در جریان تولید فلز سیلیسیم در کارخانجات سیلیس و آلیاژهای آن بدست می‌آید. میکروسیلیس دارای ۸۵ تا ۹۸ درصد سیلیس می‌باشد که میزان آن بستگی به نوع محصول و کوره تولید سیلیس دارد. ذرات این ماده عمدتاً کروی با حالت کریستال بوده و در حدود ۱۰۰ برابر کوچک‌تر از ذرات سیمان است. میزان مصرف میکروسیلیس در بتن ۳۰-۵ درصد وزن سیمان می‌باشد. استفاده از این افزودنی موجب افزایش میزان آب مصرفی شده که با استفاده از فوق روان کننده می‌توان مقدار آب را کاهش داد. تجارب آزمایشگاهی نشان می‌دهد که بتن‌های حاوی میکروسیلیس نسبت به بتن‌های معمولی دارای انقباض بیشتری در سنین اولیه می‌باشند. از این رو سطح این بتن‌ها می‌بایست پوشیده شود تا از تبخیر سریع آب از سطح آن‌ها جلوگیری به عمل آید.

میکروسیلیس مورد استفاده در این تحقیق محصول کارخانه فروسیلیس سمنان است. با وجود ریزدانه بودن این ماده، گلوله‌های درشت غیرقابل اختلاط نیز در آن وجود دارد. بنابراین قبل از استفاده آن را از الک ۱۰۰ عبور می‌دهیم. وزن مخصوص میکروسیلیس ۲/۳۵ در نظر گرفته شده است. ترکیبات شیمیایی آن به کمک آزمایش جذب اتمی مواد تعیین گردیده و در جدول ۴-۲ ارائه شده است.

جدول ۴-۲ ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس

Chemical Composition	Content (%)
Silica(SiO ₂)	۸۷/۹۷
Alumina(Al ₂ O ₃)	۰/۲۷
Iron Oxide(Fe ₂ O ₃)	۱/۵۶
Lime(CaO)	۱/۳۰
Magnesia(MgO)	۳/۸۱

۴-۱-۳- سنگدانه

مطالعات نشان می‌دهد که در بتن مقاومت بالا معمولاً از سنگدانه کوارتز استفاده می‌شود. دلیل این امر سازگاری آن با خمیر سیمان می‌باشد. کوارتز نیز همانند میکروسیلیس دارای درصد بالایی سیلیس است. دانه‌بندی سنگدانه‌ها از عوامل موثر در رفتار بتن می‌باشد. با افزایش مساحت سنگدانه‌ها می‌توان تنش در سطح تماس سنگدانه و خمیر سیمان را کاهش داد. به همین دلیل حداکثر بعد سنگدانه را تا حد امکان کاهش می‌دهیم. همچنین استفاده از سنگدانه‌های ریز موجب کاهش تمرکز تنش در سطح آن‌ها شده و منجر به مقاومت بالاتری خواهد شد. از این‌رو در این تحقیق از سنگدانه کوارتز با حداکثر ابعاد ذرات ۴/۷۵ میلی‌متر و وزن مخصوص ۲/۷۵ استفاده شده است. دانه‌بندی سنگدانه‌های موجود در جدول ۴-۳ ارائه شده است.

جدول ۴-۳ دانه بندی سنگدانه کوارتز

بعد سنگدانه‌ها
۰-۰/۳mm
۰/۳-۰/۶mm
۰/۶-۱/۲mm
۱/۲-۲/۰mm
۲/۰-۳/۲mm
۳/۲-۴/۷۵mm

۴-۱-۴- فوق روان کننده

فوق روان کننده‌ها موادی آلی یا ترکیبی از مواد آلی و معدنی هستند. این مواد جذب ذرات سیمان شده و به آن‌ها بار منفی می‌دهند که سبب دفع شدن این ذرات از یکدیگر می‌شود. بار منفی موجب بوجود آمدن پوسته‌ای منظم از مولکول‌های آب دور هر ذره شده و باعث جدایش ذرات گردیده و در نتیجه کارایی مخلوط را افزایش می‌دهند. یکی از کاربردهای فوق‌روان کننده‌ها تولید بتن مقاومت بالا است. زیرا برای دستیابی به مقاومت بالا می‌بایست نسبت آب به سیمان را تا حد امکان کاهش داد. با کاهش این نسبت، کارایی مخلوط نیز کاهش می‌یابد. با استفاده از فوق روان کننده مناسب می‌توان آب مورد نیاز را بدون افت کارایی کاهش داده که این امر افزایش مقاومت را به دنبال خواهد داشت. در این تحقیق فوق‌روان کننده PCE محصول شرکت وندشیمی بکار برده شده است. PCE مایعی قهوه‌ای رنگ با پایه شیمیایی دیسپرسیون پلیمری و نمک کربوکسیلیک است. وزن مخصوص آن ۱/۰۳ کیلوگرم بر لیتر و مقدار مصرف آن ۱/۲-۰/۲ درصد وزنی سیمان توصیه شده است.

۴-۱-۵- الیاف

الیاف مورد استفاده در این تحقیق، الیاف فولادی قلاب‌دار می‌باشند. مشخصات الیاف در جدول ۴-۴ آورده شده است.

جدول ۴-۴ مشخصات الیاف

الیاف	تغییر شکل مکانیکی	قطر (mm)	طول (mm)	وزن مخصوص (Kg/m ³)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	پوشش الیاف
Dramix	قلاب‌دار	۰/۳۷۵	۳۰	۷۸۵۰	۲۱۰۰	۲۰۰	-
Durocem	قلاب‌دار	۱/۰۰	۵۰	۷۸۵۰	۸۰۰	۲۰۰	مس

۲-۴- طرح اختلاط و روند اختلاط

هدف از انجام این مرحله از کار آزمایشگاهی دستیابی به ماتریس سیمانی با کارایی و مقاومت مناسب و همچنین ارزیابی خصوصیات مکانیکی آن می‌باشد. طرح اختلاط اولیه ماتریس سیمانی با توجه به تحقیقات پیشین انجام شده انتخاب گردیده و در جدول زیر ارائه شده است. دانه‌بندی سنگدانه‌های بکار رفته در این طرح اختلاط نیز در جدول ۴-۵ آورده شده است.

جدول ۴-۵ طرح اختلاط اولیه ماتریس سیمانی

ماتریس سیمانی	سیمان	میکروسیلیس	سنگدانه	آب	فوق‌روان‌کننده*
نسبت وزنی	۱/۰۰	۰/۲۵	۱/۵۸	۰/۲۵	۰/۰۱۲

*نسبت وزنی فوق‌روان‌کننده به مجموع سیمان و میکروسیلیس

جدول ۴-۶ دانه بندی سنگدانه های کوارتز در طرح اختلاط

بعد سنگدانه‌ها	درصد
۰-۰/۳mm	۱۴/۰۰
۰/۳-۰/۶mm	۹/۰۰
۰/۶-۱/۲mm	۱۹/۰۰
۱/۲-۲/۰mm	۱۳/۰۰
۲/۰-۳/۲mm	۱۹/۰۰
۳/۲-۴/۷۵mm	۲۵/۰۰

شکل ۴-۱ مخلوط‌کن‌های بکار رفته در ساخت نمونه‌های بتنی را نشان می‌دهد. ساخت نمونه‌های با حجم کم به کمک مخلوط‌کن Hobart و نمونه‌های با حجم بالا با استفاده از مخلوط‌کن ELE ساخته شده‌اند.

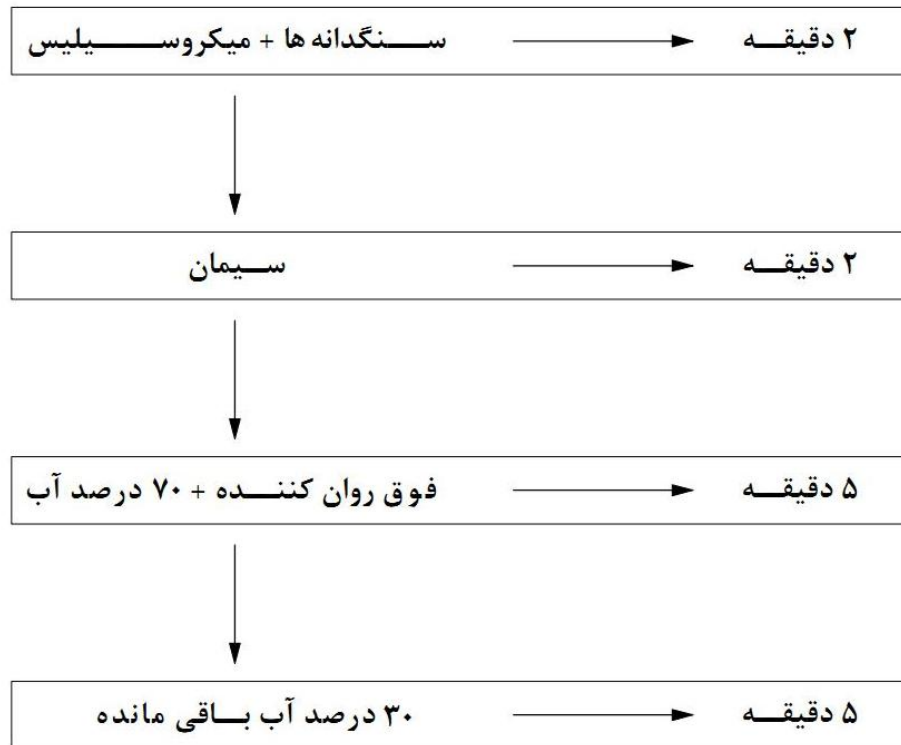


شکل ۴-۱ مخلوط‌کن‌های بکار رفته در ساخت نمونه‌ها

روند اختلاط بدین ترتیب است که ابتدا سنگدانه‌ها همراه با میکروسیلیس بصورت خشک و در حدود ۲ دقیقه با یکدیگر مخلوط می‌شوند. چسبیدن ذرات میکروسیلیس به سنگدانه‌ها باعث بهبود توزیع یکنواخت آن در مخلوط نهایی می‌گردند. بعد از اختلاط کامل سنگدانه‌ها و میکروسیلیس، سیمان به آن‌ها اضافه شده و مصالح خشک در حدود ۲ دقیقه دیگر بطور کامل مخلوط می‌گردند.

فوق‌روان‌کننده با ۷۰ درصد آب مورد نیاز اختلاط، مخلوط می‌شود. به کمک این روش توزیع آن در مخلوط یکنواخت‌تر و عملکرد بهتری در افزایش کارایی بتن خواهد داشت. پس از اختلاط کامل مصالح خشک، محلول آب و فوق‌روان‌کننده به تدریج و در طی مدت زمان ۵ دقیقه به آن اضافه می‌شود. با اضافه کردن این محلول، مخلوط حالت خمیری پیدا کرده ولیکن کارایی آن برای اضافه کردن الیاف مناسب نیست. با افزودن ۳۰ درصد آب باقی‌مانده در طی مدت زمان ۵ دقیقه، کارایی لازم برای افزودن الیاف بدست خواهد آمد. دلیل طولانی بودن مدت زمان افزودن آب و فوق‌روان‌کننده این است که با افزایش زمان اختلاط، تاثیر فوق‌روان‌کننده افزایش می‌یابد. با توجه به بالا بودن حجم مصالح خمیری (سیمان و میکروسیلیس)، افزایش زمان اختلاط باعث کاهش یکنواختی و جداسازی ذرات

نمی‌گردد. شکل ۴-۲ روند اختلاط را بطور خلاصه نشان می‌دهد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که این روند اختلاط برای هر دو مخلوط‌کن (ELE و Hobart) مناسب بوده و بدین ترتیب مخلوط‌های ساخته شده با حجم کم و حجم بالا مشابه خواهند بود.



شکل ۴-۲ روند طرح اختلاط

۴-۳- ارزیابی طرح اختلاط

همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد، طرح اختلاط اولیه بر اساس نتایج بدست آمده در تحقیقات پیشین انتخاب گردیده است. طول الیاف بکار رفته در تحقیقات پیشین ۲۰ میلی‌متر بوده است؛ در حالی که طول الیاف موجود در این تحقیق ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. افزایش طول الیاف باعث کاهش کارایی مخلوط شده و همچنین حداکثر مقدار الیاف قابل استفاده در مخلوط را محدود می‌نماید. از این رو به منظور ارزیابی طرح اختلاط و در صورت نیاز تصحیح آن، به طور آزمایشی مخلوطی با حجم بالا و همراه با الیاف ساخته شده تا بتوان کارایی مخلوط را کنترل نموده و حداکثر مقدار الیاف قابل استفاده نیز تعیین گردد.

طرح اختلاط این مخلوط با توجه به نسبت‌های اختلاط ارائه شده در جدول ۴-۷ بدست آمده و ارائه شده است. حجم مخلوط ۱۱ لیتر بوده و برای ساخت آن از مخلوط‌کن ELE استفاده شده است. علاوه بر مقدار آب مورد نیاز در طرح اختلاط، ۵۰۰ میلی‌لیتر آب اضافی نیز در نظر گرفته شده تا در صورت نیاز به مخلوط اضافه گردد. روند اختلاط همانند آنچه در بخش قبل توضیح داده شد، در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۷ طرح اختلاط (Kg/m^3)

سیمان	۷۹۴/۰۰
سنگدانه (۰ - ۰/۳)	۱۷۵/۶۰
سنگدانه (۰/۳ - ۰/۶)	۱۱۲/۹۰
سنگدانه (۰/۶ - ۱/۲)	۲۳۸/۳۰
سنگدانه (۱/۲ - ۲/۰۰)	۱۶۳/۱۰
سنگدانه (۲/۰۰ - ۳/۲)	۲۳۸/۳۰
سنگدانه (۳/۲ - ۴/۷۵)	۳۱۳/۵۸
میکروسیلیس	۱۹۸/۵
آب	۱۹۸/۵
فوق‌روان‌کننده	۱۱/۹۱
الیاف*	٪۳/۰۰

*درصد حجمی الیاف

همان‌گونه که در جدول قابل مشاهده است، حداکثر مقدار الیاف قابل استفاده در مخلوط ۳ درصد تخمین زده شده است. اضافه کردن الیاف در انتهای روند اختلاط انجام می‌شود. به منظور کنترل کارایی مخلوط، الیاف به ۶ قسمت مساوی یعنی هر قسمت معادل ۰/۵ درصد الیاف، تقسیم شده و هر قسمت بصورت تدریجی به مخلوط اضافه گردیده است. بعد از اضافه کردن هر قسمت و توزیع

یکنواخت الیاف در مخلوط، کارایی مخلوط کنترل شده و در صورت امکان قسمت بعدی، الیاف به مخلوط اضافه گردیده است. تا قبل از اضافه کردن ۰/۵ درصد سوم الیاف، کارایی مخلوط مناسب بوده؛ ولیکن با اضافه کردن این قسمت یعنی در مجموع ۱/۵ درصد الیاف، کارایی مخلوط افت کرده که با اضافه کردن آب (از آب اضافی در نظر گرفته شده) کارایی مناسب مخلوط تامین شده و قسمت بعدی الیاف اضافه گردیده است. به همین ترتیب و با کنترل کارایی و تامین آن از طریق اضافه کردن آب، می‌توان ۲/۵ درصد الیاف را به مخلوط اضافه نمود. اضافه کردن ۰/۵ درصد نهایی باعث افت شدید کارایی مخلوط گردیده و دلیل آن حجم بالای الیاف موجود در مخلوط می‌باشد. به همین جهت با اضافه کردن آب نیز نمی‌توان کارایی را تامین نمود. بنابراین حداکثر مقدار ممکن الیاف قابل استفاده ۲/۵ درصد می‌باشد. با توجه به اضافه کردن آب علاوه بر آب مورد نیاز در طرح اختلاط، می‌بایست نسبت آب به سیمان نیز تصحیح گردد. بدین ترتیب طرح اختلاط نهایی، بدست آمده و در جداول ۴-۸ و ۹-۴ ارائه شده است. در ادامه برای ساخت کلیه نمونه‌ها از این طرح اختلاط، استفاده شده و روند اختلاط نیز ثابت و همانند قبل می‌باشد.

جدول ۴-۸ طرح اختلاط نهایی ماتریس سیمانی

ماتریس					
سیمانی	سیمان	میکروسیلیس	سنگدانه	آب	فوق‌روان‌کننده*
نسبت وزنی	۱/۰۰	۰/۲۵	۱/۵۸	۰/۳۰	۰/۰۱۲

*نسبت وزنی فوق‌روان‌کننده به مجموع سیمان و میکروسیلیس

جدول ۴-۹ طرح اختلاط نهایی (Kg/m³)

سیمان	۷۶۳/۰۰
سنگدانه (۰-۰/۳)	۱۷۴/۸۰
سنگدانه (۰/۳-۰/۶)	۱۱۴/۵۰
سنگدانه (۰/۶-۱/۲)	۲۲۹/۰۰
سنگدانه (۱/۲-۲/۰۰)	۱۵۶/۸۰
سنگدانه (۲/۰۰-۳/۲)	۲۲۹/۰۰
سنگدانه (۳/۲-۴/۷۵)	۳۰۱/۴۰
میکروسیلیس	۱۹۰/۷۵
آب	۲۲۸/۹۰
فوق‌روان‌کننده	۱۱/۴۵

۴-۴- ارزیابی خصوصیات مکانیکی ماتریس سیمانی

در این بخش خصوصیات مکانیکی ماتریس سیمانی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدن و مقاومت خمشی از طریق ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های مختلف تعیین می‌گردد. نحوه ساخت، آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایشات در هر بخش توضیح داده خواهد شد.

۴-۴-۱- نحوه ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها

در بخش‌های قبل راجع به طرح اختلاط و روند اختلاط ماتریس سیمانی بحث گردید. برای ساخت نمونه‌ها، از قالب‌های فلزی نشان داده شده در شکل ۴-۳ استفاده شده است. قبل از ریختن ماتریس به داخل قالب، سطوح داخلی قالب‌ها به روغن قالب آغشته می‌شود. این امر موجب سهولت باز کردن قالب‌ها شده و همچنین از آسیب دیدن نمونه‌ها در حین باز کردن قالب جلوگیری می‌نماید. روغن قالب بکار رفته، محصول شرکت وندشیمی می‌باشد. پس از ریختن ماتریس در داخل قالب، عملیات

متراکم کردن آن با استفاده از میز لرزان انجام می‌شود. به همین منظور قالب‌ها در حدود ۱۰ دقیقه بر روی میز لرزان قرار داده می‌شوند.



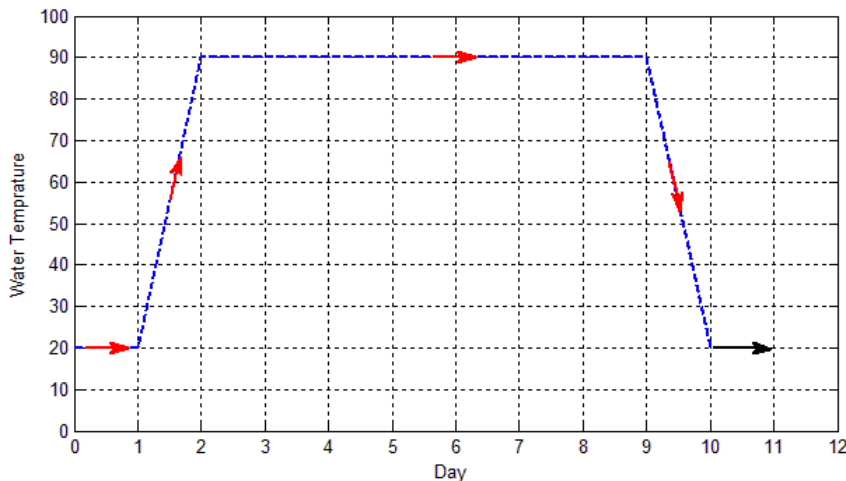
شکل ۳-۴ قالب‌های مورد استفاده قبل و بعد از بتن‌ریزی
 سپس سطح نمونه‌ها پرداخت شده و برای جلوگیری از تبخیر سطحی آب، آن‌ها را داخل محفظه‌های پلاستیکی قرار می‌دهیم. قالب‌ها بعد از مدت زمان ۲۴-۲۰ ساعت باز شده و نمونه‌ها پس از نامگذاری عمل آوری می‌شوند [۲۰].



شکل ۴-۴ نمونه‌ها پس از بازکردن قالب‌ها و نام‌گذاری
 اشکال ۳-۴ و ۴-۴ به ترتیب قالب‌های استفاده شده، نمونه‌ها بعد از بتن‌ریزی و پرداخت سطوح و همچنین نمونه‌ها بعد از قالب‌برداری و نام‌گذاری را نشان می‌دهد.

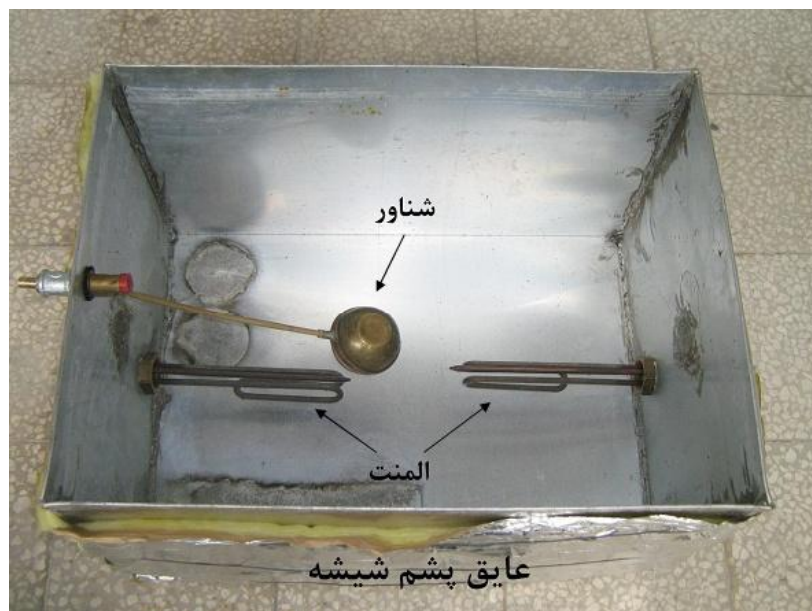
۴-۲-عمل آوری نمونه‌ها

در دماهای بالا فرآیند هیدراسیون سیمان به سرعت بیشتری پیشرفت نموده و کریستال‌های C-S-H نیز با سرعت بیشتری تشکیل می‌گردند. دمای بالا باعث افزایش فعالیت میکروسیلیس نیز می‌شود. بنابراین می‌توان با افزایش دمای آب مدت زمان عمل‌آوری را کاهش داده و به مقاومتی نظیر مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌ها رسید [۲۱]. از این‌رو عمل‌آوری نمونه‌ها در دمای بالا انجام می‌شود. بدین منظور پس از باز کردن قالب‌ها، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در مخزن آب با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد عمل‌آوری می‌گردند. سپس دمای آب در طی مدت زمان ۲۴ ساعت تا ۹۰ درجه سانتیگراد افزایش پیدا می‌کند. عمل‌آوری با آب ۹۰ درجه به مدت ۷ روز ادامه می‌یابد. پس از این دوره ۷ روزه دمای آب به تدریج و در مدت زمان ۲۴ ساعت کاهش یافته تا به دمای ۲۰ درجه برسد. با کاهش دمای آب، دوره عمل‌آوری نمونه‌ها به پایان رسیده و می‌توان آن‌ها را مورد آزمایش قرار داد. با اجرای برنامه‌ی تشریح شده، می‌توان زمان عمل‌آوری نمونه‌ها را از ۲۸ روز به ۱۰ روز کاهش داد. شکل ۴-۵ دوره عمل‌آوری نمونه‌ها و تغییرات دمای آب در طی این دوره نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵ نمودار دوره عمل‌آوری نمونه‌ها و تغییرات دمای آب در این دوره به منظور اجرای برنامه عمل‌آوری فوق، مخزنی با حجم مناسب طراحی و ساخته شد. جنس مخزن از آلومینیوم انتخاب شده تا با توجه به دمای بالای آب، خوردگی در آن رخ ندهد. برای افزایش دمای آب مخزن، از دو المنت استفاده گردید. با اتصال المنت‌ها به ترموستات می‌توان دمای آب مخزن را کنترل

نمود. با توجه به دمای بالای آب، میزان تبخیر سطحی آن زیاد است. بنابراین می‌بایست به نحوی آب تبخیر شده جایگزین گردیده و سطح آب داخل مخزن حفظ شود. همچنین جایگزین شدن آب باید بصورت تدریجی بوده و موجب تغییر درجه حرارت آن نشود. با استفاده از یک شناور می‌توان سطح آب در مخزن را حفظ نمود. علاوه بر این سطوح خارجی مخزن به وسیله پشم شیشه عایق کاری شده تا بتوان از هدر رفتن حرارت جلوگیری نمود. شکل ۴-۶ نشان دهنده مخزن طراحی شده می‌باشد.



شکل ۴-۶ مخزن ساخته شده برای عمل‌آوری نمونه‌ها در دمای بالا

۴-۳-۴- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری به عنوان مهم‌ترین معیار جهت تعیین کیفیت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر اساس ASTM C39 انجام شده است. برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری می‌توان از نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی استفاده نمود که در این تحقیق نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بر اساس پیشنهاد ASTM برای ارزیابی مقاومت فشاری، ۳ نمونه ساخته شده و تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته‌اند. با توجه به رفتار نمونه‌ها حین بارگذاری، متوسط مقاومت فشاری آن‌ها، به عنوان مقاومت فشاری ماتریس سیمانی در نظر گرفته می‌شود. در آزمایش مقاومت فشاری نیرو با سرعت مشخص به نمونه وارد شده تا خرابی رخ

دهد. سرعت اعمال بار برای نمونه‌های فشاری، ۱ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد [۲۲]. سرعت بارگذاری می‌بایست طوری باشد که در حدود ۲ الی ۳ دقیقه، نمونه به مقاومت نهایی خود برسد. با ثبت حداکثر نیروی وارد شده و تقسیم آن بر سطح مقطع نمونه می‌توان مقاومت فشاری ماتریس سیمانی را محاسبه نمود [۲۲]. شکل ۴-۷ نمونه‌های فشاری در انتهای روند بارگذاری را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۷ نمونه فشاری در انتهای روند بارگذاری

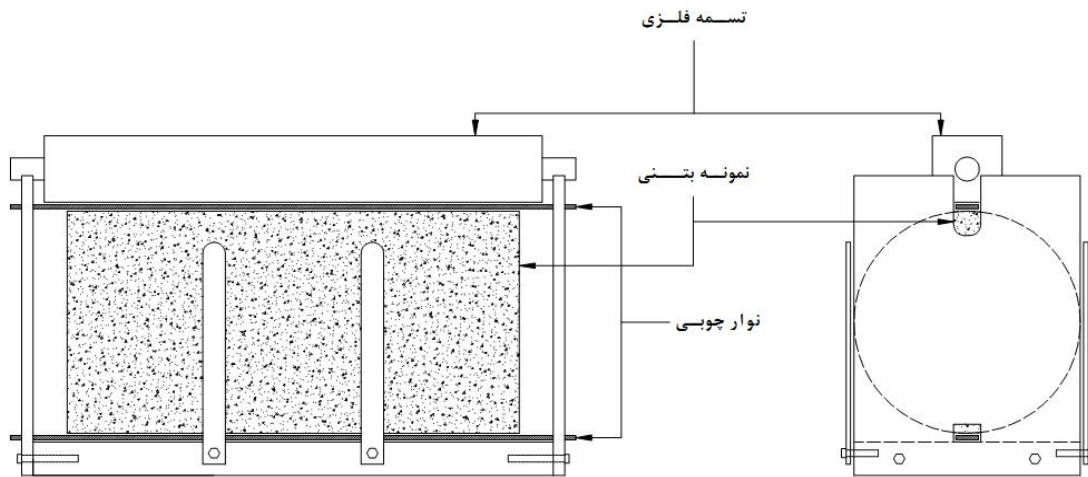
۴-۴-۴ مقاومت کششی دو نیم شدن

مقاومت کششی ماتریس سیمانی را می‌توان با استفاده از روش‌های غیرمستقیم مانند آزمایش دو نیم شدن و آزمایش خمشی تعیین نمود. این روش‌ها به مقاومت‌هایی منجر می‌شوند که از مقاومت واقعی تحت بار کشش محوری بیشتر است. رابطه‌ی بین این مقاومت‌ها بصورت زیر است :

$$\text{کشش خمشی} < \text{کشش دو نیم شدن} < \text{کشش مستقیم}$$

کاهش حجم بتن تحت کشش و توزیع غیر یکنواخت تنش‌های ایجاد شده، باعث تفاوت در نتایج این آزمایشات می‌شود. آزمایش کشش دو نیم شدن بر اساس ASTM C496 انجام می‌گردد. در این آزمایش از نمونه‌های آزمایش فشاری یعنی استوانه‌های ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر استفاده می‌شود. نمونه‌ها طوری در دستگاه آزمایش قرار می‌گیرند که محور طولی آن‌ها عمود بر جهت بارگذاری باشد. بار با

سرعت ۱ مگاپاسکال بر دقیقه افزایش یافته تا شکست بصورت دو نیم شدن نمونه در امتداد قطر استوانه در صفحه قائم رخ دهد [۲۳].



شکل ۴-۸ چیدمان آزمایش دونیم شدن



شکل ۴-۹ تجهیزات و نحوه بارگذاری آزمایش دونیم شدن

چیدمان آزمایش کشش دو نیم شدن در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. به منظور ثابت نگه داشتن نمونه در ابتدای روند بارگذاری با یک چهارچوب فلزی مطابق شکل آزمایش می‌شود. آزمایش کشش دو نیم شدن بر اساس ASTM C496 انجام می‌گردد. در این آزمایش از نمونه‌های آزمایش فشاری یعنی استوانه‌های 100×200 میلی‌متر استفاده می‌شود. نمونه‌ها طوری در دستگاه آزمایش قرار می‌گیرند که محور طولی آن‌ها عمود بر جهت بارگذاری باشد. بار با سرعت ۱ مگاپاسکال بر دقیقه

افزایش یافته تا شکست بصورت دو نیم شدن نمونه در امتداد قطر استوانه در صفحه قائم رخ دهد. چیدمان آزمایش کشش دو نیم شدن در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. به منظور ثابت نگه داشتن نمونه در ابتدای روند بارگذاری از یک چهارچوب فلزی مطابق شکل ۴-۹ استفاده می‌شود. جهت جلوگیری از تمرکز تنش، بار از طریق نوارهای باریک چوبی به نمونه وارد می‌گردد.

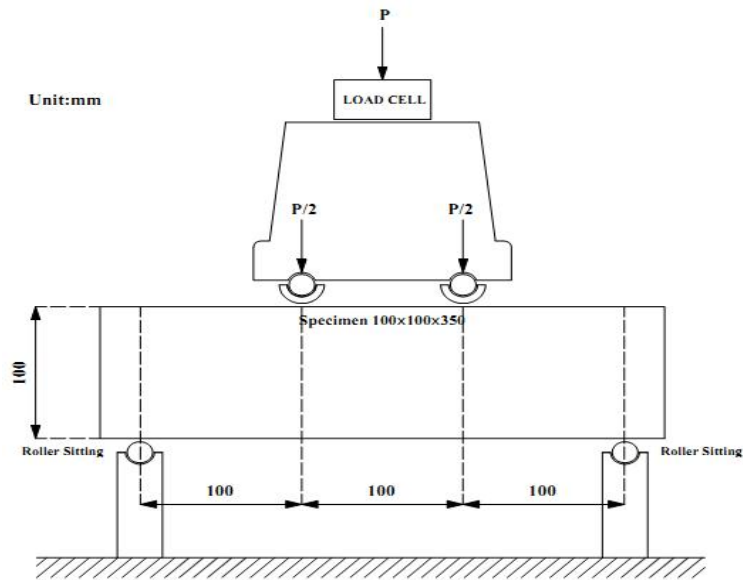
مقاومت کششی دو نیم شدن از رابطه ۴-۱ بدست می‌آید:

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi LD} \quad ۴-۱$$

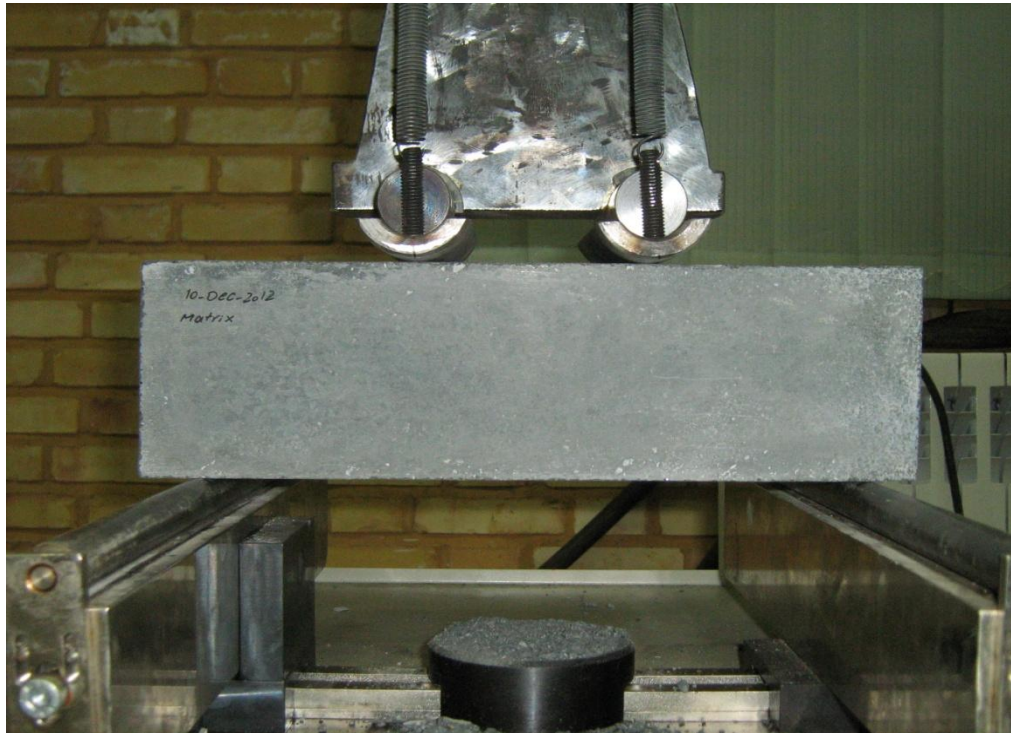
که در آن P بیشینه نیروی ثبت شده در حین آزمایش، L طول نمونه و D قطر نمونه می‌باشد.

۴-۵- مقاومت خمشی

مقاومت خمشی ماتریس سیمانی با اعمال بار در نقاط یک سوم دهانه‌ی نمونه‌های تیر بدست می‌آید. این آزمایش بر اساس ASTM C78 انجام می‌گردد. بر همین اساس ابعاد نمونه‌های تیر ۳۵۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با افزایش بار تا لحظه خرابی نمونه و ثبت آن می‌توان مدول گسیختگی را محاسبه نمود. بار از طریق افزایش تغییر مکان با نرخ ثابت ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه به نمونه وارد می‌شود. به منظور کاهش نشست‌های تکیه‌گاهی و قرار گرفتن صحیح نمونه بر روی تکیه‌گاه‌ها، لبه‌های نمونه با استفاده از دستگاه ساب به دقت پرداخت شده‌اند. چیدمان این آزمایش در اشکال ۴-۱۰ و ۴-۱۱ نشان داده شده است. به منظور کاهش آثار راستای بتن‌ریزی، نمونه حول محور طولی ۹۰ درجه چرخانده شده و سپس بر روی تکیه‌گاه‌ها قرار داده می‌شود [۲۴].



شکل ۴-۱۰ چیدمان آزمایش مقاومت خمشی



شکل ۴-۱۱ تجهیزات و نحوه بارگذاری آزمایش مقاومت خمشی

برای ارزیابی دقیق‌تر این پارامتر سه نمونه تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. پس از انجام آزمایش و ثبت

حداکثر نیروی وارد شده می‌توان مدول گسیختگی را با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود.

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

۲-۴

رابطه فوق در صورتی قابل استفاده است که شکست نمونه در دهانه میانی رخ دهد. در این رابطه P بیشینه نیروی ثبت شده، L طول دهانه بارگذاری، b عرض مقطع و d ارتفاع مقطع می باشد.

۴-۵- نتایج

۴-۵-۱- نتایج مقاومت فشاری

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری در جدول زیر ارائه شده است. رفتار نمونه‌ها بسیار ترد و شکست آن‌ها بصورت ناگهانی رخ می‌دهد. با بررسی میزان حباب‌های هوا موجود در سطوح شکست، می‌توان تراکم ماتریس سیمانی را ارزیابی نمود. در هیچ یک از نمونه‌ها حباب‌های هوای بزرگ مشاهده نشده و تعداد حباب‌های ریز نیز بسیار کم است.

جدول ۴-۱۰ نتایج آزمایش مقاومت فشاری

	شماره نمونه	نیروی گسیختگی (KN)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت فشاری متوسط (MPa)
ماتریس سیمانی	۱	۵۳۲/۴۶	۶۷/۷۹	۶۸/۴۸
	۲	۶۵۶/۷۹	۸۳/۶۲	
	۳	۴۲۴/۰۷	۵۳/۹۹	

با توجه به نتایج حاصله، مقاومت فشاری ماتریس سیمانی $۶۸/۴۸$ مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود.

۴-۵-۲- نتایج مقاومت کششی دو نیم شدن

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، شکست نمونه‌ها در این آزمایش می‌بایست در امتداد محور طولی آن‌ها و در صفحه قائم در راستای قطر صورت پذیرد. حالت گسیختگی در تمامی نمونه‌ها به همین صورت بوده است. شکل ۴-۱۲ نشان دهنده حالت خرابی نمونه در انتهای آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن می‌باشد. نتایج آزمایش با استفاده از رابطه ۴-۱ محاسبه شده و در جدول ۴-۱۱ ارائه شده است.



شکل ۴-۱۲ حالت گسیختگی نمونه در آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن
جدول ۴-۱۱ نتایج آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن

شماره نمونه	نیروی گسیختگی (KN)	مقاومت کششی دو نیم شدن (MPa)	مقاومت کششی دو نیم شدن (متوسط) (MPa)
ماتریس ۱	۱۴۷/۳۰	۴/۶۹	۶/۴۰
سیمانی ۲	۲۱۴/۵۳	۶/۸۳	
۳	۲۴۱/۸۷	۷/۷۰	

با توجه به نتایج بدست آمده از این آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن ماتریس سیمانی ۶/۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود.

۴-۵-۳- نتایج مقاومت خمشی

رفتار نمونه‌های خمشی ترد و فاقد شکل پذیری می‌باشد. بعد از ایجاد ترک اولیه، نمونه مقاومت خود را از دست داده و با رشد ترک در ارتفاع مقطع، گسیختگی کامل نمونه رخ می‌دهد.



شکل ۴-۱۳ حالت گسیختگی نمونه‌های تیر در انتهای آزمایش خمشی
 فاصله میان ایجاد ترک اولیه و گسیختگی کامل نمونه بسیار کوتاه بوده و این امر نشان دهنده رفتار
 ترد ماتریس سیمانی می‌باشد. شکل ۴-۱۳ حالت گسیختگی نمونه در انتهای آزمایش را نشان می‌دهد.
 در هر ۳ نمونه، گسیختگی در دهانه میانی رخ داده است.

جدول ۴-۱۲ نتایج آزمایش مقاومت خمشی

	شماره نمونه	نیروی گسیختگی (KN)	مدول گسیختگی (MPa)	مدول گسیختگی متوسط (MPa)
ماتریس سیمانی	۱	۳۸/۸۵	۱۱/۶۵	۱۱/۸۴
	۲	۳۹/۷۲	۱۱/۹۱	
	۳	۳۹/۸۲	۱۱/۹۴	

مدول گسیختگی با استفاده از رابطه ۴-۲ محاسبه شده و در جدول ۴-۱۲ ارائه شده است. با توجه به
 نتایج بدست آمده مدول گسیختگی ماتریس سیمانی ۱۱/۸۴ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

۴-۶- بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار از ماتریس سیمانی

رفتار مصالح مرکب پایه سیمانی به عواملی مانند نوع ماتریس، خصوصیات الیاف و پیوستگی الیاف و ماتریس وابسته است. در مقایسه با بتن‌های الیافی معمولی، مصالح مرکب پایه سیمانی بوسیله رفتار سخت شدگی کرنشی یا سخت شدگی تغییر مکانی تحت بارهای کششی شناخته می‌شوند. این رفتار همواره با ایجاد ترک‌های متعدد در ناحیه تحت تنش‌های کششی همراه است. این ویژگی‌ها قابلیت شکل‌پذیری، دوام و جذب انرژی مصالح پایه سیمانی مرکب را افزایش می‌دهند. برای دستیابی به مصالحی با خصوصیات رفتاری سخت‌شدگی کرنشی یا سخت‌شدگی تغییر مکانی و ایجاد ترک‌خوردگی‌های متعدد می‌بایست مقاومت مصالح بعد از ترک خوردگی از مقاومت نظیر اولین ترک خوردگی بیشتر باشد.

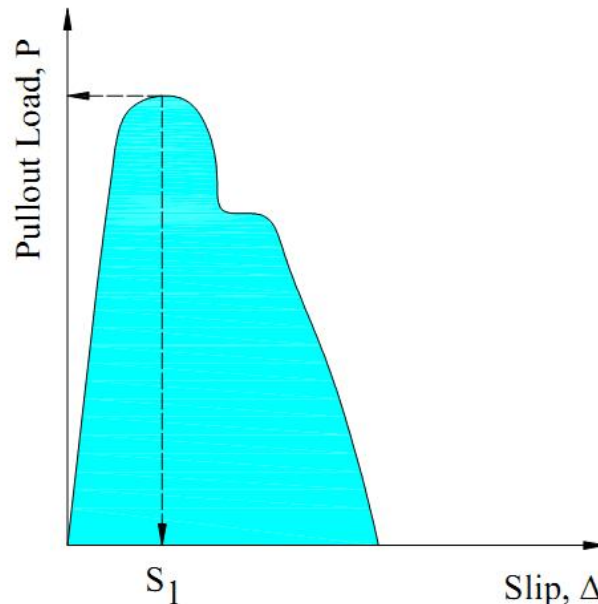
$$\sigma_{pc} > \sigma_{cc} \quad ۳-۴$$

بدون برقراری رابطه ۳-۴ امکان دستیابی به رفتارهای فوق غیرممکن است. علاوه بر این سخت‌شدگی لغزشی در رفتار بیرون کشیده شدن الیاف منفرد به عنوان مهم‌ترین عامل در رفتار سخت‌شدگی مصالح شناخته می‌شود. هدف از این مرحله از برنامه آزمایشگاهی، بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار فولادی از ماتریس سیمانی می‌باشد. با انجام این آزمایش بر روی این الیاف، رفتار بیرون کشیده شدن آن‌ها بررسی و نتایج لازم استخراج گردید.

۴-۷- مکانیزم و انرژی بیرون کشیده شدن

مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن، به مکانیزم پیوستگی آن در سطح مشترک الیاف و ماتریس وابسته است. مولفه‌های اصلی این مکانیزم پیوستگی عموماً چسبندگی، اصطکاک و مهار مکانیکی می‌باشند. مهار مکانیکی الیاف فولادی تغییر شکل یافته، مهم‌ترین عامل در ایجاد مقاومت در برابر بیرون کشیده شدن می‌باشد. درحالی که در الیاف مستقیم فولادی، اصطکاک بین الیاف و ماتریس در مقاومت بیرون کشیدگی آن غالب است. یکی از انواع پرکاربرد الیاف فولادی نوع قلابدار آن می‌باشد که در حین بیرون کشیده شدن از ماتریس از قابلیت جذب انرژی نظیر تغییر شکل فولاد استفاده

می‌کند. هرچند که در این الیاف مهار مکانیکی در طول کوتاهی از الیاف به وجود آمده، ولیکن با تشکیل مفصل پلاستیک در همین قسمت موجب افزایش مقاومت بیرون کشیدگی الیاف می‌گردد. تشکیل مفصل پلاستیک باعث ایجاد سخت شدگی لغزشی واحد مشخصی از لغزش (S_1) می‌گردد. شکل ۴-۱۴ نمودار شماتیک رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلاب‌دار فولادی را نشان می‌دهد.



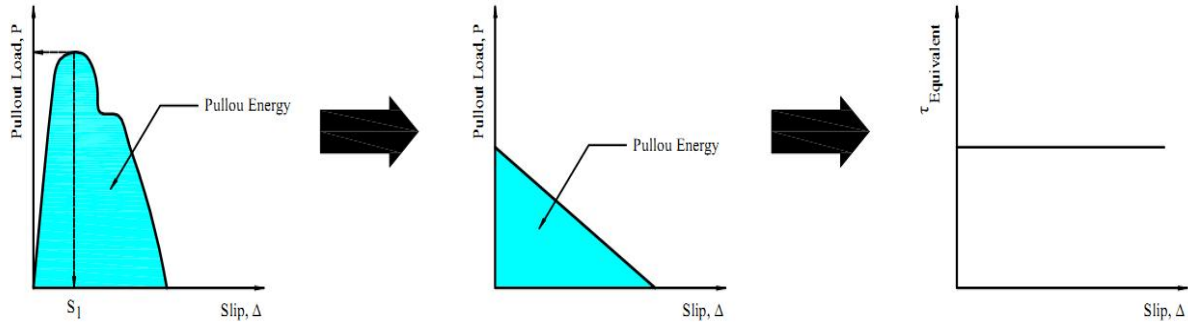
شکل ۴-۱۴ رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلاب‌دار فولادی

۴-۸- انرژی بیرون کشیده شدن الیاف و مقاومت پیوستگی معادل

همان‌گونه که اشاره شد، به منظور دستیابی به رفتار سخت‌شدگی کرنشی یا سخت شدگی تغییر مکانی، مقاومت مصالح بعد از ترک‌خوردگی می‌بایست از مقاومت نظیر ایجاد اولین ترک بیشتر باشد. مقاومت مصالح بعد از ترک‌خوردگی مستقیماً به مقاومت پیوستگی متوسط الیاف و ماتریس وابسته است. با فرض ثابت بودن مقاومت پیوستگی در تمامی طول مدفون الیاف، می‌توان مقاومت پیوستگی معادل را با محاسبه انرژی بیرون کشیده شدن الیاف در آزمایش مربوطه بدست آورد. همان‌گونه که در شکل ۴-۱۵ قابل مشاهده است، با فرض ثابت بودن مقاومت پیوستگی، شکل منحنی نیرو-لغزش به صورت یک مثلث خواهد بود. با استفاده از انرژی بیرون کشیده شدن الیاف (سطح زیر نمودار هر منحنی در شکل ۴-۱۵ می‌توان مقاومت پیوستگی معادل را برای الیاف قلاب‌دار محاسبه نمود.

بنابراین انرژی بیرون کشیده شدن الیاف مهم‌ترین نقش را در مقاومت پیوستگی الیاف ایفا می‌کند.

مقاومت پیوستگی معادل را با استفاده از رابطه ۴-۴ می‌توان محاسبه نمود [۲۵].



شکل ۴-۱۵ انرژی بیرون کشیده شدن الیاف و مقاومت پیوستگی معادل

$$E_{\text{Pullout}} = \frac{P\Delta}{2} = \left(\pi d_f \tau_{eq} \frac{L_f}{2} \right) \times \left(\frac{L_f}{2} \right) \times 1/2 = \tau_{eq} \pi d_f L_f^2 / 8$$

$$\tau_{eq} = 8E_{\text{Pullout}} / \pi d_f L_f^2 \quad 4-4$$

در این رابطه E_{Pullout} انرژی الیاف در حین بیرون کشیده شدن، d_f قطر الیاف و L_f طول الیاف می‌باشد.

۴-۹- نحوه انجام آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف

این آزمایش از طریق اعمال نیروی کششی به الیاف منفرد که با طول مشخص در ماتریس سیمانی مدفون گردیده اند، انجام می‌شود. این آزمایش عموماً به صورت کنترل تغییر مکان انجام شده است؛ به همین دلیل دستگاه اعمال نیرو، می‌بایست قابلیت اعمال تغییر مکان با نرخ ثابت را داشته باشد. مقدار بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس به عنوان لغزش الیاف در نظر گرفته می‌شود. با ثبت نیروی لازم برای بیرون کشیدن الیاف و میزان لغزش آن در حین آزمایش می‌توان نمودار نیرو-لغزش که مهم‌ترین خروجی این آزمایش است را رسم نمود؛ در صورتی که آزمایش به صورت کنترل تغییر مکان انجام شود می‌توان هر دو شاخه صعودی و نزولی نمودار را ثبت نمود. درحالی که با انجام آزمایش به صورت کنترل نیرو تنها شاخه صعودی نمودار قابل ثبت خواهد بود. علاوه بر این میزان دقت دستگاه در ثبت نیرو و لغزش نیز از اهمیت خاصی برخوردار است.

در این تحقیق نمونه های استوانه ای 50×50 میلی متر مورد استفاده قرار گرفته اند. طول مدفون الیاف در ماتریس سیمانی نصف طول الیاف در نظر گرفته شده است. آماده سازی نمونه ها از اهمیت خاصی برخوردار بوده و در این فرایند، نکات زیر می بایست مورد توجه قرار گیرد:

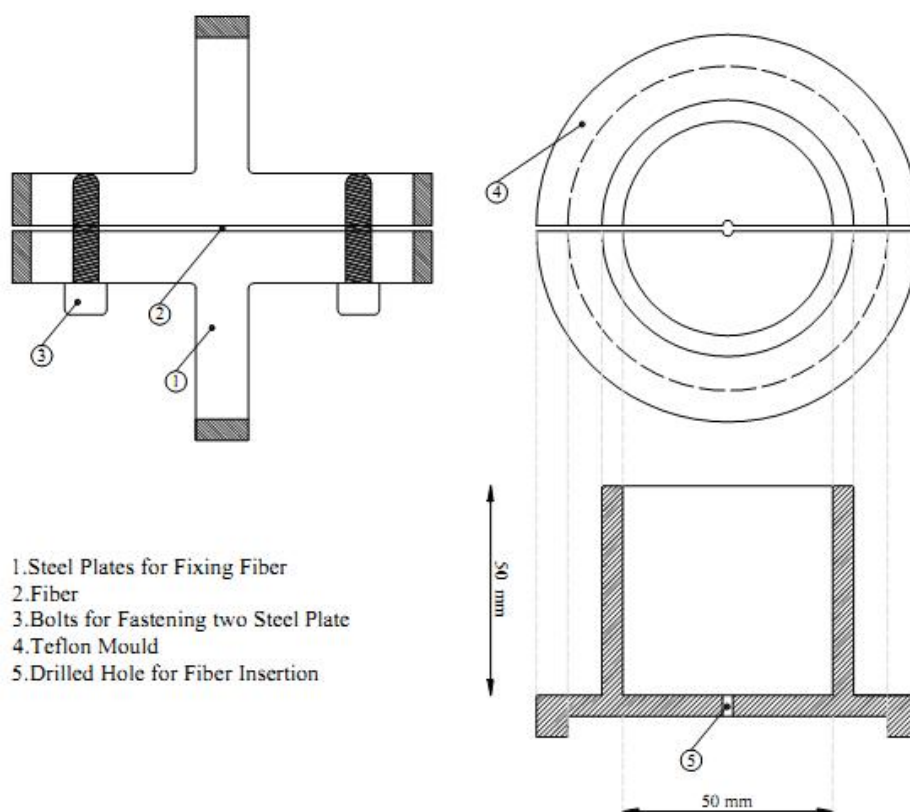
۱- طول مدفون الیاف و راستای قرارگیری آن به دقت تعیین و تامین گردد.

۲- الیاف به نحوی در مکان خود تثبیت شده که در حین ریختن ماتریس در قالب و متراکم

کردن، موقعیت آن تغییر ننماید.

بنابراین قالب های بکار رفته برای ساخت نمونه ها می بایست قابلیت تامین موارد فوق را داشته باشند.

به همین منظور قالب هایی از جنس پلی اتیلن طراحی و ساخته شد.



شکل ۴-۱۶ هندسه قالب های آزمایش بیرون کشیدن الیاف

اشکال ۴-۱۶ و ۴-۱۷ نمایانگر هندسه و اجزای قالب های طراحی شده می باشند. به کمک این قالب ها

می توان الیاف را با طول مدفون مشخص و به طور قایم در ماتریس سیمانی قرار داد.



شکل ۴-۱۷ قالب آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف



شکل ۴-۱۸ مراحل قرار دادن الیاف در داخل قالب

به منظور سهولت بازکردن قالب‌ها، سطوح داخلی آن‌ها به روغن قالب آغشته شده و سپس ماتریس سیمانی به آرامی در درون قالب‌ها ریخته می‌شود. تراکم ماتریس نیز از طریق ارتعاش به کمک میز لرزان انجام می‌گردد. شکل ۴-۱۸ مراحل قرار دادن الیاف در داخل قالب را نشان می‌دهد. قالب‌ها پس از ۲۴-۲۰ ساعت باز شده و نمونه‌ها عمل‌آوری می‌شوند. از آنجایی که عمل‌آوری با آب داغ باعث افزایش خوردگی الیاف می‌گردد، این نمونه‌ها در آب ۲۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری می‌شوند.

۴-۹-۱- ارزیابی چیدمان آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف

با توجه به اهمیت این آزمایش، قبل از ساخت نمونه‌های اصلی، ابتدا آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف را بر روی الیاف Dramix انجام می‌دهیم. رفتار بیرون کشیده شدن این الیاف توسط Dong Joo Kim انجام شده و نمودار نیرو- لغزش آن موجود است [۲۴]. با مقایسه نمودار بدست آمده می‌توان از صحت چیدمان آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف اطمینان حاصل کرد.

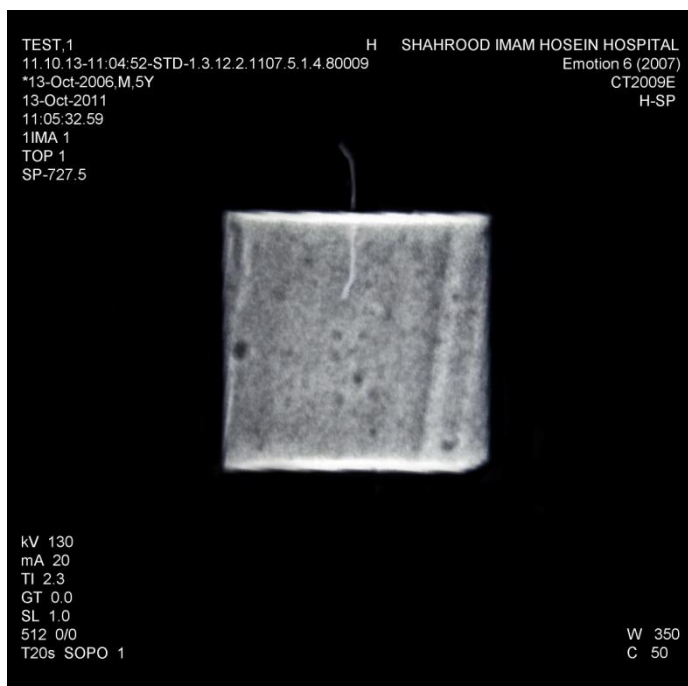
با توجه به اهمیت راستای قرارگیری الیاف در قالب، این مهم با استفاده از تصویربرداری به کمک اشعه ایکس کنترل گردیده و عملکرد قالب در حفظ موقعیت الیاف در حین آماده‌سازی نمونه‌ها ارزیابی شده است.

۴-۹-۲- آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف قالب‌دار Dramix

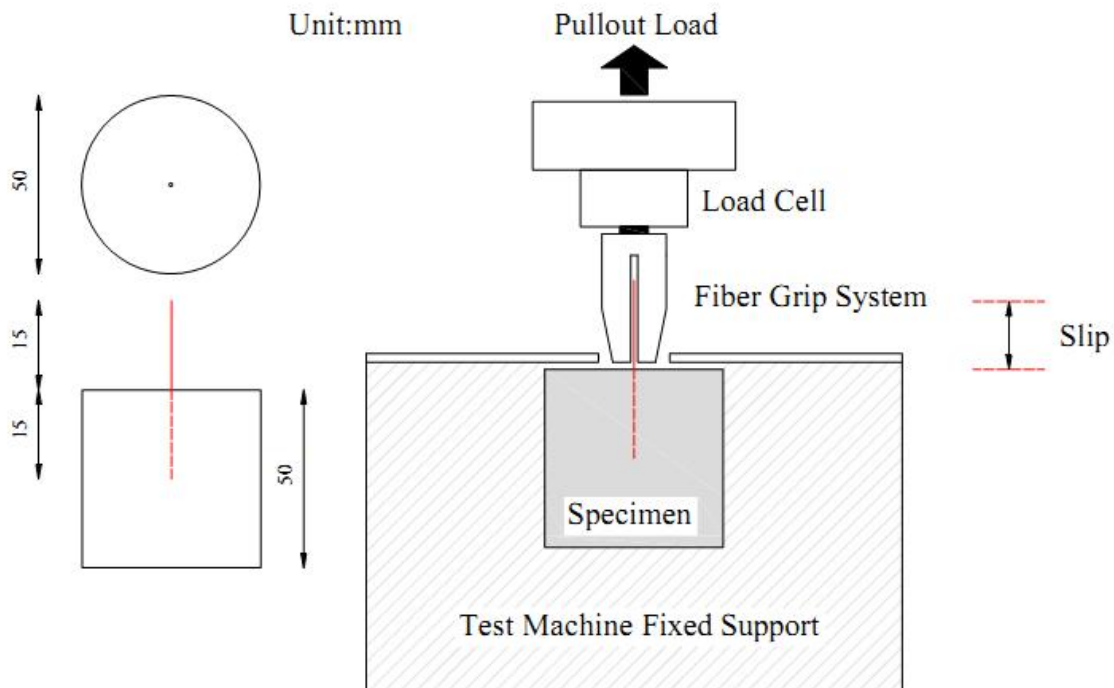
مشخصات طرح اختلاط ماتریس در جدول ۴-۹ و مشخصات الیاف نیز در جدول ۴-۴ ارائه شده است. همان‌گونه که اشاره شد، طول مدفون الیاف نصف طول الیاف در نظر گرفته شده است. شکل ۴-۱۹ نمونه ساخته شده را نشان می‌دهد. پس از عمل‌آوری نمونه‌ها و قبل از انجام آزمایش، تصویربرداری به کمک اشعه ایکس انجام شده است. شکل ۴-۲۰ نشان‌دهنده تصویر گرفته شده می‌باشد. همان‌طور که قابل مشاهده است راستای قرارگیری الیاف در ماتریس در آماده‌سازی نمونه تغییر نکرده و الیاف بطور قائم در ماتریس قرار گرفته است.



شکل ۴-۱۹ نمونه ساخته شده آزمایش بیرون کشیدن الیاف
 بنابراین قالب طراحی شده مناسب بوده و نمونه‌های ساخته شده دقت کافی را خواهند داشت.
 پس از تصویربرداری آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف بر روی نمونه انجام شده است. هندسه و
 چیدمان این آزمایش در شکل ۴-۲۱ آورده شده است. این آزمایش عملکرد الیاف موجود در سطح
 ترک را شبیه‌سازی می‌نماید.



شکل ۴-۲۰ تصویربرداری از نمونه با اشعه ایکس

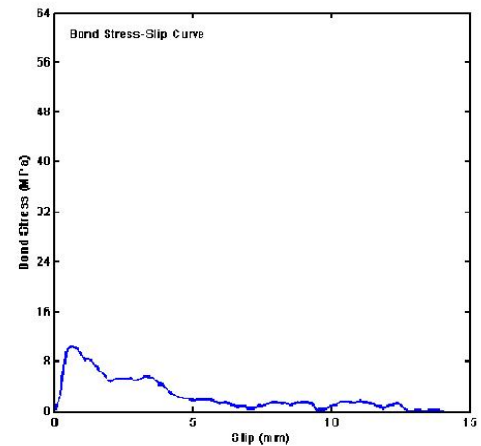
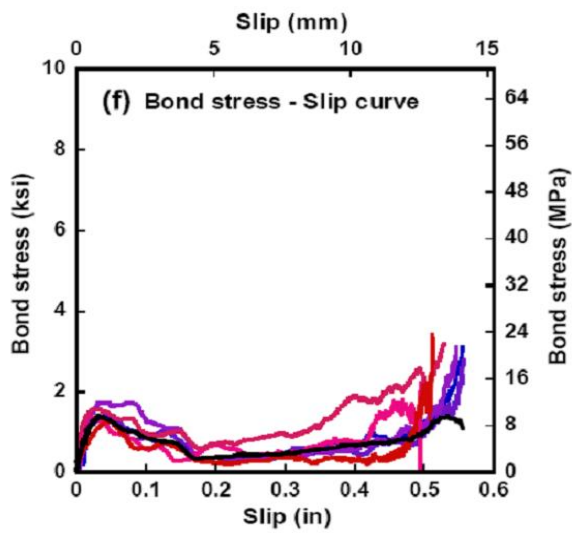
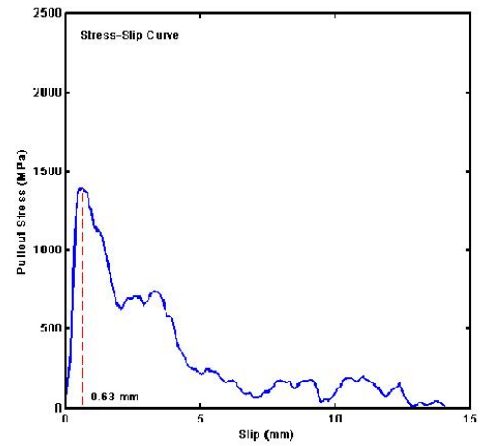
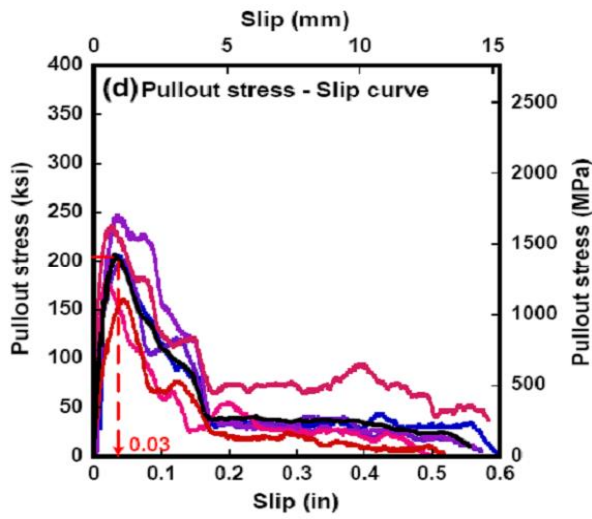
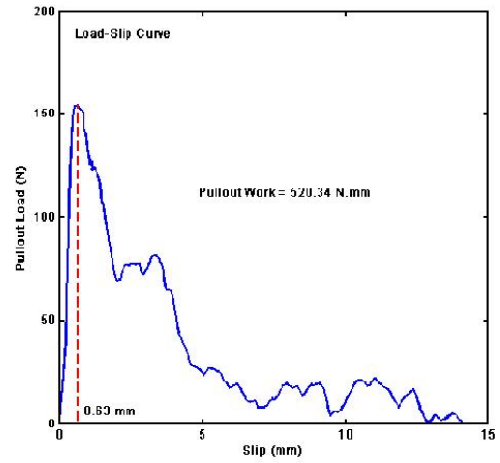
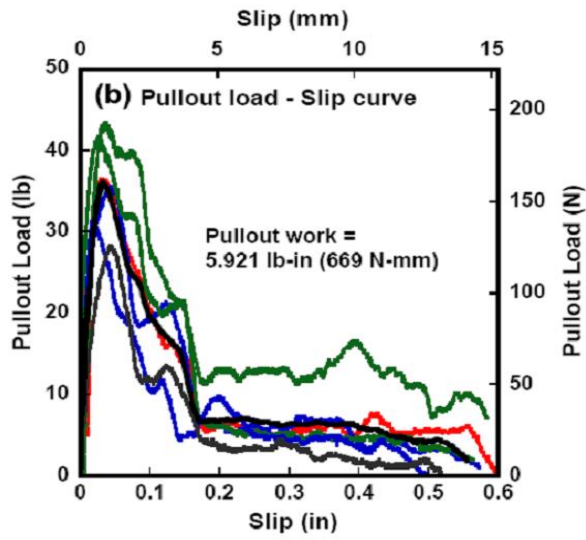


شکل ۴-۲۱ چیدمان آزمایش بیرون کشیدن الیاف

در حین آزمایش، الیاف مکانیزم بیرون کشیده شدن را تجربه نموده و ظرفیت لغزش و انرژی بیرون کشیدگی آن‌ها را می‌توان محاسبه نمود.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که به منظور کاهش تاثیر تغییر طول الیاف، گیره دستگاه می‌بایست الیاف را از نزدیک‌ترین فاصله ممکن تا سطح نمونه بگیرد. نتایج بدست آمده از این آزمایش در شکل ۴-۲۲ ارائه شده است. نمودارهای سمت چپ توسط Dong joo kim و نمودارهای سمت راست، نشان دهنده نتایج آزمایش این تحقیق می‌باشد.

با مقایسه نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که دقت آزمایش انجام شده مناسب بوده و نتایج بدست آمده قابل اطمینان خواهند بود. اختلاف جزئی بین نتایج بدلیل تفاوت در خصوصیات ماتریس سیمانی بکار برده شده می‌باشد. با توجه به صحت نتایج بدست آمده، در مرحله بعد آزمایش بیرون کشیده شدن بر روی الیاف Durocem انجام شده و نتایج لازم استخراج می‌گردند.



شکل ۴-۲۲ مقایسه نتایج تحقیق با نتایج Kim

۴-۱۰- بررسی رفتار بیرون شکیده شدن الیاف Durocem

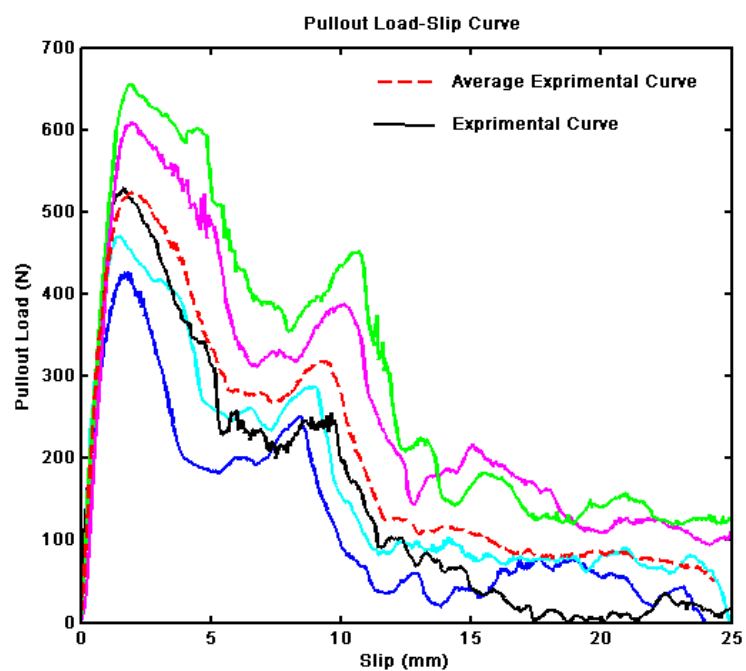
مشخصات الیاف و مشخصات ماتریس به ترتیب در جداول ۴-۴ و ۴-۹ آورده شده است. نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. به منظور افزایش دقت، آزمایش بر روی ۵ نمونه انجام شده است. شکل ۴-۲۳ نشان دهنده نمونه‌ها قبل از انجام این آزمایش می‌باشد. چیدمان آزمایش همانند شکل ۴-۲۱ بوده با این تفاوت که طول مدفون این الیاف ۲۵ میلی‌متر می‌باشد.



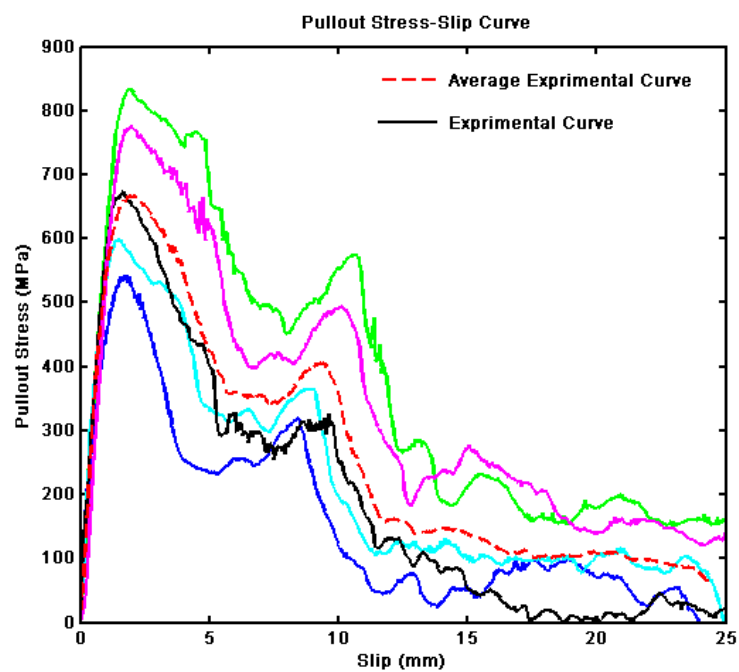
شکل ۴-۲۳ نمونه‌های آزمایش بیرون کشیدن الیاف

۴-۱۱- نتایج آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف Durocem

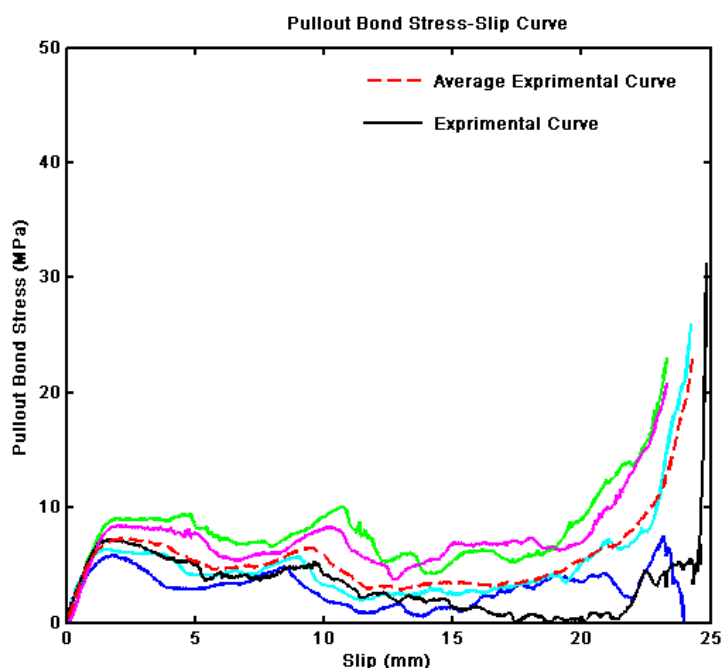
آزمایش بیرون کشیدگی الیاف بر روی نمونه‌ها انجام شده و نتایج آن در شکل‌های ۴-۲۴ و ۴-۲۵ و ۴-۲۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۴ منحنی نیرو- تغییرمکان آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار

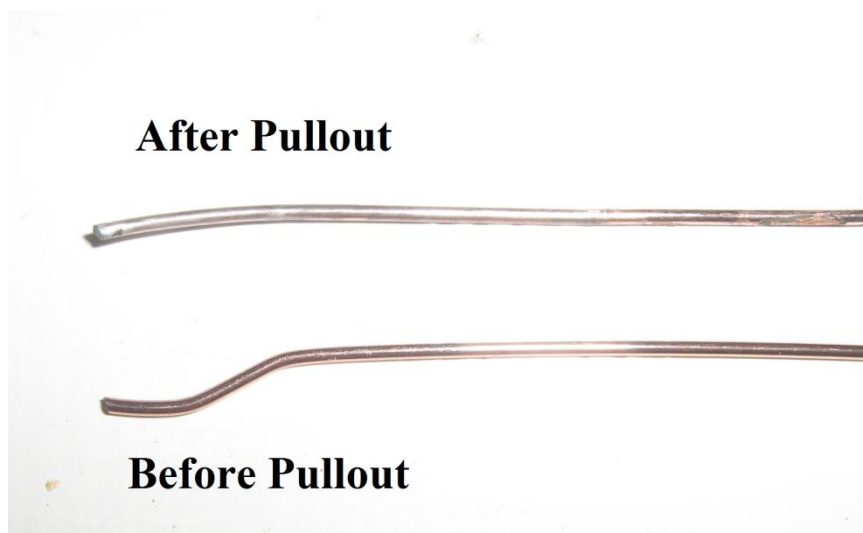


شکل ۴-۲۵ منحنی تنش- تغییرمکان آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار



شکل ۴-۲۶ منحنی تنش پیوستگی - تغییر مکان آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار

شکل ۴-۲۷ نمایانگر تغییر شکل الیاف فولادی در حین بیرون کشیده شدن از ماتریس سیمانی می‌باشد. در تمامی نمونه‌های آزمایش شده، الیاف همراه با تغییر شکل و تشکیل مفصل پلاستیک از ماتریس بیرون کشیده شده‌اند.



شکل ۴-۲۷ تغییر شکل الیاف فولادی در حین بیرون کشیده شدن از ماتریس

می‌توان نتیجه گرفت که تغییر شکل و ایجاد مفصل پلاستیک باعث رفتار سخت‌شدگی الیاف تا لغزش متوسط ۱/۷۷ میلی‌متر می‌گردد. پس از این مرحله مقاومت پیوستگی الیاف کاهش یافته و اصطکاک بین الیاف و ماتریس، مهم‌ترین عامل در ایجاد این مقاومت می‌باشد. نتایج آماری آزمایش در جدول ۴-۱۳ آورده شده است. مقاومت پیوستگی معادل را می‌توان با محاسبه انرژی بیرون کشیده شدن الیاف از نتایج بدست آمده و رابطه‌ی ۴-۴ بدست آورد.

جدول ۴-۱۳ نتایج آماری آزمایش بیرون کشیدگی الیاف

شماره نمونه	حالت گسیختگی	طول مدفون (mm)	نیروی بیشینه (N)	جابجایی نظیر نیروی بیشینه (mm)	انرژی بیرون کشیدگی (N.mm)	مقاومت پیوستگی معادل (MPa)
۱	بیرون کشیدگی	۲۵	۶۵۴/۷۸	۱/۹۹	۷۶۶۸/۲	۷/۸۱
۲	بیرون کشیدگی	۲۵	۴۲۶/۰۸	۱/۷۰	۳۰۹۹/۲	۳/۱۶
۳	بیرون کشیدگی	۲۵	۴۶۹/۶۳	۱/۵۱	۴۳۰۴/۸	۴/۳۹
۴	بیرون کشیدگی	۲۵	۵۲۹/۴۳	۱/۶۷	۴۰۰۷/۷	۴/۰۸
۵	بیرون کشیدگی	۲۵	۶۰۹/۴۱	۲/۰۰	۶۷۵۰/۱	۶/۸۸
متوسط	-	-	۵۳۷/۸۶	۱/۷۷	۵۱۶۶	۵/۲۶

فصل پنجم

مدل سازی بیرون کشیده

شدن الیاف از ماتریس

بتنی

۵-۱- مقدمه

مدل‌سازی به کمک روش اجزا محدود همواره به عنوان ابزاری مناسب جهت درک بهتر رفتار پدیده‌های مختلف تلقی می‌گردد. بر همین اساس در این فصل رفتار بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس سیمانی مدل‌سازی شده و بوسیله‌ی منحنی- لغزش بدست آمده از این آزمایش صحت سنجی می‌گردد. در انجام مدل‌سازی از خصوصیات مکانیکی مصالح که در فصل چهارم بدست آمده استفاده گردیده است. مدل‌سازی الیاف Durocem با استفاده از نرم‌افزار ANSYS انجام گرفته است. در انجام مدل‌سازی اهداف زیر دنبال می‌گردد:

۱. نحوه ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک در الیاف فولادی بررسی شود.
۲. رابطه‌ی میان ایجاد مفصل پلاستیک در مقادیر مختلف لغزش بررسی و میزان سخت‌شدگی لغزشی الیاف ارزیابی گردد.
۳. بوسیله کنترل تنش‌های فشاری در سطح مشترک الیاف و ماتریس، خرابی ماتریس مورد بررسی قرار گیرد.

در ادامه نحوه‌ی مدل‌سازی این پدیده و پارامترهای دخیل در آن تشریح می‌گردد.

۵-۲- تحلیل غیر خطی

رفتار غیرخطی در سازه‌ها به دلایل مختلفی می‌تواند رخ دهد. بطور کلی رفتارهای غیر خطی را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود.

۵-۲-۱- غیرخطی هندسی

ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ موجب تغییر هندسه سازه شده که باعث بروز رفتار غیرخطی می‌گردد. در این حالت وضعیت هندسی سازه به نحوی است که هنگام محاسبه نیروهای داخلی و تنش‌ها، نمی‌توان از این تغییرات صرف نظر نمود.

۵-۲-۲- رفتار غیر خطی مصالح

این نوع رفتار غیرخطی به دلیل وجود رابطه‌ی غیرخطی تنش و کرنش رخ می‌دهد. در این صورت تنش تابعی غیرخطی از کرنش است.

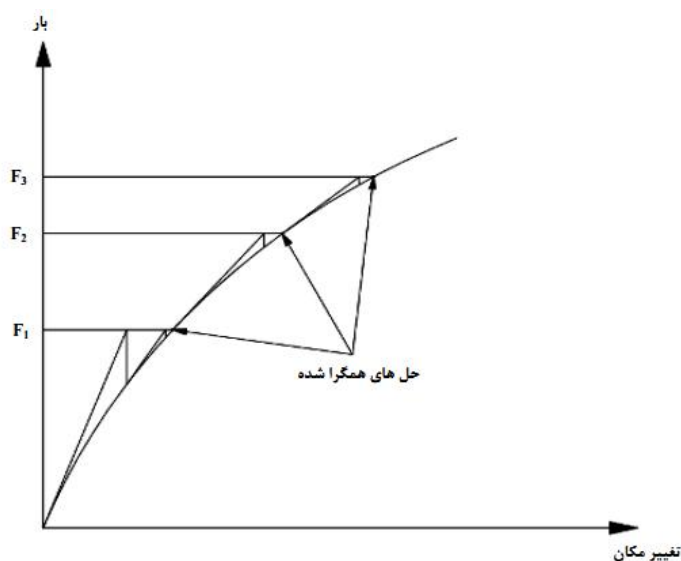
هرچند در مراحل ابتدایی بارگذاری ممکن است رابطه تنش و کرنش خطی باشد، لیکن با افزایش بار و افزایش کرنش رفتار مصالح غیرخطی می‌گردد.

۵-۲-۳- تغییر وضعیت سازه

در بسیاری از موارد رفتار غیرخطی وابسته به وضعیت سازه می‌باشد. در این مواقع بروز رفتار غیرخطی ناشی از تغییر ناگهانی سختی سازه می‌باشد به عنوان مثال زمانی که یک کابل تحت کشش شل شود، سختی آن به یک‌باره از بین خواهد رفت. یا زمانی که بین دو جسم تماس ایجاد شود، سختی سازه دچار تغییرات ناگهانی می‌گردد.

۵-۳- حل مسائل غیرخطی در ANSYS

حل مسائل غیرخطی در نرم افزار ANSYS به کمک روش نیوتن-رافسون انجام می‌پذیرد. در این روش می‌توان بار را طی چندین گام بارگذاری و به صورت تدریجی بر سازه اعمال نمود. بنابراین حل مسأله نیز بصورت تدریجی بوده و طی گام‌های مختلف انجام می‌گیرد [۲۶][۲۷].



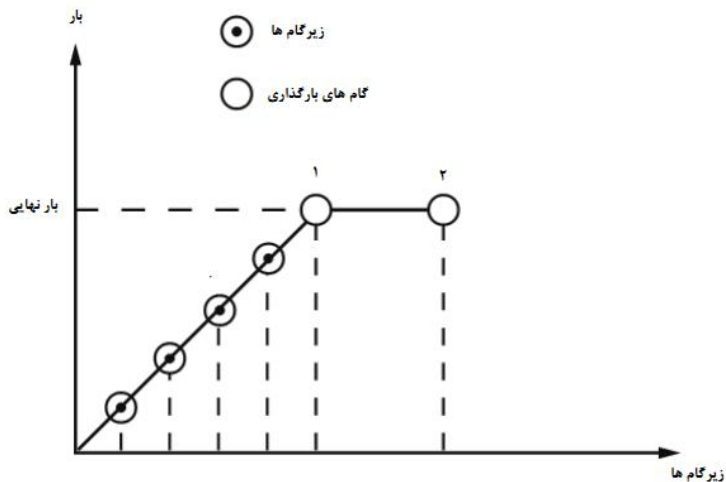
شکل ۵-۱ مراحل حل مسأله به روش نیوتن-رافسون

قبل از شروع حل مسأله در هر گام نیروهای ناشی از تنش حاصله در المان‌ها محاسبه شده و با نیروی خارجی اعمال شده مقایسه می‌گردد. اختلاف این دو به عنوان نیروی نامتعادل کننده در نظر گرفته می‌شود. این نیرو به عنوان معیاری برای همگرایی حل مسأله می‌باشد. نرم افزار با انجام حل خطی، همگرایی مسأله را کنترل می‌نماید. در صورت عدم همگرایی حل مسأله، ماتریس سختی و نیروی نامتعادل کننده یک بار دیگر محاسبه شده و حل مسأله تکرار می‌گردد. این فرآیند تکراری تا زمان همگرایی ادامه می‌یابد. شکل ۵-۱ مراحل حل مسأله به کمک روش نیوتن-رافسون را شرح می‌دهد.

همان گونه که اشاره شد بارگذاری مسأله به صورت تدریجی انجام می‌پذیرد. اول آن که بار در مراحل مختلف تحت عنوان گام بارگذاری (Load Step) به سازه اعمال می‌شود. به بیان دیگر گام بارگذاری همان نحوه اعمال بار برای حل مسأله می‌باشد. در نرم افزار گام‌های بارگذاری می‌بایست بر حسب زمان تعریف شوند. البته در تحلیل‌های استاتیکی که ماهیت مسأله مستقل از زمان می‌باشد، زمان یک پارامتر نمادین بوده و در حل مسئله نقشی ندارد. شکل ۵-۲ نمودار تاریخچه بارگذاری را نشان می‌دهد که برای اعمال این بار، به تعریف سه گام بارگذاری نیاز داریم.

دومین روند در اعمال بار، تقسیم هر گام بارگذاری به بازه‌های زمانی کوچک‌تر است. هر یک از این بازه‌های زمانی زیرگام (Sub Step) نامیده می‌شوند. حل مسأله در نقاط انتهایی زیرگام‌ها انجام می‌شود. دلیل اصلی استفاده از زیرگام، اعمال تدریجی بار به منظور افزایش دقت در حل مسأله می‌باشد. علاوه بر این، در هر زیرگام با تکرار معادلات تعادل معیار همگرایی مسأله بدست خواهد آمد. شکل ۵-۲ مفهوم زیرگام و رابطه‌ی آن با گام بارگذاری را نمایش می‌دهد.

انتخاب تعداد زیرگام‌ها در هر گام بارگذاری از اهمیت خاصی برخوردار است و باید به گونه‌ای باشد که بین دقت مسأله و مدت زمان حل مسأله تعادل وجود داشته باشد. با افزایش تعداد زیرگام‌ها دقت حل مسأله افزایش پیدا کرده و در عین حال مدت زمان حل آن نیز افزایش خواهد یافت. و البته کاهش تعداد زیرگام‌ها باعث کاهش دقت حل مسأله خواهد شد. لازم به ذکر است در برخی موارد انتخاب نادرست تعداد زیرگام‌ها منجر به واگرایی مسأله می‌شود.



شکل ۵-۲ مفهوم گام بارگذاری و زیرگام

۴-۵- چگونگی انجام تحلیل در نرم افزار ANSYS

تحلیل یک مسأله در نرم افزار ANSYS شامل سه قسمت اصلی است:

- ۱- مدل سازی
- ۲- اعمال بار و حل مسأله
- ۳- بررسی نتایج

۴-۵-۱- مدل سازی

ساخت مدل اجزای محدود مهم ترین بخش در روند تحلیل مسأله می باشد. تعریف المان‌ها، ثوابت حقیقی، خصوصیات مصالح و هندسه ی مدل، جزء مراحل این گام می باشند.

۴-۵-۱-۱ المان (Element)

انتخاب المان مناسب برای مدل سازی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در نرم افزار ANSYS المان‌ها دارای قابلیت های متفاوتی می باشند. تعداد گره ها، درجات آزادی، ثوابت حقیقی و خصوصیات مصالح جزو مواردی هستند که در انتخاب المان تاثیر گذارند. نکته حائز اهمیت دیگر این است که در مسائل غیرخطی، المان می‌بایست قابلیت بروز رفتارهای غیرخطی از قبیل تغییر شکل‌های بزرگ، رفتار غیرخطی مصالح و ... را داشته باشد. این قابلیت ها که در نرم‌افزار به عنوان KEYOPT نام‌گذاری می‌شوند را می‌توان برحسب نیاز مسأله فعال و یا غیرفعال نمود.

۵-۴-۱-۲- خصوصیات مصالح

به منظور اعمال رفتار مصالح، خصوصیات مانند مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و منحنی تنش و کرنش باید برای نرم افزار تعریف شود.

۵-۴-۱-۳- ثابت‌های حقیقی

نرم افزار برای محاسبه‌ی ماتریس سختی المان‌ها نیاز به داده‌هایی مانند سطح مقطع، ضخامت، قطر داخلی و خارجی و غیره دارد. که تعریف آنها از طریق خصوصیات مصالح برای نرم افزار امکان پذیر نیست. لذا این داده‌ها در نرم افزار به عنوان ثابت‌های حقیقی (REAL CONSTANT) شناخته می‌شوند که این ثابت‌ها بسته به نوع المان و شرایط مسأله تعریف می‌شوند.

۵-۵- نکات قابل توجه در مدل سازی بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس سیمانی

شبهه سازی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس سیمانی به دلیل بروز رفتارهای سیمانی مسأله‌ی پیچیده‌ای است. به منظور مدلسازی صحیح و حصول نتایج قابل اطمینان، رعایت نکات زیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

- ۱- با انتخاب المانهای مناسب می‌توان پدیده‌های غیرخطی زیر را در مدل‌سازی در نظر گرفت.
 - رفتار غیرخطی پیوستگی بین الیاف و ماتریس سیمانی در مراحل اولیه بارگذاری
 - تماس بین الیاف و ماتریس و تاثیر آن بر رفتار الیاف
 - رفتار اصطکاکی و تنش‌های حاصله از آن در حین بیرون کشیده شدن الیاف
 - تغییر شکل‌های پلاستیک ایجاد شده در الیاف و ماتریس سیمانی و اثرات آن بر چگونگی بیرون کشیده شدن الیاف
 - تغییر شکل و کرنش‌های زیاد ایجاد شده در الیاف در حین بیرون کشیده شدن
- ۲- به دلیل اهمیت رفتار سطح مشترک الیاف و ماتریس این ناحیه می‌بایست شبهه سازی گردیده و رفتار و خصوصیات آن به درستی انتخاب گردد.
- ۳- با توجه به نامنظم بودن هندسه الیاف، مدل‌سازی صحیح هندسه مسأله نیز از نکات مهم می‌باشد.

۴- انتخاب مناسب تراکم شبکه در دقت نتایج حاصله و همچنین مدت زمان حل مسأله تاثیر بسزایی دارد.

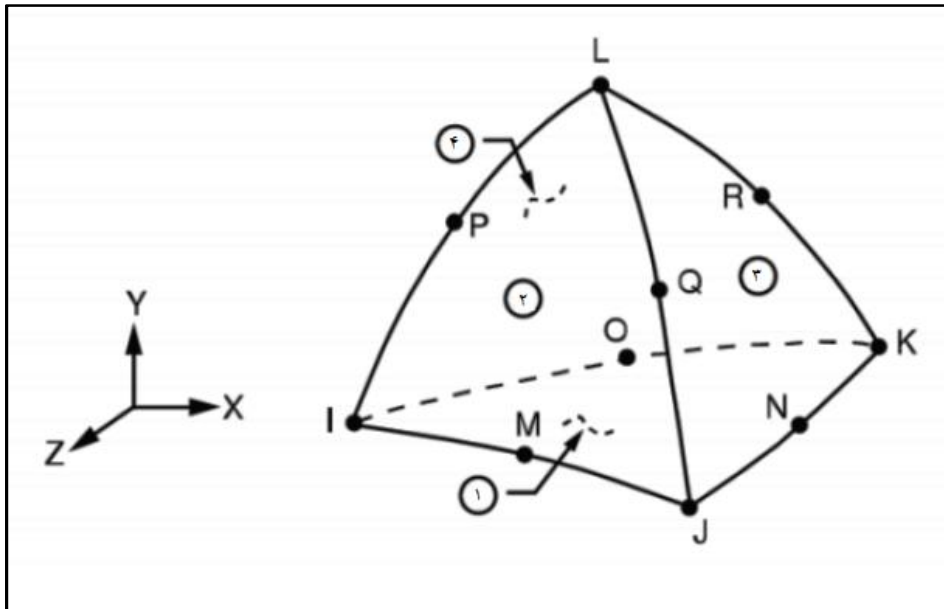
۵- بارگذاری مسأله می‌بایست بطور تدریجی و از نوع کنترل تغییر مکان بوده تا بتوان رفتار الیف را به درستی ارزیابی نمود.

در ادامه نحوه مدل سازی بخش های مختلف، المان های بکار رفته و خصوصیات مصالح و تنظیمات را بررسی می نماییم.

۵-۶- مدل سازی الیف و ماتریس سیمانی در نرم افزار ANSYS

۵-۶-۱- المان Solid 187

المان به کار رفته به منظور مدلسازی الیف، المان Solid 187 است. این المان سه بعدی، چهار وجهی و از نوع مرتبه دوم بوده و بوسیله ۱۰ گره تعریف می‌شود [۲۶].



شکل ۵-۳ هندسه، موقعیت گره‌ها و دستگاه مختصات المان Solid187 [۲۶]

بیشترین کاربرد این المان در شبکه بندی اشکال هندسی نامنظم است. هندسه، موقعیت گره‌ها و دستگاه مختصات این المان در شکل زیر نمایش داده شده است. همان‌گونه که اشاره شد این المان بوسیله ۱۰ گره تعریف شده که هر گره آن دارای سه درجه آزادی جابه‌جایی در جهات X و Y و Z

می‌باشد. المان Solid187 توانایی مدل‌سازی تغییر شکل‌های بزرگ، کرنش‌های بزرگ و پلاستیسیته را دارا می‌باشد.

۵-۶-۲- مصالح (مدل رفتاری) مورد استفاده در شبیه‌سازی الیاف

در این تحقیق، الیاف مورد بررسی از جنس فولاد می‌باشد. به منظور شبیه‌سازی رفتار الیاف از دو مدل رفتاری استفاده شده است:

۵-۶-۲-۱- ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic) :

همانگونه که اشاره شد، در ابتدای روند بارگذاری، رفتار مصالح خطی است. در مراحل اولیه بارگذاری دو پارامتر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون برای شبیه‌سازی رفتار الیاف به کار می‌روند.

۵-۶-۲-۲- ایزوتروپیک چند خطی (Multilinear Isotropic Hardening Plasticity) :

این مدل رفتاری با تعیین منحنی تنش - کرنش، رفتار مصالح حین بارگذاری را شبیه‌سازی می‌نماید. به منظور استفاده از این مدل رفتاری، کرنش و تنش متناظر آن می‌بایست برای نرم افزار تعریف گردد. نرم افزار این نقاط را بوسیله ی خط به یکدیگر متصل نموده و منحنی تنش و کرنش شکل می‌گیرد. با توجه به دقت و نیاز مسأله، می‌توان تعداد نقاط را کاهش یا افزایش داد. همچنین منحنی تنش - کرنش را می‌توان از آزمایشات انجام شده و یا مدل‌های ریاضی پیشنهادی بدست آورد. در صورتی که کرنش از تعداد تعریف شده تجاوز نماید، نرم افزار شیب نمودار را صفر در نظر می‌گیرد.

۵-۶-۳- مدل‌سازی سطح مشترک الیاف و ماتریس سیمانی

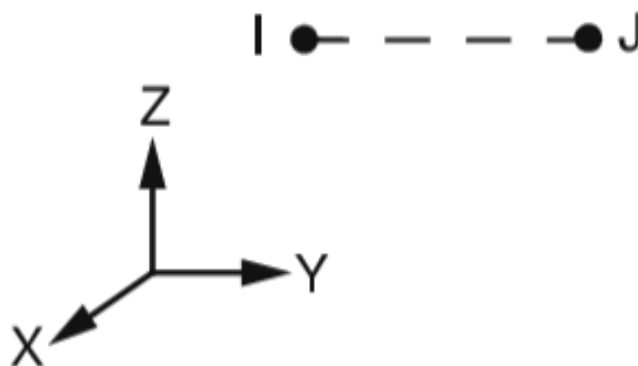
مدل‌سازی سطح مشترک الیاف و خصوصیات آن از مواردی است که بر رفتار بیرون کشیده شدن الیاف تاثیر بسزایی دارد. وجود دو مکانیسم متفاوت باعث بروز رفتار پیچیده در این ناحیه می‌شود:

۱- رفتار غیرخطی پیوستگی در مراحل اولیه بارگذاری

۲- ایجاد تماس و رفتار اصطکاکی

۵-۶-۴-المان COMBIN39

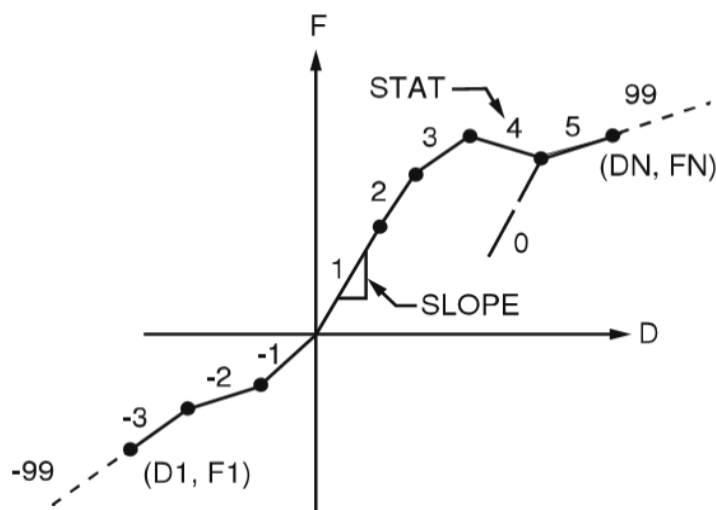
مکانیزم پیوستگی سطح مشترک الیاف و ماتریس به کمک تعریف المان غیرخطی COMBIN39 در این ناحیه شبیه سازی شده است. این المان در حقیقت فنری یک جهته با رفتار غیرخطی است. رفتار این المان با توجه به درجات آزادی تعریف شده می تواند به صورت طولی یا پیچشی باشد. کنترل رفتار این المان در حین بارگذاری از طریق تعیین رابطه ی نیرو و تغییر مکان می باشد. المان بوسیله ی دو گره تعریف شده که هر گره دارای سه درجه آزادی تغییر مکان و یا چرخش در جهات یا حول محوره های X و Y و Z می باشد. با تعریف درجه آزادی تغییر مکانی برای گره ها، این المان تبدیل به المان محوری خرابایی (کشش یا فشار) می شود. هندسه، موقعیت گره ها و دستگاه مختصات این المان در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵ موقعیت گره ها و دستگاه مختصات المان COMBIN39 [۲۶]

قابلیت تغییر شکل های بزرگ، استفاده از این المان در تحلیل های غیرخطی را ممکن می سازد. رابطه نیرو-تغییر مکان این المان، از طریق تعریف نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل می گردد. نقاط روی نمودار بیانگر رابطه نیرو و جابه جایی نسبی گره های المان می باشند. از طریق تعریف ثابت های حقیقی (Real Constant) می توان نقاط منحنی نیرو-تغییر مکان را برای نرم افزار تعریف نمود. شکل ۵-۵ نشان دهنده نمودار تغییر مکان برای المان COMBIN39 می باشد. تعیین درجات آزادی گره ها، از طریق گزینه های KEYOPT این المان امکان پذیر می باشد. با توجه به اینکه رفتار غیرخطی المان از

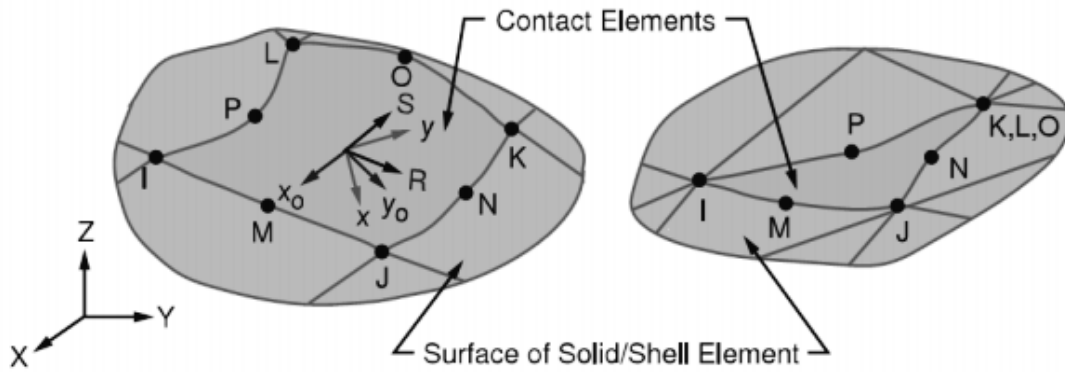
طریق منحنی نیرو-تغییر مکان تعریف می‌شود، المان نیازی به تعیین خصوصیات مصالح ندارد. همان‌گونه که اشاره شد، رفتار المان غیرخطی بوده و روند حل مسأله باید به صورت تکراری باشد.



شکل ۵-۵ نمودار نیرو-تغییر مکان المان COMBIN39 [۲۶]

۵-۶-۵- المان CONTA174 و TARGET170

از المان CONTA174 به منظور مدل سازی تماس و لغزش بین دو جسم استفاده می شود. این المان بر روی اجسام سه بعدی قرار گرفته و در صورت ایجاد تماس بین دو جسم امکان تحلیل تنش های تماسی را فراهم می سازد. به همراه این المان، المان دیگری به نام TARGET170 نیز می‌بایست تعریف گردد. به عبارت دیگر بر روی سطح یک جسم، المان CONTA174 و بر روی سطح جسم دیگر المان TARGET170 ایجاد می‌شود. تماس زمانی رخ می دهد که المان‌های CONTACT به داخل المان TARGET نفوذ نماید. این المان ها نیاز به شبکه بندی نداشته و هندسه و مدل شبکه بندی سطوحی که بر روی آن ها تعریف می گردند را به خود می گیرند. شکل ۵-۶ نشان دهنده هندسه و موقعیت نقاط این المان می باشد.

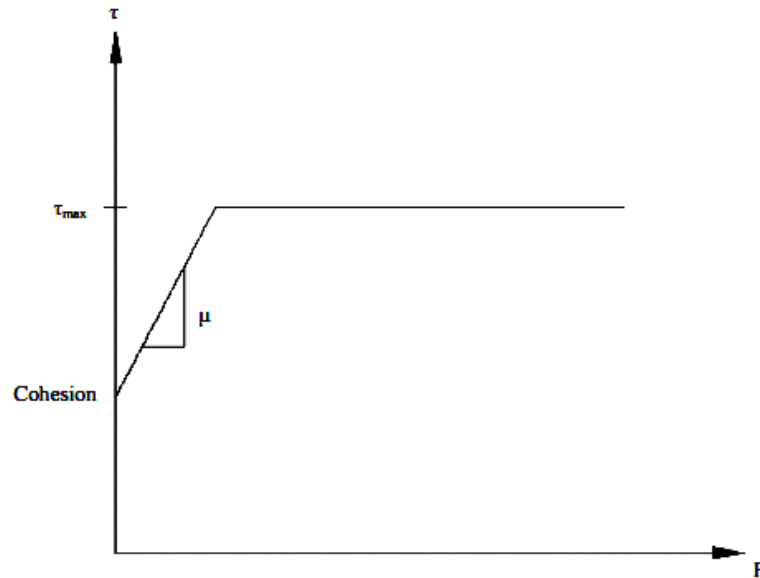


شکل ۵-۶ هندسه و موقعیت نقاط المان [۲۶]

بسته به هندسه شبکه‌ی سطوح تماس، شش یا هشت گره قابل تعریف است. این المان‌ها در مسائلی که سطح تماس دو جسم از ابتدا مشخص نیست، بر روی تمامی سطوحی که بین آن‌ها احتمال تماس وجود دارد تعریف می‌گردند.

انواع حالت‌های تماس بین دو جسم از قبیل صلب-انعطاف پذیر، انعطاف پذیر-انعطاف پذیر و ... از این طریق قابل تعریف می‌باشند. ماهیت رفتار این المان‌ها غیرخطی بوده و برای حل این مسائل می‌بایست از روش تکراری نیوتن-رافسون استفاده کرد.

شبه سازی رفتار اصطکاک بین دو جسم از طریق مدل رفتاری اصطکاک کولمب صورت می‌پذیرد. نرم افزار قابلیت مدل سازی اصطکاک‌های همسان گرد و غیرهمسان گرد را نیز دارا می‌باشد. بر اساس مدل رفتاری کولمب، دو سطح در حال تماس می‌توانند تنش‌های برشی وارده را تا حد معینی تحمل نمایند و با افزایش تنش بین دو سطح لغزش رخ خواهد داد. شکل زیر نشان دهنده رابطه بین تنش‌های برشی و تنش‌های قائم وارد بر سطح تماس دو جسم می‌باشد.



شکل ۷-۵ رابطه بین تنش برشی و تنش قائم وارد بر سطح تماس دو جسم [۲۶]

این المان توانایی مدل سازی جداسازی بین دو سطح پیوسته را نیز دارا می باشد؛ لیکن استفاده از این قابلیت باعث بروز مشکلاتی در همگرایی مسأله می شود.

مهم ترین بخش در تحلیل تماس بین دو جسم به وسیله این المان، تنظیم پارامترهای مربوط به ثوابت حقیقی (REAL CONSTANT) و گزینه های این المان (KEYOPT) می باشد.

علاوه بر این، انتخاب الگوریتم مناسب به منظور تحلیل تماس دو جسم از اهمیت خاصی برخوردار بوده و در همگرایی و مدت زمان حل مسأله تاثیر بسزایی دارد.

Penalty Method و Augmented Lagrangian Method دو الگوریتم پرکاربرد و FKN و FTOLN، SLTO و FKT ثوابت حقیقی مهم در این مرحله می باشند. در صورت استفاده از دو الگوریتم فوق مهم ترین ثابت حقیقی در حل مسأله، سختی المان های تماسی در جهت عمود بر سطح تماس (FKN) می باشد که مقدار آن در مدت زمان حل مسأله و تعداد تکرارهای معادلات تعادل برای همگرایی تاثیر زیادی دارد.

۷-۵- مراحل مدل سازی بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس

مدل سازی به معنی تعیین و تطبیق مشخصات، اهم از رفتار مادی، مشخصات هندسی، شرایط مرزی و نحوه بارگذاری به گونه ای که عکس العمل رفتاری و خروجی هایی متناسب و نزدیک به نتایج واقعی

از آن حاصل شود. اطمینان از نزدیک شدن نتایج خروجی با نتایج آزمایشگاهی که با تعدیل پارامترهای قابل تنظیم در نرم افزار صورت می گیرد، صحت عملکرد یا همان کالیبراسیون نامیده می شود. آن چه که در این مدل سازی نقش اساسی ایفا می کند، معادل سازی صحیح رفتارهای غیرخطی در نرم افزار می باشد. بطور کلی برای مدل سازی بیرون کشیده شدن الیاف در نرم افزار ANSYS، مراحل زیر باید مد نظر قرار گرفته و بطور مشخص تعریف گردند:

۱- ترسیم شکل هندسی باتوجه به ابعاد نمونه ها و در نظر گیری سیستم واحد یکسان و استفاده از دستگاه مختصات محلی و مناسب با توجه به هندسه مسأله.

۲- در نظرگیری المان هایی متناسب با رفتار مسأله و تنظیم مشخصات اصلی از طریق گزینه های (KEYOPT) مربوط به هر المان.

۳- بیان خصوصیات و رفتار مکانیکی مواد و مصالح به کار رفته که این قسمت متشکل از دو بخش می باشد:

الف - تعریف خصوصیات خطی مصالح که شامل سختی (مدول الاستیسیته) و ضریب پواسون اولیه با در نظر گیری شماره ای منحصر به فرد برای هر ماده می باشد.

ب - با در نظر گرفتن شماره ای که در قسمت قبل به آن ماده اختصاص داده شده است، رفتار غیرخطی ماده نیز تعریف گردد.

۴- با توجه به نوع المان علاوه بر خصوصیات مصالح (که در مراحل قبل بررسی گردید)، ثوابت حقیقی (REAL CONSTANT) مربوط به هر المان نیز تعریف شوند.

۵- تخصیص مشخصات تعریف شده در مراحل قبل، اعم از نوع المان، خصوصیات ویژه برای هر المان، نوع ماده مورد استفاده و دستگاه مختصات محلی که خصوصیات آن المان با توجه به آن در نظر گرفته شده، برای هر قسمت حجمی، سطحی و یا خطی ترسیم شده است.

۶- اعمال تراکم مورد نیاز شبکه در قسمت های مختلف. میزان تراکم شبکه از اهمیت خاصی برخوردار است زیرا در میزان دقت مسأله و مدت زمان حل مسأله تاثیر بسزایی دارد. بدین منظور با شناخت رفتار بخش های مختلف سازه می توان میزان تراکم را تعیین نمود.

۷- با ایجاد تراکم مورد نیاز در هر قسمت، امکان المان بندی کل هندسه ی رسم شده فراهم می شود.

۸- اعمال بارگذاری مورد نظر. بارگذاری شامل تخصیص شرایط مرزی اعم از قید گیرداری گره ها، شرایط تقارن و اعمال نیروها یا تغییر مکان ها می باشد.

۹- تعیین پارامترهای مربوط به همگرایی تحلیل غیرخطی که با استفاده از معیارهای کنترل نیرو، جابه جایی، لنگر و دوران و با توجه به نوع بارگذاری اعمال می گردد. در همین قسمت نیز میزان حداکثر تکرارهای معادلات تعادل به منظور دستیابی به معیار همگرایی تعیین شده، مشخص می شود.

۱۰- همانگونه که در بخش های قبل اشاره شد، نرم افزار ANSYS از طریق اعمال گام (Load Step) و زیرگام (Sub Step) بارگذاری امکان اعمال تدریجی بار را فراهم می سازد. تعداد گام های بارگذاری با توجه به نوع بارگذاری مسأله تعیین می گردد. لیکن برای تعیین تعداد زیرگام ها معیار مشخصی وجود نداشته و می بایست با توجه به سرعت همگرایی و تعداد تکرار معادلات تعادل در هر زیرگام تخمین زده شود. انتخاب نادرست تعداد زیرگام ها سرعت همگرایی مسأله را کاهش داده و بالعکس ممکن است باعث طولانی شدن زمان حل مسأله می گردد.

۱۱- اعمال نوع تحلیل مورد نیاز که شامل استاتیکی، دینامیکی، گذرا و ... است و تنظیم پارامترهای قابل تعریف برای تحلیل اجزای محدود و اجرای تحلیل.

۱۲- کنترل نتایج خروجی حاصل از تحلیل در پردازشگرهای POST1 و POST26 و کالیبره نمودن نرم افزار با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود.

پس از بیان مختصری از مراحل مدل سازی اجزای محدود بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس سیمانی به بررسی مدل سازی بیرون کشیده شدن الیاف قلاب دار (Hooked) پرداخته و نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در فصل چهارم مقایسه خواهد شد.

۵-۸- مدل سازی بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار از ماتریس سیمانی

در این قسمت مدل بیرون کشیده شدن الیاف قلاب دار (Hooked) از ماتریس سیمانی انجام شده و اعتبار آن بوسیله ی نتایج آزمایشگاهی بررسی می شود. رفتار بیرون کشیده شدن این الیاف به کمک

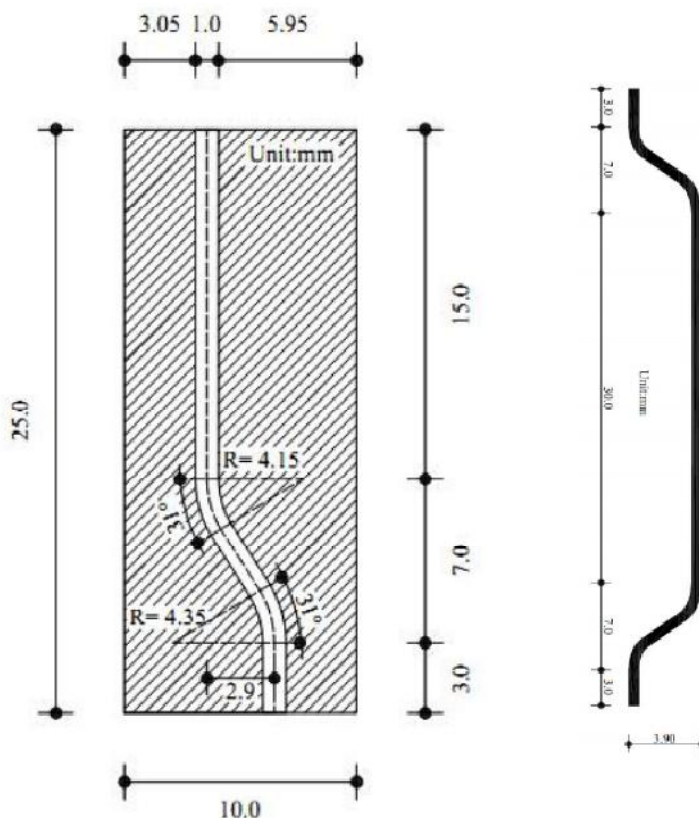
آزمایش بیرون کشیدگی مورد ارزیابی قرار گرفته و نمودار نیرو-تغییر مکان آن در اختیار می‌باشد. هندسه‌ی الیاف و نمونه‌ی مدل‌سازی شده در شکل ۵-۸ آورده شده است.

۵-۸-۱- مشخصات مصالح به کار رفته در مدل سازی

مقاومت فشاری ماتریس بتنی ۶۸/۸ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آن به ترتیب ۴۱ گیگاپاسکال و ۰/۲ می‌باشند. الیاف قلاب‌دار به کار رفته در این مدل سازی از جنس فولاد پرمقاومت بوده که تنش تسلیم آن ۶۵۰ مگاپاسکال و تنش نهایی آن ۸۰۰ مگاپاسکال می‌باشد. علاوه بر خصوصیات ماتریس بتنی و الیاف، نیاز به مشخصات سطح مشترک الیاف و ماتریس (Interface) داریم. این مشخصات شامل مقاومت پیوستگی و رفتار این ناحیه و ضریب اصطکاک آن می‌باشد.

۵-۸-۲- نکات کلی مدل سازی الیاف قلاب‌دار

نخستین گام در مدل‌سازی اجزاء محدود، انجام هشت مرحله‌ی ابتدایی بخش قبل می‌باشد. در شکل زیر هندسه‌ی مسأله مشاهده می‌شود. ذکر نکات زیر در رابطه با این مدل‌سازی حائز اهمیت است.

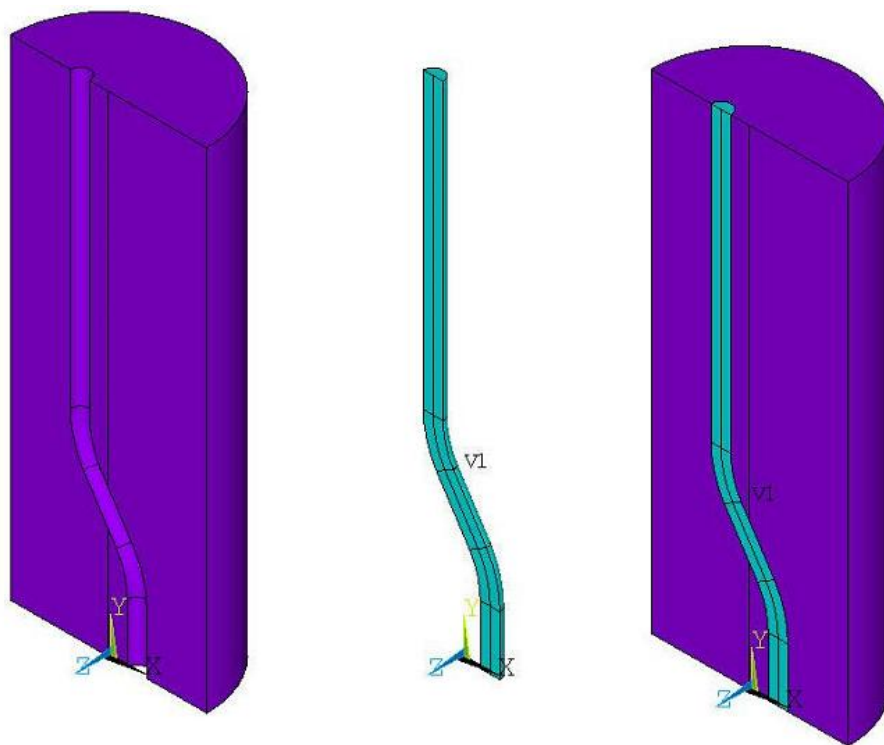


شکل ۵-۸ ابعاد و هندسه الیاف نمونه

۱- مدل سازی رفتار متفاوت ماتریس بتنی تحت تنش های کششی و فشاری باعث بروز مشکلاتی در همگرایی مسأله شده، به همین دلیل از شبیه سازی آن صرف نظر می شود. علاوه بر این المان Solid187 که برای شبکه بندی ماتریس بتنی به کار رفته، قابلیت پذیرش مصالح بتنی (Concrete) را ندارد.

۲- با توجه به تقارن مسأله نسبت به صفحه $X-Y$ نیمی از هندسه ی مدل سازی شده است. استفاده از خاصیت تقارن و کاربرد آن در مدل سازی با کاهش حجم محاسبات باعث افزایش سرعت انجام تحلیل می گردد. لازم به ذکر است که به منظور استفاده از خاصیت تقارن می بایست شرایط مرزی مناسبی را بر روی صفحه ی تقارن اعمال نماییم. بدین منظور درجات آزادی تغییر مکان و دوران در صفحه ی $X-Y$ (تغییر مکان در راستای محور Z و دوران حول محورهای X و Y) مقید شده اند.

۳- به منظور کاهش حجم محاسبات، از مدل سازی ماتریس بتنی در قسمت پایین نمونه صرف نظر شده است. البته با انجام تحلیل بر روی هندسه ی کامل این مدل، در نظر گرفتن ماتریس بتنی انتهای نمونه تاثیری بر منحنی نیرو-تغییر مکان ندارد.



شکل ۵-۹ هندسه ایاف و ماتریس مدل سازی شده در نرم افزار ANSYS

همانگونه که در شکل ۵-۹ مشاهده می‌شود قسمت سبز رنگ، الیاف و قسمت بنفش رنگ نشان‌دهنده‌ی ماتریس بتنی مدل‌سازی شده می‌باشد.

۵-۸-۳- داده های ورودی اجزاء محدود

۵-۸-۳-۱- ماتریس بتنی

همانگونه که اشاره شد به منظور شبیه‌سازی خصوصیات بتنی از دو مدل بتنی استفاده شده است.

الف - ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic):

رفتار بتن در ناحیه‌ی خطی به وسیله‌ی مدول الاستیسیته و ضریب پواسون توصیف می‌گردند. مقدار مدول الاستیسیته و ضریب پواسون به ترتیب ۴۱ گیگا پاسکال و ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

ب - ایزوتروپیک چند خطی (Multi Linear Isotropic Hardening Plasticity):

تخصیص منحنی تنش-کرنش بتن به منظور تعریف رفتار غیرخطی آن، از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود است. معادله رفتاری تنش بر حسب کرنش بتن را می‌توان با استفاده از مدل ریاضی هاگنستاد به صورت زیر بیان نمود.

$$f = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad ۱-۵$$

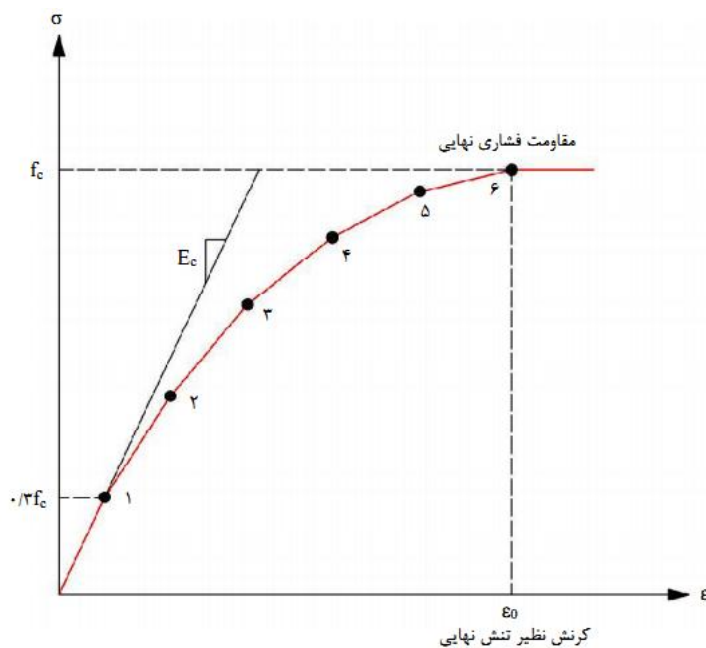
$$\varepsilon_0 = 1.8 \frac{f_c}{E_c} \quad ۲-۵$$

$$E_c = \frac{f}{\varepsilon} \quad ۳-۵$$

که در این روابط f تنش در هر نقطه، ε_c کرنش در هر نقطه و ε_0 کرنش در مقاومت فشاری نهایی می‌باشند.

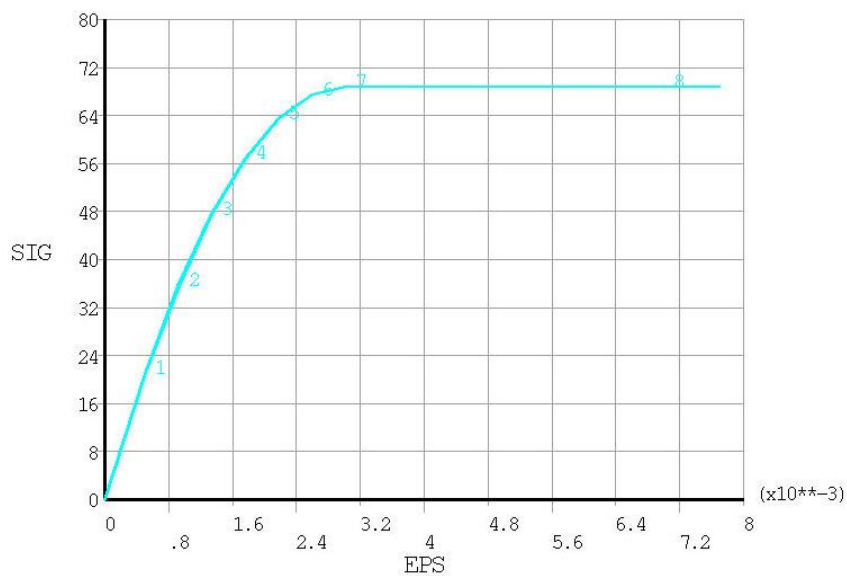
می‌بایست به این نکته توجه کرد که مدول الاستیسیته اولیه مماسی در این مدل، با مدول الاستیسیته مربوط به رفتار خطی در مدل رفتاری ایزوتروپیک خطی برابر باشد. در غیر اینصورت در زمان تحلیل مسأله با پیغام خطا مواجه خواهیم شد. بدین منظور همانگونه که در شکل ۵-۱۰ مشاهده می‌شود، مقدار تنش در نقطه شماره یک برابر $0.3f_c$ می‌باشد.

با قرار دادن این مقدار در معادله ۳-۴ که نشان دهنده‌ی رابطه‌ی تنش و کرنش بتن در ناحیه خطی است، کرنش این نقطه را می‌توان محاسبه نمود.



شکل ۵-۱۰ مدل رفتاری تنش-کرنش بتن

برای بدست آوردن سایر نقاط نمودار می‌توان از معادله‌ی ۱-۴ استفاده کرد. مقدار ϵ_0 به کار رفته در این معادله نیز از رابطه‌ی ۲-۴ بدست خواهد آمد. شکل ۵-۱۱ نشان دهنده‌ی منحنی تنش-کرنش بتن که برای نرم افزار تعریف شده می‌باشد.



شکل ۵-۱۱ منحنی تنش-کرنش تعریف شده برای نرم‌افزار

همانگونه که اشاره شد مدل رفتاری ایزوتروپیک چند خطی قادر به بیان رفتار نرم شدگی کرنشی نمی‌باشد. به همین علت انتهای منحنی با خطی با شیب صفر تقریب زده شده است.

۵-۸-۳-۲- داده های ورودی الیاف

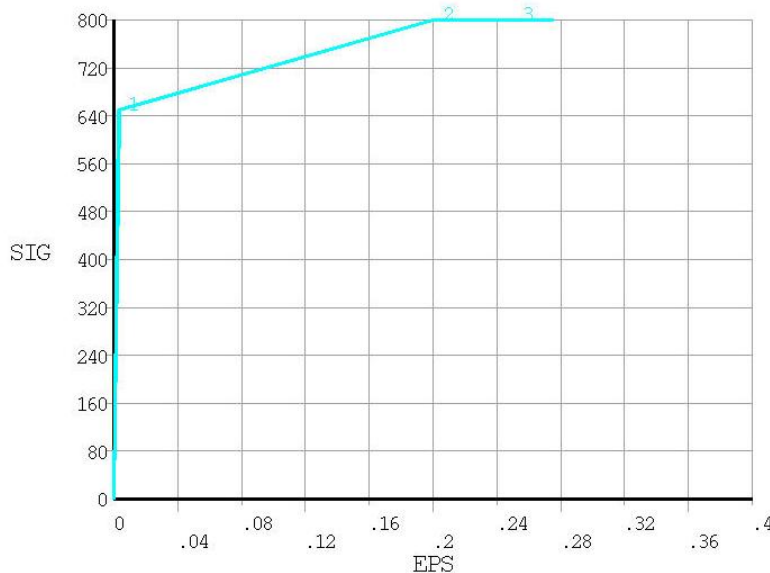
تعریف خصوصیات الیاف از طریق دو مدل رفتاری زیر انجام می شود:

الف- ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic):

مدول الاستیسیته و ضریب پواسون الیاف فلزی به ترتیب ۲۱۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ می باشند.

ب- ایزوتروپیک چندخطی (Multi Linear Isotropic Hardening Plasticity):

تنش تسلیم الیاف فلزی ۶۵۰ مگاپاسکال بوده که با تقسیم این عدد بر مدول الاستیسیته کرنش نظیر جاری شدن آن نیز بدست خواهد آمد. علاوه بر این کرنش نهایی و تنش نهایی الیاف نیز به ترتیب ۰/۲ و ۸۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. شکل ۵-۱۲ نشان دهنده منحنی تنش-کرنش وارد شده در نرم افزار می‌باشد.



شکل ۵-۱۲ منحنی تنش-کرنش الیاف

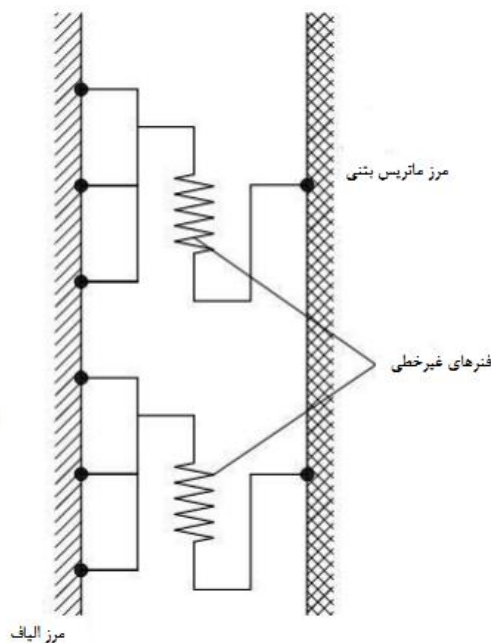
۵-۸-۳-۳- داده های ورودی سطح مشترک الیاف و ماتریس بتنی (Interface)

همانگونه که اشاره شد، در حین بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس، نیرو از طریق سطح مشترک الیاف انتقال می‌یابد. در ابتدای بارگذاری، انتقال نیرو به وسیله تنش‌های برشی پیوستگی انجام شده

و سپس توسط تنش‌های اصطکاکی بوجود آمده در این ناحیه صورت می‌گیرد. با توجه به تفاوت ماهیت این دو مکانیزم، هر یک بصورت جداگانه و بوسیله‌ی اعمال المان‌های متفاوت در نظر گرفته شده است.

الف - مکانیزم پیوستگی الیاف و ماتریس بتنی

در مراحل اولیه بارگذاری نیرو از طریق پیوستگی موجود بین الیاف و ماتریس بتنی انتقال می‌یابد که در همین حین اصطکاک نیز در انتقال نیرو موثر است. مکانیزم پیوستگی توسط قراردادن المان‌هایی در سطح مشترک الیاف و ماتریس بتنی در نظر گرفته می‌شود. این المان‌ها در حقیقت فنرهایی هستند که قابلیت پذیرش رفتار غیرخطی را دارند. نقطه ابتدایی این المان‌ها به الیاف متصل می‌شود. با توجه به تفاوت تراکم شبکه در الیاف و ماتریس بتنی، نقطه انتهایی این المان‌ها به نزدیکترین نقطه در روی ماتریس بتنی متصل شده است. شکل ۵-۱۳ نحوه اتصال این المان‌ها را نشان می‌دهد. رفتار غیرخطی این المان‌ها می‌بایست به وسیله انجام آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف مستقیم فلزی تعیین شود.

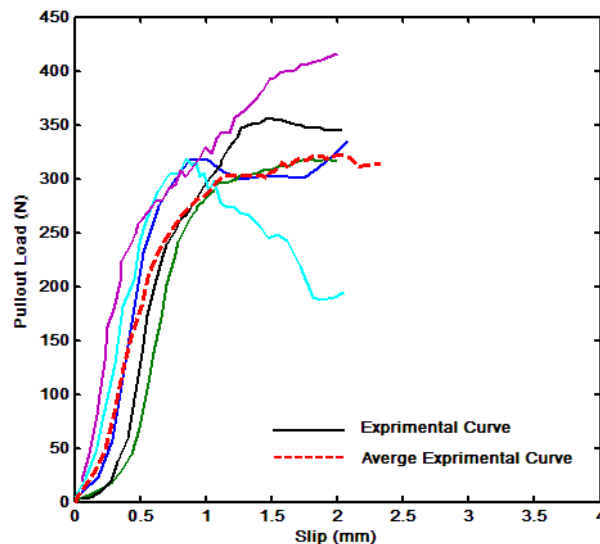


شکل ۵-۱۳ نحوه اتصال المان‌ها به ماتریس بتنی

الیاف مستقیم فلزی در حقیقت همان الیاف قلاب‌دار بوده که انتهای قلاب‌دار آن حذف گردیده است. با تعیین تنش برشی بر روی سطح الیاف در حین بیرون کشیده شدن، می‌توان رفتار غیرخطی این ناحیه را تخمین زد. علاوه بر این فرض می‌شود که تنش برشی به‌طور نسبتاً یکنواخت بر روی این سطح توزیع شده است.

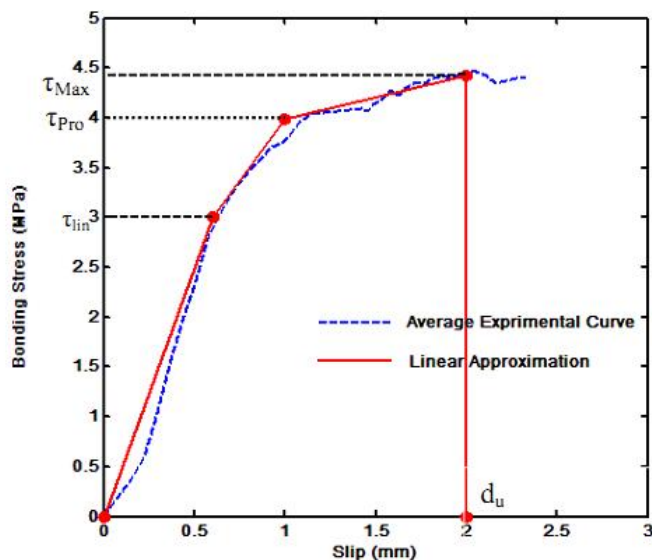
چیدمان این آزمایش در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است. با انجام آزمایش بیرون کشیده شدن، منحنی نیرو- لغزش این الیاف بدست خواهد آمد. با تقسیم نیروی بیرون کشیدگی بر طول الیاف در حین آزمایش و فرض توزیع یکنواخت تنش بر روی سطح مشترک الیاف و ماتریس، می‌توان تنش‌های پیوستگی را محاسبه نمود. شکل ۵-۱۴ منحنی نیرو-لغزش الیاف مستقیم را نشان می‌دهد.

منحنی تنش‌های پیوستگی بر حسب میزان لغزش الیاف در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است. این شکل نشان دهنده منحنی است که از آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف مستقیم بدست آمده است. محور افقی نمودار تغییرمکان نسبی ایجاد شده در سطح مشترک الیاف و محور قائم تنش برشی پیوستگی را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۴ منحنی نیرو-لغزش بیرون کشیدگی الیاف مستقیم

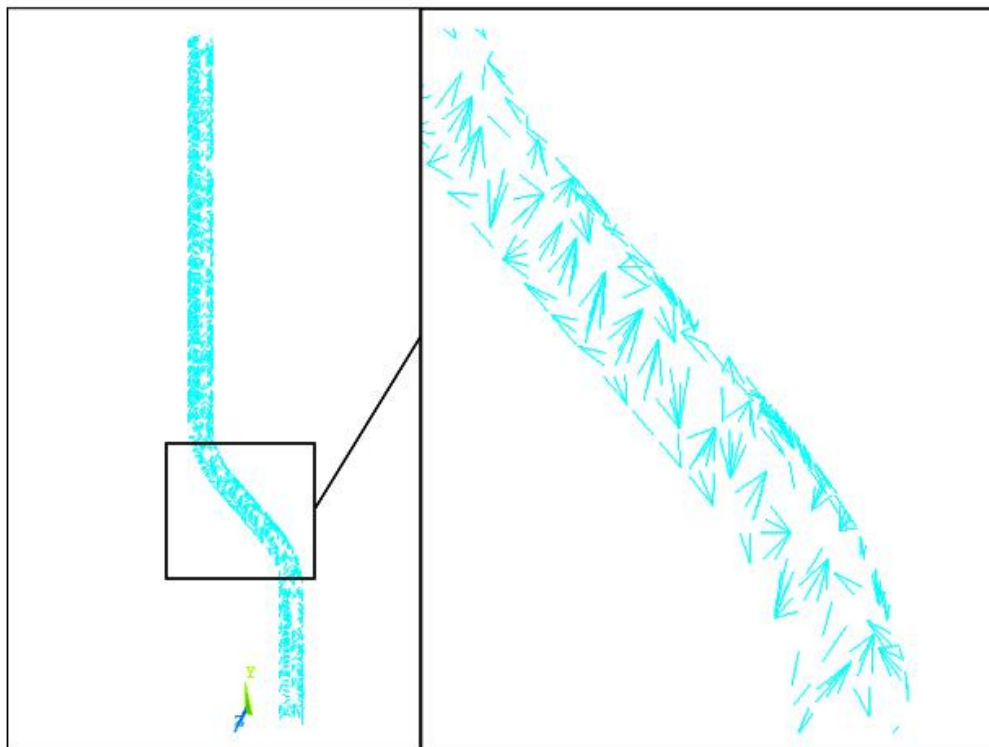
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، رفتار غیرخطی سطح مشترک الیاف و ماتریس به کمک تقریب خطی تخمین زده شده است. استفاده از تقریب خطی امکان اعمال این رفتار غیرخطی به المان‌ها را بوجود می‌آورد.



شکل ۵-۱۵ نمودار تنش برشی پیوستگی

رفتار غیرخطی این ناحیه به وسیله τ_{lin} و τ_{max} و τ_{Pro} تخمین زده می شود. همانگونه که در شکل ملاحظه می شود، قسمت ابتدایی نمودار تا رسیدن به مقدار τ_{lin} خطی می باشد. سپس هم زمان با کاهش سختی مقدار تنش پیوستگی به حداکثر خود (τ_{Pro}) می رسد. در این مرحله با افزایش تغییرمکان مقدار تنش تغییر چندانی نکرده و به مقدار τ_{max} می رسد. با رسیدن تغییرمکان به مقدار حداکثر خود، پیوستگی موجود بین الیاف و ماتریس از بین رفته و مقاومت این ناحیه از بین می رود.

شبیه سازی این رفتار به وسیله المان $Combin39$ انجام شده است. این المان ها از رفتار غیرخطی توصیف شده پیروی می کنند. هندسه و خصوصیات المان ها می بایست از طریق یک فرآیند مناسب به وجود آید. شکل ۵-۱۶ نشان دهنده المان های ایجاد شده در سطح مشترک الیاف و ماتریس می باشد.



شکل ۵-۱۶ المان‌های Combin39 در سطح مشترک ماتریس و الیاف

رفتار غیرخطی المان Combin39 از طریق وارد نمودن منحنی نیرو-تغییر مکان تعریف می‌گردد. در حالی که رفتار سطح مشترک الیاف و ماتریس برحسب تنش و تغییر مکان می‌باشد. به منظور تعیین رفتار غیرخطی این المان‌ها ابتدا می‌بایست منحنی تنش-تغییر مکان به منحنی نیرو-تغییر مکان تبدیل شده و سپس داده‌های منحنی نیرو-تغییر مکان به عنوان ثوابت حقیقی (Real Constant) این المان‌ها تعریف گردند.

ب- تماس و اصطکاک بین الیاف و ماتریس بتنی

مکانیزم دوم شامل تنش‌های ناشی از تماس و اصطکاک بین الیاف و ماتریس می‌باشد. این مکانیزم به دلیل تماس و درگیر بودن الیاف و ماتریس بتنی به وجود می‌آید. به منظور در نظر گرفتن این مکانیزم از المان‌های تماس (Contact) که قابلیت مدل‌سازی تماس و اصطکاک بین دو جسم را دارند، استفاده شده است. تعریف این المان‌ها در نواحی انجام می‌شود که در آن احتمال وقوع تماس بین الیاف و ماتریس وجود داشته باشد. المان‌های Conta174 و Target170 بدین منظور بکار می‌روند.

برای تعریف تماس بین دو جسم دو روش متفاوت وجود دارد:

۱- تماس متقارن (Symmetric Contact) :

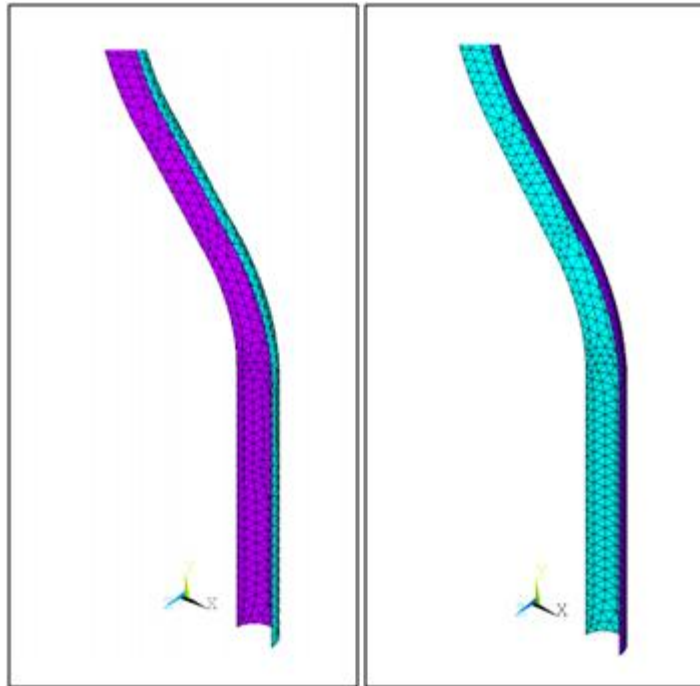
در این وضعیت المان‌های Contact و Target بر روی هر دو سطح تماس قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر هر یک از سطوح تماس نقش المان‌های Contact و Target را تماماً ایفا خواهد کرد.

۲- تماس نامتقارن (Asymmetric Contact) :

در صورت تعریف المان‌های Contact بر روی یکی از سطوح تماس و المان‌های Target بر روی سطح دیگر، تماس از نوع نامتقارن خواهد بود.

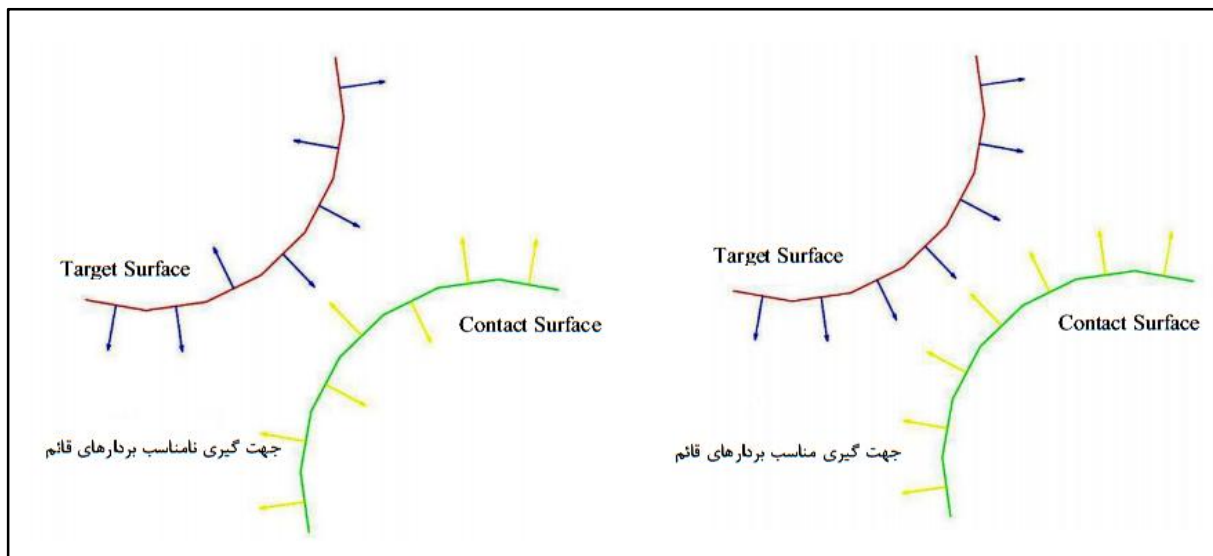
در اکثر موارد تعریف تماس نامتقارن موثرتر واقع می‌شود. استفاده از تماس متقارن در مواردی انجام می‌شود که تشخیص و انتخاب سطوح Contact و Target مشکل بوده و یا میزان نفوذ دو جسم زیاد باشد. علاوه بر این استفاده از تماس متقارن باعث افزایش زمان حل مسأله می‌گردد.

در مدل‌سازی انجام شده از روش تماس نامتقارن استفاده شده است. بدین منظور بر روی سطح الیاف المان Contact¹⁷⁴ و بر روی سطح ماتریس (در مجرای ایجاد شده به وسیله ی الیاف) المان Target¹⁷⁰ تعریف می‌شود. انتخاب سطوح برای تخصیص المان‌های Contact و Target به عواملی مانند تراکم شبکه سطوح، تحدب و تقعر سطوح و مدول الاستیسیته مصالح بستگی دارد. شکل ۵-۱۷ نشان دهنده بخشی از المان‌های Contact و Target به وجود آمده در سطح مشترک الیاف و ماتریس می‌باشد. همراه با تعریف المان‌های Contact و Target، برای هر یک از این المان‌ها یک بردار قائم بر سطح تعریف می‌گردد. جهت‌گیری این بردارها، از نکات حائز اهمیت در مسائل تماسی می‌باشد.



شکل ۱۷-۵ المان‌های Contact و Target

پس از تعریف المان‌های Contact و Target می‌بایست جهت بردارهای قائم کنترل گردد. جهت‌گیری این بردارها در المان‌های Contact باید به نحوی باشد که این بردارها به سمت المان‌های Target قرار گیرند. در المان‌های Target نیز جهت این بردارها باید به سمت المان‌های Contact باشد. شکل ۱۸-۵ نشان‌دهنده نحوه جهت‌گیری مناسب و نامناسب این بردارها است.



شکل ۱۸-۵ جهت‌گیری مناسب بردارهای قائم المان‌های Contact و Target

غالبا تحلیل تماس دو جسم با بروز مشکلاتی در هم‌گرایی مسأله همراه است. تعریف صحیح ثوابت حقیقی (Real Constant) و گزینه‌های المان (KEYOPT) باعث بهبود رفتار تماس دو جسم و همچنین هم‌گرایی آسان‌تر مسأله می‌گردد. نرم افزار ANSYS با تعریف ثوابت حقیقی زیر این امکان را فراهم می‌سازد.

FKN: در صورت استفاده از روش های Augmented Lagrangian و Penalty، المان‌های Contact نیاز به تعیین سختی در راستاهای عمودی و مماسی خواهند داشت. میزان نفوذ المان‌های Contact به داخل المان‌های Target و میزان لغزش نسبی آن‌ها به مقادیر این سختی‌ها وابسته است. نرم افزار با توجه به مدول الاستیسیته و ضخامت المان‌های قرار گرفته در زیر المان‌های Contact، مقادیر سختی‌های عمودی و مماسی را محاسبه می‌نماید. پارامتر FKN ضریبی است که در سختی عمودی ضرب شده و امکان کنترل آن را فراهم می‌سازد. مقدار پیش فرض این ضریب یک بوده که برای بسیاری از مسائل مناسب می‌باشد. تعیین مقدار مناسب برای این ضریب از طریق سعی و خطا و کنترل نتایج و روند همگرایی مسأله می‌باشد.

FTOLN: ضریبی است که نرم افزار با استفاده از آن و براساس ضخامت المان‌های قرار گرفته در زیر المان‌های Contact، حداکثر مقدار مجاز نفوذ دو جسم را محاسبه می‌نماید.

ICONT: به کمک این ضریب می‌توان وضعیت دو جسم (نفوذ یا فاصله ی اولیه) در ابتدای فرآیند تحلیل را تعدیل نمود.

PINB: نرم افزار به منظور تعیین وضعیت تماس دو جسم، فاصله ی نقاط انتگرال‌گیری المان‌های Contact از سطح المان‌های Target را با یک فاصله ی مرجع مقایسه می‌نماید. فاصله ی مرجع را می‌توان با استفاده از این پارامتر کنترل نمود.

PMAX و PMIN: به کمک این پارامتر می‌توان حداکثر و حداقل نفوذ دو جسم در ابتدای تحلیل مسأله را تعیین نمود.

TAUMAX: حداکثر مقدار تنش‌های اصطکاکی را می‌توان با استفاده از این ثابت حقیقی محدود نمود.

FKT: ضریب سختی مماسی که همانند FKN عمل کرده و در راستاهای مماسی میزان لغزش نسبی را کنترل می‌نماید.

COHE: این پارامتر از جنس تنش بوده و مقاومت چسبندگی دو سطح را می‌توان از این طریق تعریف نمود. جدول ۵-۱ نشان دهنده مقادیر ثوابت حقیقی پیشنهاد شده در این مدل‌سازی می‌باشد.

جدول ۵-۱ مقادیر پیشنهادی ثوابت حقیقی برای المان CONTA174

مقادیر پیشنهادی	Real Constant (CONTA174)
۰/۰۵	FKN
۰/۱	FTOLN
۰	ICONT
Default	PINB
۰	PMAX
۰	PMIN
۱e+۲۰	TAUMAX
۱	FKT
۰	COHE

همانگونه که اشاره شد گزینه‌های المان (KEYOPT) نیز در رفتار و همگرایی مسأله تاثیر به سزایی دارد. بعضی از گزینه‌های المان به کار گرفته شده در این مدل‌سازی عبارتند از:

- (1) KEYOPT: درجات آزادی المان از این طریق تعریف می‌شود.
- (2) KEYOPT: الگوریتم به کار رفته در تحلیل تماس دو جسم به کمک این گزینه قابل تعریف است.
- (4) KEYOPT: تعیین موقعیت نقاط تشخیص وضعیت تماس از این طریق ممکن است.
- (5) KEYOPT: تنظیم فاصله سطوح تماس در ابتدای تحلیل مسأله توسط این گزینه اعمال می‌شود.
- (8) KEYOPT: نحوه ی تعریف تماس متقارن یا نامتقارن با این گزینه اعمال می‌شود.
- (9) KEYOPT: به کمک این گزینه می‌توان وضعیت تماس در ابتدای فرآیند تحلیل را تغییر داد.

(10) KEYOPT: با پیشرفت روند تحلیل و تغییر شکل المان‌ها، سختی آن‌ها نیز تغییر خواهد کرد. با

تنظیم این گزینه نحوه‌ی تعیین سختی در حین تحلیل را می‌توان اعمال نمود.

(12) KEYOPT: رفتار سطوح تماسی از این طریق قابل تعریف است.

جدول ۲-۵ نشان دهنده مقادیر در نظر گرفته شده برای هر یک از گزینه‌های فوق می‌باشد.

جدول ۲-۵ مقادیر پیشنهادی گزینه‌های المان CONTA174

KEYOPT	مقدار پیشنهادی	توضیحات
۱	۰	UX و UY و UZ
۲	۰	Augmented Lagrangian
۳	۰	Gauss Point
۵	۱	—
۸	۰	—
۹	۱	—
۱۰	۲	—
۱۲	۰	Standard

نرم افزار ANSYS با استفاده از اصل اصطکاک کولمب (Columb) رفتار اصطکاکی دو جسم و تنش‌های ناشی از آن را تعیین می‌نماید. یکی از پارامترهای مهم در این مدل‌سازی ضریب اصطکاک می‌باشد. در حین بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس، اصطکاک به وجود آمده بین سطح الیاف و ماتریس بتنی باعث خرابی سطح مجرای ایجاد شده به وسیله الیاف می‌گردد. حرکت الیاف در این مجرا باعث ایجاد سایش و کاهش ضریب اصطکاک می‌گردد. به منظور اعمال این رفتار از تابع نمایی زیر برای تعریف کاهش ضریب اصطکاک استفاده می‌نماییم. در این تابع ضریب اصطکاک تابعی از میزان لغزش (Slip) می‌باشد.

$$\mu = \mu_u(1 + (FACT - 1)e^{(-s)}) \quad ۴-۵$$

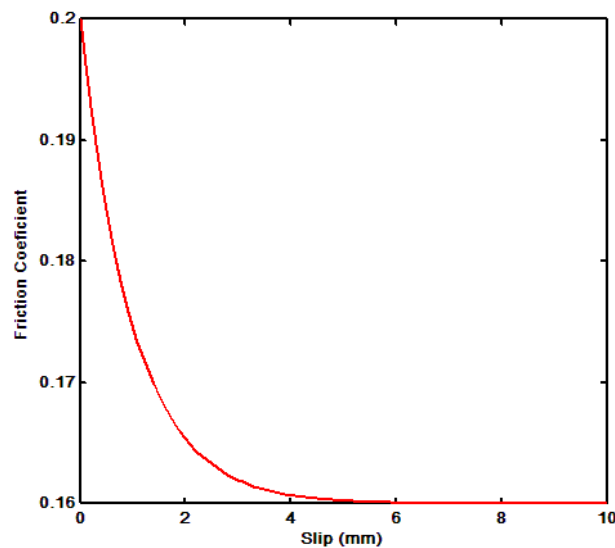
در رابطه ی فوق

μ_u : ضریب اصطکاک در انتهای آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف

FACT: نسبت ضریب اصطکاک اولیه به ضریب اصطکاک نهایی

S: میزان لغزش ایجاد شده در سطح الیاف و ماتریس

می باشند. مقدار ضریب اصطکاک اولیه و نهایی به ترتیب ۰/۲ و ۰/۱۶ لحاظ شده است. شکل ۵-۱۹ تغییرات ضریب اصطکاک را نشان می‌دهد که در آن محور عمودی مقدار ضریب اصطکاک و محور افقی لغزش می‌باشد.

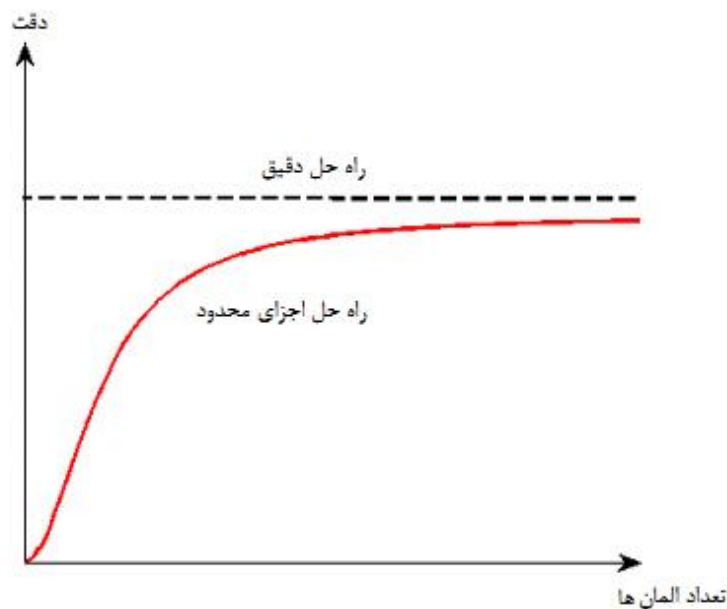


شکل ۵-۱۹ منحنی تغییرات ضریب اصطکاک

۵-۸-۴- شبکه بندی مدل

انتخاب تراکم شبکه از مهم‌ترین عوامل در مدل‌سازی به کمک روش اجزا محدود می‌باشد. زیرا یکی از پارامترهای مهم در همگرایی نتایج، انتخاب تعداد مناسب المان‌های مورد استفاده می‌باشد. شکل ۵-۲۰ نشان‌دهنده رابطه دقت نتایج حاصله از حل به روش اجزا محدود و تعداد المان‌های مورد استفاده در مدل‌سازی می‌باشد. از دیدگاه تئوری، افزایش تعداد المان‌ها، دقت روش اجزا محدود را افزایش می‌دهد. لیکن همانطور که از نمودار بر می‌آید ریز کردن شبکه بندی تا حد معینی مقرون به صرفه است. زیرا با افزایش تعداد المان‌ها شیب نمودار به سمت صفر میل می‌نماید. ابعاد شبکه بندی می‌بایست با توجه به همگرایی مسأله و میزان دقت مورد نظر انتخاب گردد.

نرم افزار ANSYS قابلیت‌های زیادی برای تولید انواع شبکه‌های مختلف دارد. این قابلیت‌ها این امکان را فراهم می‌سازد که با توجه به نیاز مسأله بتوان شبکه‌بندی را متناسب با شرایط مسأله انجام داد. با تعریف میزان تراکم شبکه در قسمت‌های مختلف می‌توان شبکه‌بندی مدل را به گونه‌ای انجام داد که سرعت همگرایی، مدت زمان حل مسأله و دقت نتایج متناسب باشد. میزان تراکم شبکه در هر قسمت از مدل با توجه به تغییرات تنش آن قسمت انجام شده و برای تعیین آن نیاز به درک و شناخت رفتار مسأله داریم. در مدل‌سازی انجام شده با توجه به وقوع کرنش‌ها و تغییرشکل‌های بزرگ در الیاف، می‌بایست شبکه‌بندی ریزتری در این ناحیه به کار برده شود. علاوه بر این، نحوه توزیع تنش‌های تماسی و اصطکاکی بین الیاف و ماتریس نیز به تراکم شبکه المان‌های Contact وابسته بوده و می‌بایست مدنظر قرار گیرد. شبکه‌بندی مدل در اشکال ۵-۲۱ و ۵-۲۲ نشان داده شده است.

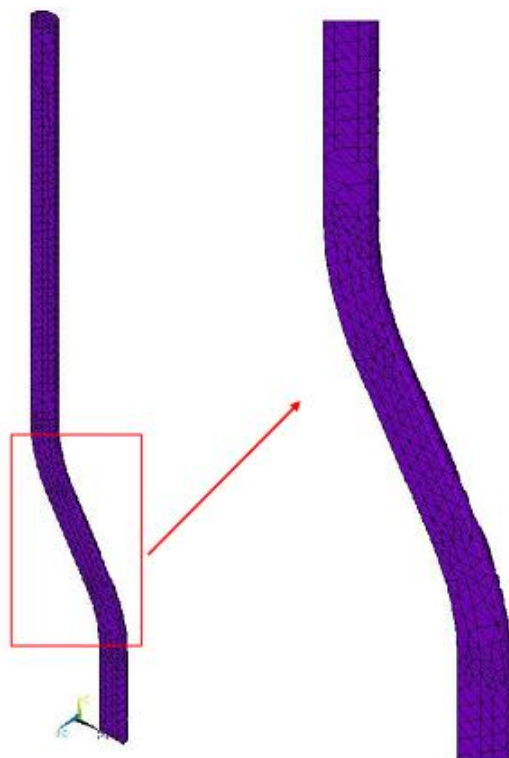


شکل ۵-۲۰ رابطه دقت حل اجزا محدود با تعداد المان‌ها

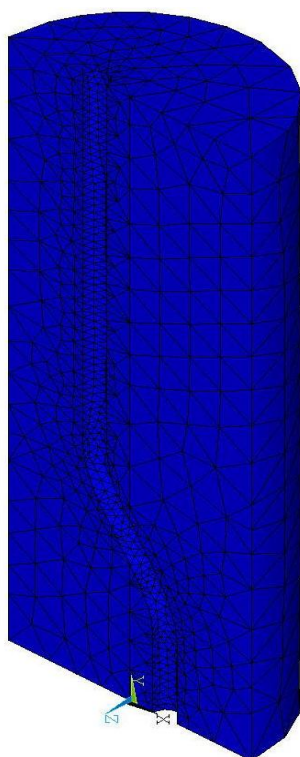
تعداد المان‌های ایجاد شده در مدل‌سازی در جدول ۵-۳ خلاصه شده است.
جدول ۵-۳ تعداد المان‌های به کار رفته در مدل‌سازی

اجزاء مدل	المان به کار رفته	تعداد المان‌ها
ماتریس بتنی	SOLID187	۸۲۱۱
الیاف	SOLID187	۲۶۴۲
سطح مشترک الیاف و ماتریس	CONTA174	۱۱۲۲
	TARGET170	۱۱۲۲
	COMBIN39	۵۰۹

با توجه به شبکه‌بندی، در مجموع ۱۳۴۵۰ المان و ۱۸۸۹۹ گره در این مدل سازی به کار رفته است.



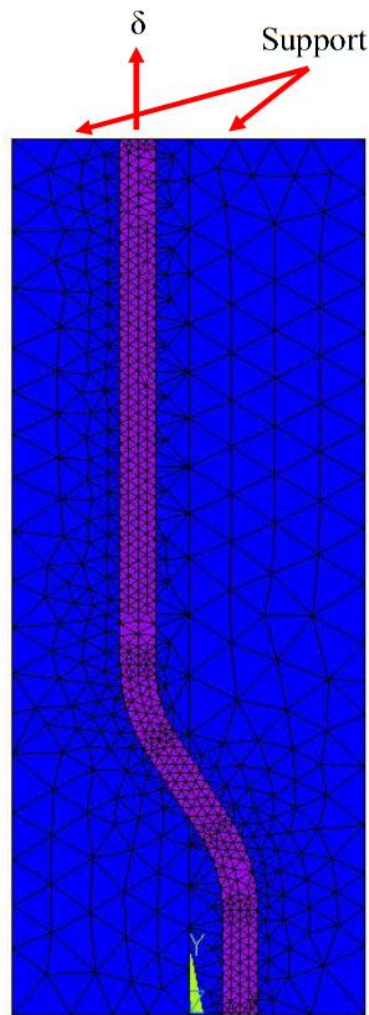
شکل ۲۱-۵ تراکم شبکه‌بندی الیاف



شکل ۲۲-۵ تراکم شبکه‌بندی ماتریس بتنی

۵-۸-۵- بارگذاری و شرایط تکیه گاهی

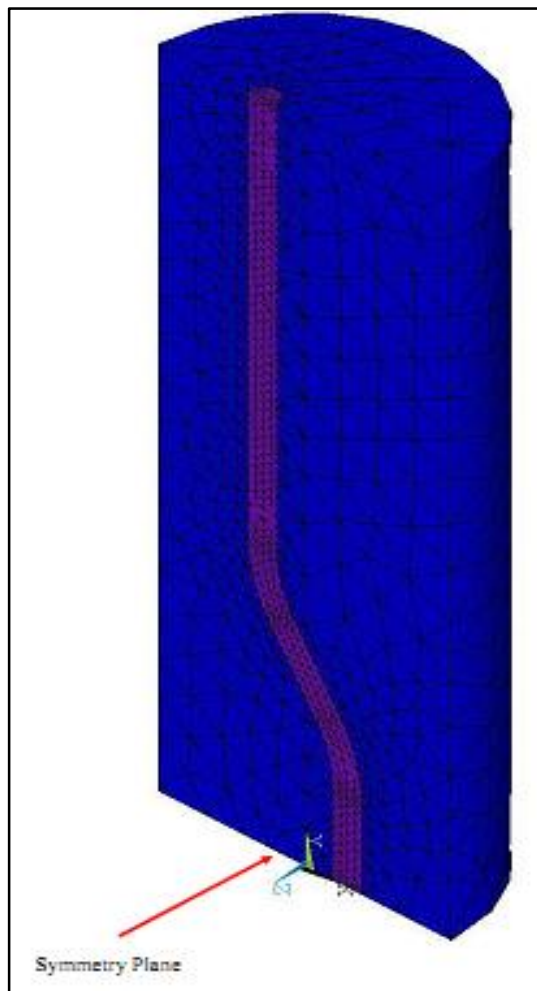
بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس بتنی همواره به روش کنترل تغییرمکان انجام می‌شود. البته استفاده از بارگذاری کنترل نیرو نیز امکان پذیر بوده، لیکن ثبت رفتار نزولی بیرون کشیده شدن الیاف از این طریق امکان پذیر نمی باشد.



شکل ۵-۲۳ محل تکیه‌گاه و اعمال بارگذاری

بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلاب‌دار به کمک نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی انجام شده است. در این تحقیق نوع بارگذاری در آزمایشگاه، کنترل تغییرمکان و در مدل‌سازی نیز کنترل تغییرمکان می‌باشد. به منظور بررسی رفتار کامل این الیاف، بارگذاری از نوع کنترل تغییرمکان در نظر گرفته شده است.

با توجه به شکل ۵-۲۳ قسمت انتهایی ماتریس به عنوان تکیه‌گاه در نظر گرفته شده و تمامی گره‌های موجود در این ناحیه در تمامی جهات (UX,UY,UZ) مقید شده‌اند. قسمت بالایی الیاف محل بارگذاری نمونه بوده و تغییر مکان اجباری در جهت Y به گره‌های این ناحیه اعمال شده است. به منظور اعمال شرایط تکیه‌گاهی ناشی از تقارن، کلیه گره‌های موجود در صفحه X-Y در جهات مناسب (UZ,ROTX,ROTY) مقید شده‌اند. شکل ۵-۲۴ صفحه اعمال شرایط تکیه‌گاهی ناشی از تقارن را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۴ صفحه اعمال شرایط تکیه‌گاهی تقارن

۵-۸-۶- روش تحلیل

همانگونه که اشاره شد، در تحلیل‌های غیرخطی کل بار خارجی تحت عنوان گام بارگذاری و زیرگام بارگذاری بر سازه وارد می‌شود. روش‌های گوناگونی برای حل دستگاه معادلات غیر خطی وجود داشته

که از آن جمله می‌توان به روش تکراری نیوتن-رافسون اشاره کرد. نرم افزار ANSYS نیز در تحلیل‌های غیر خطی از این روش استفاده می‌نماید. در روش مذکور تحلیل غیرخطی با مجموعه‌ای از تحلیل‌های خطی صورت می‌گیرد. هر گام تحلیل، یک گام تکراری بوده و تا زمان هم‌گرایی مسأله ادامه می‌یابد.

تحلیل مدل مد نظر به روش تحلیل غیر خطی استاتیکی انجام شده است. با توجه به وجود المان‌های Contact در رفتار اصطکاکی آن‌ها، نرم افزار ANSYS استفاده از ماتریس سختی نامتقارن را توصیه می‌نماید. در این حالت ماتریس سختی در هر تکرار معادلات تعادل مجدداً بازسازی می‌شود. استفاده از الگوریتم‌های گام زمانی خودکار (Automatic Time Stepping) و جستجوی خط (Line Search) در همگرایی تحلیل غیرخطی نقش بسزایی دارد.

در حل مسائل غیرخطی باید به موارد زیر توجه شود:

۱- شبکه‌بندی مدل با دقت انجام شود. المان‌های با اخطارهای مربوط به شکل المان، می‌تواند منجر به واگرایی در یک مسأله غیرخطی شود. هرچند که وجود این المان‌ها همواره باعث بروز مشکل در همگرایی نمی‌گردد.

۲- تعداد زیرگام‌ها یا نمونه‌های بار، متناسب با شرایط مسأله انتخاب شود.

۳- در صورت وجود المان‌های Contact، سختی این المان‌ها به درستی انتخاب شود.

برای تحلیل، معیار همگرایی نیرو مورد استفاده قرار گرفت. حدود انحراف (تولرانس)، همان مقادیر پیش فرض ANSYS یعنی ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شده است.

۵-۸-۷- نتایج بدست آمده از تحلیل اجزای محدود و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی موجود

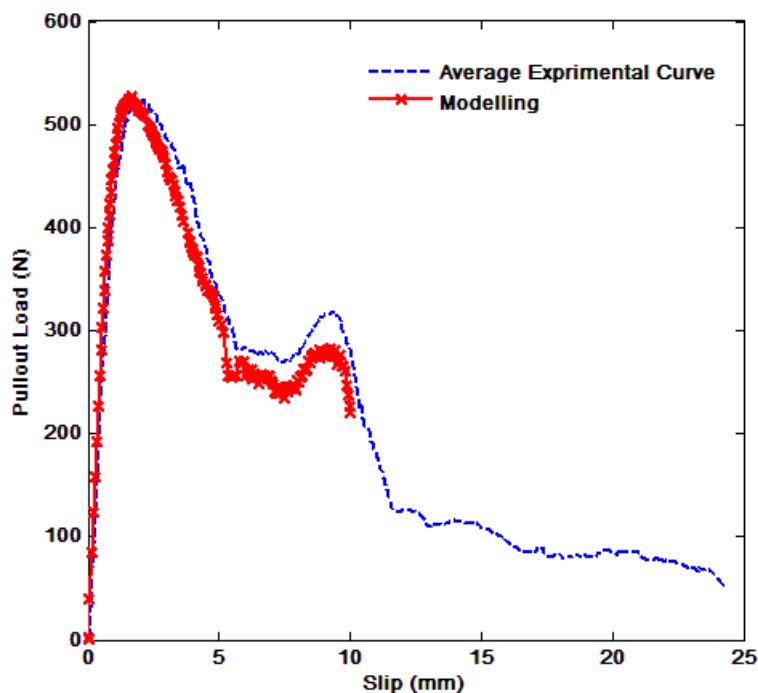
رفتار بیرون کشیده شدن الیاف اغلب بوسیله منحنی نیرو-لغزش (Force-Slip) حاصله بررسی می‌شود. ذکر موارد زیر در مورد مدل‌سازی، تحلیل و استخراج خروجی این مدل حائز اهمیت است.

۱- بارگذاری مدل از نوع تغییرمکان بوده است.

۲- در نمودار آزمایشگاهی، لغزش (Slip) بوسیله جابه‌جایی سنج (LVDT) تعبیه شده در محل بیرون کشیده شدن الیاف، اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین لغزش در مدل اجزای محدود نیز بر مبنای تغییر مکان گره‌های بارگذاری شده در نظر گرفته می‌شود. نیروی لازم برای بیرون کشیده شدن الیاف نیز از مجموع واکنش‌های بوجود آمده در گره‌های اعمال تغییر مکان بدست می‌آید.

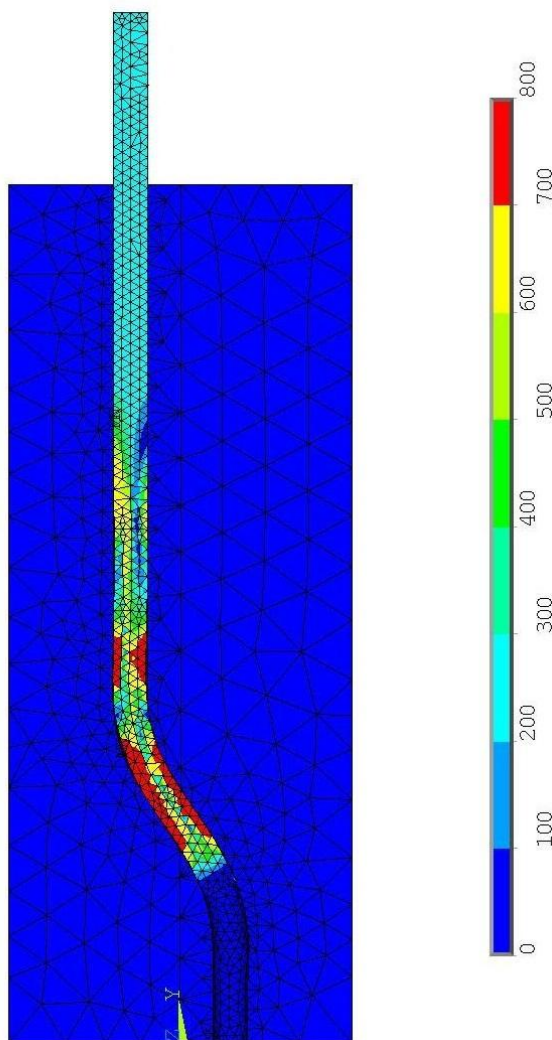
۳- جابه‌جایی اعمال شده ۱۰ میلی‌متر بوده که به‌طور تدریجی و با تعریف ۱۰۰۰ زیرگام بارگذاری، انجام می‌شود.

نمودار نیرو-لغزش حاصل از تحلیل اجزای محدود در شکل ۵-۲۵ آورده شده است.



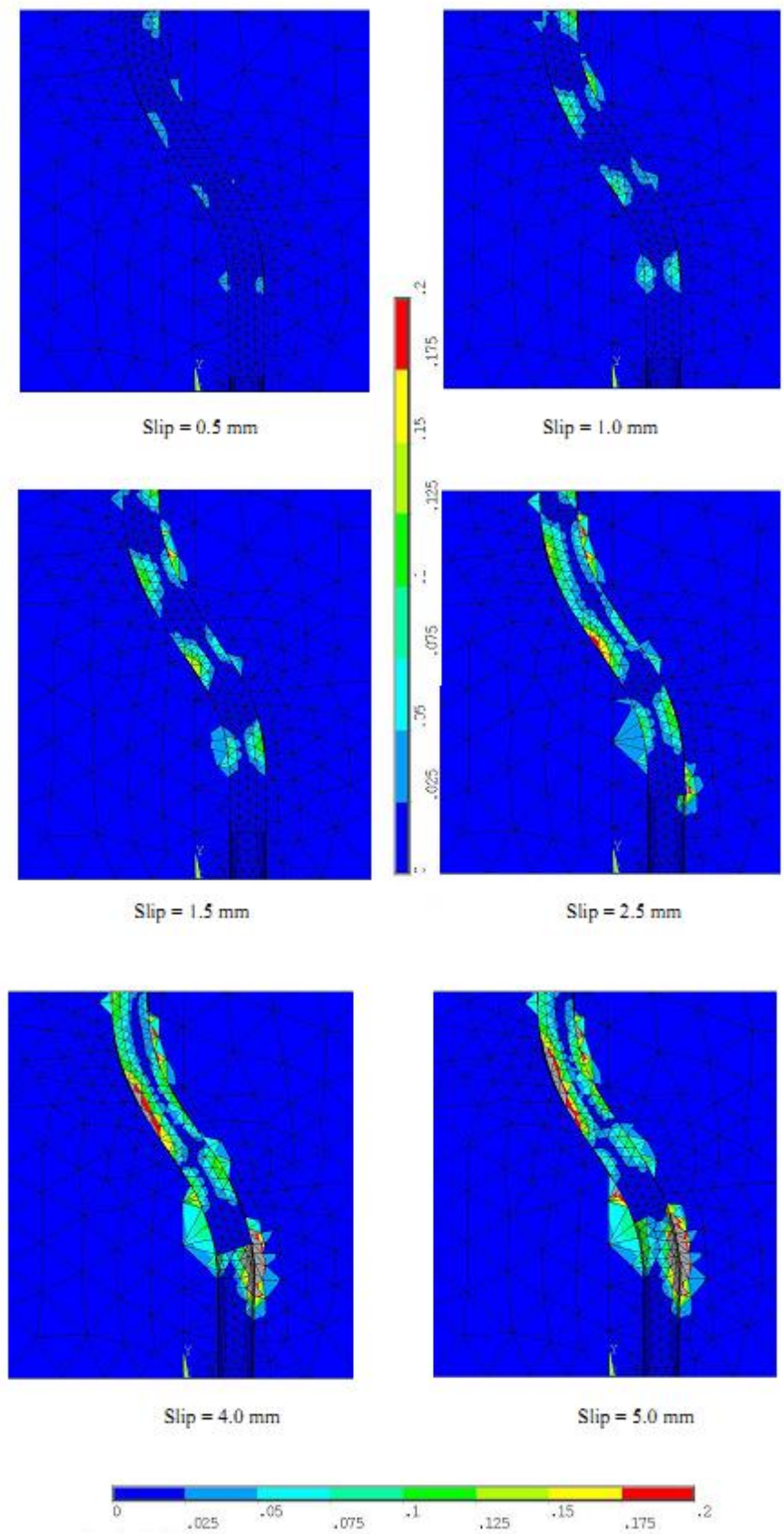
شکل ۵-۲۵ نمودار نیرو-لغزش حاصل از تحلیل اجزای محدود

در شکل ۵-۲۶ تغییر شکل الیاف در لغزشی برابر با ۵ میلی‌متر قابل مشاهده است. وجود قلاب در انتهای این الیاف با ایجاد مهار مکانیکی باعث افزایش نیروی لازم برای بیرون کشیدن آن می‌شود. در حین بیرون کشیده شدن الیاف، انحنای موجود در انتهای آن از طریق تشکیل مفصل پلاستیک از بین خواهد رفت. شکل ۵-۲۷ نشان‌دهنده کرنش‌های ایجاد شده در مراحل مختلف بارگذاری است. همانگونه مشاهده می‌شود، با افزایش تغییر مکان، مقادیر کرنش‌ها در محل انحنا افزایش یافته و مفصل پلاستیک تشکیل می‌گردد.



شکل ۵-۲۶ تغییر شکل الیاف در لغزش ۵ میلی‌متر

با توجه به حجم بالای مدل و رفتارهای غیر خطی موجود، مدت زمان تحلیل مسأله بسیار طولانی خواهد بود. نرم افزار ANSYS دارای قابلیت پردازش موازی (Parallel Processing) می‌باشد. این قابلیت امکان استفاده از چند پردازشگر به‌طور همزمان را فراهم می‌سازد. بدون استفاده از این قابلیت، مدت زمان تحلیل این مدل در حدود ۴۸ ساعت (با اعمال جابه‌جایی ۲ میلی‌متر) خواهد بود. در حالی که با استفاده از ۶ پردازشگر به‌طور همزمان، مدت زمان تحلیل را می‌توان به میزان یک هشتم تقلیل داد.



شکل ۵-۲۷ کرنش‌های پلاستیک در مراحل بارگذاری

فصل ششم

دستیابی به مصالح با رفتار

سخت شدگی تغییر مکانی

۶-۱- مقدمه

افزودن الیاف به ماتریس پایه سیمانی راه حلی مناسب جهت بهبود خصوصیات مکانیکی این مصالح می‌باشد. مصالح نهایی به عنوان مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف (FRCC) شناخته می‌شوند. این مصالح قابلیت بروز مقاومت و شکل‌پذیری بالاتری در مقایسه با ماتریس یا بتن‌های غیرمسلح دارند. عملکرد FRCC را می‌توان تا حدی بهبود بخشید، به نحوی که رفتار سخت‌شدگی کرنشی همراه با ایجاد ترک‌های متعدد را تحت خمش و پس از ایجاد اولین ترک، بروز دهد.

عملکرد FRCC به عوامل مختلفی نظیر خصوصیات ماتریس، نوع الیاف و هندسه آن‌ها، درصد حجمی بکار رفته و خصوصیات پیوستگی آن با ماتریس سیمانی وابسته است. در صورت ثابت در نظر گرفتن ماتریس، نوع و درصد حجمی الیاف و رفتار آن‌ها در حین بیرون کشیده شدن، مهم‌ترین عوامل در عملکرد FRCC می‌باشند. به کار بردن درصد حجمی کم‌تر الیاف و در عین حال دستیابی به رفتار سخت‌شدگی همواره از دیدگاه اقتصادی و اجرایی مورد توجه بوده است. بنابراین حداقل درصد حجمی الیاف برای دستیابی به رفتار سخت‌شدگی از اهمیت خاصی برخوردار است.

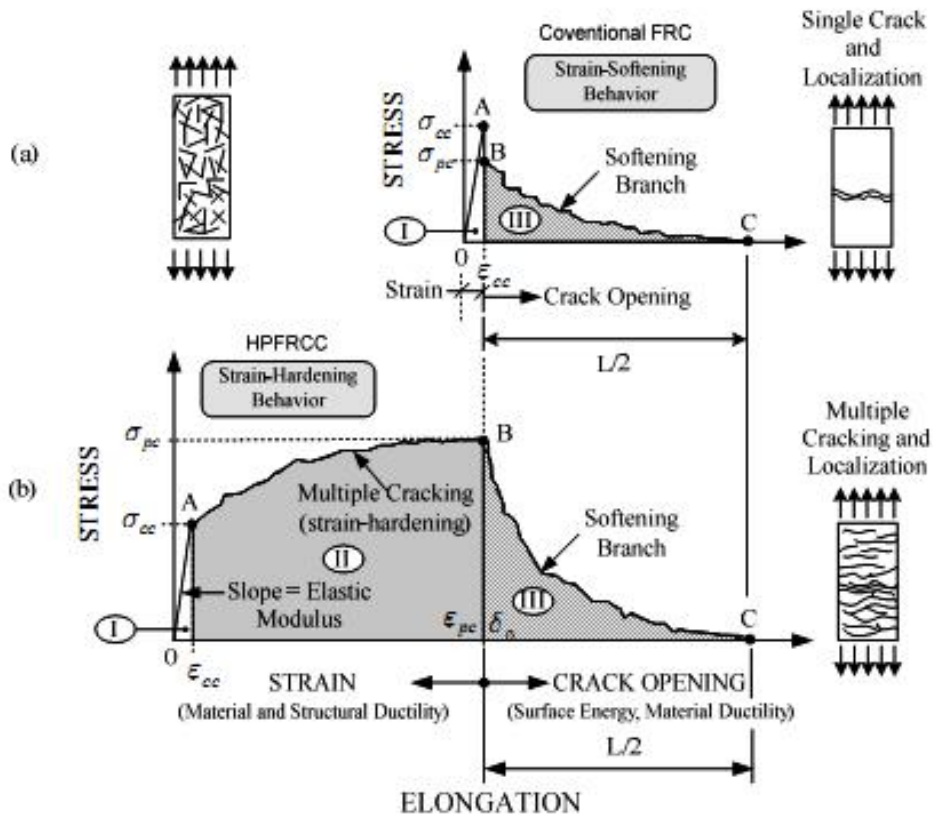
در این بخش تاثیر افزودن الیاف بر خصوصیات مکانیکی ماتریس پایه سیمانی شامل مقاومت فشاری و رفتار خمشی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. آزمایش و بررسی نتایج بر اساس استاندارد ASTM انجام خواهد شد. ابتدا با توجه به نتایج بدست آمده در فصل‌های قبل، درصد الیاف لازم برای دستیابی به رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی محاسبه شده و سپس خصوصیات مصالح با مقادیر مختلف الیاف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۶-۲- سخت‌شدگی کرنشی و تغییر مکانی مصالح پایه سیمانی مسلح به

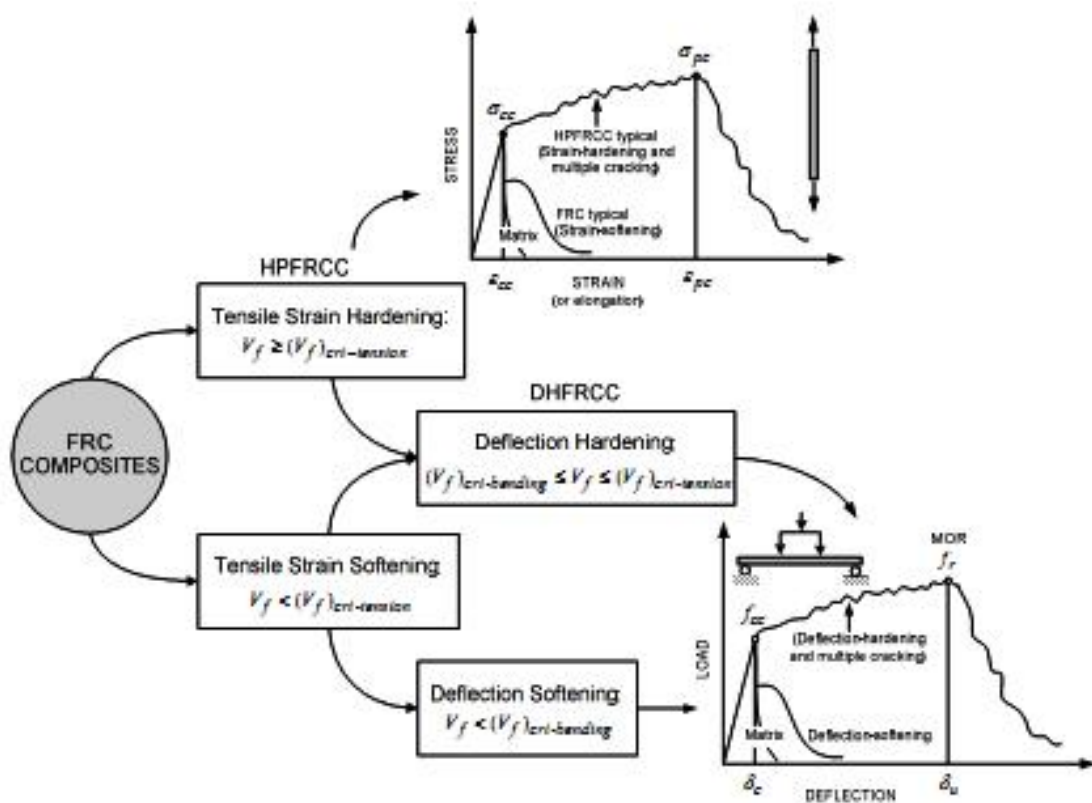
الیاف

مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف را می‌توان بر اساس خصوصیات متفاوتی دسته‌بندی نمود. مهم‌ترین وجه قابل تمایز این مصالح، رفتار آن تحت تنش‌های کششی می‌باشد. به عبارت دیگر بروز

رفتار سخت‌شدگی کرنشی و سخت‌شدگی تغییرمکانی تحت تنش‌های کششی به عنوان معیاری برای دسته‌بندی این مصالح در نظر گرفته می‌شود (شکل ۶-۱).



شکل ۶-۱ منحنی تنش-کرنش یا تنش-تغییرطول تحت بارهای کششی [۲۸]
 مفهوم سخت‌شدگی و نرم‌شدگی کرنشی در شکل ۶-۱ نشان داده شده است. بر اساس بروز این رفتار، مصالح پایه سیمانی را می‌توان به دو دسته مصالح پایه سیمانی متداول (بروز رفتار نرم‌شدگی کرنشی) و مصالح پایه سیمانی با عملکرد بالا (بروز رفتار سخت‌شدگی کرنشی) تقسیم نمود. علاوه بر این، رفتار مصالح تحت تنش‌های کششی ناشی از خمش نیز می‌تواند منجر به رفتار سخت‌شدگی یا نرم‌شدگی تغییرمکانی شود. شکل ۶-۲ با در نظر گرفتن این رفتار مصالح، دسته‌بندی جامع‌تری را در نظر می‌گیرد. همان‌گونه که در شکل ۶-۲ قابل مشاهده است، همواره مصالح دارای سخت‌شدگی کرنشی، سخت‌شدگی تغییرمکانی را نیز بروز خواهند داد. علاوه بر این، مصالح با رفتار نرم‌شدگی کرنشی می‌توانند رفتار سخت‌شدگی یا نرم‌شدگی تغییرمکانی، از خود نشان دهند.



شکل ۶-۲ دسته‌بندی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف بر اساس رفتار تحت بارهای کششی و رفتار خمشی [۲۸] پر واضح است که رفتار سخت‌شدگی تحت بارهای کششی و خمشی عملکرد مناسب‌تری را نسبت به رفتار نرم‌شدگی به همراه خواهد داشت. رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی در مواردی پراهمیت است که خمش در عضو مورد نظر غالب باشد. شکل ۶-۲ علاوه بر تشریح رفتار و دسته‌بندی مصالح، میزان درصد حجمی مورد نیاز الیاف برای دستیابی به رفتارهای سخت‌شدگی کرنشی و سخت‌شدگی تغییرمکانی را نشان می‌دهد.

۶-۳- درصد حجمی مورد نیاز الیاف برای دستیابی به رفتار سخت‌شدگی کرنشی

همان‌گونه که در فصل چهارم اشاره شد، برای دستیابی به رفتار سخت‌شدگی کرنشی و ایجاد ترک‌خوردگی‌های متعدد، می‌بایست مقاومت مصالح بعد از ترک خوردگی از مقاومت ایجاد اولین ترک بیشتر باشد.

$$\sigma_{pc} > \sigma_{cc}$$

۱-۶

این دو کمیت را می‌توان با استفاده از روابط پیشنهاد شده توسط Namaan محاسبه نمود [۲۸].

$$\sigma_{cc} = \sigma_{mu}(1 - V_f) + \alpha\tau_{eq}V_f\frac{L}{d} \quad 2-6$$

$$\sigma_{pc} = \lambda\tau_{eq}\frac{L}{d}V_f \quad 3-6$$

که در این روابط V_f درصد حجمی الیاف، L طول الیاف، d قطر الیاف، σ_{mu} مقاومت کششی ماتریس، τ_{eq} مقاومت پیوستگی معادل الیاف می‌باشند. α و λ ضرایبی هستند که دربرگیرنده طول الیاف در حین بیرون کشیده شدن، جهت‌گیری الیاف در ماتریس، خرابی ماتریس در حین بیرون کشیده شدن الیاف و غیره می‌باشند که در مورد الیاف فولادی به ترتیب 0.5 و 0.3 پیشنهاد می‌گردند. با توجه به روابط 1-6 و 2-6 و 3-6 می‌توان درصد حجم مورد نیاز الیاف به منظور رفتار سخت‌شدگی کرنشی را محاسبه نمود.

$$V_f \geq V_{f(Cri-Tension)} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_{eq}L}{\sigma_{mu}d}(\lambda - \alpha)} \quad 4-6$$

شکل 3-6 تغییرات درصد حجمی الیاف بر حسب نسبت ظاهری الیاف (L/d) را نشان می‌دهد. هر منحنی نشان دهنده نسبت مقاومت پیوستگی معادل به مقاومت کششی ماتریس می‌باشد.

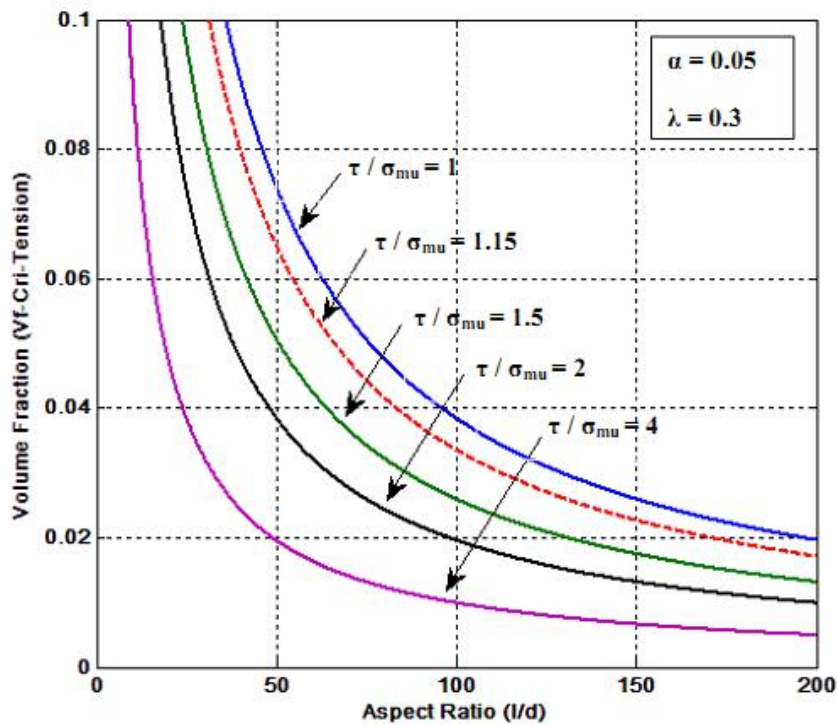
پیوستگی مدل این الیاف با توجه به نتایج آزمایش بیرون کشیده شدن، $5/26$ مگاپاسکال تخمین زده شده است. مقاومت کششی ماتریس‌های پایه سیمانی با عملکرد بالا را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی پیشنهاد شده توسط Pul محاسبه نمود [16].

$$f_t = 0.026f_c^{1.223} \quad 5-6$$

$$f_t = 0.026(68.8)^{1.223} \rightarrow f_t = \sigma_{mu} = 4.6 \text{ MPa} \quad 6-6$$

الیاف مورد استفاده در این تحقیق دارای طول 50 میلی‌متر و قطر 1 میلی‌متر می‌باشند. با توجه به مقاومت فشاری حاصله، مقدار مقاومت کششی ماتریس برابر با $4/6$ مگاپاسکال بدست می‌آید. بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{\tau_{eq}}{\sigma_{mu}} = 1.15 \quad 7-6$$



شکل ۶-۳ درصد حجمی الیاف مورد نیاز برای دستیابی به رفتار سخت‌شدگی کرنشی با توجه به شکل ۶-۳ درصد حجمی الیاف مورد نیاز در حدود ۶/۵ درصد بدست خواهد آمد.

$$V_{f(\text{Cri-Tension})} = \frac{1}{1+1.15 \times 50 \times (0.3-0.05)} \rightarrow V_{f(\text{Cri-Tension})} \approx 6.5\%$$

اضافه نمودن درصد حجمی الیاف بدست آمده، از نقطه نظر اجرایی و اقتصادی امکان‌پذیر نمی‌باشد. زیرا با افزودن این مقدار الیاف به ماتریس، کارایی به حدی افت می‌کند که بتن‌ریزی ممکن نمی‌باشد. با توجه به رابطه‌ی ۶-۴ می‌توان به اهمیت خصوصیات و رفتار الیاف در عملکرد نهایی مصالح پی برد. افزایش نسبت ظاهری الیاف و بروز رفتار سخت‌شدگی لغزشی در حین بیرون کشیده شدن از ماتریس، دستیابی به رفتار سخت‌شدگی کرنشی را آسان می‌نماید.

۶-۴- درصد الیاف مورد نیاز به منظور دستیابی به رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی

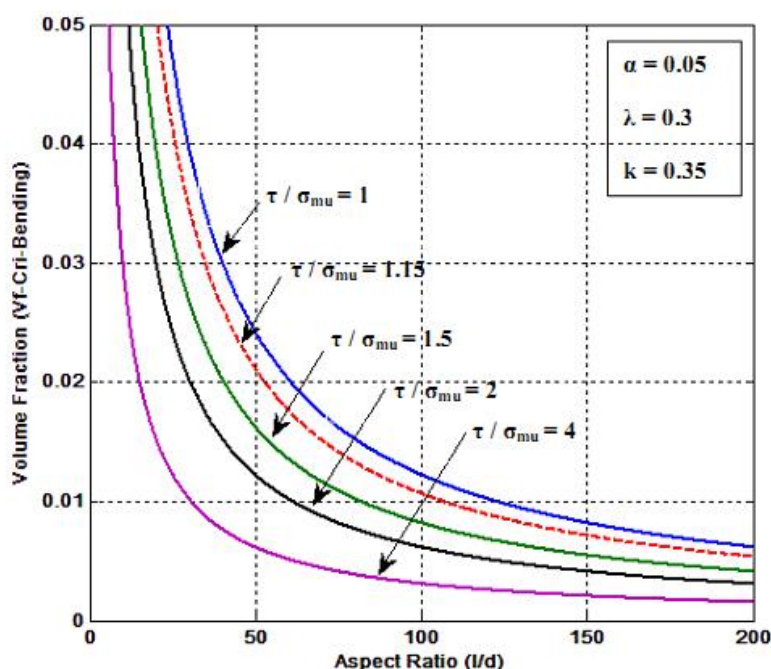
درصد الیاف مورد نیاز سخت‌شدگی تغییرمکانی را می‌توان مشابه رفتار سخت‌شدگی کرنشی محاسبه نمود. با این تفاوت که در این حالت، حداکثر مقدار تنش خمشی معادل بعد از ترک‌خوردگی می‌بایست از تنش نظیر اولین ترک خمشی بیشتر باشد. درصد الیاف مورد نیاز سخت‌شدگی تغییرمکانی را می‌توان بر اساس رابطه پیشنهادی توسط Namman محاسبه نمود [۲۸].

$$V_f \geq V_{f(\text{Cri-Bending})} = \frac{k}{k + \frac{\tau_{eq} L}{\sigma_{mu} d} (\lambda - k\alpha)} \quad 8-6$$

در رابطه‌ی فوق k ضریبی است کوچک‌تر از ۱ که مقدار آن در مورد الیاف فولادی ۰/۳۵ پیشنهاد می‌گردد. شکل ۴-۶ تغییرات درصد حجمی الیاف بر حسب نسبت ظاهری آن را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که با استفاده از الیاف فولادی با نسبت ظاهری ۵۰ تا ۱۰۰ و مقاومت پیوستگی مناسب $1-2 \approx \tau/\sigma$ می‌توان با استفاده از ۱ تا ۲ درصد الیاف به رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی دست یافت. کاربرد عملی این مقدار الیاف امکان‌پذیر بوده و از نظر اقتصادی نیز مناسب است. درصد الیاف مورد نیاز برای دستیابی به رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$V_{f(\text{Cri-Bending})} = \frac{0.35}{0.35 + 1.15 \times 50 \times (0.3 - 0.35 \times 0.05)} \rightarrow V_{f(\text{Cri-Bending})} \approx 2\%$$

بنابراین با افزودن ۲ درصد حجمی الیاف می‌توان انتظار رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی را داشت.



شکل ۴-۶ درصد حجمی الیاف مورد نیاز برای دستیابی به رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی

۶-۵- تشریح برنامه آزمایشگاهی

با توجه به مباحث ارائه شده در بخش قبل، درصد حجمی الیاف مورد نیاز برای دستیابی به رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی در حدود ۲ درصد می‌باشد. الیاف مورد استفاده، الیاف فولادی قلاب‌دار Durocem بوده که خصوصیات آن در جدول ۴-۴ ارائه شده است. بررسی رفتار خمشی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف از طریق انجام آزمایش خمشی بر روی نمونه‌های تیر به ابعاد $100 \times 100 \times 350$ میلی‌متر انجام گردیده است. در مجموع ۳ نمونه با ۱ درصد حجمی الیاف و ۳ نمونه با ۲ درصد حجمی الیاف ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. از این طریق می‌توان علاوه بر بررسی تاثیر درصد حجمی الیاف در رفتار سخت‌شدگی و رفتار نمونه‌ها با درصد‌های متفاوت الیاف را مقایسه نمود.

علاوه بر بررسی رفتار خمشی، تاثیر افزودن الیاف بر مقاومت فشاری نیز از طریق ساخت نمونه‌های استوانه‌ای 100×200 میلی‌متر بررسی شده است. بدین منظور نیز ۳ نمونه فشاری با ۱ درصد و ۳ نمونه با ۲ درصد حجمی الیاف ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در ادامه نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش و نتایج بدست آمده تشریح می‌گردند.

۶-۵-۱- مصالح و آماده‌سازی نمونه‌ها

مصالح به کار رفته در ساخت نمونه‌ها، سیمان، میکروسیلیس، سنگدانه، فوق‌روان کننده، آب و الیاف می‌باشند. خصوصیات الیاف (Durocem) و ماتریس سیمانی به ترتیب در جداول ۴-۴ و ۴-۸ و ۴-۹ ارائه شده است. به منظور آماده‌سازی مخلوط از مخلوط کن ELE استفاده شده است. ابتدا میکروسیلیس و سنگدانه به مدت ۲ دقیقه با یکدیگر مخلوط شده و سپس سیمان به آن اضافه می‌شود. سپس تمامی مصالح خشک به مدت ۲ دقیقه مخلوط می‌گردند. در مرحله بعد محلول ۷۰ درصد آب و فوق‌روان کننده اضافه گردیده و در پایان نیز ۳۰ درصد آب باقی مانده به مخلوط اضافه می‌شود. با رسیدن مخلوط به کارایی و همگنی مناسب، الیاف به آرامی و با دقت به مخلوط اضافه می‌شوند. پس از افزودن کامل الیاف و توزیع یکنواخت آن، مخلوط در داخل قالب‌های آغشته به روغن

جای داده می‌شود. تراکم مخلوط از طریق ارتعاش بوسیله میز لرزان انجام شده است. بدین منظور قالب‌ها به مدت کافی بر روی میز لرزان قرار داده شده تا تراکم مخلوط انجام شود. سپس سطوح نمونه‌ها پرداخت شده و درون محفظه‌های پلاستیکی قرار می‌گیرند. قالب‌ها بعد از مدت زمان ۲۰ الی ۲۴ ساعت باز شده و نمونه‌ها عمل‌آوری می‌گردند. عمل‌آوری نمونه‌ها با استفاده از آب داغ انجام شده و به تفصیل در فصل چهارم توضیح داده شده است. پس از طی دوره ۱۰ روزه‌ی عمل‌آوری، نمونه‌ها تحت آزمایش قرار می‌گیرند.

۶-۵-۲- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس ASTM C39 و بر روی نمونه‌های 100×200 میلی‌متر انجام شده است. همان‌گونه که اشاره شد، ۳ نمونه فشاری به ترتیب با ۱ و ۲ درصد حجمی الیاف ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. متوسط مقاومت فشاری ۳ نمونه به عنوان مقاومت فشاری مصالح در نظر گرفته می‌شود. سرعت بارگذاری نمونه‌ها همانند بارگذاری نمونه‌های ماتریس غیرمسلح، ۱ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد.

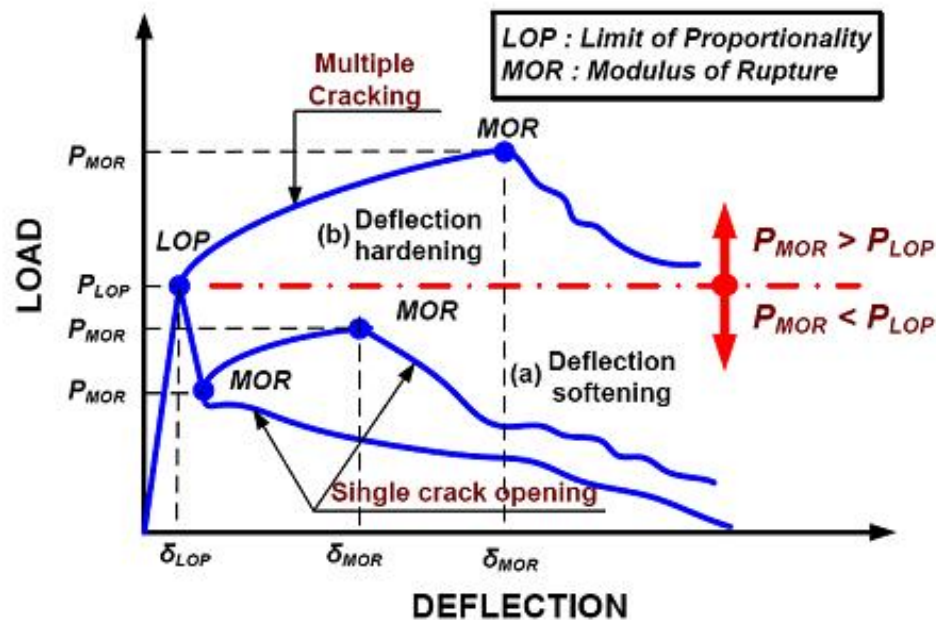
۶-۵-۳- آزمایش مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی بر اساس ASTM C1018 و ASTM C1609 انجام شده است. در این آزمایش نمونه‌های تیر $100 \times 100 \times 350$ میلی‌متر در نقاط یک سوم دهانه بارگذاری می‌گردند [۲۹] [۳۰]. سه نمونه با درصد های حجمی متفاوت ۱ و ۲ درصد مورد آزمایش قرار خواهند گرفت.

۶-۵-۳-۱- پارامترهای توصیف کننده رفتار خمشی

همان‌گونه که اشاره شد رفتار مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف را می‌توان به دو دسته سخت‌شدگی یا نرم‌شدگی تغییرمکانی دسته‌بندی نمود (شکل ۶-۵). مصالحی با رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی، بعد از ترک‌خوردگی ظرفیت باربری بیشتری را در مقایسه با بتن یا بتن الیافی معمولی دارند.

در تحقیق حاضر، نقطه نظیر ایجاد اولین ترک بر روی نمودار نیرو- تغییرمکان، نقطه‌ی شروع رفتار غیرخطی در نظر گرفته می‌شود. که بر اساس ASTM C1018 این نقطه حد تناسب یا LOP نامیده می‌شود [۲۹].



شکل ۶-۵ منحنی نیرو- تغییرمکان مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف [۱۵]

در حالی که استاندارد جدید ASTM C1609، نقطه‌ی ای با شیب صفر را به عنوان حد تناسب در نظر می‌گیرد. این تعریف برای مصالحی با رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی و ترک‌خوردگی‌های متعدد مناسب نمی‌باشد. زیرا در صورتی که مصالح رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی را بروز دهند، تعیین این نقطه براساس تعریف ASTM C1609 بسیار دشوار است. به همین دلیل و بر اساس ASTM C1018 حد تناسب به عنوان مقاومت نظیر اولین ترک‌خوردگی در نظر گرفته می‌شود. نیرو و تغییرمکان نظیر این نقطه به ترتیب P_{LOP} و δ_{LOP} نامیده می‌شوند. تنش ایجاد شده ناشی از نیروی P_{LOP} به عنوان مقاومت نظیر اولین ترک در نظر گرفته شده و با استفاده از رابطه ۶-۹ تعیین می‌گردد. سطح زیر منحنی نیرو- تغییرمکان تا نقطه‌ی حد تناسب، انرژی نظیر ایجاد اولین ترک یا $Tough_{LOP}$ در نظر گرفته می‌شود. بر اساس ASTM C1609 تنش در نقطه حد تناسب از رابطه ۶-۹ تعیین می‌شود.

$$f_{LOP} = P_{LOP} \frac{L}{bh^2}$$

که در این رابطه L طول دهانه و b و h به ترتیب عرض و ارتفاع مقطع تیر می‌باشند. مدول گسیختگی یا MOR نقطه‌ی شروع رفتار نرم‌شدگی و بعد از نقطه‌ی حد تناسب در نظر گرفته می‌شود (شکل ۶-۵). علاوه بر نقاط حد تناسب و مدول گسیختگی، ۶ نقطه‌ی دیگر بر روی منحنی نیرو تغییرمکان تعریف می‌شوند.

d_5 : نقطه‌ی نظیر تغییر مکان ۳ برابر δ_{LOP}

d_{10} : نقطه‌ی نظیر تغییر مکان ۵/۵ برابر δ_{LOP}

d_{20} : نقطه‌ی نظیر تغییر مکان ۱۰/۵ برابر δ_{LOP}

$L/600$: نقطه‌ی نظیر تغییر مکان ۱/۶۰۰ برابر طول دهانه

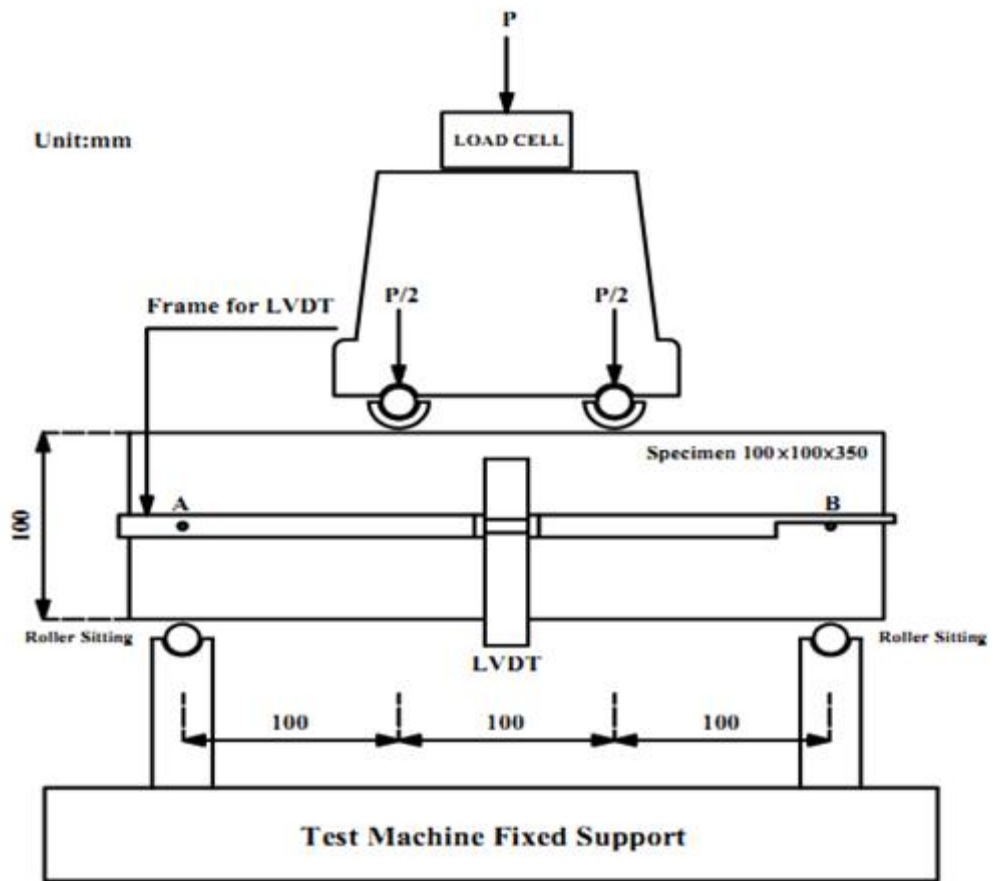
$L/150$: نقطه‌ی نظیر تغییر مکان ۱/۱۵۰ برابر طول دهانه

$L/100$: نقطه‌ی نظیر تغییر مکان ۱/۱۰۰ برابر طول دهانه

استاندارد ASTM C1609 نقاط $L/600$ و $L/150$ را به منظور ارزیابی رفتار خمشی نمونه‌ها پیشنهاد می‌نماید. نقطه $L/100$ علاوه بر نقاط پیشنهاد شده و به منظور ارزیابی صحیح‌تر رفتار خمشی در نظر گرفته شده است. برای تمامی نقاط فوق نیرو، تنش و انرژی بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشات محاسبه خواهند شد. به منظور سهولت نام‌گذاری این کمیت‌ها از پیشوندهای P و f و δ و Tough به ترتیب برای نیرو، تنش، تغییرمکان و انرژی در نقاط ذکر شده استفاده می‌نماییم.

۶-۵-۳-۲- چیدمان و نحوه انجام آزمایش مقاومت خمشی

هندسه نمونه‌ها و چیدمان آزمایش مقاومت خمشی در شکل ۶-۶ نشان داده شده است. بر اساس ASTM C1609 ابعاد نمونه‌ها $۳۵۰ \times ۱۰۰ \times ۱۰۰$ میلی‌متر و دهانه خالص بارگذاری ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد [۳۰].



شکل ۶-۶ هندسه نمونه‌ها و چیدمان آزمایش مقاومت خمشی

در هنگام قرارگیری نمونه‌ها بر روی تکیه‌گاه، آن‌ها را نسبت به وضعیت‌شان در حین بتن‌ریزی، ۹۰ درجه می‌چرخانیم. بدین ترتیب می‌توان آثار ناشی از جهت بتن‌ریزی در نتایج آزمایشات را حذف نمود. همان‌گونه که در شکل ۶-۶ قابل مشاهده است، به منظور اندازه‌گیری تغییرمکان وسط دهانه تیر از یک قاب فلزی استفاده شده است. به کمک این قاب می‌توان تغییرشکل‌های ناشی از نشست‌های تکیه‌گاهی و چرخش نمونه در حین بارگذاری را از بین برد. قاب در وسط ارتفاع مقطع و به کمک ۴ پیچ در نقاط A و B به نمونه متصل می‌گردد. تنها ۲ پیچ از ۴ پیچ به طور ثابت عمل کرده و ۲ پیچ دیگر اجازه‌ی تغییرمکان افقی رابه قاب می‌دهند. بدین ترتیب در حین بارگذاری، تغییر شکلی در قاب ایجاد نمی‌شود. تغییرمکان وسط دهانه به کمک دو تغییرمکان سنج که در دو وجه تیر به قاب متصل هستند، اندازه‌گیری می‌شود. متوسط مقادیر این تغییرمکان سنج‌ها به عنوان تغییرمکان خالص وسط دهانه در نظر گرفته می‌شود. نیروی وارده بر نمونه به کمک نیروسنج متصل به بازوی محرک دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. به منظور ثبت اطلاعات نیروسنج و تغییرمکان سنج‌ها از دستگاه ثبت داده‌ها استفاده شده است. این دستگاه با فرکانس ۱ هرتز داده‌ها را در حین آزمایش ثبت می‌نماید.

برای بارگذاری نمونه‌ها، جک هیدرولیکی با قابلیت اعمال بار بصورت کنترل تغییرمکان، مورد استفاده قرار گرفته است. سرعت بارگذاری نمونه‌ها بر اساس ASTM C1609، ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد [۳۰].

۶-۶- نتایج آزمایشات

۶-۶-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایشات مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های با ۱ و ۲ درصد حجمی الیاف به ترتیب در جداول ۶-۱ و ۶-۲ ارائه شده است. برخلاف نمونه‌های بدون الیاف، رفتار این نمونه‌ها شکل‌پذیر و گسیختگی آن‌ها بصورت تدریجی می‌باشد.

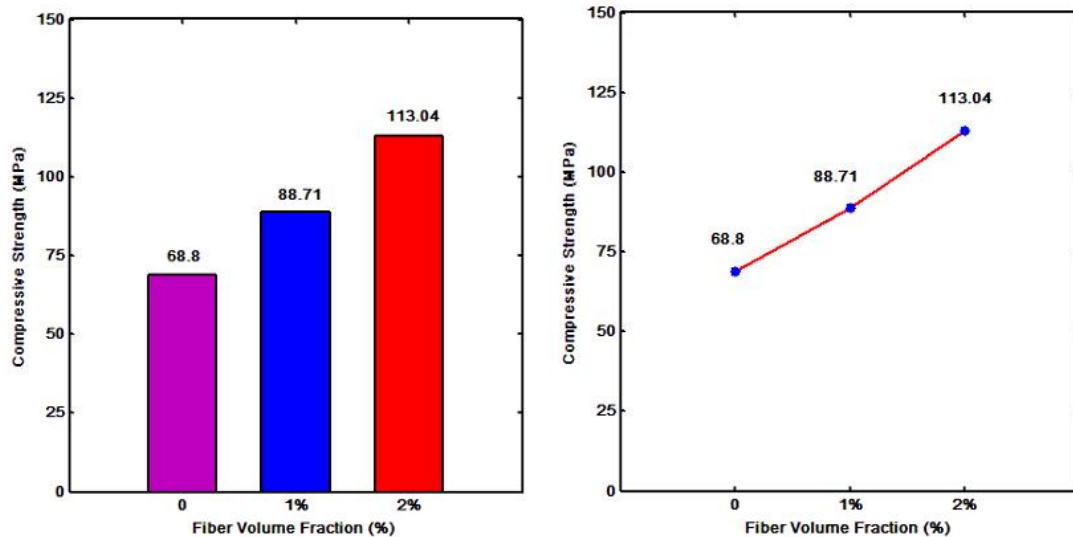
جدول ۱-۶ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مسلح به ۱ درصد حجمی الیاف

شماره نمونه	نیروی گسیختگی (KN)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت فشاری متوسط (MPa)
۱	۴۷۹/۹۹	۶۱/۱۲	۸۸/۷۱
۲	۷۵۹/۸۵	۹۶/۷۵	
۳	۸۵۰/۲۷	۱۰۸/۲۶	

جدول ۲-۶ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مسلح به ۲ درصد حجمی الیاف

شماره نمونه	نیروی گسیختگی (KN)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت فشاری متوسط (MPa)
۱	۸۷۳/۰۳	۱۱۱/۱۵	۱۱۳/۰۴
۲	۷۹۸/۸۶	۱۰۱/۷۲	
۳	۹۹۱/۵۵	۱۲۶/۲۵	

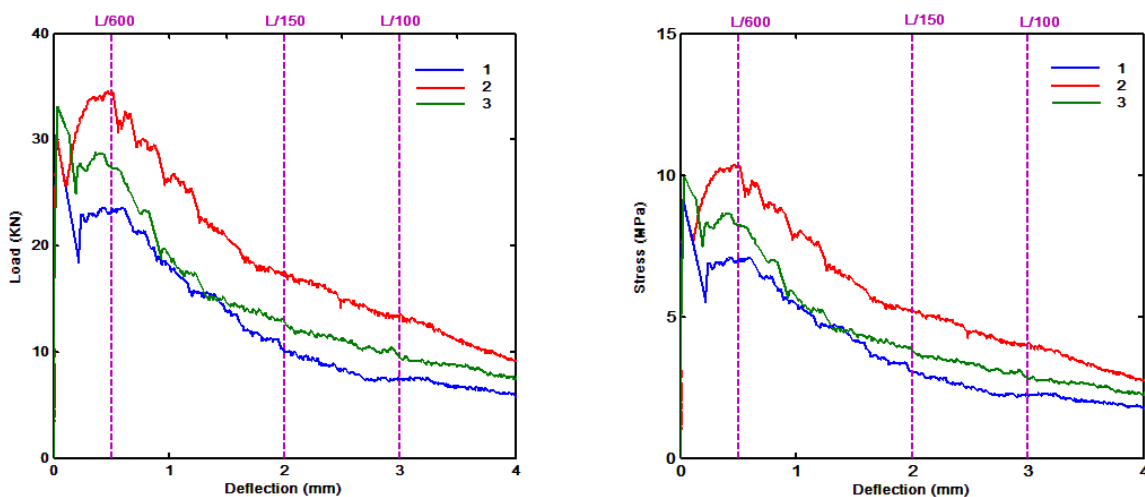
شکل ۶-۸ تاثیر افزودن الیاف در مقاومت فشاری ماتریس را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود افزودن به ترتیب ۱ و ۲ درصد حجمی الیاف، باعث افزایش ۲۹ و ۶۴ درصدی مقاومت فشاری نسبت به ماتریس بدون الیاف می‌گردد. در حالی که حداکثر مقدار افزایش مقاومت فشاری در حدود ۳۰ درصد گزارش شده است. افزایش چشم‌گیر مقاومت فشاری به دلیل طول و قطر نسبتاً بالای الیاف بکار رفته در مقایسه با سایر الیاف فولادی می‌باشد.



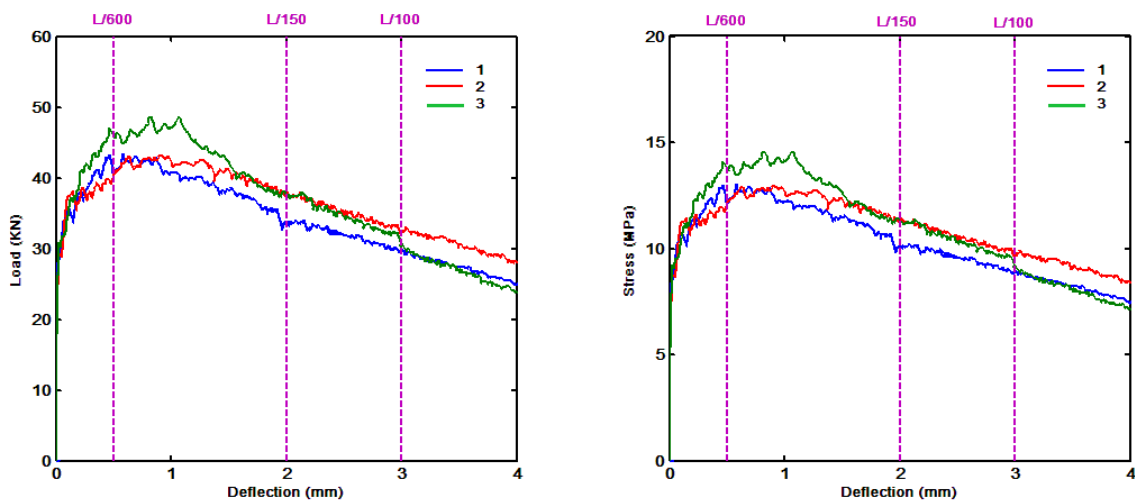
شکل ۶-۷ تاثیر الیاف بر مقاومت فشاری ماتریس

۶-۶-۲ رفتار خمشی

اشکال ۶-۸ و ۶-۹، به ترتیب منحنی‌های نیرو- تغییرمکان نمونه‌های با ۱ و ۲ درصد حجمی الیاف را نشان می‌دهند. هر یک از منحنی‌ها مربوط به آزمایش یک نمونه می‌باشد. جزئیات نتایج آزمایشات در جداول ۶-۳ و ۶-۴ ارائه گردیده است.



شکل ۶-۸ منحنی نیرو- تغییرمکان و تنش- تغییرمکان نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف



شکل ۹-۶ منحنی نیرو- تغییرمکان و تنش- تغییرمکان نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف

در رسم منحنی‌ها از دو مقیاس متفاوت برای محور نیرو استفاده شده که دلیل آن افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف بدلیل رفتار سخت‌شدگی می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۸-۶ قابل مشاهده است، این نمونه‌ها رفتار نرم‌شدگی تغییر مکانی را پس از ایجاد اولین ترک بروز داده‌اند. در حالی که مسلح نمودن ماتریس به ۲ درصد الیاف، باعث رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی تمامی نمونه‌ها گشته است. تمامی نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف، ظرفیت باربری و مدول گسیختگی بیشتری نسبت به نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف نشان داده‌اند.

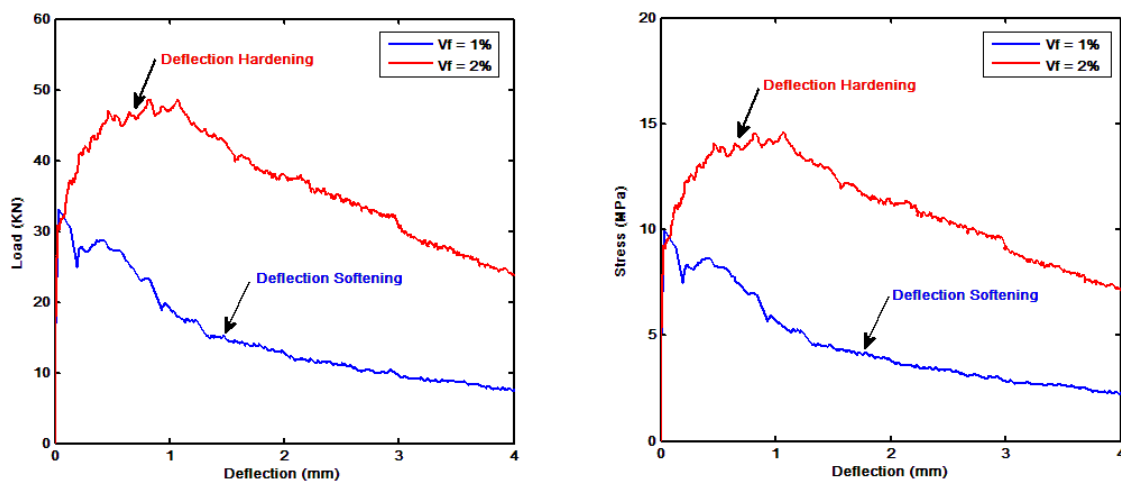
شکل ۱۰-۶ رفتار نرم‌شدگی و سخت‌شدگی تغییر مکانی نمونه‌ها با درصد حجمی مختلف الیاف را مقایسه می‌نماید. ظرفیت باربری نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف پس از ایجاد اولین ترک کاهش یافته و این روند نزولی تا گسیختگی کامل نمونه ادامه خواهد داشت. با افزایش بار، ترک اولیه ایجاد شده، باز گردیده و نمونه به تدریج گسیخته می‌شود. با این حال ذکر این نکته حائز اهمیت است که رفتار نرم‌شدگی، ظرفیت تحمل نیرو بعد از ایجاد ترک را در مصالح بوجود می‌آورد که در مقایسه با بتن غیرمسلح به الیاف، منجر به رفتار شکل‌پذیر نمونه‌ها می‌گردد.

جدول ۳-۶ جزئیات نتایج آزمایش نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف

		UNIT	Specimen Number		
			1	2	3
LOP	P_{LOP}	KN	30.15	30.44	33.13
	f_{LOP}	MPa	9.05	9.13	9.94
	δ_{LOP}	mm	2.75E-02	2.75E-02	3.50E-02
	$Tough_{LOP}$	N-m	0.572	0.550	0.747
d_5	P_{d5}	KN	26.82	26.73	31.18
	f_{d5}	MPa	8.05	8.02	9.35
	δ_{d5}	mm	8.25E-02	8.25E-02	1.05E-01
	$Tough_{d5}$	N-m	2.139	2.122	2.998
d_{10}	P_{d10}	KN	22.67	27.96	25.1
	f_{d10}	MPa	6.80	8.39	7.53
	δ_{d10}	mm	1.51E-01	1.51E-01	1.93E-01
	$Tough_{d10}$	N-m	3.841	3.906	5.502
d_{20}	P_{d20}	KN	22.42	32.22	28.63
	f_{d20}	MPa	6.73	9.67	8.59
	δ_{d20}	mm	2.89E-01	2.89E-01	3.68E-01
	$Tough_{d20}$	N-m	6.859	8.269	10.382
L/600	$P_{L/600}$	KN	23.18	34.32	27.44
	$f_{L/600}$	MPa	6.95	10.30	8.23
	$\delta_{L/600}$	mm	0.50	0.50	0.50
	$Tough_{L/600}$	N-m	11.661	15.409	14.056
L/150	$P_{L/150}$	KN	10.02	17.35	13.14
	$f_{L/150}$	MPa	3.01	5.21	3.94
	$\delta_{L/150}$	mm	2.00	2.00	2.00
	$Tough_{L/150}$	N-m	36.218	51.560	40.681
L/100	$P_{L/100}$	KN	7.31	13.3	9.57
	$f_{L/100}$	MPa	2.19	3.99	2.87
	$\delta_{L/100}$	mm	3.00	3.00	3.00
	$Tough_{L/100}$	N-m	44.584	66.714	51.913
MOR	P_{MOR}	KN	23.68	34.6	28.82
	f_{MOR}	MPa	7.10	10.38	8.65
	δ_{MOR}	mm	4.25E-01	4.70E-01	3.65E-01
	$Tough_{MOR}$	N-m	9.914	14.380	10.238

جدول ۴-۶ جزئیات نتایج آزمایش نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف

		UNIT	Specimen Number		
			1	2	3
LOP	P_{LOP}	KN	28.82	29.27	30.82
	f_{LOP}	MPa	8.65	8.78	9.25
	δ_{LOP}	mm	2.25E-02	2.75E-02	2.75E-02
	$Tough_{LOP}$	N-m	0.544	0.597	0.578
d_5	P_{d5}	KN	33.42	34.72	32.23
	f_{d5}	MPa	10.03	10.42	9.67
	δ_{d5}	mm	6.75E-02	8.25E-02	8.25E-02
	$Tough_{d5}$	N-m	1.916	2.274	2.304
d_{10}	P_{d10}	KN	35.15	38.19	36.65
	f_{d10}	MPa	10.55	11.46	11.00
	δ_{d10}	mm	1.24E-01	1.51E-01	1.51E-01
	$Tough_{d10}$	N-m	3.935	4.505	4.785
d_{20}	P_{d20}	KN	36.84	37.88	41.15
	f_{d20}	MPa	11.05	11.36	12.35
	δ_{d20}	mm	2.36E-01	2.89E-01	2.89E-01
	$Tough_{d20}$	N-m	8.010	10.094	10.379
L/600	$P_{L/600}$	KN	40.53	40.29	45.79
	$f_{L/600}$	MPa	12.16	12.09	13.74
	$\delta_{L/600}$	mm	0.50	0.50	0.50
	$Tough_{L/600}$	N-m	18.770	18.256	19.583
L/150	$P_{L/150}$	KN	33.66	37.69	37.39
	$f_{L/150}$	MPa	10.10	11.31	11.22
	$\delta_{L/150}$	mm	2.00	2.00	2.00
	$Tough_{L/150}$	N-m	77.526	79.793	85.349
L/100	$P_{L/100}$	KN	29.49	32.22	30.75
	$f_{L/100}$	MPa	8.85	9.67	9.23
	$\delta_{L/100}$	mm	3.00	3.00	3.00
	$Tough_{L/100}$	N-m	109.417	115.364	119.706
MOR	P_{MOR}	KN	43.48	43.26	48.6
	f_{MOR}	MPa	13.04	12.98	14.58
	δ_{MOR}	mm	5.78E-01	9.03E-01	8.28E-01
	$Tough_{MOR}$	N-m	21.879	35.105	34.761



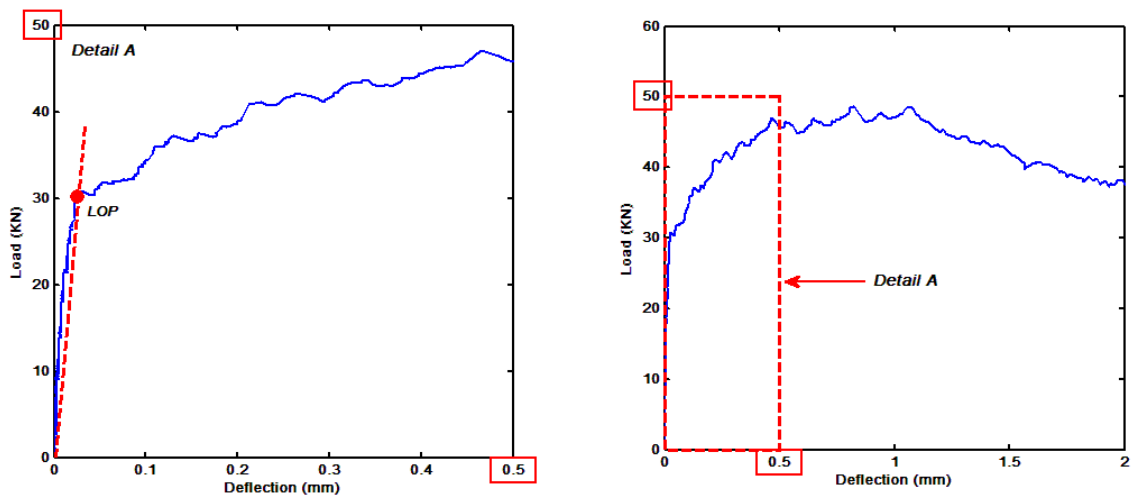
شکل ۶-۱۰ مقایسه رفتار نمونه‌های مسلح به ۱ و ۲ درصد الیاف

در نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف، پس از ایجاد اولین ترک، ظرفیت باربری افزایش یافته و ترک‌های متعدد در نمونه ایجاد می‌شود. با افزایش نیرو ترک ریز ایجاد شده، به هم متصل شده و با تشکیل ترک بزرگ نمونه گسیخته می‌شود. شکل ۶-۱۱ نحوه ترک‌خوردگی نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۱ نحوه ترک‌خوردگی نمونه‌ها

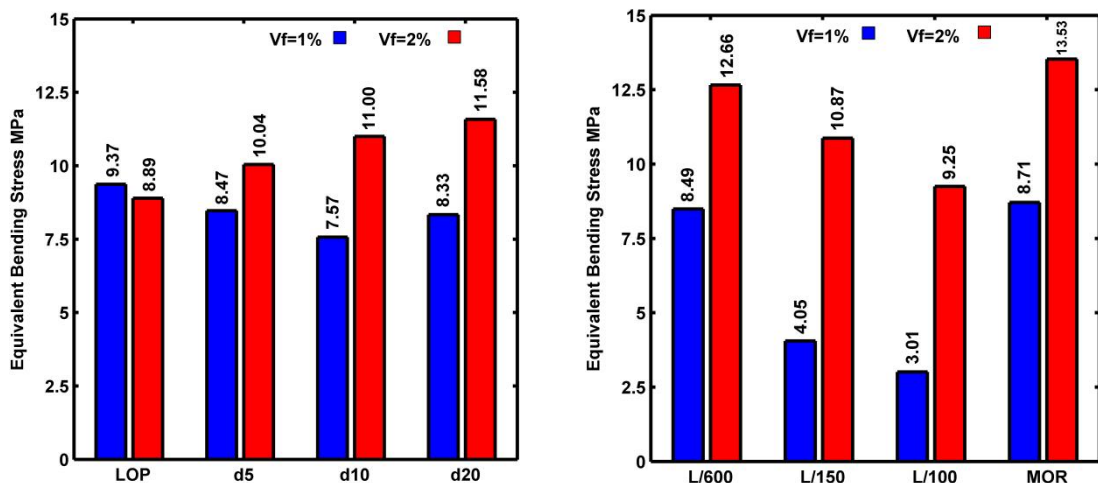
به منظور تعیین تغییر مکان و نیروی نظیر ایجاد اولین ترک از شکل ۶-۱۲ استفاده شده است.



شکل ۶-۱۲ نحوه تعیین نیرو و تغییر مکان نظیر ایجاد اولین ترک

۶-۶-۳- ظرفیت باربری (تنش‌های خمشی معادل)

تأثیر درصد حجمی الیاف بکار رفته بر تنش‌های خمشی معادل در اشکال ۶-۸ و ۶-۹ نشان داده شده است. مقادیر این تنش‌ها با استفاده از رابطه‌ی ۶-۹ در تمامی نقاط منحنی، محاسبه شده‌اند. افزایش درصد حجمی الیاف بر تنش‌های خمشی معادل در شکل ۶-۱۳ ارائه شده است.



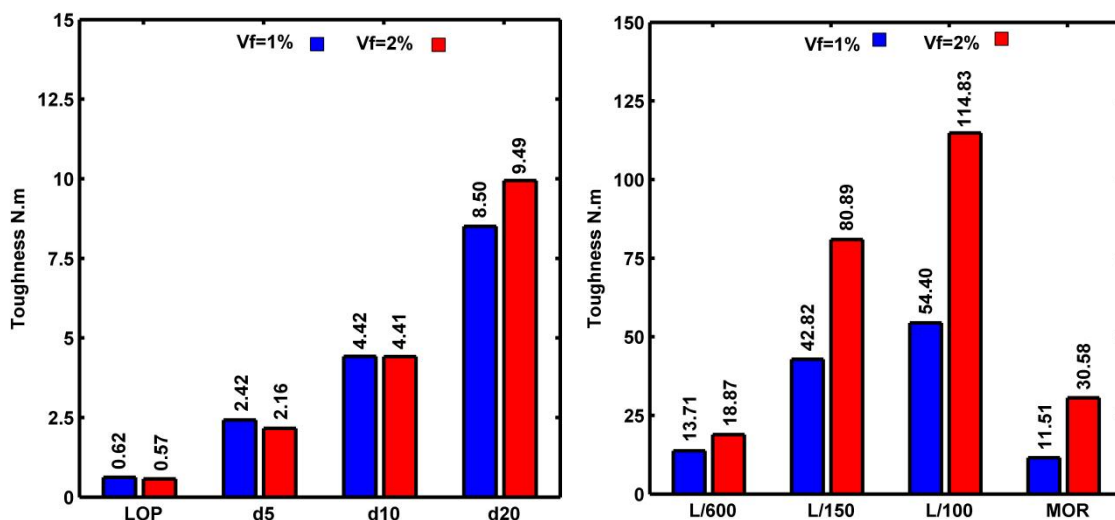
شکل ۶-۱۳ تأثیر افزایش درصد حجمی الیاف بر تنش‌های خمشی معادل

مقادیر بدست آمده، مقادیر متوسط نتایج نمونه‌ها می‌باشند که در نقاط LOP، d5، d10، d20، L/600، L/150، L/100 و MOR محاسبه گردیده‌اند. همان‌گونه که در شکل قابل مشاهده است، افزایش درصد حجمی الیاف تأثیری بر مقدار تنش در نقطه‌ی حد تناسب نداشته و تغییرات محسوس تنش بعد از

این نقطه رخ می‌دهد. این مطلب بیان‌گر آن است که الیاف تاثیری بر رفتار قبل از ترک‌خوردگی ماتریس نداشته و بیشترین تاثیر آن‌ها بعد از ایجاد ترک و از طریق دوختن سطوح ترک می‌باشد. علاوه بر این میزان کارایی الیاف به درصد حجمی آن وابسته است. در نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف، نقاط L/600، L/150 و L/100 در محدوده رفتار نرم‌شدگی قرار گرفته‌اند. در حالی‌که نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف، نقطه‌ی L/600 در محدوده رفتار سخت‌شدگی قرار گرفته است. این امر نشان دهنده تاثیر رفتار سخت‌شدگی در افزایش باربری، در تغییر مکان‌های کوچک و بعد از ترک‌خوردگی می‌باشد. بیشترین تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف در نقطه‌ی L/150 است و مقاومت نظیر اولین ترک‌خوردگی کمترین تغییر را داشته است.

۴-۶-۶- جذب انرژی

کاربرد مصالح با قابلیت جذب انرژی بالا می‌تواند باعث کاهش خطرات ناشی از بارهای دینامیکی مانند زلزله، ضربه و انفجار گردد. بنابراین مقایسه این کمیت در درک بهتر کاربرد این مصالح در موارد فوق اهمیت دارد. تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف در قابلیت جذب انرژی در شکل ۶-۱۴ آمده است. سطح زیر نمودار منحنی نیرو-تغییر مکان تا نقطه‌ای مشخص به عنوان میزان جذب انرژی تعریف می‌شود.

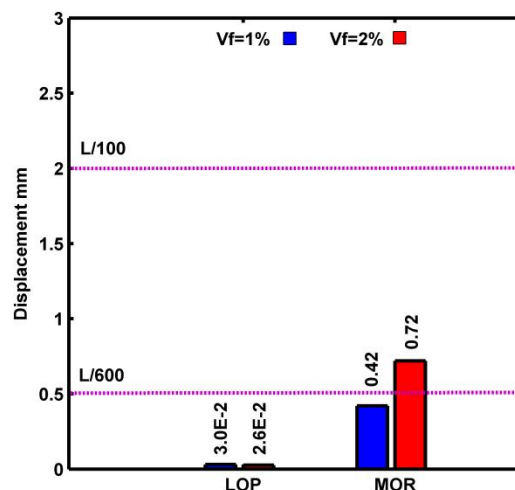


شکل ۶-۱۴ تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف در میزان جذب انرژی

همان‌گونه که در این اشکال قابل ملاحظه است، میزان جذب انرژی تا نقطه d_{20} تغییر چندانی با افزایش درصد حجمی الیاف نمی‌نماید. با افزایش تغییرمکان، میزان جذب انرژی مصالح به طور قابل توجهی با افزایش درصد حجمی الیاف افزایش می‌یابد. وجود سخت‌شدگی تغییرمکانی در رفتار خمشی نمونه‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری و در نتیجه افزایش سطح زیر نمودار می‌گردد. بیشترین تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف در نقطه‌ی $L/100$ مشاهده گردیده که نشان دهنده تاثیر قابل ملاحظه رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی در عملکرد مصالح می‌باشد.

۶-۶-۵- تغییرمکان

از آنجایی که میزان شکل‌پذیری به ظرفیت تغییرمکان وابسته است، بررسی این خصوصیت از اهمیت خاصی برخوردار است. با توجه به نتایج بدست آمده (شکل ۶-۱۵)، تغییرمکان نظیر نقطه‌ی LOP به درصد حجمی الیاف وابسته نمی‌باشد. درحالی که تغییرمکان نظیر حداکثر نیرو به مقدار زیادی به درصد حجمی الیاف وابسته می‌باشد. میزان این وابستگی به حدی است که با افزایش درصد الیاف، مقدار δ_{MOR} از تغییرمکان $L/600$ نیز بیشتر می‌گردد.



شکل ۶-۱۵ تاثیر درصد حجمی الیاف در تغییرمکان نظیر نقاط LOP و MOR

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه گیری

هدف اصلی این تحقیق بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار و تاثیر آن بر خصوصیات مکانیکی بتن الیافی می باشد. به واسطه کاربرد الیاف فولادی انتظار می رود که خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری، ظرفیت باربری خمشی و میزان جذب انرژی مصالح بهبود یابد. جهت بررسی این موضوع تلاش هایی در راستای بهبود خصوصیات مکانیکی بتن الیافی انجام پذیرفته است.

هرچند تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه کاربرد الیاف فولادی در بتن انجام شده است، لیکن اطلاعات کافی راجع به رابطه ی میان رفتار الیاف و تاثیر آن بر خصوصیات مکانیکی بتن الیافی و علی الخصوص عملکرد خمشی آن موجود نمی باشد. علاوه بر این ارزیابی دقیقی راجع به درصد حجمی مورد نیاز به منظور دستیابی به رفتار سخت شدگی یا نرم شدگی تغییر مکانی الیاف قلابدار نیز موجود نمی باشد. در راستای اهداف کلی این تحقیق، موارد اساسی ذیل انجام پذیرفته است:

۱. رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار بررسی شده و نتایج بدست آمده مورد ارزیابی قرار گرفته اند.

۲. مدل سازی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف به منظور درک صحیح رفتار آن نیز انجام گردیده است.

۳. تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف بر رفتار کلی مصالح بررسی گردیده است.

۴. مصالح پایه سیمانی مسلح به ۲ درصد الیاف با شکل پذیری بالا و رفتار سخت شدگی تغییر مکانی توسعه داده شده و مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفته است. با توجه به موارد فوق جزئیات نتایج بدست آمده به ۴ بخش تقسیم می گردد.

۷-۱-۱- نتایج حاصله از رفتار بیرون کشیده شدن الیاف قلابدار

- الیاف تغییر شکل یافته قلابدار، رفتار سخت شدگی لغزشی را بروز می دهند که به دلیل ایجاد مفاصل پلاستیک در انتهای الیاف می باشد. هرچند بخش کوتاهی از الیاف در بروز

این رفتار مشارکت می‌نماید، لیکن می‌تواند با ایجاد مقاومت پیوستگی مناسب، شرایط لازم برای بروز رفتار سخت‌شدگی در ماتریس را به‌وجود آورد.

- در تمامی نمونه‌های آزمایش شده، الیاف از ماتریس بیرون کشیده شده و در هیچ یک گسیختگی الیاف رخ نداده است. این رفتار تضمین‌کننده، رفتار شکل‌پذیر مصالح بعد از ایجاد ترک می‌باشد.

- بخش قلاب‌دار الیاف پس از بیرون کشیده شدن از ماتریس به صورت مستقیم درآمده که نشان دهنده تشکیل مفصل پلاستیک و انتقال آن تا انتهای الیاف می‌باشد.

۲-۱-۷- نتایج حاصله از مدل‌سازی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف

- مدل‌سازی الیاف بر تغییرشکل پلاستیک الیاف در حین بیرون کشیده شدن از ماتریس صحنه می‌گذارد.

- در مدل‌سازی انجام شده نحوه‌ی تغییرشکل الیاف در مقادیر مختلف لغزش، نشان دهنده رفتار سخت‌شدگی لغزشی الیاف می‌باشد.

- به کمک کنترل تنش‌های تماسی می‌توان نتیجه گرفت که در ماتریس و در محل انحنای الیاف، فشار الیاف باعث خرابی ماتریس در این ناحیه می‌گردد.

۳-۱-۷- نتایج حاصله از تاثیر افزودن الیاف و افزایش درصد حجمی آن

- مقاومت فشاری مصالح با افزودن الیاف افزایش یافته و با ازدیاد درصد حجمی تاثیر آن بیشتر می‌گردد.

- با افزودن الیاف به ماتریس، رفتار نمونه‌های فشاری در حین گسیختگی از حالت ترد به حالت شکل‌پذیر تبدیل می‌گردد و این شکل‌پذیری با افزایش درصد الیاف بهبود می‌یابد.

- افزودن الیاف به ماتریس باعث ایجاد ظرفیت باربری بعد از ایجاد ترک در ماتریس می‌گردد.

- همان‌گونه که انتظار می‌رفت الیاف موجود در سطح ترک از ماتریس بیرون کشیده شده و گسیختگی الیاف رخ نداده است.

- افزایش درصد حجمی الیاف از ۱ به ۲ درصد منجر به تغییر حالت رفتاری نمونه‌های خمشی، از حالت نرم‌شدگی به سخت‌شدگی تغییر مکانی می‌گردد.
- افزایش درصد الیاف باعث افزایش مدول گسیختگی مصالح می‌گردد. علاوه بر این ظرفیت باربری مصالح در تغییر مکان‌های بالا نیز افزایش می‌یابد.
- همراه با افزایش درصد الیاف قابلیت جذب انرژی مصالح افزایش یافته و این تغییر به خصوص با افزایش تغییر مکان محسوس‌تر است.
- افزایش درصد الیاف تاثیری بر تغییر مکان و نیروی نظیر ایجاد اولین ترک در ماتریس نداشته است.
- افزایش درصد الیاف ظرفیت تغییر مکان تیر را افزایش می‌دهد. تغییر مکان نظیر مدول گسیختگی نیز با این افزایش، افزایش می‌یابد.

۷-۱-۴- نتایج حاصله از بررسی رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی

- الیاف بکار رفته به دلیل نسبت ظاهری پایین نمی‌توانند منجر به رفتار سخت‌شدگی کرنشی گردند. لیکن امکان ایجاد رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی در مصالح با افزودن ۲ درصد الیاف وجود دارد.
- رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی در تمامی حالات باعث بهبود چشمگیر عملکرد مصالح می‌گردد.
- در نمونه‌های با رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی، ترک خوردگی متعدد نیز در نمونه‌ها مشاهده گردیده است.
- استاندارد ASTM C1018 قابلیت ارزیابی رفتار خمشی مصالح با رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی را نداشته در حالیکه ASTM C1609، افزایش چشمگیر عملکرد مصالح با رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی را نمایان می‌نماید.

- معیار ASTM C1609 برای تعیین تغییرمکان و نیروی نظیر ایجاد اولین ترک در مورد

مصالح با رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی مناسب نمی‌باشد.

۲-۷- پیشنهادات

- بررسی دقیق‌تر رفتار بیرون کشیده شدن الیاف از طریق تصویربرداری به کمک اشعه ایکس
- کاربرد الیافی با رفتار سخت‌شدگی لغزشی بیشتر و دستیابی به مصالحی با رفتار سخت‌شدگی

کرنشی

- بررسی تاثیر خصوصیات ماتریس بر رفتار بیرون کشیده شدن الیاف
- بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف بر نحوه ترک‌خوردگی مصالح
- افزایش محدوده رفتار سخت‌شدگی کرنشی و تغییرمکانی به کمک ارزیابی میکرومکانیکی

رفتار الیاف

- مدل‌سازی رفتار کلی مصالح با در نظر گرفتن رفتار الیاف

- [١]ACI Committee 544.1R (2004) "State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete" ACI Manual of Concrete Practice
- [٢]Guerrero P. and Naaman A. E. (2000) "Effect of Mortar Fineness and Adhesive Agents in Pullout Response of Steel Fibers" ACI Materials Journal, V.97, No. 1, pp 12-22
- [٣]Robbins P. and Austin S. and Jones P. (2001) "Pullout Behaviour of Hooked Steel Fibers" Journal of Materials and Structures, V.35, pp 434-442
- [٤]Markovich I. and Van Mier J.G.M. and Walraven J.C. (2001) "Single Fiber Pullout from Hybrid Fiber Reinforced Concrete" HERON, Vol.46, No.3, pp 191-200
- [٥]Naaman A.E. (2003) "Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites" Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.3, pp 241-252
- [٦] Kim D.J. and El-Tawil S. and Naaman A.E. (2007) "Correlation between Single Fiber Pullout Behaviour and Tensile Response of Fiber Reinforced Cementitious Composites with High Strength Steel Fiber" Proceeding of Fifth International Symposium on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, pp 67-76, Mainz, Germany
- [٧] Kim D.J. and El-Tawil S. and Naaman A.E. (2008) "Loading Rate Effect on Pullout Behaviour of Deformed Steel Fibers" ACI Materials Journal, V.105, No.6, pp 576-584
- [٨] Kim D.J. and El-Tawil S. and Naaman A.E. (2010) "Effect of Matrix Strength on Pullout Behaviour of High Strength Deformed Steel Fibers" ACI Special Publication, Four Decades of Progress in Prestressed Concrete, Fiber Reinforced Concrete, and Thin Laminate Composites, pp 135-150, Parra-Montesinos, Balaguru
- [٩] Abu-Lebdeh T. and Hamoush S. and Heard W. and Zornig B. (2011) "Effect of Matrix Strength on Pullout Behaviour of Steel Fiber Reinforced very High strength Concrete Composites" Journal of Construction and Building Materials, Vol.25, pp 39-46
- [١٠] Kim J.J. and Kim D.J. and Kang S.T. and Jang H.L. (2012) "Influence of Sand to Coarse Aggregate ratio on the Interfacial Bond Strength of Steel Fiber in Concrete for Nuclear Power Plant" Journal of Nuclear Engineering and Design, Vol.252, pp 1-10
- [١١] Cheng Y.L. and Mobashert B. (1997) "Finite Element Simulation of Fiber Pullout Toughening in Fiber Reinforced Cement Based Composites" Journal of Advanced Cement Based Materials, Vol.7, pp 123-132
- [١٢] Yang Q.S. and Qin Q.H. and Peng X.R. (2003) "Size Effect in Fiber Pullout Test" Journal of Composite Structures, Vol.61, pp 193-198
- [١٣] Kyriaki G.S. and Mistakidis E. and Pantiusa D. and Zygomalas M. (2010) "Numerical Modelling of the Pullout of Hooked Steel Fibers from High Strength Cementitious Matrix Supplemented by Experimental Results" Journal of Construction and Building Materials, Vol.24, pp 2489-2506

[۱۴]Chin C.S. and Xiao R.Y. (2012)" Experimental and Nonlinear Finite Element Analysis of Fiber Cementitious Matrix Bond Slip Mechanism" H.W. Reinhardt, and A.E. Naaman (Eds.) HPRCC 6, pp 145–152, G.J. Parra-Montesinos

[۱۵] Kim D.J. and El-TawilS.and NaamanA.E. (2008)" Comparative Flexural Behaviour of Four Fiber Reinforced Cementitious Composites" Journal of Cement and Concrete Composites, Vol.30, pp 917-928

[۱۶] Pul S. (2008)" Experimental Investigation of Tensile Behaviour of High Strength Concrete" Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, Vol.15, pp 467-472

[۱۷]Xu B.W. and Shi H.S. (2009)" Correlation among Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Composites" Journal Construction and Building Materials, Vol.23, pp 3468-3474

[۱۸] Kim D.J. and El-TawilS.and NaamanA.E. (2010)" Correlation between Tensile and Bending Behaviour of FRC Composites with Scale Effect" Proceedings of FramCoS-7, pp 1379-1385, Korea

[۱۹]Park S.H. and Kim D.J. and Ryu G.S. and Koh K.T. (2012)" Tensile Behaviour of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete" Journal of Cement and Concrete Composites, Vol.34, pp 172-184

[۲۰]ASTM C 192/C 192M (2002)Standard Test Method for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory American Society of Testing and Materials, pp 1–3

[۲۱] نظر علی. قدس، (۱۳۸۵)، پایان نامه کارشناسی ارشد "دستیابی به مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف با مقاومت کششی و شکل پذیری بالا"، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود

[۲۲]ASTM C 39/C 39M-03 (2003)Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical concrete Specimens American Society of Testing and Materials, pp 1–5

[۲۳]ASTM C 496/C 496M-04 (2004)Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens American Society of Testing and Materials, pp 1–5

[۲۴]ASTM C 78-02 (2002)Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading) American Society of Testing and Materials, pp 1–3

[۲۵]Kim D.J. (2009) PhD. Thesis "Strain Rate Effect on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites using Slip Hardening High Strength Deformed Steel Fibers" Civil Engineering Department, University of Michigan

[۲۶]ANSYS, ANSYS Help Documentation, ANSYS Inc. (2010)

[۲۷]جاهدمطلق. حمیدرضا، نوبان. محمد رضا، اشراقی، محمدمین، (۱۳۸۳) "اجزا محدود (ANSYS)" چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران

[۲۸]Shi C. and Mo Y.L. (2008)" High Performance Construction Materials-Science and Applications" World Scientific Publishing Co, Singapore

[၃၅]ASTM C 1018 (1997) Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading) American Society of Testing and Materials, pp 1-8

[၃၆]ASTM C 1609/C 1690M-05 (2006) Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading) American Society of Testing and Materials, pp 1-8

Abstract

The main objective of this research is to investigate the pull-out behavior of hooked steel fibers and its influence on mechanical properties of fiber reinforced composites. The research is divided into four parts. In the first, mechanical properties of cementitious matrix including compressive strength, tensile splitting strength and flexural strength have been determined. In the second part, pull-out behavior of hooked steel fiber has been evaluated by means of experimental tests on single fiber embedded in cementitious matrix. The pull-out results indicated that the hooked steel fiber exhibits slip-hardening behavior as a result of plastic hinge formation in hooked part of fiber. This mechanism increases bond strength and pull-out energy of fiber. In the third part of this research, pull-out behavior of fiber has been investigated by means of numerical modeling of hooked steel fiber embedded in cementitious matrix. ANSYS software has been used for numerical modeling and obtaining solution. The complexity of numerical modeling arises from nonlinear behavior comprising bond between fiber and matrix in the early stage of pull-out, unilateral contact between fiber and matrix, friction, plastification of steel fiber and cementitious matrix and large displacement and strains during pull-out. All these nonlinearities require special treatment in numerical modeling. The results of numerical modeling were compared and verified with respect to the result of experimental test of hooked steel fibers. The formation of plastic hinge in hooked part has been observed in modeling which results in slip-hardening behavior. Obtained results from modeling were in good agreement with experimental results. In the final part, critical volume fraction of fiber to achieve deflection-hardening behavior has been determined according to pull-out tests results. The critical volume fraction has to be at least 2%. In order to compare different flexural behavior of composites, four-point bending tests performed on cementitious composites reinforced with 1% and 2% hooked steel fibers. The result showed that cementitious composites with 2% hooked steel fibers exhibit deflection-hardening behavior as expected. In contrast, specimens with 1% hooked steel fibers showed deflection-softening behavior. Comparing obtained results indicated that deflection hardening behavior will increase flexural strength and have a great influence on toughness and ductility of material.

Keywords: hooked fiber; slip-hardening; volume fraction; deflection hardening; deflection softening.



University of Shahrood
Faculty of Engineering
Civil Engineering Department

**Effect of Hooked Fibers Pull-out Behavior on
Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete**

Mansour Jamee

Supervisor:

Dr.Farshid J.Alaee

February 2013