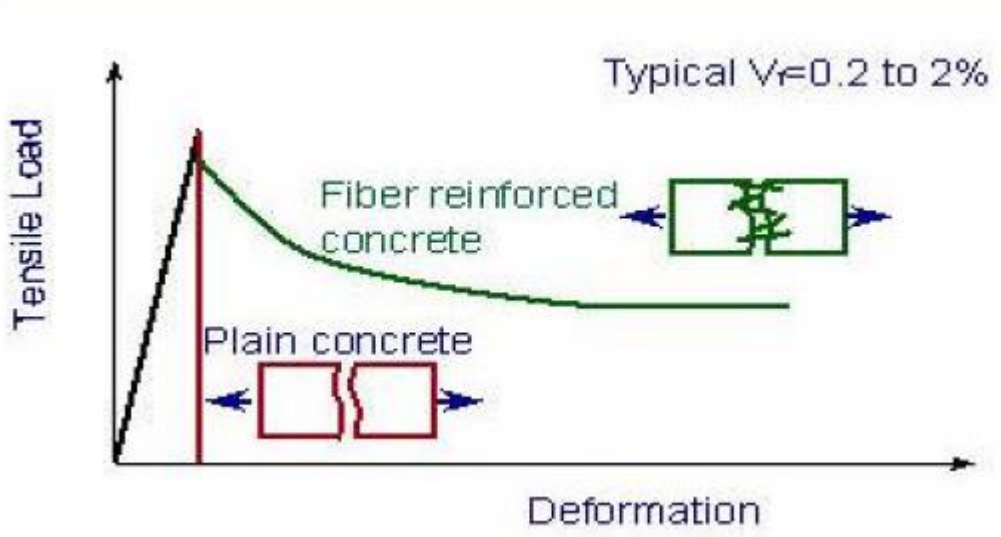
2-1- مقدمه

با وجود اینکه استفاده از بتن در کاربردهای سازه‌ای رواج زیادی دارد، ولی به عنوان یک مصالح ساختمانی معایبی نیز دارد. از جمله معایب بتن، مقاومت کششی پایین و عدم شکل‌پذیری آن می-باشد. همچنین وزن زیاد خود بتن و مسائل دوام بتن نیز مطرح می‌باشد. بدین ترتیب بدست آوردن نوع خاصی از بتن که کیفیت سازه‌ای و مراحل ساخت را بهبود بخشد، ضروری به نظر می‌رسد[27] .

بتن مسلح شده با الیاف[1] یا به اصطلاح بتن الیافی (FRC)، افزایش مقاومت کششی و شکل‌پذیری بتن را بدون نیاز به مسلح‌کننده‌های استاندارد، در پی دارد. همچنین دوام بتن را افزایش می‌دهد، که باعث کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود[2] . شکل (2-1)، افزایش مقاومت کششی بتن الیافی را نشان می‌دهد.



شکل 2-1- نمودار بار کششی- تغییر مکان برای بتن ساده و مسلح شده با الیاف [28]

2-2- تعریف

بتن مسلح شده با الیاف، بتن معمولی است که الیاف کوتاه ناپیوسته در حین اختلاط به آن افزوده می‌شوند. الیاف که از فولاد، پلاستیک، شیشه، مواد طبیعی و مواد دیگر ساخته می‌شوند، به شکل‌های

[1] - **F**ibre **R**einforced **C**oncrete

مختلف (میله‌ای، تسمه‌ای، تسمه‌ای موجدار و میله‌ای آجدار) و در اندازه‌های مختلف با طول‌های از 6 mm تا 75 mm و ضخامت‌های از 0.005 mm تا 0.75 mm در دسترس قرار دارند[29] .

2-3- مزایا و معایب FRC[1]

استفاده از FRC، جایگاه خود را درکاربردهای عمرانی پیدا کرده است. در جاهایی که نیاز به تعمیر می‌باشد یا مکان‌هایی که اجتناب از خوردگی بتن ضروری می‌باشد، بتن الیافی می‌تواند مؤثر واقع شود. همچنین FRC در سازه‌هایی مثل آبگیرها و دریچه سدها و پایه‌های پل که در معرض جریان پرسرعت قرار دارند، باعث **کاهش خسارت ناشی از خلازایی و فرسایش** می‌شود. کاهش اساسی وزن سازه با **استفاده از مقاطع FRC نازک، با مقاومتی برابر با مقاومت مقاطع ضخیم‌تر بتن ساده** ممکن می‌باشد. وقتی که FRC، در پل‌ها استفاده می‌شود، از گسیختگی فاجعه‌آمیز جلوگیری می‌کند. همچنین استفاده از **بتن الیافی در نواحی مستعد لرزه‌خیزی، تلفات انسانی** را به حداقل می‌رساند.

مهمترین عیب بتن الیافی، **ساخت این نوع بتن** می‌باشد. مرحله ترکیب الیاف با بتن معمولی، نسبت به تولید بتن ساده، **پر زحمت و گران** می‌باشد[28] .

2-4- انواع الیاف[30]

در یک حالت کلی انواع الیاف را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد: الیاف شیشه‌ای، الیاف فولادی، الیاف مصنوعی و الیاف طبیعی.

2-4-1- شیشه

الیاف شیشه‌ای به صورتی‌که در ابتدا استفاده می‌شد، با مواد سیمانی واکنش قلیایی داشته و باعث فساد مواد سیمانی می‌شد. بعدها، الیاف شیشه‌ای مقاوم در برابر قلیا که دارای زیرکونیا[2] می‌باشد، تولید

[1] - Fibre Reinforced Concrete
[2] - zirconia

شد. الیاف شیشه‌ای به صورت پیوسته یا بریده بریده وجود دارد. الیاف به طول تا 35mm در کاربردهای پاشش و الیاف با طول تا 25mm در کاربردهای اختلاط بکار می‌رود.

الیاف شیشه‌ای، دارای مقاومت کششی بالا (2 ~ 4 GPa)، و مدول الاستیسیته (70~80 GPa) می-باشد، ولی مشخصه تنش - کرنش شکننده (2.5 تا 4.8 ٪ افزایش طول در هنگام گسیختگی) و خزش کمتری در دمای اتاق دارد.

چنانچه محصولات ساخته شده با الیاف شیشه‌ای درمحیط هوای آزاد قرار بگیرند، مقاومت و شکل-پذیری خود را از دست خواهند داد. علت این امر هنوز به وضوح مشخص نیست، ولی می‌توان حمله قلیائیا یا شکنندگی الیاف را دلیل این امر دانست. به دلیل کمبود اطلاعات از دوام بتن‌های مسلح شده با الیاف شیشه‌ای (GRC)، موارد استفاده آن به کاربردهای غیر سازه‌ای محدود می‌شود، که البته دارای کاربرد وسیعی است. استفاده از این الیاف در تکنیک پاشش مستقیم و به عنوان جایگزینی برای الیاف آزبستی در ورق‌های تخت، لوله‌ها و محصولات پیش‌ساخته مناسب می‌باشد.

2-4-2- فولاد

الیاف فولادی دارای مقاومت کششی بالا (0.5 ~ 2 GPa) و مدول الاستیسیته 200 GPa می‌باشد. مشخصه تنش-کرنش آن شکل‌پذیر بوده و خزش کمتری را نشان می‌دهد. در مورد الیاف فولادی در بخش‌های بعدی بیشتر بحث می‌شود.

2-4-3- الیاف مصنوعی

الیاف مصنوعی به طور کلی ساخته دست بشر بوده و از صنایع پتروشیمی و نساجی بدست می‌آید. انواع الیاف مصنوعی عبارتند از: آکریلیک، آرامید، کربن، نایلون، پلی‌استر، پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن. جدول(2-1)، مشخصات فیزیکی برخی از الیاف مصنوعی را نشان می‌دهد[30] .

2-4-3-1- آکریلیک

الیاف آکریلیک به عنوان **جایگزین الیاف آزبستی** در محصولات بتن الیافی استفاده می‌شود. همچنین به منظور کاهش **ترک‌های ناشی از افت بتن** الیاف آکریلیک با درصد حجمی کم به بتن ساده اضافه می‌شوند.

2-4-3-2- آرامید

الیاف آرامید درحدود2/5 بار قویتر از الیاف شیشه‌ای و 5 بار قویتر از الیاف فولادی در واحد جرم می‌باشد. **به دلیل گرانی این الیاف**، بتن مسلح شده با آرامید به عنوان جایگزین سیمان آزبستی در کاربردهای با مقاومت بالای خاصی استفاده می‌شود.

جدول 2-1- مشخصات انواع الیاف مصنوعی [30]

Fibre type	Equivalent diameter µm	Relative density	Tensile strength MPa	Elastic modulus GPa	Ultimate elongation %	Ignition tem-perature °C	Melt, oxidation, or decomposition temperature °C	Water absorption per ASTM D 570, % by mass
Acrylic	13 - 104	1,16 - 1,18	270 - 1 000	14 - 19	7,5 - 50,0	-	220 - 235	1,0 - 2,5
Aramid I	12	1,44	2 900	60	4,4	high	480	4,3
Aramid II†	10	1,44	2 350	115	2,5	high	480	1,2
Carbon, PAN HM‡	8	1,6 - 1,7	2 500 - 3 000	380	0,5 - 0,7	high	400	nil
Carbon, PAN HT§	9	1,6 - 1,7	3 450 - 4 000	230	1,0 - 1,5	high	400	nil
Carbon, pitch GP**	10 - 13	1,6 - 1,7	480 - 790	27 - 35	2,0 - 2,4	high	400	3 - 7
Carbon, pitch HP††	9 - 18	1,8 - 2,15	1 500 - 3 100	150 - 480	0,5 - 1,1	high	500	nil
Nylon‡‡	23	1,14	970	5	20	-	200 - 220	2,8 - 5,0
Polyester	20	1,34 - 1,39	230 - 1 100	17	12 - 150	600	260	0,4
Polyethylene‡‡	25 - 1 000	0,92 - 0,96	75 - 590	5	3 - 80	-	130	nil
Polypropylene‡‡	-	0,90 - 0,91	140 - 700	3,5 - 4,8	15	600	165	nil

Notes

* Not all fibre types are currently used for commercial production of FRC

† High modulus

‡ Polyacrylonitrile based, high modulus

§ Polyacrylonitrile based, high tensile strength

** Isotropic pitch based, general purpose

†† Mesophase pitch based, high performance

‡‡ Data listed is only for fibres commercially available for FRC

2-4-3-3- کربن

به طور اساسی الیاف کربن گرانتر از انواع دیگر الیاف بوده و به همین دلیل استفاده‌های تجاری آن محدود می‌باشد. الیاف کربنی به صورت رشته‌های پیوسته یا به صورت بریده بریده موجود می‌باشد. رشته‌های پیوسته الیاف برای بهینه سازی جهت‌گیری الیاف در هنگام ساخت بتن استفاده می‌شوند. الیاف بریده، به طور کلی در مرحله اختلاط بتن به آن اضافه شده و به طور تصادفی در مخلوط پخش می‌شوند. الیاف کربنی دارای مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بالا و مشخصات تنش-کرنش شکننده می‌باشد.

2-4-3-4- نایلون

نایلون، یک **نام عمومی برای مشخص کردن خانواده‌ای از پلیمرها** می‌باشد. مشخصات الیاف نایلونی به نوع پلیمر پایه، میزان مختلف افزودنیها، شرایط ساخت و ابعاد الیاف بستگی دارد. نایلون، مخصوصا در مقاومت در برابر ضربه و طاقت خمشی[1] و افزایش ظرفیت باربری پس از اولین ترک مؤثر می‌باشد.

2-4-3-5- پلی‌استر

الیاف پلی‌استر، با محتوای پائین (در حدود 1 ٪ حجمی) برای کنترل **ترکهای پلاستیک ناشی از افت** بتن استفاده می‌شوند.

2-4-3-6- پلی اتیلن

بتن مسلح شده با الیاف پلی‌اتیلن با میزان الیاف بین 2 تا 4 درصد حجمی، رفتار بار خمشی - تغییرمکان خطی تا رسیدن به نقطه گسیختگی را نشان می‌دهد و پس از آن ظاهرا انتقال بار به الیاف صورت گرفته و باعث افزایش بار تا نقطه شکستگی الیاف می‌شود.

2

[1] - flexural toughness

2-4-4- الیاف طبیعی

الیاف طبیعی به دو دسته، الیاف طبیعی فرآوری‌شده[1] و الیاف طبیعی فرآوری‌نشده[2] تقسیم می-شوند.

مشخصات برخی از الیاف طبیعی در جدول (2-2) آمده است.

جدول 2- 2- مشخصات برخی از الیاف طبیعی[30]

Fibre type	Coconut	Sisal	Sugar cane bagasse	Bamboo	Jute	Flax	Ele-phant grass	Water reed	Plan-tain	Mu-samba	Wood fibre (Kraft pulp)
Fibre length, mm	50 - 100	N/A	N/A	N/A	175 - 300	500	N/A	N/A	N/A	N/A	2,5 - 5,0
Fibre diameter, mm	0,1 - 0,4	N/A	0,2 - 0,4	0,05 - 0,4	0,1 - 0,2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,025 - 0,075
Relative density	1,12 - 1,15	N/A	1,2 - 1,3	1,5	1,02 - 1,04	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1,5
Modulus of elasticity, GPa	19 - 26	13 - 26	15 - 19	33 - 40	26 - 32	100	5	5	1,5	1,0	N/A
Ultimate tensile strength, MPa	120 - 200	275 - 570	180 - 290	350 - 500	250 - 350	1 000	180	70	90	80	700
Elongation at break, %	10 - 25	3 - 5	N/A	N/A	1,5 - 1,9	1,8 - 2,2	3,6	1,2	5,9	9,7	N/A
Water absorption, %	130 - 180	60 - 70	70 - 75	40 - 45	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	50 - 75
Notes N/A Properties not readily available or not applicable.											

2-5- بتن مسلح شده با الیاف فولادی[3] (SFRC)

2-5-1- مقدمه [31]

یکی از مهمترین مشخصات بتن مسلح شده با الیاف فولادی، **مقاومت خوب آن در مقابل ترک خوردگی و انتشار ترک است.** به دلیل توانایی مقابله در برابر ترک، مواد مرکب حاوی الیاف،

[1] - processed natural fibres
[2] - unprocessed natural fibres
[3] - **S**teel **F**ibre **R**einforced **C**oncrete

مقاومت کششی بالایی، مخصوصا در بارگذاری خمشی دارند و قادر هستند حتی پس از ترک خوردگی وسیع، بتن را در کنار یکدیگر نگه دارند. بدین ترتیب مواد مرکب الیافی، در شکل‌پذیری بعد از ترک خوردن، نقش عمده‌ای را ایفا می‌نمایند. انتقال از یک ماده شکننده به یک ماده شکل‌پذیر، باعث افزایش جذب انرژی مواد مرکب الیافی می‌شود و توانایی آن را در تحمل بارهای متناوب و بارگذاری زلزله افزایش می‌دهد.

بتن ساده و غیر مسلح، یک ماده شکننده با مقاومت کششی کم و ظرفیت کرنشی کم می‌باشد. نقش الیاف مجزا که به صورت تصادفی در بتن پخش می‌شود، این است که به صورت پلی در امتداد ترک عمل می‌کند و بدین ترتیب شکل‌پذیری بعد از ترک را ایجاد می‌کند. نقش واقعی الیاف در افزایش طاقت[1] بتن (که به صورت تابعی از سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان تعریف می‌شود)، تحت هر نوع بارگذاری می‌باشد. بهمین دلیل الیاف، کرنش در بار ماکزیمم را افزایش می‌دهند و مقدار زیاد جذب انرژی در ناحیه پس از اوج منحنی بار - تغییرمکان را فراهم می‌کنند.

الیاف فولادی نمی‌توانند به عنوان جایگزینی مستقیم برای مسلح کننده‌های طولی در اعضای سازه‌ای مسلح و پیش تنیده باشند، ولی در هر حال حضور الیاف در بتن در بهبود مقاومت اعضای سازه‌ای عادی مسلح شده در برابر ترک خوردگی و تغییرمکان نقش موثری دارد[31].

الیاف فولادی باعث افزایش ظرفیت کرنشی، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت خمشی، مقاومت خستگی، جذب انرژی و مقاومت کششی می‌شوند[29،32]. افزایش در این مشخصات بر اساس نوع و مقدار الیاف مورد استفاده، ممکن است از صفر تا یک مقدار اساسی باشد. البته بهبود مشخصات یاد شده به میزان افزایش الیاف، اتفاق نمی‌افتد.

در حالت کلی، در کابردهای سازه‌ای الیاف فولادی باید در نقش مکمل میلگردهای مسلح کننده باشد. الیاف فولادی می‌توانند از وقوع ترک جلوگیری کرده و مقاومت در برابر از دست رفتن مقاومت مصالح در نتیجه خستگی، ضربه، افت بتن و تنش‌های حرارتی را بهبود بخشند. روش طراحی محافظه کارانه و قابل توجیه در اعضای سازه‌ای که بارهای خمشی و کششی در آنها وجود دارد، مثل تیرها، ستون‌ها، دال‌ها (سقف‌ها، کف‌ها و دال‌هایی که بر روی شیب واقع نیستند)، این است که میلگردهای مسلح‌کننده برای تحمل بارهای کششی استفاده شود. زیرا الیاف فولادی به طور تصادفی پخش می-

[1] - toughness

شوند و ممکن است در موقعیت‌های بحرانی مقدار کمی الیاف داشته باشیم، که باعث کاهش مقاومت شود.

در کاربردهایی که حضور مسلح‌کننده‌های پیوسته مثل میلگرد برای ایمنی سازه ضروری نباشد، به عنوان مثال در کف‌های واقع بر روی شیب‌ها، روکش‌ها، پیاده‌روها و در پوشش‌های بتن پاششی[1]، بهبود در مقاومت خمشی، مقاومت در برابر ضربه و خستگی، با استفاده از الیاف می‌تواند بدست آید و همچنین الیاف در کاهش ضخامت و بهبود عملکرد موثر خواهد بود.

ACI 318، استفاده از مقاومت کششی افزایش یافته بتن در نتیجه وجود الیاف را در طراحی‌های ساختمانی در نظر نمی‌گیرد و طراحی مسلح‌کننده‌ها باید روال عادی را طی بکند[32] .

2-5-2- کاربردهای SFRC [31]

SFRC، عمدتا در روکش پیاده‌روها، روکش فرودگاه‌ها و به طور کلی در روسازی ها، آستر تونل‌ها، دال‌ها و سنگفرش‌ها، بتن پاششی[2]، تعمیرات دال عرشه پل‌ها، سازه‌های هیدرولیکی، پوسته‌های نازک، و تولید قطعات پیش‌ساخته بکار می‌رود[29،31] .

متاسفانه به دلیل گرانی الیاف، کاربردهایSFRC به موارد خاصی محدود شده است. افزودن 1٪ الیاف، تقریبا قیمت مصالح بتن را دو برابر می‌کند[31] .

2-5-3- انواع الیاف فولادی از نظر شکل ظاهری[33]

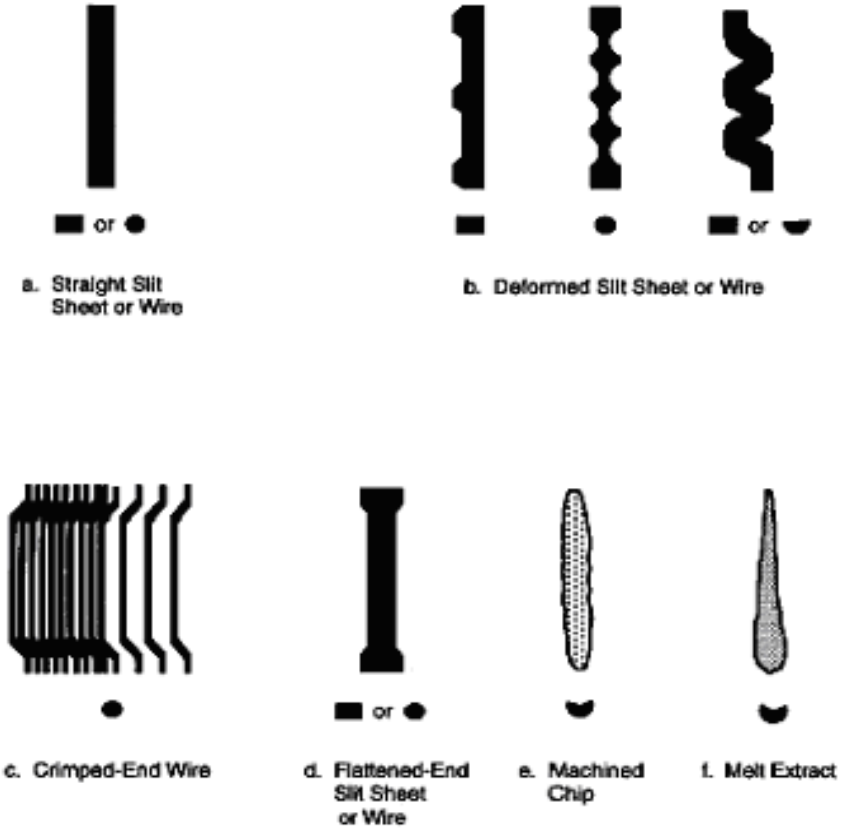
قدیمی‌ترین و در عین حال اساسی‌ترین نوع الیاف فولادی، الیاف مستقیم هستند. متاسفانه در چنین الیافی به دلیل عدم مهار مناسب الیاف در بتن، از تمامی مقاومت الیاف استفاده نمی‌شود. بیش از 90٪ الیاف تولید شده الیاف شکل دار می‌باشند. شکل الیاف طوری انتخاب می‌شود که افزایش مهار الیاف را در پی داشته باشد. در طی 40 سال گذشته، الیاف فولادی به اشکال تابدار[3]، چین خورده[4]،

[1] -shotcrete
[2] -shotcrete
[2] -twisted
3-crimped
4-flattend
5-hooked

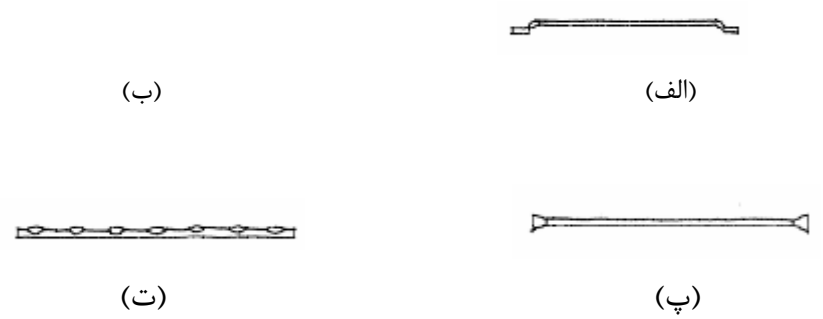
مسطح[1]، مخروطوار[2]، سرکج[3](قلاب مانند) و دارای بافت سطحی[4] تولید شده‌اند. این الیاف فولادی دارای سطح مقطع‌های مدور، مربعی و مستطیلی یا نامنظم می‌باشند.

دهه‌ها تجربه، باعث تولید 5 نوع الیاف فولادی مؤثر شد. مؤثر بودن الیاف تولیدی بر اساس مؤثر بودن آنها در بتن و آسانی تهیه آن که تاثیر مهمی بر روی بهای آن دارد، سنجیده می‌شود. این 5 نوع الیاف مؤثر عبارتند از: مستقیم، سرکج، چین‌خورده، با انتهای مخروطی و الیاف تغییر شکل‌یافته مکانیکی. هندسه این الیاف در شکل (2-2) نشان داده شده است.

تحلیل‌های آماری در جهان دلالت بر این دارند که 67.1٪ الیاف از نوع الیاف سرکج می‌باشد. دیگر الیاف ویژه مهم عبارتند از: الیاف مستقیم 9.1٪ ، الیاف با تغییرشکل مکانیکی9.1 ٪، الیاف چین-خورده 7.9٪ و الیاف با شرایط انتهایی دیگر 6.6٪.



6-coned
7-surface-textured



شکل 2-2- انواع مختلف الیاف فولادی ؛ الف) چین‌خورده، ب) سرکج، پ) با انتهای مخروطی، ت) با تغییر شکل مکانیکی [30،33]

پارامتر عددی متداولی که برای توصیف الیاف فولادی استفاده می‌شود، نسبت ظاهری[1] الیاف می‌باشد که به صورت نسبت طول به قطر الیاف تعریف می‌شود. اگر سطح مقطع الیاف مدور نباشد، قطر معادل الیاف که به صورت قطر دایره‌ای با همان سطح مقطع تعریف می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد[32] .

2-5-4- طرح اختلاط SFRC [31]

بسته به کاربرد SFRC، و احتیاجاتی از قبیل مقاومت، کارآیی و ... ، نسبت‌های اختلاط SFRC تعیین می‌شود. در حالت کلی مخلوط‌های SFRC، شامل **میزان سیمان بیشتر** و **نسبت ریزدانه به درشت دانه بیشتری** نسبت به بتن معمولی می‌باشند و ممکن است روش‌های طرح اختلاط بکار رفته برای بتن معمولی، برای بتن SFRC قابل کاربرد نباشند. به طور معمول برای کاهش میزان سیمان، **ممکن است تا 35 درصد سیمان با خاکستر بادی** جایگزین شود. علاوه بر این، برای بهبود کارآیی مخلوط‌های با حجم بالای الیاف، **اغلب از افزودنی‌های کاهنده آب و مخصوصا فوق روان کننده‌ها** استفاده می‌شود. محدوده نسبت‌های مورد استفاده برای SFRC، با وزن معمولی در جدول(2-3)، نشان داده شده است.

[1] - aspect ratio

جدول 2-3- محدوده نسبت‌های اختلاط برای بتن مسلح شده با الیاف با وزن معمولی [31]

Property	Mortar	9.5mm Maximum aggregate size	19 mm Maximum aggregate size
Cement (kg/m^3)	415-710	355-590	300-535
w/c ratio	0.3-0.45	0.35-0.45	0.4-0.5
Fine/coarse aggregate(%)	100	45-60	45-55
Entrained air (%)	7-10	4-7	4-6
Fibre content (%) by volume			
smooth steel	1-2	0.9-1.8	0.8-1.6
deformed steel	0.5-1.0	0.4-0.9	0.3-0.8

کارآیی الیاف تحت تاثیر مقدار ذرات سنگدانه می‌باشد. نسبت ظاهری الیاف نیز بر کارآیی مخلوط SFRC تاثیر دارد. **با افزایش نسبت ظاهری، کارآیی مخلوط بتنی کاهش** می‌یابد. چنانچه نسبت **ظاهری الیاف بزرگتر از 100** باشد، در عمل بدست آوردن **یک مخلوط یکنواخت، خیلی مشکل** است.

2-5-5- تکنولوژی تولید SFRC [31]

در حالت کلی،SFRC را می‌توان با استفاده از بتن معمولی تولید کرد، ولی به وضوح برخی تفاوت-های مهم بین آن دو وجود دارد. برای بدست آوردن بهبود مطلوب در رفتار مکانیکی SFRC، مسئله اساسی وارد کردن حجم کافی از الیاف که به طور یکنواخت در مخلوط بتنی پخش شود، می‌باشد. به طوری‌که کارآیی مخلوط تازه برای اختلاط مناسب، قالب ریزی و پرداخت مناسب حفظ شود. عملکرد بتن سخت شده با استفاده از الیاف با نسبت ظاهری بزرگ، به دلیل بهبود مرز بین الیاف و بتن افزایش می‌یابد، ولی اثر معکوسی در کارآیی مخلوط تازه دارد. به طورکلی، با افزایش طول و حجم الیاف، مشکلات کارآیی و توزیع یکنواخت الیاف افزایش می‌یابد. نسبت ظاهری الیاف فولادی به خاطر کارآیی بتن، نباید بیشتر از 150 باشد[33] .

یکی از مشکلات اساسی در بدست آوردن یک مخلوط یکنواخت، تمایل الیاف به گلوله شدن یا به هم چسبیدن است. بدین ترتیب باید در هنگام اختلاط بتن، کاملا احتیاط کرد.

2

-5-6- مشخصات مکانیکی استاتیکی

2-5-6-1- کلی

مشخصات مکانیکی بتن مسلح‌شده با الیاف تحت تاثیر نوع الیاف، نسبت طول به قطر الیاف (نسبت ظاهری الیاف)، مقدار الیاف، مقاومت بتن، ابعاد، شکل و روش آماده‌سازی نمونه‌ها و همچنین ابعاد سنگدانه‌ها قرار می‌گیرد[32] .

الیاف، تقریبا در همه مودهای گسیختگی، مخصوصا مودهایی که در نتیجه خستگی و تنش کششی بوجود می‌آیند، مشخصات مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشند. برای مثال، کشش مستقیم، خمش، ضربه و برش (Gopalaratnam-1987، Shah). مکانیزم مقاوم‌سازی الیاف، شامل انتقال تنش از ملات به الیاف توسط تنش‌های برشی سطحی یا اگر سطح الیاف شکل‌دار باشد، توسط درگیری مکانیکی بین الیاف و ملات، صورت می‌گیرد. بدین ترتیب تنش در کشش بوسیله الیاف و ملات حمل می‌شود، تا جایی که ملات ترک بخورد و سپس تنش کل به تدریج به الیاف منتقل شود.

دو متغیر مهم که مشخصات بتن مسلح‌شده با الیاف را تحت تاثیر قرار می‌دهند، کارآمدی الیاف و میزان الیاف (درصد حجمی یا وزنی الیاف)، می‌باشد. کارآمدی الیاف بوسیله مقاومت الیاف در مقابل کشیدگی کنترل می‌شود که از این نظر به مقاومت چسبندگی در سطح مشترک الیاف و ملات بستگی دارد. برای الیاف با سطح مقطع یکنواخت، مقاومت در برابر کشیدگی با افزایش طول الیاف افزایش می‌یابد. الیاف بلندتر اثر زیادتری در بهبود مشخصات عضو مرکب دارند. همچنین از آنجایی که مقاومت در برابر کشیدگی متناسب با مساحت سطح مشترک الیاف با ملات می‌باشد، الیاف با سطح مقطع‌های غیر مدور و الیاف مدور با قطر کوچکتر، به خاطر داشتن مساحت سطحی بزرگتر در واحد حجم نسبت به الیاف مدور با قطر بزرگتر کارآمدی بیشتری دارند.

همچنین مساحت سطحی بزرگتر (یا کوچکتر)، مقاومت چسبندگی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین برای یک طول معلوم، نسبت زیاد طول به قطر الیاف (نسبت ظاهری)، کارآمدی الیاف را افزایش می‌دهد.

تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از الیاف با نسبت ظاهری بزرگتر از 100، معمولا باعث کارآیی ناکافی مخلوط بتنی، توزیع غیر یکنواخت الیاف یا هر دو می‌شود. در بیشتر مخلوط‌هایی که در عمل استفاده می‌شود، الیاف با نسبت ظاهری کمتر از 100 استفاده می‌شود و گسیختگی عضو ابتدا به

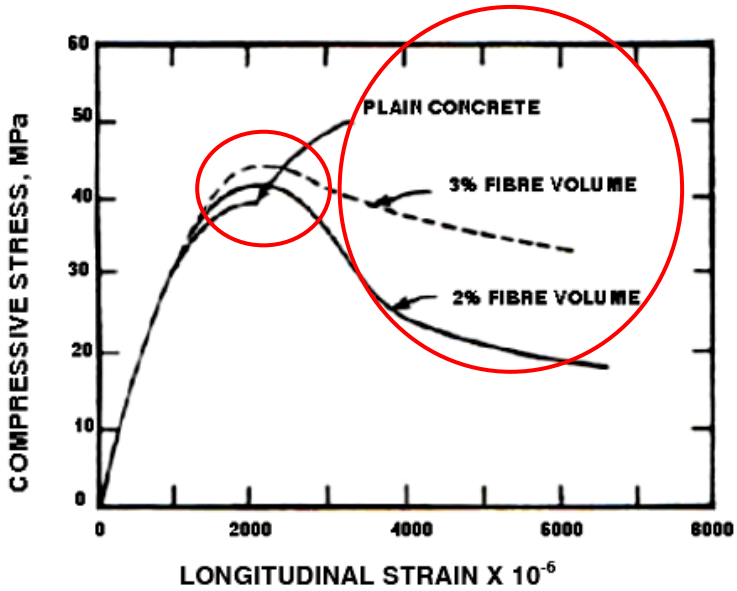
صورت کشیدگی الیاف می‌باشد. افزایش مقاومت در برابر کشیدگی، بدون افزایش نسبت ظاهری الیاف، در مورد الیاف با سطوح شکل‌دار یا با مهار انتهایی بدست می‌آید[32].

2-5-6-2- مقاومت فشاری

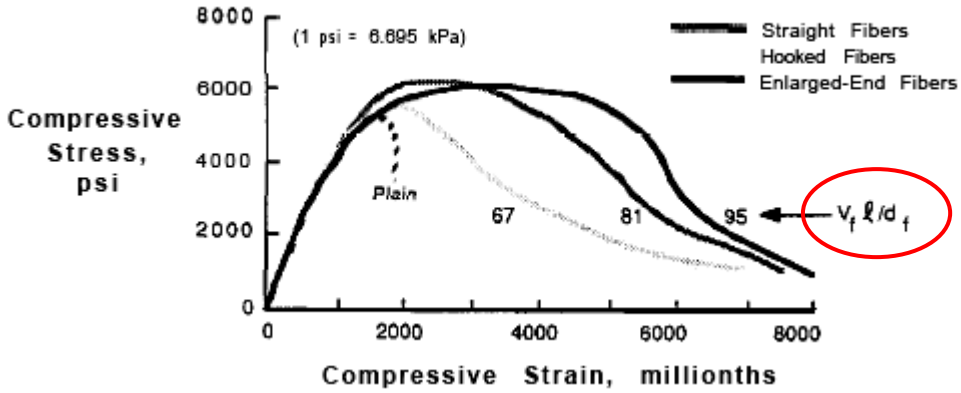
به طور کلی افزایش مقاومت فشاری استاتیکی با استفاده از الیاف، خیلی کم است. محدوده افزایش مقاومت ممکن است از صفر تا 25 درصد باشد. حتی در اعضایی که علاوه بر الیاف فولادی، به طور عادی مسلح شده‌اند، الیاف اثر کمی بر روی مقاومت فشاری دارند. ولی با این حال الیاف، به طور اساسی شکل پذیری پس از ترک یا انرژی جذب شده را افزایش می‌دهند. منحنی-های تنش-کرنش SFRC در فشار، در شکل (2-3) نشان داده شده است[31].

نمونه‌ای از منحنی‌های تنش-کرنش برای بتن مسلح شده با الیاف فولادی در فشار، در شکل‌های (2-4)، (2-5) و (2-6) آمده است[32].

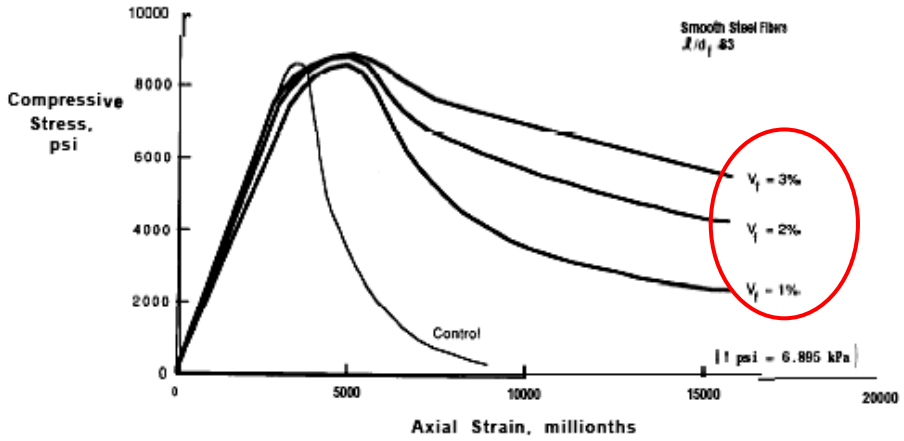
چنانچه از منحنی‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش حجم الیاف یا با افزایش نسبت ظاهری الیاف، جذب انرژی یا طاقت نیز افزایش می‌یابد.



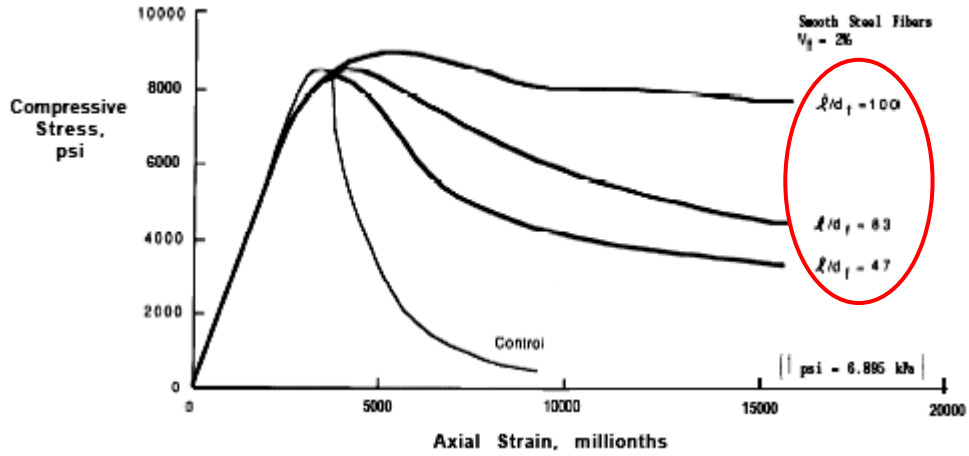
شکل 2-3- منحنی تنش-کرنش در فشار برای SFRC [31]



شکل 2-4- منحنی تنش-کرنش برای بتن مسلح شده با الیاف در فشار[32]



شکل 2-5- **اثر درصد حجمی الیاف در منحنی تنش-کرنش در فشار**[32]

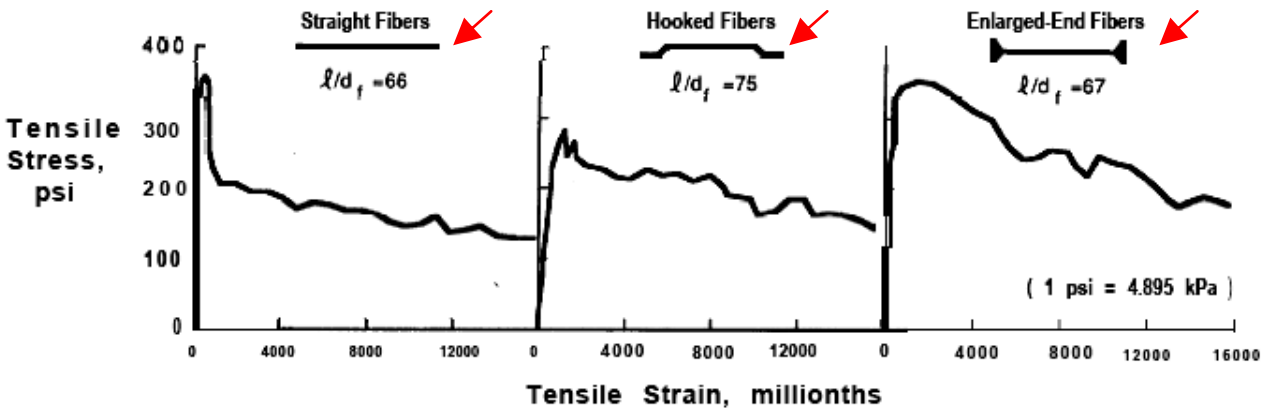


شکل 2-6- **اثر نسبت ظاهری الیاف در منحنی تنش-کرنش**[32]

در این منحنی‌ها افزایش اساسی در کرنش مربوط به تنش ماکزیمم، قابل ذکر است و شیب شاخه نزولی کمتر از نمونه‌های کنترل بدون الیاف است و این امر دلالت بر طاقت[1] بیشتر دارد. طاقت به صورت توانایی جذب انرژی در طول تغییر شکل تعریف می‌شود و می‌تواند با محاسبه سطح زیر منحنی تنش-کرنش یا بار- تغییرمکان بدست آید. بهبود طاقت در فشار که توسط الیاف ایجاد می-شود، در جلوگیری از گسیختگی ناگهانی تحت بارهای استاتیکی و جذب انرژی تحت بارهای دینامیکی مفید است [32].

2-5-6-3- کشش مستقیم

نمونه‌ای از منحنی‌های تنش-کرنش ملات مسلح شده با الیاف فولادی در شکل (2-7) نشان داده شده است. شاخه صعودی منحنی تا اولین ترک، شبیه ملات غیر مسلح می‌باشد. بخش نزولی منحنی، بستگی به پارامترهای الیاف مسلح‌کننده از قبیل شکل الیاف، مقدارالیاف و نسبت ظاهری الیاف دارد[32].



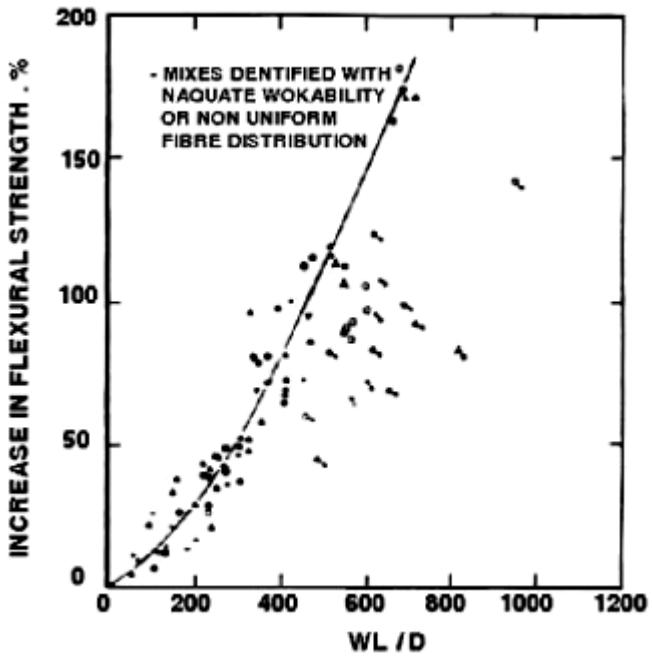
شکل 2-7- **منحنی‌های تنش-کرنش برای ملات مسلح شده با الیاف فولادی در کشش**(با 1.73٪ حجمی الیاف) .

[32]

[1] -toughness

2-5-6-4- مقاومت خمشی

الیاف فولادی ممکن است **اثر خیلی زیادی در مقاومت خمشی SFRC** نسبت به مقاومت فشاری و کششی داشته باشند[32،31]. در این مورد **حتی افزایشی در حدود 100 ٪ نیز** گزارش شده است. افزایش در مقاومت خمشی نه فقط به حجم الیاف، بلکه به نسبت ظاهری الیاف نیز بستگی دارد. نسبت ظاهری زیاد الیاف، باعث افزایش مقاومت زیادی می‌شود. شکل (2-8)، اثر الیاف را بر حسب پارامتر ترکیبی WL/D، توصیف می‌کند، که L/D، نسبت ظاهری و W، درصد وزنی الیاف می-شود.

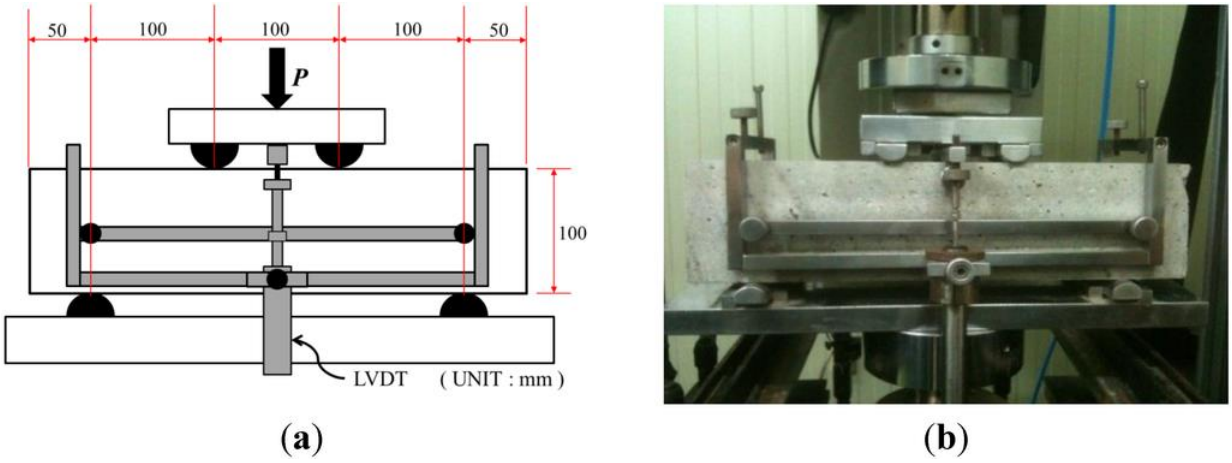


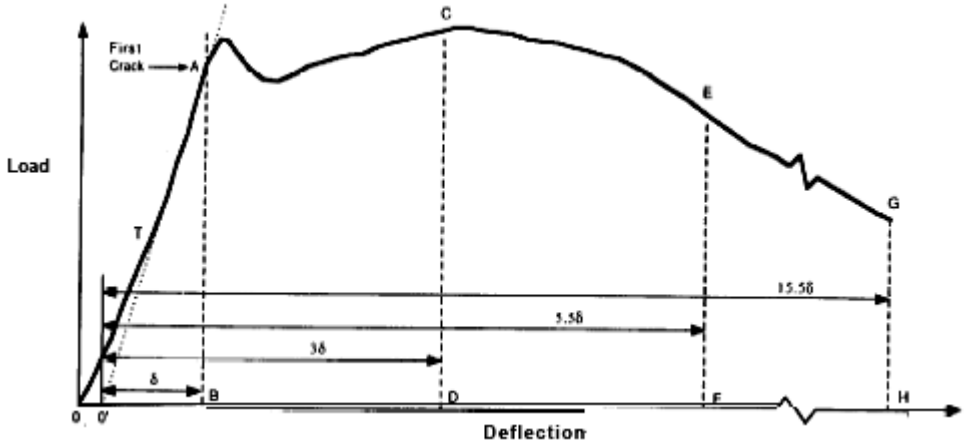
شکل 2-8- **اثر WL/D بر روی مقاومت خمشی بتن**[31]

چنانچه قبلا نیز گفته شد، الیاف نه فقط به خاطر بهبود مقاومت، بلکه در ابتدا به خاطر بهبود طاقت و ظرفیت جذب انرژی، به بتن اضافه می‌شوند. به طور معمول طاقت خمشی به صورت سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان در خمش تعریف می‌شود.

منحنی‌های بار- تغییرمکان برای انواع مختلف و حجم‌های مختلف الیاف فولادی تفاوت‌های زیادی باهم دارند. شکل(2-9)، مشخصه‌های مهم منحنی بار-تغییرمکان را برای SFRC نشان می‌دهد. الیاف با مشخصات قیدی بهتر (الیاف شکل‌دار یا الیاف با نسبت ظاهری زیاد) مقادیر بیشتر طاقت را نسبت به الیاف صاف و مستقیم در همان حجم نشان می‌دهند [31]

مقاومت خمشی اولین ترک[1]، متناظر با باری است که در آن منحنی بار- تغییرشکل از حالت خطی خارج می‌شود (نقطه A در شکل(2-9)). بار ماکزیمم بدست آمده از منحنی بار- تغییرشکل، مقاومت خمشی نهایی[2] یا مدول شکست[3] نامیده می‌شود (نقطه c در شکل (2-9)) [32].





شکل 2-**9**- **مشخصه‌های مهم منحنی بار- تغییرمکان (ASTM C 1018)**[32]

روش تعیین مقاومت اولین ترک و مقاومت خمشی نهایی در ACI 544.2R و ASTM C 1018 براساس آزمایش تیرهای (100*100*350 mm)، تحت بارگذاری 3 نقطه‌ای آمده است.

[1] - first –crack flexural strength
[2] - ultimate flexural strength
[3] - Modulus of rupture

افزایش مقاومت خمشی نهایی در نتیجه الیاف بستگی به نسبت ظاهری و مقدار الیاف دارد. مقدار الیاف کمتر از 0.5 درصد حجمی و الیاف با نسبت ظاهری کم (کمتر از 50)، اثر ناچیزی در مشخصات مقاومت استاتیکی دارند. درمورد الیاف منشوری یا چین‌خورده یا با مهار انتهایی بهتر، افزایش مقاومت خمشی نسبت به ملات غیر مسلح بیشتر از 100٪ می‌باشد.

مشخصات پس از ترک خوردگی در منحنی بار- تغییرشکل، تحت تاثیر انتخاب نوع الیاف و درصد حجمی الیاف می‌باشد. الیاف با مشخصات قیدی بهتر (الیاف شکل‌دار، چین خورده)، مقاومت‌های بالاتری را نسبت به الیاف صاف با همان مقدار بدست می‌دهند، یا می‌توان گفت که با مقدار کمتری الیاف همان مقاومت را بدست می‌دهند.

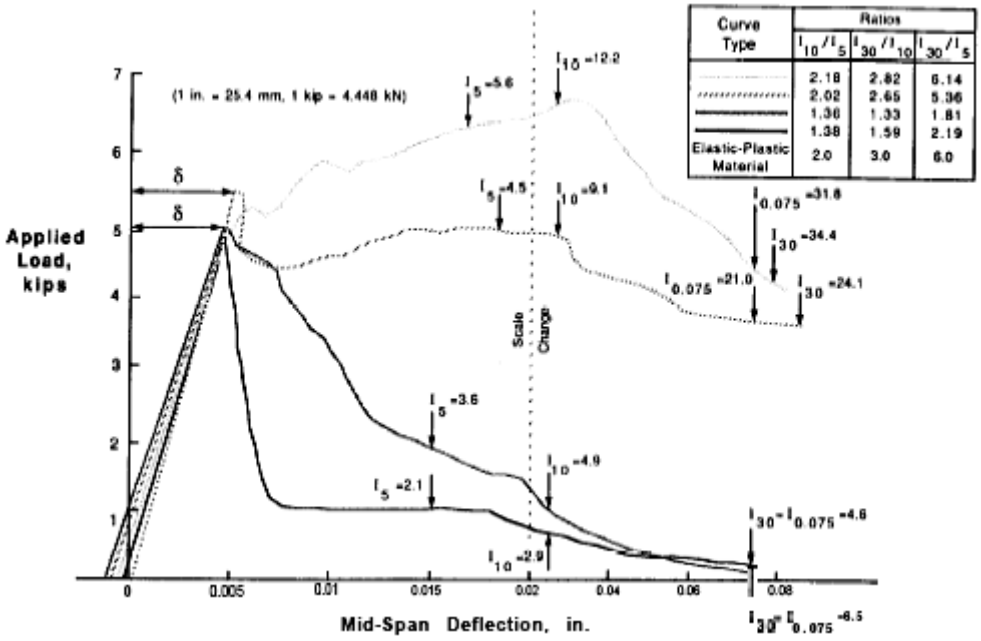
2-5-6-5- طاقت خمشی

طاقت مهمترین مشخصه قابل ذکر بتن مسلح‌شده با الیاف فولادی می‌باشد. مقادیر اندیس طاقت خمشی به صورت نسبت سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان تا یک نقطه مشخص به سطح زیر منحنی تا وقوع اولین ترک برای ملات بدون الیاف مطابق با ASTM C 1018 می‌باشد[32]. اندیس های متداولی که استفاده می‌شود، عبارتند از I_5 در $\delta 3$، I_{10} در $\delta 5.5$ و I_{30} در $\delta 15.5$ ، که δ ، تغییر مکان متناظر با اولین ترک می‌باشد. با افزایش درصد حجمی الیاف، اندیس طاقت افزایش می-یابد[34].

مقادیر اندیس طاقت بدست‌آمده با استفاده از استاندارد ASTM C 1018، به نوع، مقدار و نسبت ظاهری الیاف بستگی دارد. الیاف با حجم کمتر یا با مهار انتهایی نامناسب، مقادیر اندیس طاقت کمتری را بدست می‌دهند. شکل(2-10)، منحنی بار-تغییر مکان را برای انواع مختلف الیاف به همراه اندیس طاقت خمشی نشان می‌دهد[32].

2-5-6-6- خزش و افت[32]

نتایج آزمایشات نشان داده‌اند که الیاف فولادی **اثر کمی بر روی افت** SFRC دارند و افزودن الیاف فولادی، **کرنش خزشی** اعضای مرکب را به **طور مؤثری کاهش نمی‌دهد**. الیاف فولادی به طور **اساسی مقدار ترک‌خوردگی و عرض متوسط ترک را کاهش می‌دهند**.



شکل 2-10- منحنی بار- تغییرمکان برای انواع مختلف الیاف[32]

2-5-6-7- عملکرد تحت بارگذاری دینامیکی[32]

مقاومت دینامیکی بتن مسلح‌شده با انواع مختلف الیاف، که تحت بارگذاری‌های **سقوط وزنه، و بارهای خمشی، کششی و فشاری دینامیکی قرار دارند، 3 تا 10 برابر بیشتر از بتن مسلح** می‌باشد.

تیرهای مسلح شده با الیاف فولادی تحت بارگذاری ضربه‌ای به وسیله سقوط وزنه قرار گرفتند و مشاهده شد که انرژی جذب شده کل (که از منحنی بار- تغییرشکل بدست می‌آید)، توسط تیرهای SFRC می‌تواند بیشتر از 40 تا 100 برابر تیرهای غیرمسلح باشد.

2-6- مطالعات آزمایشگاهی انجام یافته بر روی SFRC

2-6-1- مشخصات مکانیکی بتن با مقاومت بالا مسلح شده با الیاف فولادی

در سال 2004، P.S.Song و S.Hwang، تحقیقاتی را برای ارزیابی مشخصات مکانیکی بتن با مقاومت بالا که با الیاف فولادی مسلح شده است، انجام دادند[34] .شکنندگی و مقاومت کششی کم و ظرفیت کرنشی پائین بتن با مقاومت بالا[1](HSC)، با افزودن الیاف فولادی می‌تواند بهبود یابد. مشخصات مکانیکی شامل مقاومت‌های فشاری و کششی دو نیم شدن[2]، مدول گسیختگی و اندیس طاقت می‌باشد. الیاف با مقادیر 0.5، 1، 1.5 و 2 درصد حجمی اضافه شدند. مقاومت فشاری بتن مسلح‌شده با الیاف در مقدار الیاف 1.5٪ حجمی، به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد، که بهبودی در حدود 15.3٪ نسبت به HSC نشان می‌دهد. با افزایش الیاف، مقاومت کششی دو نیم شدن و مدول گسیختگی افزایش می‌یابد و در حدود 98.3٪ و 126.6٪ بهبود در مقدار الیاف 2٪ حجمی دیده می‌شود.

آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد بتن به ابعاد 150*300mm و برروی نمونه‌های تیربه ابعاد 150*150*300mm برای آزمایش مقاومت خمشی انجام شد. جدول(2-4)، نتایج آزمایش مقاومت بر روی HSFRC[3] و HSC را نشان می‌دهد. هر یک از نتایج، متوسط نتایج آزمایش بر روی 15 نمونه می‌باشد.

جدول 2-4- نتایج آزمایش مقاومت بر روی HSFRC و HSC [34]

Strength test results and strength-effectiveness on HSFRC and HSC

Fiber volume fraction (%)	Compressive strength		Splitting tensile strength		Modulus of rupture	
	Measured (MPa)	Strength-effectiveness[a] (%)	Measured (MPa)	Strength-effectiveness[a] (%)	Measured (MPa)	Strength-effectiveness[a] (%)
0	85	–	5.8	–	6.4	–
0.5	91	7.1	6.9	19.0	8.2	28.1
1.0	95	11.8	8.7	50.0	10.1	57.8
1.5	98	15.3	10.8	86.2	12.3	92.2
2.0	96	12.9	11.5	98.3	14.5	126.6

[a] Strength-effectiveness $= \frac{\text{HSFRC strength} - \text{HSC strength}}{\text{HSC strength}} \times 100\%$.

2-6-1-1- مقاومت فشاری

[1] - High Strength Concrete
[2] - split tension
[3] - high strength fibre reinforced concrete

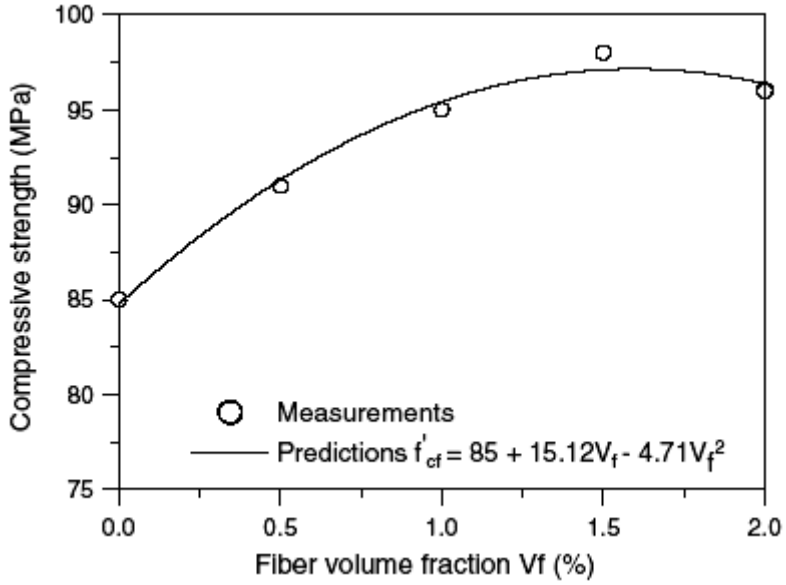
با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت فشاری HSFRC، f'_{cf} ، با استفاده از مقاومت فشاری f'_c ، HSC و درصد حجمی الیاف V_f ، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f'_{cf}(\text{MPa}) = f'_c + AV_f + BV_f^2. \quad (1\text{-}2)$$

با جایگذاری $f'_c = 85$ MP ، و با استفاده از تحلیل‌های برازشی، رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f'_{cf}(\text{MPa}) = 85 + 15.12V_f - 4.71V_f^2. \quad (2\text{-}2)$$

مقادیر بدست آمده از رابطه فوق، مطابقت خوبی با نتایج آزمایشات نشان می‌دهند. شکل (2-11)، رابطه مقاومت فشاری با درصد حجمی الیاف که به دو روش تجربی و معادله پیشنهادی بدست آمده است، را نشان می‌دهد.



شکل 2-11- **تاثیر حجم الیاف برروی مقاومت فشاری**[34]

2-1-6-2- مقاومت کششی دو نیم شدن

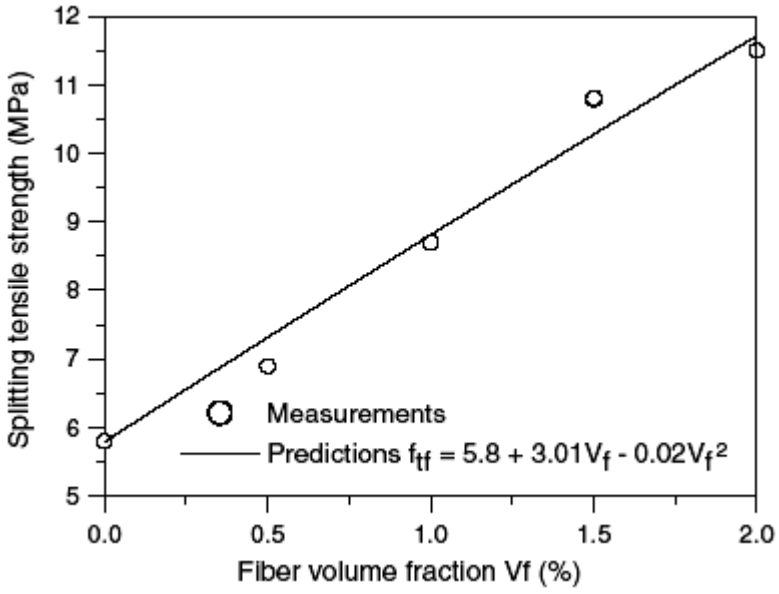
در مقایسه با HSC ، با افزایش درصد حجمی الیاف، مقاومت کششی دو نیم شدن نیز افزایش می-یابد. مقاومت کششی دو نیم شدن f_{tf} ، HSFRC، با استفاده از مقاومت فشاری(f'_c) HSC و درصد حجمی الیاف V_f ، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_{tf}(\text{MPa}) = A\sqrt{f'_c} + BV_f + CV_f^2. \quad (3\text{-}2)$$

با جایگذاری f'_c = 85 MPa ، و انجام تحلیل‌های برازشی معادله زیر حاصل می‌شود :

$$f_{tf}(\text{MPa}) = 5.8 + 3.01V_f - 0.02V_f^2. \quad (4\text{-}2)$$

شکل (12-2)، رابطه مقاومت کششی دو نیم شدن با درصد حجمی الیاف که به دو روش تجربی و معادله پیشنهادی بدست آمده است، را نشان می‌دهد.



شکل 2-12- **اثر درصد حجمی الیاف برروی مقاومت کششی دو نیم شدن**[34]

2-6-1-3- مدول گسیختگی[1]

چنانکه قبلا نیز گفته شد، بار ماکزیمم بدست آمده از منحنی بار- تغییرشکل، مقاومت خمشی نهایی[2] یا مدول گسیختگی[3] نامیده می‌شود.

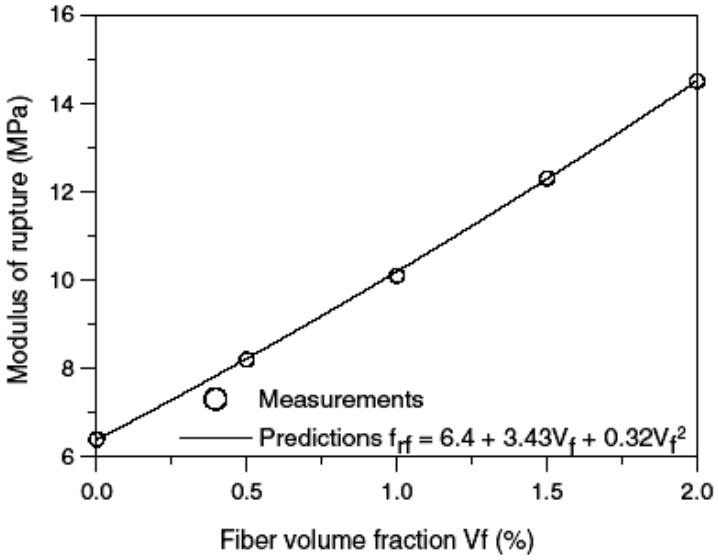
مقدار مدول گسیختگی f_{rf} ،HSFRC ، به مقاومت فشاری (f'_c) HSC و درصد حجمی الیاف V_f بستگی داشته و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$f_{rf}(\text{MPa}) = A\sqrt{f'_c} + BV_f + CV_f^2 \qquad (5\text{-}2)$$

با جایگذاری $f'_c = 85$ MPa ، و انجام تحلیل‌های برازشی معادله زیر حاصل می‌شود :

$$f_{rf}(\text{MPa}) = 6.4 + 3.43V_f + 0.32V_f^2 \qquad (6\text{-}2)$$

مدول گسیختگی برای HSFRC ، با درصدهای حجمی مختلف الیاف در شکل (2-13) نشان داده شده است. همچنین در جدول (2-5)، مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده مقاومت‌های فشاری و کششی دو نیم شدن و مدول گسیختگی مقایسه شده است.



شکل 2-13- **اثر درصد حجمی الیاف در مدول گسیختگی**[34]

[1] - modulus of rupture
[2] - ultimate flexural strength
[3] - Modulus of rupture

2-5- مقایسه مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده مقاومت‌های فشاری و کششی دو نیم شدن و مدول گسیختگی [34
[

Comparison of predicted and measured values for compressive and splitting tensile strengths and modulus of rupture

Fiber volume fraction (%)	Compressive strength			Splitting tensile strength			Modulus of rupture		
	Predicted (MPa)	Measured (MPa)	Prediction error[a] (%)	Predicted (MPa)	Measured (MPa)	Prediction Error (%)	Predicted (MPa)	Measured (MPa)	Prediction error (%)
0	85	85	0	5.8	5.8	0	6.4	6.4	0
0.5	91	91	0	7.3	6.9	5.80	8.2	8.2	0
1.0	95	95	0	8.8	8.7	1.15	10.2	10.1	0.99
1.5	97	98	−1.02	10.3	10.8	−4.63	12.3	12.3	0
2.0	96	96	0	11.7	11.5	1.74	14.5	14.5	0

[a] Prediction error $= \frac{\text{predicted value} - \text{measured value}}{\text{measured value}} \times 100\%$.

بدین ترتیب با ملاحظه نتایج فوق، می‌توان گفت که افزودن الیاف به بتن با مقاومت بالا، مقاومت فشاری آن را بهبود می‌بخشد. همچنین تاثیر افزودن الیاف به HSC، به ترتیب در مدول گسیختگی، مقاومت کششی دو نیم شدن و مقاومت فشاری بیشتر می‌باشد[34] .

2-6-2- رابطه تنش-کرنش فشاری SFRC در سنین اولیه

در سال 1999، Wolfgang Kusterl وYining Ding ، در تحقیقات خود مشخصات بتن مسلح شده با الیاف را در سنین اولیه مورد ارزیابی قرار دادند[35] . نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهند که در سنین اولیه، دوام بار ماکزیمم در بتن با الیاف فولادی در مقایسه با بتن ساده تحت بارهای فشاری افزایش می‌یابد. در جداول (2-7) و (2-8)، مقادیر متوسط دوام بار ماکزیمم[1]، به ترتیب برای بتن-هایی که 9 و 81 ساعت پس از بتن‌ریزی تحت آزمایش قرار گرفتند، نشان داده شده است.

جدول 2-7- مقادیر متوسط دوام بار ماکزیمم در سن 9 ساعت[35]

Average values of duration at the peak load and at the range of 95% peak load at the age of 9 h

Range of the load	Peak load	95% of the peak load
Duration of SFRC 60 (s)	14	57
Duration of plain concrete (s)	6	29

جدول 2-8- مقادیر متوسط دوام بار ماکزیمم در سن 81 ساعت[35]

[1] - duration at the peak load

Average values of duration at the peak load and at the range of 95% peak load at the age of 81 h

Range of the load	Peak load	95% of the peak load
Duration of SFRC 60 (s)	1	42
Duration of plain concrete (s)	1	41

مشاهده می‌شود که با افزایش سن SFRC، برای بتن سخت‌شده، الیاف فولادی تاثیری در دوام بار ماکزیمم ندارند. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول (2-9) آمده است.

جدول 2-9- مقاومت فشاری بتن و SFRC [35]

Development of compressive strength of concrete and SFRC

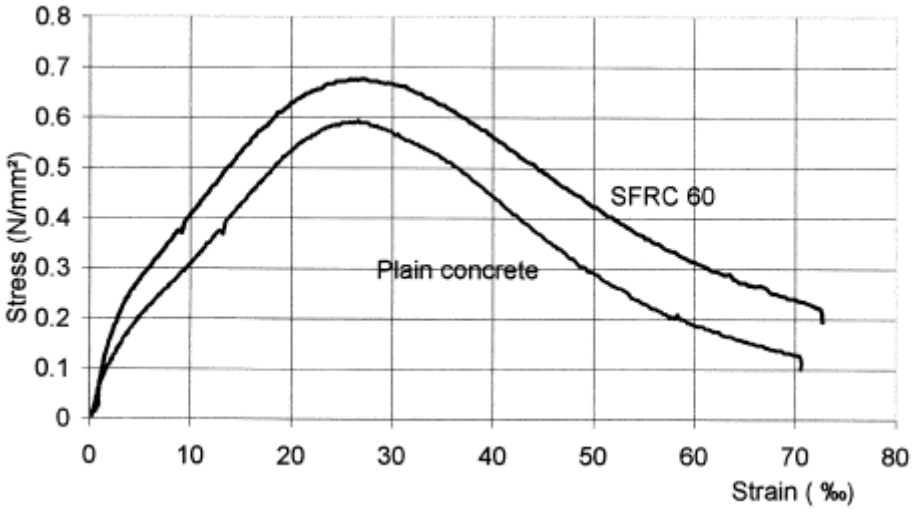
	Comprehensive strength (N/mm^2)					
Age of concrete (h)	8	10	18	30	48	72
Concrete without fibre	1.86	4.03	13.89	25.87	32.56	36.06
SFRC 20	2.35	5.11	18.63	26.33	32.65	37.52
SFRC 40	2.5	5.08	15.5	23.5	32.44	37.13
SFRC 60	1.8	3.8	15	25	33.3	37

See Notation section for abbreviations.

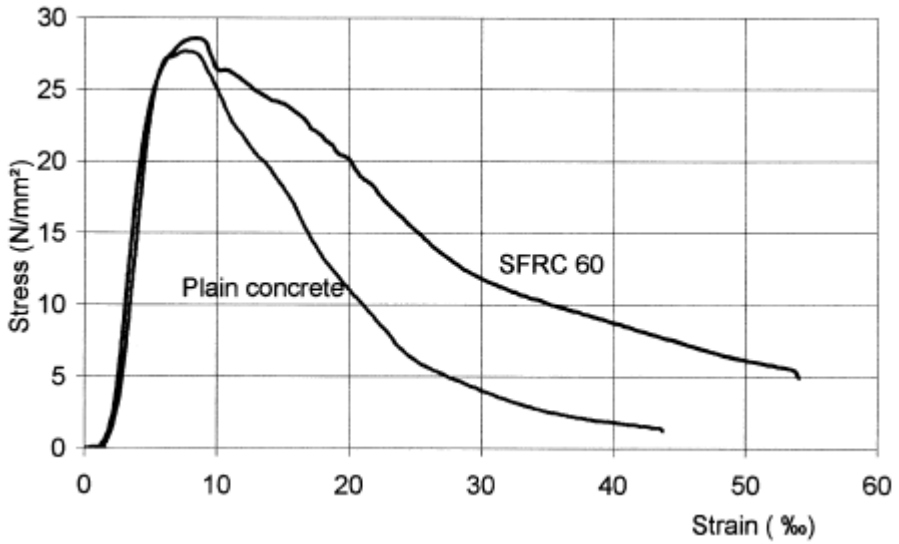
شکل(2-14)، نمونه تحت آزمایش فشاری را بعد از آزمایش نشان می‌دهد.

شکل 2-14- توزیع الیاف فولادی در نمونه مکعبی SFRC بعد از آزمایش مقاومت فشاری [35]

شکل‌های (2-15) و (2-16)، منحنی‌های تنش-کرنش بتن ساده و SFRC را، به ترتیب 9 و 81 ساعت پس از بتن‌ریزی نشان می‌دهند. در سنین اولیه، الیاف فولادی جذب انرژی و شکل‌پذیری بتن را تحت بارهای فشاری، نه فقط در ناحیه پس از ترک، بلکه همچنین قبل از بار ماکزیمم نیز افزایش می‌دهند. در درازمدت، الیاف فولادی جذب انرژی و شکل‌پذیری بتن سخت شده تحت فشار را، به طور عمده‌ای پس از بار ماکزیمم افزایش می‌دهند.



شکل 2-15- مقایسه منحنی تنش-کرنش بتن ساده و بتن SFRC با مقدار $60\ kg/m^3$ در سن 9 ساعت[35]



شکل 2-16- مقایسه منحنی تنش-کرنش بتن ساده و بتن SFRC با مقدار $60\ kg/m^3$ در سن 81 ساعت[35]

در جداول (2-10) و(2-11)، مقادیر متوسط جذب انرژی، به ترتیب پس از 9 و 81 ساعت بعد از بتن‌ریزی نمونه‌ها آمده است.

جدول2-10- مقادیرمتوسط جذب انرژی در سن 9 ساعت[35]

Average values of energy absorption at the age of 9 h

Material	E_{p9}	E_{t9}
Plain concrete	9.26	22.4
SFRC 60	13.68	29.27

جدول 2-11- مقادیرمتوسط جذب انرژی در سن 81 ساعت[35]

Average values of energy absorption at the age of 81 h

Material	E_{p81}	E_{t91}
Plain concrete	106	396
SFRC 60	123	560

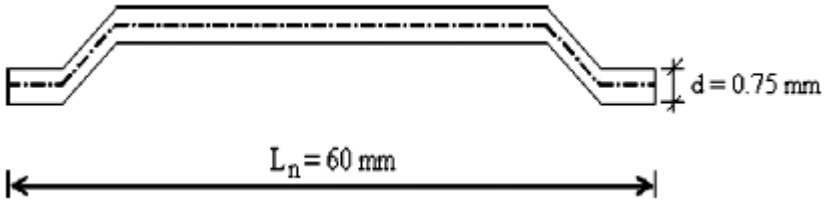
2-6-3- اثر افزودن الیاف در مشخصات مکانیکی بتن و تیرهای RC

در سال 2005، Faith Altun و همکارانش، با اضافه کردن الیاف فولادی به نمونه‌های بتن رده C20 و C30 با مقدار الیاف 0 ، 30 و 60 kg/m^3 ، مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم شدن، مدول الاستیسیته و طاقت آنها را اندازه گرفتند[36]. 9 تیر بتن مسلح RC به ابعاد خارجی 300*300*2000mm ، با مقدار الیاف 0 ، 30 و 60 kg/m^3، تحت بارگذاری خمش ساده قرار گرفتند. جدول (2-12)، طرح اختلاط بتن‌های مورد استفاده در آزمایشات را نشان می‌دهد. در شکل (2-7)، نیز نمونه‌ای از الیاف فولادی استفاده شده و در شکل (2-13)، نمونه‌ای از مخلوط بتنی تازه با الیاف فولادی آمده است.

جدول 2-12- طرح اختلاط بتن برای بتن‌های C20 و C30 [36]

Mix recipes for the 1 m^3 batches of the C20 and C30 classes of concrete used in the study

Ingredient	Amount (kg)	
	C20	C30
Mix water	162	170
Portland cement (≈ASTM Type I)	300	385
Filler (saturated surface-dry, SSD)	386	357
Natural sand (SSD)	472	448
Crushed medium aggregate (SSD)	467	455
Crushed coarse aggregate (SSD)	559	530



شکل 2-17- نمونه‌ای از الیاف مورد استفاده در تحقیق [36]

شکل2-18- نمونه‌ای از مخلوط بتنی تازه با الیاف فولادی[36]

نتایج آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بتن تحت فشار، نشان می‌دهد که در هر دو بتن رده C20 و C30، با افزودن 30 kg/m^3 الیاف فولادی، طاقت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در حالی که کاهش ناچیزی در مقاومت نهایی و مدول الاستیسیته رخ می‌دهد. همچنین با توجه به اینکه دو برابر کردن الیاف فولادی به مقدار 60 kg/m^3، بهبود خیلی کمی را در طاقت سبب می‌شود، واضح است که مقدار الیاف 30 kg/m^3، بهتر از مقدار 60 kg/m^3 می‌باشد.

با توجه به نتایج آزمایشات خمشی بر روی نمونه‌های تیری، می‌توان نتیجه گرفت که هم **بار نهایی** و هم **طاقت خمشی** تیرهای بتن مسلح در رده‌های بتن C20 و C30 با مقدار الیاف **30 kg/m^3**، در مقایسه با تیرهای RC بدون الیاف فولادی، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه دو برابر کردن مقدار الیاف، یعنی مقدار الیاف 60 kg/m^3، فقط بهبود خیلی کمی را در بار نهایی و طاقت نشان می‌دهد، واضح است که مقدار الیاف 30 kg/m^3، بهتر از مقدار 60 kg/m^3 می‌باشد.

بهبود زیاد طاقت در تیرهای RC با الیاف فولادی (SFARC[1]) دیده می‌شود.

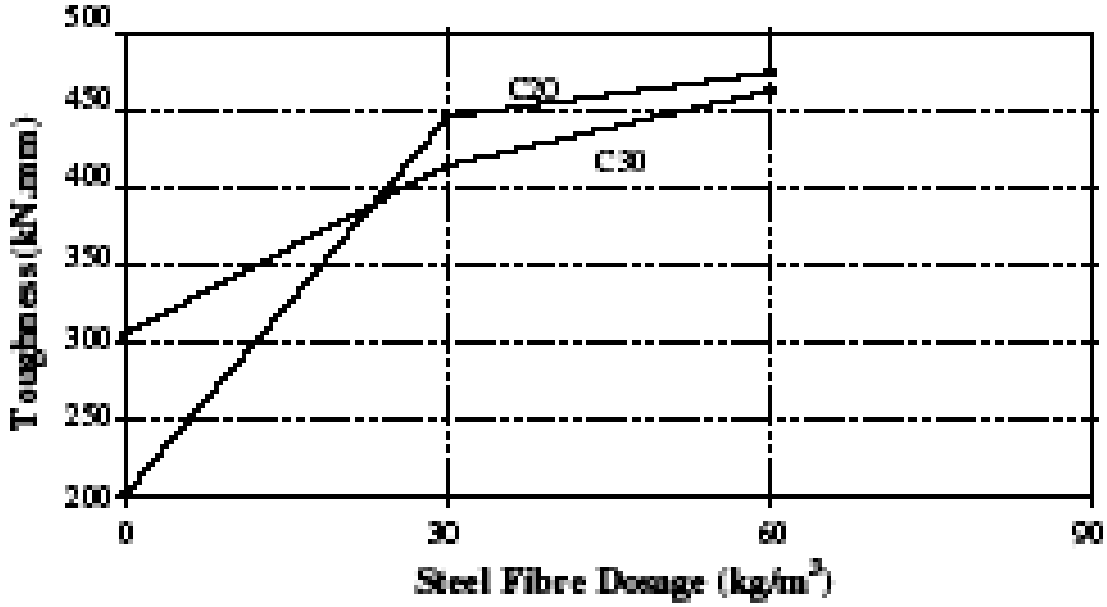
[1] - steel fibre added reinforced concrete

جدول (2-13)، نتایج آزمایشات خمشی را بر روی نمونه‌های تیر RC و SFARC نشان می‌دهد. در اشکال (2-19) و (2-20) رابطه بار نهایی و طاقت با مقدار الیاف برای نمونه‌های بتنی نشان داده شده است.

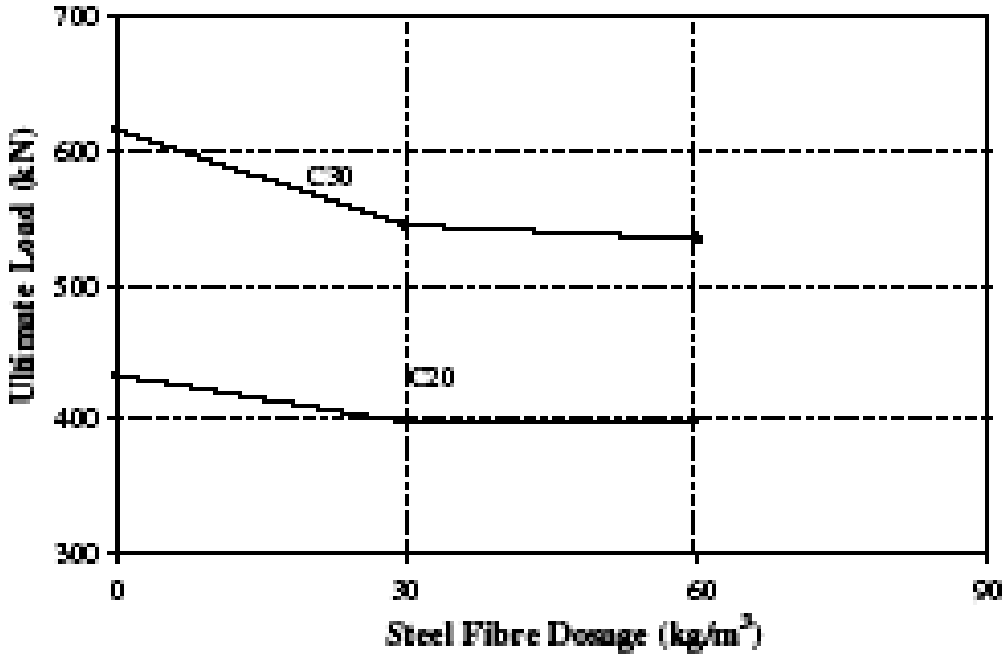
جدول 2-13- نتایج آزمایش خمشی بر روی نمونه‌های تیرRC و SFARC [36]

Results of the bending experiments on RC and SFARC beams

Beam sample	Concrete class	SF dosage (kg/m^3)	Tensile steel (mm)	Theoretical ultimate load (kN)	Measured ultimate load (kN)	(Experimental ultimate load)/ (theoretical ultimate load)	Average of (experimental ultimate load)/(theoretical ultimate load) ratios	Toughness (kN mm)
C20-1-0	C20	0	2Φ16	126.0	184.50	1.46	1.55	5495
C20-2-0					202.00	1.60		5970
C20-3-0					201.60	1.60		5830
C20-4-30		30	2Φ16	126.0	201.90	1.60	1.63	27,835
C20-5-30					202.30	1.61		27,550
C20-6-30					210.00	1.67		29,501
C20-7-60		60	2Φ16	126.0	210.30	1.67	1.67	29,830
C20-8-60					211.00	1.67		30,800
C20-9-60					209.00	1.66		29,800
C30-1-0	C30	0	2Φ16	148.6	262.30	1.77	1.74	10,782
C30-2-0					260.15	1.75		9925
C30-3-0					250.90	1.69		10,965
C30-4-30		30	2Φ16	148.6	320.25	2.16	2.26	26,382
C30-5-30					330.00	2.22		27,989
C30-6-30					357.20	2.40		29,856
C30-7-60		60	2Φ16	148.6	370.45	2.49	2.45	29,979
C30-8-60					368.75	2.48		30,045
C30-9-60					352.95	2.38		29,460



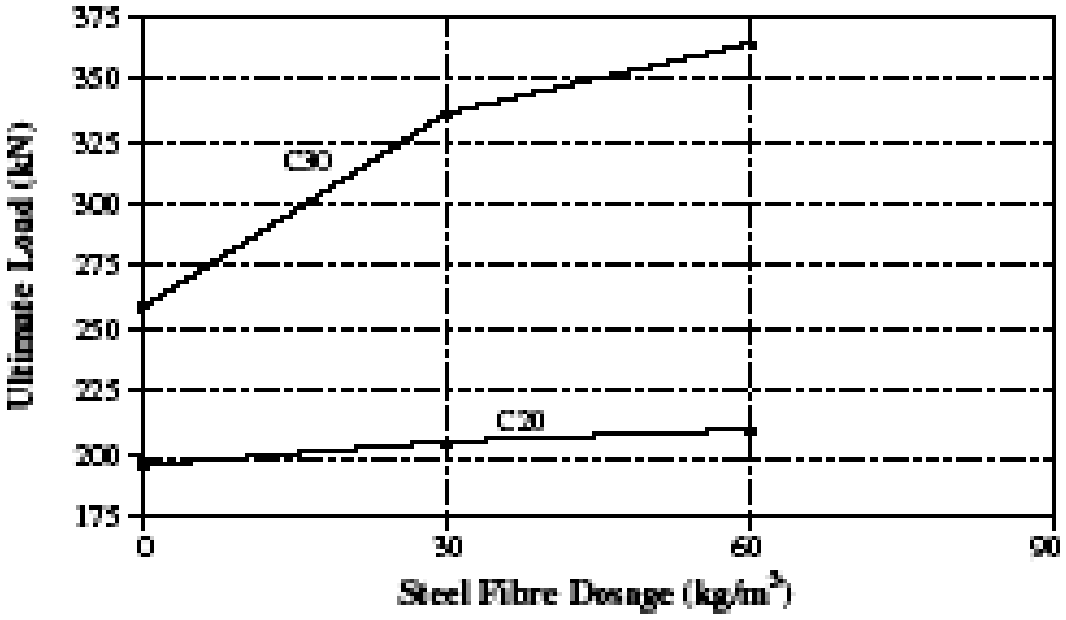
(الف) رابطه طاقت با مقدار الیاف برای نمونه‌های بتنی C30وC20



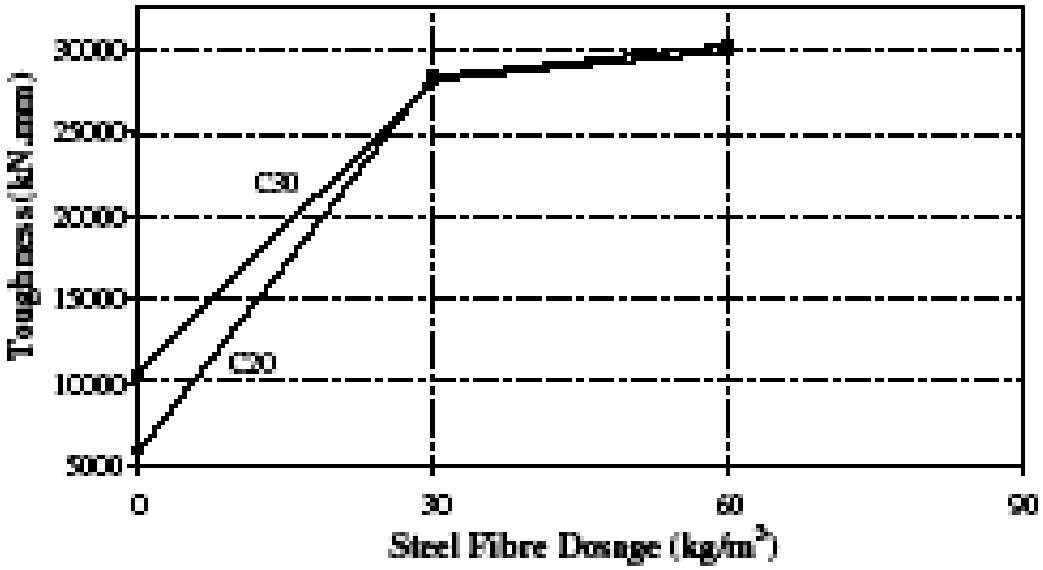
(ب) رابطه بار نهایی با مقدار الیاف برای نمونه‌های بتنی C30وC20

شکل 2-19- (الف) رابطه طاقت با مقدار الیاف (ب) رابطه بار نهایی با مقدار الیاف

برای نمونه‌های بتنی C30وC20 [36]



(الف) رابطه بار نهایی با مقدار الیاف برای نمونه‌های تیر بتنی SFARC



(ب) رابطه طاقت با مقدار الیاف برای نمونه‌های تیر بتنی SFARC

شکل 2-20- (الف) رابطه بار نهایی با مقدار الیاف (ب) رابطه طاقت با مقدار الیاف

برای نمونه‌های تیر بتنی SFARC [36]

2-7- خلاصه فصل

در این فصل، به تعریف بتن مسلح شده با الیاف یا به اصطلاح بتن الیافی و مزایا و معایب آن پرداخته شد. نمونه‌هایی از کاربردهای بتن الیافی نیز مطرح شده و آشنایی مختصری با انواع الیاف حاصل شد. در ادامه الیاف فولادی و خصوصیات بتن مسلح شده با الیاف فولادی یا SFRC بررسی شد. نتایج تحقیقات در زمینه SFRC نشان می‌دهند که استفاده از الیاف در بتن، مشخصات آن را بهبود می‌بخشند و می‌توان گفت که **SFRC دارای مزایایی از قبیل زیر می‌باشد:**

- **مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و ترک**
- **مقاومت کششی بالا مخصوصا در بارگذاری خمشی**
- **شکل‌پذیری پس از ترک**
- **افزایش طاقت و جذب انرژی**

همچنین استفاده از الیاف، بتن را از یک ماده شکننده به یک ماده شکل‌پذیر تبدیل می‌کند، مخصوصا در مورد بتن با مقاومت بالا که مهمترین خاصیت آن شکنندگی و عدم شکل‌پذیری کافی می‌باشد، استفاده از الیاف می‌تواند مؤثر واقع شود.

در نهایت نیز، نمونه‌هایی از کارهای آزمایشگاهی انجام یافته در مورد SFRC آورده شده است.