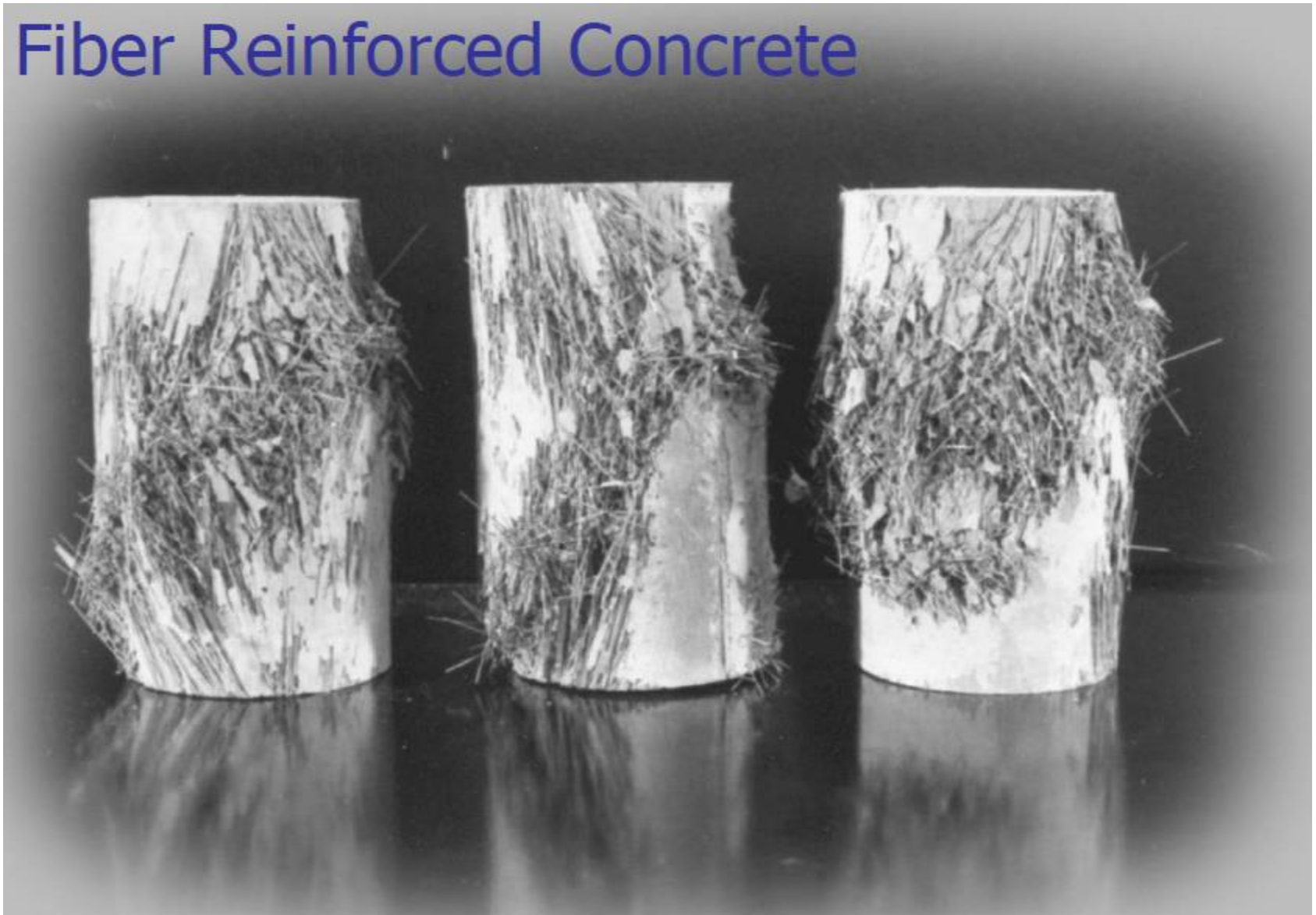
بتن الیافی



تعریف

- بتن ساخته‌شده از سیمان هیدرولیکی، آب، شن و ماسه و الیاف تفکیک شده و مجزا، بتن الیافی نامیده می‌شود.
- الیاف در شکل‌ها و اندازه‌های متفاوت و از جنس فولاد، شیشه، مواد مصنوعی و مواد طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- با این‌وجود، در بیشتر اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، الیاف فولادی بیشتر از انواع دیگر الیاف استفاده می‌شود.

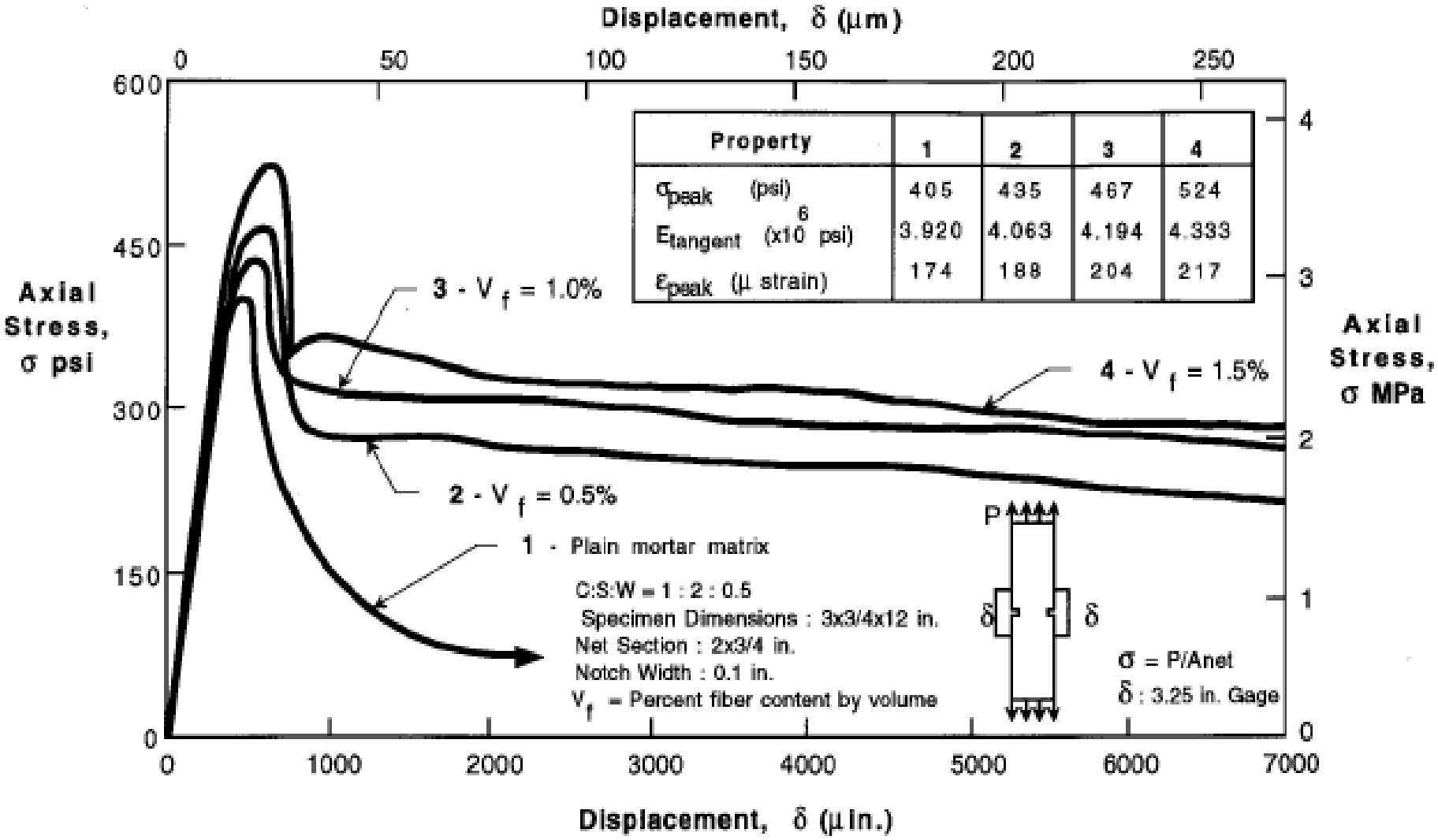
اهمیت

- بتن معمولی، دارای تعداد زیادی ترک‌های مویین است که به دلیل توسعه سریع ترک‌های مویین تحت تنش‌های اعمال‌شده، مقاومت کششی بتن کم است.
- در ابتدا فرض می‌شد که با به‌کاربردن الیاف در فواصل نزدیک به یکدیگر، از توسعه ترک‌های مویین جلوگیری شده و درنتیجه، مقاومت‌های کششی و خمشی بتن به‌میزان زیادی افزایش می‌یابد.
- همچنین الیاف، شروع ترک‌های کششی را به تأخیر انداخته و درنتیجه باعث افزایش مقاومت کششی بتن می‌شود.

اهمیت

- اما مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از الیاف با حجم و اندازه‌های مختلف در ملات یا بتن باعث افزایش مقاومت آنها، به‌میزان زیاد نمی‌گردد.
- بااین‌وجود، پژوهشگران، بهبود زیادی را در رفتار بتن‌های الیافی، در مرحلهٔ پس از ترک‌خوردگی پیدا کرده‌اند.
- به‌عبارت دیگر، علی‌رغم آنکه مقاومت نهایی کششی به‌میزان زیادی افزایش نمی‌یابد، اما کرنش کششی درهنگام گسیختگی افزایش می‌یابد. درنتیجه، در مقایسه با بتن ساده، بتن‌های الیافی سخت‌ترند و درمقابل ضربه مقاومت بیشتری دارند.

اهمیت

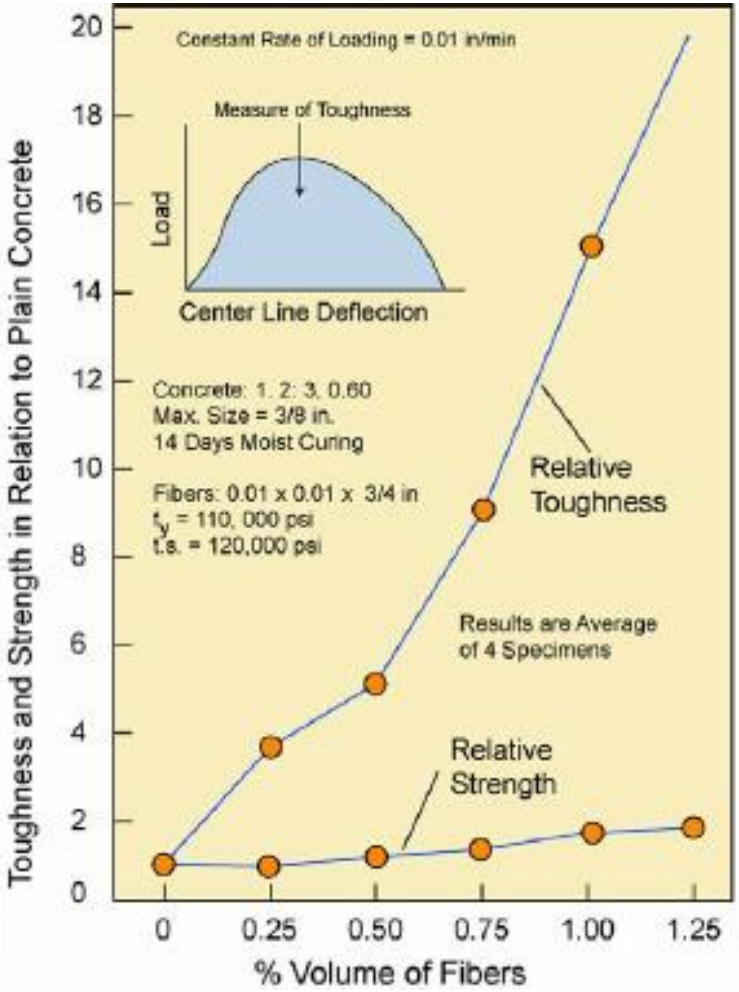


Property	1	2	3	4
σ_{peak} (psi)	405	435	467	524
$E_{tangent}$ ($\times 10^6$ psi)	3.920	4.063	4.194	4.333
ε_{peak} (μ strain)	174	188	204	217

Metric Equivalents: 1 ksi = 1000 psi = 6.895 MPa

1 in. = 25.4 mm

اهمیت



(a)

(b)

Type reinforcement	Aspect ratio L/d	Relative Strength	Relative Toughness
Effect of aspect ratio			
Plain concrete	0	1.00	1.0
	25	1.50	2.0
Random fiber	50	1.60	8.0
	75	1.70	10.5
	100	1.50	8.5
Effect of type reinforcement			
Conventional tensile bar	--	3.15	--
Random fibers	75	1.00	--

مکانیزم عمل

- بتن الیافی، بعد از ایجاد اولین ترک در خمیر سیمان، بار وارده را تحمل می‌کند، به‌شرط آنکه مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده‌شدن آنها در اولین ترک، بیش از بار در هنگام وقوع اولین ترک باشد.
- در مقطع ترک‌خورده، خمیر سیمان هیچ کششی را تحمل نمی‌کند و الیاف، تمام بار وارد بر مقطع مرکب را تحمل می‌کند.
- با افزایش بار بر روی مقطع مرکب، الیاف تمایل دارند که تنش‌های اضافی را از طریق تنش‌های پیوستگی به خمیر سیمان منتقل کنند.

مکانیزم عمل

- اگر این تنش‌های پیوستگی از مقاومت پیوستگی بیشتر نگردد، در خمیر سیمان ترک‌های دیگری نیز به‌وجود می‌آید.
- این روند ترک‌خوردگی تا آنجا ادامه می‌یابد که الیاف شکسته شوند و یا اینکه به‌علت ازبین‌رفتن پیوستگی، الیاف از درون بتن بیرون کشیده شوند.

مکانیزم عمل

بهینه سازی الیاف

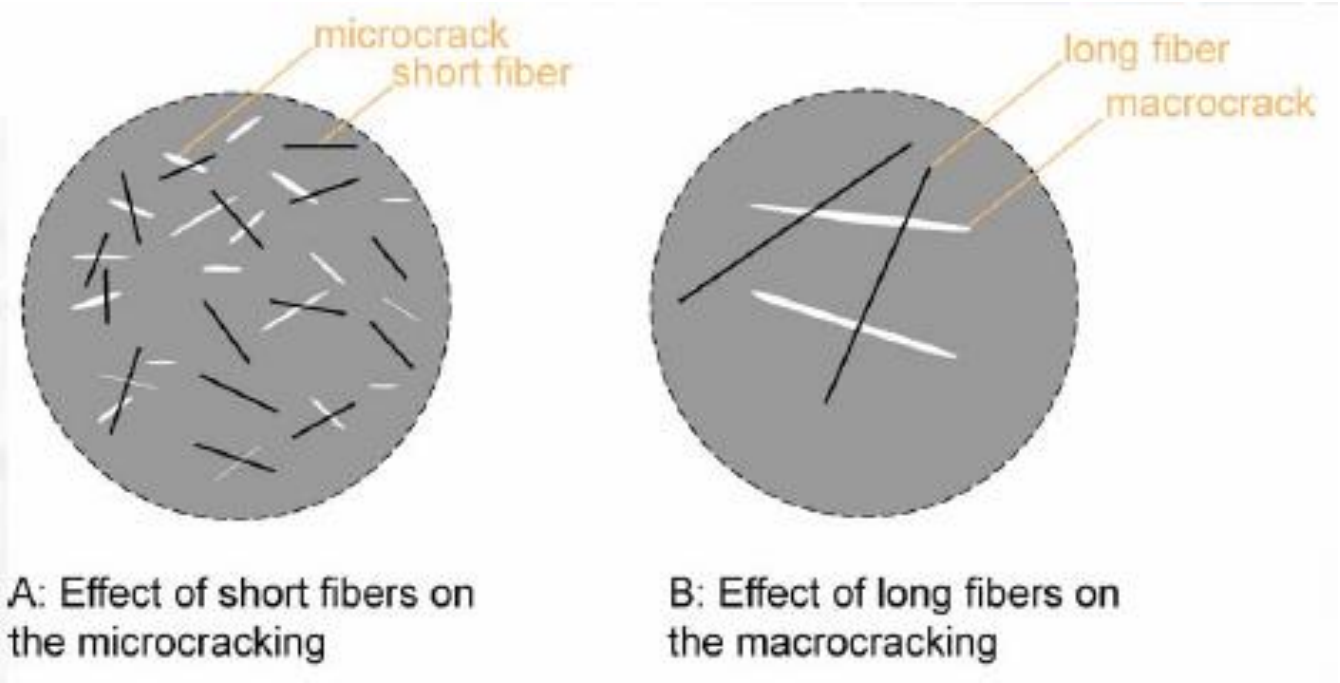
- از نقطه نظر مواد و سازه ای، نقطه تعادل ظریفی در بهینه سازی پیوستگی بین الیاف و خمیر سیمان وجود دارد.
- در صورتی که پیوستگی بین الیاف و خمیر سیمان ضعیف باشد، الیاف در نیروهای پایین بیرون کشیده شده و تاثیر چندانی در پرکردن فاصله بین ترکها نخواهند داشت، لذا سختی سیستم افزایش پیدا نخواهد کرد.
- اگر پیوستگی بین الیاف و خمیر سیمان بیش از حد قوی باشد، ممکن است عمده الیاف قبل از آنکه انرژی زیادی را مستهلک کنند، می شکنند.

بهینه سازی الیاف

- در حالت دوم الیاف مانند مواد اضافی غیر فعالی عمل می کنند که تاثیر قابل ملاحظه ای در بهبود خواص مکانیکی ندارند.
- برای پرکردن فضای بین ریز ترکها در مجموعه تحت بار و برای جلوگیری از تمرکز تنش بالا، لازم است تعداد زیادی الیاف کوتاه داشته باشیم.
- توزیع یکنواخت الیاف کوتاه می تواند مقاومت و شکل پذیری مجموعه را افزایش دهد.

بهینه سازی الیاف

- اما الیاف بلند برای پرکردن فضای بین ترکهای بزرگ منفصل در نیروهای بالا لازم هستند.
- با این وجود، درصد حجمی الیاف بلند می تواند بسیار کمتر از الیاف کوتاه باشد.



طبقه بندی

- یکی از انواع طبقه بندی بتن الیافی بر مبنای نسبت الیاف در داخل بتن است:
  - حجم کم: حجم الیاف در داخل بتن کمتر از ۱٪ است.
  - حجم متوسط: حجم الیاف در داخل بتن بین ۱٪ و ۲٪ است.
  - حجم بالا: حجم الیاف در داخل بتن بیش از ۲٪ است.

بتن با الیاف کم

- در بتن با حجم کم الیاف که معمولا در دالها و روسازی بکار می روند، الیاف عموما به منظور کاهش جمع شدگی استفاده می شوند.
- الیاف پراکنده مزیتهای عمده ای نسبت به آرماتور فلزی دارد:
  - الیاف به طور یکنواختی در سه بعد پخش شده و موجب توزیع متناسب باربری می شوند.
  - الیاف در مقایسه با آرماتور حساسیت کمتری نسبت به خوردگی دارند.
  - استفاده از الیاف می تواند هزینه های اجرایی مربوط به آرماتورگذاری را کاهش دهد.

بتن با الیاف متوسط

- کاربرد این مقدار از الیاف موجب افزایش مدول گسیختگی، سختی، و مقاومت ضربه ای بتن می شود.
- این نوع از بتن ها در انواع مختلف سیستمهای ساخت نظیر شات کریت کاربرد دارند.
- کاربرد این نوع بتن در سازه هایی که نیاز به قابلیت جذب انرژی بالا، افزایش ظرفیت در برابر بیرون پریدگی بتن و افزایش مقاومت خستگی دارند کاربرد دارد.

بتن با الیاف بالا

- کاربرد حجم زیادی از الیاف منجر به سختی کرنشی مجموعه می شود.
- به خاطر این بهبود رفتار، معمولا این ترکیبات به عنوان بتن مسلح الیافی توانمند (High-Performance Fiber-Reinforced Composites)شناخته می شوند.
- در دهه گذشته و به واسطه پیشرفتهای به وجود آمده، نسل جدیدی از این مواد با عنوان بتن مسلح الیافی فوق توانمند شناخته می شوند.

(Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Composites)

انواع الیاف

- انواع بسیار متنوعی از الیاف در ساخت بتن الیافی در سطح آزمایشگاهی و تجاری به کار می روند که دسته بندی اصلی آنها به شرح زیر است:
  - الیاف فولادی (SFRC)
  - الیاف شیشه ای (GFRC)
  - الیاف مصنوعی (SNFRC)
  - الیاف طبیعی (NFRC)

انواع الیاف

نوع الیاف	مقاومت کششی (MPa)	مدول یانگ (10^3MPa)	افزایش طول نهایی (٪)	چگالی (gr/cm^3)
آکریلیک	۲۱۰ - ۴۲۰	۱/۲	۲۴ - ۴۵	۱/۱
آزبست	۵۶۰ – ۹۸۰	۸۴ - ۱۴۰	~۰/۶	۳/۲
کتان	۴۲۰ – ۷۰۰	۴/۹	۳ – ۱۰	۱/۵
شیشه	۱۰۵۰ – ۳۸۵۰	۷۰	۱/۵ – ۳/۵	۲/۵
نایلون (سختی زیاد)	۷۷۰ – ۸۴۰	۴/۲	۱۶ – ۲۰	۱/۱
پلی‌استر (سختی زیاد)	۷۳۵ – ۸۷۵	۸/۴	۱۱ – ۱۳	۱/۴
پلی‌اتیلن	~۷۰۰	۰/۱۴ – ۰/۴۲	~۱۰	۰/۹۵
پلی‌پروپیلن	۵۶۰ – ۷۷۰	۳/۵	~۲۵	۰/۹۰
ابریشم مصنوعی (ریون)	۴۲۰ – ۶۳۰	۷	۱۰ – ۲۵	۱/۵
پشم سنگ	۴۶۰ – ۷۷۰	۷۰ – ۱۱۹	~۰/۶	۲/۷
فولاد	۲۸۰ – ۲۸۰۰	۲۰۳	۰/۵ - ۳۵	۷/۸

خواص بتن الیافی

- می‌توان گفت که تأثیر عمدهٔ الیاف، نه بر روی مقاومت بتن، بلکه بر روی طاقت خمشی آن است.
- اساساً مزیت عمده بتن الیافی، بهبود طاقت خمشی (کل انرژی جذب‌شده در هنگام شکست نمونه، در خمش) است.
- به‌دلیل افزایش طاقت خمشی، مقاومت دربرابر خستگی و مقاومت دربرابر ضربه نیز به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند.
- مشخص شده است که حتی الیاف با مدول کم مانند نایلون و پلی پروپیلن در تولید اعضای بتنی پیش‌ساخته در معرض ضربه شدید، بسیار مؤثر بوده‌اند، هر چند تعیین کمّی میزان افزایش مقاومت ضربه‌ای انجام نشده است.

خواص بتن الیافی

- درخصوص مقاومت، نشان داده شده است که افزودن الیاف به تیرهای بتن‌آرمه معمولی، عمر آن را دربرابر خستگی افزایش می‌دهد و تحت بارگذاری خستگی، عرض ترک کاهش می‌یابد.
- به‌طورکلی، مقاومت خستگی یک تیر مسلح به الیاف، درحدود ۹۰٪ مقاومت استاتیکی همان تیر تحت بارهای چرخه‌ای، با $۲*۱۰^{۶}$ دور بارگذاری می‌باشد، مشروط بر آنکه جهت اعمال بار چرخه‌ای تغییر نکند.
- اگر جهت اعمال بار چرخه‌ای کاملاً تغییر کند، مقاومت خستگی در حدود ۷۰٪ مقاومت استاتیکی تحت با چرخه‌ای، با همان تعداد دور بارگذاری خواهد بود.

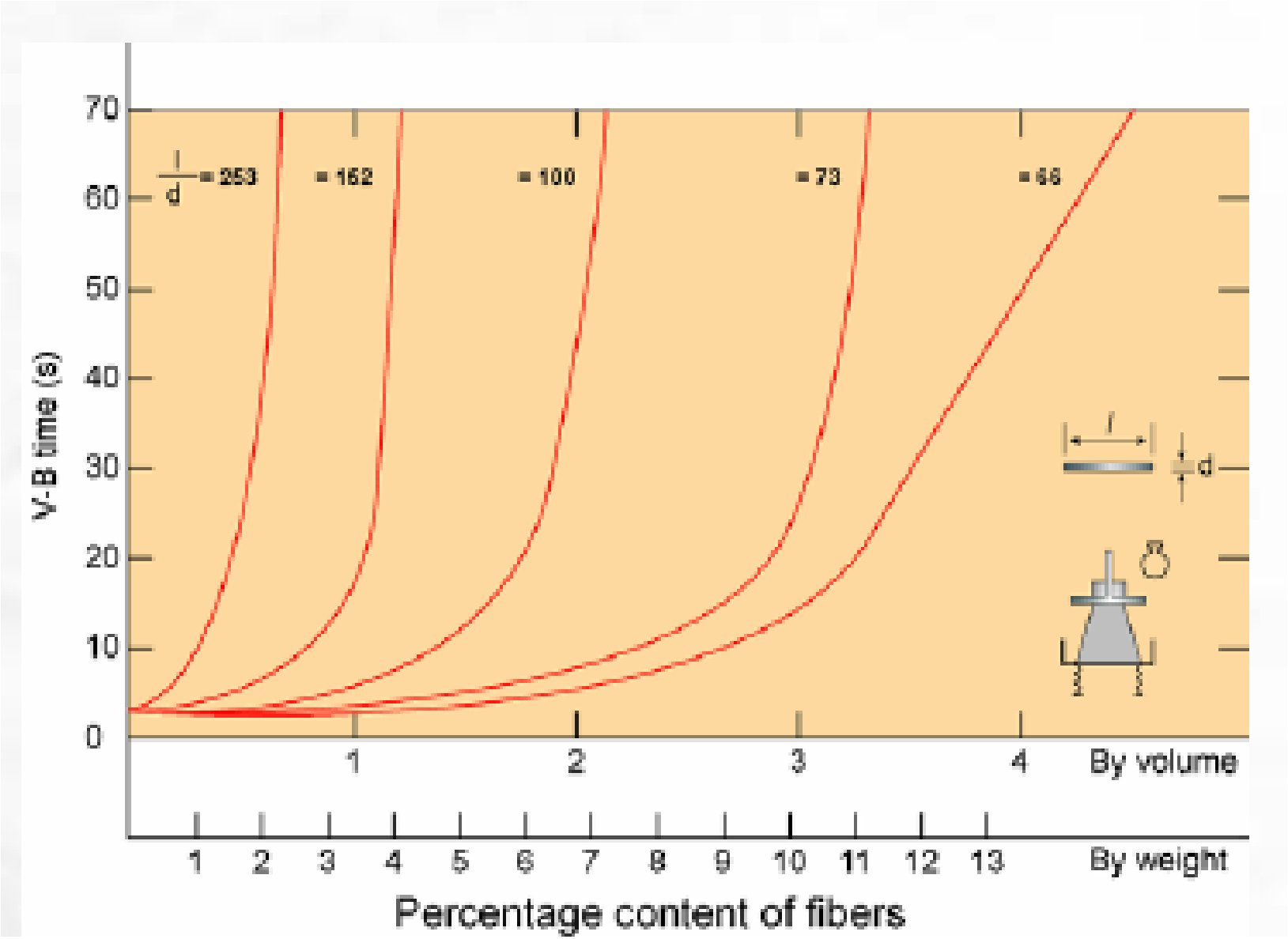
خواص بتن الیافی

- کارآیی بتن مسلح به الیاف، از هر نوعی که باشد، تابع حجم الیاف در بتن است.
- افزودن هر نوع الیاف به بتن ساده، از کارآیی آن می‌کاهد.
- ازآنجاکه وجود الیاف در بتن، پایداری توده بتن تازه را به‌میزان زیادی افزایش می‌دهد، لذا استفاده از آزمایش اسلامپ، برای تعیین کارآیی بتن الیافی مناسب نیست.

خواص بتن الیافی

- برای مثال، اگر به یک بتن با اسلامپ ۲۰۰میلیمتر، به‌میزان ۱/۵٪ حجم آن، الیاف فولادی یا شیشه‌ای افزوده شود، اسلامپ مخلوط کاهش‌یافته و به‌حدود ۲۵mm می‌رسد.
- اما بااین‌حال، جای دادن و متراکم کردن بتن ازطریق ویبره کردن، می‌تواند رضایت‌بخش باشد،
- بنابراین، آزمایش وی‌بی (Vebe) برای سنجش کارآیی بتن الیافی مناسب‌تر است.

خواص بتن الیافی



خواص بتن الیافی

- افزودن الیاف فولادی به بتن، اثر ناچیزی بر روی مدول ارتجاعی، جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن و خزش فشاری داد.
- خزش کششی تاحدی کاهش می‌یابد، ولی اگر از الیاف کربنی خیلی قوی استفاده شود، خزش خمشی به مقدار زیادی کاهش می‌یابد.
- بااین‌وجود، در اکثر تحقیقات، الیاف، به‌دلیل حجم کم آن، فقط به‌عنوان یک مادهٔ صلب درون خمیر عمل کرده است بدون آنکه اثر مهمی در پایداری ابعادی ماده مرکب داشته باشد.

خواص بتن الیافی

- معمولاً بتن مسلح به الیاف، با مقدار زیاد سیمان و نسبت کم آب به سیمان ساخته می‌شود.
- اگر بتن حاوی الیاف فولادی به‌طور مطلوبی متراکم شده و عمل‌آوری شود، تا زمانی‌که الیاف توسط خمیر سیمان محافظت می‌شود، از دوام عالی برخوردار خواهد بود.
- در اکثر شرایط محیطی، به‌خصوص در محیط‌هایی که کلرید وجود دارد، امکان زنگ‌زدگی الیاف واقع در حوالی سطح بتن وجود دارد، اما الیاف واقع در بخش درونی بتن بدون خوردگی باقی می‌مانند.

خواص بتن الیافی

- به‌دلیل تهاجم شیمیایی قلیایی موجود در خمیر سیمان، الیاف شیشه‌ای معمولی را نمی‌توان در بتن یا ملات با سیمان پرتلند استفاده کرد.
- زیرکُنیا و دیگر الیاف شیشه‌ای مقاوم دربرابر قلیا از دوام بهتری در محیط قلیایی برخوردارند، اما دیده شده است که حتی این نوع الیاف نیز به مرور زمان دچار آسیب تدریجی می‌شوند.
- به‌همین‌ترتیب، اکثر الیاف طبیعی، مانند کتان و پشم و بسیاری از پلیمرهای مصنوعی، در محیط قلیایی خمیر سیمان پرتلند دوام ندارند.

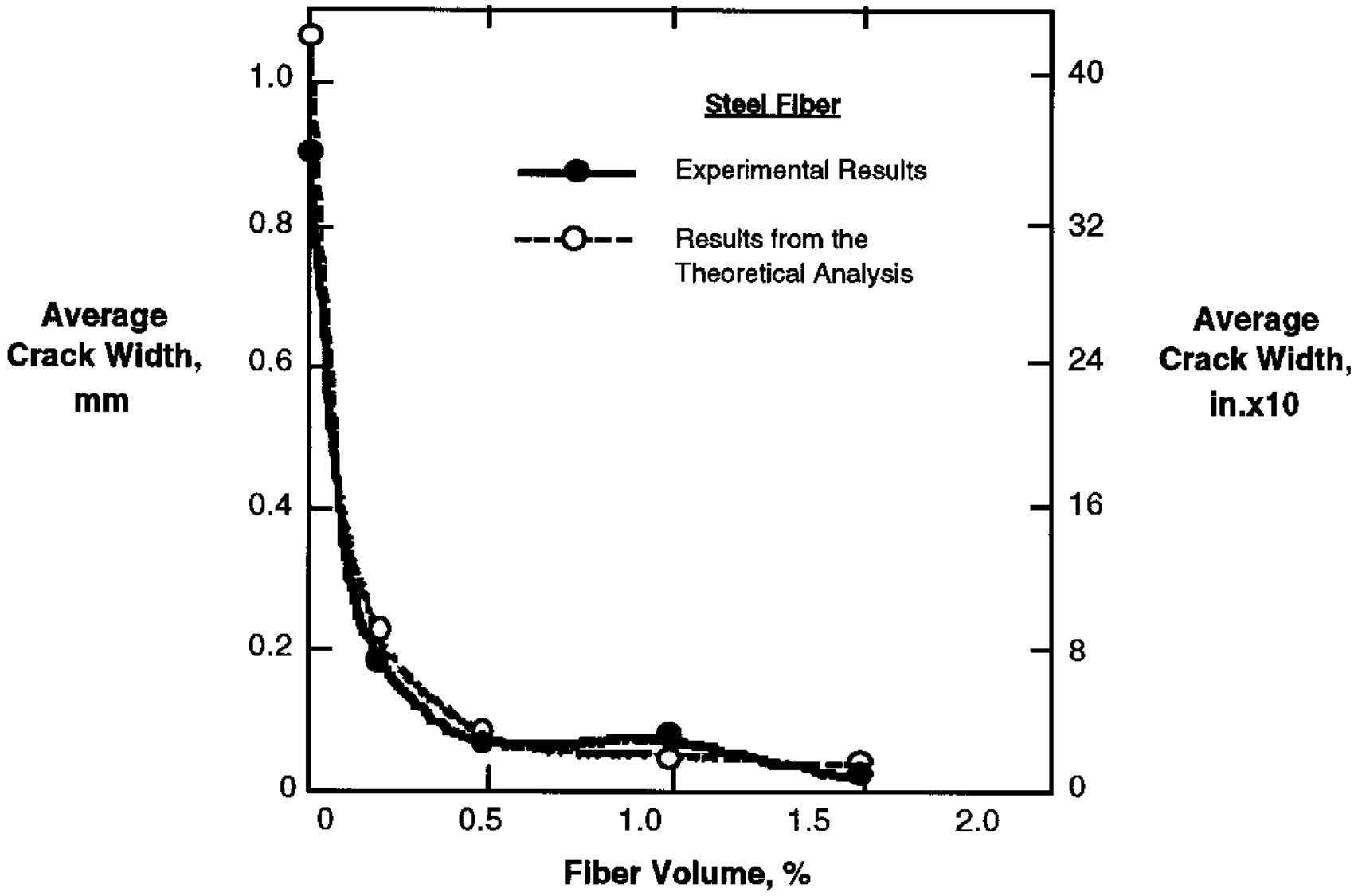
خواص بتن الیافی

- از آنجا که بتن معمولا مقید است، ترک خوردگی در آن طبیعی است، اما وجود الیاف تاثیرات مختلفی در ترک خوردگی دارد:
  - امکان تعدد ترک خوردگی (تعداد ترک ها بیشتر می شود)
  - امکان انتقال تنش کششی در سطح ترکها وجود دارد، لذا مقاومت کششی بتن به محض ترک خوردگی از بین نمی رود.
  - امکان انتقال تنش در مدت زمان طولانی وجود دارد، لذا امکان پرشدن/ترمیم ترک وجود دارد.

خواص بتن الیافی

- یکی از تاثیرات مهم حضور الیاف در بتن این است که با وجودی که به کاهش جمع شدگی کمک زیادی نمی کنند، اما تعداد ترکهای بوجود آمده در اثر تنشهای کششی را افزایش می دهند.
- افزایش تعداد این ترکها به کاهش عرض متوسط آنها منجر می شود که از لحاظ دوام پدیده ای مطلوب است.

خواص بتن الیافی



دوام خواص بتن الیافی

- همه تمهیدات لازم برای افزایش دوام بتن معمولی در مورد بتن الیافی نیز صادق است.
- هوازایی به منظور افزایش دوام در برابر چرخه های یخ زدن/آب شدن ضروری است.
- نتایج تحقیقات نشان می دهد در صورتی که مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بیش از ۲۱ مگاپاسکال بوده و ملاحظات مربوط به حداکثر نسبت آب به سیمان و تراکم بتن رعایت شده باشد، زنگ زدگی الیاف به سطح رویین بتن محدود می شود و از عمق ۲/۵ میلیمتر فراتر نمی رود (بتن بدون ترک)

دوام خواص بتن الیافی

- اما اگر بتن الیافی ترک خورده باشد، قرارگیری در محیطهای حاوی یون کلراید می تواند منجر به خوردگی الیاف فلزی شود.
- با این وجود، ترک های با عرض کمتر از ۰/۱ میلیمتر موجب خوردگی الیاف فلزی نمی شود.
- عمده تحقیقات انجام شده بر روی خوردگی الیاف فلزی در محیهای اشباع شده با یون کلر (آزمایشگاه یا محیطهای دریایی) انجام شده و عملکرد بتن الیافی در سایر محیطها با غلظت کمتر نیاز به بررسی دارد.

طرح اختلاط بتن الیافی

- بتن مسلح به الیاف فولادی معمولاً با مقدار مقاومت و الیاف مشخص گردد.
- غالباً، در صورت استفاده از این نوع بتن‌ها در دال کف، مقاومت خمشی و درصورت استفاده از آنها به‌عنوان بتن سازه‌ای، مقاومت فشاری آنها مشخص می‌شود.
- معمولاً، یا مقاومت خمشی نمونهٔ ۲۸روزهٔ این نوع بتن‌ها در حدود ۵ تا ۱۰ مگاپاسکال و یا مقاومت فشاری نمونهٔ ۲۸روزهٔ آنها در حدود حدود ۳۴ تا ۴۸ مگاپاسکال در مشخصات قید می‌شود.

طرح اختلاط بتن الیافی

- میزان مصرف الیاف در بتن با وزن معمولی، که در مشخصات تعیین‌شده است، بین ۳۰kg/m^3 (یا ۰/۳۸٪ حجمی)، تا ۲۲۰kg/m^3 (یا ۲٪ حجمی) متغیر است.
- توصیه شده است که از سنگدانه‌های بزرگ‌تر از ۱۹ میلیمتر برای ساخت بتن مسلح به الیاف فولادی استفاده نگردد، هر چند که کاربرد الیاف در بتنی با حداکثر اندازه سنگدانه ۳۸ میلیمتر نیز گزارش شده است.
- برای آنکه کارآیی مناسب بتن‌های الیافی به‌دست آید، می‌توان از مواد افزودنی روان‌کننده، حباب‌زا و یا از میزان سیمان بیشتر (با پوزولان یا بدون آن) استفاده کرد.

طرح اختلاط بتن الیافی

مصالح	ملات	حداکثر اندازه سنگدانه ۹/۵mm	حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹mm
سیمان (kg/m^3)	۷۱۰-۴۱۵	۵۹۰-۳۵۵	۵۳۵-۲۹۵
نسبت آب به سیمان	۰/۴۵ – ۰/۳۰	۰/۴۵ – ۰/۳۵	۰/۵۰ – ۰/۴۰
درصد ریزدانه به درشت‌دانه	۱۰۰	۶۰ - ۴۵	۵۵ - ۴۵
درصد هوا با ماده حباب زا	۱۰ – ۷	۷ – ۴	۶ - ۴
درصد حجمی الیاف			
الیاف فولادی آج‌دار	۱ – ۰/۵	۰/۹ – ۰/۴	۰/۸ – ۰/۳
الیاف فولادی صاف	۲ – ۱	۱/۸ – ۰/۹	۱/۶ – ۰/۸
الیاف شیشه	۵ – ۲	۱/۲ – ۰/۳	-

ساخت بتن الیافی

- پخش شدن یکنواخت الیاف فولادی در داخل مخلوط بتن از اهمیت زیادی برخوردار است.
- این عمل می تواند در حین توزین اجزای بتن و یا حین مخلوط کردن بتن انجام شود.
- شیوه های متعددی در عمل پیاده شده اند که دو مورد کاربرد بیشتری دارند:
  - اضافه کردن الیاف به بتن در حین اختلاط
  - اضافه کردن الیاف به سنگدانه

ساخت بتن الیافی

- در روش اول، بعد از آنکه همه اجزا بتن مخلوط شدند، الیاف به بتن اضافه می شود.
- اضافه شدن باید با نرخ ۴۵ کیلوگرم بر دقیقه و در حالی که مخلوط کن با حداکثر سرعت در حال دوران است انجام شود.
- الیاف نباید به صورت به هم چسبیده اضافه شوند.
- بعد از اضافه شدن کل الیاف، دور مخلوط کن کند شده و برای ۴۰ تا ۵۰ دوران دیگر ادامه پیدا کند.

ساخت بتن الیافی

ساخت بتن الیافی

- در روش دوم، الیاف به سنگدانه ها اضافه می شود.
- این اضافه شدن می تواند پیش از ورود سنگدانه ها به داخل مخلوط کن و یا بعد از توزین آنها انجام شود.
- اضافه کردن الیاف می تواند به صورت دستی و یا از طریق تسمه نقاله انجام شود.
- جریان طبیعی سنگدانه ها به بیرون از ترازوی توزین موجب پخش شدن الیاف می شود.

ساخت بتن الیافی