

بررسی تجربی خواص بتن مسلح به الیاف شیشه (GFRC)

داود مستوفی نژاد*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۷۹/۶/۳ - دریافت نسخه نهایی ۸۰/۲/۲۳)

چکیده - نتایج آزمایش بر ۲۶۴ نمونه بتن الیافی به صورت مکعب، استوانه‌ای و منشوری در این مقاله ارائه شده است. نمونه‌ها با الیاف شیشه با طول ۲/۵ سانتیمتر مسلح شدند. پارامترهایی که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفتند عبارت‌اند از: نسبت وزنی الیاف به سیمان (۰، ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد) و نسبت وزنی شن به ماسه (۱/۱، ۰/۷ و ۰/۲)؛ بدین ترتیب در مجموع ۱۲ طرح اختلاط بتن الیافی مورد مطالعه قرار گرفت. نسبت وزنی آب به سیمان در کلیه نمونه‌ها برابر ۰/۴ در نظر گرفته شد و کارایی لازم با افزودن فوق روان کننده فراهم شد. نمونه‌ها تحت آزمایش فشاری، کششی و خمشی در سنین ۷ و ۲۸ روز قرار گرفتند و مدول الاستیسیته بتن و نیز درصد جذب آب نمونه‌ها تعیین شد. در نهایت ضمن بررسی و بحث بر خواص مکانیکی بتن الیافی با الیاف شیشه، با استفاده از نتایج آزمایشها، روابطی برای تعیین ارتباط خواص مکانیکی این بتن، ارائه شد.

واژگان کلیدی: الیاف شیشه، بتن الیافی، خواص مکانیکی، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته

Experimental Investigation of Behavior of Glass Fiber Reinforced Concrete (GFRC)

D. Mostofinejad

Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

ABSTRACT- *The paper presents the results of casting and testing of 264 GFRC specimens. The glass fibers were 25 mm long, with the aspect ratio (L/D) ranging between 1250 and 3570. The parameters studied were the ratio (by weight) of fibers to cement, i.e. F/C=0%, 1.5%, 3%, and 4.5%, and the ratio of coarse to fine aggregates (gravel to sand), i.e. G/S=1.1, 0.7 and 0.2. In total, 12 mix designs were selected for GFRC specimens while the water-cement ratio was constant and equal to W/C=0.4. The balling of glass fibers in the mix was overcome by using adequate and sufficient antistatic agents. The specimens were tested under compressive, tensile and flexural loading at the ages of 7 and 28 days. Furthermore, the modulus of elasticity and the absorption of the concretes were determined. Finally, the mechanical and physical properties of the GFRC specimens were analysed and an empirical expression describing the modulus of elasticity of the GFRC was proposed.*

Keywords: *Compression Strength, Glass Fiber Reinforced Concrete, GFRC, Mechanical Characteristics, Modulus of Elasticity.*

* - استادیار

E_c مدول الاستیسیته بتن	f'_{cu7} مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه	G/S نسبت وزنی دانه‌های درشت
$f'_{cu} = f'_{cu28}$ مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مکعبی بتن	به دانه‌های ریز
نمونه مکعبی بتن	f_r مقاومت خمشی (مدول)	W درصد جذب آب
$f'_c = f'_{c28}$ مقاومت فشاری ۲۸ روزه	گسیختگی) بتن	W/C نسبت وزنی آب به سیمان
نمونه استوانه‌ای بتن	f'_t مقاومت کششی بتن	ϵ_0 کرنش نظیر f'_c
f'_{c7} مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه	F/C نسبت وزنی الیاف به سیمان	
استوانه‌ای بتن		

۱- مقدمه

انهدام و زوال بتن به شدت به تشکیل ترکها و ریزترکها در اثر بارگذاری و یا تأثیرات محیطی وابسته است. تغییرات گرمایی و رطوبتی در خمیر سیمان باعث ایجاد ریزترکها می‌شوند و چنین ریزترکهایی در سطح دانه‌های درشت متمرکز می‌شوند. با تأثیر بیشتر بارگذاری و نیز سایر مسائل محیطی، ریزترکها به هم متصل شده و ترکها را تشکیل می‌دهند و نهایتاً این ترکها در جسم بتن منتشر می‌شوند [۱]. استفاده از الیاف مختلف در بتن و ساخت بتن الیافی (FRC) به عنوان یک گام مؤثر در جلوگیری از انتشار ریزترکها و ترکها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن محسوب می‌شود.

مهمترین مشخصه بتن الیافی خاصیت جذب انرژی، انعطاف پذیری و مقاومت آن در مقابل ضربه است؛ به همین دلیل امروزه این بتن نقش بسیار جدی در پیشرفت تکنولوژی بتن ایفا کرده و به عنوان یک ماده جدید و اقتصادی در مسائل ساختمانی محسوب شده است [۲]. خاصیت جذب انرژی و طاقبت بتن می‌تواند به نحو مطلوبی خطر شکست سازه‌های بتنی به خصوص در مناطقی که تحت بارهای مکرر و لرزه‌ای قرار می‌گیرند را کاهش دهد. خاصیت جذب انرژی بتن الیافی معمولاً با آزمایش سنجش طاقبت^۲ اندازه‌گیری می‌شود. در این آزمایش شاخص طاقبت^۳ براساس استاندارد ASTM C1018 [۳] به صورت سطح زیرمنحنی بار - تغییر شکل یک تیر استاندارد

با ابعاد ۱۰×۱۰×۳۵ سانتیمتر تا یک تغییر شکل مشخص (مثلاً ۳/۵ برابر تغییر شکل در لحظه اولین ترک)، به سطح زیر همان منحنی تا تغییر شکل متناظر با اولین ترک خوردگی، تعریف می‌شود. اگرچه در استاندارد ACI-544 [۴] تعریفی متفاوت با تعریف قبلی برای سنجش طاقبت بتن الیافی ارائه شده است. برای روشن شدن شکل پذیری بتن الیافی توجه شود که کرنش شکست یک ماتریس ترد (نظیر سیمان پرتلند) به مراتب از کرنش شکست یک فایبر محکم (نظیر فولاد، شیشه، پلی‌پروپیلین^۴، کولار^۵ و ...) کمتر است (کمتر از $\frac{1}{5}$). نتیجتاً وقتی که سیمان مسلح به الیاف تحت بار قرار گیرد، ماتریس بسیار زودتر از شکست الیاف، ترک خواهد خورد. با ترک خوردگی ماتریس، یکی از سه نوع شکست زیر ممکن است برای جسم کامپوزیت اتفاق بیفتد: الف - ممکن است جسم کامپوزیت بلافاصله پس از ترک خوردگی ماتریس بشکند، نظیر حالتی که از فایبرهای پلیمری با درصد حجم کم استفاده شده باشد. ب - ممکن است جسم کامپوزیت تحت بارهای کمتر به تحمل بار و تغییر شکل ادامه دهد، نظیر حالتی که از فایبرهای فولادی با حجم کم تا متوسط استفاده شده باشد. در این حالت مقاومت پس از ترک خوردگی ابتدا با بیرون کشیده شدن فایبرها از سطح ترک تأمین شده و سپس با تغییر شکل آنها ادامه می‌یابد. ج - ممکن است حتی پس از ترک خوردگی ماتریس، جسم کامپوزیت تنشهای کششی و تغییر شکلهای

الیافی دارند. خواص مکانیکی این الیاف تا حدودی مشابه الیاف E-Glass است.

- الیاف از نوع A-Glass که به تدریج از رده خارج شده است و امروزه کمتر تولید و مصرف می‌شود.
- الیاف از نوع S-Glass با مقاومت بسیار خوب ($E=87\text{GPa}$, $\sigma_u=3900\text{MPa}$). استفاده این الیاف بیشتر در تحقیقات فضایی و تکنولوژی ساخت قطعات و تجهیزات فضایی است.

اگرچه در بتن استفاده از E-Glass نیز متداول بوده است، ولی به دلیل گزارشهای فراوان در مورد خوردگی این الیاف در محیط‌قلیایی بتن، امروزه الیاف Z-Glass به عنوان الیاف مناسب در بتن محسوب می‌شوند. با این وجود مطالعات مادج [۸] نشان داده است که چنانچه الیاف E-Glass همراه با یک ماده افزودنی با خاصیت پوزولانی بالا نظیر سیلیکافیوم^۹ به کار رود، در طول زمان، خوردگی قابل توجهی در الیاف اتفاق نمی‌افتد.

اضافه کردن الیاف شیشه به بتن به شدت بر کاهش کارایی بتن تازه تأثیر می‌گذارد [۱، ۲ و ۸]. بنابراین باید از روانسازهای مناسب استفاده کرد و شیوه مناسب اختلاط را نیز تجربه کرد. همچنین الیاف شیشه‌ای به شدت تمایل دارند که در بتن تازه به یکدیگر چسبیده و گلوله شوند که به این پدیده گلوله شدن^۹ الیاف می‌گویند. واضح است که در صورت وقوع این پدیده، توزیع الیاف دیگر یکنواخت نبوده و بنابراین برای برطرف کردن آن باید چاره‌اندیشی کرد.

برای جبران کاهش کارایی بتن با الیاف شیشه معمولاً از نسبتهای درشت دانه به ریزدانه (شن به ماسه، $\frac{G}{S}$) پایبندی استفاده می‌کنند. لین [۲] در مطالعات تجربی خود برای بررسی طاقبت بتن الیافی، از $\frac{G}{S}$ تقریباً ۱/۲ برای الیاف کنف، فولادی و سیم آهنی استفاده کرده، در حالی که برای الیاف شیشه نسبت $\frac{G}{S}$ را به ۰/۲ کاهش داده است. لازم به ذکر است که در مطالعات لین، تأثیر الیاف شیشه در افزایش شکل‌پذیری بتن

بیشتری را تحمل کند، نظیر حالتی که از فایبرهای کربن به مقدار متوسط تا زیاد استفاده شده باشد. دقت شود که این حالت فقط در صورتی اتفاق می‌افتد که مقاومت چسبندگی (مقاومت بیرون کشیدگی^۱) فایبر در لحظه اولین ترک بیش از بار موجود در لحظه اولین ترک باشد، زیرا در لحظه ترک خوردگی تمام بار به ناگهان به فایبر منتقل می‌شود. حال با افزایش بار روی جسم کامپوزیت، فایبر تنش اضافی را از طریق چسبندگی به ماتریس منتقل می‌کند. واضح است که از بین سه حالت فوق‌الذکر، بتن الیافی در وضعیت (الف) فاقد شکل‌پذیری بوده و بیشترین شکل‌پذیری برای بتن الیافی در شرایط (ج) حاصل می‌شود.

بتن الیافی با الیاف متفاوتی منجمله الیاف فولاد، شیشه، کربن، آرامید (کولار)، پلی‌پروپیلین (PP)، کنف و آزبست ساخته می‌شود. امروزه الیاف فولادی بیشترین کاربرد را در بتن الیافی دارند، با این وجود به دلایل خاص ممکن است از سایر الیاف نیز استفاده شود.

۲- الیاف شیشه‌ای

از آنجا که در این مقاله تمرکز اصلی بر بتن با الیاف شیشه است، مقدمتاً به انواع الیاف شیشه اشاره می‌شود. لازم به ذکر است که الیاف شیشه‌ای نخستین بار همراه با سیمان به کار رفته و با عنوان "سیمان مسلح به الیاف شیشه‌ای، GRC"^۷ نامیده شده است که بررسی خواص مکانیکی و پایایی این سیمان را می‌توان در مراجع [۵] و [۶] ملاحظه کرد. الیاف شیشه به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۷]:

- الیاف از نوع E-Glass. این الیاف بیشترین استفاده در صنعت ساختمان را پیدا کرده‌اند. مشخصات این الیاف عبارت‌اند از: مدول الاستیسیته $E=87\text{GPa}$ ، مقاومت نهایی شکست $\sigma_u=1500-2500\text{GPa}$ ، کرنش نهایی شکست $\varepsilon_u=1.8\%-3\%$.
- الیاف از نوع Z-Glass با مقاومت بسیار خوب در مقابل محیط‌های قلیایی. این الیاف بیشترین مصرف را در بتن

الیافی نسبت به الیاف فولادی و یا سیم آهنی کمتر گزارش شده است. بزرگترین اندازه دانه‌های مصرفی ۱۹ میلیمتر ($\frac{3}{4}$ اینچ) و برای کلیه نمونه‌ها نسبت آب به سیمان برابر $\frac{0.4}{0.7}$ انتخاب شده است. لازم به ذکر است که در هنگام استفاده از یک طرح مشخص، نسبت $\frac{G}{S}$ در خلال طرح تعیین خواهد شد، لیکن از آنجا که الیاف شیشه‌ای به شدت باعث افت کارایی می‌شوند، اکثراً محققان سعی کرده‌اند نسبت $\frac{G}{S}$ را در بتن با الیاف شیشه کوچکتر انتخاب کنند [۸ و ۲]. به همین دلیل در این تحقیق سعی شد تا اختلاطهایی با $\frac{G}{S}$ متفاوت ایجاد شود تا اثر این مسئله بر خواص مکانیکی نیز بررسی شود.

۳-۳- دانه‌بندی و طرح اختلاط

از آنجا که برای طرح مخلوط بتن الیافی استاندارد مشخصی وجود ندارد، در این مطالعه برای طرح اختلاط سعی شد تا حتی‌المقدور از روش ACI-211 استفاده شود [۹ و ۱۰]. تنها اشکالی که به نظر می‌رسید این بود که برای نسبتهای $\frac{G}{S}$ کم که در این طرح مدنظر بود، امکان انطباق مخلوط دانه‌بندی شن و ماسه بر منحنیهای استاندارد ASTM-C33 وجود نداشت. به همین جهت تصمیم گرفته شد که برای تنظیم دانه‌بندی، از منحنیهای استاندارد BS^۱ استفاده شود. بدین ترتیب با استفاده از منحنیهای استاندارد BS^۱ و براساس بزرگترین بعد دانه‌ها برابر ۱۹ میلیمتر، سه دانه‌بندی مناسب برای نسبتهای $\frac{G}{S}$ برابر $\frac{0.2}{0.7}$ ، $\frac{0.1}{0.7}$ و $\frac{1}{1}$ تنظیم شد. آن‌گاه مبتنی بر روش وزنی ACI-211 و نسبت $\frac{W}{C}$ برابر $\frac{0.4}{0.7}$ و برای حصول بتنی با مقاومت فشاری استوانه‌ای ۲۸ روزه برابر $f'_c = 420 \text{ kg/cm}^2$ و اسلامپ ۵۰ میلیمتر، طرح مخلوط بتن صورت گرفت. از آنجا که در این طرح وجود الیاف کارایی را کاهش خواهد داد، برای بهبود کارایی و براساس توصیه ACI-211، مقدار دانه‌های درشت به میزان ۱۰ درصد کاهش داده شد؛ نهایتاً در این طرح نسبت

الیافی نسبت به الیاف فولادی و یا سیم آهنی کمتر گزارش شده است. بزرگترین اندازه دانه‌های مصرفی ۱۹ میلیمتر ($\frac{3}{4}$ اینچ) و برای کلیه نمونه‌ها نسبت آب به سیمان برابر $\frac{0.4}{0.7}$ انتخاب شده است. لازم به ذکر است که در هنگام استفاده از یک طرح مشخص، نسبت $\frac{G}{S}$ در خلال طرح تعیین خواهد شد، لیکن از آنجا که الیاف شیشه‌ای به شدت باعث افت کارایی می‌شوند، اکثراً محققان سعی کرده‌اند نسبت $\frac{G}{S}$ را در بتن با الیاف شیشه کوچکتر انتخاب کنند [۸ و ۲]. به همین دلیل در این تحقیق سعی شد تا اختلاطهایی با $\frac{G}{S}$ متفاوت ایجاد شود تا اثر این مسئله بر خواص مکانیکی نیز بررسی شود.

۳- مطالعات تجربی در این تحقیق

۳-۱- مصالح مصرفی

در این تحقیق از شن و ماسه شکسته آهکی استفاده شد. شن و ماسه مصرفی به ترتیب چگالی $G_{CA}=2.68$ و $G_{FA}=2.64$ و وزن مخصوص ظاهری $\gamma_{CA}=1515 \text{ kg/m}^3$ و $\gamma_{FA}=1604 \text{ kg/m}^3$ داشتند. همچنین درصد جذب آب شن و ماسه به ترتیب 0.5 و 0.7 درصد و مدول نرمی ماسه برابر $FM=2.8$ اندازه‌گیری شد. سیمان مصرفی از نوع سیمان پرتلند تیپ I (محصول کارخانه سیمان اصفهان از نوع صادراتی بدون سرباره) انتخاب شد. الیاف مورد استفاده در این تحقیق، الیاف شیشه‌ای از نوع E-Glass و بارزین پلی‌استر (محصول کشور ژاپن) بوده است. الیاف شیشه‌ای دارای قطری در محدوده $0.02-0.07$ میلیمتر بوده و طول آنها حدود ۲۵ میلیمتر انتخاب شده است. بنابراین نسبت طول به قطر الیاف ($\frac{L}{D} = \text{Aspect Ratio}$) در محدوده $3570-1250$ بوده است. همچنین چگالی الیاف $2/65$ و مدول الاستیسیته آنها 70 GPa بوده است. فوق روان کننده مصرفی در این مطالعه از نوع ملامین فرمالدئید سولفانات و به صورت پودری (محصول کشور آلمان) بوده که توسط شرکتهای داخلی تهیه شده است.

۳-۲- مشخصات بتن الیافی انتخاب شده

در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های بتن الیافی از چهار نوع نسبت الیاف به سیمان $\left(\frac{F}{C}\right)$ برابر با 0 ، $\frac{1}{5}$ ، $\frac{3}{5}$ و $\frac{4}{5}$ درصد و نیز سه نوع نسبت شن به ماسه $\left(\frac{CA}{FA}\right)$ یا $\left(\frac{G}{S}\right)$ برابر

است. با توجه به اینکه علت اصلی این پدیده، ایجاد الکتريسيته ساکن در الياف است، در اين تحقيق ماده جداسازي به نام اسپریتان ۳۰/۵۰ که معمولاً در صنعت نساجی استفاده می‌شود، مورد استفاده قرار گرفت. به صورت عملی ابتدا الياف شیشه که قبلاً با طول ۲۵ میلی‌متر برش داده شده بود، در لایه‌های خیلی نازک پهن شده و سپس ماده جداساز به میزان ۰/۲ تا ۰/۵ درصد وزنی الياف، با ۱۰ تا ۲۰ برابر آب مخلوط شده و با آبفشان روی الياف پاشیده شد. لازم به ذکر است که برای پوشش بهتر الياف با این ماده حين پاشیدن، الياف زیر و رو می‌شد. عمل اندود سطح الياف به ماده جداساز، حداقل یک روز قبل از اختلاط بتن صورت می‌گرفت تا فرصت کافی برای خشک شدن الياف وجود داشته باشد.

۳-۵- ساخت بتن

در ساخت بتن اليافی، مهم‌ترین مسئله توزیع و پراکنندگی یکنواخت الياف در جسم بتن است. به همین دلیل روشهای متفاوت برای اختلاط مورد بررسی و آزمایش قرار گرفتند. نهایتاً بهترین روش اختلاط به صورت زیر در نظر گرفته شد. ابتدا مصالح خشک همراه با الياف به خوبی مخلوط شده و سپس $\frac{4}{5}$ آب به مخلوط اضافه شده و به مدت ۲ تا ۳ دقیقه مخلوط شد. آن گاه $\frac{1}{5}$ باقیمانده آب همراه با روانساز به مخلوط اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه دیگر اختلاط ادامه یافت.

۳-۶- نمونه‌گیری برای آزمایش

در این مطالعه در مجموع تعداد حداقل ۲۶۴ نمونه قالبگیری و برای انجام آزمایشها مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها برای هر یک از ۱۲ طرح اختلاط به کار رفته به صورت زیر انتخاب شدند.

الف - ۳ نمونه استوانه‌ای 10×20cm برای آزمایش مقاومت کششی (f'_t) (آزمایش شکافت^{۱۱}) در سن ۲۸ روز.
ب - ۶ نمونه مکعبی 7×7×7cm برای آزمایش مقاومت فشاری مکعبی (f'_{cu}) در سنين ۷ و ۲۸ روز.

1.1 $\approx \frac{G}{S}$ به دست آمد. سپس با انجام تغییراتی در طرح، به صورتی که وزن مجموع دانه‌های شن و ماسه تغییر نکند، طرح اختلاط بتن برای نسبتهای $\frac{G}{S}$ برابر با ۰/۷ و ۰/۲ نیز انجام گرفت. به دلیل اینکه دانه‌های مصرفی به صورت خشک بودند، تأثیر جذب آب دانه‌ها در مقدار آب نیز در نظر گرفته شده و اصلاحات لازم در مقدار آب صورت گرفت. برای تعیین درصد جذب آب الياف، ۵ نمونه از الياف با وزن تقریبی ۵ تا ۱۰ گرم به صورت تصادفی انتخاب شده و پس از توزین، به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور شدند. سپس الياف از آب خارج شده و درون پاکت قرار داده شد و در معرض وزش باد قرار گرفتند. پس از چند دقیقه و زمانی که احساس شد که آب سطحی الياف تبخیر شده‌اند، نمونه‌ها مجدداً توزین شد و درصد جذب آب آنها تعیین شدند. بدین ترتیب میانگین جذب آب نمونه‌های الياف، برابر $\frac{4}{8}$ درصد تعیین شد. تأثیر میزان جذب آب الياف نیز در طرح در نظر گرفته شد و اصلاحات لازم در وزن آب صورت گرفت. اگرچه براساس توصیه بعضی از محققان [۲]، مناسب است به میزان حجم الياف اضافه شده، از حجم دانه‌های درشت کم شده و تصحیح لازم در کاهش وزن دانه‌های درشت صورت گیرد، در این طرح برای حفظ نسبتهای $\frac{G}{S}$ ، متناسب با حجم الياف، از مجموع وزن دانه‌های ریز و درشت کاسته شد. نهایتاً ۱۲ طرح اختلاط به دست آمد که اجزای هر طرح در جدول (۱) آورده شده است.

لازم به ذکر است که فوق روان کننده مصرفی با غلظت وزنی ۴۰ درصد، ۲۴ ساعت قبل از اختلاط، با آب مخلوط و در آخرین مرحله از اختلاط به مخلوط اضافه می‌شد. بدیهی است که در هر مورد برای ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان، مقدار آب مصرفی همراه با روان کننده، از وزن آب محاسبه شده در جدول (۱) کسر می‌شد.

۳-۴- نحوه جلولگیری از گلوله شدن الياف

همان گونه که قبلاً ذکر شد، از مهم‌ترین مشکلات کاربرد الياف شیشه در بتن پدیده جمع شدگی و گلوله شدن^۹ الياف

روزه و ۲۸ روزه استوانه‌ای برحسب نسبت الیاف به سیمان و نسبت شن به ماسه به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نمایش داده شده است. شکل (۵) نیز تعدادی از نمونه‌های استوانه‌ای شکسته شده تحت آزمایش فشار را نشان می‌دهد. با بررسی شکل‌های (۱) تا (۴) ملاحظه می‌شود که منحنی‌های فوق‌الذکر روند مشخصی را برای تأثیر نسبت الیاف شیشه در بتن الیافی بر مقاومت فشاری نشان نمی‌دهند. بدین ترتیب می‌توان نوسانات جزئی مقاومت در منحنی‌های (۱) تا (۴) در محدوده درصد کم الیاف را به ماهیت تصادفی بتن در رفتار مکانیکی نسبت داد. با این وجود می‌توان ملاحظه کرد که تقریباً در تمام حالتها، مقاومت فشاری نمونه‌های با ۴/۵ درصد الیاف شیشه تا حدودی افت کرده است. چنین رفتاری را می‌توان با امکان بیشتر تجمع الیاف و پدیده گلوله شدن الیاف در بتن‌های با درصد بیشتر الیاف توجیه کرد. از طرفی از منحنی‌های فوق‌الذکر می‌توان دریافت که بتن‌های الیافی با نسبت شن به ماسه $\frac{G}{S} = 0.2$ ، به خصوص در درصدهای بالاتر الیاف، مقاومت فشاری کمتری از خود نشان داده‌اند. بنابراین با توجه به نتایج آزمایش‌های فشاری، برای حفظ رفتار فشاری مناسب در بتن الیافی، کار کردن با نسبت $\frac{G}{S}$ پایین (مثلاً کمتر از ۰/۷) توصیه نمی‌شود.

تغییرات نسبت مقاومت فشاری ۷ روزه به ۲۸ روزه نمونه‌های آزمایشی بتن الیافی با درصدهای مختلف الیاف شیشه در شکل (۶) رسم شده است. منحنی مذکور نشان می‌دهد که نسبت مقاومت ۷ روزه به ۲۸ روزه بتن الیافی با الیاف شیشه در مقایسه با بتن بدون الیاف مختصراً بیشتر است.

همچنین تغییرات نسبت مقاومت فشاری ۲۸ روزه استوانه‌ای به مقاومت فشاری ۲۸ روزه مکعبی نمونه‌های بتن الیافی، برحسب نسبت الیاف به سیمان در شکل (۷) رسم شده است. از این منحنی ملاحظه می‌شود که وجود الیاف تأثیر محسوسی بر نسبت فوق‌الذکر نگذاشته، به صورتی که برای نمونه‌های مورد آزمایش در محدوده ۰-۴.۵٪ $\frac{F}{C} = 0$ ٪ می‌توان $\frac{f'_c}{f'_{cu}} \approx 0.76$ را به عنوان یک میانگین قابل قبول، انتخاب کرد.

ج - ۶ نمونه استوانه‌ای ۱۰×۲۰cm برای آزمایش مقاومت فشاری استوانه‌ای (f'_c) و نیز مدول الاستیسیته در سنین ۷ و ۲۸ روزه.

د - ۳ نمونه منشوری با ابعاد ۱۰×۱۰×۳۵cm برای آزمایش مقاومت کششی ناشی از خمش (مقاومت خمشی و یا مدول گسیختگی، f_r) در سن ۲۸ روزه.

ه - ۴ نمونه مکعبی ۷×۷×۷cm برای تعیین درصد جذب آب در سن ۲۸ روزه.

قابلیت‌گیری نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM صورت گرفت. قالبها پس از ۲۴ ساعت باز و نمونه‌ها به حوضچه آب انتقال داده شدند. هر گروه از نمونه‌ها ۲۴ ساعت قبل از آزمایش از حوضچه آب خارج و به محیط عادی آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌های استوانه‌ای آزمایش فشاری، قبل از آزمایش توسط سولفور مذاب کلاهیک‌گذاری^{۱۲} شدند تا سطوح صاف و موازی برای قرار گرفتن در دستگاه آزمایش فشاری فراهم شود.

۴- نتایج آزمایش

نتایج آزمایش روی نمونه‌های مختلف در جدول (۲) آورده شده است. در این جدول f'_{cu7} و f'_{cu28} به ترتیب بیانگر مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه مکعبی، f'_{c7} و f'_{c28} به ترتیب بیانگر مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای، f'_t و f_r به ترتیب بیانگر مقاومت خمشی و مقاومت کششی نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه، E_c بیانگر مدول الاستیسیته در سن ۲۸ روزه، ϵ_0 بیانگر کرنش نظیر f'_c در سن ۲۸ روزه، و نهایتاً W بیانگر درصد جذب آب نمونه‌هاست. در این قسمت به بررسی و تحلیل نتایج آزمایش می‌پردازیم.

۴-۱- مقاومت فشاری

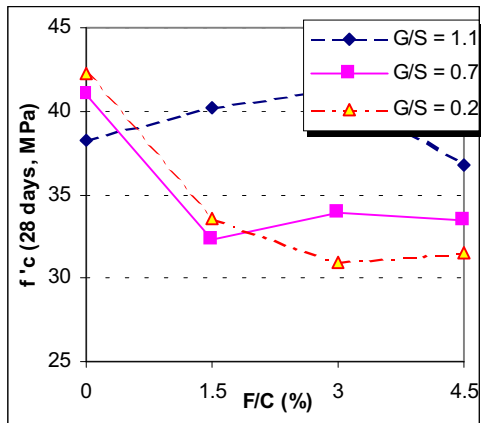
برای تحلیل نتایج مقاومت فشاری، تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی برحسب نسبت الیاف به سیمان و نسبت شن به ماسه، به ترتیب در شکل‌های (۱) و (۲) نمایش داده شده است. همچنین تغییرات مقاومت فشاری ۷

جدول ۱- طرح اختلاط به کار رفته در ساخت نمونه‌های بتن یابی با الیاف شیشه

شماره طرح	آب به سیمان (W/C)	شن به ماسه (G/S)	الیاف به سیمان (F/C,%)	آب (ناخالص) (W,kg/m ³)	سیمان (C,kg/m ³)	دانه‌های درشت (CA,kg/m ³)	دانه‌های ریز (FA,kg/m ³)	الیاف شیشه (GF, kg/m ³)	وزن فوق روان‌کننده به سیمان (%)
۱	۰/۴	۱/۱	۰	۲۰۰/۲	۴۷۵	۸۸۹	۸۰۷	۰	۰/۶
۲				۲۰۰/۵	۴۷۵	۸۸۷	۸۰۷	۷/۱	۱/۲
۳				۲۰۰/۷	۴۷۵	۸۸۳	۸۰۳	۱۴/۳	۱/۴
۴				۲۰۱/۰	۴۷۵	۸۸۰	۸۰۰	۲۱/۴	۲/۰
۵	۰/۴	۰/۷	۰	۲۰۰/۲	۴۷۵	۷۰۵	۹۹۶	۰	۰/۶
۶				۲۰۰/۵	۴۷۵	۶۹۸	۹۹۶	۷/۱	۱/۶
۷				۲۰۰/۷	۴۷۵	۶۹۵	۹۹۲	۱۴/۳	۲/۰
۸				۲۰۱/۰	۴۷۵	۶۹۲	۹۸۸	۲۱/۴	۲/۴
۹	۰/۴	۰/۲	۰	۲۰۰/۲	۴۷۵	۲۸۹	۱۴۱۲	۰	۰/۸
۱۰				۲۰۰/۵	۴۷۵	۲۸۲	۱۴۱۲	۷/۱	۲/۰
۱۱				۲۰۰/۷	۴۷۵	۲۸۱	۱۴۰۶	۱۴/۳	۲/۸
۱۲				۲۰۱/۰	۴۷۵	۲۸۰	۱۴۰۰	۲۱/۴	۴/۰

جدول ۲- خواص مکانیکی و فیزیکی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های آزمایشی بتن مسلح به الیاف شیشه

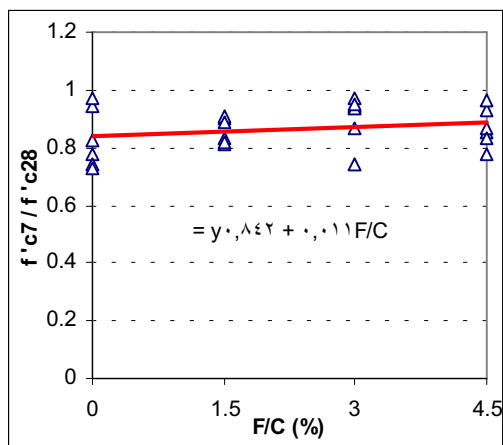
شماره مخلوط	G/S	F/C(%)	f' _{cu28} (MPa)	f' _{cu7} (MPa)	f' _{c28} (MPa)	f _r (MPa)	f' _t (MPa)	E _c (MPa)	ε ₀	W (%)
۱	۱/۱	۰	۳۸/۵	۴۹/۴	۳۷/۰	۴/۶۲	۲/۸۹	۳۰۹۶۷	۰/۰۰۱۹	۴/۶۸
۲			۴۱/۰	۴۵/۴	۳۳/۰	۵/۷۳	۲/۹۰	۳۱۰۷۳	۰/۰۰۲۰۴	۱/۲۱
۳			۳۷/۰	۴۹/۹	۳۵/۸	۵/۱۰	۴/۹۲	۳۴۰۷۱	۰/۰۰۲۱	۱/۲۱
۴			۳۶/۷	۴۷/۴	۳۲/۰	۴/۵۲	۲/۸۶	۳۴۹۴۵	۰/۰۰۱۸۴	۲/۱۶
۵	۰/۷	۰	۳۸/۴	۵۱/۷	۳۳/۸	۴/۷۹	۲/۷۷	۳۳۸۹۷	۰/۰۰۱۹	۵/۴۶
۶			۴۳/۴	۵۲/۰	۲۹/۳	۵/۳۳	۲/۹۴	۲۷۳۳۱	۰/۰۰۱۹۶	۰/۵۵
۷			۴۱/۸	۴۶/۰	۳۱/۷	۵/۵۱	۳/۰۷	۲۲۴۰۴	۰/۰۰۲۱	۰/۵۱
۸			۴۴/۹	۴۵/۱	۳۲/۳	۴/۰۴	۳/۰۵	۲۵۸۴۸	۰/۰۰۲۴۹	۰/۵۲
۹	۰/۲	۰	۴۰/۰	۵۵/۰	۴۲/۵	۴/۴۶	۳/۰۴	۲۵۷۷۸	۰/۰۰۲۰۵	۵/۹۱
۱۰			۴۱/۶	۵۱/۳	۲۹/۹	۵/۶۰	۳/۱۰	۱۷۹۴۰	۰/۰۰۲۴۴	۰/۱۹
۱۱			۴۰/۳	۴۲/۸	۲۹/۴	۴/۹۹	۳/۳۷	۲۱۲۵۷	۰/۰۰۲۵۱	۰/۳۷
۱۲			۳۶/۰	۴۲/۱	۲۶/۳	۴/۹۳	۳/۳۱	۱۶۵۱۸	۰/۰۰۲۷۵	۰/۲۴



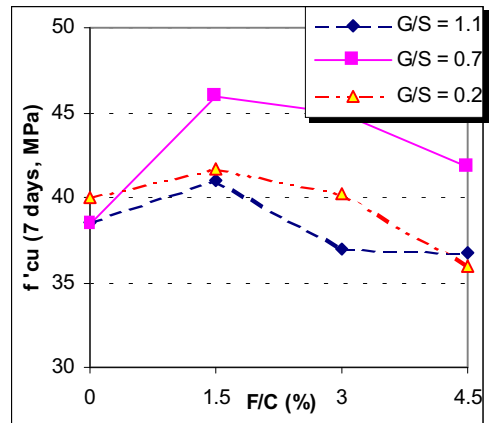
شکل ۴- تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه استوانه‌های نمونه‌های آزمایشی GFRC برحسب نسبت الیاف به سیمان و شن به ماسه



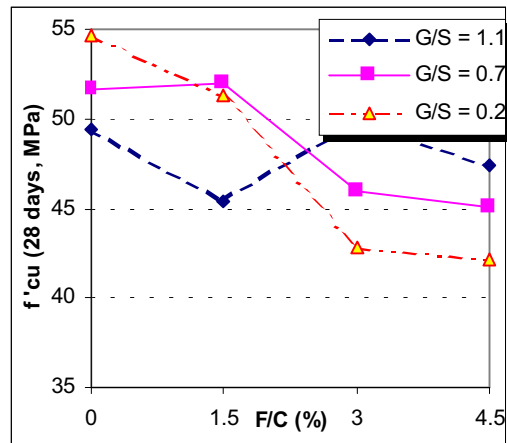
شکل ۵- تعدادی از نمونه‌های استوانه‌ای شکسته شده تحت آزمایش فشار



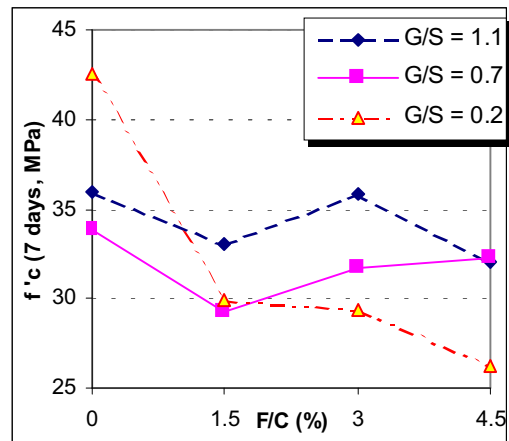
شکل ۶- نسبت مقاومت فشاری ۷ روزه به ۲۸ روزه استوانه‌ای نمونه‌های آزمایشی GFRC برحسب نسبت الیاف به سیمان



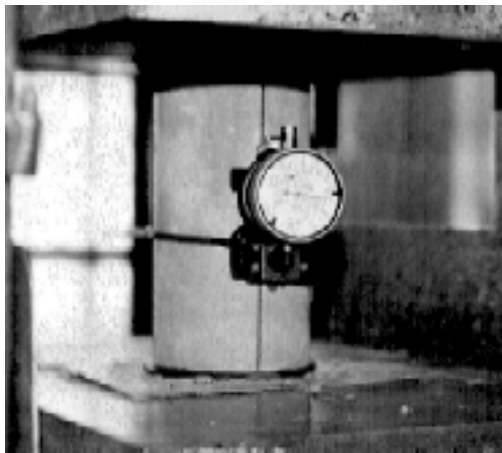
شکل ۱- تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه مکعبی نمونه‌های آزمایشی GFRC برحسب نسبت الیاف به سیمان و شن به ماسه



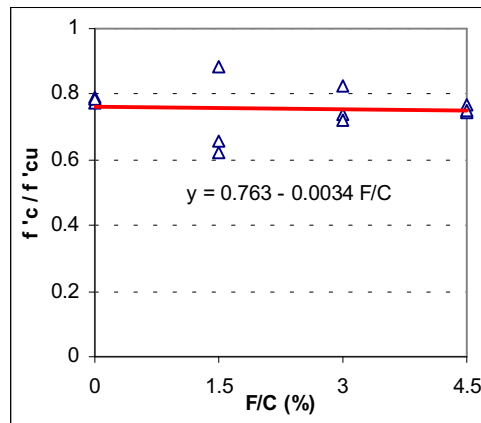
شکل ۲- تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه مکعبی نمونه‌های آزمایشی GFRC برحسب نسبت الیاف به سیمان و شن به ماسه



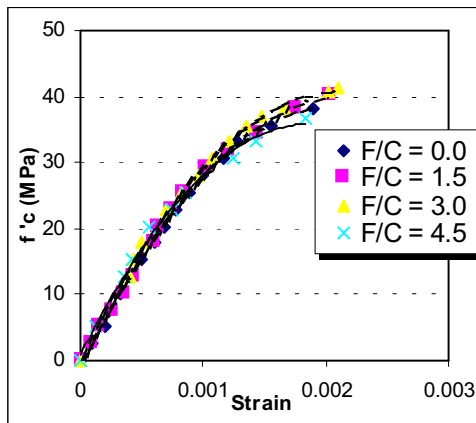
شکل ۳- تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه استوانه‌ای نمونه‌های آزمایشی GFRC برحسب نسبت الیاف به سیمان و شن به ماسه



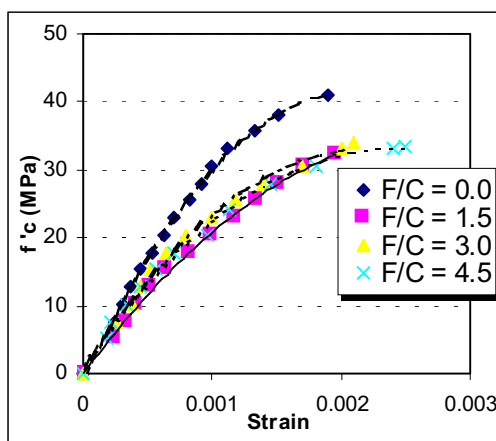
شکل ۸- اندازه‌گیری کرنش یک نمونه استوانه‌ای توسط دمک گیج، تحت آزمایش فشار



شکل ۷- نسبت مقاومت فشاری ۲۸ روزه استوانه‌ای به مکعبی نمونه‌های آزمایشی GFRC برحسب نسبت الیاف به سیمان



شکل ۹- منحنی تنش - کرنش (۲۸ روزه استوانه‌ای) نمونه‌های آزمایشی GFRC به ازای G/S=1.1



شکل ۱۰- منحنی تنش - کرنش (۲۸ روزه استوانه‌ای) نمونه‌های آزمایشی GFRC به ازای G/S=0.7

۴-۲- منحنی تنش و مدول الاستیسیته

کرنش فشاری نمونه‌های استوانه‌ای بتن الیافی تحت بار، با چسباندن نشانه‌هایی^{۱۳} بر روی نمونه‌ها به فاصله ۵۰ میلیمتر و با استفاده از دمک گیج^{۱۴} اندازه‌گیری شد. شکل (۸) یک نمونه استوانه‌ای را در حالی که تحت بار قرار گرفته و کرنش آن توسط دمک گیج اندازه‌گیری می‌شود، نشان می‌دهد. منحنی تنش - کرنش نمونه‌ها به ازای درصدهای مختلف الیاف و نیز به ازای نسبت شن به ماسه ۱/۱، ۱/۷ و ۰/۲ به ترتیب در شکل‌های (۹) تا (۱۱) نمایش داده شده است. منحنی برازش داده شده در کلیه شکلها یک منحنی درجه دوم است که از دقت بسیار بالایی برخوردار است، به صورتی که ضریب همبستگی در کلیه این منحنیها حداقل برابر $R^2=0.995$ است. با استفاده از منحنیهای تنش - کرنش و با استفاده از مفهوم مدول الاستیسیته بتن که به صورت مدول الاستیسیته سکانت در تنش $0.4f'_c$ تعریف می‌شود، مدول الاستیسیته کلیه نمونه‌ها محاسبه شد که در جدول (۲) آورده شده است.

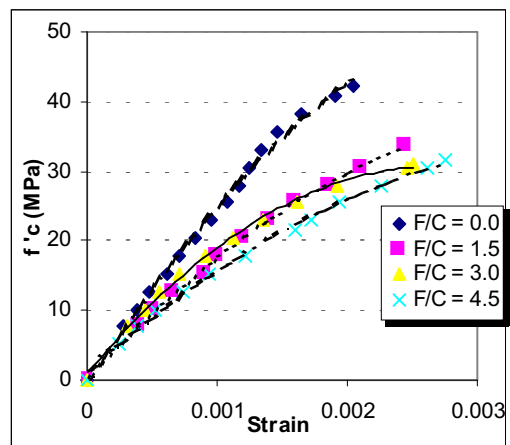
بررسی اعداد جدول (۲) نشان می‌دهد که روابط متداول برای تعیین مدول الاستیسیته بتن که اکثراً به صورت زیر بیان می‌شود [۱۱]

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

در جدول (۲) همچنین مقادیر کرنش متناظر با f'_c برای نمونه‌های آزمایشی آورده شده است. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که در غالب موارد، افزایش میزان الیاف شیشه‌ای منجر به افزایش ϵ_0 شده است؛ بدین ترتیب می‌توان استنتاج کرد که اصولاً افزایش درصد الیاف شیشه‌ای منجر به تغییر شکل بیشتر بتن قبل از شکست خواهد شد.

۴-۳- مقاومت خمشی و کششی

منحنی تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌های بتن الیافی برحسب تغییرات نسبت الیاف به سیمان و نسبت شن به ماسه در شکل (۱۲) و نظیر همین منحنی برای مقاومت کششی در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. شکل (۱۳) روند مطلوبی از تأثیر افزایش درصد الیاف بر مقاومت کششی بتن تحت کشش خالص را نشان می‌دهد؛ به طوری که با افزایش مقدار الیاف شیشه از ۰ به ۳ درصد، مقاومت کششی بتن با $\frac{G}{S}$ برابر ۰/۲ و ۰/۷ بیش از ۱۰ درصد افزایش یافته است. اگر چه برای بتن با $\frac{G}{S}$ برابر ۱/۱، افزایش مقدار $\frac{F}{C}$ تقریباً تأثیری بر مقاومت کششی بتن نداشته است که این مسئله بیانگر نامناسب بودن مخلوطهای بتن الیافی با نسبت $\frac{G}{S}$ بالاست. از طرف دیگر منحنیهای شکل (۱۲) نشان می‌دهند که مقاومت خمشی بتن با الیاف شیشه با درصد الیاف در محدوده ۱/۵ تا ۳ درصد، تا ۲۵ درصد افزایش یافته است (حداقل ۱۰ درصد). از مجموع دو شکل (۱۲) و (۱۳) می‌توان قضاوت کرد که با توجه به اینکه هدف اصلی استفاده از بتن الیافی بهبود رفتار بتن تحت کشش است، به کار بردن الیاف شیشه در محدوده ۱/۵ تا ۳ درصد و نیز به کار بردن مقدار متوسطی برای نسبت شن به ماسه (مثلاً $\frac{G}{S} = 0.7$)، رفتار کششی بتن الیافی را چه در کشش مستقیم و چه در کشش ناشی از خمش به صورت مناسبتری بهبود می‌بخشد. لازم به ذکر است که یکی از اهداف اصلی ساخت بتن الیافی، افزایش خاصیت جذب انرژی و طاقت بتن است که در برنامه این تحقیق با توجه به محدودیتهای آزمایشگاهی،

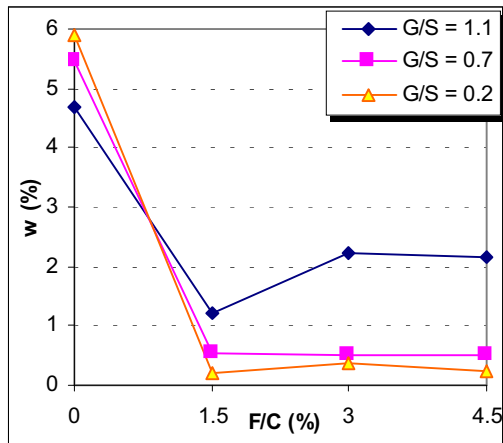


شکل ۱۱- منحنی تنش - کرنش (۲۸ روزه استوانه‌ای) نمونه‌های آزمایشی GFRC به ازای $G/S=0.2$

با خطای بسیار زیاد نتایج بالا را پیش بینی می‌کنند ($R^2=0.44$). به همین دلیل با استفاده از یک رگرسیون چندمتغیره^{۱۵} سعی شد که تأثیر کلیه عوامل در پیش بینی مدول الاستیسیته بتن وارد شود. بررسی انجام شده نشان داد که تأثیر پارامتر $\frac{F}{C}$ در این پیش بینی چندان زیاد نیست، به همین دلیل با حذف $\frac{F}{C}$ از معادله حاصله، نهایتاً به معادله زیر دست یافتیم

$$E_c = 1.4 \left(\frac{G}{S} \right)^{0.24} f'_c{}^{0.85}, \quad R^2 = 0.85 \quad (2)$$

در این معادله E_c مدول الاستیسیته بتن برحسب GPa، f'_c مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن برحسب MPa و G/S نسبت دانه‌های درشت به دانه‌های ریز به کار رفته در ساخت بتن است. قابل ذکر است که اگرچه در این معادله ضریب همبستگی از مقدار قابل قبولی برخوردار است ($R^2=0.85$)، با این وجود معرفی این معادله به عنوان یک مدل نیاز به انجام تحقیقات تجربی بیشتر و با به کار گرفتن نسبتهای متفاوتی از G/S دارد. در هر حال این نکته قابل توجه است که براساس تحقیق انجام شده و معادله پیشنهادی، مقدار الیاف شیشه‌ای به کار رفته در ساخت بتن الیافی تأثیر قابل توجهی بر مدول الاستیسیته بتن الیافی ندارد

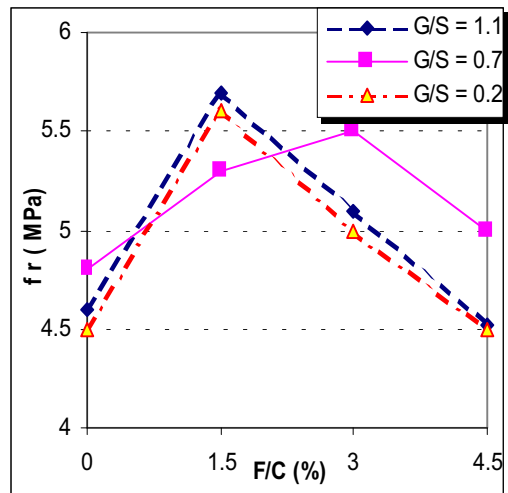


شکل ۱۴- تغییرات درصد جذب آب نمونه‌های آزمایشی GFRC برحسب نسبت الیاف به سیمان و ماسه به شن

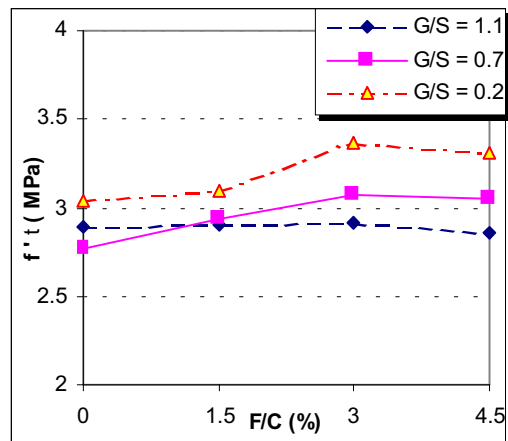
آب را برحسب تغییرات مقدار الیاف مصرفی در ساخت بتن، به ترتیب برای نسبت شن به ماسه ۱/۱، ۰/۷ و ۰/۲ نشان می‌دهد. با مشاهده این شکل ملاحظه می‌شود که به ازای انواع نسبت‌های شن به ماسه مورد استفاده در ساخت بتن، جذب آب بتن مسلح به الیاف شیشه به مراتب کمتر از جذب آب بتن بدون الیاف است. این مسئله یکی از خواص مطلوب بتن الیافی مسلح به الیاف شیشه محسوب می‌شود. بدیهی است که با کاهش جذب آب بتن، مقاومت در مقابل بسیاری از شرایط نامساعد محیطی و منجمله یخ زدن و آب شدن‌های متوالی، افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه گیری

- ۱- استفاده از بتن الیافی و منجمله بتن با الیاف شیشه تأثیرات قابل توجهی بر رفتار مکانیکی بتن تحت کشش و مقابله با ریزترکها می‌گذارد.
- ۲- مهمترین مشکل کار کردن با بتن مسلح به الیاف شیشه، پایین آمدن کارایی بتن است که برای فائق آمدن بر آن باید از مخلوط‌های ریزدانه‌تر استفاده کرد. همچنین لازم است فوق روان‌کننده با کیفیت مناسب به مخلوط اضافه شود.



شکل ۱۲- تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌های آزمایشی GFRC برحسب نسبت الیاف به سیمان و ماسه به شن



شکل ۱۳- تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های آزمایشی GFRC برحسب نسبت الیاف به سیمان و ماسه به شن

مورد بررسی تجربی قرار نگرفته است و بنابراین نتایج فقط براساس افزایش مقاومت کششی در کشش ایجاد شده در آزمایش شکافت، و مقاومت خمشی در اولین لحظه از ترک خوردگی خمشی، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۴-۴- جذب آب

درصد جذب آب نمونه‌های ساخته شده در جدول (۲) آورده شده است. همچنین شکل (۱۴)، تغییرات درصد جذب

تا ۲۵ درصد). از طرفی وجود الیاف شیشه‌ای تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت فشاری بتن الیافی نمی‌گذارد.

۸- بتن الیافی مسلح به الیاف شیشه به صورت قابل ملاحظه نسبت به بتن بدون الیاف، درصد جذب آب کمتری دارد، بدین ترتیب پیش‌بینی می‌شود که بتن الیافی نسبت به بتن معمولی از پایایی بهتری برخوردار باشد.

قدردانی

این مطالعه در قالب یک طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده و کلیه هزینه‌ها در همین چارچوب تأمین شده است که بدین وسیله از مساعدت معاونت پژوهشی دانشگاه تقدیر می‌شود. همچنین الیاف شیشه‌ای به کار رفته در آزمایشها توسط شرکت تولیدی صنعتی فراسان تأمین شده که بدین وسیله از مدیریت محترم آن شرکت نیز تقدیر می‌شود. کلیه آزمایشها در آزمایشگاه بتن و مصالح دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان و با مساعدت کارکنان آزمایشگاه، و نیز همکاری آقای مهندس عبدالرضا کبیری صورت گرفته که بدین وسیله از کلیه دست اندرکاران تقدیر و تشکر می‌شود.

۳- در ساخت بتن با الیاف شیشه لازم است با اتخاذ تدابیر مناسب و منجمله استفاده از مواد جداکننده، پدیده گلوله شدن الیاف را به حداقل رسانید.

۴- نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که استفاده از مخلوطهای با نسبت شن به ماسه متوسط (مثلاً $\frac{G}{S} \approx 0.7$) و نیز درصد الیاف شیشه در محدوده ۱/۵ تا ۳ درصد، بهترین رفتار مکانیکی را برای بتن با الیاف شیشه حاصل می‌کند.

۵- چنانچه در یک بتن با وزن معمولی نسبت درشت دانه به ریزدانه مصرفی معلوم باشد، در تخمین مدول الاستیسیته بتن می‌توان از معادله پیشنهادی (۲) به جای معادله متداول ACI-318 استفاده کرد. از آنجا که در این رابطه درصد الیاف مصرفی تأثیر مشخصی بر مدول الاستیسیته بتن نداشته است، می‌توان استنتاج کرد که میزان الیاف شیشه‌ای نقش مؤثری در مدول الاستیسیته بتن الیافی ایفا نمی‌کنند.

۶- وجود الیاف شیشه در بتن و نیز افزایش میزان الیاف (غالباً)، سبب افزایش کرنش نظیر f'_c شده و به بیان دیگر، بتن تا حدودی شکل‌پذیرتر می‌شود.

۷- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در محدوده مصالح اشاره شده در مورد ۴، مقاومت کششی و به خصوص مقاومت خمشی بتن به صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد (۱۰)

واژه نامه

- | | | |
|------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 1. fiber reinforced concrete | 6. pull-out strength | 11. splitting test |
| 2. toughness | 7. glass fiber reinforced cement | 12. capping |
| 3. toughness index | 8. silica fume | 13. Demec points |
| 4. polypropylene | 9. balling | 14. Demec gauge |
| 5. Kevlar | 10. British Standard | 15. multiple regression |

مراجع

- Soroushian, P., "Secondary Reinforcement Adding Cellulose Fibers," *ACI, Concrete International*, pp. 28-38, June 1986.
- Lin, Wei-ling, "Toughness Behaviour of Fiber Reinforced Concrete," *Fibre Reinforced Cement and Concrete, Proceedings of the Fourth RILEM International symposium*, Sheffield, UK, pp. 299-315, 1992.
- American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)," *ASTM C1018*, Philadelphia, USA, 1997.
- American Concrete Institute, "Measurment of Properties of Fiber Reinforced Concrete," *ACI*

- Manual of Concrete Practice, ACI-544. 2R-89*, Michigan, USA, 1998.
5. Majumdar, A. M., "Properties of GRC, "Fibrous Concrete, Concrete International Ci80, Proceedings of the Symposium on Fibrous Concrete, London, England, pp. 48-68, 1980.
 6. Proctor, B. A., "Properties and Performance of GRC," Fibrous Concrete, *Concrete International, Ci80, Proceedings of the Symposium on Fibrous Concrete*, London, England, pp. 69-85, 1980.
 7. Razaqpur, A. G., and Kashef, A. H., "State-of-the-Art on Fibre Reinforced Plastics for Buildings," Submitted to Institute for Research in Construction-National Research Council of Canada, Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada, 1993.
 8. Madej, J., "Properties of GFRC Mortars with Different pozzolanic Additives," *Fibre Reinforced Cement and Concrete, Proceeding of the Fourth RILEM International Symposium*, Sheffield, UK, pp. 114-125, 1992.
 9. American Concrete Institute, "Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal and Heavyweight Concrete (ACI 211-89)," *ACI Manual of Concrete Practice*, Detroit, USA, 1998.
 ۱۰. مستوفی نژاد، د.، *تکنولوژی و طرح اختلاط بتن*، چاپ سوم، نشر ارکان، اصفهان، ۱۳۷۹
 11. American Concrete Institute, "*Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-95)*," Farmington Hills, USA, 1995.