بررسي خواص مصالح پايه سيماني مسلح به الياف فولادي مجعد با مقاومت كششي و شكل پذيري بالا

قدس نظرعلي[۱] و فرشيد جندقي علايي*[۲]

[۱] كارشناس ارشد دانشكده مهندسي عمران و معماري - دانشگاه صنعتي شاهرود

[۲]استاديار دانشكده مهندسي عمران و معماري - دانشگاه صنعتي شاهرود

(تاريخ دريافت ۸۵/۱۲/۲۶ , تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۷/۲/۷ , تاريخ تصويب ۸۷/۶/۵)

چكيده

مقاومت فشاري، مقاومت كششي و شكل پذيري از جمله مهم ترين خصوصيات مكانيكي يک مصالح سازه اي مناسب، خصوصاً براي تعميرات سازه اي مي باشد. با توجه به مقاومت فشاري قابل قبول مصالح پايه سيماني و ناچيز بودن مقاومت كششي و شكل پذيري آنها يكي از روشهاي جبران كاستي هاي اين مصالح، افزودن الياف به آنها مي باشد. اين تحقيق به منظور دست يابي به بتن اليافي با مقاومت كششي و شكل پذيري بالا با استفاده از مصالح موجود در كشور صورت پذيرفته است. به طور كلي فعاليت هاي انجام شده در اين مطالعه را مي توان به سه بخش تقسيم نمود: دست يابي به ماتريس پايه سيماني مناسب براي بتن اليافي، انتخاب شكل الياف فولادي سازگار با ماتريس و در نهايت دست يابي به بتن اليافي با مقاومت كششي و شكل پذيري بالا.در بخش نخست مطالعه ۱۴۰ طرح اختلاط مورد بررسي قرار گرفت و در نهايت ماتريس پايه سيماني با مقاومت فشاري MPa ۱۷۰ جهت ادامه تحقيقات انتخاب گرديد. به منظور بهبود مقاومت كششي و شكل پذيري ماتريس، الياف فولادي مجعد با قطر mm ۰/۳ و طول mm ۲۰ مورد مطالعه قرار گرفتند. جهت دست يابي به الياف سازگار با ماتريس به دست آمده، آزمايش مقاومت بيرون كشيدگي بر روي الياف تک با طول و ارتفاع هاي موج مختلف انجام گرفت و شكل بهينه الياف به دست آمد. در نهايت با افزودن ۲ تا ۴ درصد حجمي الياف فولادي مجعد به ماتريس پايه سيماني، مقاومت فشاري MPa ۱۹۸ و مقاومت كششي MPa ۲۳/۴ و انرژي شكست به بزرگي N/m ۹۵۰۰ به دست آمد.

واژه هاي كليدي: بتن اليافي - مقاومت كششي - شكل پذيري - ماتريس پايه سيماني - الياف مجعد

مقدمه

كاربرد بتن اليافي[۱] (FRC) از اواسط دهه ۶۰ ميلادي در كف سازي جاده ها، باند فرودگاه ها، دال ها، قطعات پيش ساخته و سازه هاي ضد انفجار شروع شد. از آن زمان تاكنون تحقيقات زيادي در اين مورد انجام شده و انواع الياف با شكل و جنس مختلف براي تقويت بتن مورد استفاده قرارگرفته است. در دهه ۹۰ با نگاهي دقيق تر به ساختار ماتريس[۲] و الياف، و بررسي مكانيزم شكست بتن اليافي، نسل جديد اين مصالح يعني FRC هاي با عملكرد ويژه (HPFRCC[۳]) ابداع گرديد. HPFRCC براي اولين بار توسط Naaman و Reinhardt در سال ۱۹۹۶ از FRC معمولي متمايز شد [۱]. FRC هاي معمولي در مقايسه با بتن از شكل پذيري بهتري برخوردار مي باشند، ولي مقاومت كششي آن ها تفاوت چنداني با بتن ندارد. در مقابل، HPFRCC ها داراي خصوصيات بهبود يافته اي نظير رفتار سخت شدگي كرنش[۴] تحت بارهاي كششي، مقاومت كششي، انرژي شكست[۵] و مقاومت نظير اولين ترک[۶] بسيار بيشتر از FRC هاي معمولي مي باشند. وسعت ناحيه سخت شدگي كرنش در مصالح پايه سيماني مسلح به الياف كمتر از فولاد مي باشد و از اين جهت مكانيزم سخت شدگي كرنش در اين مصالح به صورت مجازي[۷] تشكيل مي شود [۲].

پي بردن به خصوصيات منحصر به فرد HPFRCC، همواره بر انگيزه محققان براي استفاده هرچه بيشتر از اين مصالح در سازه هاي حجيم افزود. ترميم اعضاي بتني [۵-۳] ساخت ميراگرها[۸] [۶] و تيرهاي با دهانه چند ده متر براي پل سازي [۷] تنها مواردي از كاربردهاي وسيع HPFRCC مي باشد. جدول (۱) خصوصيات مكانيكي بارزترين انواع HPFRCC ابداع شده تاكنون در سراسر جهان را نشان مي دهد. در اين جدول v_f ,L_f ,D_f ,σ_c , f_{sp} ,f_y و G_f به ترتيب عبارتند از: درصد حجمي الياف، طول الياف، قطر الياف، مقاومت فشاري، مقاومت كششي، تنش جاري شدن و انرژي شكست HPFRCC.

* نويسنده مسئول : تلفن : ۰۹۱۲۲۷۳۱۳۷۱ , فاكس : ۸۸۷۱۴۳۳۰ , Email: farshidja@yahoo.com

جدول ۱ : خصوصيات مكانيكي انواع بارز HPFRCC.

Material	*Reference No.*	v_f (%)	L_f *(mm)*	D_f *(mm)*	σ_c (*MPa*)	f_{sp} (*MPa*)	f_r (*MPa*)	G_f (N/m)
CARDIFRC ®	[3-5]	6	6(5%) & 13(1%)	0.16	207	25	-	21000
Densit	[1]	6	12	0.4	140	-	-	-
Ductal	[1]	2	13-15	0.2	160-240	-	-	-
RPC	[7]	4	6	0.16	200-800	-	60	45000
SIFCON	[1]	12	30	0.5	56-120	41	90	134000
Torex-HPFRCC	[1]	2	30	0.3	84	-	-	-

بتن اليافي در ايران

هرچند تحقيقات در زمينه بتن اليافي در ايران از سال ۱۳۶۶ آغاز شده است ليكن متأسفانه تاكنون فعاليت هاي بسيار محدودي به منظور بهبود مقاومت كششي، شكل پذيري، دوام و كنترل ترک هاي كششي صورت گرفته است. ريشه اين محدوديت را مي توان عدم وجود امكانات كافي و مناسب براي ساخت بتن اليافي و در نتيجه، عدم شناخت كافي اين مصالح دانست. از ميان مواد اوليه مورد نياز جهت توليد بتن اليافي تمامي مصالح مورد نياز در ماتريس، شامل: سيمان، سنگ دانه، ميكروسيليس و فوق روان كننده در داخل كشور با كيفيت قابل قبول توليد مي شود. اما توليد جزء اصلي بتن اليافي كه همان الياف است، در داخل كشور تاكنون ميسر نبوده است. در تحقيقات انجام شده در كشور، الياف به صورت وارداتي از كشورهاي ديگر تامين شده و يا به روش دستي (كه دقت لازم را نداشته و جنبه عملي موضوع را زير سؤال مي برد) توليد شده است. به طور كلي تأمين الياف فولادي را مي توان بزرگ ترين مانع در توسعه صنعت بتن اليافي در كشور دانست. هدف از انجام اين تحقيق دست يابي به بتن اليافي با مقاومت كششي و شكل پذيري بالا با استفاده از امكانات موجود در كشور و حذف محدوديت هاي اجرايي توليد الياف مي باشد.

تشريح برنامه آزمايشگاهي

مراحل اصلي برنامه آزمايشگاهي به شرح زير مي باشد:

- دست يابي به ماتريس با مقاومت فشاري، كارآيي و حالت خميري مناسب جهت استفاده در بتن اليافي.
- طراحي هندسه الياف فولادي سازگار با ماتريس.
- توليد الياف فولادي.
- ساخت نمونه هاي اصلي بتن اليافي و آزمايش هاي نهايي.

مصالح مصرفي

همان طور كه پيش تر ذكر گرديد، به منظور تقويت جنبه كاربردي اين تحقيق، از مصالح موجود در كشور استفاده شده است. سيمان مصرفي در اين پژوهش از نوع پرتلند تيپ II بوده و از سيمان شاهرود استفاده گرديد. دو نوع ميكروسيليس، محصول كارخانه هاي فروسيليس سمنان و ازنا، و سه نوع فوق روان كننده PCE، NSF و Seko Dense در اين تحقيق بكار گرفته شد. سنگ دانه مصرفي از نوع ريزدانه و جنس كوارتز با حداكثر ابعاد ذرات $۴/۷۵\,mm$ انتخاب گرديد.

در اين تحقيق به منظور توليد دقيق و سريع الياف فولادي دستگاهي در دانشگاه صنعتي شاهرود طراحي و ساخته شد. رشته هاي سيم فولادي از يک سمت وارد دستگاه شده و توسط دو چرخ دنده موج زن به صورت مجعد در مي آيند. در نهايت يک چهار تيغه از جنس كربن رشته سيم فولادي مجعد را به قطعات مساوي تقسيم مي نمايد (شكل۱). اين دستگاه كه با شماره ۳۷۶۱۱ به عنوان اختراع به ثبت رسيده است، قابليت توليد انبوه الياف مجعد را دارا بوده به طوري كه قادر است در هر ساعت ۲- ۱/۵ كيلوگرم الياف مجعد مطابق با مشخصات مورد نظر را توليد نمايد. هم چنين اين دستگاه قابليت تنظيم براي ساخت انواع ديگر الياف با طول، قطر، ارتفاع موج و طول موج مختلف را دارا مي باشد. الياف مجعد مصرفي در اين تحقيق با استفاده از سيم فولادي پركربن، با مقاومت كششي نهايي $۱۸۰۰\text{-}۱۹۰۰\,MPa$ و قطر $۰/۳\,mm$ ساخته شده است.

شكل ۱- الف : سيم فولادي، ب :دستگاه، ج : الياف مجعد.

جدول ۲ : طرح مخلوط هاي اوليه (نسبت وزني).

	Agg/C	SF/C	Fine Quartz Sand				W/(C+SF)	SP/(C+SF)
			0-300 μm	0-0.25 mm	0.25-1 mm	1-4 mm		
RPC	1.1	0.25	100%	---	---	---	0.22	0.019
DSP	1.58	0.25	---	14%	29%	57%	0.15	0.06

جدول۳ : طرح مخلوطهاي آزمايشي.

نام طرح اختلاط		**MIX-A1**	**MIX-A2**	**MIX-A3**	**MIX-A4**	**MIX-A5**
نسبتهاي اختلاط	**AGG/C**	1.1	2	1.1	1.1	1.34
	S.F/C	0.25	0.25	0.15	0.25	0.25
	AGGREGATE	50% (0.1-0.25mm)	50% (0.1-0.25mm)	50% (0.1-0.25mm)	100% (0-0.6mm)	50% (0-0.3mm)
		50% (0-0.3mm)	50% (0-0.3mm)	50% (0-0.3mm)	----	50% (0.3-1.2mm)
		----	----	----	----	----
		----	----	----	----	----
حداكثر مقاومت فشاري۷روزه (MPa) 7days-20 $°C$		**88**	**61**	**72**	**73**	**73**
نام طرح اختلاط		**MIX-A6**	**MIX-A7**	**MIX-A8**	**MIX-A9**	**MIX-A10**
نسبتهاي اختلاط	**AGG/C**	1.58	1.58	2.5	2.9	2.9
	S.F/C	0.25	0.15	0.15	0.15	0.15
	AGGREGATE	14% (0-0.3mm)	14% (0-0.3mm)	14% (0-0.3mm)	10% (0-0.3mm)	7% (0-0.3mm)
		28.5% (0.3-1.2mm)	28.5% (0.3-1.2mm)	28.5% (0.3-1.2mm)	25% (0.3-1.2mm)	10% (0.3-1.2mm)
		57.5% (1.2-4.75mm)	57.5% (1.2-4.75mm)	57.5% (1.2-4.75mm)	65% (1.2-4.75mm)	10% (1.2-2.4mm)
		----	----	----	----	73% (2.4-4.75mm)
حداكثر مقاومت فشاري۷روزه (MPa) 7days-20 $°C$		**128**	**84**	**70**	**90**	**76**

دست يابي به ماتريس سيماني جهت استفاده در بتن اليافي

هدف از انجام اين مرحله از كار آزمايشگاهي دست يابي به بتني با كارآيي مناسب و مقاومت بالا مي باشد. به عنوان طرح اوليه ماتريس، از طرح كلي دو FRC با مشخصات مكانيكي مطلوب با نام هاي RPC[۹] [۷] و DSP[۱۰] [۸] استفاده گرديد (جدول ۲). در طي مراحل مختلف كار آزمايشگاهي در روش ساخت، عمل آوري و تركيب آنها تغييرات اساسي ايجاد شد.

با ايجاد تغيير در طرح مخلوط هاي اوليه و اعمال روش هاي مختلف اختلاط تعداد ۱۰ گروه طرح اختلاط مورد آزمايش قرار گرفت (جدول ۳). در هر گروه با ثابت نگه داشتن مصالح خشک تشكيل دهنده (سيمان، ميكروسيليس و سنگ دانه) مخلوط هاي متعدد با نسبت هاي مختلف آب به مقادير سيمان و ميكروسيليس W/(C+SF) و همچنين فوق روان كننده به مجموع همين مقادير SP/(C+SF) ساخته شد. در مجموع بيش از ۱۴۰ طرح اختلاط مجزا بر اساس مخلوط هاي آزمايشي (MIX-A1…10) با استفاده از ميكسر(Planar Mixer) ساخته و آزمايش مقاومت فشاري روي نمونه هاي ۷ روزه مكعبي با ابعاد $۱۰\times۱۰\times۱۰\ cm$ صورت پذيرفت.

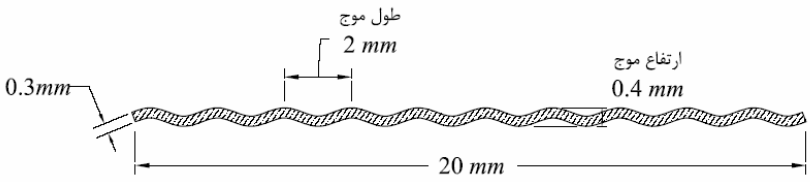
طرح اختلاط برتر (MIX-A6) كه داراي بيشترين مقاومت فشاري بوده و كارآيي مناسبي از خود نشان مي داد، به عنوان ماتريس بتن اليافي انتخاب و در حجم زياد با استفاده از بتونير(Drum Mixer) توليد شد. در اين مخلوط حداكثر مقاومت با مصرف فوق روان كننده PCE به ميزان ۱/۵ درصد وزني مجموع سيمان و ميكروسيليس و در نسبت آب به مصالح خميري ۱۵/۵-۱۷/۲% به دست آمد. مقاومت ۷ روزه اين مخلوط در شرايط عمل آوري استاندارد(آب $۲۰\ ^\circ C$) و عمل آوري در آب $۹۰\ ^\circ C$ به ترتيب به $۱۲۸\ MPa$ و $۱۶۹\ MPa$، و مقاومت ۲۸ روزه به $۱۵۴\ MPa$ رسيد. طرح اختلاط و نتايج آزمايش هاي انجام شده بر روي MIX-A6 در جدول (۴) خلاصه شده است.

جدول ۴: طرح اختلاط و خصوصيات ماتريس بتن اليافي (MIX-A6).

Constituents (kg/m^3)			***Properties***		
Portland Cement	**813**		مقاومت فشاري	7days-20 $^\circ C$	**128** MPa
Fine Quartz Sand(0-0.3mm)	**183**			28days-20 $^\circ C$	**154** MPa
Fine Quartz Sand (0.3-1.2mm)	**367**			7days-90 $^\circ C$	**169** MPa
Fine Quartz Sand (1.2-4.75mm)	**734**		كرنش نظير بار حداكثر		**0.3-0.4** %
Silica Fume	**203**		مدول گسيختگي		**7.6** MPa
Superplasticizer(PCE)	**15.2**		مقاومت كششي دونيم شدن(28days-)		**7.7** MPa
Water	**175**		مدول الاستيسيته		**5×10^4** MPa
W/C	**0.215**		انرژي شكست(G_f)		**60** N/m
W/(C+S.F)	**0.172**		اسلامپ		**20-25** cm
S.P/(C+S.F)	**1.5%**		وزن مخصوص		**2500** kg/m^3

جدول ۵ : نتايج آزمايش بيرون كشيدگي الياف مجعد و صاف با طول مدفون cm ۱ در ماتريس پايه سيماني ۷ روزه.

مود گسيختگي حاكم	نيروي تحمل شده ميانگين توسط الياف *(kgf)*	ارتفاع موج *(mm)*
گسيختگي الياف	11.73	0.9
گسيختگي الياف	11.40	0.75
گسيختگي الياف	11.35	0.55
بيرون كشيده شدن الياف	13.00	0.40
بيرون كشيده شدن الياف	6.32	0.0



شكل۲: الياف مجعد بهينه ساري شده.

طراحي هندسه الياف فولادي سازگار با ماتريس

از آن جايي كه شكل الياف يكي از عوامل مؤثر بر مشخصات مكانيكي بتن اليافي است، در بخش دوم تحقيق به ارائه روشي براي بهينه سازي شكل الياف فولادي مجعد به نحوي كه با ماتريس به دست آمده در بخش قبل سازگار باشد پرداخته شد. به منظور بررسي ميزان مشاركت مهار مكانيكي الياف موجدار، آزمايش هايي نيز بر روي الياف صاف صورت گرفت. بيرون كشيده شدن الياف از ماتريس يا گسيخته شدن آن پيش از بيرون كشيده شدن، در نوع رفتار FRC تأثير به سزايي دارد. در صورتي كه شكست با گسيخته شدن الياف همراه باشد، بتن اليافي مقاومت كششي قابل توجهي را به نمايش مي گذارد، ولي رفتار آن ترد خواهد بود و چنانچه الياف از ماتريس بيرون كشيده شود، به دليل تدريجي بودن اين نـوع شكسـت، رفتـار بتن اليـافي شكل پذيـر مي باشد. براي دست يابي توأم به هر دو عامل هدف يعني مقاومت كششي و شكل پذيري بالا، هندسه الياف بايد به گونه اي طرح شود كه الياف در حالت نهايي بيشترين نيرو را تحمل كرده (به عبارت ديگر در آستانه گسيختگي قرار گيرد)، و هم چنين قبل از گسيختگي از ماتريس بيرون كشيده شود. به اين منظور الياف صاف و مجعد با اشكال مختلف و با طول هاي متفاوت در ماتريس پايه سيماني مدفون شدند. پس از آنكه هر رشته الياف به صورت مجزا بارگذاري شد، با مشاهده مود گسيختگي هر يک، اليافي كه با حداكثر نيرو از ماتريس بيرون كشيده شدند به عنوان يک حالت بهينه معرفي گرديدند. الياف مجعد مورد استفاده در اين تحقيق داراي قطر ۰/۳*mm*، طول ۲۰*mm*، طول موج ۲*mm* و ارتفاع موج متغير بودند. براي مدل سازي حالتي كه ترک به صورت عمودي از وسط يک رشته الياف بگذرد، نيمي از رشته الياف در ماتريس مدفون و نيمه ديگر آن تحت اثر نيروي كششي افزاينده قرار گرفت. طول، قطر و طول موج الياف ثابت درنظر گرفته شد و آزمايش بيرون كشيدن (Pull-out) روي الياف با ارتفاع موج هاي مختلف (۰/۹ *mm*، ۰/۷۵ *mm*، ۰/۵۵ *mm* و ۰/۴ *mm*) انجام گرفت. همان طور كه از جدول (۵) مشاهده مي شود، الياف فولادي مجعد با ارتفاع موج ۰/۴ mm (شكل ۲) در مقايسه با حالات آزمايش شده رفتار مناسبتري را به نمايش مي گذارد. اين الياف با نيروي نزديک به مقاومت كششي نهايي الياف از ماتريس بيرون كشيده شده و موج ها تا حد زيادي صاف مي شوند، هم چنين در صورت افزايش ارتفاع موج، الياف قبل از بيرون كشيده شدن گسيخته شده و درنتيجه شكل پذيري قابل توجهي را تأمين نمي كنند. آزمايش ها نشان داد كه نيروي بيرون كشيدگي الياف با ارتفاع موج ۰/۴*mm* نسبت به الياف صاف با طول مشابه در حدود ۱۰۰% افزايش پيدا مي كند كه نشان دهنده بهره گيري قابل توجه از مهارهاي مكانيكي ايجاد شده توسط موج ها مي باشد.

ساخت نمونه هاي اصلي بتن اليافي و آزمايش هاي نهايي

پس از دستيابي به ماتريس مناسب براي ساخت بتن اليافي و هم چنين ساخت الياف فولادي سازگار با آن، اقدامات اوليه براي ساخت نمونه هاي اصلي بتن اليافي و تعيين خصوصيات مكانيكي آنها صورت گرفت. در اين مرحله با توجه به طرح اختلاط نهايي به دست آمده در بخش قبل، تعداد ۵ مخلوط بتن اليافي با درصدهاي مختلف الياف فولادي توسط بتونير ساخته شد. در هر اختلاط يک تير شكافدار[11] (۵۰×۱۰×۱۰cm) جهت انجام آزمايش انرژي شكست [۹،۱۰]، يک تير منشوري بدون شكاف (۴۰×۱۰×۱۰cm) براي آزمايش خمش چهـار نقطه اي، دو استوانه (به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتي متر) جهت انجام آزمايش كشش دونيم شدن و دو يا سه نمونه مكعبي (۱۰×۱۰×۱۰cm) براي تعيين مقاومت فشاري ساخته شد. در جدول (۶) طرح اختلاط بتن اليافي و MIX-A6 جهت مقايسه ارائه شده است. ذيلاً بتن هاي اليافي ساخته شده از جنبه هاي مختلف مكانيكي مـــورد

ارزيابي قرار مي گيرند.

نتايج آزمايش هاي مقاومت فشاري، كششي، خمشي و انرژي شكست بتن الياف

آزمايش مقاومت فشاري

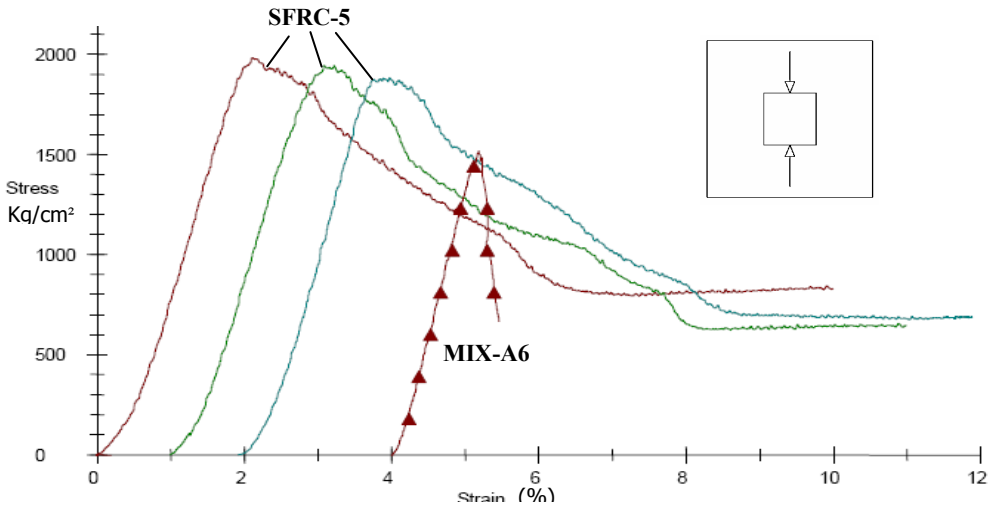
نتايج آزمايش مقاومت فشاري نمونه هاي مكعبي بتن الياف در جدول (۷) ارائه شده است. همان طور كه مشاهده مي شود در اثر افزودن الياف مقاومت فشاري تنها به ميزان ۱۶ تا ۲۸ درصد افزايش پيدا مي كند، اما انرژي جذب شده تحت تنش هاي فشاري ۱۲ تا ۱۵ برابر حالت بدون الياف است. شكل (۳) رفتار ۳ نمونه SFRC-5 (مخلوط بهينه) را تحت تنش هاي فشاري با رفتار ماتريس (بدون الياف) مقايسه مي كند. مشاهده مي شود كه نمونه هاي بتن الياف حتي تا بعد از ۱۰% كرنش فشاري مقاومت قابل ملاحظه اي از خود نشان مي دهند.

جدول ۶ : طرح اختلاط بتن الياف (kg/m^3).

نام مخلوط	MIX-A6	SFRC-1	SFRC-2	SFRC-3	SFRC-4	SFRC-5
Portland Cement	813	796	791	787	782	*777*
Fine Quartz Sand(0-0.3mm)	183	180	179	178	176	***175***
Fine Quartz Sand (0.3-1.2mm)	367	359	357	355	353	***351***
Fine Quartz Sand (1.2-4.75mm)	734	719	715	710	706	***702***
Silica Fume	203	199	198	197	195	***194***
Superplasticizer (PCE)	15.2	14.9	15.8	16.7	17.6	***18.5***
Water	175	171	170	169	168	***167***
Steel Fiber(volume percent)	Without fiber	157(2%)	196(2.5%)	236(3%)	275(3.5%)	***314(4%)***
W/C	0.215	0.215	0.215	0.215	0.215	***0.215***
W/(C+S.F)	0.172	0.172	0.172	0.172	0.172	***0.172***
S.P/(C+S.F)	1.5%	1.5%	1.6%	1.7%	1.8%	***1.9%***

جدول ۷ : ميانگين مقاومت فشاري و جذب انرژي نمونه هاي بتن الياف.

نام مخلوط	MIX-A6	SFRC-1	SFRC-2	SFRC-3	SFRC-4	SFRC-5
مقاومت فشاري(MPa)	151.3	176.2	175.9	179	180.7	***193.6***
سطح زير نمودار تا كرنش ۱۰% ($N.m$)	686	8035.4	8144.6	8648.7	9442.9	***10065.2***



شكل ۳ : مقايسه رفتار SFRC-5 تحت آزمايش مقاومت فشاري با رفتار ماتريس.

آزمايش مقاومت خمشي

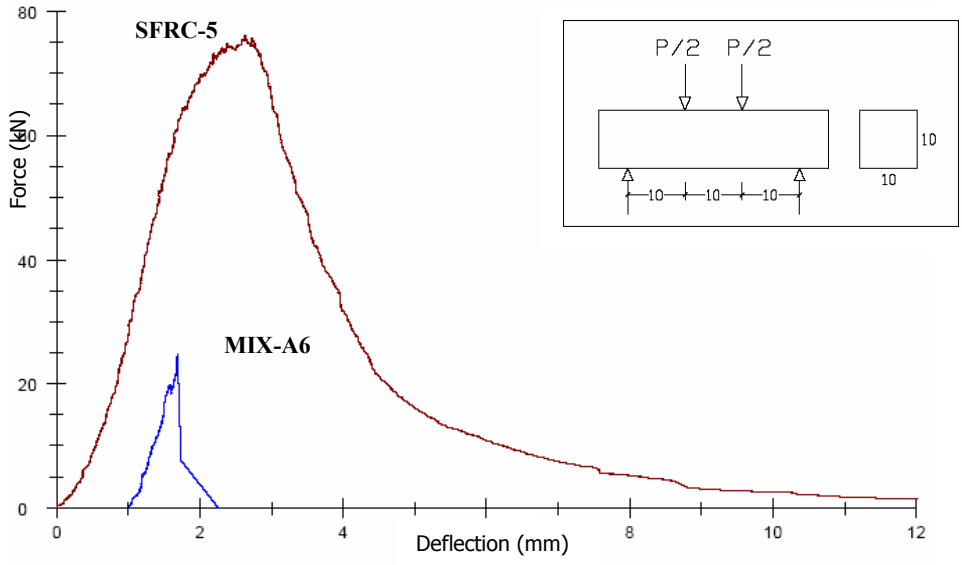
نتايج آزمايش مقاومت خمشي نمونه هاي بتن الياف در جدول (۸) خلاصه شده است. نتايج آزمايش نشان مي دهد كه تغيير مكان و جذب انرژي نظير بار حداكثر نسبت به حالت بدون الياف به ترتيب ۳/۵ و ۱۴ برابر افزايش پيدا مي كند ضمن اين كه مقاومت خمشي و كل انرژي جذب شده نسبت به حالت بدون الياف نيز به ترتيب ۳ و ۳۰ برابر شده است. شكل (۴) رفتار SFRC-5 را با ماتريس بدون الياف (MIX-A6) در آزمايش خمش چهار نقطه اي مقايسه نموده و همان طور كه مشاهده مي شود، افزودن الياف مجعد تأثير شگرفي در مقاومت خمشي و شكل پذيري ماتريس مي گذارد.

مقاومت كششي دونيم شدن

نتايج آزمايش مقاومت كششي دونيم شدن نمونه هاي بتن الياف در جدول (۹) خلاصه شده است. در اثر افزودن مقادير مختلف الياف مقاومت كششي دو نيم شدن ۲/۵ تا ۳ برابر شده است.

جدول ۸ : نتايج آزمايش خمش نمونه هاي بتن الياف .

نام مخلوط	MIX-A6	SFRC-1	SFRC-2	SFRC-3	SFRC-4	SFRC-5
مقاومت خمشي (*Mpa*)	77	17.7	17.9	19.4	19.2	**23.3**
تغيير شكل نظير بار حداكثر (*mm*)	0.75	1.01	1.42	1.76	2.07	**2.64**
جذب انرژي نظير بار حداكثر (*N.m*)	7.9	29.4	38.4	54.1	63.8	**108.6**
كل انرژي جذب شده تا لحظه خرابي (*N.m*)	7.9	75.4	97.2	131.7	157.9	**247.2**



شكل۴ : مقايسه رفتار SFRC-5 تحت آزمايش خمش با رفتار ماتريس (MIX-A6).

جدول ۹ : نتايج آزمايش مقاومت كششي دونيم شدن نمونه هاي بتن الياف.

نام مخلوط	MIX-A6	SFRC-1	SFRC-2	SFRC-3	SFRC-4	SFRC-5
ميانگين مقاومت كششي دو نيم شدن(*MPa*)	7.7	18.9	20	20.4	20.7	***23.2***

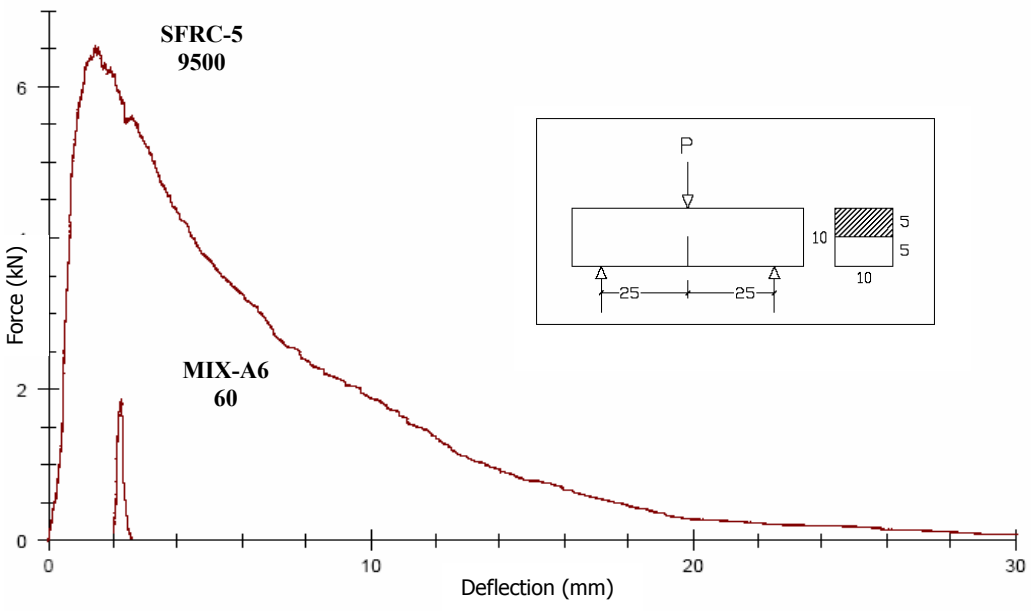
آزمايش انرژي شكست

شكل (۵) رفتار خمشي تير شكافدار از جنس SFRC-5 با رفتار مشابه ماتريس MIX-A6، تحت اثر بار وسط دهانه را مقايسه مي كند. نتايج آزمايش در جدول (۱۰) نيز خلاصه شده است. مشاهده مي شود كه انرژي شكست با افزودن الياف تا ۱۶۰ برابر نسبت به حالت بدون الياف افزايش پيدا مي كند. همانند آزمايش فشار و خمش، تغيير مكان و انرژي جذب شده تا نقطه حداكثر ظرفيت باربري نسبت به حالت بدون الياف افزايش قابل ملاحظه اي را نشان مي دهد.

جدول (۱۱) طرح اختلاط و خصوصيات مكانيكي SFRC-5 را در شرايط عمل آوري در آب $20^{\circ}C$ به مدت ۲۸ روز نشان مي دهد. افزايش مقاومت كششي و شكل پذيري بتن الياف را مي توان به عمل پل زدن[۱۲] الياف در وجوه ترک هاي كششي ايجاد شده نسبت داد (شكل ۶). در حقيقت ترک با انرژي بسيار كمي در ماتريس شكل مي گيرد اما به علت وجود الياف به راحتي گسترش پيدا نمي كند. بالا بودن نيروي بيرون كشيدگي الياف و هم چنين انرژي فوق العاده زياد جهت جداشدن كامل الياف از ماتريس باعث مي شود كه گسترش ترک نياز به اعمال نيروي قابل توجه و صرف انرژي زيادي داشته باشد. موارد ذكر شده به طور خاص براي يک ترک كششي، مستقيماً بر مقاومت كششي و شكل پذيري كل مصالح تأثير مي گذارد. همان طور كه در نتايج آزمايش هاي انجام شده مشاهده مي گردد، مطالعه رفتار بيرون كشيدگي الياف فولادي مجعد در يک ماتريس متراكم مي تواند به دست يابي به يک مصالح پايه سيماني مسلح به الياف با مقاومت كششي و شكل پذيري بالا بيانجامد.

جدول ۱۰ : نتايج آزمايش انرژي شكست نمونه هاي بتن الياف.

نام مخلوط	MIX-A6	SFRC-1	SFRC-2	SFRC-3	SFRC-4	SFRC-5
سطح زير نمودار نيرو-تغيير مكان ($N.m$)	0.3	16.1	30	39	39.2	47.5
انرژي شكست (G_f) (N/m)	60	3220	6000	7800	7840	***9500***



شكل۵ : مقايسه رفتار خمشي تير شكاف دار SFRC-5 و رفتار مشابه ماتريس الياف(MIX-A6).

جدول۱۱ : طرح اختلاط و خصوصيات بتن اليافي (SFRC-5).

Constituents (kg/m^3)			***Properties***	
Portland Cement	**777**		***SFRC-5***	
Fine Quartz Sand(0-0.3mm)	**175**		**مقاومت فشاري** (MPa)	***193.6***
Fine Quartz Sand (0.3-1.2mm)	**315**		سطح زير نمودار تا كرنش ۱۰%$(N.m)$	***10065***
Fine Quartz Sand (1.2-4.75mm)	**702**			
Silica Fume	**194**		**مقاومت خمشي** (MPa)	***23.3***
Superplasticizer(PCE)	**18.5**		تغيير شكل نظير بار حداكثر (mm)	***2.64***
Water	**167**		جذب انرژي نظير بار حداكثر $(N.m)$	***108.6***
Steel Fiber(volume percent)	**314(4%)**		كل انرژي جذب شده تا لحظه خرابي $(N.m)$	***247.2***
W/C	**0.215**			
W/(C+S.F)	**0.172**		**انرژي شكست** $(G_f)(N/m)$	***9500***
S.P/(C+S.F)	**1.9%**		**مقاومت كششي دو نيم شدن**(MPa)	***23.2***

شكل ۶ : مكانيزم شكست بتن اليافي [۱۰].

نتيجه گيري

اين تحقيق به منظور دست يابي به بتن اليافي با مقاومت كششي و شكل پذيري بالا با استفاده از مصالح موجود در كشور صورت پذيرفت. براي رسيدن به اين هدف مراحل مختلف آزمايشگاهي زير به انجام رسيد.

براي دست يابي به ماتريس مناسب براي بتن اليافي تعداد ۱۰ طرح اختلاط اصلي با مقادير مختلف آب و فوق روان كننده مورد آزمايش قرار گرفت. در نهايت MIX-A6 كه داراي كارآيي مناسب و مقاومت بسيار بالا بود به عنوان ماتريس مناسب انتخاب شد. MIX-A6 با نسبت آب به مجموع سيمان و ميكروسيليس (مصالح خميري) ۱۷/۲% و نسبت فوق روان كننده به مصالح خميري ۱/۵% در شرايط عمل آوري استاندارد داراي مقاومت فشاري ۷ و ۲۸ روزه به ترتيب ۱۲۸ MPa و ۱۵۴ MPa بوده و با ۷ روز عمل آوري در دماي ۹۰ $^{\circ}C$، مقاومت آن به ۱۶۹ MPa افزايش پيدا كرد.

در مرحله دوم برنامه آزمايشگاهي به منظور تعيين شكل الياف فولادي سازگار با ماتريس به دست آمده در بخش قبل، آزمايش مقاومت بيرون كشيدگي انجام شد. در نهايت الياف فولادي مجعد با طول ۲۰ mm، قطر ۰/۳ mm ، طول موج ۲ mm و ارتفاع موج ۰/۴ mm براي استفاده در بتن اليافي مناسب تشخيص داده شد. الياف فولادي مطابق با شرايط فوق، با نيروي نزديک به مقاومت كششي نهايي از ماتريس بيرون كشيده و موج ها تا حد زيادي صاف شدند.

در مرحله پاياني ۵ طرح اختلاط بتن اليافي ساخته و آزمايشا هاي مقاومت فشاري، مقاومت خمشي، مقاومت كششي غير مستقيم (آزمايش كشش دونيم

شدن) و انرژي شكست روي نمونه هاي ۲۸ روزه انجام گرفت و در تمامي آزمايش ها، مخلوط SFRC-5 با ۴ درصد حجمي الياف مجعد بهترين نتايج را از خود نشان داد. مقاومت كششي $۲۳/۴ MPa$ (حدوداً معادل مقاومت فشاري بتن هاي متداول) و انرژي شكست به بزرگي $۹۵۰۰ N/m$ (در حدود ۱۶۰ برابر انرژي شكست بتن معمولي و به همان نسبت شكل پذير تر از آن) نشان مي دهد كه افزودن الياف فولادي مجعد تا چه حد مي تواند بر روي خصوصيات مكانيكي ماتريس اثر بگذارد. طرح اختلاط و خصوصيات بتن اليافي SFRC-5 تحت شرايط استاندارد در جدول (۱۰) خلاصه شده است.

مراجع

1 - Li, V.C. and Wang, S. (2003). "On high performance fiber reinforced cementitious composites." Japan concrete institute, Vol. JCI-C61, PP. 13-23.

2 - JCI-DFRCC Committee (2003). "DFRCC terminology and application concepts." J. of Adv. Conc. technology, Vol. 1, No. 3, PP. 335-340.

3 - Karihaloo, B.L., Benson, S.D.P. and Alaee, F.J. (2004). "CARDIFRC® -Properties and application to retrofitting." Proc., 5th Int. Conf. on Fracture Mechanics of Conc. & Conc. Struct., USA, 12-16 April.

4 - Alaee, F.J. and Karihaloo, B.L. (2003). "Fracture Model for Flexural Failure of Beams Retrofitted with CARDIFRC." ASCE, J. of Eng. Mechanics, Vol. 129, No. 9, PP. 1028-1038.

5 - Alaee, F.J. and Karihaloo, B.L. (2003). "Retrofitting of RC beams with CARDIFRC." ASCE, J. of Comp. for Construction, Vol. 7, No. 3, PP. 174-186.

6 - Fukuyama, H. and Suwada, H. (2003). "Experimental response of HPFRCC dampers for structural control." J. of Adv. Conc. technology, Vol. 1, No. 3, PP. 317-326.

7 - Sadrekarimi, A. (2004). "Development of light weight reactive powder concrete." Japan concrete institute, J. of Adv. Conc. technology, Vol. 2, No. 3, PP. 409-417.

8 - Alaee, F. J. (2002). "Retrofitting of concrete structures using high performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC)." PhD thesis, Cardiff Univ., UK.

9 - ACI Committee 446.1R (2004). "Fracture Mechanics of Concrete: Concepts, Models and Determination of Material Properties." ACI manual of concrete practice.

10 - Cotterell, B. and Mai, Y. M (1996). "Fracture Mechanics of Cementitious Materials." Chapman & Hall, 1st. Ed.

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - Fiber Reinforced Concrete (FRC)
2 - Matrix
3 - High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite (HPFRCC)
4 - Strain Hardening
5 - Fracture Energy
6 - First Crack Strength
7 - Pseudo Strain Hardening
8 - Damping
9 - Reactive Powder Concrete (RPC)
10 - Densified System Containing Homogeneously Arranged Ultra Fine Particles (DSP or Densit)
11 - Notched Beam
12 - Bridging Action