

## دستیابی به بتن فوق توانمند

قدس نظرعلی<sup>۱</sup>، فرشید جندقی علایی<sup>۲</sup>

1- کارشناس ارشد سازه، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود

2- استادیار دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود

farshidja@yahoo.com

### خلاصه

بتن فوق توانمند (UHPC) با مقاومت فشاری بیش از  $1500 \text{ kg/cm}^2$  و دیگر خصوصیات ویژه نظیر کارایی و دوام بالا، نوع نوینی از مصالح پایه سیمانی به شمار می رود. این مصالح در مقایسه با بتن معمولی دارای نسبت آب به سیمان پایین تر بوده و در ساخت آنها از فوق روان کننده و ترکیبات سیمانی مکمل مانند میکروسیلیس نیز استفاده می شود. تا کنون تحقیقات زیادی به منظور بهبود مقاومت فشاری بتن به عنوان مهمترین خصوصیت آن صورت گرفته است. اما این تحقیقات با وجود استفاده از مصالح رایج برای تولید بتن فوق توانمند و دستیابی به مقاومت های بسیار بالا عمدتاً به دلیل روش ساخت صرفاً آزمایشگاهی، جنبه عملی نداشته و برای تولید در حجم زیاد و در شرایط کارگاهی مناسب نیستند. علاوه بر این روش عمل آوری بکار رفته در این تحقیقات نیز استفاده از نتایج آنها را تا حد زیادی محدود می کند.

هدف از این تحقیق دستیابی به بتنی با مقاومت بسیار بالا و با کارایی مناسب با استفاده از مصالح موجود در کشور است که روش ساخت و عمل آوری آن تفاوت چندانی با بتن معمولی نداشته باشد. به این منظور چندین طرح بتن با مقاومت بالا اساس مطالعه قرار گرفته و سپس با ایجاد تغییراتی در طرح و اعمال روشهای مختلف اختلاط تعداد 140 مخلوط آزمایشی با استفاده از میکسر (Planar Mixer) ساخته و آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه های 7 روزه صورت پذیرفت. در مرحله بعد طرح اختلاط برتر که دارای بیشترین مقاومت فشاری و کارایی مناسب بود برای تولید بتن در حجم زیاد با استفاده از بتونیر انتخاب و آزمایشات تکمیلی نظیر اسلامپ، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مدول گسیختگی و مقاومت کششی دومین شدن روی آن انجام شد. در نهایت این نتیجه حاصل شد که می توان با اصلاح نسبت اختلاط مصالح و روش اختلاط به یک بتن فوق توانمند با مقاومت فشاری بیش از  $1600 \text{ kg/cm}^2$  و کارایی بسیار بالا مطابق با شرایط کارگاهی و عملی دست پیدا کرد.

کلمات کلیدی: بتن مقاومت بالا، میکروسیلیس، فوق روان کننده، کارایی

### 1. مقدمه

بتن به عنوان ماده ای مقاوم و اقتصادی، یکی از مناسبترین و پرکاربردترین مصالح سازه ای به شمار می رود. بتن در ساخت پلها، جاده ها، ساختمانها، فرودگاهها و سازه های نظامی و دریایی مورد استفاده وسیع قرار می گیرد. از اینرو بخش عمده ای از بودجه عمرانی کشورها به این مصالح اختصاص دارد و طبیعتاً هزینه قابل توجهی نیز صرف تعمیر و جایگزین کردن اعضای بتنی می شود. استفاده از بتن هایی با مقاومت و دوام بیشتر باعث کاهش چشمگیر این هزینه ها خواهد شد.

بتن فوق توانمند (Ultra High Performance Concrete) با خصوصیات ویژه بلند مدت و کوتاه مدت و رفتار یکنواخت آن از بتن معمولی متمایز می شود. این مصالح معمولاً دارای مقاومت فشاری بیش از  $1500 \text{ kg/cm}^2$  و نسبت آب به ترکیبات سیمانی کمتر از 24٪ می باشند [1،2]. در ساخت آنها از فوق روان کننده و میکروسیلیس نیز استفاده می شود. ضریب نفوذپذیری UHPC تا 10000 برابر از بتن معمولی کمتر است [1]. لذا این مصالح تقریباً نفوذناپذیر و دارای دوام بسیار عالی می باشند. چنین خصوصیتی با استفاده از مصالح مرسوم و یا انجام عملیات عادی قابل دستیابی نیستند.

<sup>1</sup> کارشناس ارشد سازه، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود  
<sup>2</sup> استادیار دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود

## 2. اصول کلی برای دستیابی به UHPC

ابعاد، توزیع دانه بندی، شکل هندسی و خصوصیات ظاهری ذرات تشکیل دهنده UHPC از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می باشد. ساختار UHPC به دلیل حجم بالای مصالح سیمانی و نسبت آب به مصالح سیمانی پایین، بسیار متراکم تر از بتن معمولی بوده و برای اختلاط آن نیاز به انرژی و مدت زمان بیشتری است [3]. بطور کلی بمنظور بهبود خصوصیات مکانیکی بتن عوامل اصلی زیر باید در نظر گرفته شوند:

- افزایش یکنواختی بتن با حذف سنگدانه های درشت. بدلیل اختلاف خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بین سنگدانه ها و خمیر سیمان در مراحل مختلف گیرش، و در حین بارگذاری، ناحیه انتقال بین سنگدانه های درشت و ماتریس سیمانی منشاء ریز ترکها می باشد. پیشنهاد شده است که به منظور افزایش مقاومت فشاری بتن، حداکثر بعد سنگدانه ها باید تا حد امکان کاهش پیدا کند [3].
- افزودن مواد پوزولانی. اضافه کردن مواد پوزولانی مخصوصا میکروسیلیس با ایجاد واکنشهای پوزولانی با  $Ca(OH)_2$  حاصل از هیدراسیون سیمان و خاصیت پرکنندگی بین ذرات آن، باعث بهبود خصوصیات بتن، در حالت تازه و سخت شده می شود. افزودن 18٪ وزنی سیمان برای مصرف کامل ذرات  $Ca(OH)_2$  کافی می باشد، ولی با توجه به خاصیت پرکنندگی میکروسیلیس، مقدار بهینه مصرف آن معمولا بین 25 تا 30 درصد وزنی سیمان است [4].
- کاهش نسبت آب به مصالح سیمانی (سیمان و میکروسیلیس).
- تغییر در دانه بندی مصالح تشکیل دهنده بتن، بطوریکه در حالت خشک دارای حداکثر تراکم باشند و فضای خالی بین آنها به حداقل برسد.
- عمل آوری در دمای بالا با تشدید فعالیت پوزولانی میکروسیلیس باعث انجام کاملتر فرایند هیدراسیون و بهبود ریز ساختار بتن خواهد شد.

## 3. تشریح برنامه آزمایشگاهی

کارایی و مقاومت دو مشخصه مهم بتن فوق توانمند بشمار می روند. این مصالح باید دارای کارایی مناسب بوده تا در حداقل زمان ممکن و با حداقل انرژی بتوان آن را متراکم کرد. برای استفاده از بتن هایی با کارایی پایین به تجهیزات ویژه برای ایجاد ارتعاش خارجی و یا فشرده کردن نیاز می باشد که جنبه عملی ندارد. از آنجایی که روش تولید و عمل آوری بتن تا حدی کاربرد آن را محدود می کند، هدف از انجام این تحقیق دستیابی به بتنی با کارایی مناسب و مقاومت بسیار بالا، با استفاده از مصالح موجود در کشور و با روش مشابه با بتن معمولی می باشد. به این منظور با ایجاد تغییر در طرح مخلوطهای اولیه چند طرح جدید انتخاب و از هر کدام نمونه های متعدد ساخته شد. با اعمال روشهای مختلف اختلاط سعی شد تا حد امکان نسبت آب به سیمان کاهش و در عین حال کارایی افزایش یابد. برای ساخت مخلوط های آزمایشی از میکسر (Planar Mixer) استفاده شد و در نهایت یک طرح که حداکثر مقاومت و کارایی مناسب را دارا می باشد، برای تولید بتن با حجم بیشتر با استفاده از بتونیر (Drum Mixer) انتخاب خواهد شد. مبنای پذیرش مخلوط های آزمایشی مقاومت فشاری 7 روزه می باشد.

### 3-1. مصالح مصرفی

به منظور تقویت جنبه کاربردی این تحقیق، از مصالح موجود در کشور استفاده شده است. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ II، تولید کارخانه سیمان شاهرود می باشد. براساس مطالعات انجام شده این نوع سیمان برای تولید بتن با مقاومت بالا مناسب می باشد [5، 1]. از دو نوع میکروسیلیس محصول کارخانجات فروسیلیس سمنان و ازنا استفاده شد. به طور کلی بعد از ساخت مخلوطهای زیاد تفاوت چندانی بین خصوصیات بتن های ساخته شده از این دو نوع میکروسیلیس در حالت تازه و سخت شده مشاهده نشد. در مجموع می توان گفت استفاده از میکروسیلیس سمنان به دلیل خلوص بیشتر و عدم نیاز به الک کردن قبل از مصرف برای تولید بتن با حجم زیاد مناسبتر است. سه نوع فوق روان کننده PCE، NSF، و Seko Dense مورد استفاده قرار گرفت. در مقایسه با انواع دیگر فوق روان کننده، با استفاده از مقدار بسیار کمتری PCE به همراه نسبت آب به سیمان پایین، کارایی بتن به نحو مطلوبی افزایش پیدا می کند.

سنگدانه مورد مصرف از نوع ریزدانه و جنس کوارتز با حداکثر ابعاد ذرات 4/75mm می باشد. مطالعات نشان می دهد که در بتن با مقاومت بسیار زیاد معمولاً از سنگدانه کوارتز استفاده می شود که دلیل آن سازگاری با خمیر سیمان می باشد [7، 6، 4، 2، 8]. در نهایت مخلوط سیمان، میکروسیلیس و سنگدانه کوارتز بصورت یک جسم یکپارچه و همگن تغییر شکل می دهند. از سنگدانه سیلیسی با دانه بندی 0/1-0/25mm به عنوان مکمل استفاده شد. این نوع سنگدانه در صنایع ریخته گری کاربرد دارد و در حقیقت سنگدانه کوارتز است، که بعد از خرد شدن، فرآوری، و حذف ناخالصی ها، خشک و دانه بندی می شود.

### 3-2. طراحی بتن با مقاومت بالا

بهترین و مطمئن ترین روش برای طراحی و ساخت بتن با مقاومت بالا این است که ابتدا با مصالح موجود و طرح اختلاط اولیه نمونه های آزمایشی ساخته شود، آنگاه با توجه به نتایج بدست آمده (در صورت نرسیدن به مقاومت مطلوب)، با تغییر یک یا چند پارامتر می توان به نتیجه مورد نظر دست یافت. به عنوان طرح اولیه از دو UHPC با نام های RPC [8] و DSP (Densit) [6] کمک گرفته شد (جدول 1). در طی مراحل مختلف کار آزمایشگاهی با توجه به امکانات، در روش ساخت، عمل آوری و ترکیب آنها تغییرات اساسی ایجاد شد. با توجه به طرح مخلوطهای اولیه تعداد 10 گروه طرح اختلاط مورد آزمایش قرار گرفت. در هر گروه با ثابت نگه داشتن مصالح خشک تشکیل دهنده (سیمان، میکروسیلیس و سنگدانه) مخلوطهای متعدد با نسبتهای  $W/(C+SF)$  و  $SP/(C+SF)$  متغیر ساخته شد. نسبت اختلاط مصالح و همچنین دانه بندی سنگدانه های استفاده شده در هر گروه در جدول 2 خلاصه شده است.

جدول 1- طرح اختلاط و خصوصیات DSP و RPC

	Agg/C	SF/C	Crashed Quartz Sand				W/(C+SF)	SP/(C+SF)
			0-300 $\mu m$	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

جدول 2- طرح مخلوطهای آزمایشی با استفاده از میکسر

Mix No	MIX-A1	MIX-A2	MIX-A3	MIX-A4	MIX-A5	
Mix ratios	AGG/C	1.1	2	1.1	1.1	1.34
	S.F/C	0.25	0.25	0.15	0.25	0.25
AGG.	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)	
$f_c(MPa)$ 7days-20°C	88	61	72	73	73	
Mix No	MIX-A6	MIX-A7	MIX-A8	MIX-A9	MIX-A10	
Mix ratios	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
AGG.	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)	
$f_c(MPa)$ 7days-20°C	128	84	70	90	76	

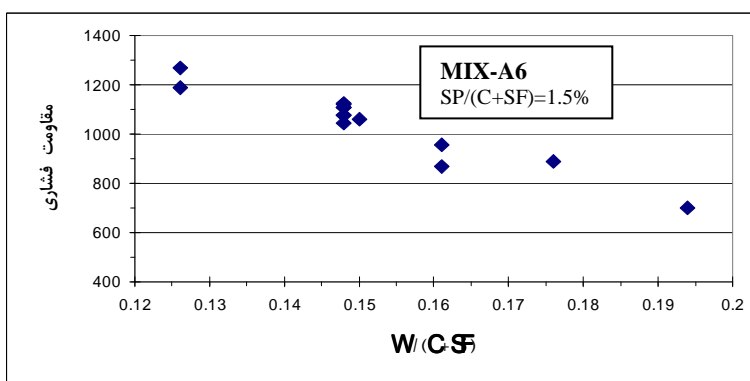
### 3-3. ساخت نمونه های آزمایشی

در مجموع تعداد بیش از 140 طرح اختلاط مجزا بر اساس 10 مخلوط آزمایشی (MIX-A1...10) با استفاده از میکسر ساخته و آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه های مکعبی با ابعاد 10×10×10cm انجام گرفت. در ادامه به تعدادی از مخلوطهای ساخته شده بر پایه MIX-A6 که نسبت به دیگر مخلوطهای آزمایشی دارای کارایی و مقاومت بیشتری است اشاره خواهد شد.

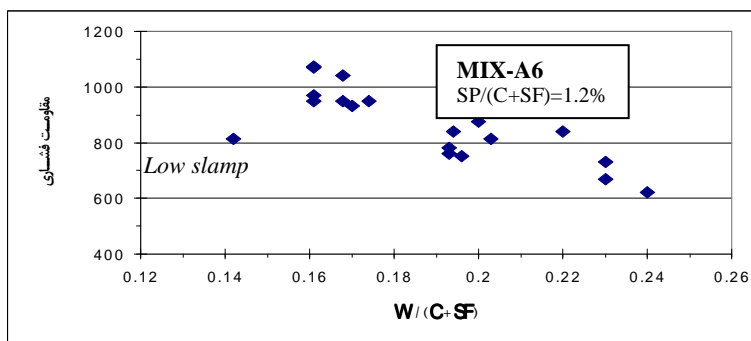
MIX-A6 تا حدودی شبیه به Densit است. این مخلوط با مقادیر مختلف آب و انواع فوق روان کننده مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج تعدادی از آنها در جدول 3 خلاصه شده است. مصرف 1/5٪ فوق روان کننده PCE و 4-5٪ فوق روان کننده NSF و Sekodense کارایی این مخلوط را به یک میزان بالا می برد و این درحالی است با استفاده از PCE حتی در نسبت آب به سیمان پایین نیز می توان به مخلوطی با کارایی قابل قبول و مقاومت بالا دست پیدا کرد. با توجه به نمودارهای 1 تا 3 مشاهده می شود که حداکثر مقاومت در صورت مصرف 1/5٪ فوق روان کننده PCE و در نسبت آب به مصالح خمیری 12/7-14/8٪ می باشد. مقاومت 7 روزه بتن در شرایط عمل آوری استاندارد و عمل آوری در آب داغ به ترتیب به  $1270 \text{ kg/cm}^2$  و  $1688 \text{ kg/cm}^2$  رسیده است (شکل 1).

جدول 3- طرح اختلاط و مقاومت فشاری 7 روزه MIX-A6 با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده ( $\text{kg/cm}^2$ )

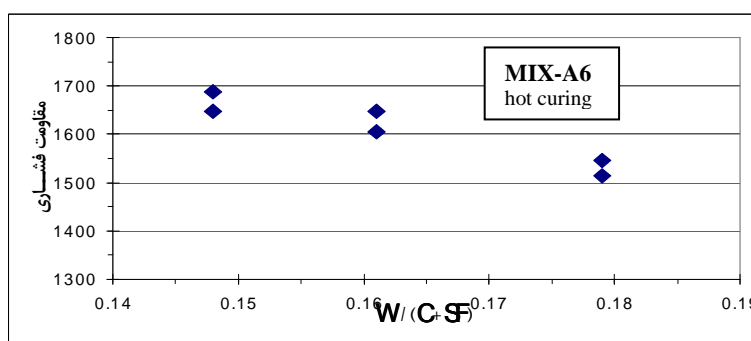
Portland Cement	804	847	852	833	826	811	773
Fine Quartz Sand(0-0.3 mm )	181	191	192	188	186	183	174
Fine Quartz Sand(0.3-1.2 mm )	363	383	385	376	372	366	349
Fine Quartz Sand(1.2-4.75 mm )	726	766	769	752	744	733	698
Silica Fume	200	213	213	209	206	203	193
Superplasticizer(PCE)	39.2	21.2	16	15.6	12.4	10.1	6.8
Water	161	134	135	154	166	181	223
W/C	0.2	0.158	0.158	0.185	0.202	0.223	0.288
W/( C+S.F)	0.16	0.127	0.127	0.148	0.161	0.179	0.233
S.P/(C+S.F)	3.9%	2%	1.5%	1.5%	1.2%	1%	0.7%
20 °C	680	1172	<b>1270</b>	1125	1073	1005	620
90 °C (مقاومت فشاری 7 روزه)	---	---	---	<b>1688</b>	1647	1546	---



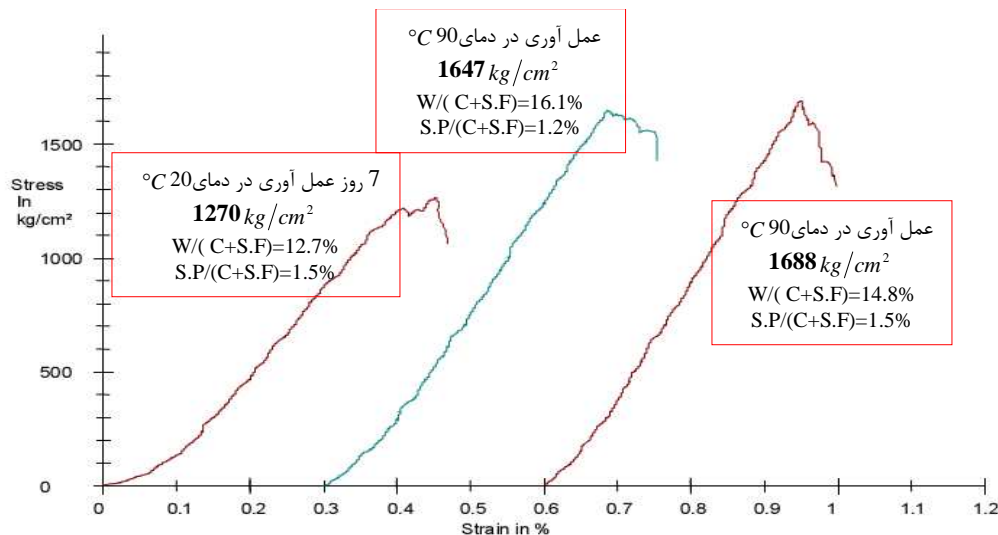
نمودار 1 - تغییر مقاومت فشاری MIX-A6 با افزایش نسبت آب به سیمان (7 روز عمل آوری در دمای 20 °C)



نمودار 2 - تغییر مقاومت فشاری MIX-A6 با افزایش نسبت آب به سیمان (7 روز عمل آوری در دمای 20 °C)



نمودار 3 - تغییر مقاومت فشاری MIX-A6 با افزایش نسبت آب به سیمان (7 روز عمل آوری در دمای 90 °C)



شکل 1 - منحنی تنش-کرنش MIX-A6 تحت بارهای فشاری

### 3-4. ساخت بتن در حجم زیاد با استفاده از بتونیر

با ساخت مخلوطهای آزمایشی متعدد و آزمایش مقاومت فشاری آنها مشخص شد که MIX-A6 با مقادیر  $W/(C+S.F)=12/7-14/8$  و  $S.P/(C+S.F)=1/5$  دارای بیشترین مقاومت 7 روزه و کارایی مناسب می باشد. بنابراین طرح مذکور به عنوان طرح اختلاط اصلی برای تولید بتن در حجم زیاد با استفاده از بتونیر انتخاب می شود. در این مرحله نیز براساس طرح اصلی چند طرح اختلاط با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده در حجم زیاد با استفاده از بتونیر ساخته شد. در نهایت MIX-A6-6 که دارای بیشترین مقاومت فشاری و کارایی بسیار خوب می باشد به عنوان طرح نهایی برگزیده شد و آزمایشات متعدد از جمله اسلامپ، مقاومت فشاری، کششی، خمشی و مدول الاستیسیته روی آن صورت پذیرفت.

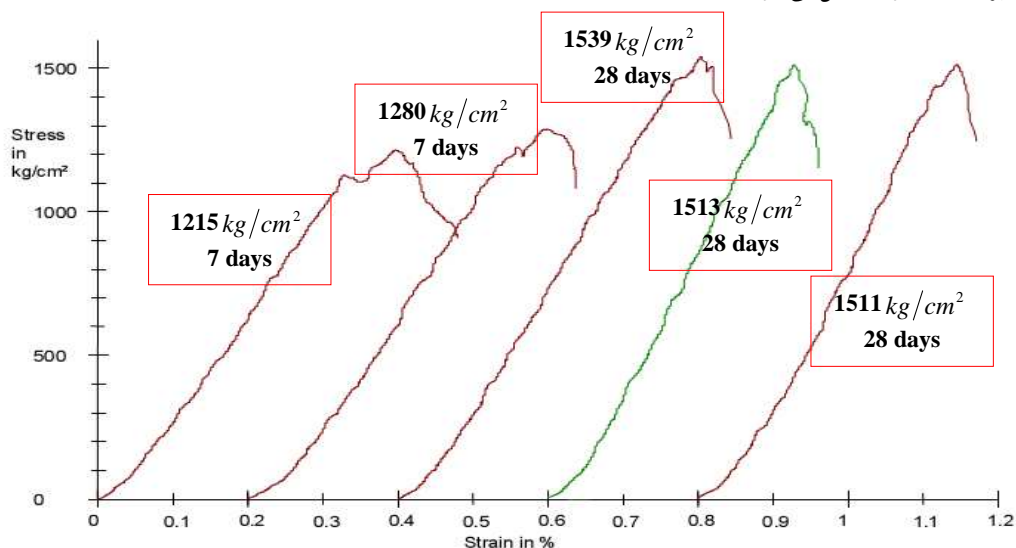
جدول 4- طرح اختلاط و مقاومت فشاری 7 و 28 روزه MIX-A6 (ساخته شده با بتونیر) با مقادیر مختلف آب و فوق روان کننده ( $kg/m^3$ )

	MIX-A6-1	MIX-A6-2	MIX-A6-3	MIX-A6-4	MIX-A6-5	MIX-A6-6
Portland Cement	786	801	834	834	826	<b>813</b>
Fine Quartz Sand(0-0.3mm)	178	181	188	188	186	<b>183</b>
Fine Quartz Sand (0.3-1.2mm)	355	362	377	376	373	<b>367</b>
Fine Quartz Sand (1.2-4.75mm)	709	723	753	752	746	<b>734</b>
Silica Fume	196	200	208	208	207	<b>203</b>
Superplasticizer(PCE)	9.8	12	14.1	15.6	15.5	<b>15.2</b>
Water	207	189	154	154	160	<b>175</b>
W/C	0.263	0.236	0.185	0.185	0.194	<b>0.215</b>
W/(C+S.F)	0.21	0.189	0.148	0.148	0.155	<b>0.172</b>
S.P/(C+S.F)	1%	1.2%	1.35%	1.5%	1.5%	<b>1.5%</b>
مقاومت فشاری 7 روزه ( $kg/cm^2$ )	1031	1157	1154	1157	<b>1215</b>	<b>1281</b>
مقاومت فشاری 28 روزه ( $kg/cm^2$ )	1287	1350	1405	1350	<b>1511</b>	<b>1539</b>

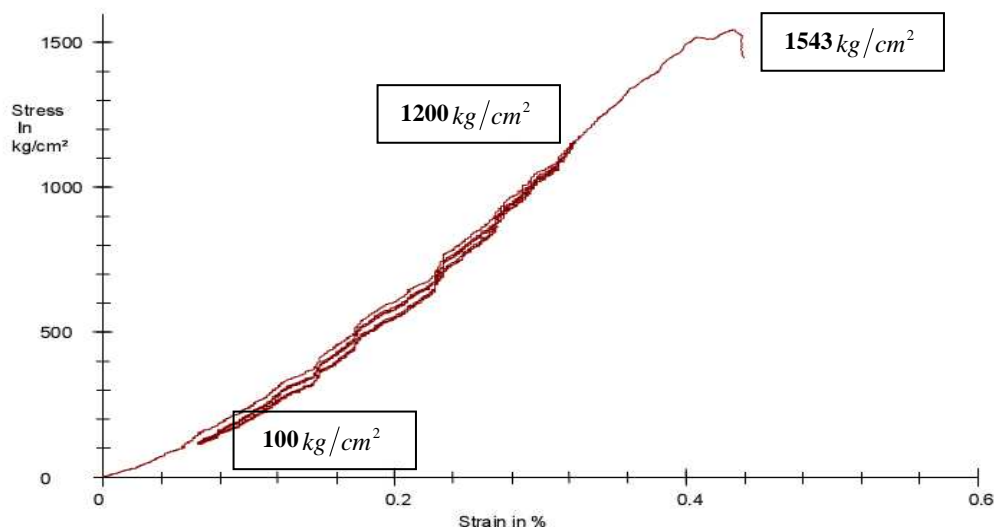
### 3-5. خصوصیات مکانیکی MIX-A6-6

منحنی تنش-کرنش تحت بارهای فشاری: در بتن های فوق توانمند بدلیل اتصال قوی بین سنگدانه های کوآرتز و ماتریس سیمانی، ریزترکهای (Micro Cracks) کمتری نسبت به بتن معمولی در ازای کرنش برابر تشکیل می شود. شاخه صعودی و نزولی منحنی تنش-کرنش برای این مصالح دارای شیب بیشتری نسبت به بتن های با مقاومت پایین تر است و کرنش نظیر حداکثر با افزایش مقاومت فشاری، افزایش پیدا می کند [4]. شکل 2 رفتار MIX-A6-6 را در شرایط عمل آوری استاندارد نشان می دهد. مقاومت 7 و 28 روزه آن به ترتیب به 1281 و 1539 کیلوگرم بر سانتیمترمربع رسیده است. کرنش نظیر بار حداکثر نیز در حدود 0/4-0/3 درصد می باشد.

شکل 3 رفتار نمونه های MIX-A6-6 را تحت بارهای سیکلی فشاری نشان می دهد. حداقل و حداکثر تنش در سیکل بارگذاری و باربرداری به ترتیب برابر 100 و 1200 کیلوگرم بر سانتیمترمربع می باشند. مشاهده می شود که منحنی ها در مراحل مختلف بر هم منطبق هستند و نمونه ها پس از سه سیکل تا 75% مقاومت حداکثر رفتار الاستیک از خود نشان می دهند. این امر نشان دهنده این است که تنها ریزترکهای کمی در طی مراحل بارگذاری و باربرداری در نمونه تشکیل می شود.



شکل 2 - نمودار تنش-کرنش MIX-A6-6 در سنین 7 و 28 روزه (عمل آوری استاندارد)



شکل 3 - رفتار MIX-A6 تحت سه سیکل بارگذاری فشاری (عمل آوری استاندارد)

مدول الاستیسیته: آزمایش مدول الاستیسیته براساس ASTM C469 روی نمونه های استوانه ای  $10 \times 20$  سانتیمتر در سن 28 روزه انجام شد و مقدار آن در حدود  $5 \times 10^5$  کیلوگرم بر سانتیمترمربع تخمین زده شد.  
مدول گسیختگی: مدول گسیختگی MIX-A6-6 با بارگذاری تیرهای  $10 \times 10 \times 40$  سانتیمتر در نقاط یک سوم دهانه مطابق ASTM C78 مورد آزمایش قرار گرفت و مقدار آن در حدود  $76 \text{ kg/cm}^2$  تخمین زده شد.  
مقاومت کششی: به منظور تعیین مقاومت کششی دونیم شدن، براساس ASTM C496 از نمونه های استوانه ای  $10 \times 20$  سانتیمتر استفاده و مقدار آن در حدود  $77 \text{ kg/cm}^2$  تخمین زده شد.

#### 4. نتیجه گیری و پیشنهادات

این تحقیق با هدف دستیابی به بتنی با مقاومت بسیار بالا و با کارایی مناسب با استفاده از مصالح موجود در کشور صورت پذیرفت. سعی شد تا حد امکان روش ساخت و عمل آوری مطابق با شرایط کارگاهی و عملی باشد. به این منظور با ایجاد تغییرات در طرح مخلوطهای اولیه و اعمال روشهای مختلف اختلاط تعداد زیادی مخلوط آزمایشی با استفاده از میکسر ساخته و آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه های 7 روزه انجام شد. سپس یک طرح که بیشترین مقاومت فشاری و کارایی مناسب را دارا بود برای تولید بتن در حجم زیاد با استفاده از بتونیر انتخاب شد. در نهایت MIX-A6-6 به عنوان بتن فوق توانمند معرفی شد. مشخصات این مخلوط در جدول 5 خلاصه شده است.

معمولا مقاومت کششی بتن های با مقاومت بسیار بالا پایین و شکست آنها تحت بارهای فشاری بسیار ترد می باشد. یک راه حل اساسی برای بهبود خصوصیات بتن، مسلح کردن آن با الیاف است. استفاده از الیاف تنها باعث بهبود مقاومت کششی می شود، بلکه با کنترل ترک خوردگی و انتقال تنش بین سطوح ترک خورده باعث بهبود شکل پذیری خواهد شد. در میان انواع الیاف که بصورت تجاری قابل دسترس می باشد، الیاف فولادی تغییر شکل یافته برای تقویت بتن های با مقاومت بسیار بالا مناسب تر است.

امید است نتایج این تحقیق سرآغازی برای تولید صنعتی بتن فوق توانمند (UHPC) در کشور باشد.

جدول 5- طرح اختلاط و خصوصیات MIX-A6-6

<i>Constituents</i> ( $kg/cm^2$ )		<i>Properties</i>		
Portland Cement	<b>813</b>	مقاومت	7days-20 °C	<b>1281</b> $kg/cm^2$
Fine Quartz Sand(0-0.3mm)	<b>183</b>	فشاری	28days-20 °C	<b>1539</b> $kg/cm^2$
Fine Quartz Sand (0.3-1.2mm)	<b>367</b>		7days-90 °C	<b>1688</b> $kg/cm^2$
Fine Quartz Sand (1.2-4.75mm)	<b>734</b>	کرنش نظیر بار حداکثر (28days-20 °C )		<b>0.3-0.4</b> %
Silica Fume	<b>203</b>	مدول گسیختگی (28days-20 °C )		<b>76</b> $kg/cm^2$
Superplasticizer(PCE)	<b>15.2</b>	مقاومت کششی دونیم شدن (28days-		<b>77</b> $kg/cm^2$
Water	<b>175</b>	مدول الاستیسیته (28days-20 °C )		<b>5×10<sup>5</sup></b> $kg/cm^2$
W/C	<b>0.215</b>	اسلامپ		<b>20-25</b> cm
W/(C+S.F)	<b>0.172</b>	وزن مخصوص		<b>2500</b> $kg/m^3$
S.P/(C+S.F)	<b>1.5%</b>			

5. مراجع

1. Nawy.E.G, "Fundamentals of High Performance Concrete", 2nd ed, John Wiley&Sons, Inc, 2001.
2. Ma.J&Schneider.H, "Properties of Ultra-High-Performance Concrete", LACER, no.7, p25-32, 2002.
3. Dehn.Frank,"Influence of Mixing Technology on Fresh Concrete Properties of HPCRCC", Leipzig University, Institute for Structural Concrete and Building Materials, Germany,2005.
4. Tasdemir.M.A&Karihaloo.B.L&Bayramov.F&Yerlikaya.M&Sonmez.R,"HS/HPC, HPCRCC, and SCC for repair and retrofitting of concrete structures", 2003.
- 5- رمضانیانپور.علی اکبر، پرهیزگار.طیبه، طاهری.افشین، "مواد افزودنی و پوزولانی و کاربردهای آن در بتن"، وزارت مسکن و شهر سازی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، 1376.
5. Alaae.F.J, "Retrofitting of concrete structures using high performance fiber reinforced cementitious composites(HPFRCC)", thesis submitted for the degree of PHD, 2002.
6. B.L.Karihaloo,S.D.P.Benson,F.J.Alaae, "CARDIFRC<sup>®</sup>-Properties and application to retrofitting", Proceedings of the fifth international conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures, USA, 12-16 April, 2004.
7. Sadrekarimi.A, "development of light weight reactive powder concrete", Japan concrete institute, Journal of advanced concrete technology, vol.2, no.3, p409-417, 2004.