



## بتن فوق توانمند UHPC بررسی خواص و تولید آزمایشی با مصالح بومی

جواد مروتی - مدیر واحد R&D و کنترل کیفیت بنیان بتن

ابراهیم اکرمی - رئیس هیأت مدیره بنیان بتن

تلفن: ۰۵۱۱-۶۲۲۳۰۰۰ Email : info @ bonyan beton .com

چکیده:

بتن به عنوان پر مصرفترین ماده ساختمانی مدتهاست جوابگوی نیازهای روبه گسترش جامعه جهانی است. بتن معمولی و سپس بتن با عملکرد بالا سالیان سال است که تشکیل دهنده بخش اصلی سازه های بتنی بوده اند. اما نیاز به ساخت سازه های مرتفع تر، مقاوم تر و دارای المانهای سازه ای با ابعاد کوچکتری و عمر طولانی تر محققان را وادار به جستجو و تحقیق برای ساخت بتن مقاوم تر و با دوام تر نمود. تحقیقات دانشمندان طی دو دهه اخیر منجر به پیدایش نوع جدیدی از بتن با خواص فوق العاده و مقاومت فشاری قابل مقایسه با فولاد گردید. این بتن که تحت عنوان بتن فوق توانمند Ultra high performance concrete شناخته می شود دارای مقاومت فشاری بیشتر از  $1500 \text{ kg/cm}^2$  و دوام فوق العاده در برابر عوامل مهاجم همچون یون کلر و سیکل‌های یخبندان می باشد. در این مقاله پس از معرفی کلی این نوع بتن، تعدادی از پروژه های اجرا شده با آن معرفی می شود. سپس نتایج مربوط به تحقیقات انجام یافته جهت ساخت بتن فوق توانمند با استفاده از مصالح بومی کشور ارائه می گردد. در این پژوهش ۲۰ طرح اختلاط مختلف مورد آزمون قرار گرفته و در نهایت طرح اختلاط بتنی با مقاومت نزدیک به  $2000 \text{ kg/cm}^2$  به دست آمده است. واژگان کلیدی: بتن فوق توانمند، مقاومت فشاری، بتن پودری، دوام.



## مقدمه

تحقیقات دانشمندان طی دو دهه اخیر منجر به پیدایش نوع جدیدی بتن با خواص فوق العاده گردیده که بسیاری از محدودیتهای بتن معمولی را پشت سر گذاشته است. این بتن که ابتدا تحت عنوان بتن پودری (RPC) و سپس با نام " بتن فوق توانمند " (Ultra-high-performance concrete) یا همان UHPC معرفی شد دارای مقاومت فشاری بالاتر از  $1500 \text{ kg/cm}^2$  می باشد.

این بتن تقریباً غیرقابل نفوذ می باشد و همین مسئله باعث شده است خیلی از ضعف های بتن معمولی مثل ضعف در برابر سیکل های یخبندان، خوردگی آرماتور و حمله یونهای مضر را نداشته باشد. همچنین ضعف عمده بتن یعنی مقاومت کششی پایین را تا حد زیادی مرتفع نموده به گونه ای که در یک نوع از UHPC با استفاده از الیاف فولادی دیگر نیازی به استفاده از آرماتور در بتن نمی باشد.

در بتن های پیش تنیده با استفاده از UHPC می توان نیروی کشش پیش تنیدگی را به میزان قابل توجهی افزایش داد. از این طریق اجرای دهانه های خیلی بزرگتر خصوصاً برای پلها امکان پذیر شده است افزایش دهانه به معنای کاهش تعداد پایه های مورد نیاز در پل هاست که این مسئله در مورد پلهایی که ترافیک از زیر آنها عبور می کند باعث افزایش ایمنی می گردد و در مورد پلهایی که بر روی رودخانه احداث می گردند کاهش تعداد پایه ها که در معرض جریان آب و خرابی های ناشی از آن قرار دارند به معنای افزایش طول عمر و کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری می باشد.

البته مزیت اصلی UHPC بهبود دوام سازه های بتنی می باشد. گسترش استفاده از بتن در محیط های مختلف با شرایط متفاوت و وجود عوامل مهاجم محیطی نظیر سیکل های یخبندان، حمله سولفات ها، کلرایدها و ... باعث شده است که امروزه دوام نیز در کنار مقاومت فشاری بتن یکی از پارامترهای اصلی طراحی در نظر گرفته شود. امروزه در کشورهای صنعتی طراحی برای دوام در سازه های بتنی یک امر لازم و ضروری است و با توجه به لزوم حرکت در جهت توسعه پایدار این مسئله در کشور ما نیز باید مد نظر قرار گیرد. دوام فوق العاده UHPC در برابر عوامل مختلف، آن را به ماده ای ایده آل برای اجرای سازه های با طول عمر بالا تبدیل نموده است.

## تاریخچه پیدایش و کاربرد UHPC

در اوایل دهه ۸۰ میلادی ایده استفاده از یک دانه بندی بسیار ریز به همراه یک ماتریس همگن و توپر از مواد سیمانی ظهور پیدا کرد این ایده از آنجا پیدا شد که تحقیقات نشان دادند ضعیف ترین ناحیه بتن محل اتصال خمیر سیمان و سنگدانه یا همان ناحیه انتقال می باشد. عمدتاً ریز ترک هایی که در این ناحیه ایجاد می گردند پس از گسترش به نواحی دیگر باعث گسیختگی بتن می شوند. حال با حذف درشت دانه در واقع این ضعف حذف می گردد و ریز ترکهای ناحیه انتقال که باعث گسیختگی نهایی بتن می شوند نیز محدود خواهد شد [۱].

به علت استفاده از مواد بسیار ریز ( با حداکثر قطر ۰.۶ میلیمتر) این بتن، بتن پودری (RPC) نامیده شد. امروزه این بتن با توجه به خواص ویژه اش " بتن با عملکرد فوق العاده بالا " UHPC نامیده می شود. در جدول شماره ۱ مشخصات مکانیکی UHPC در مقایسه با HPC و بتن معمولی دیده می شود.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی UHPC درمقایسه با HPC و بتن معمولی

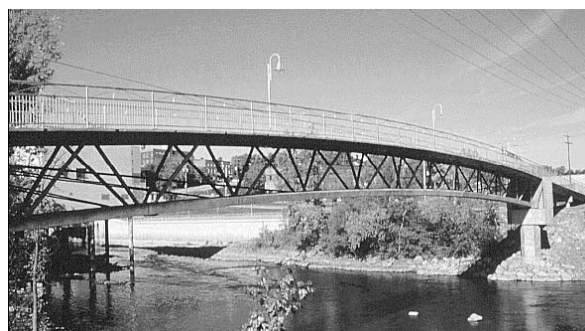
بتن UHPC	بتن HPC	بتن معمولی	
1500-2500	400-1000	200-400	مقاومت فشاری $kg/cm^2$
0.2-0.8	1.6-1.9	2.35	ضریب خزش $C_u$
2-6	10-15	20-25	تخلخل (%)
70-250	-	25-32	مقاومت کششی دونیم شدن (آزمایش برزیلی) $(kg/cm^2)$
560000-630000	320000-560000	140000-420000	مدول یانگ

پروژه های اجرا شده با UHPC

اولین کاربرد صنعتی این بتن تحت نام تجاری D.S.P. در صنایع دفاع دانمارک برای پروژه های خاص و به صورت "سری" بود. تحقیقات با هدف کاربرد UHPC در صنعت ساختمان در حدود سال ۱۹۸۵ شروع شد. بعد از انجام تحقیقات اولیه در اوایل دهه ۹۰ بتن با عملکرد بالا با نامهای تجاری مختلف توسط چند شرکت بزرگ در اروپا تولید گردید. معروفترین آنها دو پیمانکار بزرگ فرانسوی بودند که محصولات خود را تحت نامهای BSI و Ductal ارائه نمودند [۳].

اولین سازه های ساخته شده با UHPC چندین پل عابر پیاده در کشورهای مختلف و دو پل ترافیکی در فرانسه و استرالیا و چند پروژه دیگر بودند که در ادامه به اختصار به آن اشاره می شود.

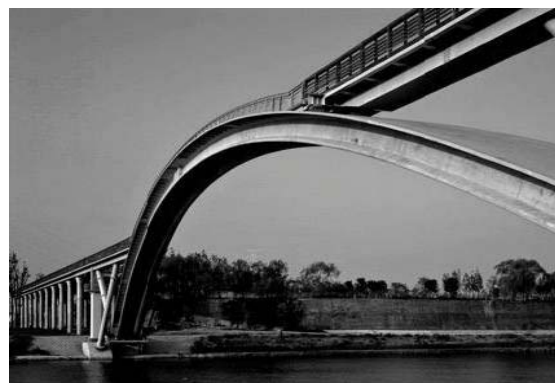
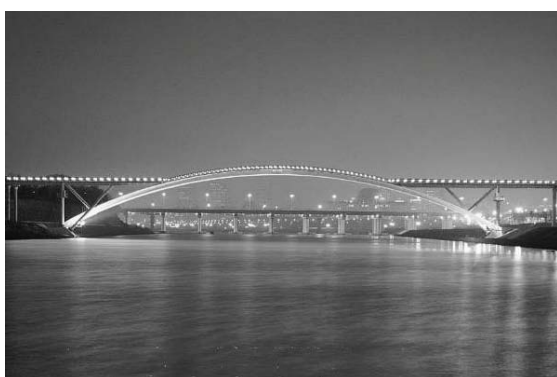
در سال ۱۹۹۷ اولین سازه با استفاده از UHPC در کبک کانادا ساخته شد این سازه یک پل عابر پیاده با دهانه ۶۰ متر و به صورت خرابای فضایی پیش تنیده بود. استفاده از UHPC علاوه بر مزایای زیادی که داشت به طراحان اجازه داده بود از یک دال بتنی به ضخامت  $3^m$  برای رویه پل استفاده کنند. در واقع اجرای این پل بخشی از یک مطالعه دراز مدت بود و یک برنامه تحقیقاتی برای مطالعه بر روی تغییر شکل ها و تنش ها در المانهای پیش تنیده پل در دراز مدت انجام گرفت.



شکل ۱- پل شر بروک در کانادا

در سال ۱۹۹۷ استفاده از UHPC در یک پروژه در فرانسه تاییدی بر دوام بسیار خوب این نوع بتن شد در نیروگاه cattenom فرانسه تیرهای فلزی برجهای خنک کننده با تیرهای ساخته شده از UHPC جایگزین شدند . محیط بسیار خورنده بود و UHPC نیز به این دلیل انتخاب شد که کارشناسان انتظار داشتند با توجه به دوام بسیار بالای UHPC خرابی و در نتیجه هزینه های تعمیر و نگهداری این تیرها به حداقل ممکن برسد. بعد از ۳ سال یک گروه تخصصی از انجمن مهندسان فرانسه (AFGC) تیرهای مذکور را در محل نیروگاه بازبینی نمودند و هیچگونه اثر خرابی بر روی تیرهای UHPC دیده نشد .

پروژه های دیگری نیز در کشورهای کره جنوبی ، ژاپن ، فرانسه و آلمان با استفاده از UHPC انجام شده است. پل عابر پیاده صلح در کره یک پل قوسی با دهانه ۱۲۰ متر، ارتفاع قوس فقط ۱۵ متر و ضخامت رویه پل بین ۳ تا ۱۰ سانتی متر میباشد.



شکل ۲- پل صلح در کره جنوبی

شکل ۳- پل صلح در کره جنوبی

پل عابر پیاده Sakata-mirai در ژاپن یک پل صندوقه ای با جان مجوف می باشد که با UHPC (در سال ۲۰۰۲) ساخته شده است. جان مجوف این پل علاوه بر کاهش وزن آن باعث زیبایی پل نیز شده است .



شکل ۴- پل sakata-mirai در ژاپن

پل عابر پیاده دیگری در Rhodia فرانسه در سال ۲۰۰۲ با استفاده از UHPC ساخته شد که خاصیت اصلی آن مقاومت بسیار زیاد در برابر آتش بود.



شکل ۵- پل فوق العاده مقاوم در برابر آتش ، فرانسه

و یکی دیگر از پروژ‌هایی که اخیراً با استفاده از UHPC ساخته شد پل Cartnerplatz در آلمان می باشد که در سال ۲۰۰۸ به اتمام رسیده است .



شکل ۶- پل Gartnenplatz در آلمان

اولین پل ترافیکی (برای عبور وسایل نقلیه) ساخته شده از بتن فوق توانمند ، پل Bourg les valence در فرانسه بود که در سال ۲۰۰۱ به بهره برداری رسید. دهانه پل تقریباً ۴۴ متر می باشد [۴] .

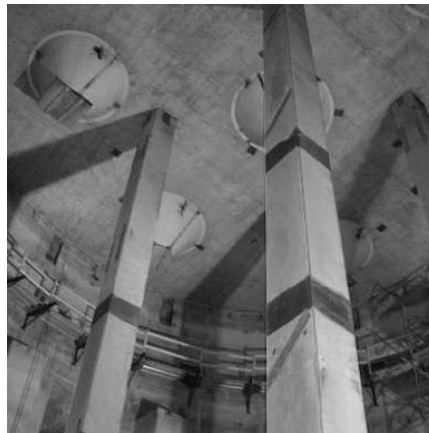
در استرالیا یک پل برای عبور ترافیک چهار خطه با یک دهانه ۱۶ متری با UHPC ساخته شده که استفاده از این بتن باعث کاهش بار مرده به نصف شده است .

اولین کاربرد UHPC در ایالات متحده در سال ۲۰۰۱ و برای ساخت سقف سیلوی کلینکر در joppa ایالت Illinois بود. بیست و چهار قطعه دوزنقه ای شکل با ضخامت ۱۳ میلیمتر سقف سیلو با قطر 17.5<sup>m</sup> را پوشش دادند. استفاده از UHPC باعث کاهش نیروی انسانی و زمان لازم برای اجرا شد و سقف این سیلو سریعتر و با نیروی کار کمتر از دو سیلوی دیگر که با فلز پوشش داده شدند ساخته شد.



شکل ۷- اولین کاربرد UHPC در آمریکا

یک نمونه دیگر استفاده از UHPC در صنعت سیمان در آمریکا ساخت ستونهای بارگیر خانه سیمان در petroit می باشد که باعث شده از ستونهای با سطح مقطع کوچکتر استفاده شود و فضای بیشتری برای کامیونهای حمل سیمان ایجاد گردد .



شکل ۸- ستونهای ساخته شده با UHPC آمریکا

## مواد تشکیل دهنده UHPC

مواد اصلی تشکیل دهنده UHPC سیمان پرتلند معمولی ، آب ، دوده سیلیسی ، پودر کوارتز ، فوق روان کننده و در بعضی موارد الیاف می باشد. البته اخیراً در بعضی پروژه های تحقیقاتی از نانو تیوپ های کربن نیز استفاده شده است . ترکیب این مواد یک ماتریس توپر و فشرده ایجاد می کند که خواص مکانیکی و رئولوژی بتن را بهبود می بخشد و نفوذپذیری را به حداقل ممکن می رساند .



در جدول زیر محدوده مقادیر ترکیبات مورد استفاده برای ساخت UHPC مشاهده می شود [۷].

جدول ۲- محدوده مقادیر مواد تشکیل دهنده UHPC

مقدار (kg)	مواد
630-900	سیمان پرتلند
200-250	میکروسیلیس
180-250	پودر کوارتز
800-1100	ماسه سیلیسی
150-200	الیاف فولادی
25-30	فوق روان کننده
150-180	آب
0.18-0.25	نسبت آب به مواد سیمانی

### سیمان

مقدار سیمان مورد مصرف در UHPC خیلی بیشتر از سیمان مورد مصرف در بتن معمولی یا حتی HPC می باشد در بعضی از تحقیقات اولیه از سیمان بدون  $C_3A$  در ساخت بتن RPC استفاده می شد ولی در حال حاضر دانشمندان به این نتیجه رسیدند که سیمان با مقدار  $C_3A$  و  $C_3S$  بیشتر و نرمی (بلین) پایین برای UHPC مطلوب هستند زیرا  $C_3A$  و  $C_3S$  در مقاومت اولیه بتن مؤثر اند و نرمی (بلین) پایین تر آب مورد نیاز را کاهش می دهد.

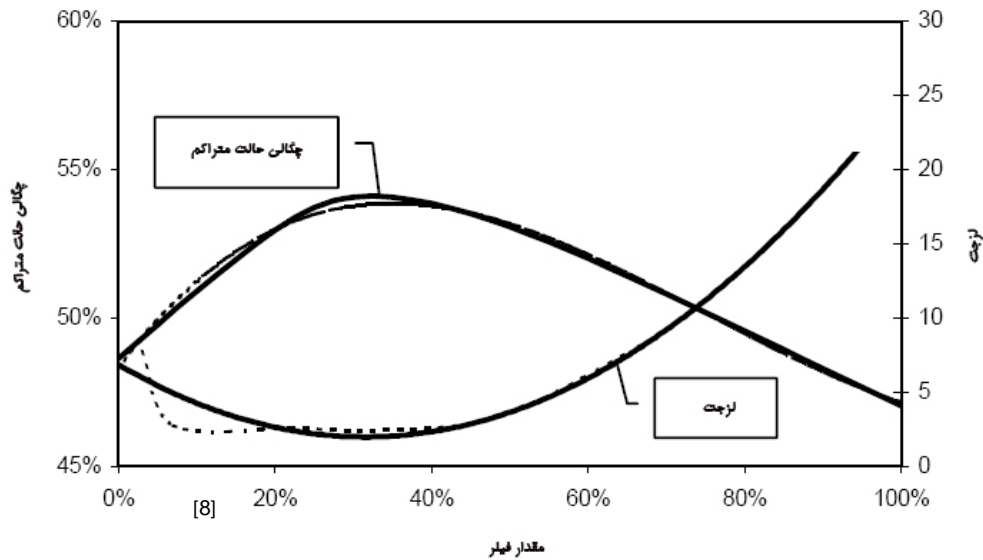
### میکرو سیلیس

اضافه کردن میکروسیلیس چندین نقش در UHPC دارد که شامل موارد زیر می شود:

دسته بندی و فشردگی ذرات، افزایش روانی (به علت شکل کروی دانه هایش) و فعالیت پوزولانی (واکنش با محصولات ضعیف هیدراتاسیون و تشکیل بلورهای مقاوم تر (سیلیکاتهای کلسیم)؛ همانطور که میدانم در نتیجه هیدراتاسیون سیمان علاوه بر بلورهای مقاوم مختلف، بلورهای ضعیف هیدروکسید کلسیم نیز تشکیل می گردند. میکروسیلیس با هیدروکسید کلسیم واکنش داده و محصول این واکنش بلورهای مقاوم سیلیکات کلسیم می باشند.

سنگدانه های مورد مصرف در UHPC شامل ماسه سیلیسی با حداکثر اندازه دانه 0.6 میلیمتر و پودر کوارتز با اندازه 10 میکرون در ایجاد یک بافت توپر مشارکت دارند. تغییر نسبت پودر کوارتز (ریزدانه/فیلر) و ماسه سیلیسی (درشت دانه) علاوه بر اثر گذاری روی تراکم و چگالی ترکیب، بر روی خواص رئولوژی UHPC نیز اثر گذار است.

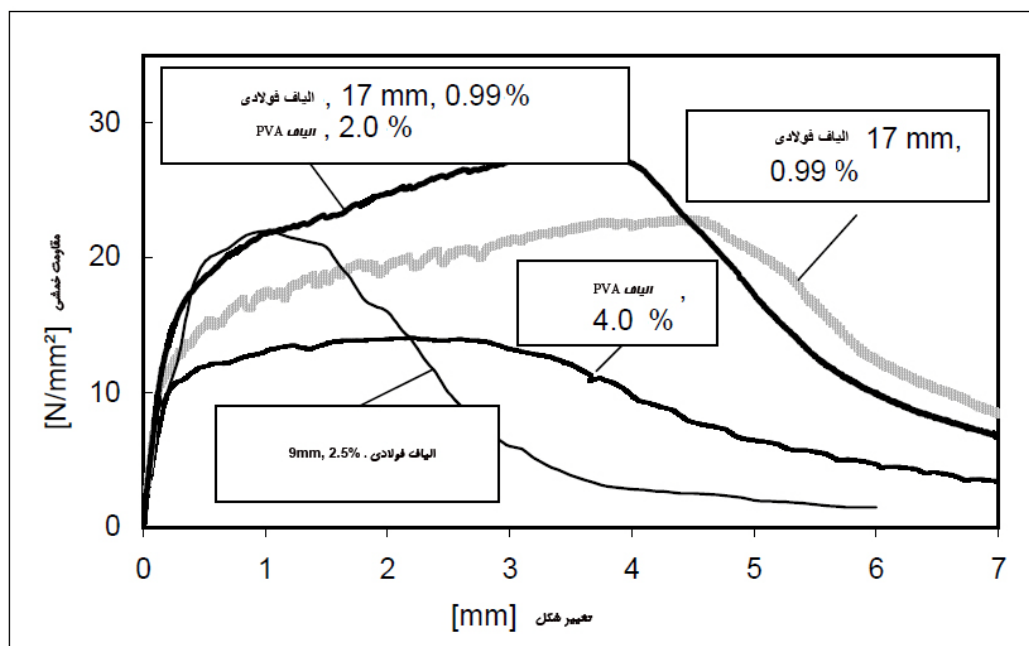
همانگونه که در نمودار دیده می شود با افزایش میزان پودر کوارتز از صفر تا ۳۰ درصد، چگالی حالت متراکم ترکیب مصالح از ۴۸ تا ۵۴ درصد افزایش می یابد. این افزایش به علت پر شدن فضاهای خالی بین دانه های درشت تر ماسه سیلیس توسط ذرات پودر کوارتز می باشد. در همین حین از جهت کاهش می یابد. اگر میزان ریزدانه را همچنان اضافه کنیم، چگالی حالت متراکم کاهش و از جهت افزایش خواهد یافت.



شکل ۹- تاثیر نسبت ریزدانه (فیبر) بر روی لزوجت و چگالی حالت متراکم بتن UHPC

### الیاف

استفاده از الیاف فولادی یا سایر انواع الیاف های معمول در صورت دارا بودن حداقل مدول الاستیسته بیشتر از  $4500 \text{ n/mm}^2$  باعث افزایش مقاومت خمشی، مقاومت برشی و شکل پذیری UHPC به میزان قابل ملاحظه ای می شود. استفاده از الیاف تاثیر چشمگیری بر روی مقاومت فشاری ندارد. میزان اثر الیاف بر روی خواص ذکر شده به مقدار و جنس الیاف بستگی دارد. در نمودار زیر میزان اثر دو نوع الیاف با مقادیر متفاوت بر روی مقاومت خمشی UHPC مشاهده می گردد.



شکل ۱۰- اثر الیاف فولادی و الیاف پلیمری بر روی شکل پذیری UHPC





## ناحیه انتقال در بتن معمولی و UHPC

[8]

مطالعات میکروسکوپی بر روی بافت بتن دانشمندان را از این حقیقت آگاه ساخت که بتن دارای سه فاز مختلف سنگدانه، خمیر سیمان و ناحیه انتقال (محل اتصال سنگدانه به خمیر سیمان) می باشد و خواص این سه فاز به تنهایی بر روی خواص نهایی بتن بسیار تاثیر گذار است. ضعیفترین فاز در بتن ناحیه انتقال می باشد و بسیاری از ضعفهای بتن نظیر مقاومت کششی پایین ناشی از اثر گذاری این فاز است. در ناحیه انتقال یا همان محل اتصال خمیر سیمان و سنگدانه بلورهای خمیر سیمان به سختی تشکیل میگردند. این امر به علت وجود یک سطح وسیع (سنگدانه) و جلوگیری آن از رشد کریستالهای سیمان است. از طرفی به دلیل جمع شدگی آب موضعی دور سنگدانه های درشت، نسبت آب به سیمان در این نواحی بالاست و بلورهای تشکیل شده بلورهای ضعیف تری هستند. در نتیجه این ناحیه دارای تخلخل و نفوذپذیری بسیار زیاد است. حذف سنگدانه های درشت در UHPC باعث حذف ضعف های ناشی از ناحیه اتصال این سنگدانه ها به خمیر سیمان شده است. و عملاً UHPC را به یک بتن غیر قابل نفوذ با مقاومت فشاری بسیار زیاد تبدیل کرده است.

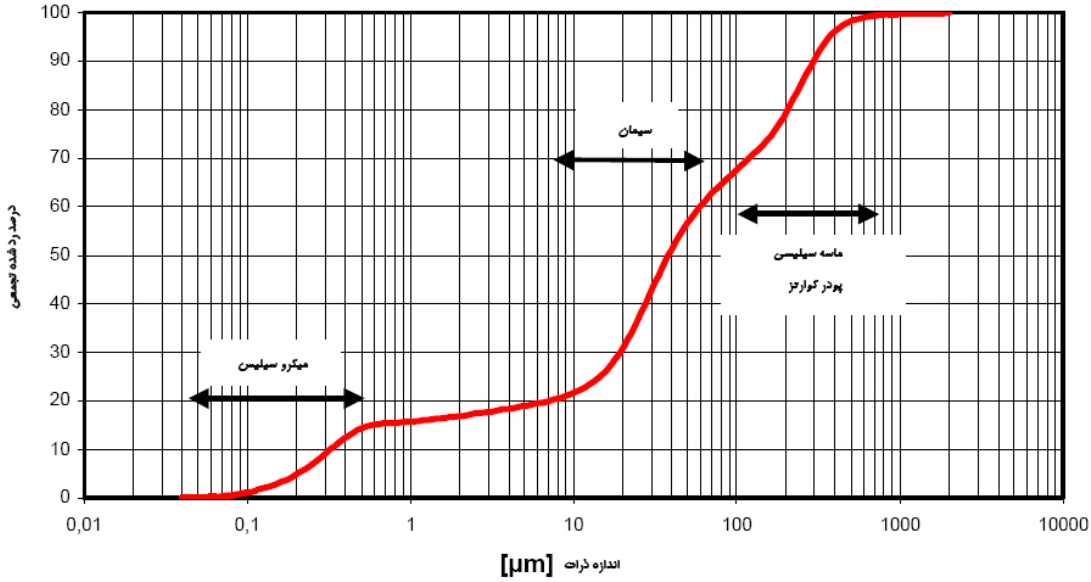
### مقاومت فشاری

حداقل مقاومت فشاری در بتن های UHPC بین  $1500 \text{ kg/cm}^2$  تا  $2500 \text{ kg/cm}^2$  می باشد. این مقاومت فوق العاده بالا حاصل موارد زیر است.

- حذف درشت دانه و در نتیجه حذف ناحیه انتقال مربوط به آن (محل اتصال درشت دانه و خمیر سیمان)
  - بهینه سازی بافت ریزدانه مخلوط و رسیدن به متراکم ترین حالت
  - بهبود ساختار میکروسکوپی سیمان با عملیات حرارتی در زمان عمل آوری
- البته در صورت عدم استفاده از این الیاف UHPC نیز مانند سایر مصالح پر مقاومت، بسیار ترد و دارای مدول الاستیسیته خیلی بالا (  $70000 \text{ N/mm}^2$  تا  $50000 \text{ N/mm}^2$  می باشد که مطلوب نیست. ولی همچنان که تشریح گردید استفاده از الیاف این امکان را ایجاد می کند که UHPC همزمان دارای مقاومت بسیار بالا و شکل پذیری بسیار مناسب باشد.

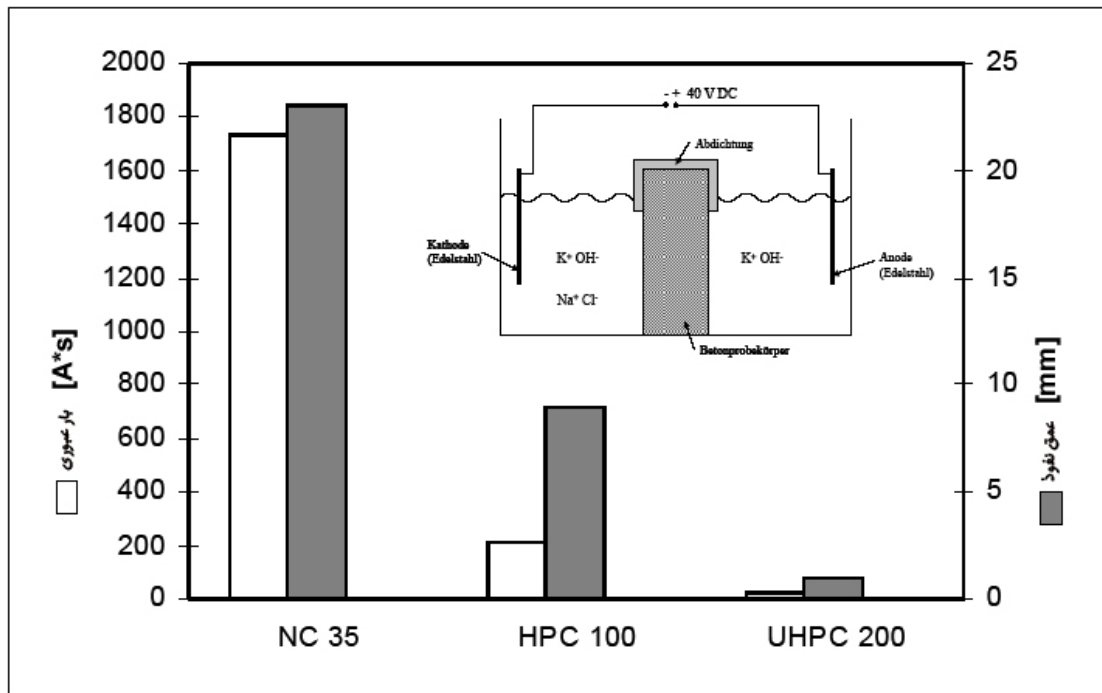
### دوام

- بهبود فوق العاده UHPC در برابر همه انواع مهاجم های محیطی نظیر کلرایدها، سولفاتها و یا سیکل های یخبندان و ذوب شدن ناشی از نفوذ ناپذیر بودن آن می باشد. دو علت اصلی باعث ایجاد این ویژگی (نفوذ ناپذیری) در UHPC شده است:
- ۱ - ترکیب مواد از دانه های بسیار ریز که دانه های ریزتر فواصل دانه های درشت را پر می نمایند و در نهایت همانگونه که در شکل زیر مشاهده می گردد یک منحنی پیوسته از اندازه دانه ها حاصل می شود.
  - ۲ - ناحیه اتصال خمیر سیمان به سنگدانه ها که در UHPC نسبت به بتن معمولی خیلی متراکم و نفوذ ناپذیرتر است که ناشی از انجام هیدراتاسیون کاملتر در اطراف سنگدانه ها می باشد.



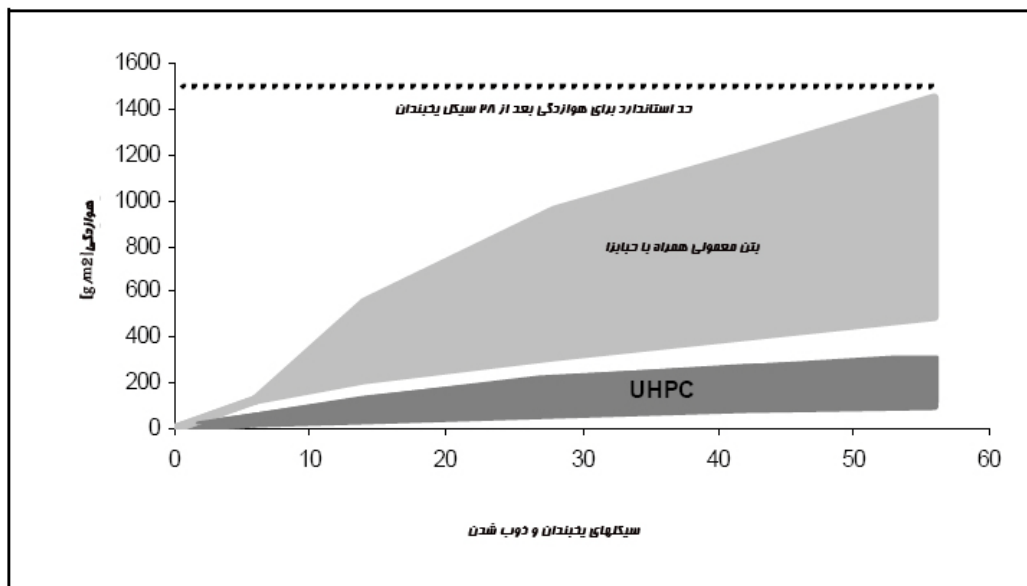
شکل ۱۱ - نمونه دانه بندی ذرات برای دست یابی به متراکم ترین حالت در UHPC

نفوذ ناپذیری UHPC باعث مقاومت بسیار زیاد آن در مقابل انتشار یون کلر نسبت به بتن معمولی و حتی HPC گردیده است.



شکل ۱۲ - میزان انتشار یونهای کلر در HPC، UHPC و بتن معمولی [8]

همچنین مقاومت بسیار خوب UHPC در برابر سیکلهای یخبندان و ذوب شدن در مقایسه با بتن معمولی دارای حباب زا در نمودار زیر قابل مشاهده است .



شکل ۱۳ - مقایسه دوام UHPC در برابر سیکلهای یخبندان با بتن معمولی دارای حباب افزودنی [8]

در جدول زیر تعدادی از پارامترهای دوام UHPC نسبت به بتن معمولی و HPC قابل مشاهده است .

جدول ۳- پارامترهای مربوط به دوام [۷]

UHPC	HPS	بتن معمولی	
1.5	4	7	عمق کر بنا تاسیون mm (بعد از ۳ سال)
1	8	23	انتشار یون کلر mm عمق نفوذ
20-50	150	1500	مقاومت در برابر سیکل یخبندان $\frac{gr}{m^2}$
1	11	60	فاکتور جذب آب

#### ساخت بتن UHPC با مصالح در دسترس کشور

با توجه به خواص فوق العاده UHPC و گسترش کاربرد آن در دنیا از طرفی و لزوم حرکت به سوی ساخت سازه های با دوام تر از طرف دیگر یک کار پژوهشی با هدف تولید UHPC در داخل کشور و با استفاده از مصالح بومی در دستور کار قرار گرفت . پس از بررسی های اولیه ماسه سیلیسی و پودر کوارتز از یکی از معادن اطراف شهر تربت حیدریه تهیه گردید . ماسه سیلیسی برای استفاده از الک شماره ۵۰ و پودر کوارتز از الک نمره ۲۰۰ عبور داده شدند ، همچنین میکروسیلیس مورد نیاز با توجه به مرغوبیت



کافی از کارخانه داخلی خریداری شد. فوق روان کننده پلی کربوکسیلاتی و سیمان تیپ II کارخانه سیمان واقع در استان خراسان مورد استفاده قرار گرفتند. بعد از ساخت، نمونه ها ۴۸ ساعت تحت بخار با دمای  $90^{\circ}\text{C}$  قرار گرفته و سپس در آب  $20^{\circ}\text{C}$  تا سن ۲۸ روزگی نگهداری شدند. پس از ساخت بیست طرح اختلاط آزمایشی و انجام آزمون مقاومت فشاری در نهایت طرح اختلاط زیر برای ساخت بتن UHPC با مقاومت فشاری 1700 تا 1900 کیلوگرم بر سانتیمتر مربع با استفاده از مصالح بومی بدست آمد.

جدول ۴- طرح اختلاط بدست آمده برای UHPC با مصالح بومی

730 kg	سیمان
1010 kg	ماسه سیلیسی عبوری از الک 50
210 kg	پودر کوارتز عبوری عبوری از الک ۲۰۰
230 kg	میکروسیلیس
28 kg	فوق روان کننده
0.21	نسبت آب به مواد سیمانی

## نتیجه گیری

لزوم توجه به دوام در اجرای پروژه های عمرانی در کنار مزیت های فراوان بتن با عملکرد فوق العاده بالا UHPC مطالعه وبومی سازی دانش تولید این بتن نوظهور در سطح دنیا را به ما یاد آوری نمود. مقاومت فشاری بسیار بالا (بالتر از  $1500 \text{ kg/cm}^2$ ) به همراه شکل پذیری مناسب این نوع بتن در کنار دوام فوق العاده آن باعث شده تا یک ماده ساختمانی ایده آل خصوصاً برای پروژه های دارای اهمیت زیاد در دسترس قرارگیرد. تجربیات اجرایی که در دهه اخیر در ساخت سازه های مختلف در کشورهای صنعتی با بتن با عملکرد فوق العاده بالا حاصل شده نیز همه موید ویژگیهای مطلوب این نوع بتن می باشند. با توجه به آزمایش های انجام گرفته با استفاده از مصالح بومی و در دسترس در داخل کشور امکان تولید این نوع بتن خصوصاً برای قطعات پیش ساخته وجود دارد.

مراجع:

۱- کومار مهتا - ریز ساختار ، خواص و اجزای بتن ( تکنولوژی بتن پیشرفته ) - رضانیانپور ، علی اکبر- ایران - انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر - ۳۰ تا ۴۵ - بهار ۱۳۸۵

۲- مستوفی نژاد ، داود - سازه های بتن آرمه جلد۱- ایران - انتشارات ارکان دانش - ۲۵ تا ۲۸ - ۱۳۸۶

3- Bornemann R.; Schmidt, M.; and vellmer, c., 2002, "feuerwiderstand ultra-hochfester beton /fire resistance of ultra-high-performance concretes ," beton, vol. 52, no. 9,s.418-422.



- 4- Hajar ,z.; simon , A.; lecoindre, D.; and petitjean, J., 2004, design and construction of the world first ultra-high performance road bridges," proceedings of the international symposium on ultra-high performance concrete, kassel university press, kassel germany, pp 39-48
- 5- Kowald , t., 2004, „influence of surface modified carbon nanotubes on ultra-high performance concrete," proceedings of international symposium on ultra-high performance concrete, kassel university press, kassel, germany, pp 195-202
- 6- Ma, J; Schneider, H., 2003, "creep of ultra-high performance concrete under compressive stresses," Leipzig annual civil engineering report, no.8,2003.
- 7- Richard, p. and cheyrezy, M.,1995, "composition of reactive powder concretes,"cement and concrete research , vol.25, no.7,pp.1501-1511.
- 8- Michael Schmidt and ekkehard fehling , " ultra – high – performance concrete : research , developmet and application in europe