



ارائه شده توسط :

سایت ترجمه فا

مرجع جدیدترین مقالات ترجمه شده

از نشریات معتربر

# دوان یک عملکرد فوق العاده بالای بافت بتن مسلح (UHPFRC) تحت

## پیری زودرس

### چکیده

ما دوان یک عملکرد فوق العاده بالای بافت بتن مسلح (UHPFRC) پس از پیری زودرس، یعنی پس از خشک شدن، و یا فر خشک کن 105 درجه سانتیگراد (کیفیت مرجع خشک)، عمل حرارتی 200، 300 و یا 400 درجه سانتیگراد، یا تقسیم زودرس (آزمون برزیلی) را ارزیابی می‌کنیم. ابزار تجربی کلیدی ما نفوذپذیری گاز  $K_{\text{gas}}$  تحت تحدید مختلف  $P_c$ ، به همراه تجزیه و تحلیل MIP و SEM است. خواص UHPFRC با ملات استاندارد و بتن معمولی مقایسه شده است.

در حالی که UHPFRC‌های معمول شامل اضافات پوزولانی و عمل حرارتی می‌شوند، این UHPFRC نیست، و به طور قابل توجهی بیشتر پرمنفذ است (با 9-10٪). با این حال، 74 درصد از تخلخل آن شامل UHPFRC منافذ کوچکتر از 4 نانومتر، به عنوان مثال واقع در C-S-H می‌باشد. کیفیت مرجع خشک UHPFRC نهفته در طیف وسیعی از مواد با دوان بسیار بالا با میانگین  $K_{\text{gas}} = 10^{-18} \text{ m}^2$  است. آسیب‌های حرارتی در 400 درجه سانتیگراد باعث محدود کردن پیوستگی مجدد در فیبر / رابط پیوستگی می‌شود، که باعث افزایش  $K_{\text{gas}}$  تا  $10^{-17} \text{ m}^2$  در 6  $P_c$  مگاپاسکال می‌شود. در حالی که حفظ بیش از 300 میکرومتر/متر کرنش،  $K_{\text{gas}}$  از UHPFRC تقریباً یکسان باقی مانده است.

### 1. مقدمه

#### 1.1 زمینه علمی و صنعتی

در حال حاضر، فرانسه دارای پارک صنعتی نیروگاه هسته‌ای دوم (بعد از USA) می‌باشد، که با زیادی 58 راکتور مستقل در سراسر کشور گسترش یافته است. 24 تا این راکتورها متعلق به اصطلاح نسل دوم است که در بین سال‌های 1970 و 1988 ساخته شده بود (به عنوان مثال آنها بین 25 و 43 سال سن دارند).

هر واحد راکتور نسل دوم شامل یک ساختمان مهارکننده است که از دو سازه بتن آرمه منطبق ساخته شده است. هدف آنها این است که به عنوان یک مانع در برابر هرگونه حمله هوایی عمل کنند، و همچنین به عنوان یک ظرف تنگ، باید هرگونه نشت مخزن راکتور رخ دهد. در چنین رویدادی، فشار گاز، ساختن در داخل ساختار مهارکننده، که باید از طریقی به محیط زیست و پخش نشود انتظار می‌رود. بر خلاف راکتورهای نسل دوم، ساختمان مهارکننده راکتورهای نسل اول یک پوشش فولاد متخلخل غیر منطبق به یک ظرف بتن هستند، که مسائل ایمنی مختلف را تولید می‌کنند.

قانون فرانسه (روی شفافیت و امنیت سیستم‌های عملیات هسته‌ای، 13ژوئن 2016) نفوذ دارد که هر ۵ سال، تمام راکتورهای هسته‌ای فرانسه به نوبه خود متوقف شده‌اند، و به طور کامل آزمون ماکرو، به منظور بررسی در صورتی که مناسب باشد برای ۵ سال بیشتر اداره می‌شود. به طور خاص، تنگی راکتور نسل دوم به فشار گاز مسلم و قطعی نیست که به شرح زیر است: فشار گاز داخلی به ساختمان مهارکننده اعمال شده است، در یک سرعت و دامنه متعارف، به طوری که راکتور برای یک عملیات گستردۀ مناسب اعلام شده است اگر سرعت نشت زیر یک مقدار ثابت نظارتی است.

EDF (Electricité de France)، اولین شرکت عملیاتی فرانسوی برق، روش جدید برای افزایش طول مدت زمان عملیات قدیمی‌ترین راکتورهای آن، از جمله آنهايی که 25-43 ساله نسل دوم هستند، را پیش‌بینی می‌کند. مسیر پیش‌بینی تقویت تنگی ساختمان مهارکننده است که با گذشت زمان کاهش می‌یابد، به دلیل خشک شدن بتن و زودرسی (مشخص شده توسط الگوهای مختلف نرم افزار)، و برای کاهش تحکیم می‌باشد. همانطور که Ozyildirim به یاد می‌آورد، یکی از روش‌های بهبود دوام در کاهش نفوذپذیری بتن می‌باشد. یکی از گزینه‌های مناسب برای پوشش *extrados* ساختمان بتن در حال حاضر با یک لایه بتن مکمل، با هدف افزایش سفتی آن برای حداقل 30 سال است.

در این زمینه، یک بتن مسلح خاص فیبری عملکرد فوق العاده بالا (UHPFRC)، توسعه یافته توسط شرکت لافارژ، تحت فرم اسلب قالب پیش ساخته، مونتاژ و چسبیده با هم (با ملات خاص) در ساختارهای موجود در نظر گرفته شده است. این مواد جدید یک نسخه ارزان تر از بتن پودری واکنش‌دار تجاری محدوده

است (همچنین به عنوان UHPFRC-D شناخته می‌شود)، با توجه به فرآیند تولید ساده‌تر آن *Dactal*<sup>TM</sup> است. مشخصات مورد نیاز آن شامل چسبندگی بلند مدت خوب (البته، این موضوع در اینجا خطاب نیست)، و عملکرد دوام کافی است. به طور مشابه در *Dactal*<sup>TM</sup>، این UHPFRC یک بتن خود متراکم است، و دارای یک عملکرد مکانیکی بالا به رسمیت شناخته، با مقاومت فشاری بالای 120 مگاپاسکال، استحکام کششی بالا 5-6 مگاپاسکال، تخلخل (با آب اندازه گیری شده) کمتر از 10٪، شکل پذیری قابل توجه ارائه شده با حضور الیاف فلزی و مقاومت عالی در برابر نفوذ کلرید می‌باشد.

## 1.2 بررسی دوام از طریق آزمایش نفوذپذیری گاز

عملکرد دوام بتن به طور کلی توسط تعدادی از پارامترها که در میان خواص مکانیکی و نفوذ پذیری گاز کلیدی هستند، ارزیابی شده است. در یک نشریه صنعت بتن فرانسوی ارزیابی شد، V. Baroghel-Bouny یک طبقه بندی بتن با دوام *wrt*. پیشنهاد می‌کند، تعدادی از شاخص‌ها، که در میان نفوذپذیری گاز و تخلخل هستند، همانطور که در تحقیقات گسترده تجربی هستند، به جدول 1 نگاه کنید. دوام بسیار بالا مربوط به (1) آشکاری نفوذپذیری گاز در مقادیر زیر  $10^{-17} m^2$  پس از خشک شدن در دمای 105 درجه سانتیگراد با یک شب فشار گاز بمنظور 2 مگاپاسکال)، در حالی که (2) مربوط به تخلخل *P<sub>water</sub>* (توسط اشباع آب اندازه گیری شده) از 6 تا 9٪ است، و تخلخل *P<sub>hg</sub>* (اندازه گیری شده توسط نفوذ جیوه مقاومت الکتریکی، هنوز اینها مرکز سهم آشکاری ندارد.

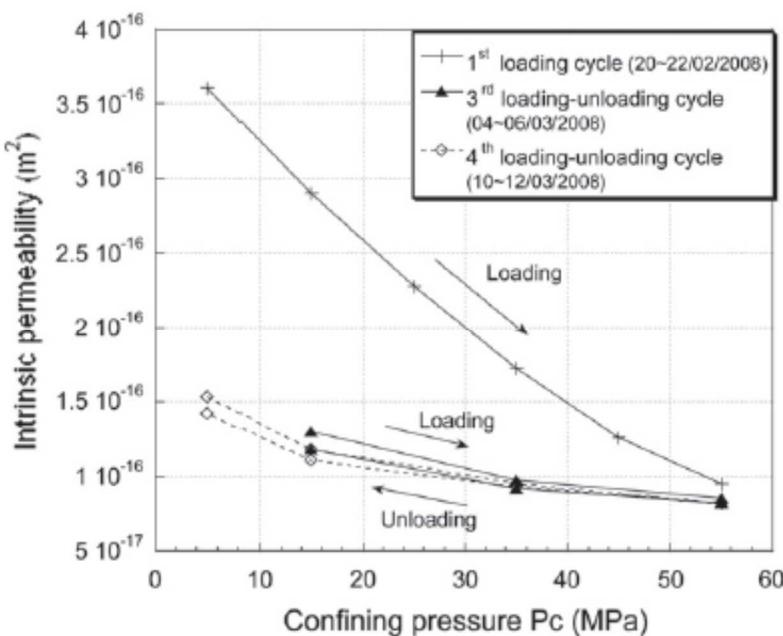
تعدادی آزمایش در آزمایشگاه ما در آسیب دیدن مواد مهندسی عمران انجام شده است: اینها نشان داده‌اند که نفوذپذیری گاز *K<sub>gas</sub>* بسیار حساس به بسته شدن یا ترک‌های بزرگ و یا ترک‌های کوچک است. بکار بردن یک فشار هیدرواستاتیک (یا فشار محدود *P<sub>C</sub>*) به یک نمونه متخلخل آسیب دیده باعث بسته شدن می‌شود (یا یک دیافراگم روی تخلیه)، که به نوبه خود، یک رفتار هیدرولیکی مشخص تولید می‌کند، به شکل 1 نگاه کنید.

		Classification and limit values				
	Potential durability indicator	Very low	Low	Average	High	Very high
G	Porosity accessible to water (%) $P_{\text{water}}$	>16	14 to 16	12 to 14	9 to 12	6 to 9
S	Porosity measured by mercury intrusion (%) $P_{\text{Hg}}$		13 to 16	9 to 13	6 to 9	3 to 6
S	Electrical resistivity (Ohm-m)	<50	50 to 100	100 to 250	250 to 1000	>1000
G	Effective chloride diffusion coefficient ( $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) $D_{\text{eff}}$	>8	2 to 8	1 to 2	0.1 to 1	<0.1
G	Apparent chloride diffusion coefficient (measured by a migration test) ( $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) $D_{\text{app(mig)}}$	>50	10 to 50	5 to 10	1 to 5	<1
G	Apparent chloride diffusion coefficient (measured by a diffusion test) ( $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) $D_{\text{app(diff)}}$				<5	
G	Apparent gas permeability (at $P_{\text{upstream}}=2 \text{ MPa}$ and after drying at $T=105^\circ\text{C}$ ) ( $10^{-18} \text{ m}^2$ ) $K_{\text{gas}}$	>1000	300 to 1000	100 to 300	10 to 100	<10
G	Liquid water permeability (at $P_{\text{max}}$ by direct flowrate measurement, after saturation) ( $10^{-18} \text{ m}^2$ ) $K_{\text{lw}}$	>10	1 to 10	0.1 to 1	0.01 to 0.1	<0.01
	Concrete type (indicative) (European EUROCODE2 denomination)		C25 to C35	C30 to C60	C55 to C80	>C80

## جدول 1

دقیق تر، در طول افزایش/کاهش پی در پی محدوده فشار  $P_c$ ، شکل 1 مراحل معمول در رفتار هیدرولیکی نمونه ملات استاندارد است که ترک کوچک خورده شده پس از 400 درجه سانتی گراد حرارتی را نشان می‌دهد. مرحله بارگذاری برای اولین بار توسط یک قطره نفوذپذیری گاز مشخص شده‌اند (از یک مقدار اولیه باسته شدن غیر قابل برگشت ترک کوچک همراه است. پس از این، اولین مسیر تخلیه با نفوذپذیری گاز  $K_{\text{gas}}$ ،  $1 - 1.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  با 3.8 و 55 مگاپاسکال سلول تقسیم شده است؛ این است که تقریباً ثابت رخ می‌دهد، به طوری که تعداد بسیار محدودی از ترک‌های کوچک دوباره باز می‌شوند) (

در دستور  $1.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2 - 1$  باقی می‌ماند). الگوی این ترکهای کوچک (قبل از بارگذاری) با مشاهده شده است. در طول سیکل‌های بارگذاری بعدی، رابطه ( $P_c$ ,  $K_{\text{gas}}$ ) یک مسیر برگشت پذیر غیر خطی را دنبال می‌کند، به طوری که دیگر تفاوت بین بارگیری و تخلیه آسان است: چنین رفتاری معمولی تقریباً دست نخورده است، به عنوان مثال مواد ترک کوچک خورده است. چنین رفتار هیدرولیکی حتی بیشتر برای مواد در ابتدا ترک کوچک خورده مشخص شده‌اند. در مقابل، اگر محدوده فشار هیچ اثر حساسیتی بر نفوذپذیری گاز ندارد، به این معنی است که مواد متخلخل به عنوان مثال اونی که شامل ترک است کوچک است، دست نخورده است. بنابراین، یک تحقیق همراه با نفوذپذیری گاز و محدوده تغییرات فشار یک ابزار کارآمد برای ارزیابی خسارت مادی است، به همین دلیل عملیات حرارتی و یا بارگذاری مکانیکی است. هر دو برای تولید مجدد در زودرسی بتن مسلح در روش شتاب، و در مقیاس آزمایشگاهی استفاده می‌شود.



شکل 1

### 1.3 اهداف و طرح‌های نهایی

خصوصیات تجربی خواص انتقالی  $Dactal^{\text{TM}}$  UHPFRC منتشر شده است در (14)، که تنگی بودن عالی آنها را به گاز نشان داده است. با این حال امیدواریم، این تحقیق مربوط به نه مواد UHPFRC خاص در نظر

گرفته در این سهم باشد، و نه به رفتار زودرسی آن. در واقع، شرکت‌های لافاژ و EDF نیاز به تعیین اینکه آیا این UHPFRC دوام آن بیش از چند ده سال و بعد از آسیب جزئی حفظ می‌شود یا نه. این جنبه‌ها بطور آزمایشی در اینجا، با انجام آزمایش‌های موثر نفوذپذیری گاز ( $K_{gas}$ ) تحت بارگذاری‌های مختلف مکانیکی، برای بتن بتدريج کهنه شده مشخص شده‌اند. بارگذاری کاربردی فشار هیدرواستاتیک (یا  $P_c$  سلول)، به دست آمده با قرار دادن هر نمونه در یک سلول سه محوری است. به منظور دوباره ساختن در شرایط پیری محل، سه روش به تدریج پست کننده از یک حالت کامل اولیه اعمال می‌شود:

(1) خشک شدن جزئی با قرار دادن نمونه UHPFRC در اتاق‌های غیر قابل نفوذ در رطوبت نسبی (RH) تا زمانی که تکثیر جرم ثبات یابد.  $K_{gas}$  پس از آن سطح اشباع آب شده  $S_w$  را مشخص کرده است. برای مقایسه اهداف، حالت مرجع در تثبیت جرم انتخاب شده است که فر خشک کن در 105 درجه سانتیگراد، بهمان اندازه در (17) است.

(2) UHPFRC برای اشعه آسیب تحت کنترل در آمده است، بطوریکه در محل بعد از چند ده سال تغییرات حرارتی و هیدرولیک فصلی مشاهده شده است. این است که در آزمایشگاه آسیب‌سنج به علت چرخه گرمایش/سرماشی تا 200، 300 و یا 400 درجه سانتیگراد تکثیر شده است. تحقیقات پیشین بر روی ملات استاندارد ثابت کرده است که این قبیل آسیب حرارتی از نگهداری عملکرد مکانیکی پیروی می‌کند، در حالی که منجر به اثرات بسیار حساس بر روی نفوذپذیری گاز و  $K_{gas}$  ( $P_c$ ) می‌شود (15).

(3) به منظور تکثیر بیشتر تخریب، UHPFRC در آسیب موضعی قرار می‌گیرد، با استفاده از آزمون تقسیم برزیلی. فشار کرنش در مقادیر داده شده در طول یک نمونه هواییمای قطری تا نارسایی ماکروسکوپی تحمیل شده است.

در موارد (2) و (3)، خواص انتقال گاز ( $P_c$ ) با حالت مرجع UHPFRC، و آن دو ماده سیمان بر اساس استاندارد مقایسه شده‌اند: یک بتن معمولی (OC)، از ترکیب نزدیک برای استفاده سازه نگهدارنده، و ملات استاندارد (M1) تحقیقات سابق ما است.

## 2. مواد و روش‌ها

## 2.1 مواد

یک نمونه ترکیب UHPFRC-D در (18) ارائه شده است: آن است که از 700-1000 کیلوگرم بر مترمکعب سیمان پرتلند خالص، 300-200 کیلوگرم بر مترمکعب بخار سیلیس، 10-40 کیلوگرم بر مترمکعب ساخته شده فوق العاده روان، 110-200 کیلوگرم بر مترمکعب آب، بیش از 150 کیلوگرم بر مترمکعب الیاف فلزی، و ترکیبات باقی مانده مصالح (0-200 کیلوگرم بر مترمکعب مصالح بد و 1000-1200 کیلوگرم بر مترمکعب مصالح خوب) هستند، که حداقل اندازه بین کوچکی 0.5 و 7 میلیمتر محدود می‌شود. نسبت آب به سیمان  $C / W$  زیر 0.24 است. میزان بالای پلاستی در UHPFRC بیشتر از بتن با عملکرد بالا برای معمول (HPC)، به منظور حصول اطمینان کارایی مناسب با وجود  $C / W$  کم است. به عنوان مقایسه یک ماده، HPC‌ها توسط آندرای مخزن زباله‌های هسته‌ای زیرزمینی فرانسه مورد استفاده گرفتند که تنها نیاز به 10-11.5 کیلوگرم بر مترمکعب فوق العاده روان در هر مترمکعب بتن (19)، با  $W / C$  از 0.39-0.43 دارند (یعنی بیشتر از UHPFRC).

Property	Average value for UHPFRC (without thermal treatment)	Average value for M1	Average value for OC
Uniaxial compressive strength $f_c$	140 MPa (at 28 days)	58 +/- 0.5 MPa (after 6 months maturation under water)	48 MPa (at 28 days)
Tensile strength at 28 days $f_t$	6.6 MPa	N/A	N/A
Tensile stress at a crack aperture of 0.3 mm (three point bending test) $\sigma_{(0.3\text{mm})}$	2.0 MPa	N/A	N/A
Young's modulus E	52 GPa	32.5 +/- 1 GPa	N/A

جدول 2

Constituents	Proportions ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
<i>Mortar M1</i>	
Cement CEM II/B-M (LL-S) 32.5R	450
Leucate sand (0-1.6 mm)	1350
Water (W/C = 0.5)	225
<i>Concrete OC</i>	
Cement CEM I 52.5 PM ES	350
Mix of sand (0-4 mm)	764
Mix of aggregates (4-20 mm)	1075
Water (W/C = 0.53)	185

جدول 3

بتن UHPFRC مورد استفاده در این مطالعه از UHPFRC-D به شرح زیر است: آن شامل بخار سیلیس نیست، و آن در هر پست هیدراتاسیون عملیات حرارتی مشخص نشده است، بعنوان استفاده برای کاهش

تخلخل آن (از 6-7٪ به 2-3٪ اگر در 90 درجه سانتی گراد و 100٪ RH به مدت 48 ساعت انجام شد، (20)). با این حال، همچنین برای UHPFRC-D، عملکرد مکانیکی بالای آن توسط یک بسته بندی مصالح بهینه سازی Appolonian، با اندازه مصالح حداقل 0.6 میلیمتر، که آن شبیه به یک ملات است، و یا به یک بتن میکرو، به جای بتن عادی ارائه شده است. نسبت  $W/C$  0.23 است، که بدان معنی است که هیدراتاسیون سیمان بمراتب کامل است: این مجبور می‌شود بتن خود تعمیر بعد از ترک خوردگی محدود شود. ترکیب UHPFRC ما اغلب شامل الیاف فلزی است که طول و قطر به ترتیب، به طور متوسط، 6 میلیمتر و 0.180 میلیمتر هستند. اطلاعات دقیقتر در مورد ترکیب این UHPFRC در *Lafrage<sup>TM</sup>* می‌باشد. جدول 2 خواص مکانیکی اصلی UHPFRC در 28 روز کیورینگ با هوا، همانطور که در (5) ارائه شده است، خلاصه نموده است. این نشان می‌دهد که، با وجود عدم درمان حرارتی و بدون مواد افزودنی پوزولانی، این UHPFRC عملکرد مکانیکی بسیار قوی (با 140 مگاپاسکال مقاومت فشاری، 6.6 مگاپاسکال استحکام کششی و 52 گیگاپاسکال مدول تازه) و انعطاف پذیری قابل توجه، به عنوان فشار مشهود پایدار در 0.3 میلیمتر شکاف دیافراگم دارد (در طول یک آزمون خمس 3 نقطه):  $\sigma_{(0.3\text{mm})} = 2.0 \text{ MPa}$ .

برای مقایسه اهداف، دو مواد سیمانی دیگر مطالعه شده است. آنها به ترتیب عبارتند از: (1) ملات استاندارد (M1)، در [15] به منظور بررسی اثر درمان حرارتی (تا 400 درجه سانتیگراد) بر روی خواص مکانیکی و حمل و نقل آن مطالعه شد و (2) بتن معمولی (OC)، شبیه به آنها برای سازه‌های مهارکننده نیروگاه‌های هسته‌ای استفاده شد.

جدول 3 ترکیبات M1 و OC را ارائه می‌کند. ملات استاندارد (M1) با توجه به EN196-1 استاندارد اروپا مخلوط می‌شوند. آن دارای یک نسبت  $W/C$  است اگر 0.5 باشد، و با شن و ماسه سیلیس خالص ساخته شده باشد (از Leucate، فرانسه)، که توزیع اندازه مصالح مربوط به استاندارد اروپا 1-EN196، با مقادیر زیر 1.6 میلیمتر می‌باشد. سیمان آن یک CEM II/B-M (LL-S) 32.5R است: آن با 69-75٪ کلینکر، 21-35٪ بtoneh آهکی LL (با مواد آلی کمتر از 0.2 درصد وزنی) و 21-35٪ افجgar تشکیل شده

کوره S، با ظرفت ارائه شده بیش از 10 مگاپاسکال مقاومت فشاری در 2 روز (و حداقل 32.5 مگاپاسکال در 28 روز کامل) ترکیب شد. هنگامی که با فرض چگالی سیمان 3150 کیلوگرم بر مترمکعب (21)، حجم خمیر آن 368 دسیمترمکعب بر مترمکعب ملات است. پس از 6 ماه رسیده شدن تحت آهک آب و خشک کردن در فر 105 درجه سانتیگراد اشباع تا تثبیت جرم، مدول یانگ  $M1 = 32.5 \pm 1$  گیگاپاسکال است، مقاومت فشاری آن است  $58 \pm 0.5$  مگاپاسکال است و تخلخل آن (اندازه گیری شده توسط روش اشباع آب)  $13\% \pm 0.5\%$  است. ملات M1 در مقایسه با UHPFRC در معنای آن است که از مصالح کم به اندازه تشکیل شده است: سطح تماس متوسط بین خمیر سیمان و مصالح به طور قابل توجهی کمتر از OC است. بتن معمولی (OC) مطابق با استاندارد فرانسه XP18-351 است. این است که از سیمان خالص پرتلند CEMI 52.5 PM ES به منظور بهبود مقاومت در برابر حمله سولفات و محیط های دریایی ساخته شده است. شن و ماسه و مصالح بزرگتر (قطر تا 20 میلی متر) سیلیس خالص، استخراج شده از معدن Palvadeau (فرانسه) هستند. نسبت W/C آن 0.53 است: آن شبیه به آن ملات M1 است، به طوری که آن استفاده از بلستیسرس بالا را نیاز ندارد. هنگامی که با فرض چگالی سیمان 3150 کیلوگرم بر مترمکعب، حجم خمیر آن بتن 296 دسیمتر مکعب بر مترمکعب است، به طور قابل توجهی کمتر از ملات M1 می باشد. تخلخل آن (اندازه گیری شده توسط اشباع آب)  $11.5\% \pm 0.5\%$  است، و مقاومت فشاری آن در 28 روز  $f_{c28} = 48 \text{ MPa}$  است. هر دو هم UHPFRC و هم OC به آزمایشگاه ما (با شرکت لافارژ) به عنوان اسلب صنعتی PRE-CAST، ضخامت 37 میلیمتر برای UHPFRC و ضخامت 50 میلیمتر برای بتن OC ارائه شده است.

## 2.2 روش آماده سازی نمونه

برای اندازه گیری نفوذ پذیری گاز، تمام نمونه ها به یک اندازه مواد رسیده را کاهش می دهند. نمونه های ملات (بزرگترین مصالح قطر 1.6 میلیمتر) از یک پرتو محافظ در آهک آب اشباع شده در دمای 20 درجه به مدت 6 ماه پر شده است. حجم نمونه قطر 37 میلیمتر و ارتفاع 70 میلیمتر است.

بتن‌های UHPFRC و OC از پیش فروش اسلب PRE-CAST توسط Lafrage<sup>TM</sup> ارائه شده است، به طوری که ارتفاعش با ضخامت کم تحمیل شده است. UHPFRC (بزرگترین مصالح با قطر 0.6 میلیمتر) برای بیش از سه ماه درمانی شده است، و بتن OC (بزرگترین مصالح با قطر 20 میلیمتر) آب درمانی به مدت 6 ماه شده است. حجم نمونه به قطر 65 میلیمتر برای هر دو مواد، ارتفاع 37 میلی متر برای UHPFRC و 50 میلیمتر برای بتن OC می‌باشد. همانطور که توسط شرپیشنهاad شد [22]، ارتفاع نمونه باید برابر با حداقل سه برابر اندازه بزرگترین مصالح انتخاب شده باشد، به منظور حصول اطمینان نمایندگی نمونه مناسب برای انتقال مایع (و برای جلوگیری از مایع قطع شده ترجیحی از طریق چسباندن/رابط مصالح). مشاهده شده است که ارتفاع نمونه بتن 2.5 برابر اندازه بزرگترین مصالح (که نزدیک به 3 زمان است، در حالی ارتفاع نمونه 62 برابر اندازه بزرگترین مصالح برای UHPFRC، و 44 برابر اندازه بزرگترین مصالح برای M1 است، که با توجه به [22] هر دو کافی هستند.

### 2.3 روش‌های اندازه گیری اشباع مجدد و تخلخل جزئی

از حالت اولیه به طور کامل اشباع شده آب، سه سطح رطوبت نسبی (RH) به سه نمونه UHPFRC مختلف با قرار دادن هر یک در یک محفظه مختلف غیر قابل نفوذ در 20 درجه سانتیگراد، بالای یک محلول نمک با توجه به اشباع تحمیل شده است: NaBr برای RH = 59٪، محلول KCl برای RH = 85٪ و K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> برای RH = 98٪ است.

سطح اشباع آب S<sub>w</sub> نسبت منافذ (به عنوان مثال کل تخلخل) پر از آب را نشان می‌دهد. این استنباط شده است که از:

$$S_w = \frac{V_{\text{pores}}(\text{filled with water})}{V_{\text{pores}}(\text{total})} = \frac{m(\text{RH}) - m_{\text{dry}}}{m_{\text{saturated}} - m_{\text{dry}}} \quad (1)$$

که در آن m(RH) نمونه جمعی در RH داده شده ثبیت شده است، m<sub>dry</sub> نمونه توده خشک (در ثبات در طول خشک شدن در فر دمای 105 درجه سانتیگراد به دست آمد)، و m<sub>saturated</sub> توده به طور کامل اشباع از آب است.

با استفاده از این روش به اصطلاح اشباع آب، تخلخل  $\Phi_{\text{water}} = \Phi$  مشتق شده از:

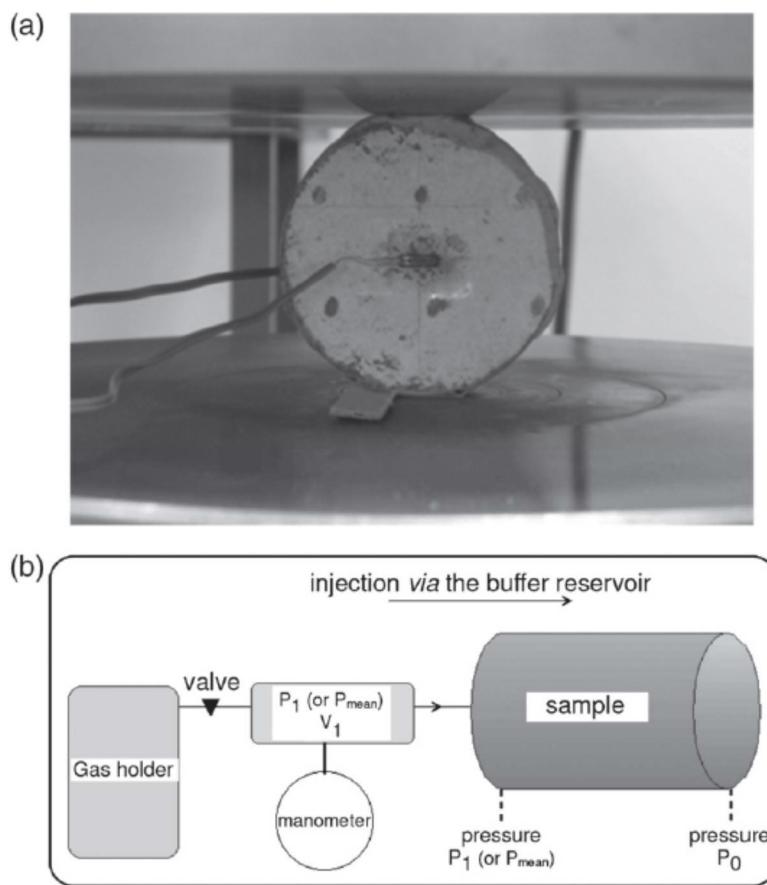
$$\phi_{\text{water}} = \phi = \frac{V_{\text{pores (total)}}}{V_{\text{sample}}} = \frac{m_{\text{saturated}} - m_{\text{dry}}}{\rho_{\text{water}} V_{\text{sample}}} \quad (2)$$

که در آن  $\rho_{\text{water}}$  وزن مخصوص آب در 20 درجه سانتیگراد است،  $V_{\text{sample}}$  حجم نمونه (با استفاده از کولیس با دقت 0.008 میلیمتر مربع اندازه گیری شد) است.

اشباع آب  $S_w$  ممکن است به فشار ظریف  $p_{\text{cap}}$  در داخل محیط متخلخل مربوط شده باشد. در واقع، فشار ظریف  $p_{\text{cap}}$  به رطوبت نسبی RH اطراف محیط متخلخل (فرض ثابت) از طریق قانون کلوین، که تعادل بین بخار آب / هوا را توصیف می‌کند، مربوط می‌شود.  $p_{\text{cap}}$  اغلب مربوط به بزرگترین قطر منفذ  $d^i$  در فصل مشترک بین آب / هوا توسط قانون لاپلاس می‌شود. ترکیب این قوانین معادله کلوین-لاپلاس را فراهم می‌کند، که اجازه محاسبه  $d^i$ ، نیز به نام کوچکترین قطر منفذ خشک شده، در دمای داده شده T و برای RH داده شده را می‌دهد، به عنوان مثال:

$$d^i = -\frac{4 \gamma_w(T) M_w}{RT \rho_{\text{water}}(T) \ln(RH)} \quad (3)$$

که در آن  $\rho_{\text{water}}$  وزن مخصوص آب (تابعی از درجه حرارت T) است (کیلوگرم بر مترمکعب)، R ثابت گاز کامل (ژول / مول در کلوین) است؛ T دمای [K] است؛  $M_w$  جرم مولی آب است [کیلوگرم / مول] و  $\gamma_w$  کشش سطحی آب / هوا (همچنین تابعی از درجه حرارت) است [23]. در ادامه، تمام محاسبات در 20 درجه سانتیگراد (293.15 کلوین) انجام شده است. از معادله 3، در  $RH = 98\%$ ، کوچکترین قطر منفذ تخلیه شده به عنوان  $d^i = d_{\text{saturated}} = 106\text{nm}$  محاسبه شده است؛ در  $RH = 85\%$ ، آن 13 نانومتر است، که مربوط به منفذ بین لایه های C-S-H (منفذ درون لایه) است؛ و در  $RH = 59\%$   $d^i = 4$  نانومتر است، که مربوط به C-S-H منفذ درون لایه [24,25] است.



شکل 2

بطور مکمل، منافذ توزیع اندازه و تخلخل UHPFRC یک نمونه  $\Phi_{Hg}$  (حجم کمتر از 1 سانتیمترمکعب) بر اساس جیوه نفوذ (MIP) ارزیابی شده‌اند، با 9500 دستگاه Micromeritics™ Porosimetry (MIP)، قادر به فشار نفوذ تا 200 مگاپاسکال می‌باشند. با استفاده از قانون لاپلاس برای رابط بین هوا و جیوه، این مربوط به نفوذ منافذ با قطر 6 نانومتر و بالاتر می‌باشد.

#### 2.4 روش درمان حرارتی

اهداف درمان حرارتی در تخریب، و از این رو، پیری، M1 و OC و UHPFRC بیشتر از طریق کاهش RH اطرافشان می‌باشد. به این منظور، عملیات حرارتی انجام شده است بین 105 و 400 درجه سانتیگراد است، که به ارتباط به تجزیه مترقی C-S-H مشهور است. همانطور که نیز از اجزای اصلی بتن به تنزل به دلیلی پیر می‌شود، عملیات حرارتی در محدوده دمایی فرض بر این دارد که برای تنزل شتاب پیری کافی است.

Strain ( $10^{-6}$ )	100	200	300	360
OC-concrete UHPFRC	Yes Yes	Failure Yes	Yes	Failure

#### جدول 4

UHPFRC Sample	Dry mass after 105 °C oven-drying (g)	Saturated mass (g)	Porosity $\phi_{water}$ (water saturation method) (%)	Imposed RH (%)	d <sub>saturated</sub> (nm)	Stable mass at given RH (g)	Water saturation $S_w$ at stabilization at given RH
F	295.2	307.99	10.4%	59	4	304.68	74%
G	293.65	305.74	9%	85	13	303.12	78%
H	294.48	305.88	9%	98	106	305.27	95%

#### جدول 5

بطور مقدماتی در درمان حرارتی، تمام نمونه‌ها در اصطلاح مرجع حالت خشک هستند، که توسط خشک شدن در فر دمای 105 درجه سانتیگراد تا ثبیت جرم به دست آمده‌اند (RH سپس کمتر از 5٪ است) و پس از سرد شدن تا 20 درجه سانتیگراد است. چرخه حرارتی به شرح زیر انجام می‌شود: از نمونه‌های 20 درجه سانتیگراد به نسبت یک حرارت 20 درجه سانتی گراد در ساعت، به دنبال یک حالت پایدار در دمای UHPFRC هدف T = 200، 300 و یا 400 درجه سانتیگراد به مدت 1 ساعت (برای M1) و یا 24 ساعت (OC)، و سپس در مرحله خنک کننده به نسبت 20 درجه سانتیگراد در ساعت به پایین 20 درجه سانتی گراد است.

#### 2.5 آزمون تقسیم برزیلی

آزمون تقسیم برزیلی در UHPFRC و OC برای آسیب آنها به صورت محلی بیشتر از عملیات حرارتی، و تا زمان شکاف کوچک خوردن شکست نمونه انجام شده‌اند. این اجازه می‌دهد تا یک ارزیابی از مزایای حضور فیبر در نفوذ گاز انجام گیرد.

مقدمات آزمون تقسیم و نفوذپذیری، نمونه‌های UHPFRC و OC از درون هسته باز گرفته شده، یعنی هیچ فری خشک کردن را انجام نمی‌دهد. خرد کن در یک مقدار فشار قطری کنترل شده است، که توسط رشتہ‌ی واقع در وسط یک سطح پایانی نمونه اندازه گیری شده است، نگاه کنید به شکل 2a. جدول 4 مراحل بارگذاری‌های مختلف را تا زمان شکست نشان می‌دهد.

نفوذپذیری گاز است بعد از هر مرحله در حال بارگذاری (با وجود آسیب‌های بالقوه موضعی) اندازه‌گیری شده است، مگر پس از شکست، که نیاز به توجه به نمونه به عنوان یک ساختار کوچک، و دیگر به عنوان یک محیط متخلخل همگن است.

## 2.6 اندازه‌گیری نفوذپذیری موثر گاز

آزمایشات نفوذپذیری گاز ما در قرار دادن یک نمونه از محیط متخلخل در یک سلول سه محوری، که اجازه می‌دهد تا استفاده از اعمال فشار هیدرواستاتیک تا 30 – 35 مگاپاسکال باشد، به طور همزمان در یک سیال \*\*گرادیان فشار تشکیل شده است، به شکل (b) نگاه کنید.

در بیان کلی آن برای انتقال مایع، قانون دارسی مربوط به گرادیان فشار مایع به سرعت آن می‌باشد، به طوری که نفوذ پذیری یک تانسور مرتبه دوم است، که عموماً پذیرفته متقابله می‌باشد [27] و [28]. در ادامه، محیط متخلخل فرض بر همسانگردی است، و در معرض یک جریان سیال تک بعدی در امتداد محور X آن می‌باشد، به طوری که نفوذ پذیری گاز به یک کمیت اسکالار  $K_{\text{gas}}$  کاهش می‌یابد (و بنابراین گرادیان فشار مایع و سرعت هستند). اثرات گرانش صرفنظر شده است.

معمولاً، نفوذپذیری گاز  $K_{\text{gas}}$  یا با روش حالت پایدار، و یا با استفاده از روش گذرا (آزمون پالس)، که به طور عمده در انتخاب به منظور بزرگی  $K_{\text{gas}}$  بستگی دارد، محاسبه شده است. روش حالت پایدار یک روش مناسب برای تراوایی  $K_{\text{gas}} \geq 10^{-20} \text{ m}^2$ ، برای جلوگیری از مدت زمان آزمایشی طولانی است. این است که به شرح زیر انجام می‌شود.

بطور تجربی، سرعت مایع  $v$  به طور متوسط جریان حجم گاز  $Q_v = v/A$  (در مترمکعب بر ثانیه) است که در آن یک نمونه سطح مقطع ارزیابی شده است. عنوان تجاری جریان متر لزوماً در محدوده اندازه‌گیری مورد نیاز نیست،  $Q_v$  با تحمیل کاهش فشار  $\Delta P$  کوچک (زمانی که با  $P_1$  فشار بالا در مقایسه است) در طول زمان  $\Delta t$  اندازه گیری شد. این با بسته شدن دریچه واقع شده در بالای مخزن بافر، بالای نمونه‌اش قرار داده شده، انجام شده است، به شکل 2B نگاه کنید. با فرض جریان شبیه استاتیک و معادله حالت گاز کامل،  $Q_v$

می‌نویسد:

$$Q_v = \frac{V_r \Delta P}{P_{mean} \Delta t} \quad (4)$$

که در آن حجم بالای مخزن بافر  $V_r$  است، فشار گاز  $P_1$  در سمت بالای نمونه است،  $P_0 = P_{atm}$  در سمت پایین آن و  $P_{atm} = P_1 - (\Delta P/2)$  حجم لوله در نظر گرفته شده است قابل اغماض است که با  $V_r$  مقایسه شده است. در ادامه،  $P_1 = 1.5 \text{ MPa}$  و  $\Delta P$  کمتر از 0.1 مگاپاسکال است.

در امتداد ارتفاع نمونه  $L$ ، نفوذپذیری گاز  $K_{gas} = K$  آشکار و یا موثر با ابراز گرادیان فشار در سمت بالای نمونه ( $X = 0$ ) از طریق ماندگاری جرم سیال و معادله حالت گاز کامل مشتق شده است، به طوری که:

$$K_{gas} = K_{int} K_{rg} = \frac{\mu Q_v 2 L P_{mean}}{A (P_{mean}^2 - P_0^2)} \quad (5)$$

که در آن  $K_{gas}$  در مترمربع بیان می‌شود،  $\mu$  یک گاز گرانروی پویا است: آن به عنوان  $2.2 \times \text{Pa.sec}$  در دمای 20 درجه سانتیگراد برای جوشکاری آرگون گرفته شده است. در سطح اشباع  $S_w$  داده شده،  $K_{gas}$  محصول یک به اصطلاح نفوذ پذیری ذاتی به گاز  $K_{int}$  و نفوذپذیری نسبی گاز  $K_{rg}$  است.

## 2.7 اندازه گیری تخلخل (با گاز) تحت بارگذاری هیدرواستاتیک

یک آزمون اختصاصی، مشابه در اصل خود با یک آزمون pycnometric، در آزمایشگاه ما با استفاده از تزریق گاز در داخل نمونه در هر مرحله سلول [12] طراحی شده است. گاز ممکن است نمونه به یک طرف دسترسی داشته باشد، با این حال مجاز نیست به جریان در آن (مقدار دسترسی پایین بسته شده است). گاز از مخزن کالیبراسیون حجم شناخته شده است  $P_1$  فشار تزریق شده است و فرض بر این است که کامل است. پس از تزریق گاز از طریق حجم نمونه منافذ در دسترس، یک تعادل در فشار نهایی  $P_f$  وجود دارد به طوری که، در حجم بسته مخزن، لوله‌های گاز و حجم منافذ نمونه، یکی می‌شود (از قانون گاز کامل):

$$P_1 V_0 = P_f (V_0 + V_t + V_p) \quad (6)$$

که در آن  $V_p$  حجم منافذ است،  $V_0$  حجم مخزن است و  $V_t$  حجم لوله است. هر دو هم  $V_0$  و هم  $V_t$  از طریق یک آزمون مقدماتی (که شامل جایگزینی نمونه توسط یک غیر متخلخل) تعیین می‌شود. از اطلاعات حجم

منافذ  $V_p$ ، تخلخل معمولی (اندازه‌گیری شده با گاز) با استفاده از حجم نمونه اولیه  $V_{sample}$ ، محاسبه شده است به عنوان:  $\Phi_{gas}(P_c) = V_p/V_{sample}$  در هر مقدار از  $P_c$  سلول.

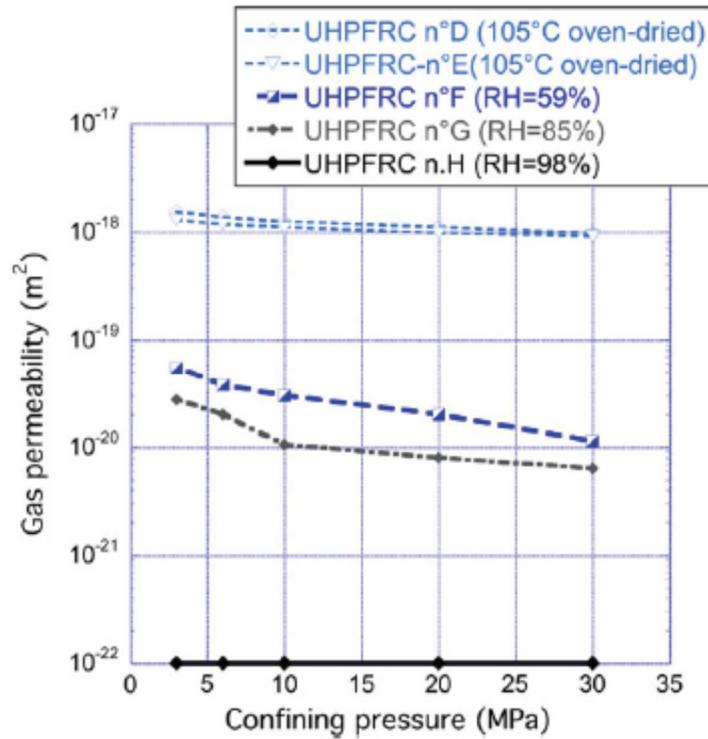
### 3. نتایج و بحث

#### 3.1 اثر خشک شدن بر نفوذپذیری گاز ( $P_c$ )

جدول 5 نتایج باقی مانده برای تخلخل  $\Phi_{water}$  و درجه اشباع  $S_w$  در RH داده شده را برای UHPFRC به تنها‌یی خلاصه می‌کند.

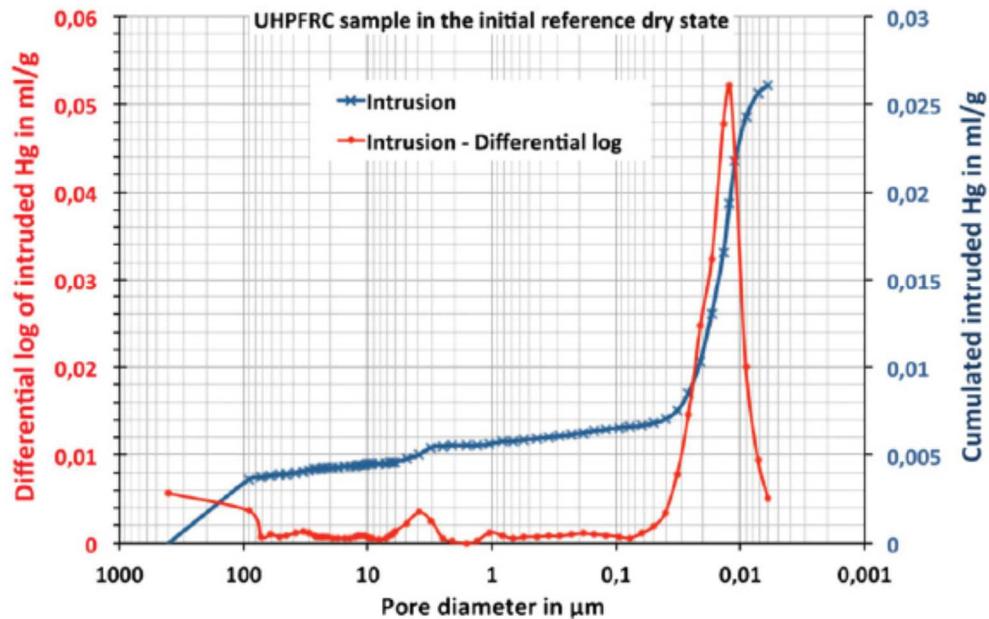
##### 3.1.1 حجم منافذ

تخلخل  $\Phi_{water}$  به طور متوسط  $9.5\% \pm 0.5$  است، همانطور که انتظار می‌رود، به طور قابل توجهی بیشتر از تخلخل  $\Phi_{Hg}$  توسط MIP به ارزش  $6.4\%$  داده شده است. با توجه به [7]، چنین سطح تخلخلی برای  $\Phi_{water}$  مربوط به طیف وسیعی از بتن دوام بالا (نه دوام بسیار بالا) می‌شود، و انتظار می‌رود نفوذپذیری گاز خشک (پس از خشک کردن فر 105 درجه سانتیگراد و در  $2 \text{ مکاپاسکال}$ ) بایستی در  $10^{-17} - 10^{-16} \text{ m}^2$  باشد. شکل 3 نشان می‌دهد که برای UHPFRC ما، نفوذپذیری گاز خشک است که به سختی محدود تغییرات فشار را تحت تاثیر قرار می‌دهد، و آن بین محدوده  $0.92 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  و  $10^{-17} \text{ m}^2$  است. چنین نفوذپذیری گاز طبقه بندی‌ای UHPFRC ما را به عنوان دوام بسیار بالا (و نه تنها دوام بالا)، به عنوان با ارزش تخلخل به تنها‌یی پیشنهاد می‌دهد. این توجیه استفاده از نفوذ پذیری گاز، به عنوان یک شاخص دقیق‌تر از دوام بتن تخلخل است.



شكل 3

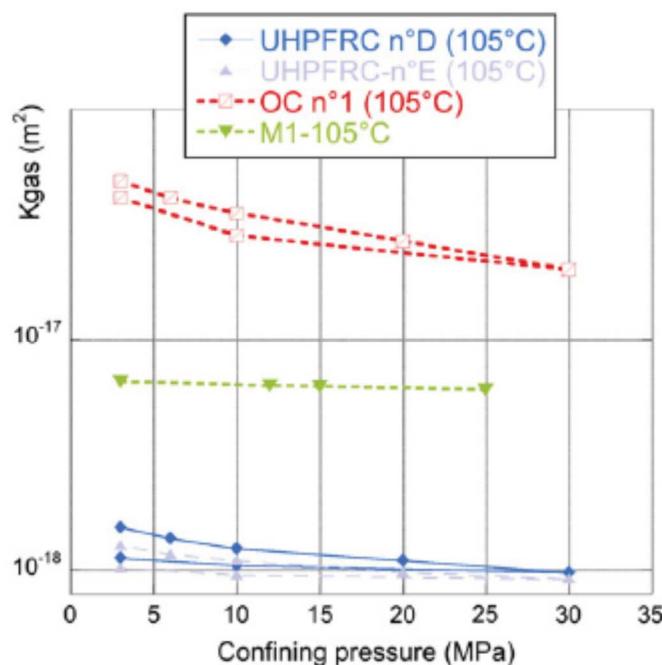
W. Wang et al / Cement and Concrete Research 55 (2014) 1–13



شكل 4

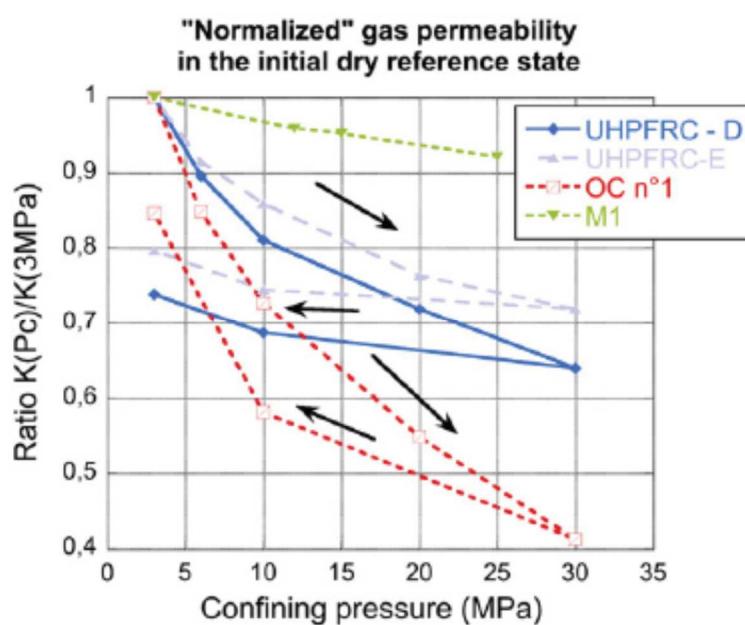
### 3.1.2 خشك شدن و توزيع اندازه منافذ

در تثبیت توده در RH داده شده (از ابتدا به طور کامل حالت آب اشباع شده، یعنی در طول یک دفع اولیه)، سطح اشباع آب  $S_w$  درصد در 95% است، در حالی  $S_w$  در 85% (نمونه H) است، در حالی  $S_w$  در 78% (نمونه G) است، و به پایین 74% فقط با 59% (نمونه F) کاهش می‌یابد. اگر چه این آزمایش بر روی نمونه‌های مختلف انجام شد (که موظف به اثر بر نتایج است)، مشاهده می‌کنیم که تنوع تنها 4 درصد در بین 59% RH و 85% RH است. هنگامی که استفاده از قانون لاپلاس در 20 درجه سانتیگراد است، این مربوط به خشک کردن منافذ با قطر بین 4 تا 13 نانومتر، که برای منافذ درون لایه اولی C-S-H، و برای منافذ درون لایه دومی C-S-H هستند: با توجه به قانون کلوین-لاپلاس، بین 85% RH تا 59% RH، تمام منافذ بزرگتر از آنهایی است که در داخل لایه‌های C-S-H خالی هستند. اندازه‌گیری‌های ما نشان می‌دهد که تنها 4 درصد از تخلخل کل UHPFRC ما (به عنوان مثال  $S_w(RH=85\%) - S_w(RH=59\%)$ ) از منافذ در محدوده [13، 4] نانومتر ساخته شده است. به طور مشابه، تنها 5% از تخلخل UHPFRC از منافذ بزرگتر از 106 نانومتر (که خشک در 98% RH = 22% از تخلخل منافذ بزرگتر از 13 نانومتر تشکیل شده است. بسیاری از تخلخل‌ها (به عنوان مثال 74 درصد از آنها) 4 نانومتر است، به عنوان مثال آن در درون لایه‌های C-S-H در زیر است. این یک نتیجه از بهینه سازی ساختار UHPFRC فراهم می‌کند که اندازه منافذ بسیار نازک هستند، و از این رو، مقاومت عالی در برابر نفوذ سیال دارند.



## شکل 5

به عنوان یک ماده قابل مقایسه، نتایج MIP برای توزیع اندازه منافذ UHPFRC حالت خشک در شکل 4 داده شده است. پایین تا 6 نانومتر (حد پایین تر از MIP)، توزیع اندازه منافذ UHPFRC تک مدلی است، با حداقل منفذ در قطر 12 نانومتر، به دنبال کاهش شدید قطر منافذ بزرگتر از این مقدار است. تفاوت کوچک در اشباع آب بین  $85\% \text{ RH} = 13 \text{ nm}$  (نامتر از بزرگترین قطر منافذ اشباع) و  $59\% \text{ RH} = 4 \text{ nm}$  (نامتر از بزرگترین قطر منافذ اشباع) است که توسط MIP توجیه شده است، بطوریکه این طیف وسیعی از قطر در حوزه کاهش شدید حجم منافذ نهفته است. به جز برای به حداقل کوچکی در 3.85 میکرومتر، هیچ منفذ بیشتری وجود ندارد، درحالیکه قطر بزرگتر از 100 نانومتر است. منافذ بزرگتر از 80 میکرون در ترک کوچک، ایجاد شده توسط برش نمونه، به داخل دستگاه MIP مناسب نسبت داده شده است: آنها با منافذ کوچک قانون کلوین-لاپلاس در حال حاضر در  $98\% \text{ RH}$  و یا زیر آن پیش بینی نشده‌اند. علاوه بر این، هیچ منافذ کوچکتر از 6 نانومتری برای MIP حساب نشده است، به طوری که قطر منافذ اصلی برای UHPFRC باید 12 نانومتر باشد. این است که مطابق با اندازه گیری سطح اشباع ما، دوباره به جدول 5 نگاه کنید: درصد پس از منافذ بزرگتر از 4 نانومتر خشک شده، با توجه به قانون کلوین-لاپلاس باقی مانده  $S_w$  است.



## شکل 6

### 3.1.3 نفوذپذیری گاز تا حدی در حالت اشباع آب

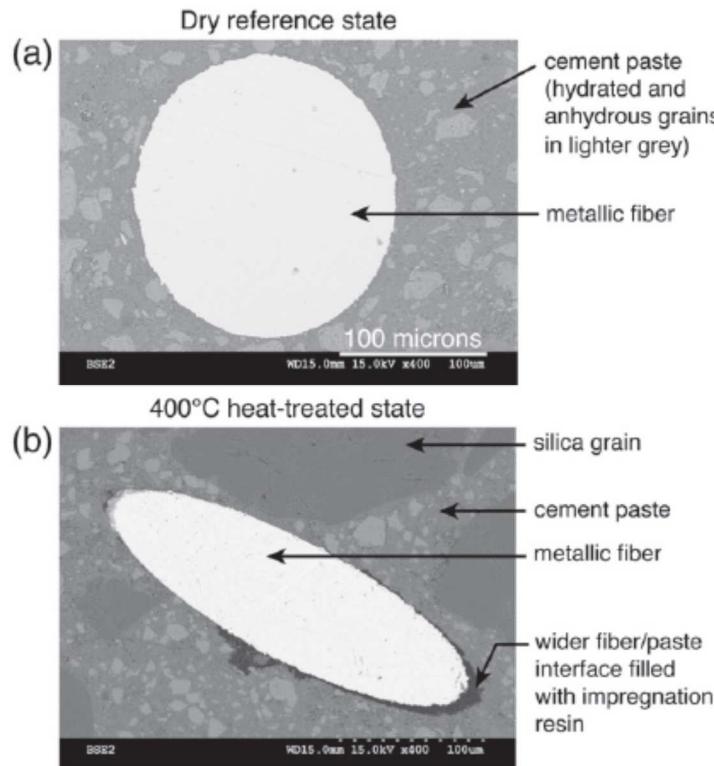
در حین ارائه چند نکته از دفع منحنی ( $RH, S_w$ )، هدف ما برای مشاهده اینکه آیا UHPFRC ممکن است یک برش هیدرولیک ارائه دهد یا نه، است که به موجب آن گاز می‌تواند از طریق رسانه‌ها سطح سلول جریان داده را نشان دهد، در حالی که آن را به طور کامل اشباع شده است. بنابراین، در زیر، ظاهر نفوذپذیری گاز از UHPFRC ارائه شده است (1) پس از تثبیت توده در  $RH$  داده شده، و (2) پس از خشک شدن در فر 105 درجه سانتیگراد، هر دو تحت پوشش تا 30 مگاپاسکال، به شکل 3 نگاه کنید. نمونه H با ۹۵٪ اشباع شده است: آن یک نفوذپذیری گاز کمتر از  $10^{-22} m^2$  دارد، و هیچ دفع گاز واقعی‌ای در سمت پایین اندازه گیری نشده است، در هنگام استفاده از فشار گاز ثابت در سمت بالا برای بیش از 4 ساعت. می‌توان نتیجه گرفت که نفوذپذیری گاز برابر با صفر مربوط به  $RH = 98\%$  است. با استفاده از قانون لابلس در  $RH = 98\%$  و 20 درجه سانتیگراد، این بدان معنی است که هیچ مسیر پیوسته‌ای در UHPFRC متتشکل از منافذ نیست، که قطر بزرگتر از 106 نانومتر است.

Material	Average initial gas permeability K ( $10^{-18} m^2$ )	K(material)/K(UHPFRC)	Permeability after 400 °C heat-treatment ( $10^{-18} m^2$ )	K(material)/K(UHPFRC) after 400 °C heat-treatment
UHPFRC	1.4	1	12	1
Mortar	6.5	4.6	239	20
Ordinary concrete	48.7	35	641	53

## جدول 6

برای نمونه F و G، که زیر  $S_w = 95\%$  اشباع شده‌اند، نفوذپذیری گاز با افزایش سلول، و در مقادیر بسیار کم، اعم از  $10^{-20} m^2$  به  $7 \times 10^{-20} m^2$  (نمونه F،  $S_w = 74\%$ ) و یا  $8 \times 10^{-21} m^2$  به  $10^{-20} m^2$  (نمونه G،  $S_w = 78\%$ ) ثبت شده است، دوباره به شکل 3 نگاه کنید. همانطور که انتظار می‌رود، بیشتر اشباع نمونه G ( $S_w = 78\%$ ) نفوذپذیری گاز به طور مداوم کمتر از نمونه F ( $S_w = 74\%$ ) دارد. برای هر دو این نمونه‌ها در یک فشار محصور  $P_c = 30 MPa$  بین  $10^{-22} m^2$  و  $8 \times 10^{-21} m^2$  است، که به عنوان یک برش هیدرولیک واقعی در نظر گرفته شده است. در واقع، برای  $0.2$  مگاپاسکال گرادیان فشار گاز (که در ترتیب  $K_{gas} = 8 \times 10^{-21} m^2$  به  $K_{gas} = 10^{-20} m^2$ )

به منظور اعمال در محل است)، جریان گاز تنها 8.14 میکرولیتر/ ساعت (به ترتیب 6.51 میکرولیتر/ ساعت) است؛ در حد بالایی 0.5 مگاپاسکال گرادیان فشار گاز، جریان گاز 26 میکرولیتر/ ساعت (برابر با 20.8 میکرولیتر/ ساعت) است.



شکل 7

### 3.2 ارزیابی یک حالت مرجع خشک برای ( $P_c$ )<sub>gas</sub>

هدف ما مقایسه اثر آسیب تدریجی بر دوام بتن، به عنوان اندازه گیری نفوذپذیری گاز، در رابطه با یک حالت مرجع است. آن به عنوان حالت خشک در 105 درجه سانتی گراد، مربوط به یک  $P_c$  در حال بارگذاری هیدرواستاتیک تا 30 مگاپاسکال یا 25 مگاپاسکال (برای ملات M1) انتخاب شده است. شکل 5 تکامل هستند. مقیاس ورود به سیستم استفاده می‌شود، همانطور که بیشتر به تضاد نفوذ پذیری بالا اندازه گیری با  $K_{\text{gas}}$  در هر سه ماده (M1، OC، UHPFRC) نشان می‌دهد، زمانی که همه در حالت مرجع هستند. مقیاس ورود به سیستم استفاده می‌شود، همانطور که بیشتر به تضاد نفوذ پذیری بالا اندازه گیری باقی باشد است.

یکی معتقد است که UHPFRC بطور قابل توجهی کمتر نفوذ پذیرتر از OC و ملات M1 است، با ارزش بین  $6.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  و  $0.96 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  (همچنین زیر بخش قبلی 3.1 را ببینید). در حالی که این محدوده بین

و  $6.5 \times 10^{-18} \text{m}^2$  برای M1، و بین 20.1 و  $49 \times 10^{-18} \text{m}^2$  برای OC است. با این حال، مرجع

ارزش‌های نفوذپذیری گاز خشک برای UHPFRC در مقایسه با نتایج به دست آمده سابق در آزمایشگاه ما

[17] در چند بتن با کارایی بالا باقی می‌ماند، که نفوذپذیری گاز از حدود  $5 \times 10^{-18} \text{m}^2$  (و 6 تا 8

درصد تخلخل) است. مرجع نفوذپذیری گاز خشک برای UHPFRC، پایین است اما استثنایی نیست. علاوه

بر این، برخلاف UHPFRC و OC، ملات M1 تقریباً به محدود افزایش فشار حساس است: این به واقعیتی

که هیچ ترک خورده‌گی کوچکی قابل توجه در طول خشک شدن آن رخ نداده است، نسبت داده شده است.

نفوذپذیری گاز نرمال بیشتر در اقتباس برای ارزیابی حساسیت مواد به فشار محصور است، که به طور

مستقیم مربوط به سطح آسیب آن می‌باشد: ما نسبت بین نفوذپذیری گاز در داده  $P_c$  و در کمترین  $P_c$  را

استفاده شده را استفاده کردیم، به عنوان مثال  $K(P_c)/K(P_c = 3 \text{MPa})$ ، به شکل 6 نگاه کنید. این

اجازه برای پاک کردن نفوذپذیری گاز اولیه ( $K(P_c = 3 \text{MPa})$ ) را می‌دهد، که با این منظور مقدار قابل

توجهی از یک ماده با دیگری متفاوت است، به جدول 6 نگاه کنید:  $K(P_c = 3 \text{MPa})$  به طور متوسط

$1.4 \times 10^{-18} \text{m}^2$  برای 105 درجه سانتیگراد فر خشک UHPFRC است، در حالی که آن را نشان

دهنده 4.6 بار این مقدار برای M1، و 35 بار این مقدار برای OC است.

دو فاز مختلف مشاهده شده است. اولین فاز در حال بارگذاری است، که در طی آن بتن OC به حساسترین

افزایش  $P_c$  با 60٪ کاهش در نفوذ پذیری گاز در  $P_c = 30 \text{MPa}$  است. این به این معنی است که OC

ابتدا ترک کوچک خورده است. همانطور که قبل از شکل 5 اشاره شد، ملات M1 تقریباً غیر حساس به  $P_c$

است، که بدان معنی است که این مواد به طور قابل توجهی (wrt.) توانایی انتقال گاز آن) با 105 درجه

سانتیگراد حرارت تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد. به اندازه OC، UHPFRC حساس به سلول، با کاهش حدود

30٪ در نفوذ پذیری گاز در  $P_c = 30 \text{MPa}$  است. در مرحله تخلیه، رفتار بتن OC پسمند کمتر از

است: تفاوت با  $K_{\text{gas}}$  در مرحله بارگذاری برای اولین بار برای OC از برای UHPFRC کوچکتر

است. این مشاهدات به این معنی است که، هنگامی که محصور نشده، معابر گاز در داخل UHPFRC دوباره

باز کمتر از بتن OC هستند. این معابر گاز در داخل UHPFRC قطعاً شکاف کوچکی، به عنوان ترکیب بهینه سازی شده برای استنباط ما می‌دهند.

شکل 7a تصویر SEM معمولی از ریزساختار UHPFRC در ایالت مرجع خشک را نشان می‌دهد. در مقیاس‌های مشاهده شده توسط SEM (پایینتر از چند صد نانومتر)، هیچ شکاف کوچکی مشاهده نشده است. با این حال، UHPFRC ما در عملیات حرارتی مشخص نشده است، که برای بهبود ارتباط بین الیاف و چسبندگی [5] اجازه می‌خواهد.

از مشاهدات SEM از UHPFRC و M1 در حالت مرجع خشک، چنین استنباط می‌شود که دامنه  $K_{gas}$  و حساسیت آن نسبت به محدوده تغییرات فشار، با توجه به هر دو (1) استحکام باند بین خمیر سیمان و الیاف فلزی (و/ یا خمیر سیمان و مصالح شن و ماسه) و (2) نرمی ریزساختار (دانه‌های ماسه با قطر کمتر از 0.6 میلی متر برای FUHPC و 1.6 میلی متر برای M1) هستند. هر دو قدرت چسبندگی و نرمی ریزساختار برای UHPFRC بهینه سازی شده است، هنگامی که با M1 (و OC) مقایسه شده است. این عواقب مستقیم بر خواص انتقال مایع دارد: هنگامی که در مقایسه UHPFRC با M1 و OC،  $K_{gas}$  به طور قابل توجهی کاهش یافت، حساسیت آن نسبت به تغییرات فشار محدود شد، شکل‌های 5 و 6 را ببینید.

### 3.3 اثر آسیب منتشر بر دوام

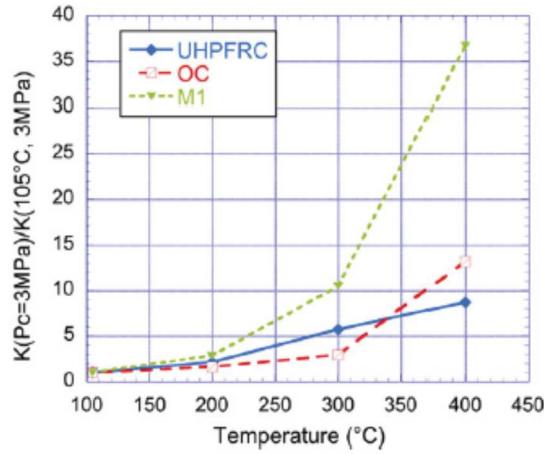
#### 3.3.1 تغییرات ریزساختار

انتشار آسیب پس از عملیات حرارتی توسط تصویربرداری SEM مجسم شده است، به شکل 7a و b برای UHPFRC و مرجع (12) برای ملات M1 نگاه کنید. برای UHPFRC، مشاهده شده است که ویژگی‌های آسیب اصلی به عملیات درمان در 400 درجه سانتیگراد تخریب رابط بین فیبر و خمیر سیمان است، با توجه به حضور طلایی اشباع (در تاریکی) که نشان می‌دهد. با این حال، این باز سطحی است که در تمام الیاف مشاهده نشده، و هیچ یک همراه تمام سطح آنها تخریب نشده است: یک باند در محدود بین فیبر و خمیر سیمان وجود دارد.

برای ملات M1، تخریب پس از 400 درجه سانتیگراد عملیات حرارتی گسترده تر است، با (1) منافذ گسترده (مشاهده شده توسط MIP) و (2) حرارت ناشی از ترک کوچک در حال حاضر هر دو در فصل مشترک بین مصالح شن و ماسه و خمیر سیمان و بدون چسبندگی سیمان معرفی می‌شوند، که در دو دانه رابط همسایه / چسبیده پیوند برقرار می‌شود. گسترش منافذ با تجزیه C-S-H در محدوده 400-105 درجه سانتیگراد همراه است، و ترک خوردگی کوچک به اتساع دیفرانسیل بین خمیر سیمان و مصالح نسبت داده می‌شود. برای OC، مکانیسم آسیب مشابه استنبط است. با این حال، برای UHPFRC، هیچ ترک خوردگی کوچکی شبیه به M1 مشاهده نشده است. در واقع، طراحی UHPFRC شامل ITZ بسیار محدود (رابط منطقه انتقال)، و یک محدودیت در تفاوت سفتی بین کارخانه و چسبندگی (با توجه به افزایش در سفتی خمیر سیمان، و به شن و ماسه  $w_{rt}$  نسبت بیشتر آن) است. این ملزم به کمک به محدود کردن وقوع و میزان ترک کوچک است. علاوه بر این، تجزیه C-S-H با مشکل مانع برای دسترسی به بخش عمدت‌های از نمونه، با توجه به اندازه منافذ بسیار خوب بستگی دارد.

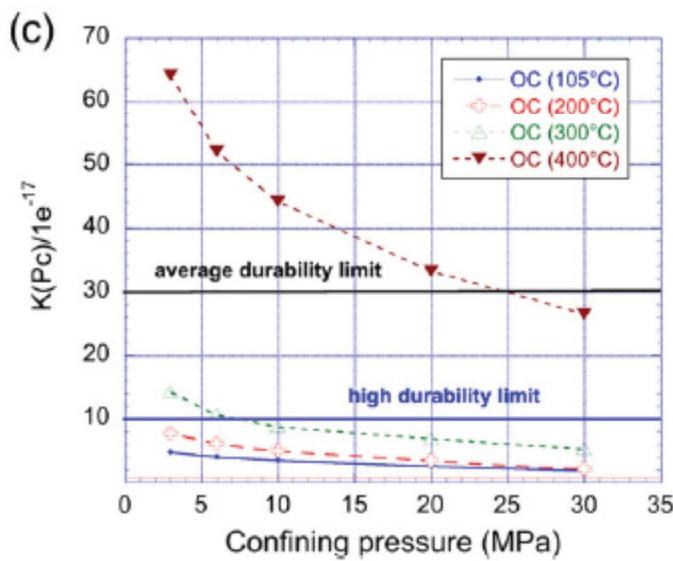
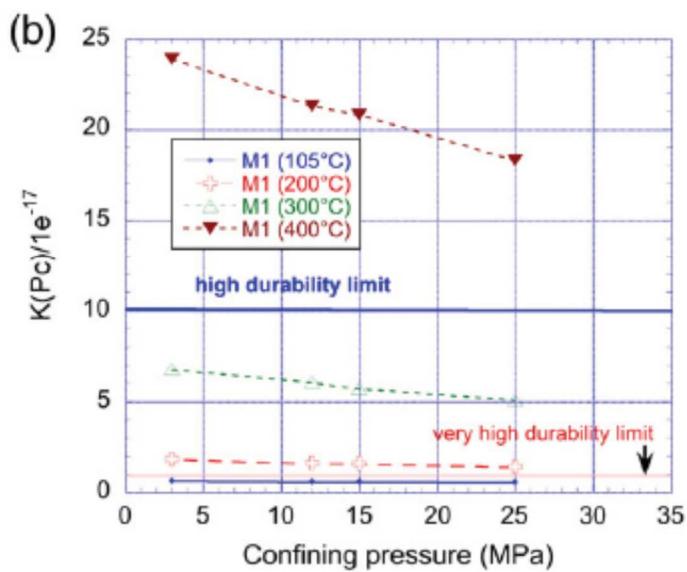
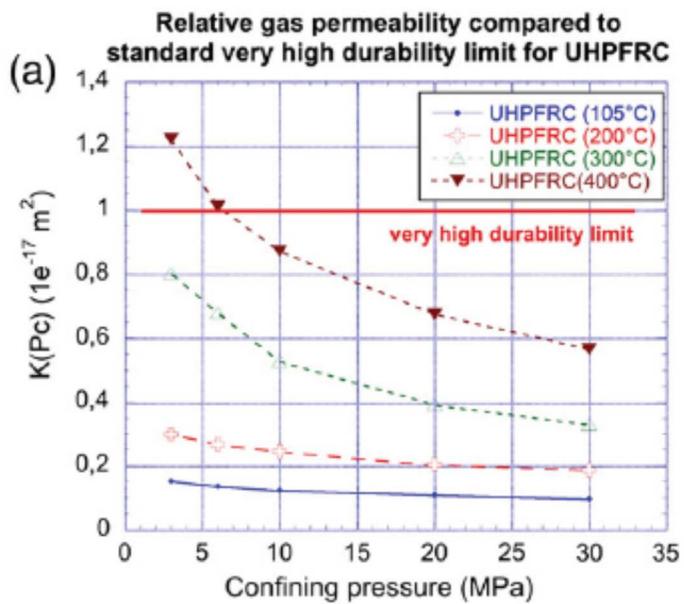
### 3.3.2 نفوذپذیری گاز ( $P_c$ ) پس از انتشار آسیب

پس از عملیات حرارتی، تغییرات نفوذپذیری گاز نشان داده شده است: (1) به عنوان تابعی از دمای عملیات حرارتی (T) برای یک مقدار سلول کم داده شده 3 مگاپاسکال)، به شکل 8 نگاه کنید، پس از آن (2)، به عنوان تابعی از محدوده فشار، شکل 9 و 3 را ببینید توسط مرجع نفوذپذیری گاز ( $K_{gas}$ ) ( $105^{\circ}C, P_c$ ) نormal شده است. هر نمایندگی مختلف افزایش ویژگی‌های خاص تغییرات نفوذپذیری گاز با عملیات حرارتی و حفظ و مقایسه سه ماده OC، UHPFRC و M1 است.



شکل 8

**3.2.2.1** اثر درمان حرارتی در سلول پایین. در شکل 8، برای هر یک از مواد به صورت جداگانه، تغییرات نفوذپذیری گاز نرمال شده است به عنوان مثال در مقایسه با ارزش  $K_{\text{gas}} = P_c / 3$  در حالت مرجع خشک در مگاپاسکال کم است. با استفاده از چنین نمایندگی، اثر درمان حرارتی تنها بر  $K_{\text{gas}}$  هنگامی که آن در مقایسه با  $P_c$  سلول بیشتر است، تقویت می‌شود.



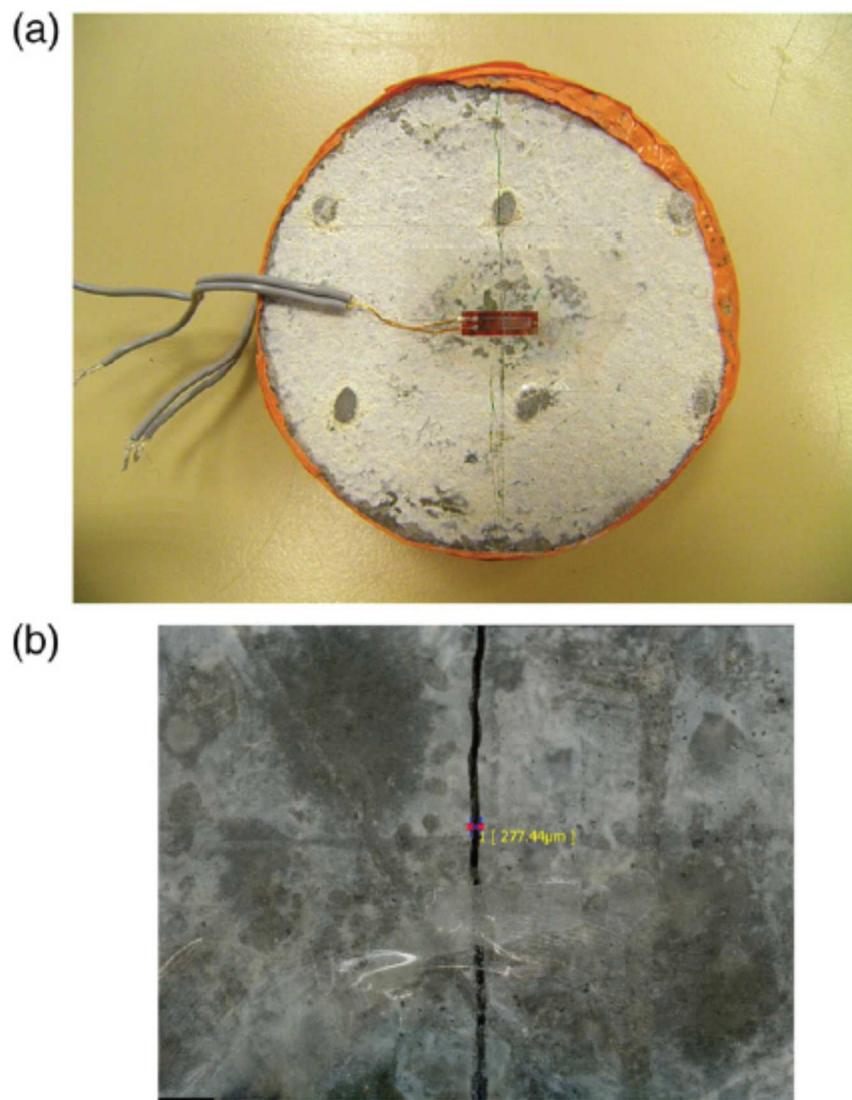
## 9 شکل

شکل 8 نشان می‌دهد که عملیات حرارتی در ( $K = K_{\text{gas}}(P_c = 3 \text{ MPa})$ ) افزایش را نشان می‌دهد، به طوری که آن توسط 1.6 (برای OC) 2.1 (برای UHPFRC) و 2.8 (برای M1) در  $T = 200$  درجه سانتی گراد ضرب شده است. افزایش بیشتری در ( $K = K_{\text{gas}}(P_c = 3 \text{ MPa})$ ) است که در  $T = 300$  درجه سانتی گراد اندازه گیری شده است: آن است که با 2.9 برای OC، 5.7 برای UHPFRC و 10.4 برای M1 ضرب شده است. افزایش بطور قابل توجه بیشتری در 400 درجه سانتی گراد با ضرب  $K = K_{\text{gas}}(P_c = 3 \text{ MPa})$  با 8.7 برای UHPFRC، 13.2 برای OC و 36.7 برای M1 اندازه گیری شده است. بنابراین، کوچکترین افزایش محدوده  $T=[200;400]$  درجه سانتی گراد حفظ کرده است، در حالی که بیشترین خسارت به دلیل حرارتی است که توسط ملات M1 پایدار مانده است. OC کوچکترین آسیب تا 300 درجه سانتی گراد را حفظ کرده است، در حالی که آسیب پس از 400 درجه سانتی گراد عملیات حرارتی بیشتر از UHPFRC است.

برای M1 و OC، ویژگی‌های اصلی آسیب مربوط به منافذ گسترش و ترک خوردگی کوچک هستند، زیرا بخش 3.3.1 را ببینید. همچنین، M1 از یک سیمان تشکیل شده است، که شامل نه تنها کلینکر، بلکه از پرکننده سنگ آهک و خاکستر کوره ساخته شده است. با توجه به این اضافات، استوکیومتری C-S-H در گسترده تر از OC است، که با استفاده از کلینکر تنها به عنوان یک سیمان است. بنابراین، تجزیه C-S-H در ملات M1 موظف است در یک محدوده دمای بیشتر از OC رخ دهد، همانطور که به یک طیف وسیعتری از واکنش‌های شیمیایی برای OC مربوط می‌شود. علاوه بر این واقعیت این است که ملات M1 شامل نسبت بیشتری از خمیر سیمان از OC (368 دسیمتر مکعب بر مترمکعب در مقابل 296 دسیمتر مکعب بر مترمکعب) می‌شود، این استوکیومتری C-S-H گسترده تر است به دلیل اصلی اینکه برای افزایش OC زودتر و بیشتر در ( $K_{\text{gas}}(P_c = 3 \text{ MPa})$ ) از ملات M1 با افزایش T تفسیر شده است، هنگامی که با مقایسه شده است. در مقابل، UHPFRC باقی مانده صدا و به ندرت آسیب دیده است که به M1 و OC در

مقایسه با تعداد کمی از تغییرات در هندسه منافذ آن است، زیر بخش 3.3.1 را ببینید، به طوری که نفوذپذیری آن بسیار کمتر از آن تخریب OC و M1 است.

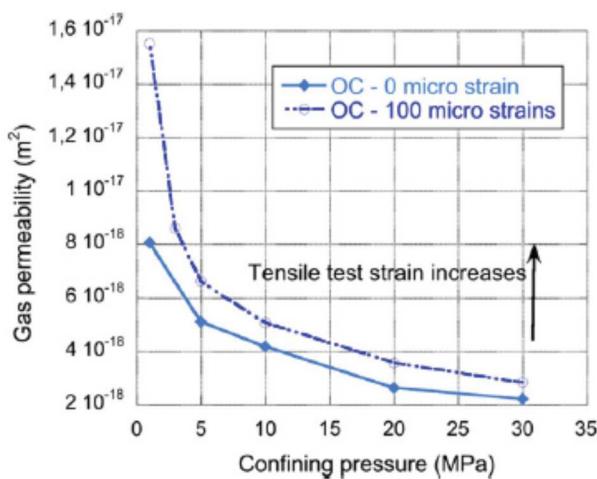
بطور مکمل، جدول 6 نشان می‌دهد که در سلول پایین ( $P_c = 3 \text{ MPa}$ ، بتن OC دارای بالاترین نفوذپذیری گاز از هر سه مواد، قبل یا بعد از عملیات حرارتی در 400 درجه سانتیگراد است. هنگامی که با UHPFRC در حالت خشک مرجع مقایسه می‌شود، ملات M1 دارای یک  $K_{\text{gas}}$  بیشتر با تنها 4.6 بار است، در حالی که 35 بار OC  $K_{\text{gas}}$  بیشتر است. پس از عملیات حرارتی 400 درجه سانتیگراد، OC هنوز بزرگترین نسبت K(material)/ K(UHPFRC) ارزش 20 را نمایش می‌دهد.



شکل 10

با این حال، مخرب ترین مواد (از خود حالت مرجع خشک آن) M1 است، به شکل 8 دوباره نگاه کنید. اینگونه تفسیر می‌شود که OC، در ابتدا نفوذ پذیرتر، کمتر حساس به آسیب‌های حرارتی بوده است: وقتی رخ می‌دهند، عبور گاز از طریق OC چندان در گسترش منافذ و یا ترک خوردن کوچک به عنوان انجام M1 تکیه نمی‌کند.

**3.3.2.2 ارزیابی دوام پس از عملیات حرارتی.** شکل 9 صفحه نمایش مطلق ارزش نفوذپذیری گاز، از طریق  $K(P_c)/10^{-17} \text{ m}^2$  در مقابل محدوده فشار برای هر دمای عملیات حرارتی  $T = 200$  و  $300$  درجه سانتیگراد، و در مقایسه با حالت خشک مرجع، برای (الف): UHPFRC، (ب): M1 و (ج): M1 می‌باشد. ارزش نفوذپذیری گاز از  $10^{-17} \text{ m}^2$  مربوط به "حد دوام بسیار بالا" (که توسط یک خط قرمز در شکل 9 نشان داده شده است) می‌شود، در حالی که  $10^{-16} \text{ m}^2$  "حد دوام بالا" (خط آبی) و  $3 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  است. به اصطلاح "حد متوسط دوام" (خط سیاه) است. افزایش عمودی مقیاس از  $K(P_c)/10^{-17} \text{ m}^2$  به (0-70) OC، به منظور افزایش تکامل UHPFRC (0-1.4) می‌باشد.



شکل 11

مشاهده شده است که UHPFRC دارای به تدریج افزایش نفوذپذیری  $K_{\text{gas}}$  با افزایش دمای حرارتی، در  $K_{\text{gas}}$  هر سلول اعمال می‌شود. به جز در  $P_c = 3,6 \text{ MPa}$  پس از 400 درجه سانتیگراد عملیات حرارتی، زیر حد دوام بسیار بالا است، که نشان از رفتار بسیار خوبی UHPFRC پس از انتشار آسیب است.

در مقابل، ملات M1 زیر حد دوام بسیار بالا تنها پس از 105 درجه سانتیگراد در فر خشک شدن باقی مانده است؛ آن را در داخل مواد دوام بالا پس از 200 و 300 درجه سانتیگراد درمان حرارتی می‌شود، و کمتر از حد دوام بطور متوسط پس از 400 درجه سانتیگراد درمان حرارتی می‌شود. از هر سه مواد مورد بررسی، بتن OC حداقل به آسیب‌های حرارتی مقاوم است: حتی پس از 105 درجه سانتی گراد در فر خشک کردن، آن بالاتر از حد دوام بسیار بالا است. آن کمتر از حد دوام بالا است؛ تا زیر  $T = 300$  درجه سانتیگراد و  $P_c \geq 6 \text{ MPa}$ . در غیر این صورت، آن بالاتر از حد دوام متوسط ( $T = 400$  درجه سانتی گراد و  $P_c \geq 25 \text{ MPa}$ ) است. برای هر دو M1 و OC، حالت دوام بالا به 300 درجه سانتیگراد (و  $K_{\text{gas}} \geq 3 \text{ MPa}$ ) است، که در آستانه بالا که گاز شروع می‌شود تثبیت در جریان مهمتر (با  $\times 10^{-16} \text{ m}^2$ ) حفظ می‌شود.

### 3.3.2.3 حساسیت بتن با گرما به محدود تغییرات فشار

حساسیت به تغییرات  $P_c$  در شکل 10، توسط  $K(T, P_c)/K(105^\circ\text{C}, P_c)$  نشان داده شده است. در مقابل محدود تحت فشار برای (الف): UHPFRC (ب): ملات M1 و (ج) OC، برای دماهای مختلف  $T = 200, 300$  و 400 درجه سانتیگراد، و در حالت مرجع خشک است: در این مورد، نسبت به یک، هر  $P_c$  مساوی می‌باشد. چنین بازنمایی مفید است، به عنوان اثری از سلول اولیه که توسط عملیات عادی حساب شده است، به طوری که به تجزیه و تحلیل اثر تنها سلول به دلیل حرارت بالا 105 درجه سانتیگراد می‌پردازد.

برای UHPFRC، حساسیت به فشار محصور پس از 200 درجه سانتیگراد حرارتی، با  $K(T, P_c)/K(105^\circ\text{C}, P_c)$ ،  $P_c$  های مختلف در محدوده باریک 2.1-1.9 هر  $P_c$  تقریباً ثابت است، به شکل 10 نگاه کنید. این مقدار نشان دهنده دو بار پس از 105 درجه سانتیگراد فر خشک کردن است: آن هم ایجاد معابر

گاز است، که به میزان قابل توجهی به  $P_c = 30 \text{ MPa}$  نزدیک نیست، نسبت داد. این است که معمولاً برای یک شبکه معابر عرض کوچک (زیر  $1 \mu\text{m}$ ) مشاهده شده است. پس از 300 درجه سانتیگراد و 400 درجه سانتیگراد حرارتی، نفوذپذیری نرمال شده‌ی گاز در سلول پایین  $K(T, P_c = 3 \text{ MPa})$  بیشتر از پس از 105 درجه سانتیگراد یا 200 درجه سانتیگراد عملیات حرارتی، با ارزش از  $T = 300$  درجه سانتیگراد و  $8.7$  درجه سانتیگراد است. از این تصدیق حجم بیشتری از معابر گاز با افزایش  $T$  است، که در حال حاضر از شکل 8 مشاهده می‌شود. با این حال، در مقابل به 200 درجه سانتیگراد درمان حرارتی، نسبت  $K(T, P_c)/K(105^\circ\text{C}, P_c)$  را به تدریج با افزایش سلول، با ارزش محدوده در  $T = 300$  درجه سانتیگراد، و  $5.9$  تا  $8.7$  درجه سانتیگراد، با ارزش محدوده در  $T = 300$  درجه سانتیگراد، برای  $P_c = 3 - 30 \text{ MPa}$  کاهش می‌دهد. از این مشاهدات، آن تفسیر می‌شود که بخشی از معابر گاز به اندازه کافی گسترده برای بستن زمانی که  $P_c$  افزایش می‌یابد، ایجاد شده است. مشاهدات SEM پس از 400 درجه سانتیگراد عملیات حرارتی را نشان می‌دهد که تا چند ده میکرون وجود داشته است، که توجیه این تفسیر معابر بطور گسترده‌ای به عنوان چند میکرون است، به شکل 7b نگاه کنید. از آنجا که معابر گاز ایجاد شده توسط عملیات حرارتی در یک ماتریس نفوذپذیری کم گنجانده شده است، بسته شدن آن با توجه به حبس یک دامنه بیشتر از M1 و OC می‌باشد، همچنین به شکل 10b و c نگاه کنید. علاوه بر این، برای  $T > 200$  درجه سانتیگراد نسبت  $K(T, P_c)/K(105^\circ\text{C}, P_c)$  به دنبال یک شیب مشابه 400 درجه سانتیگراد حرارتی ایجاد شده می‌باشد، که نزدیک به بالای  $P_c$ ، یک باز اولیه مشابه آن در  $T = 300$  درجه سانتیگراد ایجاد شده است. آنها، با این حال، پس از عملیات 400 درجه سانتیگراد در حرارت‌های متعدد هستند.

شکل 10b و c نشان دهنده نسبت  $K(T, P_c)/K(105^\circ\text{C}, P_c)$  برای بتن M1 و OC هستند. همانطور که برای UHPFRC، برای  $P_c$  از 3 تا 30 مگاپاسکال، بتن M1 نمایش‌دهنده‌ی آستانه دمای بین 200 تا 300 درجه سانتیگراد است، که از آن نسبت نفوذپذیری بطور قابل توجهی افزایش 8.5 تا 10.4 (برای

درجه سانتیگراد) و یا  $30.5 \leq T \leq 36.7$  (برای  $T = 400$  درجه سانتی گراد) است، در حالی که آن در محدوده  $2.4 \leq K(T, P_c) \leq 2.8$  درجه سانتیگراد است. برای  $OC$ ، آستانه بالا را همچنان  $K(105^\circ C, P_c)$  به طور قابل توجهی افزایش می دهد نه در  $300 \geq T \geq 200$  درجه سانتی گراد: در  $T = 200$  درجه سانتیگراد،  $K(T, P_c)/K(105^\circ C, P_c) = 1.1$  تا  $1.6$  متفاوت است، در حالی که آن در  $T = 300$  درجه سانتیگراد و در  $T = 400$  درجه سانتیگراد است.

#### 4. نتیجه گیری

این مطالعه تجربی بر روی فیبرهای فوق العاده با کارایی بالا بتنی (UHPFRC) طراحی شده است که مفروض به صرفه برای برنامه های کاربردی مهندسی عمران مت مرکز شده است. هدف ما بررسی دوام آن بعد از شتاب زودرسی متراقی بود: خشک شدن جزئی،  $105^\circ C$  درجه سانتیگراد فر خشک کن،  $200$ ,  $300$  و یا  $400$  درجه سانتیگراد عملیات حرارتی و تقسیم متراقی (با یک آزمایش بزرگی). UHPFRC با یک بتن استاندارد (M1) و به بتن معمولی (OC) مقایسه شده است. ابزار تجربی کلیدی ما برای ارزیابی دوام نفوذپذیری گاز تحت حبس های مختلف، MIP و SEM برای ارزیابی تغییرات ریز ساختار مختلف به همراه اندازه گیری منافذ است.



این مقاله، از سری مقالات ترجمه شده رایگان سایت ترجمه فا میباشد که با فرمت PDF در اختیار شما عزیزان قرار گرفته است. در صورت تمایل میتوانید با کلیک بر روی دکمه های زیر از سایر مقالات نیز استفاده نمایید:

✓ لیست مقالات ترجمه شده

✓ لیست مقالات ترجمه شده رایگان

✓ لیست جدیدترین مقالات انگلیسی ISI

سایت ترجمه فا؛ مرجع جدیدترین مقالات ترجمه شده از نشریات معتبر خارجی