



## مطالعه نفوذپذیری در بتن‌های باکارائی بالا

دکتر محمد شکرچیزاده

استادیار گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران

چکیده:

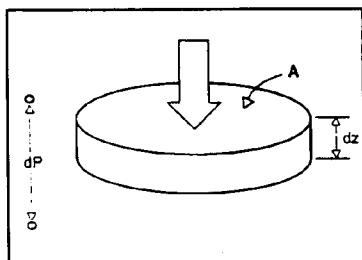
به علت کاربرد روزافزون دوده سیلیس در سازه‌های بتی که تحت تأثیر شرایط نامساعد خارجی قرار دارند ضروری است نفوذپذیری این ساختمانها در برابر سیالات مختلف مورد مطالعه قرار گیرد. در این مقاله به تأثیر عوامل گوناگون بر روی ضریب نفوذپذیری بتن پرداخته شده و نشان داده است که نسبت آب به سیمان اثر قابل ملاحظه‌ای در این رابطه دارد. نتیجه مثبت افزودن دوده سیلیس برای کاستن ضریب نفوذپذیری بتن بستگی زیادی به استفاده از مقدار بهینه دوده سیلیس دارد. مقدار اپتیمم دوده سیلیس را می‌توان از آزمایش‌های مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن حدس زد.

### مقدمه

در سالهای اخیر موضوع تعیین عمر مفید و قابل استفاده اینیه فنی جدید الاحادیث و قدیمی جزء ملزومات صنعت ساختمان درآمده است. این در حالی است که تعمیرات ساختمانها و پل‌های بتی که بدلیل خوردگی آرماتور دچار آسیب شده‌اند سالانه در کشورهای مختلف هزینه‌های گرافی را در بر دارد و بخش قابل ملاحظه‌ای از بازار ساخت و ساز را تشکیل می‌دهد. در این میان پارامتر نفوذپذیری به عنوان اصلی‌ترین شاخص در موضوع دوام بتن و پایایی این ماده در برابر حملات کلوروری و سولفاته شناخته شده است. باید توجه داشت که یکی از نقاط ضعف بتن‌های معمولی دارای بودن تخلخل بالا و در نتیجه ضریب نفوذپذیری زیاد می‌باشد. این مطلب یکی از دلایلی است که باعث می‌شود بتن معمولی از حیث دوام در محیط‌های خورنده دچار ضعف باشد. برای جبران این ضعف، بتن با کارائی بالا با استفاده از دو تکنیک ساخته شده است: یکی کاهش مقدار آب مصرفی با استفاده از روان‌کننده‌های ممتاز و دیگری استفاده از مواد افزودنی نظیر دوده سیلیس که باعث متراکم کردن ریز ساختار بتن از طریق فعل و انفعالات پوزولانیک می‌گردد. تحقیقات انجام شده تاکنون نشان می‌دهد که افزودن بیش از حد دوده سیلیس موجب شکننده شدن بتن و اثرات نامساعد بر روی مقاومت فشاری آن می‌گردد، ولی اثرات دوده سیلیس اضافی بر روی ضریب نفوذپذیری بتن کمتر مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این مقاله پس از توضیح اثرات عوامل مختلف بر روی ضریب نفوذپذیری بتن مقدار بهینه دوده سیلیس برای کسب حداقل ضریب نفوذپذیری مورد تحقیق قرار گرفته است.

### ۱- تعریف نفوذپذیری - یادآوری

نفوذپذیری بتن (K) عبارت از ویژگی است که قابلیت این ماده ساختمانی را جهت عبور و حرکت یک سیال تحت اثر یک گرادیان فشار، از درون بتن مشخص می‌نماید. مقدار متوسط ضریب نفوذپذیری از رابطه دارسی بدست می‌آید و در سیستم آحاد بین‌المللی بر حسب  $m^2$  بیان می‌شود.



$$Q = k / m \cdot \frac{dp}{dz}$$

Q: دبی حجمی سیال با ویسکوزیتۀ دینامیکی

A: سطح ظاهری نمونه بتی

با استفاده از رابطه زیر ضریب نفوذپذیری بتن در مقابل آب ( $K_w$ ) با سرعت ظاهری  $V_{app}$  بدست می‌آید:

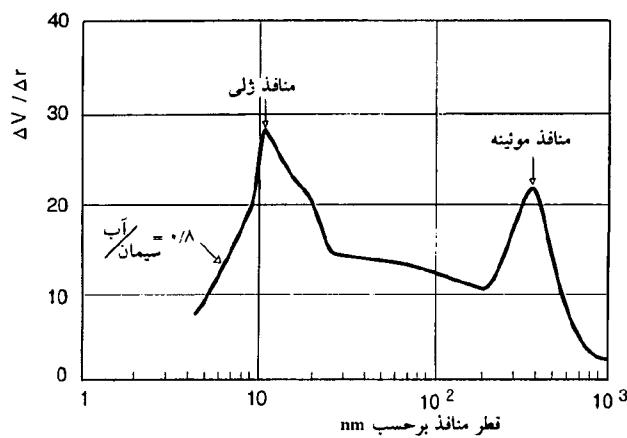
$$V_{app} = Q / A = - k_w \cdot i$$

$i$  گرادیان هیدرولیکی را نشان می‌دهد و برابر  $\frac{dP}{dh}$  می‌باشد. در این رابطه  $k_w$  در سیستم آحاد بین‌المللی بر حسب  $m/s$  بوده و نشانگر ضریب نفوذپذیری ذاتی محیط متخلخل بتن می‌باشد.

## ۲- نفوذپذیری و وضع هندسی منافذ و توزیع آنها

باید توجه داشت که بین نفوذپذیری بتن و وضعیت منافذ آن ارتباط ساده‌ای برقرار نیست. با یک دید کلی می‌توان گفت این تمامیت ویژگی‌های ساختمان منافذ شامل ابعاد، نحوه توزیع و ارتباط بین خلل و فرج هستند که وضعیت نفوذپذیری را تعیین می‌کنند. در این قسمت ابتدا یک نظر کلی به انواع منافذ در خمیر هیدراته شده سیمان خواهیم داشت و آنگاه سیر تحول ضریب نفوذپذیری در بتن جوان را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

منافذ موجود در بتن دارای اشکال هندسی پیچیده می‌باشند که معمولاً آنها را می‌توان بصورت استوانه‌هایی مدل نمود که قطر این استوانه‌ها با آزمایش کلاسیک نفوذ جیوه بدست می‌آید. منحنی توزیع منافذ برای یک خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان زیاد (شکل ۱) نشان می‌دهد که در خمیر هیدراته شده عموماً دو دسته منافذ وجود دارد: منافذ بزرگتر به نام منافذ موئینه که به علت فضاهای خالی پر نشده توسط هیدرات‌ها بین مصالح سنگی بوجود می‌آیند و دسته دوم به نام منافذ ژلی که کوچکتر بوده و بدليل فضاهای خالی در داخل خود هیدرات‌ها ایجاد می‌شوند [۱].



شکل ۱: حضور دو دسته منافذ در خمیر سیمان هیدراته

جدول ۱ نشان می‌دهد که ضریب نفوذپذیری بتن با ضریب آب به سیمان کاهش می‌یابد و دلیل این امر آن است که همزمان با پیشرفت روند هیدراتاسیون ارتباط بین منافذ موئینه قطع و حرکت سیال در درون محیط متخلخل بتن با مشکل روبرو می‌شود. جدول شماره ۲ نشان می‌دهد که هرچه ضریب آب به سیمان زیادتر باشد زمان بیشتری لازم است تا منافذ موئینه غیرمرتبط شوند [۲].

جدول ۱: اثر بلوغ بتن بر روی ضریب نفوذپذیری آن (برای نسبت آب به سیمان ثابت)

سن نمونه (روز)	$K(m/s)$
بتن تازه	$2 \times 10^{-6}$
۵	$24 \times 10^{-10}$
۸	$4 \times 10^{-11}$
۱۳	$5 \times 10^{-12}$
۲۴	$1 \times 10^{-12}$

جدول ۲: حداقل زمان لازم برای غیرمرتبط شدن منافذ موئینه در بتن بر حسب ضریب آب به سیمان

ضریب آب به سیمان	روز
۰/۴	۳
۰/۴۵	۷
۰/۵	۲۸
۰/۶	۱۸۰
۰/۷	۳۶۵

### ۳- اثر اجزاء تشکیل دهنده بتن بر روی ضریب نفوذپذیری

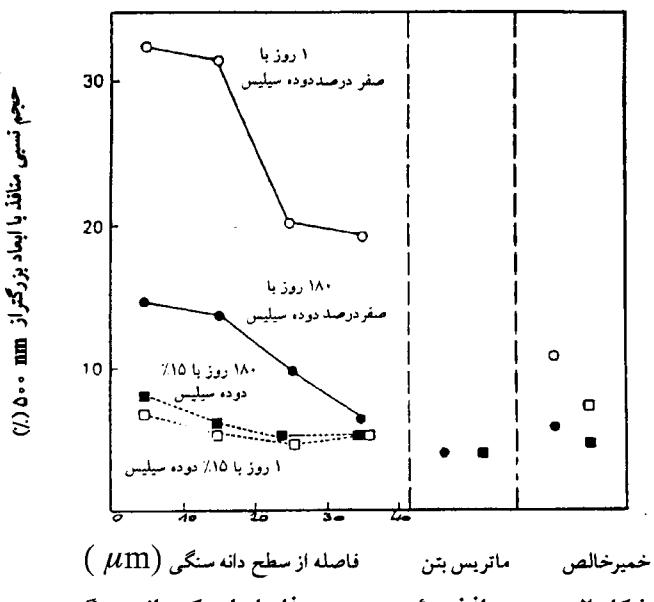
تحقیقات بعمل آمده نشان می‌دهد که عموماً ضریب نفوذپذیری بتن از ضریب نفوذپذیری خمیر سیمان (با مقدار آب به سیمان و درجه هیدراتاسیون یکسان) بزرگتر می‌باشد. به عنوان مثال برای یک خمیر سیمان هیدراته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۶ ضریب نفوذپذیری برابر ۴۰ بdst آمده، حال آنکه برای بتن با دانه سنگی بین ۳۸ و ۱۱۳ میلیمتر با همان نسبت آب به سیمان ضریب نفوذپذیری برابر ۱۸۰۰ بوده است. این در حالی است که اگر بتن را به عنوان یک ماده دو فازه (خمیر سیمان و مصالح سنگی) فرض کنیم با توجه به اینکه معمولاً مصالح سنگی به عنوان مصالح نفوذناپذیر شناخته شده‌اند قاعده‌تاً باید نتایج برعکس نتایجی باشد که در بالا ذکر شد. یعنی اینکه ضریب نفوذپذیری بتن که بین ۶۰ تا ۸۰ درصد حجمی آن از مصالح سنگی تشکیل شده است باید از خمیر سیمان هیدراته شده کمتر باشد. دلایل راکه می‌تواند بزرگ‌تر بودن ضریب نفوذپذیری بتن را توجیه کند به شرح زیر می‌توان ذکر کرد:

I : دانه‌های سنگی برخلاف آنچه که ممکن است بنظر برسند دارای ضریب نفوذپذیری هستند که با ضریب نفوذپذیری خمیر هیدراته سیمان قابل مقایسه می‌باشند. جدول ۳ ضرایب نفوذپذیری بdst آمده برای مصالح سنگی و خمیر سیمان هیدراته معادل (با توجه به نسبت آب به سیمان) را نشان می‌دهد. همانگونه که مشهود است ضریب نفوذپذیری بعضی از مصالح سنگی (مانند گرانیت) معادل ضریب نفوذپذیری یک خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۷۱ می‌باشد [۳].

جدول ۳: ضرائب نفوذپذیری بعضی از سنگ‌ها و خمیر سیمان هیدراته

نوع سنگ	ضریب نفوذپذیری (m/s)	نسبت آب به سیمان یک خمیر سیمان هیدراته با همان ضریب نفوذپذیری
دیوریت کوارتزیک	$8/2 \times 10^{-14}$	۰/۴۲
مرمر	$2/4 \times 10^{-13}$	۰/۴۸
گرانیت	$1/6 \times 10^{-10}$	۰/۷۱
ریگ سنگ	$1/2 \times 10^{-10}$	۰/۷۱

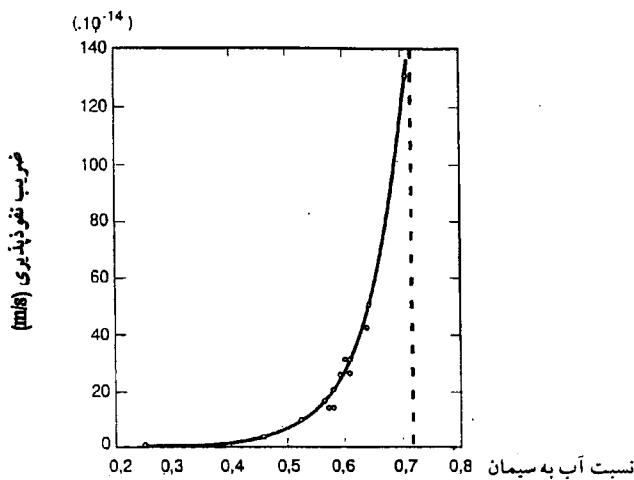
II - ناحیه مرزی بین ماتریس سیمان و دانه‌های سنگی از تخلخل بالائی برخوردار است که عموماً از تخلخل خود ماتریس سیمان هیدراته بیشتر است. شکل ۲ نشان می‌دهد که در فاصله نزدیک دانه سنگی یعنی در لایه مرزی حجم منافذ با ابعاد بزرگ‌تر از ۵۰۰ nm (منافذ موئینه) به مراتب بیشتر بوده در حالی که هرچه از کناره دانه سنگی فاصله بگیریم از حجم منافذ کاسته خواهد شد. در همین شکل اثر مثبت افزودن دوده سیلیس و روان‌کننده در کاهش حجم منافذ موئینه و در نتیجه متراکم‌تر کردن بتن و کاهش ضریب نفوذپذیری مشخص است.



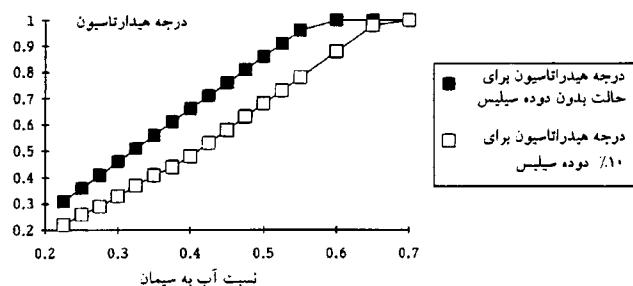
شکل ۲: حجم منافذ موئینه بر حسب فاصله از یک دانه سنگی

#### ۴ - تأثیرات مقدار آب اولیه، درجه هیدراتاسیون و دوده سیلیس بر روی اتصال بین منافذ در یک خمیر سیمان هیدراته

آقای power [۴] در سال ۱۹۵۹ نشان داد که شبکه منافذ در خمیر سیمان با مقدار آب به سیمان ۷٪ یا بزرگتر در هر حال به صورت مرتبط باقی خواهد ماند حتی اگر درجه هیدراتاسیون نزدیک به ۱ باشد. مطالعات مربوط به ضرایب نفوذپذیری نیز نشان می‌دهد (شکل ۳) که ضریب نفوذپذیری برای خمیر سیمان با ضریب نفوذپذیری نزدیک ۷٪ افزایش زیادی می‌یابد [۵]. منحنی‌های شکل ۴ حداقل درجه هیدراتاسیون لازم برای غیرپیوسته شدن شبکه منافذ موئینه در بتن را نشان می‌دهد [۶]. همانگونه که ملاحظه می‌شود هرچه مقدار نسبت آب به سیمان اولیه پایین‌تر باشد، درجه هیدراتاسیون لازم برای قطع ارتباط بین شبکه منافذ موئینه (یا بالا رفتن درجه نفوذناپذیری بتن) پایین‌تر است، به عبارت دیگر بتن می‌تواند در سنین جوانتر بطور مطمئن در معرض محیط‌های خورنده قرار گیرد. در همین شکل ملاحظه می‌شود چنانچه که در بتن دوده سیلیس بکار رفته شده باشد حداقل درجه هیدراتاسیون برای قطع ارتباط بین منافذ موئینه پایین‌تر است و یا می‌توان گفت بتن با دوده سیلیس با سرعت بیشتر و در شرایط سهله‌تری به مقاومت نفوذناپذیری خواهد رسید.



شکل ۳: تغییرات ضریب نفوذپذیری بر حسب نسبت آب به سیمان (برای نسبت آب به سیمان ۷٪ شبکه بین منافذ موئینه بصورت مرتبط باقی خواهد ماند)



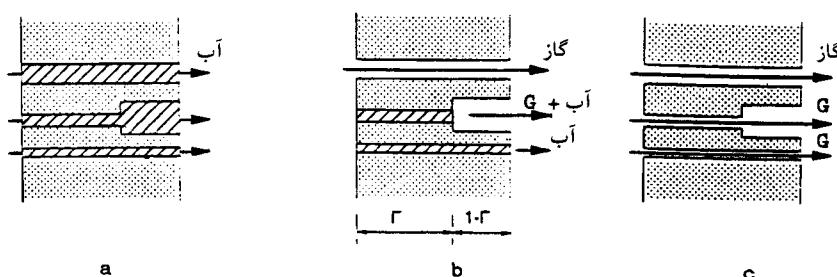
شکل ۴: حداقل درجه هیدراتاسیون بر حسب نسبت آب به سیمان برای قطع ارتباط بین شبکه منافذ موئینه

## ۵ - شرایط رطوبتی نمونه برای اندازه‌گیری ضرایب نفوذپذیری بتن در مقابل سیالات

بطورکلی اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری بتن در برابر گازها با توجه به ضریب ویسکوزیتۀ کم آنها ساده‌تر انجام می‌شود تا در برابر آب . به صورت تئوری برای اینکه ضریب نفوذپذیری بتن در برابر آب و هوا قابل اندازه‌گیری باشد باید نمونه بتنی به ترتیب کاملاً اشباع و یا کاملاً خشک باشد (شکل a - b و c - d) به نحوی که سیال بتواند از طریق منافذ بتن جریان پیدا کند. البته باید توجه داشت خشک کردن کامل بتن به منظور اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری آن احتمالاً به ایجاد ریز ترک‌های منجر خواهد شد که سرعت جریان سیال را خواهد افزود. در عمل وضعیت رطوبت در بتن در حالت میانی خشک و اشباع (حالت مرطوب) قرار دارد (شکل b - d) و مطلب دیگر اینکه عموماً رطوبت به نحو یکسان و یکنواخت در تمام منافذ مصالح بتن پراکنده نیست و این خود ایجاد مشکلاتی در تحلیل نتایج مربوطه می‌نماید. البته باید ذکر کرد که اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری بتن در برابر هوا می‌تواند با دو هدف زیر انجام پذیرد :

I - ارزیابی بتن همانگونه که در آزمایش‌های مشخصات مکانیکی، بر حسب طرح اختلاط‌های مختلف، مثلاً مقاومت فشاری ۲۸ روزه را بدست می‌آوریم. البته در این راستا باید مطابق استاندارد، شرایط نگهداری نمونه کاملاً معین و مشخص باشد.

II - شناخت و مطالعه خواص یک بتن با طرح اختلاط معین برای بررسی رفتاری آن بر حسب شرایط نگهداری‌های متفاوت و متغیر.



شکل ۵: تغییرات وضعیت رطوبت در بتن

a: نمونه اشباع برای نفوذپذیری در برابر آب

b: نمونه مرطوب (حالت میانی)

c: نمونه خشک برای نفوذپذیری در برابر گاز

## ۶ - نفوذپذیری بتن در برابر گازها

### ۶-۱ اثر روش‌های آزمایشگاهی

نتایج آزمایش‌های تعیین ضرایب نفوذپذیری در مقابل اکسیژن برای دو بتن، اولی یک بتن کلاسیک B30 و دیگری یک نوع بتن با کارآئی بالا با استفاده از دوده سیلیس (B80) ارائه شده توسط گروه تحقیقاتی Lafarge (در فرانسه) در جدول ۴ آمده است. دو نوع بتن فوق با سه روش مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌شود تاثیرات شرایط نمونه‌گیری و نحوه آزمایشها در مورد نوع بتن B80 یعنی بتن حاوی دوده سیلیس مشهود‌تر است.

جدول ۴ : مقایسه بین ضرایب نفوذپذیری برای انواع بتن و شرایط آزمایشی مختلف  
 $(10^{-14} \text{ m}^2)$  K نفوذپذیری بتن در برابر اکسیژن

نوع بتن	نحوه ریختن	L. C. R.	Holderbank	Cembureau
B30 استوانه با قطر ۱۵ سانتیمتر	ویراتور دستی ویراتور میزی	۰/۸۹۳ ۱/۰۹۵	۱/۴۹۶ ۱/۷۰۳	۰/۶۴۳ ۰/۷۹۷
B80 (همراه با دوده سیلیس) مکعب با ابعاد ۲۰ سانتیمتر بصورت نمونه گیری از بتن اصلی	ویراتور میزی	۰/۰۱۱۸	۰/۰۳۱۵	۰/۰۰۱۶۱
شرایط نگهداری نمونه	روز در درجه حرارت $20^\circ\text{C}$ و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد	۲۸ روز در درجه حرارت $20^\circ\text{C}$ و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد	۷ روز در درجه حرارت $20^\circ\text{C}$ و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد	۲۸ روز در درجه حرارت $20^\circ\text{C}$ و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد
عملیات قبل از آزمایش	۶ روز در درجه حرارت $50^\circ\text{C}$ در دستگاه خشک کننده	۶ روز در درجه حرارت $50^\circ\text{C}$ در دستگاه خشک کننده	۲۱ روز در درجه حرارت $50^\circ\text{C}$ در درجه حرارت $20^\circ\text{C}$ نسبی + ۶ روز در درجه حرارت $50^\circ\text{C}$ در دستگاه خشک کننده	۲۸ روز در درجه حرارت $20^\circ\text{C}$ در درجه حرارت $50^\circ\text{C}$ رطوبت نسبی

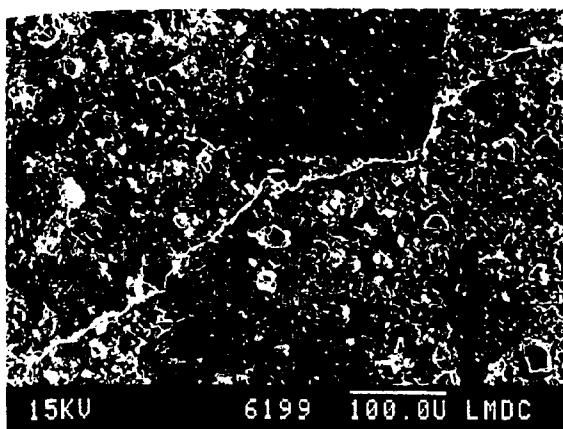
#### ۶ - ۲ اثر شرایط نگهداری نمونه ها

نمونه های بتنی به شکل استوانه ( $11 \times 22 \text{ cm}$ ) پس از یک روز قالب برداری شده آنگاه به سه طریق مختلف به شرح جدول ۵ نگهداری شده اند. دوره نگهداری نمونه ها در اطاق مرطوب ۱ روز و عمر نمونه ها در زمان آزمایش دو سال بوده است (با شرایط ذکر شده در جدول ۵). مقدار مواد چسبنده (سیمان + دوده سیلیس) برابر  $590 \text{ kg/m}^3$  و نسبت آب به مواد چسبنده  $34/3$  می باشد. همانگونه که ملاحظه می شود ضرایب نفوذپذیری به نسبت از ۱ تا ۶۰ تغییر کرده است.

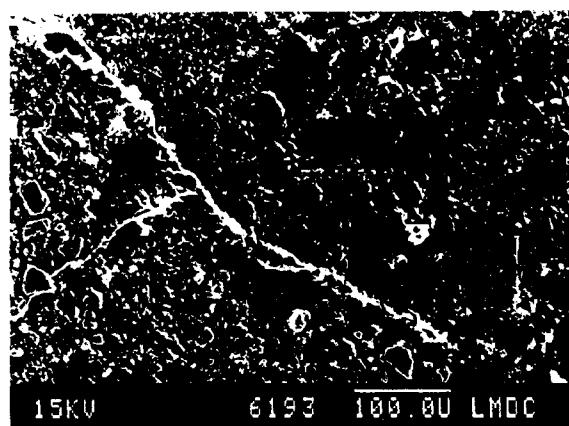
مشاهدات انجام شده توسط میکروسکوپ الکترونیکی (شکل ۶) به منظور بررسی وضع ریز ترکهای احتمالی در سطح خارجی سه نمونه (با شرایط نگهداری مختلف) نشان می دهد که بازشدنی ریز ترکها برای نمونه های نگهداری شده در محیط با رطوبت نسبی ۵۰ درصد، ساک نفوذناپذیر و اتاق مرطوب به ترتیب زیاد، متوسط و ناچیز می باشد بدین ترتیب می توان تفاوت در ضرایب نفوذپذیری را توجیه کرد [۱].

جدول ۵ : تاثیر نحوه نگهداری نمونه بر روی ضریب نفوذپذیری

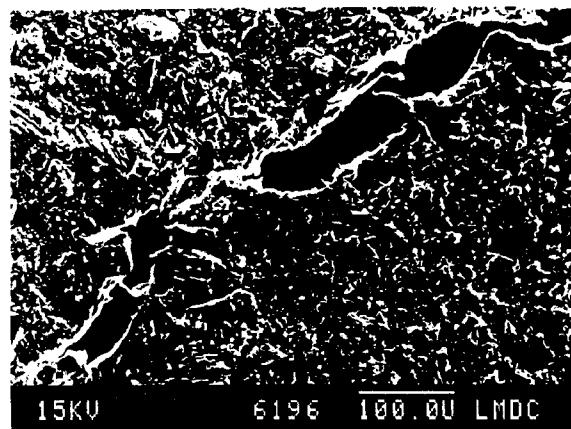
نحوه نگهداری نمونه های بتنی	نفوذپذیری در برابر هوا ( $10^{-18} \text{ m}^2$ )
اطاق مرطوب	۰/۴۴
ساک نفوذناپذیر	۶/۷
اطاق خشک با رطوبت نسبی ۵۰ درصد	۲۷/۱



۶ - a : ریز ترکها با بازشدنگی بسیار کم برای بتن با کارآئی بالا نگهداری شده در اطاق مرطوب با رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد



۶ - b : ریز ترکها با بازشدنگی متوسط برای بتن با کارآئی بالا نگهداری شده در ساکهای نفوذناپذیر



۶ - c : ریز ترکها با بازشدنگی زیاد برای بتن با کارآئی بالا نگهداری شده در اطاق خشک با رطوبت نسبی ۵۰ درصد

### ۶ - ۳ اثر طول زمان نگهداری در اطاق مرطوب

طول زمان نگهداری اولیه در اطاق مرطوب اثر بسیار مهمی در دوام بتن دارد زیرا که محیط با درجه رطوبت نسبی بالا برای هیدراتاسیون سیمان و در نتیجه متراکم شدن ساختار متخلخل بتن ضروری است. نتایج بررسی اثر طول زمان نگهداری اولیه بتن در اطاق مرطوب بر روی ضریب نفوذپذیری که در آزمایشگاه CMC در فرانسه بر روی یک طرح اختلاط بتن با کارآئی بالا انجام پذیرفته در جدول ۶ آمده است.

بتن با کارآئی بالا با ۵۰۰ کیلوگرم مواد چسبنده (سیمان + دوده سیلیس) با نسبت آب به مواد چسبنده ۳/۹٪ حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیس (به نسبت وزن سیمان) با استفاده از مصالح سنتگی از نوع آهکی و ۱/۳ درصد روان‌کننده ممتاز بر حسب وزن سیمان ساخته شده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر ۸۰ MPa می‌باشد.

**جدول ۶: اثر طول زمان نگهداری در سالن مرطوب بر روی ضریب نفوذپذیری**

ضریب نفوذپذیری در برابر هوا ( $m^{18-10}$ بعد از ۲۸ روز)	طول زمان نگهداری در سالن مرطوب (روز)
۱	۲/۷۷
۶	۰/۸۲
۱۸	۰/۲۱
۲۲	۰/۰۶

چنانچه ملاحظه می‌شود اگر طول مدت نگهداری نمونه در شرایط مرطوب از ۱ روز به ۲۷ روز افزایش یابد، ضریب نفوذپذیری ۴۶ برابر کاهش خواهد یافت.

بطورکلی مجموعه نتایج نشان می‌دهد که برای طرح اختلاط‌های مختلف، طول زمان‌های گوناگون نگهداری در شرایط مرطوب و شرایط نگهداری‌های متفاوت ضریب نفوذپذیری بتن با کارائی بالا کماکان مقدار کمی را دارد می‌باشد.

#### ۶ - ۴ - اثر مقدار دوده سیلیس

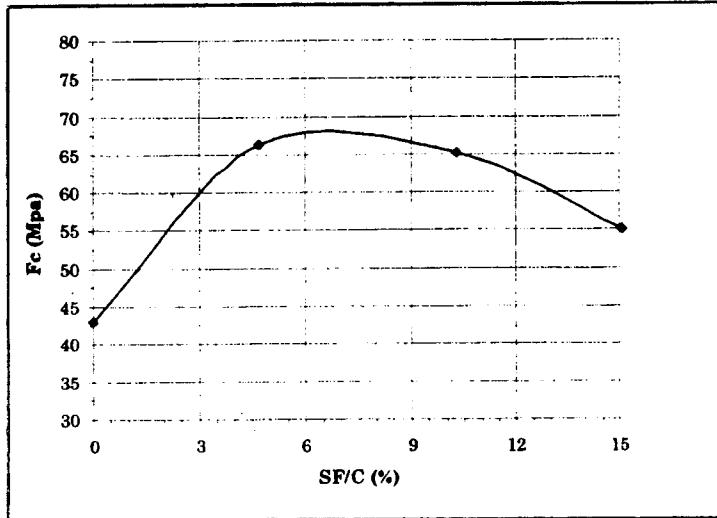
استفاده از دوده سیلیس برای بهبود ریز ساختار بتن از سالها پیش مطرح بوده است، ولی تحقیقات بعدی نشان داد که در صورت مصرف بیش از حد، ذرات دوده سیلیس وارد فعل و انفعالات شیمیایی نشده و باعث می‌شوند که بتن حالت شکننده پیدا کرده و از مقاومت فشاری آن کاسته شود [۷ و ۸].

به منظور بررسی اثرات مقدار دوده سیلیس بر روی ضریب نفوذپذیری آزمایش‌هایی بر روی ۴ نوع بتن حاوی ۰، ۰/۴ و ۰/۳ و ۱۰/۳ درصد دوده سیلیس (برحسب وزن سیمان) انجام پذیرفت که برخی از نتایج آن در جدول ۷ آمده است [۹ و ۱۰].

همانگونه که نتایج نشان می‌دهد برای هر دو حالت مرطوب و خشک افزودن ۱۵ درصد دوده سیلیس باعث می‌شود که ضریب نفوذپذیری به بیش از نصف کاهش یابد ولی بهترین نتیجه و حداقل ضریب نفوذپذیری مربوط به درصدهایی از دوده سیلیس بین ۰/۴ و ۰/۳ درصد (احتمالاً حدود ۰/۵ تا ۰/۶ درصد) می‌باشد که در آن صورت ضریب نفوذپذیری تا یک سوم مقدار اولیه کاهش خواهد یافت. نکته جالب توجه اینکه همانگونه که از شکل ۷ نیز می‌توان دریافت مقدار ماکریم مقاومت فشاری ۴ نمونه بتن ذکر شده در بالا نیز مربوط به بتن حاوی حدود ۰/۷ درصد دوده سیلیس می‌باشد، که این نتیجه از یک سوارتیابی بین مقاومت فشاری و ضریب نفوذپذیری را نشان می‌دهد و از سوی دیگر می‌توان نتیجه گرفت که برای یافتن مقدار اپتیمم دوده سیلیس جهت بالابردن دوام بتن و کاهش ضریب نفوذپذیری آزمایش‌های ساده مقاومت فشاری ۰/۸ روز می‌توانند اولین تخمین را بدست بدهنند. تحقیقات دیگری نشان می‌دهد که بتنهای با دوده سیلیس کمتر و نسبت آب به مواد چسبنده (سیمان + دوده سیلیس)، کمتر نسبت به طرح اختلاط بتن با درصد دوده سیلیس بیشتر و نسبت آب به مواد چسبنده بیشتر دارای کارائی بیشتری می‌باشد [۱۱، ۱۲، ۱۳].

**جدول ۷: اثر مقدار دوده سیلیس بر روی ضریب نفوذپذیری**

درصد دوده سیلیس نسبت به وزن سیمان	نفوذپذیری بتن در برابر اکسیژن ( $m^{17-10}$ )	
	نمونه مرطوب	نمونه خشک
۰	۷/۹۲	۱۰/۷
۰/۴	۲/۹۳	۳/۱۴
۰/۱۰	۲/۲۳	۴/۶۴
۰/۱۵	۳/۹۶	۵/۱۸
شرایط نگهداری نمونه	۰/۲۸ روز در درجه حرارت $20^{\circ}C$ و رطوبت نسبی $100\%$ درصد ۰/۲۸ روز در درجه حرارت $20^{\circ}C$ و $50\%$ درصد	۰/۲۸ روز در درجه حرارت $20^{\circ}C$ و رطوبت نسبی $100\%$ درصد ۰/۱۰ روز در درجه حرارت $10^{\circ}C$ و دستگاه خشک‌کننده
عملیات قبل از آزمایش	۰/۰۵ درصد رطوبت نسبی	۰/۰۱ درصد رطوبت نسبی



شکل ۷: اثر مقدار دوده سیلیس  
بر روی مقاومت فشاری

### نتیجه گیری

ضریب نفوذپذیری بتن با کارائی بالاکه در آن دوده سیلیس بکار رفته باشد از بتن معمولی پایین تر میباشد. دلیل عمدۀ این امر بهبود ریز ساختار بتن خصوصاً در لایه مرزی بین ماتریس و دانه های سنگی است.

ضریب نفوذپذیری بتن در حالت کلی شدیداً تحت تأثیر مرتبط بودن و یا گسسته بودن راه ارتباطی منافذ موئینه میباشد. افزایش بیش از حد مقدار نسبت آب به سیمان (بالاتر از ۷/۰) باعث میشود که حتی در درجات هیدراتاسیون بالا منافذ موئینه مرتبط باقی مانده و بتن دارای ضریب نفوذپذیری بالا و در نتیجه دوام پایین در برابر تهاجمات خارجی باشد. این در حالی است که شرایط نگهداری بتن پس از ریختن ، طول زمان نگهداری در محیط مرطوب و نحوه انجام آزمایشها تأثیراتی را بر روی ضریب نفوذپذیری خواهند داشت و نهایتاً نشان داده شده است که مصرف بیش از حد دوده سیلیس کمکی به کاهش ضریب نفوذپذیری بتن نمینماید. برای بدست آوردن مقدار اپتیمم دوده سیلیس به عنوان اولین تخمین میتوان از نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روز استفاده نمود.

### مراجع

1. Olivier J. P. et Yssorche M. P. "Microstructure et permeabilité aux gaz des bétons de hautes performances", Les bétons à hautes performances, Presses de l'école Ponts et Chaussées, 271 - 288 , 1992.
2. La Permeabilité vue par le chercheur", Les Bétons à hautes performances, Presses de l'école Ponts et Chaussées , 289 - 310 , 1992.
3. Powers T. C. , "Structures and physical properties of hardened portland cement pastes", Journal of the American Ceramic Society ,Vol.1, 1 - 6 , 1958.
4. Powers T. C. "Capillary continuity of discontinuity in cement pastes", Journal of the PCA Research and Development Laboratories, Vol. 1 , No. 2 , 38 - 48 , 1959.
5. Neville, A. M. "Properties of concretes" London, Ed. Longman scientific and technical, 844 p, 1995.
6. Bentz P. and Garboczy E. J., "Percolation of phases in a three - dimensional cement paste microstructural model" Cem. Concr. Res. Vol. 21, 325 - 344 , 1991.
7. Baroghel - Bouny V, "Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons - Méthodes analyse interprétation ", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 1994.

8. Prabir C. Basm and Amit Mittal, "High performance concrete for indian nuclear power plants", SMiRT - 15 , Corea, H 07/7 - XII 67 - 74 , 1999.
9. Shekarchi, M., Debicki, G. et Clastres P., "Permeabilité du béton à l'oxygène - influence de la fumée de silice , influence de la température", AFPC - AFREM , Toulouse , France, 197 - 206 , 1997.
10. Billard Y., " Etudes expérimentales de bétons : 1 - Etude de la permeabilité après échauffement 2 - Mesure de la teneur en eau", Mémoire de D. E. A., URGC - Insa de Lyon France, 113 p, 1997.
11. Wolsiefer J., Sr., Sivasundaram. V. Malhotra V. M. and Carette G. G., "Performance of concretes incorporating various forms of silica fume", 5 th Canmet / ACI Con. on Fly Ash. Silica fume, Slag and Natural pozzolans in concrete Milwaukee, Wisconsin U. S. A. SP, 153 , Vol. 2, 591 - 655, 1995.
12. De Larrard F., "Prévision des résistances en compression des bétons à hautes performances aux fumées de silice ou une nouvelle jeunesse pour la loi de Féret ", Ann. Inst. Tech. Bâtiment Trav. Publ. No. 483 , 92 - 98 , 1990.
13. Shekarchi, M. Debicki G. Clastres P, and Billard Y., "Influence of silica fume on permeability of concrete to oxygen for temperatures up to 500° C", 6 th Canmet / ACI , International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in concrete, Bangkok, Thailand, 975 - 996 , 1998.