

# کر بناسیون و پتانسیل خوردگی میلگرد در بتن متخلخل

آرمین منیرعباسی (استادیار)  
گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۵ (۱۳۹۵)  
دوره ۲، شماره ۱/۳، ص. ۱۰۹-۱۱۳، (یادداشت فنی)

بتن متخلخل به دلیل ویژگی‌های صوتی و آب‌گریزی، در موارد زیادی مانند روسازی‌ها، پانل‌های مسلح، و غیره کاربرد دارد. در این پژوهش، خواص مکانیکی و دوام بتن متخلخل و فولاد مدفون در آن در برابر خوردگی بررسی شده است. کاربرد ترکیبات آب‌گریز در مخلوط نیز در برخی طرح‌های اختلاط در نظر گرفته شده است. از نتایج آزمایش‌ها مشخص شده است که مخلوط‌های بتن متخلخل مورد مطالعه در این پژوهش به واسطه‌ی ساختار متخلخل آن، حساسیت زیادی به کر بناسیون داشته‌اند، زیرا گاز دی‌اکسیدکربن به سهولت می‌تواند وارد اعماق زیاد بتن شود. کاربرد مواد افزودنی آب‌گریز، اگرچه تأثیر چندانی در ساختار بتن متخلخل ندارند، اما می‌توانند روند کر بناسیون بتن را کند کنند. همچنین مشخص شده است که استفاده از مواد آب‌گریز می‌تواند با کاهش خاصیت چسبندگی بین آب و جداری لوله‌های مویینه، ضریب جذب مویینه‌ی آب را نیز کاهش دهد. لذا احتمال وجود آب، که یکی از الزامات ایجاد خوردگی میلگرد است، نیز کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، مشخص شده است که رابطه‌ی خطی بین ضریب جذب مویینه و پتانسیل خوردگی در بتن متخلخل برقرار است. به عبارت دیگر، کاهش ضریب جذب مویینه می‌تواند موجب کاهش پتانسیل خوردگی میلگرد موجود در بتن متخلخل شود.

monirabbasi@pnu.ac.ir

واژگان کلیدی: بتن متخلخل، خوردگی، کر بناسیون، افزودنی آب‌گریز

## ۱. مقدمه

بتن متخلخل نوعی از بتن است که در آن ریزدانه‌ها حذف شده و یا مصرف آن به میزان کمینه رسیده است.<sup>[۱]</sup> تاکنون بیشترین کاربرد بتن متخلخل در روسازی‌ها،<sup>[۲]</sup> بوده و دلیل این کاربرد، خاصیت زهکشی این نوع بتن است.<sup>[۳]</sup> در رابطه با کاربرد این بتن در روسازی، مطالعات موجود محدود به بررسی خواص ذوب و انجماد، انبساط و انقباض حرارتی، مقاومت فشاری و سایشی است.<sup>[۴-۷]</sup> براساس مطالعات پیشین، درصد تخلخل در بتن متخلخل به منظور عملکرد مناسب، باید بین ۱۵ تا ۲۵ درصد باشد.<sup>[۸]</sup>

استفاده از بتن متخلخل در موارد سازه‌یی به دلیل ضرورت محافظت از فولاد مدفون در بتن همواره محدود شده است. در حال حاضر، مطالعات خاصی بر روی خوردگی فولاد مدفون در بتن متخلخل در منابع مختلف گزارش نشده است.<sup>[۹]</sup> هنگامی از بتن متخلخل با میلگردهای فولادی مسلح استفاده می‌شود که میلگردهای مذکور پوششی از خمیر سیمان داشته باشند. تا زمانی که خمیر سیمان اطراف فولاد قلیابیت بالایی داشته باشد، فولاد می‌تواند در این پوشش سیمانی محافظت شود.<sup>[۹]</sup> اگرچه ممکن است این پوشش به صورت فیزیکی و یا در اثر کر بناسیون به طور موضعی و یا گسترده از بین برود. تجربه‌ی استفاده از فولاد مدفون در بتن‌های معمولی نشان می‌دهد، تا زمانی که روند کر بناسیون به سطح میلگردهای فولادی می‌رسد، سرعت خوردگی با مقاومت الکتریکی بتن رابطه‌ی مناسبی دارد،<sup>[۱۰]</sup> که به ساختار فیزیکی

## ۲. روش آزمایش

### ۱.۲. ساخت بتن متخلخل

به منظور ساخت بتن متخلخل، ابتدا شن و کمی آب به دستگاه مخلوطکن وارد و پس از ۱ دقیقه، سیمان و باقیمانده‌ی آب و مواد افزودنی شیمیایی به مخلوطکن اضافه شده‌اند. پس از ۳ دقیقه اختلاط، ۳ دقیقه دستگاه مخلوطکن خاموش و سپس دوباره به مدت ۲ دقیقه دیگر اختلاط انجام شده است.

### ۲.۲. نمونه‌گیری و عمل‌آوری

برای نمونه‌گیری از قالب‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر و استوانه‌یی به قطر

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۹/۱۹، اصلاحیه ۱۳۹۴/۲/۱۳، پذیرش ۱۳۹۴/۲/۲۷.

نمونه‌ها با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم مطابق استاندارد BS۱۴۶۳۰ EN<sup>[۱۳]</sup>، مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تعیین درصد کربناسیون، مساحت ناحیه‌ی کربناته شده به مساحت کل مقطع شکسته شده بتن تقسیم شده است. آزمایش جذب آب نیز مطابق استاندارد ASTM C ۱۵۸۵<sup>[۱۴]</sup> انجام شده است، با این تفاوت که آزمایش مذکور بر روی نمونه‌های مکعبی انجام شده است. رفتار خوردگی میلگردهای فولادی مدفون در نمونه‌های بتن مسلح متخلخل، تحت شرایط مختلف با اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری‌های پتانسیل خوردگی از الکتروود مرجع نقره - کلرید نقره استفاده شده است. این تذکر لازم است که اندازه‌گیری‌های پتانسیل خوردگی در هر سن پس از ۱ ساعت غوطه‌وری بتن در آب صورت پذیرفته است.

### ۳. نتایج

#### ۱.۳. خواص مکانیکی

جدول ۱، طرح اختلاط، مقاومت فشاری مکعبی، و ضریب نفوذپذیری مخلوط‌های مختلف بتن متخلخل را نشان می‌دهد. ۵ طرح اختلاط انتهایی، درصد‌های مختلف مواد افزودنی شیمیایی آب‌گریز دارند، که جهت بررسی اثر مواد آب‌گریز در نظر گرفته شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، چگالی بتن‌های تولیدی در محدوده‌ی  $1730 \text{ kg/m}^3$  الی  $1995 \text{ kg/m}^3$  متغیر است. همچنین تخلخل این بتن‌ها در محدوده‌ی ۲۸٪ تا ۱۵٪ و ضریب نفوذپذیری آنها در محدوده‌ی ۰٫۰۸ تا ۰٫۲۰ سانتی‌متر بر ثانیه قرار دارد. علاوه بر این، مقاومت فشاری ۲۸ روزه از ۸٫۵ تا ۲۴٫۳ مگاپاسکال متفاوت است.

#### ۲.۳. مقاومت در برابر کربناسیون

مقاومت در برابر کربناسیون بتن متخلخل، اهمیت فوق‌العاده‌ی برای پوشش فولاد مدفون دارد. در ابتدا خمیر سیمان موجود در بتن متخلخل همانند بتن معمولی، خاصیت قلیایی دارد. اما بخشی از خمیر سیمان پس از آغاز کربناسیون به تدریج دچار کاهش خاصیت قلیایی می‌شود. تخلخل بالای این نوع بتن موجب می‌شود عمق کربناسیون نسبت به بتن معمولی با سرعت بیشتری افزایش یابد و همچنین به دلیل ساختار متخلخل آن، منافذ در این بتن به یکدیگر ارتباط دارند؛ لذا، تعیین عمق کربناسیون آن مانند بتن معمولی به سادگی ممکن نیست. به همین دلیل درصد کربناسیون آن را باید با شاخص‌های بصری اندازه‌گیری کرد.

جهت انجام آزمایش کربناسیون، نمونه‌ها در محفظه‌ی کربناسیون با شرایط محیطی  $CO_2 = 5 \pm 0.5$  درصد، دمای  $T = 23 \pm 2$  درجه‌ی سانتی‌گراد و رطوبت نسبی  $R.H. = 55 \pm 15$  درصد به مدت ۳۰ روز قرار گرفته‌اند.

به منظور بررسی اثرات احتمالی مخلوط آب‌گریز در کربناسیون، طرح‌های اختلاطی به شرح جدول ۱ با ۰٫۵ و ۱ درصد ماده‌ی افزودنی آب‌گریز پیش‌بینی شده‌اند. آزمایش فنول‌فالتین مطابق جدول ۲ نشان داده است که مخلوط‌های حاوی مواد افزودنی آب‌گریز (به خصوص در مقدار مصرف ۱٪) از جنبه‌ی ممانعت از کربناسیون بتن متخلخل، عملکرد مطلوب‌تری داشته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، درصد کربناسیون در بتن‌های حاوی مواد افزودنی آب‌گریز، کمتر از طرح‌های اختلاط مشابهی است که فاقد این‌گونه مواد هستند. علت احتمالی این عملکرد، جلوگیری مواد آب‌گریز از نفوذ آب به داخل منافذ موئینه و کاهش سرعت انتشار گاز  $CO_2$  است.<sup>[۱۵]</sup> علاوه بر این، واکنش کربناسیون نیازمند وجود آب است که کاربرد مواد

۱ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر استفاده شده است. در برخی نمونه‌های بتن متخلخل از میلگردهای آج‌دار برای بررسی شرایط خوردگی آرماتور استفاده شده است. این میلگردها قبل از نصب در قالب با دوغاب سیمان پوشش داده شده‌اند. دوغاب سیمان با همان نسبت آب به سیمان مورد استفاده برای ساخت بتن متخلخل آماده شده است.

نمونه‌ها پس از گذشت ۲۴ ساعت از بتن‌ریزی و عمل‌آوری در دمای  $23 \pm 2$  درجه‌ی سانتی‌گراد و رطوبت نسبی بالای ۹۵٪ قالب‌برداری شده و پس از ۷ روز ننگه‌داری در حوضچه‌ی عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

#### ۳.۲. ویژگی‌های مصالح

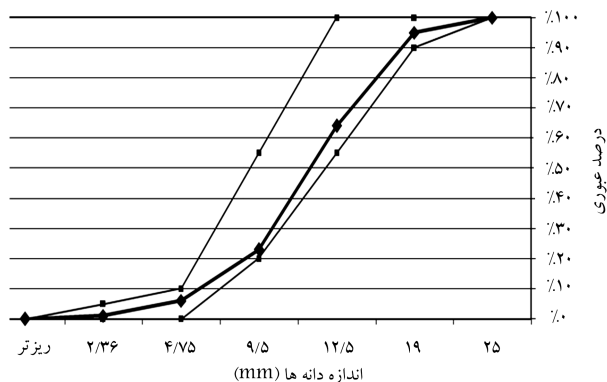
سیمان مصرفی از نوع پرتلند نوع II تولیدی کارخانه‌ی سیمان تهران بوده است. سنگ‌دانه‌های درشت مصرفی از معادن شهریار تهیه شده و بیشینه‌ی اندازه‌ی اسمی آن برابر ۱۹ میلی‌متر بوده است. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های درشت در شکل ۱ نشان داده شده است، که مطابق آن دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ی درشت کاملاً درون محدوده‌ی مجاز استاندارد ASTM C ۳۳<sup>[۱۶]</sup> قرار گرفته است. همچنین ماده‌ی آب‌گریز امولسیون سیلان آلکیل با مقدار جامد در محلول ۳۰٪ بوده است، که با مقادیر مختلف در مخلوط‌های بتنی استفاده شده است.

#### ۴.۲. طرح‌های مخلوط

در این پژوهش ابتدا خصوصیات چند مخلوط بتن متخلخل از نظر خواص مکانیکی و دوام (مانند مقاومت در برابر کربناسیون و جذب مویینگی آب) بررسی شده است، سپس اثر مخلوط آب‌گریز با مقادیر مصرف مختلف در ویژگی‌های مذکور بتن متخلخل آزمایش و در پایان، رفتار خوردگی میلگردها مقایسه شده است. طرح‌های مخلوط استفاده شده در این پژوهش شامل: ۱۲ مخلوط فاقد مواد آب‌گریز و ۵ مخلوط دارای مواد آب‌گریز بوده است، که هر کدام از طرح‌های مخلوط حاوی مواد آب‌گریز متناظر با یک طرح مخلوط فاقد مواد آب‌گریز است. ضمن اینکه ۱۲ مخلوط مذکور را می‌توان در ۴ دسته تقسیم‌بندی کرد، که نسبت آب به سیمان در هر دسته ثابت، ولی حجم خمیر سیمان در آنها متفاوت بوده است. نسبت آب به سیمان بتن‌های ساخته شده برابر ۰٫۳۵، ۰٫۳۸، ۰٫۴۲ و ۰٫۴۵ انتخاب شده است.

#### ۵.۲. روش آزمایش

پیشرفت کربناسیون با استفاده از آزمایش فنل فالتین انجام شده در سطح شکست



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی.

جدول ۱. طرح اختلاط، ضریب نفوذپذیری و مقاومت مخلوط‌های مختلف بتن متخلخل.

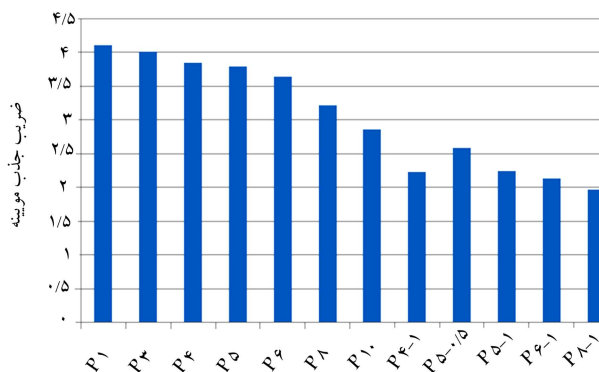
مقاومت مخلوط (MPa)	جرم حجمی (Kg/m <sup>3</sup> )	W/C	ضریب نفوذپذیری (Cm/s)	تخلخل (%)	ماده‌ی آب‌گریز (%)	شن	سیمان	آب	معرف
۸٫۵	۱۷۲۰	۰٫۴۵	۰٫۱۹	۲۸	-	۱۴۸۰	۱۸۵	۸۳	P۱
۱۰٫۳	۱۷۴۳	۰٫۴۵	۰٫۱۷	۲۶	-	۱۴۷۰	۲۱۰	۹۵	P۲
۱۲٫۷	۱۷۷۸	۰٫۴۵	۰٫۱۵	۲۴	-	۱۴۷۰	۲۴۵	۱۱۰	P۳
۹٫۳	۱۷۷۰	۰٫۴۲	۰٫۲۰	۲۹	-	۱۴۳۵	۲۰۵	۸۶	P۴
۱۲٫۲	۱۸۰۰	۰٫۴۲	۰٫۱۶	۲۵	-	۱۵۰۵	۲۱۵	۹۰	P۵
۱۵٫۶	۱۸۴۰	۰٫۴۲	۰٫۱۲	۲۰	-	۱۶۱۰	۲۳۰	۹۷	P۶
۱۳٫۷	۱۸۲۰	۰٫۳۸	۰٫۱۵	۲۴	-	۱۵۰۰	۲۵۰	۹۵	P۷
۱۸٫۱	۱۸۷۰	۰٫۳۸	۰٫۱۱	۱۹	-	۱۵۹۰	۲۶۵	۱۰۰	P۸
۲۲٫۸	۱۹۱۰	۰٫۳۸	۰٫۰۸	۱۵	-	۱۶۸۰	۲۸۰	۱۰۶	P۹
۱۶٫۷	۱۹۶۰	۰٫۳۵	۰٫۱۳	۲۱	-	۱۵۰۰	۳۰۰	۱۰۵	P۱۰
۲۱٫۳	۱۹۸۵	۰٫۳۵	۰٫۰۹	۱۷	-	۱۵۷۵	۳۱۵	۱۱۰	P۱۱
۲۴٫۳	۱۹۹۵	۰٫۳۵	۰٫۰۸	۱۵	-	۱۶۲۵	۳۲۵	۱۱۴	P۱۲
۱۰٫۱	۱۷۷۰	۰٫۴۲	۰٫۱۷	۲۶	۱	۱۴۹۱	۲۱۳	۹۰	P۴-۱
۱۲٫۹	۱۸۰۰	۰٫۴۲	۰٫۱۵	۲۴	۰٫۵	۱۵۲۶	۲۱۸	۹۲	P۵-۰٫۵
۱۳٫۸	۱۸۰۰	۰٫۴۲	۰٫۱۴	۲۳	۱	۱۵۵۴	۲۲۲	۹۳	P۵-۱
۲۰٫۳	۱۸۴۰	۰٫۴۲	۰٫۰۹	۱۷	۱	۱۶۶۶	۲۳۸	۱۰۰	P۶-۱
۲۲٫۸	۱۸۷۰	۰٫۳۸	۰٫۰۸	۱۶	۱	۱۶۴۴	۲۷۴	۱۰۴	P۸-۱

جدول ۲. درصد کربناسیون مخلوط‌های مختلف.

معرف مخلوط	درصد کربناسیون	معرف مخلوط	درصد کربناسیون	معرف مخلوط	درصد کربناسیون
P۱	۵۵	P۷	۵۶	P۱۱	۶۱
P۲	۵۶	P۸	۴۶	P۱۲	۵۰
P۳	۴۷	P۹	۳۷		
P۴	۴۱	P۱۰	۴۹		
P۵	۳۶	P۱۱	۴۱		
P۶		P۱۲	۳۲		

جدول ۳. ضریب جذب مویینه‌ی مخلوط‌های مختلف (mg/cm<sup>2</sup>s<sup>1/2</sup>).

معرف مخلوط	ضریب جذب مویینه	معرف مخلوط	ضریب جذب مویینه
P۱	۲٫۸۶	P۱۰	۴٫۱۱
P۳	۲٫۲۳	P۴-۱	۴٫۰۱
P۴	۲٫۵۸	P۵-۰٫۵	۳٫۸۵
P۵	۲٫۲۵	P۵-۱	۳٫۷۹
P۶	۲٫۱۴	P۶-۱	۳٫۶۴
P۸	۱٫۹۷	P۸-۱	۳٫۲۱



شکل ۲. نمودار ضریب جذب مویینه‌ی مخلوط‌های مختلف (mg/cm<sup>2</sup>s<sup>1/2</sup>).

ذکرشده، مقدار آب موجود در منافذ مویینه را به شدت کاهش می‌دهد. ضمن اینکه همان‌طور که از مقایسه‌ی مخلوط‌های مختلف قابل مشاهده است، کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش حجم خمیر سیمان نیز می‌تواند موجب کاهش کربناسیون بتن شود.

### ۳.۳. جذب آب مویینه

زمانی که سرعت کربناسیون بتن متخلخل زیاد است، پوشش لایه‌ی انفعالی روی فولاد مدفون با توجه به کاهش pH، نمی‌تواند از خوردگی فولاد ممانعت کند. اگر خمیر سیمان اطراف میلگرد خشک باشد، سرعت خوردگی آن قابل اغماض است.<sup>[۱۶]</sup> از این رو بررسی مقدار جذب مویینه‌ی بتن متخلخل در هنگام تماس با آب بسیار مهم است.

نتایج حاصل از آزمایش جذب مویینه‌ی بتن‌های متخلخل مختلف در جدول ۳ و شکل ۲ ارائه شده است. این آزمایش بر روی ۱۲ مخلوط از ۱۷ مخلوط این

بازرسی چشمی قرار گرفته‌اند، که براساس آن، خوردگی در میلگردهای موجود در نمونه‌های P5 و P8 در زمان شکسته‌شدن قابل رؤیت بوده است.

#### ۴. بحث و جمع‌بندی

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، تمام مخلوط‌های بتن متخلخل مورد مطالعه در این پژوهش حساسیت زیادی به کربن‌سیون داشته‌اند، که این حساسیت به واسطه‌ی ساختار متخلخل این بتن ایجاد شده است. کاربرد مواد افزودنی آب‌گریز اگرچه تأثیر چندانی در ساختار بتن متخلخل نداشته است، اما به دلیل کاهش درصد اشباع منافذ مویینه و همچنین کاهش سرعت انتشار گاز CO<sub>2</sub>، توانسته‌اند روند کربن‌سیون بتن را کند کنند. این رفتار را می‌توان در نتایج جدول ۲ مشاهده کرد. در هر حال روند کربن‌سیون لایه‌ی انفعالی اطراف میلگرد در بتن متخلخل نسبت به بتن معمولی به واسطه‌ی تخلخل بالای بتن و ضخامت کم اندود سیمان دور میلگرد سریع‌تر است. براساس نتایج این پژوهش، فقط مواد افزودنی آب‌گریز می‌توانند روند کربن‌سیون را در بتن متخلخل کند کنند.

از طرفی همان‌طور که در جدول ۳ و شکل ۲ مشاهده می‌شود، استفاده از مواد آب‌گریز می‌تواند با کاهش خاصیت چسبندگی بین آب و جداره‌ی لوله‌های مویینه، ضریب جذب مویینه‌ی بتن را نیز کاهش دهند. به همین دلیل، احتمال وجود آب که یکی از الزامات ایجاد خوردگی میلگرد است، نیز کاهش یافته است. از سوی دیگر (مطابق شکل ۲)، کاهش نسبت آب به مواد سیمانی و افزایش حجم خمیر سیمان نیز عواملی هستند که می‌توانند باعث کاهش ضریب جذب مویینه‌ی بتن شوند. اگرچه تأثیر کاربرد مواد افزودنی آب‌گریز در کاهش ضریب جذب مویینه‌ی بتن متخلخل بسیار بیشتر از سایر معیارها بوده است.

با توجه به دلایل ذکر شده به نظر می‌رسد روند آغاز خوردگی در مخلوط‌هایی که حاوی مواد افزودنی آب‌گریز هستند، کندتر از مخلوط‌های فاقد آن بوده است (شکل ۳). به عبارتی، مخلوط‌های حاوی مواد افزودنی آب‌گریز در مقدار مصرف ۱٪ تا سن ۹۰ روز هیچ‌گونه افزایش ناگهانی در پتانسیل خوردگی از خود نشان نداده‌اند، ضمن اینکه مقدار بیشینه‌ی این پتانسیل در حدود ۱۳۰- میلی‌ولت بوده است. تغییر این موضوع، احتمال ناچیز آغاز خوردگی در میلگرد آن است، حال آنکه خوردگی در مخلوط‌های فاقد مواد افزودنی آب‌گریز با احتمال بالای ۹۰٪ آغاز شده است. در شکل ۴، نمودار ضریب جذب مویینه در برابر پتانسیل خوردگی ۹۰ روزه‌ی میلگرد مخلوط‌های مختلف بتن متخلخل نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه

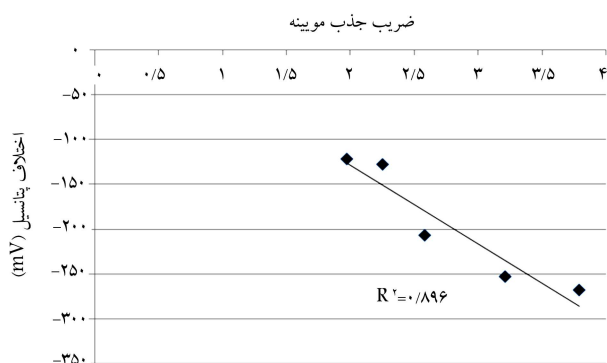
پژوهش انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد وجود مواد افزودنی آب‌گریز به‌طور قابل توجهی منجر به کاهش جذب مویینه شده است. ضریب جذب مویینه در مخلوط‌های حاوی مواد آب‌گریز به‌طور متوسط حدود ۴۰٪ کمتر از مخلوط‌های مشابه فاقد مواد آب‌گریز بوده است.

پس از این معیار، مهم‌ترین معیار اثرگذار در مقدار جذب آب مویینه در بتن‌های معمولی نسبت آب به سیمان است، که این اثر در نتایج مشاهده می‌شود. مثلاً مخلوط‌های P1 و P3، نسبت آب به سیمان بیشتری نسبت به سایر مخلوط‌ها داشته‌اند و لذا، ضریب جذب مویینه‌ی آن‌ها نیز از سایر مخلوط‌ها بیشتر بوده است. اما همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود، تأثیر کاربرد مواد آب‌گریز در کاهش ضریب جذب مویینه بسیار بیشتر از نسبت آب به سیمان است. ضمن اینکه از مقایسه‌ی مخلوط‌های P4، P5 و P6 مشخص می‌شود که هر چه مقدار خمیر سیمان افزایش یابد، مقدار ضریب جذب مویینه‌ی بتن کمتر خواهد شد.

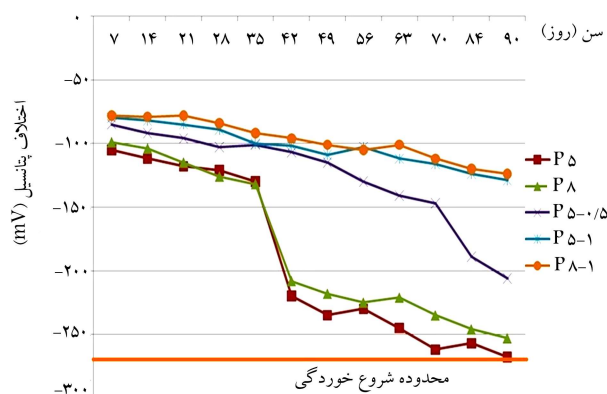
#### ۴.۳. رفتار خوردگی

آزمایش پتانسیل خوردگی روی مخلوط‌های P5، P8، P5-0/5، P5-1 و P8-1 انجام شده است. در تمامی نمونه‌های مذکور، میلگرد مدفون، یک لایه‌ی نازک از خمیر سیمان به‌عنوان اندود داشته است. عمل‌آوری نمونه‌های ذکر شده به مدت ۱ هفته در حوضچه‌ی عمل‌آوری با دمای  $23 \pm 2$  درجه‌ی سانتی‌گراد انجام و نتایج آزمایش به مدت ۹۰ روز ثبت شده‌اند (شکل ۳). در نمونه‌های فاقد مواد آب‌گریز پس از گذشت ۶ هفته، افت شدیدی در پتانسیل خوردگی مشاهده شده است، که نشانه‌ی آغاز احتمالی خوردگی در میلگرد است. حال آنکه اغلب مخلوط‌های حاوی مواد آب‌گریز، چنین افتی را تا سن ۹۰ روز نداشته‌اند. تنها مخلوطی که با وجود داشتن مواد آب‌گریز، افت شدید اختلاف پتانسیل در آن مشاهده شده است، مخلوط P5-0/5 است، که این افت شدید در هفته‌ی دوازدهم در آن مشاهده شده است؛ اگرچه پتانسیل خوردگی در این مخلوط در پایان ۹۰ روز، دست‌کم ۲۵٪ کمتر از مخلوط‌های فاقد مواد آب‌گریز بوده است. تأثیر نسبت آب به سیمان را در مقایسه‌ی مخلوط‌های P5 و P8 و همچنین P5-1 و P8-1 می‌توان مشاهده کرد. همان‌طور که مشخص است، در بتن متخلخل حاوی میلگرد، نسبت آب به سیمان به واسطه‌ی ضخامت کم ملات اندود روی میلگرد، اثر قابل توجهی در تغییر رفتار خوردگی میلگرد نداشته است.

نمونه‌های حاوی میلگرد در انتهای آزمایش شکسته شده و میلگردها مورد



شکل ۴. رابطه‌ی ضریب جذب مویینه و اختلاف پتانسیل ۹۰ روزه‌ی مخلوط‌های مختلف.



شکل ۳. اختلاف پتانسیل ثبت‌شده‌ی مخلوط‌های مختلف.

جذب مویینه، بسیار بیشتر از نسبت آب به سیمان است. در این بتن افزایش حجم خمیر سیمان نیز تأثیر اندکی در کاهش ضریب جذب مویینه داشته است. ۳. استفاده از مواد آب‌گریز می‌تواند با کاهش خاصیت چسبندگی بین آب و جداری لوله‌های مویینه، ضریب جذب مویینه آب را کاهش دهد. به همین دلیل با کاربرد مواد افزودنی آب‌گریز، احتمال وجود آب که یکی از الزامات ایجاد خوردگی میلگرد است، نیز کاهش می‌یابد.

۴. با توجه به نتایج، روند آغاز خوردگی در مخلوط‌هایی که حاوی مواد افزودنی آب‌گریز هستند، کندتر از مخلوط‌های فاقد آن است. مخلوط‌های حاوی مواد افزودنی آب‌گریز در مقدار مصرف ۱٪ تا سن ۹۰ روز، هیچ‌گونه افزایش ناگهانی در پتانسیل خوردگی را از خود نشان نداده‌اند، ضمن اینکه مقدار بیشینه این پتانسیل در حدود ۱۳۰- میلی‌ولت بوده است. تعبیر این موضوع، احتمال ناچیز آغاز خوردگی در میلگرد آن است، حال آنکه خوردگی در مخلوط‌های فاقد این مواد در سنین بالای ۶ هفته با احتمال بالای ۹۰٪ آغاز شده است.

۵. از مقایسه ضریب جذب مویینه و پتانسیل خوردگی ۹۰ روزهی میلگردهای موجود در طرح‌های بتن متخلخل مشخص شده است که رابطه‌ی خطی بین ضریب جذب مویینه و پتانسیل خوردگی ۹۰ روزهی میلگردهای موجود در این طرح‌ها وجود دارد. به عبارت دیگر، افزایش ضریب جذب مویینه در بتن، موجب افزایش پتانسیل خوردگی ۹۰ روزه در میلگردهای موجود در بتن متخلخل خواهد شد. علت این موضوع سهولت حرکت محلول موجود در منافذ بتن و به تبع آن سهولت جابه‌جایی یون  $\text{OH}^-$  در بتن است، که یکی از عوامل ضروری برای شروع فرایند خوردگی میلگرد است.

### تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه پیام نور انجام شده است، لذا در اینجا از این کمک‌قدردانی و تشکر می‌شود.

می‌شود، ضریب جذب مویینه‌ی بتن با پتانسیل خوردگی میلگرد، یک رابطه‌ی نسبتاً خطی دارد. به عبارت دیگر، افزایش ضریب جذب مویینه در بتن، موجب افزایش پتانسیل خوردگی ۹۰ روزه در میلگردهای موجود در بتن خواهد شد. چرا که افزایش ضریب جذب مویینه به معنای سهولت حرکت مایع درون بتن است و محلول موجود در منافذ بتن در فرایند خوردگی نقش الکترولیت را دارد. به عبارتی دیگر، جابه‌جایی یون  $\text{OH}^-$  در فرایند خوردگی میلگرد از طریق محلول منافذ انجام می‌شود، که افزایش ضریب جذب مویینه می‌تواند موجب تسهیل جابه‌جایی مذکور شود.

### ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مخلوط‌های مختلفی از بتن متخلخل با نسبت آب به سیمان، حجم خمیر سیمان و درصد مواد افزودنی آب‌گریز متفاوت ساخته و روی آن‌ها، آزمایش کربناسیون، تعیین ضریب جذب مویینه، و پتانسیل خوردگی انجام شده است. نتایج حاصل از پژوهش حاضر به این شرح است:

۱. درصد کربناسیون در بتن‌های حاوی مواد افزودنی آب‌گریز، کمتر از طرح‌های اختلاط مشابهی است که فاقد مواد مذکور هستند. علت احتمالی این رفتار، جلوگیری مواد آب‌گریز از نفوذ آب به داخل منافذ مویینه و کاهش سرعت انتشار گاز  $\text{CO}_2$  است. ضمن اینکه در صورت عدم وجود آب در منافذ مویینه، حتی در حضور گاز  $\text{CO}_2$  با غلظت بالا، باز هم واکنش کربناسیون اتفاق نمی‌افتد.

۲. ضریب جذب مویینه در مخلوط‌های حاوی مواد آب‌گریز به طور متوسط حدود ۴۰٪ کمتر از مخلوط‌های مشابه فاقد مواد آب‌گریز بوده است. مهم‌ترین معیار اثرگذار در مقدار جذب آب مویینه در بتن‌های معمولی نسبت آب به سیمان است، که این اثر در بتن متخلخل به واسطه‌ی ضخامت کم لایه‌ی خمیر سیمان روی میلگرد، ناچیز است. در مقابل، تأثیر کاربرد مواد آب‌گریز در کاهش ضریب

### منابع (References)

- Neville, A.M., *Properties of Concrete*, Longman Group Limited, Harlow, Essex, UK (1995).
- Meininger, R.C. "No-fines pervious concrete for paving", *Concrete International*, pp. 20-27 (August 1988).
- ACI 522R-10, *American Concrete Institute*, Report on Pervious Concrete (2010).
- Jing, Y. and Guoliang, J. "Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials", *Cement and Concrete Research*, **33**(3), pp. 381-386 (2003).
- Kevern, J.T., Schaefer, V.R., Wang, K. and Suleiman, M.T. "Pervious concrete mixture proportions for improved freeze-thaw durability", *Journal of ASTM International*, **5**(2), pp.115-122 (2008).
- Kevern, J.T., Wang, K. and Schaefer, V.R. "Effect of coarse aggregate on the freeze-thaw durability of pervious concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **22**(5), pp. 469-475 (2010).
- Vancura, M., MacDonald, K. and Khazanovich, L. "Microscopic analysis of paste and aggregate distresses in pervious concrete in a wet, hard freeze climate", *Cement and Concrete Composite*, **33**(10), pp. 1080-1085 (2011).
- Chindaprasirt, P., Hatanaka, S., Chareerat, T., Mishima, N. and Yuasa, Y. "Cement paste characteristics and porous concrete properties", *Construction and Buildings Materials*, **22**(5), pp. 894-901 (2008).
- Corrosion in Reinforced Concrete Structures*, Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland, Woodhead Publishing (2005).
- Alonso, C., Andrade, C. and Gonzalez, J.A. "Relation between resistivity and corrosion rate of reinforce-

- ments in carbonated mortar made with several cement types”, *Cement and Concrete Research*, **18**(5), pp. 687-698 (1988).
11. Page, C.L. and Page, M., *Durability of Concrete and Cement Composites*, Woodheart Publishing limited, Cambridge (2007).
  12. ASTM C33, *Standard Specification for Concrete Aggregates* (2013).
  13. BS EN 14630, *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures* (2006).
  14. ASTM C1585, *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes* (2013).
  15. Basheer, P.A.M., Basheer, L., Cleland, D.J. and Long, A.E. “Surface treatments for concrete: Assessment methods and reported performance”, *Construction and Buildings Materials*, **11**(7-8), pp. 413-429.
  16. Tittarelli, F. and Moriconi, G. “The effect of silane-based hydrophobic admixture on corrosion of galvanized reinforcing steel in concrete”, *Corrosion Sci.*, **52**(9), pp. 2958-2963 (2010).