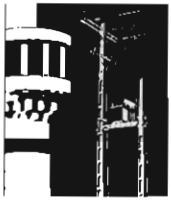


پنجمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق

استفاده از روکش نفوذی گوگرد در تیرهای بتنی شبکه‌های توزیع برای افزایش دوام و عمر آنها

کمال میرطلائی فرید عرب‌زاده
دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده:

بتن به عنوان یکی از پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی در بخش صنایع ساختمان و بناهای صنعتی از جمله خطوط توزیع برق می‌باشد، و بنابراین توجه به کیفیت آن به عنوان یک ضرورت مطرح است. یکی از ملاکهای سنجش مرغوبیت بتن دوام و پایائی آن است و نفوذپذیری به عنوان یکی از خواص بتن از جمله پارامترهای اساسی مؤثر در دوام این ماده می‌باشد. بر همین اساس در این تحقیق با توجه به موارد قبلی استفاده از گوگرد در بتن و قیمت ارزان و تولید بالای آن به عنوان محصول ثانویه پالایشگاهها، با در نظر گرفتن متغیرهای مختلف در تهیه نمونه‌ها، با استفاده از گوگرد مذاب یک لایه روکش نفوذی روی قطعات بتنی به منظور کاهش نفوذپذیری آنها ایجاد گردید. سپس شرایط محیطهای مخربی که در عمل ممکن است برای قطعات بتنی از جمله تیرهای بتنی توزیع برق اتفاق بیافتد، برای بررسی جنبه‌های مختلف دوام بتن با روکش نفوذی گوگرد مهیا شد. نتایج آزمایشات انجام شده کیفیت مناسب رفتار این نوع بتن را در مجاورت محیطهای مخرب نشان می‌دهد.

شرح مقاله:

در حال حاضر تعداد زیادی از تیرهای شبکه‌های توزیع به صورت بتن پیش‌ساخته می‌باشند. استفاده از این تیرها از دو سه دهۀ اخیر شروع گردیده است. یکی از مسائل عمده در ارتباط با این تیرها، خرابی و فساد زود رس در آنها بوده که در سالهای اخیر در سطح وسیعی از کشور مشاهده شده و توجه تعدادی از محققین را بخود معطوف نموده است. در یک تحقیق قبلی در این زمینه با همکاری برق منطقه‌ای اصفهان، علل کلی این خرابی‌ها مشخص گردید و برای جلوگیری از این خرابی‌ها، کاهش نفوذپذیری بتن به عنوان یکی از راههای اساسی پیشنهاد شده است. این خواسته با دقت در طرح مخلوط بتن و ایجاد کوبیدگی کامل با ایجاد یک بتن توپر میسر است لیکن از آنجا که در عمل نیل به این هدف با وسائل و امکانات و مواداولیه موجود به طور مطلوب امکان‌پذیر نیست، اعمال پوشش‌های محافظ بر روی سطح تمام شدۀ بتن به عنوان راه حل بعدی پیشنهاد گردیده است. مواد پوششی مؤثر موجود از قبیل چسبهای اپوکسی، پلیمرها و رنگهای مخصوص مبنای خارجی داشته و عموماً از قیمتهای بالائی برخوردارند.

تحقیق حاضر با توجه به تجارب موجود مربوط به استفاده از گوگرد در بتن انجام گرفته است. گوگرد یکی از مواد فراوان و ارزان قیمت موجود در کشور و از محصولات ثانویه پالایشگاهها می‌باشد. گوگرد می‌تواند به صورتهای جایگزینی کامل با سیمان و یا به صورت نفوذی بر روی سطح بتن معمولی بکار رود.

در این تحقیق تجربی، نمونه‌های آزمایشی بتن در داخل گوگرد مذاب (با دمای حدود ۱۲۰ درجه سانتیگراد) به مدت معینی مستغرق شدند بطوری که گوگرد تا عمق مشخصی به داخل آن نفوذ نماید. این روکش نفوذی باعث گردید که نفوذپذیری بعدی بتن بطور چشمگیری کاهش یابد. برای اینکه دوام این بتن در مقابل شرایط مخرب مختلف مشخص گردد، این شرایط به صورت تسریع شده در آزمایشگاه آماده و نمونه‌های بتنی آزمایشی در معرض آنها واقع گردیدند.

شرایط مخرب که در عمل تیرهای بتنی تحت آنها قرار دارند عبارتنداز: حملۀ سولفاتی به بتن، یخزدگی متناوب، نفوذ گاز کربنیک و کربناسیون بتن، حملۀ کلروری و خوردگی میلگردهای داخل بتن. آزمایشات تسریع شدۀ مذکور بر روی نمونه‌های با روکش گوگرد و نیز بطور مشابه بر روی نمونه‌های معمولی (شاهد) و در طول یک پروسۀ زمانی حدود ۶ ماه انجام گرفت. پس از اتمام طول دورۀ آزمایش، عمق نفوذ مواد مخرب مختلف، مقاومتهای فشاری و

کششی و سایر خواص فیزیکی و شیمیائی نمونه‌ها مورد بررسی واقع شدند. نتایج حاصله از این تحقیق مبین این است که روکش نفوذی گوگرد باعث بهبود کیفیت بتن در کلیهٔ شرایط مخرب مذکور می‌گردد. در این راستا کاهش عمق نفوذ گاز کربنیک و یونهای کلروری، افزایش دوام نمونه‌ها در مقابل یخ زدن‌های متوالی و تأخیر در زمان شروع خوردگی میلگرد را می‌توان نام برد. با توجه به اینکه پایه‌های بتنی شبکه‌های توزیع به صورت پیش‌ساخته می‌باشند عمل نفوذدهی گوگرد مذاب به بتن (در قسمتهای مجاور زمین تیر) با هزینهٔ قابل قبول و در مرحلهٔ انتهائی خط تولید این تیرها امکان‌پذیر است.

۱ ـ مقدمه :

مصرف بسیار بالا و روزافزون بتن در احداث ساختمانها و خطوط توزیع برق، لزوم توجه به دوام آن را مشخص می‌کند. اهمیت مسئله دوام بتن موجب شده که در کشورهای بزرگ صنعتی از جمله کانادا و آمریکا، مؤسسات تحقیقاتی معتبری در این زمینه به تحقیقات و برگزاری کنفرانسهای بین‌المللی اقدام کنند، همچنین انستیتو بتن آمریکا (ACI) با مد نظر قرار دادن اهمیت موضوع دوام بتن در تجدید نظر سالهای 1989 و 1992 آئین‌نامه طراحی ساختمانهای بتن‌آرمه، فصول ۴ و ۵ را به گونه‌ای بازنگری کرده که طراح قبل از تعیین مقاومت و یا پوشش محافظ آرماتورها، ضوابط پایائی و دوام بتن را در نظر بگیرد. این در حالی است که در ایران به دلیل عدم توجه به ملاحظات مرتبط بادوام و پایائی بتن، شاهد خسارات مالی زیادی ناشی از تخریب ابنیه بتنی در زمانی قبل از عمر مفید در نظر گرفته شده برای آنها می‌باشیم.

در بررسی دوام بتن چندین پارامتر مؤثر مشخص می‌گردد که در بین آنها نفوذپذیری بتن نقش اساسی دارد، این به لحاظ آن است که چون حمله موادمخرب در داخل جرم بتن انجام می‌شود، عوامل مهاجم باید قادر به نفوذ به داخل جرم بتن باشند و بتن نیز نفوذپذیر باشد. با توجه به این موضوع روشها و موادمتنوعی به منظور کاهش نفوذپذیری بتن از طرف محققین مختلف بکار گرفته شده است، از جمله استفاده از موادمضاف در طرح مخلوط بتن مانند انواع پلیمرها و مواد پوزالانی و یا استفاده از روکشهای چسب اپوکسی، رنگ و پلیمرهای مختلف. اجرای روکشهای نفوذی موادپلیمری روی سیمان پرتلند که به آن اصطلاحاً PIC گفته می‌شود، از آغاز دهه 1960 مورد آزمایش قرار گرفت ولی به لحاظ هزینه بالای تولید آن مصرف عملی پیدا نکرد، تا اینکه از سال 1974 در کانادا و توسط مالهوترا به منظور رسیدن به روشی اقتصادی برای افزایش دوام بتن، تحقیقاتی روی بتن ساخته شده از گوگرد و یا بتن با گوگرد نفوذی

انجام گرفت.

در این تحقیق با تدارک آزمایشات تسریع شده متنوع که در آنها نمونه‌های بتنی با روکش نفوذی گوگرد تحت حمله موادمضر از جمله حمله سولفاتها، نفوذ یون کلر، سیکلهای متناوب یخ زدن و ذوب شدن و نفوذ گاز CO_2 قرار گرفتند، جنبه‌های مختلف دوام بتن با روکش نفوذ گوگرد، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج این مطالعات در ادامه آمده است.

۲ ـ تهیه نمونه‌های بتنی با روکش نفوذی گوگرد :

به منظور تهیه بتنهای با روکش نفوذی گوگرد، در ابتدا نمونه‌های بتنی با نسبتهای مختلف آب به سیمان و زمان عمل‌آوری مرطوب بتن، ساخته شد. بدین ترتیب که با انتخاب سه حالت برای نسبت آب به سیمان، ۰/۵۵، ۰/۶۵ و ۰/۸۵ و زمانهای ۷ روز، ۲۱ روز و ۲۸ روز برای عمل آوردن قطعات، نمونه‌های متعددی حاصل شد. این متغیرها به منظور حصول بتنهای با نفوذپذیری متفاوت انتخاب گردیدند، چرا که نسبت W/C و زمان عمل آوردن بتن عوامل اساسی در میزان نفوذپذیری بتن هستند و با افزایش نسبت آب به سیمان و کاهش زمان عمل‌آوری بتن، نفوذپذیری بتن افزایش می‌یابد. ابعاد نمونه‌های بتنی به منظور مدل کردن شرایط نفوذ یون کلر، نفوذ گاز CO_2 و سیکلهای متناوب یخ زدن و ذوب شدن، مکعبهای ۷ سانتیمتری بود که طرح مخلوط آنها مطابق جدول ۱ می‌باشد. همچنین جهت مدل کردن محیطهای با غلظت بالای یونهای سولفات، نمونه‌های پاپیونی شکل تدارک دیده شد که دانه‌بندی آنها مطابق جدول ۲ می‌باشد.

با تهیه نمونه‌های بتنی با سیمان پرتلند نوع I و نگهداری از آنها در زمانهای ذکر شده در بالا، بایستی به طریقی روکش نفوذ گوگرد روی آنها اعمال می‌شد، که این پروسه با استفاده از یک دستگاه گوگردگری استوانه‌ای شکل و تحت شرایط فشار محیط انجام گرفت. در جدول ۳ پاره‌ای از خواص فیزیکی گوگرد ارائه شده و مشاهده می‌شود که با افزایش دمای گوگرد در حالت مذاب، ویسکوزیته آن کاهش می‌یابد. در این مرحله با توجه به یک سری مشاهدات اولیه، زمان لازم برای گوگردگری هر نمونه، ۹۰ دقیقه تعیین شد، به این صورت که نمونه‌های بتنی به مدت ۹۰ دقیقه در داخل گوگرد مذاب با دمای $125^{\circ}C$ قرار داده شدند. عمق نفوذ گوگرد در داخل این نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه گردیده است.

۳ ـ آزمایشات تسریع شده :

نمونه‌های بتنی با روکش نفوذی گوگرد تهیه شدند تا رفتار آنها در محیطهای مخرب برای

بتن بررسی شود. چون واکنش این موادمخرب با بتن در حالت طبیعی از سرعت پائینی برخوردار است و از چند ماه تا چند سال ممکن است طول بکشد، تدارک آزمایشات تسریع شده برای انجام مطالعات آزمایشگاهی ضروری است. بدین منظور با استفاده از استاندارد صنعتی ژاپن (JIS) آزمایش تسریع شده نفوذ یون کلرو با بهره‌گیری از استاندارد ASTM آزمایش سیکلهای متناوب یخ زدن و ذوب شدن و حمله سولفاتی تنظیم گردیدند. همچنین کیفیت رفتار نمونه‌های بتنی با روکش نفوذی گوگرد و مقایسه آن با نمونه‌های معمولی در مقابل نفوذ گاز CO_2، با آزمایشی که در آزمایشگاه بتن دانشگاه صنعتی اصفهان تدارک دیده شد، مورد ارزیابی قرار گرفت. خلاصه‌ای از این آزمایشات به شرح زیر است:

۱ـ۳ـ آزمایش نفوذیون کلر :

در این آزمایش نمونه‌های با روکش و نمونه‌های شاهد، به مدت ۱۴ روز در محلول ۲/۵٪ نمک طعام خالص و آب مقطر $۲۰^{\circ}C$ قرار گرفتند و بعد از طی این دوره، نمونه‌ها از محلول بیرون آورده شدند و به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد، به منظور تبخیر آب درون نمونه‌ها قرار گرفتند. پس از آن نمونه‌ها در زیر دستگاه پرس به ۲ نیم شده و با استفاده از محلولهای معرف فلوئورسین و نیترات نقره، میزان نفوذ کلر در نمونه‌ها مشخص گردید. نتایج این آزمایشات در شکل ۱ ارائه گردیده است.

۲ـ۳ـ آزمایش سیکلهای متناوب یخ زدن و ذوب شدن :

اجرای سیکلهای متناوب یخ زدن و ذوب شدن آب موجود در بتن یکی از آزمایشات استاندارد برای ارزیابی کیفیت بتن می‌باشد. این آزمایش به این صورت انجام شد که در نیم سیکل یخ زدن، نمونه‌ها به مدت حداقل ۲/۵ ساعت در داخل فریزر با دمای $۱/۷^{\circ}C \pm ۱۷/۸-$ قرار گرفتند و نیم سیکل ذوب شدن با قرار دادن نمونه‌ها به مدت ۴۵ دقیقه در آب مقطر با دمای $۱/۷^{\circ}C \pm ۴/۴+$ صورت پذیرفت. به منظور ارزیابی کیفیت نمونه‌ها در این آزمایش، در دو مرحله اقدام به تعیین میزان جذب آب نمونه‌های مکعبی با روکش نفوذی و نمونه‌های شاهد گردید. بدین ترتیب که برای اولین مرتبه قبل از اجرای سیکلهای یخ زدن و ذوب شدن، آزمایش جذب آب صورت گرفته و همچنین پس از ۵۰ سیکل یخ زدن و ذوب شدن، این آزمایش انجام پذیرفت. آزمایش تعیین جذب آب نیز براساس استاندارد JIS انجام گرفت، بدین صورت که نمونه‌ها را به مدت ۲۴ ساعت در دمای $۸۰^{\circ}C$ خشک کرده و وزنشان اندازه گرفته می‌شود. سپس نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آب مقطر

$20^{\circ}C$ قرار داده شد و بلافاصله پس از بیرون آوردن نمونه‌ها از آب و گرفتن آب سطح خارجی نمونه‌ها، آنها را مجدداً وزن می‌کنند تا میزان جذب آب مشخص شود. نتایج این آزمایشات در شکلهای ۲ و ۳ ارائه شده است.

۳ـ۳ـ آزمایش نفوذ گاز CO_2:

به منظور مقایسه بین بتن با روکش گوگردی و بتن شاهد (بتن معمولی با سیمان پرتلند نوع I) هنگامی که تحت نفوذ گاز CO_2 قرار می‌گیرند، آزمایش تسریع شده‌ای به شرح زیر ترتیب داده شد. بدین صورت که نمونه‌های با روکش گوگردی و نمونه‌های شاهد در یک دستگاه اتوکلاو قرار داده شدند و کپسول گاز کربنیک به این دستگاه نصب گردید. نمونه‌ها در محفظه سر بسته اشباع از CO_2 تحت فشار ۱/۵ اتمسفر و به مدت ۲۸ روز قرار گرفته و پس از پایان این مدت، نمونه‌ها زیر دستگاه پرس به ۲ نیم شدند، که با اسپری کردن معرف فنل فتالئین عمق نفوذ گاز CO_2 تشخیص داده شد. نتایج این آزمایشات در شکل ۴ ارائه شده است.

۴ـ۳ـ آزمایش حمله سولفاتها:

برای انجام این آزمایشات، نمونه‌های پاپیونی شکل مطابق با استاندارد ASTMC190 ساخته شدند که پس از غرق نمودن آنها در داخل گوگرد مذاب و ایجاد روکش نفوذی گوگرد روی آنها، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در محلول ۰/۱۵ مولار سولفات سدیم قرار گرفتند. طبق آزمایشات انجام گرفته توسط پروفسور نویل، معیار مقاومت نمونه‌ها در برابر سولفاتها مقاومت کششی نمونه‌های پاپیونی شکل می‌باشد. بر همین اساس، مقاومت کششی نمونه‌ها قبل و پس از قرار گرفتن در محیط سولفاتی اندازه‌گیری شد و میزان کاهش این مقاومت به عنوان معیار تأثیر سولفاتها روی نمونه‌ها در نظر گرفته شد. نتایج این آزمایشات در جدول ۵، و شکلهای ۵ و ۶ ارائه گردیده است.

۴ـ بحث و نتیجه‌گیری:

۱ـ۴ـ شکل ۱ مقایسه‌ای بین نتایج آزمایش نفوذیون کلر برای نمونه‌های شاهد (O.P.C) و نمونه‌های با روکش گوگردی (O.P.C+S) می‌باشد. همان گونه که مشاهده می‌شود در این شکل برای زمانهای عمل آوردن مرطوب مختلف، منحنی تغییرات عمق نفوذیون کلر در داخل نمونه‌ها برحسب نسبت W/C نمونه‌های بتنی رسم گردیده است. این شکل نشان‌دهندهٔ این است که برای بتنهای با روکش گوگردی، عمق نفوذ کلر نسبت به W/C (قبل از گوگردگری)

تقریباً بطور خطی و با شیب کم می‌باشد، لیکن در مورد بتن بدون روکش این تغییرات غیرخطی بوده و عمق نفوذ کلر نسبت به تغییرات W/C بتن خیلی حساس‌تر است. علت این امر این است که در بتن با روکش نفوذی گوگرد با هر نسبت W/C (هر چند بزرگ) چون خلل و فرجها پر شده‌اند، بتن حاصله از نظر نفوذپذیری تقریباً یکسان خواهد بود و بنابراین تفاوت عمده‌ای در عمق نفوذ کلر مشاهده نمی‌گردد. این مطلب بیانگر آن است که روکش نفوذی گوگرد می‌تواند بتنهای با اجرای بد (تخلخل زیاد) را به خوبی بهبود بخشیده و دوام آن را افزایش دهد. همچنین از روی این شکل مشخص می‌شود که تأثیر زمان عمل آوردن مرطوب قطعات بتنی قبل از گوگردگری، بر عمق نفوذ کلر در بتن با روکش گوگردی قابل توجه نیست در حالی که در نمونه‌های شاهد تفاوت قابل ملاحظه‌ای مشاهده می‌گردد. با توجه به این مطلب می‌توان به دنبال مقادیری اپتیمم برای نسبت W/C و زمان عمل‌آوری مرطوب بود.

۲ ـ ۴ ـ شکلهای ۲ و ۳ مقایسه‌ای بین درصد آب جذب شده برای نمونه‌های شاهد (O.P.C) و نمونه‌های با روکش نفوذی گوگرد (O.P.C+S) قبل و پس از انجام سیکلهای متناوب یخ زدن و ذوب شدن می‌باشد. نتایج این قسمت حاکی از کاهش حداقل ۵۰٪ در میزان جذب آب نمونه‌های با روکش گوگردی نسبت به نمونه‌های شاهد، پس از انجام ۵۰ سیکل یخ زدن و ذوب شدن، می‌باشد. همچنین در این شکلها مشاهده می‌شود که گرادیان جذب آب برحسب نسبت آب به سیمان به خصوص بعد از نسبت آب به سیمان برابر ۰/۶۵ تغییر محسوسی ندارد.

۳ ـ ۴ ـ شکل ۴ منحنی تغییرات عمق نفوذ گاز CO_2 را برحسب نسبت W/C برای زمانهای عمل آوردن مرطوب مختلف نشان می‌دهد. این شکل حاکی از تأثیر بسیار خوب ایجاد روکش گوگردی روی بتنهای با سیمان پرتلند می‌باشد به گونه‌ای که وجود این نوع روکش عمق نفوذ گاز CO_2 را به صفر می‌رساند و در نمونه‌های مکعبی بتن با روکش نفوذی گوگرد، بیشترین میزان نفوذ گاز CO_2 نسبت به بتنهای شاهد ۱۵٪ می‌باشد. عمق ناچیز نفوذ گاز CO_2 نشان‌دهندهٔ اثر مثبت گوگرد در کاهش نفوذپذیری و پر کردن منافذ ریز داخل جرم بتن می‌باشد. نتایج بدست آمده از آزمایش نفوذ گاز CO_2 بیانگر این مطلب است که برای تمامی متغیرهای در نظر گرفته شده، نتایج حاصل از آزمایش برای بتن با روکش نفوذی یکسان است. بنابراین برای تعیین یک حالت بهینه بایستیٔ نتایج سایر آزمایشات را مد نظر قرار داد.

۴ ـ ۴ ـ نتایج تحقیقات گزارش شده بیانگر آن است که کاهش حداقل ۲۵٪ در مقاومت کششی نمونه‌های پاپیونی شکل بتن، نشان‌دهندهٔ تأثیر سولفاتها روی نمونه مذکور می‌باشد. با توجه به این موضوع ملاحظه می‌شود که نتایج آزمایشات حمله سولفاتی که در جدول ۵ و

شکلهای ۵ و ۶ ارائه شده حاکی از رفتار نسبتاً خوب بتن با روکش نفوذی گوگرد در مقابل حمله سولفاتها می‌باشد. شکل ۵ برای زمان عمل‌آوری مرطوب ۷ رور و شکل ۶ برای زمان عمل‌آوری مرطوب ۲۸ روز می‌باشد که با توجه به این دو شکل و جدول ۵ به این نتیجه می‌رسیم که احتمالاً انتخاب زمان عمل‌آوری مرطوب نمونه‌های بتنی بین ۷ روز و ۲۸ روز از نظر صرف هزینه و اقتصادی بودن مناسب می‌باشد.

پیشنهادات کلی :

با توجه به افزایش قابل توجه کیفیت نمونه‌های بتنی با روکش گوگرد که در این تحقیق مشاهده گردید، به این نتیجه می‌رسیم که روکش نفوذی گوگرد می‌تواند بر روی قطعات پیش‌ساخته بتنی اعمال گردد. این روکش می‌تواند حتی بتنهای با اجرای ضعیف را به خوبی اصلاح نماید و مقاومت بعدی آنها را در مقابل نفوذ عوامل خورنده افزایش دهد. در مورد استفاده از این روکش برای تیرهای بتنی شبکه‌های توزیع برق پیشنهاد می‌گردد که در انتهای خط تولید این تیرها در کارگاههای مربوطه، قسمت انتهائی این تیرها تا حد ۱/۵ متری از سطح زمین در حوضچهٔ گوگرد مذاب به مدت معینی مستغرق گردند (حدود ۹۰ دقیقه) تا گوگرد به داخل جسم بتن نفوذ کند. با توجه به سمی بودن گاز حاصله از ذوب گوگرد، وجود قسمت مجزائی در کارگاه با تهویهٔ مؤثر به منظور این کار ضروری است.

منابع :

۱ ـ رمضانیانپور، ع. مجموعه مقالات نخستین سمینار نقش مواد افزودنی در توسعه تکنولوژی بتن، پیشگفتار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صفحات ۳-۶-۱۳۶۸.

۲ ـ رمضانیانپور، پیدایش، م. "بررسی علل تخریب سازه‌های بتنی در بوشهر" کنفرانس بین‌المللی بتن، مجموعه مقالات، سازمان برنامه و بودجه، صفحات ۹۵-۸۰، ۱۳۷۱.

۳ ـ رمضانیانپور، ع. و همکاران "بررسی علل خوردگی در سازه‌های بتنی تصفیه خانه‌های مرغزار و سر بندر" کنفرانس بین‌المللی بتن، مجموعه مقالات، سازمان برنامه و بودجه، صفحات ۱۴۹-۱۲۳، ۱۳۷۱.

۴ ـ رمضانیانپور، رنجبر، م،م. "بررسی خواص مهندسی و پایائی بتنهای ساخته شده با سرباره آهنگدازی ذوب آهن اصفهان و مقایسه با بتن کنترل" کنفرانس بین‌المللی بتن، مجموعه مقالات، سازمان و بودجه، صفحات ۲۵۵-۲۴۳، ۱۳۷۱.

۵ ـ رمضانیانپور، تکنولوژی بتن، چاپ اول، انتشارات علم و صنعت، ۱۳۶۹.
۶ ـ ترجمه آئین‌نامه سازه‌های بتن‌آرمه، ACI 318-89، فصل چهارم، صفحهٔ ۵۸.
۷ ـ خالو، ع. و غفوری، ح. "بررسی برخی از پارامترهای مؤثر در رفتار بتن سولفوره" کنفرانس بین‌المللی بتن، مجموعه مقالات سازمان برنامه و بودجه، صفحات ۲۸۹ - ۲۷۰، ۱۳۷۱.
۸ ـ میرطلائی، ک و ساعتچی، ا. "بررسی علل خرابی تیرهای بتنی برق در منطقه اصفهان و ارائه راه‌حلهای تعمیرات" گزارش طرح تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان و برق منطقه‌ای اصفهان، آبان‌ماه ۱۳۷۲.

9 - Menashi, Cohen, D., Mather, B. "Sufate Attach on concrete-Research needs, ACI MATTERIALS JOURNAL, 62-69, January-Februrary 1991.

10 - Moukwa, M., Aitcin, P.C., Pigeon, M. & Hornaian, H. "Freeze Thaw Tests of Concret in seawater", ACI MATERIALS JOURNAL, 360-366, July-August 1989.

11 - ACI Committee 201 REPORT, "Proposed revision of: Guide to Durable Concrete", ACI MATERIALS JOURNAL, 544-582, Sept-Oct. 1991.

12 - Ohama, Y., Demura, K., Satoh, Y., Tachibana, K. & Miyazaki, Y. "Development of Admixtures for highly durable concrete" super plasticizers & other chemical Admixtures in concrete, proccedings, third international conference, Ottawa, Canada, 1989, SP-119 ACI, Dettroit, 1989.

13 - Malhtra, V.M. : New concrete Materials.

14 - Soroushian, P. & Alhozaimy, A. "Correlation between fly Ash effects on permeability & sulfate resistance of concrete", International Conference on concrete, proceedings, the center for socio-Economic Iran, P#356-369, 1992.

15 - Jaegermann, C. "Effect of water-cement ratio & curing on chloride penetration into concrete exposed to Mediteraneach sea climate", ACI MATERIALS JOURNAL, 333-339, July-August 1990.

16 - Ying-Lu, L. & Oui-dong, W. "The mechanism of carbonation of mortars & the dependence of carbonation on pore Structures" concrete Durability, Katharine & Bryant Mather International conference, SP-100, ACI, Dettroit, 1987.

« جدول ۱ ـ طرح اختلاط برای تهیه یک مترمکعب بتن جهت تهیه نمونه‌های مکعبی ۷ سانتی‌متری »

سیمان	۳۵۰ کیلوگرم
ماسه ۵ـ۰	۱۰۶۲ کیلوگرم
ماسه ۱۰ـ۵	۸۶۸ کیلوگرم
آب	با توجه نسبت وزنی آب به سیمان

« جدول ۲ ـ طرح مخلوط ملات نمونه‌های پاپیونی »

نوع مصالح	وزن (گرم)
ماسه استاندارد	۹۰۰
سیمان پرتلند نوع یک	۳۰۰
آب	با توجه به نسبت آب به سیمان
تعداد نمونه‌ها	۶ عدد

« جدول ۳ ـ بعضی از خواص پایه‌گوگرد. »

مقاومت فشاری	ویسکوزیته	
۲۸ Mpa = روی استوانه ۷۵×۱۵۰ mm	$۱۱/۸\times۱۰^{-۳}$ Pa.s*	در ۱۲۰°C
	$۶/۶\times۱۰^{-۳}$ Pa.s	در ۱۵۹°C
$۷۴\times۱۰^{-۶}/°C$ ضریب انبساط حرارتی در ۲۵°C	۱۰۰Pa.s	در ۱۸۸°C
	وزن مخصوص	
	۱/۹۶-۲/۰۷	جامد
	۱/۸۰	مایع در ۱۲۰°C

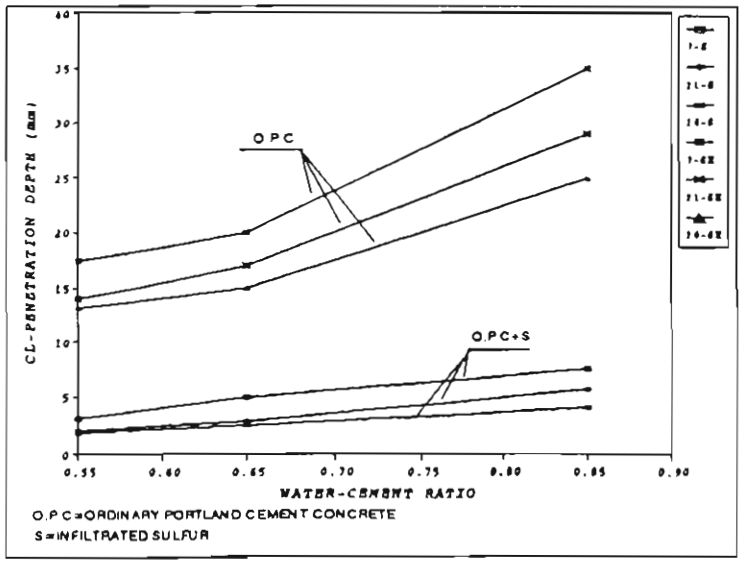
* ویسکوزیته آب ۳-۱۰ pa.s در دمای ۲۰/۳°C می‌باشد.

« جدول ۴ ـ عمق نفوذ گوگرد در نمونه‌های مکعبی ۷ سانتیمتری »

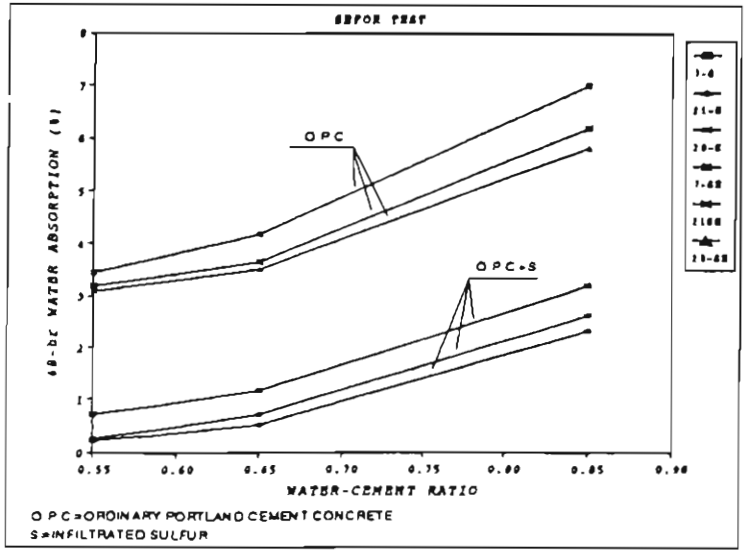
عمق نفوذ گوگرد (mm)	زمان عمل‌آوری مرطوب	نسبت آب به سیمان
۱۱	۷ روز	۰/۵۵
۱۵	۷ روز	۰/۶۵
۱۷	۷ روز	۰/۸۵
۷	۲۱ روز	۰/۵۵
۱۰	۲۱ روز	۰/۶۵
۱۵	۲۱ روز	۰/۸۵
۷	۲۸ روز	۰/۵۵
۱۰	۲۸ روز	۰/۶۵
۱۴	۲۸ روز	۰/۸۵

« جدول ۵ ـ مقاومت کششی نمونه‌های پاپیونی با روکش گوگردی قبل و پس از قرارگیری در محیط سولفاتی »

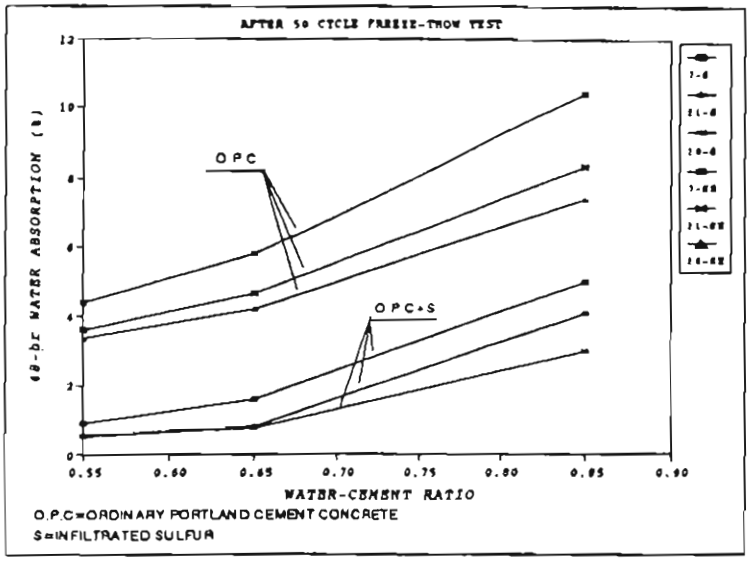
ردیف	W/C	زمان عمل‌آوری مرطوب	مقاومت کششی قبل از حمله سولفاتی (Kg/cm^2)	مقاومت کششی پس از حمله سولفاتی (Kg/cm^2)	درصدکاهش مقاومت
۱	۰/۵۵	۷ روز	۳۴	۲۷/۵۰	۱۹
۲	۰/۶۵	۷ روز	۲۷	۲۰	۲۶
۳	۰/۸۵	۷ روز	۲۴	۱۶/۳۰	۳۲
۴	۰/۵۵	۲۸ روز	۵۲	۴۵/۷۰	۱۲
۵	۰/۶۵	۲۸ روز	۴۰	۳۳/۲۰	۱۷
۶	۰/۸۵	۲۸ روز	۳۱	۲۲/۶۰	۲۷



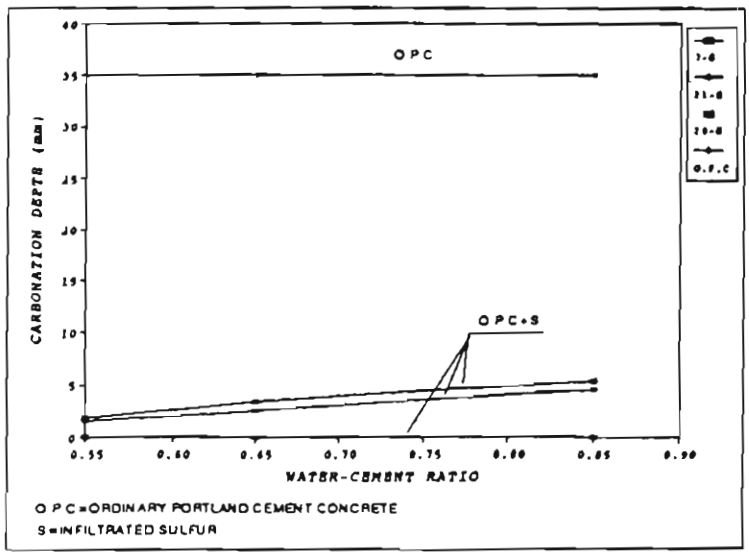
« شکل ۱ ـ مقایسه عمق نفوذ یون کلر در نمونه‌های مکعبی با روکش گوگردی و نمونه‌های مکعبی شاهد »



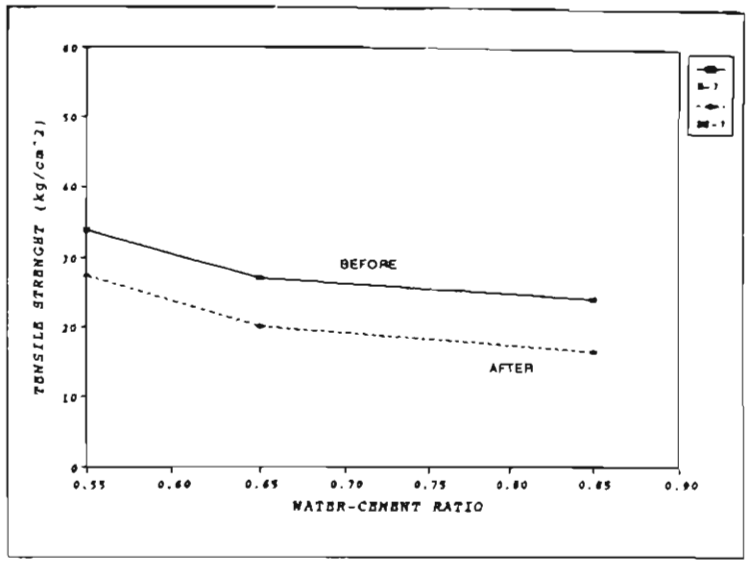
« شکل ۲ ـ مقایسه درصد آب جذب شده بتنهای با روکش گوگردی و بتنهای شاهد در سیکل صفر از آزمایش سیکلهای متناوب یخ زدن و ذوب شدن »



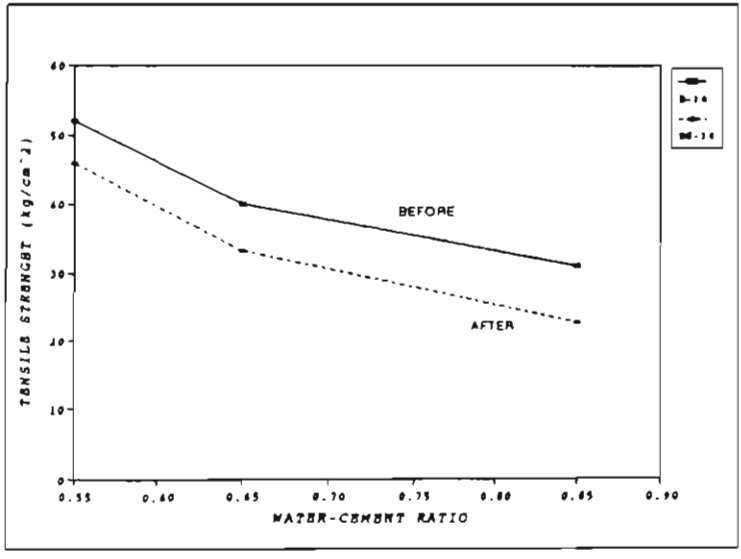
« شکل ۳ ـ مقایسه درصد آب جذب شده بتنهای با روکش گوگردی و بتنهای شاهد پس از سیکل ۵۰ام از آزمایش سیکلهای متناوب یخ زدن و ذوب شدن »



« شکل ۴ ـ مقایسه عمق نفوذ گاز CO_2 در نمونه‌های مکعبی بتنی با روکش گوگردی و نمونه‌های شاهد »



« شکل ۵ ـ مقاومت کششی نمونه‌های پاپیونی با روکش گوگردی قبل و پس از حمله سولفاتی با زمان عمل‌آوری ۷ روز »



« شکل ۶ ـ مقاومت کششی نمونه‌های پاپیونی با روکش گوگردی قبل و پس از حمله سولفاتها با زمان عمل‌آوری مرطوب ۲۸ روز »