

دوام بتن

در چند دهه اخیر دوام بتن توجه زیادی را به خود جلب کرده و کماکان از موضوعات اصلی بتن است. در این مقاله سعی می‌شود موضوعات اصلی در حوزه دوام بتن مورد بررسی قرار گیرد، موضوعاتی شامل معضلات اصلی دوام بتن مانند واکنش-های قلیایی سنگدانه‌ها^۱، حمله سولفات‌ها^۲، خوردگی میلگردها^۳ و خرابی‌های ناشی از یخ زدن و ذوب شدن^۴، و تاثیر مرکب بارهای مکانیکی و عوامل محیطی به طور همزمان بر دوام بتن.

معرفی

دوام بتن به معنی توانایی در برابر هوازدگی، حملات شیمیایی، فرسایش یا هر عامل دیگری که موجب تخریب شکل اصلی بتن، کیفیت یا کارایی آن شود است. از بین رفتن دوام بتن معمولاً با خرابی اعضای سازنده بتن شروع شده، مرحله به مرحله گسترش یافته تا بعنوان تهدید جدی برای سازه شناخته شود.

عوامل خرابی بتن به سه گروه تقسیم‌بندی می‌شوند، فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی. برای مقابله با مشکلات دوام، محققان بسیاری مطالعات عمیقی در این زمینه داشته‌اند. براساس یافته‌های محققان در اغلب موارد خرابی سازه‌های بتنی نتیجه ترکیب عوامل مختلف محیطی به همراه بارگذاری می‌باشد. به همین علت محققان تحقیقات خود را بجای بررسی یک عامل خاص، به بررسی ترکیب عوامل خرابی بتن می‌پردازند.

مشکلات اصلی دوام بتن

مشکلات اصلی شناخته شده در رابطه با دوام بتن شامل واکنش‌های قلیایی دانه‌های سنگی، حملات سولفات‌ها، خوردگی میلگردها و ذوب شدن و یخ زدن می‌شوند که در ادامه بررسی خواهند شد.

واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها

واکنش قلیایی در بتن واکنشی است بین برخی سنگدانه‌های فعال و مواد قلیایی در منافذ بتن. آزمون‌های رایج بررسی این نوع خرابی در بتن عبارتند از آزمایش ملات و میله ASTM C227، متد استوانه سنگی ASTM C586، متد آزمایش سریع ASTM C289، آزمایش انقباض شیمیایی، مدول دینامیکی و غیره. در حالت عادی درجه واکنش قلیایی در بتن به حضور

¹ Alkali-aggregate reaction (AAR)

² Sulfate attack

³ Steel corrosion

⁴ Freeze thaw

آب، مواد قلیایی موجود در بتن، تخلخل بتن و دما وابسته است. بر این اساس پیشنهاداتی برای مقابله با واکنش‌های قلیایی ارائه می‌شود، این پیشنهادات عبارتند از استفاده از سنگدانه‌های غیرفعال از نظر شیمیایی، استفاده از سیمان با درجه قلیایی پایین و یا جایگزینی درصدی از آن با مواد پوزولانی، خشک نگه داشتن بتن تا حد امکان، استفاده از مواد پوششی بتن و افزودن نمک نیترات.

در تحقیقی توسط بتی، مکانیسم واکنش‌های پوزولان‌ها بر کنترل انبساط سنگدانه‌های قلیایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پوزولان‌ها با تولید هیدرات سیلیکات کلسیم و هیدرات سیلیکات کلسیم کم آهک، انبساط قلیایی را کاهش می‌دهند یا به طور کلی حذف می‌کنند. این هیدرات‌ها می‌توانند قلیای اضافی را درون خود حفظ کرده، بنابراین مقدار قلیابیت موجود برای واکنش با سنگدانه‌های فعال را کاهش می‌دهند. به منظور کنترل این انبساط قلیایی توسط افزودن پوزولانی مانند خاکستر بادی، نتایج نشان داده که حدود ۳۰ درصد خاکستر کم آهک مورد نیاز است. با این حال، اگر بتن حاوی سنگدانه سیلیسی باشد، می‌توان این مقدار را تا حد ۲۰ درصد (بر اساس نوع سیمان) کاهش داد.

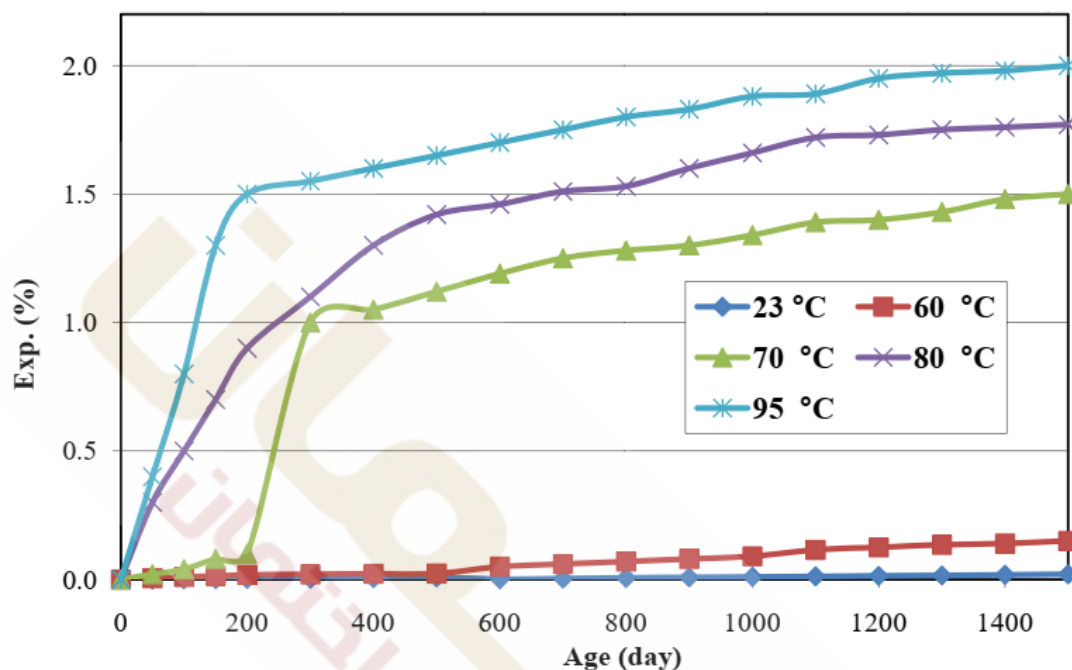
خرابی تحت اثر حمله سولفات‌ها

حمله سولفاتی یکی از عوامل اصلی خرابی سازه بتنی به شکل افزایش حجم است. این افزایش حجم ناشی از واکنش بین یون‌های سولفات و برخی از محصولات واکنش هیدراسیون در سازه بتنی می‌باشد.

آزمون‌های بررسی مقاومت در برابر سولفات‌ها معمولاً به شکل قرار دادن نمونه‌های بتنی در محلول سدیم سولفات یا منیزیم سولفات و یا ترکیبی از آن‌ها است. در حال حاضر، اثر حمله سولفات‌ها معمولاً از طریق چندین شاخص بررسی می‌شود: تغییرات طول، کاهش یا افزایش جرم، تفاوت در سختی سطح، مقاومت و کاهش مدول الاستیک. با این حال، این شاخص‌ها اطلاعات کافی برای ارزیابی واکنش‌های شیمیایی و درک مکانیسم‌های آسیب را ارائه نمی‌دهند و همچنین هیچ کدام نمی‌تواند الزاماً مربوط به عملکرد در شرایط واقعی باشد. بنابراین همواره بررسی روش‌های نوین برای مطالعه تخریب ناشی از حملات سولفات‌ها باید انجام شود.

بررسی مقابله با حمله سولفاتی داخلی به بتن عنوان مقاله‌ایست که توسط مجید احمدخانیها در این رابطه انجام شده است. در این تحقیق پس از شناسایی این پدیده و مکانیسم آسیب به بتن، عوامل مؤثر در بروز این پدیده دمای بالای هوا، مقدار فراوان سولفات در مخلوط بتن، درصد بالای C3A در سیمان مصرفی، نفوذپذیری بالای بتن و همچنین تماس آب با بتن معرفی شده است. به این ترتیب جهت کنترل انبساط‌های ناشی از این حمله، راهکارهایی که منجر به نتیجه مطلوب می‌شوند،

ارائه گشته است. این راهکارها عبارتند از کاهش دمای بتن و مقدار سولفات موجود در مخلوط بتن و همچنین جایگزین نمودن بخشی از سیمان در طرح اختلاط با مواد افزودنی معدنی که حاوی مقادیر معینی Al_2O_3 هستند. نمودار شکل ۱ نتایج افزایش حجم ملات ماسه سیمان تحت تاثیر دماهای مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۱. افزایش حجم ملات ماسه سیمان تحت تاثیر دماهای مختلف

براساس نتایج بدست آمده در این تحقیق دوده سیلیس باوجود ایجاد تاخیر در شروع انبساطها، در کنترل انبساطهای حمله سولفاتی داخلی حاصل از اترینگایت ثانویه تاثیر مفیدی نداشته است. بنابراین با توجه به تولید سرباره آهن گذاری در ایران که دارای کیفیت مطلوب نیز می‌باشد، این ماده افزودنی معدنی برای جایگزینی بخشی از سیمان به عنوان تنها گزینه بومی مورد توجه قرار گرفت. البته متاکائولین و خاکستر بادی نیز تاثیرات مثبتی بر این پدیده داشته‌اند، اما به علت هزینه بالای تولید در ایران گزینه سرباره آهن گذاری مطلوب‌تر است. از آنجا که استفاده از سرباره باعث کند شدن روند مقاومت گیری بتن می‌شود، در تعیین درصد جایگزینی سرباره به جای سیمان، می‌بایست الزامات مقاومتی بتن در کنار تامین مقدار کافی اکسید آلومینیوم آزاد و فعال مورد توجه قرار گیرد. براساس بررسی انجام شده لازم است حداقل ۷ درصد اکسید آلومینیوم آزاد در سیمان سرباره‌ای موجود باشد. ولی به هر ترتیب برای اطمینان از کارایی سیمان سرباره‌ای لازم است حداقل ۳۰ درصد جایگزینی برای سرباره به جای سیمان رعایت گردد.

خوردگی میلگردها

از آنجا که خوردگی فولاد تقویت کننده بتن به عنوان جدی‌ترین مشکل دوام در مهندسی ساختمان در نظر گرفته می‌شود، نحوه مقابله با این معضل همواره یک مشکل اساسی در اجرای این نوع سازه به شمار می‌رود. ترکیبی از کیفیت بتن و ضخامت بتن کاور میلگرد مهمترین عامل کنترل نرخ کربناسیون و ورود کلرید در بتن است، بنابراین کنترل کیفیت بتن و اجرای آن اصلی‌ترین روش حفاظت در برابر این نوع خرابی است. این استراتژی شامل افزایش پوشش بتنی، پوشش میلگرد، استفاده از فولاد ضد زنگ و استفاده از افزودنی‌های کنترل کننده خوردگی می‌باشد.

متر در تحقیقی به بررسی تاثیر کاور میلگرد پرداخته‌است. در این تحقیق بیان شده که به طور کلی، زمان خوردگی فولاد تقویت شده تعبیه شده می‌تواند به طور قابل توجهی تحت تأثیر میزان پوشش بتنی روی میلگرد قرار گیرد. با این حال، با افزایش ضخامت این پوشش، عملکرد میلگرد کاهش یافته و احتمال ترک خوردگی در اثر تنش کششی، جمع شدگی و اثرات حرارتی افزایش می‌یابد پوشش میلگرد نیز از دیگر روش‌های مقابله با خوردگی آن است. تولایا و همکاران نشان دادند که پوشش اپوکسی به طور واضح در مقایسه با پوشش‌های ضد زنگ قرمز رنگ و یا پوشش روی عملکرد بسیار بالاتری در برابر خوردگی فولاد نشان می‌دهد و می‌تواند به روش‌های مختلف، به صورت مایع یا پودر ذوب شده روی سطح اعمال شود. همچنین استفاده از میلگردهای ضدزنگ نیز به عنوان یک راه حل مطرح می‌شود که البته در محل جوش دارای ضعف بوده و همچنین هزینه آن نیز بسیار بالاست. از دهه ۱۹۹۰ نیز استفاده از الیاف به عنوان جایگزین سیمان مطرح شده‌است، الیاف‌هایی نظیر الیاف شیشه و یا الیاف‌های پلیمری که بسیاری از مشکلات فولاد مانند زنگ زدگی را ندارند.

اگرچه بسیاری از مسائل مربوط به خوردگی فولاد با استفاده از تکنیک‌های مختلف پیشگیری حل شده است، محققان و مهندسان همچنین قصد دارند پیشرفت خوردگی را برای تصمیم‌گیری به جهت رسیدگی و نگهداری به موقع کنترل کنند. روش‌های نظارتی شامل بازرسی بصری، اندازه‌گیری به روش پتانسیل نیم سلولی، رادیوگرافی، اولتراسونیک، امواج مغناطیسی و تکنیک انتشار آکوستیک می‌باشد.

یخ زدن و ذوب شدن

همواره پتانسیل ایجاد خرابی در بتن در صورت قرار گرفتن در معرض ذوب و یخ وجود دارد. موسسه بتن آمریکا (ACI⁵)، مشخصاتی را برای حفاظت بتن در معرض هوای سرد تعیین کرده است. ACI هوای سرد را به عنوان دوره‌ای تعریف می‌کند که در آن بیش از سه روز متوالی دمای هوای روزانه کمتر از ۴۰ درجه فارنهایت (حدود ۴ درجه سلسیوس) باشد. لذا دوام

⁵ American Concrete Institute

سازه بتنی که در معرض دماهای زیر صفر قرار می‌گیرد دارای اهمیت بالایی است. سرمازدگی، تخریب پیشرونده‌ای است که از جداسازی یا پوسته پوسته شدن سطح شروع شده و با فروپاشی کامل خاتمه می‌یابد. با تکرار چرخه‌های انجماد و ذوب، این زوال ادامه می‌یابد و بتن به تدریج سختی و استحکام خود را از دست می‌دهد، به علاوه افزایش حجم برگشت ناپذیری در بتن ایجاد می‌شود. بنابراین یخ‌زدگی یک فرآیند خستگی بسیار پیچیده بوده و بهبود دوام انجماد و ذوب بتن و افزایش عمر مفید بتن همواره یک مسئله علمی و فنی مهم است. افزودنی هوازا تقریباً برای همه بتن‌های در معرض هوای سرد توصیه می‌شود، عمدتاً برای بهبود مقاومت در برابر چرخه‌های انجماد و ذوب هنگام قرار گرفتن بتن در معرض آب و مواد شیمیایی ذوب کننده برف و یخ در مناطق سردسیر.

برای تعیین دوام بتن در برابر یخبندان روش‌های آزمایش متعددی وجود دارد که مهمترین آنها دستورالعمل‌های ASTM C-666 است. در حالت الف در این دستورالعمل نمونه‌های بتن به تعداد لازم در چرخه‌های یخبندان بین ۱۷/۷- الی ۴ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. تعداد چرخه‌ها برابر ۳۰۰ بوده و یخبندان و ذوب نمونه‌ها در مجاورت آب انجام می‌شود. روش ب دقیقاً مثل روش الف است، با این تفاوت که یخبندان نمونه در مجاورت آب و ذوب آن در مجاورت هوا انجام می‌شود. بعد از اتمام چرخه‌های یخبندان و ذوب میزان تخریب نمونه‌ها با معیارهای مختلفی سنجیده می‌شود که شامل موارد عمده زیر است:

۱. تغییر در مقاومت فشاری: افت بیش از ۱۰٪ نشان دهنده تخریب است.

۲. تغییر در وزن نمونه: افت بیش از ۵٪ نشان دهنده تخریب است. در صورتی که جدا شدن قطعاتی از نمونه با چشم رویت شود به شرط قابل توجه بودن می‌توان حکم به تخریب نمونه داد.

۳. تغییر در پاسخ امواج: با عبور امواج ماورای صوت از نمونه در قبل و بعد از آزمایش اگر به میزان ۴۰٪ افت در سرعت امواج عبوری مشاهده شد، نمونه تخریب شده است.

۴. تغییر در طول ابعادی نمونه: کرنش‌های نمونه با ابزارهای دقیق سنجیده می‌شود، در صورتی که از مقادیر توصیه شده تجاوز نکند (این مقادیر در مرجع‌های گوناگون و به ازای بتن‌های مختلف متفاوت است)، نمونه به حالت تخریب رسیده است.

شانگ و همکاران به بررسی دوام بتن ساخته شده با عامل هوازا تحت ۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ چرخه انجماد و ذوب پرداخته‌اند. این مطالعه بر روی بتن‌های C20، C25، C30، C40 و C50 انجام شده است. در این تحقیق مدول الاستیسیته دینامیکی و کاهش وزن نمونه‌ها پس از چرخه‌های مختلف یخ‌زدایی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با تکرار چرخه‌های انجماد و ذوب، مدول الاستیسیته دینامیکی و وزن کاهش می‌یابد. آن‌ها نشان دادند که نمونه‌های C30، C40 و C50 پس از ۳۰۰ چرخه انجماد بر اساس نتایج تجربی هنوز دوام مناسبی داشته‌اند. نتایج مربوط به این آزمایش‌ها در جداول ۱ و ۲ نشان

داده شده‌اند. تفاوت وزن در چرخه‌های انجماد و ذوب به دلیل جابجایی آب به داخل و خارج از نمونه‌ها و جداسازی یا پوسته پوسته شدن سطح نمونه‌ها است.

	Number of freeze-thaw cycles								
	0	50	100	150	200	250	300	350	400
C20	100	99.45	99.4	98.75	96.7	83.85	64.95	/	/
C25	100	97.60	94.35	91.55	90.75	77.35	62.8	/	/
C30	100	99.55	98.75	98.2	94.6	/	93.9	87.3	77.05
C40	100	/	98.4	98.55	99.05	98.9	97.35	96.75	95.4
C50	100	/	95.85	97.6	97.5	95.8	90.35	85.95	77.6

جدول ۱. مدول لاستیسیته دینامیکی نمونه‌ها پس از سیکل‌های ذوب و یخ (%)

	Number of freeze-thaw cycles								
	0	50	100	150	200	250	300	350	400
C20	8.930	8.920	8.860	8.770	8.720	8.660	8.540	/	/
C25	9.417	9.380	9.270	9.150	9.080	9.050	9.005	/	/
C30	9.960	9.930	9.940	9.940	9.890	/	9.900	9.840	9.685
C40	9.740	9.730	9.735	9.685	9.675	9.660	9.410	9.615	9.510
C50	9.960	/	9.925	9.940	9.935	9.890	9.870	9.800	9.585

جدول ۲. وزن نمونه‌ها پس از سیکل‌های ذوب و یخ (Kg)

دوام انجماد و ذوب بتن ساده پایین است، اما هنگامی که عامل هوازا با بتن مخلوط می‌شود، می‌توان آن را تا حد زیادی بهبود بخشید. این امر نشان می‌دهد که بتن با مقاومت معمولی نیز می‌تواند دوام انجماد و ذوب بالایی داشته باشد.

تأثیر همزمان عوامل محیطی و بارهای مکانیکی

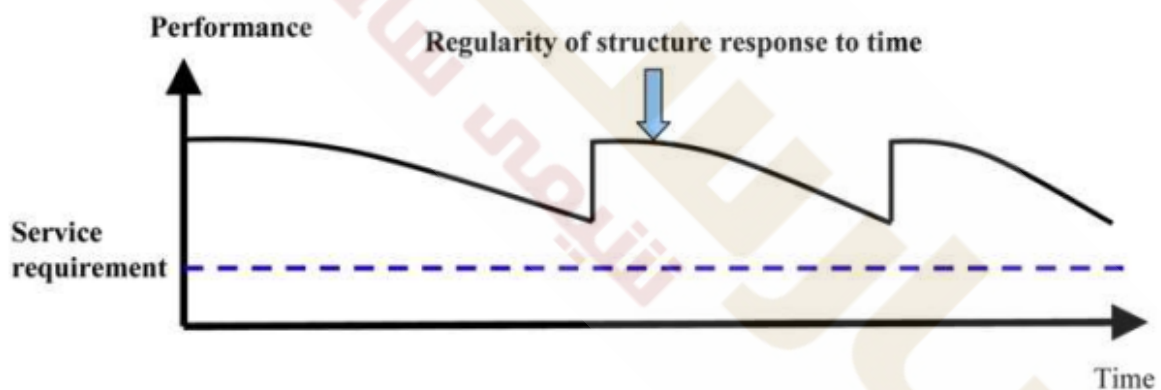
در عمل، پیش بینی طول عمر واقعی سازه‌های بتنی جدید یا قدیمی یک چالش جهانی است، چراکه سازه‌های بتنی نه تنها بارهای سازه‌ای را تحمل می‌کنند بلکه در معرض شرایط مختلف محیطی نیز قرار می‌گیرند به طور مثال سازه‌های آبی تحت شرایط خوردگی، انتشار کلرید و حمله سولفات‌ها به طور همزمان قرار دارند. بنابراین، مطالعه مکانیسم فرسودگی یک سازه بتنی تحت تأثیر ترکیب بارهای مکانیکی و ترکیبی از عوامل متعدد محیطی واقع بینانه‌تر است.

فلسفه طراحی عمر مفید براساس توانایی باربری

در طراحی سنتی بتن معمولاً عوامل محیطی نادیده گرفته می‌شود و فقط ظرفیت باربری سازه در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. به علاوه، این آیین‌نامه‌ها معمولاً خواص مکانیکی بتن را به عنوان پارامترهای مستقل از زمان در نظر می‌گیرند. از سال ۱۹۹۰، مسئله دوام بیشتر مورد توجه قرار گرفته و برخی از کدهای طراحی با در نظر گرفتن دوام بتن توسعه یافته‌اند. با

این حال، در قدم‌های اولیه در این آیین‌نامه‌ها، دوام سازه بتنی تنها با جزئیاتی مانند ضخامت کاور میلگرد آن هم تحت شرایط محیطی خاص مورد توجه قرار گرفته است. متأسفانه هیچ فرمول علمی برای ارزیابی تأثیر هر یک از عوامل محیطی وجود ندارد. ضروری است که یک رویکرد طراحی جدید با در نظر گرفتن ظرفیت باربری و در نظر گرفتن بحث دوام ایجاد شود. چنین رویکردی باید دربرگیرنده دو موضوع باشد، تبدیل کمی عوامل محیطی به پارامترهای طراحی یا تبدیل این مسائل به بار مکانیکی معادل، و ارزیابی پویای خواص مواد و رفتار سازه در طول زمان سرویس. با توجه به طرح اول، یک راه حل ساده و مستقیم ایجاد روشی است که به کمک آن بتوان این عوامل محیطی را به توزیع معادل نیرو یا تنش تبدیل کرد.

برای طرح دوم، مکانیسم تخریب ساختار یا مواد با گذشت زمان باید بیشتر روشن شود، که برای این منظور می‌توان به مطالعه تجربی ساختار واقعی در معرض شرایط مختلف محیطی تحت بارگذاری یا شبیه‌سازی کامپیوتری رفتار سازه‌ای بتنی تحت ترکیب‌های مختلف بارگذاری و عوامل محیطی مختلف متوسل شد. بر اساس این نظریه، خواص و رفتار بتن باید به عنوان تابعی از زمان توصیف شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. با استفاده از نتایج آن، می‌توان عملکرد سازه بتنی را در دوره‌های سرویس مختلف پیش‌بینی کرد و متناسب با آن در طرح گنجانید. شکل ۲ ترتیب عملکرد سازه بتنی را به عنوان تابعی از زمان نشان می‌دهد.



شکل ۲. ترتیب عملکرد سازه بتنی به عنوان تابعی از زمان

پیش‌بینی عمر سرویس با در نظر گرفتن دوام

جدا از نظریه‌های طراحی دوام، مدل‌های دوام ریاضی زیادی برای دستیابی به پیش‌بینی قابل اعتمادی از رفتارهای فیزیکی شیمیایی سازه‌های بتنی در طول عمر آن‌ها ارائه شده است. با استفاده از این مدل‌های دوام، می‌توان تصمیمات سریع و اقتصادی در مورد زمان مناسب تعمیر و نگهداری سازه‌های موجود گرفت. برخی از مدل‌های دوام برای پیش‌بینی عمر مفید

بتن عبارتند از: مدل پیش بینی عمر مفید Life-365 از انجمن سیمان سرپاره (SCA⁶), انجمن مهارکنندگان خوردگی بتن (CCIA⁷), انجمن ملی بتن آماده (NRMCA⁸) و انجمن دوده سیلیس (SFA⁹).

منابع

1. Tang, S.W., et al., Recent durability studies on concrete structure. Cement and Concrete Research, 2015. 78: p. 143-154.
2. Zongjin, L., Advanced concrete technology. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2011.
3. Bhatti, M.S., Mechanism of pozzolanic reactions and control of alkali-aggregate expansion. Cement, concrete and aggregates, 1985. 7(2): p. 69-77.
4. احمدخانیها, م., بررسی مقابله با حمله سولفاتی داخلی به بتن, در هشتمین کنفرانس ملی بتن ایران. ۱۳۹۵, undefined.
5. Al-Tholaia, M.M.H., et al., A comparative study of corrosion resistance of different coatings for mortar-embedded steel plates. Construction and Building Materials, 2014. 56: p. 74-80.
6. قلعه نوی, م., م. اژدری مقدم, و ع.ا. اورعی گلمکانی, بررسی افزایش دوام بتن در برابر سیکل های یخبندان و ذوب یخ, در هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران. ۱۳۸۸.
7. Shang, H.-S. and T.-H. Yi, Freeze-thaw durability of air-entrained concrete. The Scientific World Journal, 2013. 2013.

⁶ Slag Cement Association

⁷ Concrete Corrosion Inhibitors Association

⁸ National Ready Mixed Concrete Association

⁹ Silica Fume Association