

تأثیر کربناته شدن بتن بر خوردگی میلگردهای فولادی - مروری جامع بر ادبیات فنی

حسن خاکسار^۱، علی دوستی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مدیریت ساخت دانشگاه آزاد دماوند

۲- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

Email: cec.khaksar1370@gmail.com

چکیده

خوردگی میلگردهای فولادی در بتن از جمله رایج‌ترین خرابی‌ها در سازه‌های بتن مسلح بوده و یکی از مهمترین مشکلاتی است که مهندسان عمران امروزه در نگهداری سازه‌های بتن مسلح با آن مواجه می‌باشند. در سواحل جنوبی کشور مشکلات موجود در دستیابی بتن با پایایی مناسب و در نتیجه خرابی‌های ناشی از خوردگی میلگردهای فولادی در بتن، سالیانه خسارات مالی زیادی را به اقتصاد کشور تحمیل می‌کند. از طرف دیگر امروزه با گسترش روز افزون شهرها و صنایع مختلف، میزان آلاینده‌های معلق در هوا روند روبه افزایشی از خود نشان می‌دهند. در این میان، دی اکسید کربن به عنوان یکی از این آلاینده‌های مضر چه در مناطق شهری و چه دریایی نقش به‌سزایی در تخریب سازه‌های بتن آرمه بازی می‌کند. در بیشتر مناطق آب و هوایی در سرتاسر دنیا دی اکسید کربن در حضور رطوبتی معادل با ۵۰ تا ۷۰ درصد، به درون حفرات موئینه بتن نفوذ کرده و با هیدروکسید کلسیم و هیدرات‌های سیمان واکنش داده و تولید کربنات کلسیم می‌کند. پدیده کربناتاسیون و تولید کربنات کلسیم به تنهایی آسیبی به بتن نمی‌رساند بلکه آنچه که منجر می‌شود تاهمواره از این پدیده به عنوان یک عامل مخرب در سازه‌های بتنی یاد شود این است که این پدیده یا منجر به شروع خوردگی می‌شود و یا موجب تسریع و گسترش خوردگی در میلگردهای فولادی به‌کاررفته در سازه‌های بتنی می‌شود. در سال‌های اخیر مطالعاتی گسترده برای حل مشکلات ناشی از خوردگی بواسطه کربناته شدن بتن انجام شده است و این در حالی است که در مملکت ما با وجود دارا بودن خورنده ترین محیط دریایی در دنیا و حجم زیاد آلاینده‌های موجود در اتمسفر، تحقیقات جامعی در این خصوص صورت نگرفته است.

در مقاله حاضر سعی بر آن است تا یک بار بصورت جامع مروری بر مکانیزم‌های کربناسیون بتن و خوردگی همزمان ناشی از کربناسیون به همراه تغییرات ریزساختار بتن ناشی از رخداد این همزمان این دو پدیده پرداخته شود.

کلمات کلیدی: دوام بتن، کربناته شدن، خوردگی، میلگرد فولادی، یون کلراید، گاز CO₂

۱. مقدمه

بتن به عنوان یکی از مصالح بالنسبه ارزان و پایا در محیط‌های دریایی و غیره می‌باشد که می‌توان با قالب‌بندی آن را به هر شکل هندسی مورد نظر در آورد. اما در بعضی موارد به دلایل طراحی ضعیف، ضعف در اجرا، کیفیت نامرغوب مصالح و شرایط محیطی لحاظ نشده در طراحی و یا ترکیبی از این عوامل، سازه بتن مسلح ساخته شده، کارایی مورد نظر را در دوره عمر مفید خود نخواهد داشت. در سال‌های اخیر تعداد زیادی از سازه‌های بتنی در مناطق دریایی کشورهای مختلف دنیا در اثر این عوامل دچار آسیب دیدگی و یا خرابی زودرس شده‌اند. کربناسیون و خوردگی میلگردهای فولادی در بتن از جمله رایج‌ترین این خرابی‌ها در سازه‌های بتن مسلح بوده و یکی از مهمترین مشکلاتی است که مهندسان عمران امروزه در نگهداری سازه‌های بتن مسلح با آن مواجه می‌باشند.

در خاورمیانه نیز شرایط گرم آب و هوایی در محیط‌های دریایی، وجود غلظت بالای آلاینده‌های مختلف بخصوص گاز CO₂ به همراه نمک در آب‌های زیر زمینی مشکل خوردگی را افزایش داده است، همچنین ضعف در عمل آوری بتن باعث کم شدن عمر مفید این سازه‌ها شده است. در سواحل جنوبی کشور نیز مشکلات موجود در دستیابی بتن با پایایی مناسب و در نتیجه خرابی‌های ناشی از خوردگی میلگردهای فولادی در بتن، سالیانه خسارات مالی زیادی را به اقتصاد کشور تحمیل می‌کند. بنابراین با توجه به اینکه مساله عدم پایایی بتن در محیط‌های خورنده یکی از مشکلات اساسی در دنیا بوده و خوردگی میلگردهای فولادی در بتن ناشی از کربناته شدن بتن به همراه نفوذ یون کلرید از عوامل مهم تاثیرگذار بر پایایی آن می‌باشد، در سال‌های اخیر مطالعاتی گسترده برای حل مشکلات ناشی از آن انجام شده است. این در حالی است که در مملکت ما با وجود دارا بودن خورنده ترین محیط دریایی در دنیا، تحقیقات جامعی در این خصوص صورت نگرفته است. یون کلراید تحت ترکیبی از مکانیزم‌های مختلف (شامل مکش موئینه، انتشار، انتقال یونی، مهاجرت و غیره) به داخل بتن نفوذ می‌کند. در این میان انتشار یون‌های کلراید به داخل بتن مهمترین مکانیزمی است که برای قسمت‌های اشباع (مانند قسمتهایی از یک سازه بتنی که در زیر آب دریا قرار دارد) اتفاق می‌افتد. در دهه‌های گذشته مدل‌های بسیاری بر اساس مکانیزم انتشارپذیری یون‌های کلراید به داخل بتن تهیه شده و از آنها به منظور تخمین عمر مفید سازه‌های بتن آرمه استفاده می‌شود. اما مدل‌های بسیار دیگری هم موجودند که براساس مکانیزم انتقال ترکیبی طراحی شده‌اند و از آنها به منظور تخمین عمق نفوذ یون‌های کلراید در حالت غیر اشباع استفاده می‌شود.

کربناتاسیون، واکنش گاز دی‌اکسید کربن هوا با مواد قلیایی بتن می‌باشد. این پدیده تاثیر زیادی بر خوردگی آرما تورها در بتن خواهد داشت. اولین تاثیر آن کاهش pH بتن از مقدار طبیعی آن (بین ۱۳ و ۱۴) تا مقدار خنثی (۷) می‌باشد. در صورت عدم وجود یون کلرید در بتن از ابتدای ساخت، ترکیبات آب منفذی بتن کربناته شده تقریباً همانند آب خالص می‌باشد. این به آن معناست که مکانیزم خوردگی آرما تور در بتن کربناته شده در هوا (عاری از یون کلرید)، همانند خوردگی با آب خالص می‌باشد. اما چنانچه یون کلراید به طریقی وارد منافذ موئینه خمیر سیمان گردد مکانیزم همزمان کربناسیون و انتقال یون کلراید حاکم خواهد بود. تاثیر دیگر کربناسیون بتن، احتمال آزادسازی یون کلرید مقید (بصورت هیدرات‌های کلسیم کلروآلومینات و سایر ترکیبات آن با فازهای هیدراتاسیون) می‌باشد که موجب گزندبارتر شدن آب منفذی می‌گردد. بنابراین در نظر گرفتن فرآیند کربناسیون بتن به همراه مکانیزم انتقال و نفوذ یون‌های کلراید به داخل بتن در مدل‌های تخمین عمر مفید سازه‌ها از درجه اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود. به همین منظور لازم است تا پیش از آن در ابتدا به شناخت کافی در زمینه فرآیند کربناسیون، فرآیند نفوذ و انتشار یون‌های کلراید و سپس حضور این دو در کنار یکدیگر پرداخته شود و سپس در گام بعد در خصوص وارد نمودن تاثیر آن‌ها در مدل‌های تخمین عمر مفید سازه‌ها اقداماتی صورت پذیرد [۱].

۲. کربناسیون بتن

بطور کلی در فرآیند کربناته شدن بتن گاز CO₂ از اتمسفر به داخل حفرات بتن نفوذ کرده و با ماتریس سیمانی وارد واکنش می‌گردد. در این واکنش گاز CO₂ از فاز گازی به کمک یک فاز آبی به فاز جامد تبدیل می‌شود (رابطه ۱)



بسیاری از محققین این فاز آبی را ملاک قرار نداده و واکنش کربناسیون را بصورت ذیل بیان می‌کنند [۴-۲].



همانطور که مشاهده می گردد در این فرآیند با تشکیل کربنات کلسیم (کلسیت) و ژل های غنی از سیلیس انتظار می رود مقدار pH بتن تا حدود ۸ پایین آید [۵-۶]. از آنجائیکه لایه مقاوم بر روی میلگرد فولادی با کاهش pH بتن از بین خواهد رفت (معمولاً برای pH های زیر ۱۲ این لایه از بین خواهد رفت) بنابراین کربناسیون شرایط را برای خوردگی میلگردهای فولادی آماده یا تسریع می بخشد. بر اساس محاسبات انجام شده هزینه خوردگی سازه های فولادی و بتنی که هر ساله مخارج سنگینی را بر دوش کشورها تحمیل می کند حدود ۳ تا ۵ درصد تولید ناخالص داخلی تخمین زده شده است. در همین راستا بر اساس ادبیات فنی موجود هزینه ناشی از خوردگی در کشور آفریقای جنوبی حدود ۵/۲ درصد تولید ناخالص داخلی، ژاپن ۱/۰۲ درصد و در کشور آمریکا ۳/۱ الی ۴/۲ درصد برآورد شده است [۷-۱۰]. اینکه چه عاملی و چگونه موجب کربناسیون بتن می گردد دهه ها است که مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است اما کاربرد این یافته ها در طراحی عمر مفید سازه ها کمتر مورد توجه واقع شده است. بطور کلی پارامترهای موثر بر کربناسیون بتن عبارتند از: رطوبت نسبی، نوع سیمان، عمل آوری، غلظت گاز CO₂، دما، نوع و کیفیت بتن، نوع قرارگیری در معرض شرایط محیطی (شامل قرارگیری در معرض بارش یا قرارگیری در زیر سایبان).

بر اساس استاندارد EN ۲۰۶-۱ برای بتن ۴ رده رویارویی در نظر گرفته شده است که قرارگرفتن سازه بتنی در هر یک از این رده ها می تواند منجر به خوردگی ناشی از کربناسیون گردد.

- رده اول (XC₁) عبارتست از مواجهه دائمی سطح بتن با شرایط کاملاً خشک (همچون سطوح داخلی ساختمان) یا کاملاً مرطوب و خیس (همچون قرارگیری در زیر آب)

- رده دوم (XC₂) عبارتست از مواجهه سطح بتن با رطوبت برای مدت طولانی (همچون سیستم های زهکش آب باران)

- رده سوم (XC₃) شامل مواجهه یا قرارگیری سطوح بتنی در آب و هوایی با رطوبت متوسط (بتن در سطوح خارجی قرارگرفته در زیر سایبان)

- رده چهارم (XC₄) شامل مواجهه بتن یا سازه بتنی با سیکل های متناوب تر و خشک شدن (همچون سطوح بتنی خارجی در مواجهه با بارندگی)

بر اساس گزارش های موجود ناشی از تحقیقات گسترده درخصوص مشخصات مکانیکی، افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش نفوذ یون کلراید شده کربناسیون موجب کاهش نفوذپذیری و انتشارپذیری [۱۱-۱۳]، افزایش مشخصات مکانیکی، افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش نفوذ یون کلراید شده است [۱۴-۱۸]. از طرفی کربناسیون موجب کاهش آستانه خوردگی و نهایتاً کاهش مقاومت در برابر خوردگی خواهد شد [۲۰-۱۸].

۳. عوامل موثر بر کربناته شدن بتن

۱.۳. تاثیر پوزولان ها

بطور کلی براساس مطالعات مختلف موجود در ادبیات فنی مشاهده شده است که استفاده از پوزولان ها موجب کاهش مقاومت بتن در برابر کربناته شدن خواهد شد [۲۶-۲۱]. به همین منظور استفاده از این مواد سیمانی، از طرفی موجب بهبود ریزساختار بتن و بهبود پارامترهای مربوط به دوام بتن خواهد شد و از طرف دیگر موجب افزایش ریسک خوردگی میلگردها بر اثر کربناته شدن بتن خواهد شد [۵].

همانطور که پیشتر ذکر شد با نفوذ گاز CO₂ به داخل بتن ابتدا Ca(OH)₂ مورد حمله و مصرف واقع شده و پس از آن ژل CSH مورد حمله واقع خواهد شد، بنابراین با این تفاسیر، عملکرد پوزولان ها در برابر پدیده کربناسیون به دو صورت خواهد بود بطوریکه در درجه اول به دلیل مصرف CH در فرآیند واکنش پوزولانی، استفاده از پوزولان ها موجب افزایش نرخ کربناسیون می گردد و از طرف دیگر با تشکیل ژل CSH باز به دلیل همان واکنش پوزولانی و بهبود ریزساختار بتن، استفاده از پوزولان موجب کاهش نرخ و عمق کربناسیون خواهد شد. Park و همکاران [۲۷] در تحقیقات خود نشان دادند که با مصرف هرچه بیشتر پوزولان، عمق کربناسیون بتن افزایش خواهد یافت. این محققین معتقدند که با مصرف پوزولان، قلیائیت آب حفره ای کاهش یافته و ژل CSH تشکیل یافته، مقدار قلیایی بیشتری جذب خواهد کرد بنابراین pH بتن کاهش خواهد یافت. درخصوص عملکرد خاکستر بادی، بر اساس مطالعات Khunthongkeaw و همکاران [۲۸] مشاهده شد که با کاهش نسبت آب به سیمان و یا کاهش مقدار جایگزینی خاکستر بادی در بتن مقاومت در برابر کربناته شدن و نهایتاً عمق کربناته شدن کاهش یافته است. همچنین افزایش مقدار CaO در خاکستر بادی موجب کاهش عمق کربناسیون شده است. Lewis و Ho [۲۹] مشاهده کردند که استفاده از خاکستر بادی نیز موجب افزایش عمق کربناسیون بتن خواهد شد. Kokubu و Nagataki [۳۰] گزارش کردند که عمق کربناسیون بتن حاوی خاکستر بادی با افزایش رده مقاومتی بتن کاهش یافته است. Ogha و Nagataki [۳۱] گزارش نمودند که با جایگزینی بیشتر خاکستر بادی به جای سیمان مقدار عمق کربناسیون افزایش یافته است. درخصوص عملکرد دوده سیلیس بر اساس تحقیقات Skjolsvold

[۳۲] و Grimaldi [۳۳] مشاهده گردید که استفاده از دوده سیلیس موجب افزایش عمق کرناسیون بتن شده است. Khan و Lynsdale [۳۴] گزارش نمودند که استفاده از دوده سیلیس اندکی عمق کرناسیون بتن را افزایش خواهد داد. براساس مطالعات P. Kulakowski [۳۵] درخصوص رفتار بتن حاوی دوده سیلیس (با آب به سیمان ۰/۳ الی ۰/۸ و مقدار دوده سیلیس صفر الی ۲۰ درصد) در برابر کرناسیون و ریسک خوردگی ناشی از آن مشاهده شد که برای نسبت های آب به مواد سیمانی معادل یا کمتر از ۰/۵، فرآیند کرناسیون توسط تخلخل طرح مخلوط و بتن سخت شده کنترل خواهد شد و مقدار مصرف $Ca(OH)_2$ خیلی تاثیرگذار نخواهد بود اما برای آب به سیمانهای بیشتر از ۰/۵ پارامتر کلیدی میزان CH موجود یا مصرف شده تعریف گردید. در همین تحقیق نتایج حاصل از خوردگی میلگردهای فولادی حاکی از آن است که تاثیر دوده سیلیس وابسته به مقدار جایگزینی آن دارد بطوریکه برای جایگزینی های کمتر از ۱۰ درصد دوده سیلیس مقاومت در برابر خوردگی را کاهش نخواهد داد بلکه می تواند تا حدی موجب افزایش مقاومت بتن در برابر خوردگی گردد اما برای جایگزینی های بیشتر از ۱۰ درصد نتایج حاکی از افزایش ریسک خوردگی ناشی از کرناته شدن بتن می باشد. درخصوص روباره Tori و Kawamura [۳۶] معتقدند که رفتار بتن حاوی روباره در برابر کرناته شدن مشابه با بقیه پوزولان ها می باشد بطوریکه آزمایش های آنها حاکی از آن است که عمق کرناسیون طبیعی بعد از یک سال برای بتن حاوی سرباره ۱/۳ میلیمتر محاسبه شده است در حالیکه همین عدد برای بتن شاهد ۰/۲ میلیمتر بدست آمده است. در مطالعه Gruyaert و همکاران بر روی کرناسیون مخلوط های حاوی روباره مشاهده شد که کرناسیون بتن با افزایش مقدار جایگزینی روباره افزایش خواهد یافت [۳۷]. مطالعات مختلف دیگری نیز حاکی از افزایش نرخ کرناسیون بتن حاوی روباره نسبت به سیمان معمولی می باشد [۳۸].

براساس مطالعات مختلف دیگری مطابق جدول ۱، مشاهده شده است که استفاده از پوزولان ها به دو دلیل عمده موجب کاهش مقاومت بتن در برابر کرناته شدن می گردد که عبارتند از: ۱) افزایش تخلخل خمیر سیمان در سنین اولیه (به دلیل کاهش مقدار کلینکر) و ۲) کاهش مقدار CH در خمیر سیمان به دلیل واکنش پوزولانی [۳۹]. همچنین مقاومت در برابر کرناسیون برای بتن حاوی مواد فعال شده با قلیایی ها نیز از خمیر سیمان معمولی کمتر گزارش شده است [۳۹].

جدول ۱- تاثیر مواد سیمانی مختلف بر کرناته شدن بتن [۳۹]

منبع	نوع مواد سیمانی	مقدار جایگزینی (%)	مقاومت در برابر کرناته شدن
[۳۰،۶۸،۳۵،۸۵،۹۲،۹۳]	خاکستر بادی	۱۰-۷۰	کاهش
[۹۴]	خاکستر بادی	۰-۴۰	کاهش
[۶۸،۳۴]	روباره	۰-۸۵	کاهش
[۹۵،۹۴]	دوده سیلیس	۰-۲۰	کاهش
[۶۸]		۵-۱۰	افزایش
[۹۶]	نانو و پودر سیلیس	۰-۵	افزایش

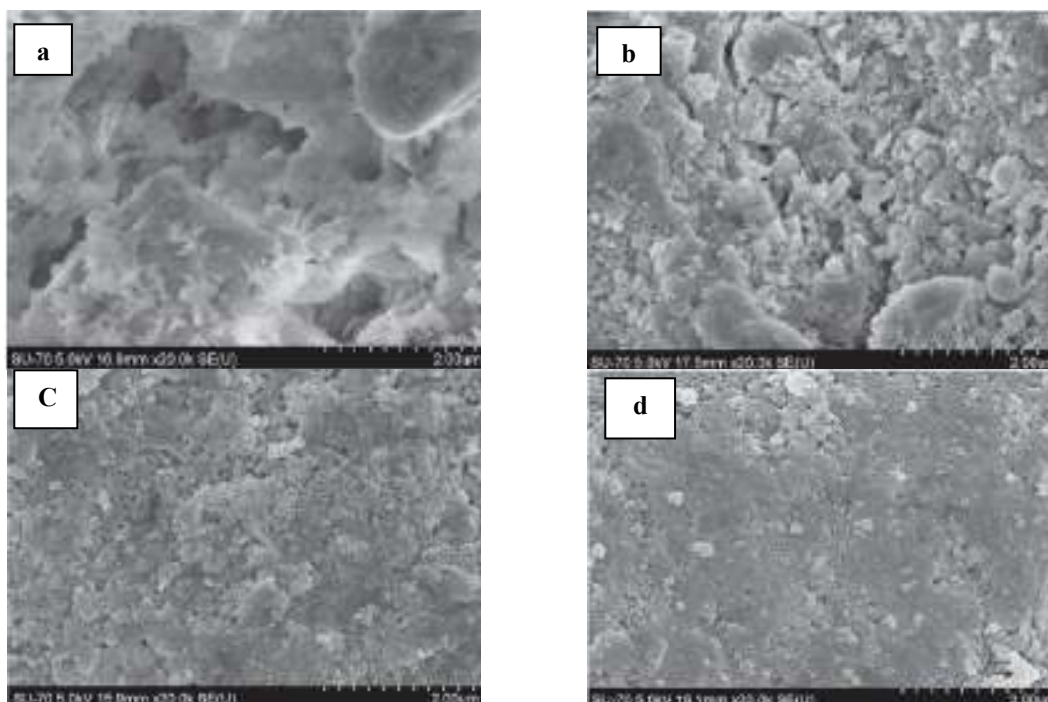
۴. تاثیر کرناته شدن بر ریزساختار بتن

براساس مطالعات مختلف مشاهده شده است که در نتیجه کرناسیون خمیر سیمان، تخلخل خمیر سیمان دستخوش تغییراتی خواهد شد که مطالعات مختلف نشان داده این تغییرات یا در جهت کاهش تخلخل و کاهش اتصال و ارتباط میان حفرات خمیر سیمان خواهد بود (در خصوص خمیر سیمان پرتلند) [۴۰-۴۴] و یا در جهت افزایش تخلخل کلی در مخلوط خمیر سیمان به همراه پوزولان خواهد بود [۴۵-۴۶] (خمیر سیمان های آمیخته). براساس مطالعات موجود کرناسیون موجب کاهش نفوذپذیری و تخلخل و افزایش مشخصات مکانیکی مخلوط های سیمانی خواهد شد [۴۷-۴۹]. بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات موجود، مشخص شده است که گاز CO_2 قادر خواهد بود تا با پرتلندایت و ژل CSH واکنش داده و موجب کرناته شدن هر دو شود [۵۰]. براساس تحقیقات Borges [۵۱] درخصوص میزان مشارکت CSH در تشکیل کلسیت مشاهده کرد که کرناته شدن CSH در مخلوطهایی که دارای CH اولیه کمتری هستند (همچون جایگزینی زیاد سرباره) بسیار بیشتر است.

تاثیر کرناسیون بر تخلخل خمیر سیمان: بر اساس مطالعات Leemann و همکارانش مشاهده شد که با کرناته شدن ملات یا خمیر سیمان، ساختار حفرات موئینه تغییر یافته و با تشکیل کلسیت ($CaCO_3$) و تجزیه C-S-H عملاً تخلخل آزمونه در لایه کرناته شده کاهش خواهد یافت با این تفاوت که

حفرات موئینه درشت تر خواهند شد (در حالیکه مشاهدات حاکی از آن است که برای آزمون‌های روباره عکس آن اتفاق افتاده است). درشت شدن حفرات موئینه ممکن است که به تشکیل سیلیکا ژل‌های اضافی به دلیل تجزیه CSH مرتبط گردد [۵۲] و می‌تواند بر انتشارپذیری موثر واقع شود بطوریکه با کربناته شدن خمیر سیمان مقدار نفوذپذیری و انتشار گاز اکسیژن برای آزمون‌های مختلف افزایش یافته است. همین رفتار و افزایش انتقال گاز اکسیژن پس از کربناته شدن برای نفوذ آب نیز مشاهده گردیده است [۵۳]. Ngala و [۵۲] معتقدند که کربناسیون موجب تغییر ساختار حفرات خمیر سیمان خواهد شد بطوریکه تخلخل کلی کاهش می‌یابد اما نسبت حفرات موئینه بزرگ (دارای قطر بزرگتر از ۳۰ نانومتر) افزایش می‌یابد به همین منظور ضریب انتشارپذیری یون کلراید بعد از کربناسیون افزایش خواهد یافت.

به جهت مقایسه ریزساختار بتن کربناته نشده با آزمون‌های بتنی کربناته شده با درصد‌های مختلف از غلظت گاز CO_2 از تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است. مطابق تصاویر موجود (شکل ۱)، مشاهده می‌گردد که آزمون‌های کربناته نشده حاوی هیدرات‌ها و ژل CSH می‌باشد که بصورت منظم همراه با تخلخل و حفرات موئینه تشکیل شده است. مقدار حفرات موجود در آزمون‌ها شاهد توسط تخلخل سنج جیوه ای (MIP) برابر با ۱۱/۲ درصد محاسبه گردید. با مشاهده تصویر آزمون بتنی در معرض گاز CO_2 با غلظت ۱۰ درصد مشاهده می‌گردد که بافت آزمون‌ها متراکم تر و حفرات توسط $CaCO_3$ پر شده اند بطوریکه در این حالت تخلخل آزمون‌ها توسط آزمون نفوذ جیوه (MIP) برابر ۹/۸ درصد محاسبه شد. به همین صورت بافت بتن برای آزمون‌ها در معرض غلظت گاز CO_2 ۲۰ و ۵۰ درصد متراکم تر شده و حفرات تا حد زیادی توسط محصولات کربناسیون پر شده اند بطوریکه میزان تخلخل آزمون‌های بتنی به ترتیب ۸/۷ و ۸/۱ درصد محاسبه گردید [۵۴].



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از آزمون بتنی (a) کربناته نشده (b) کربناته شده تحت معرض گاز CO_2 با غلظت ۱۰ درصد (c) کربناته شده تحت معرض گاز CO_2 با غلظت ۲۰ درصد و (d) کربناته شده تحت معرض گاز CO_2 با غلظت ۵۰ درصد [۵۴]

تأثیر کربناسیون بر خصوصیات انتقالی خمیر سیمان: کربنات کلسیم که محصول فرآیند کربناسیون خمیر سیمان می‌باشد از حلالیت اندکی برخوردار است و در مسدود کردن حفرات (حتی الامکان در مراحل ابتدایی کربناسیون) مشارکت فعالی خواهد داشت [۵۵]. هرچند رخداد انواع ریزترک‌ها کار را برای پیش بینی تغییر در خصوصیات انتقال مایعات و گازها از درون خمیر سیمان کربناته شده سخت خواهد کرد [۵۵]. در همین راستا Houst و Wittmann مشاهده کردند که آزمون‌های کربناته شده نسبت به آزمون‌های کربناته نشده از جذب آب کمتری برخوردارند [۵۵]. Ngala و Page [۵۲] مشاهده کردند که آزمون‌های مورد مطالعه پس از کربناته شدن از ضرایب انتشارپذیری یون کلراید بیشتری (در حدود دو برابر) در مقایسه با آزمون‌ها

های کربناته نشده برخوردار هستند. همچنین آزمون‌های کربناته شده دارای ضریب نفوذ اکسیژن بیشتری نسبت به آزمون‌های شاهد می‌باشند. Borges و همکاران [۵۵] متوجه شدند که آزمون‌های حاوی ۷۵ الی ۹۰ درصد روبراره در اثر کربناته شدن دچار ترک‌های گسترده شده‌اند و به همین دلیل نفوذ اکسیژن در آنها افزایش یافته است. در واقع با رخداد کربناسیون به دلیل کاهش تخلخل کلی بتن، کربناسیون در درجه اول موجب کاهش نفوذپذیری خواهد شد و در ادامه با افزایش نسبت حفرات موئینه با اندازه بزرگتر از ۳۰ نانومتر، موجب تغییر توزیع حفرات در سطح بتن خواهد شد [۵۶]. به علت افزایش تخلخل موئینه، ادامه فرآیند کربناسیون موجب افزایش انتشارپذیری یونها از طریق ماتریس سیمانی و نهایتاً موجب افزایش نفوذپذیری خواهد شد. همه این اتفاقات می‌تواند موجب جمع‌شدگی ناشی از کربناسیون و در ادامه ایجاد ریزترک‌ها در سطح بتن نیز شود.

تغییرات مشخصات مکانیکی: به نظر می‌آید که کربناسیون بتن منجر به افزایش اندکی در مقاومت فشاری و کششی می‌گردد [۵۵]. محققین معتقدند که دلیل این افزایش به کاهش تخلخل و تغییرات ساختاری در ژل CSH مربوط می‌شود. به نظر می‌آید در نتیجه تغییرات نامبرده شده مدول الاستیک بتن نیز تغییر یابد و اندکی افزایش نشان دهد. از طرفی دیگر کربناسیون سطوح بتنی موجب به اشتباه انداختن ما در نتایج آزمون‌های غیر مخرب همچون چکش اشمیت خواهد شد بطوریکه معمولاً سطح کربناته شده از بازگشت بیشتری برخوردار بوده و به اشتباه مقاومت بیشتری گزارش خواهد شد.

تأثیر کربناسیون بر جمع‌شدگی و ترک خوردگی ناشی از کربناسیون: گاهی کربناسیون خمیرسیمان منجر به جمع‌شدگی آن خواهد شد [۵۵]. مکانیزم جمع‌شدگی ناشی از کربناسیون در حال حاضر خیلی مشخص نیست و همواره در حال نقد و بررسی می‌باشد بطوریکه عده‌ای معتقدند که این نوع جمع‌شدگی ناشی از کربناسیون ژل CSH می‌باشد [۵۵] در حالیکه تعدادی دیگر معتقدند که حداقل بخشی از آن ناشی از کربناته شدن CH می‌باشد [۵۷]. Sereda و Swenson معتقدند [۵۷] که مکانیزم جمع‌شدگی ناشی از کربناسیون CH مشابه با مکانیزم جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن می‌باشد در واقع در این حالت نیز عامل جمع‌شدگی گرادیان رطوبتی است بطوریکه با کربناته شدن CH، علاوه بر کرنات کلسیم مقداری آب درون حفرات تشکیل می‌گردد که این رطوبت در لایه تشکیل شده از کرنات کلسیم در مجاورت CH می‌ماند و رطوبت‌های خارج از این لایه به دلیل شرایط محیطی تبخیر و خشک می‌گردد بنابراین گرادیان رطوبتی بوجود آمده منجر به ترک خوردگی خواهد شد. Chen و همکاران [۵۸] معتقدند که جمع‌شدگی ناشی از کربناسیون، در واقع جمع‌شدگی ناشی از کلسیم زدایی ژل CSH است. همانطور که پیش‌تر توضیح داده شد کربناسیون ژل CSH با کاهش نسبت Ca/Si همراه است. در این حالت درجه پلیمریزاسیون به دلیل از بین رفتن یون کلسیم در لایه داخلی برای نسبت Ca/Si کمتر از ۱/۲ افزایش می‌یابد. بنابراین شکل هندسی آن از حالت فراکتال ($Ca/Si=1.07$) بصورت صفحه‌ای ($Ca/Si<1.01$) درخواهد آمد. همچنین کلسیم زدایی موجب تغییر در مقدار گروه‌های هیدروکسیل خواهد شد. بنابراین دلیل اصلی جمع‌شدگی در این مکانیزم پلیمریزاسیون زنجیره سیلیکاتی در ژل CSH می‌باشد.

۵. عوامل موثر بر نرخ کربناته شدن بتن

بطور کلی نفوذ CO_2 به داخل بتن وابسته به پارامترهای مختلفی همچون غلظت CO_2 ، دمای محیط، تخلخل و مقدار رطوبت حفرات موئینه خمیرسیمان و پارامترهای دیگر که در ادامه بصورت مفصل توضیح داده خواهد شد وابسته می‌باشد [۵۵]. به عنوان یک اصل کلی، مطمئن‌ترین آزمون جهت شناسایی و تحقیق بر روی کربناسیون بتن، قرار دادن آزمون‌های بتنی در محیط طبیعی و کربناته شدن آنها در طول زمان است که متأسفانه زمان بر خواهد بود به همین دلیل در اکثر تحقیقات از روش‌های تسریع شده استفاده شده است. به عنوان مثال در نرم افزار DURACRETE [۵۹] از غلظت ۲ درصد حجمی برای CO_2 استفاده شده است. در استاندارد اروپایی EN ۱۳۲۹۵ ادعا شده است که محصولات تشکیل یافته ناشی از کربناسیون تسریع یافته بتن تحت غلظت ۱ درصدی از CO_2 و دمای (21 ± 2) درجه سلسیوس و رطوبت نسبی (60 ± 10) با محصولات تشکیل یافته از آزمون‌هایی که بطور طبیعی کربناته شده‌اند یکسان است.

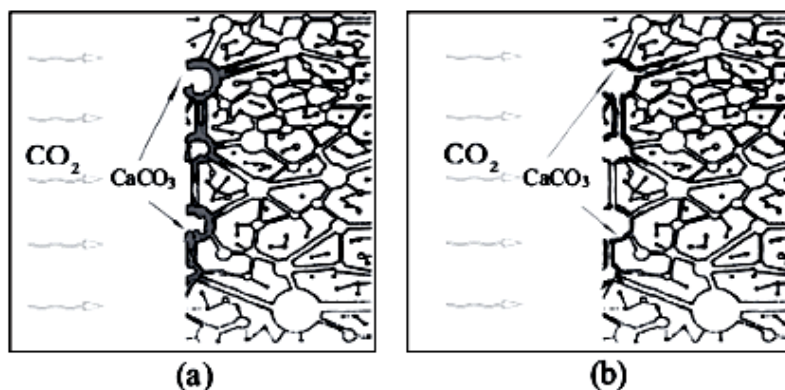
ساختار و اجزای بتن: در حال حاضر هیچگونه رابطه‌ای میان اجزاء طرح مخلوط بتن و انتشارپذیری گاز CO_2 موجود نمی‌باشد. تنها رابطه موجود این است که بطور کلی انتشارپذیری CO_2 در مخلوط‌های سیمانی کندتر از اکسیژن انجام می‌پذیرد [۵۳]. Leeman و همکارانش درخصوص رابطه میان کربناسیون بتن و ضریب نفوذپذیری گاز اکسیژن در حالت کلی رابطه منظمی پیدا نکردند بطوریکه به عنوان مثال برای طرح حاوی روبراره (S-65) کمترین نفوذ اکسیژن و در عین حال بیشترین ضریب کربناسیون بدست آمد. بنابراین متأسفانه در حال حاضر هیچگونه رابطه منظمی میان طرح اختلاط بتن و ضریب کربناسیون در بتن موجود نمی‌باشد اما در حالت کلی اثبات شده است که ضریب انتشار CO_2 در بتن آهسته‌تر از O_2 می‌باشد [۴۵].

دما: بطور کلی افزایش دما باعث می‌شود تا همه واکنش‌ها سرعت یابند. در مورد کربناته شدن وضع کمی فرق خواهد کرد زیرا افزایش دما چنانچه همراه با کاهش رطوبت در بتن باشد می‌تواند موجب کاهش کربناته شدن گردد.

رطوبت: در دنیا جهت بررسی مقاومت بتن در برابر کربناته شدن معمولاً از آزمون های تسریع شده با درصد های مختلف CO_2 و رطوبت نسبی ۵۰ الی ۷۰ درصد استفاده می شود که بطور قطع به دلیل تسریع فرآیند نسبت به آزمون های واقعی دارای مقداری خطا خواهد بود [۵۳]. نرخ کربناسیون در بتن به نرخ نفوذ CO_2 به داخل حفرات بتن و همچنین میزان رطوبت نسبی حفرات مؤئینه در خمیر سیمان وابسته است. نرخ نفوذ و انتشار گاز CO_2 در هوا تقریباً ۱۰۰۰۰ برابر آب می باشد بنابراین برای رطوبت های نسبی کم (کمتر از ۵۰ درصد) انتشار CO_2 در بتن بسیار بالاتر است اما رطوبت کافی برای انجام واکنش موجود نمی باشد. بنابراین همواره رطوبت نسبی بین ۵۰ الی ۷۰ درصد برای کربناته شدن بتن مطلوب است. کربناسیون بتن به پارامترهای مختلفی وابسته است به عنوان مثال برای بتنی با نسبت آب به سیمان ۰/۶ مقدار کربناسیون بتن بعد از ۱۵ سال ۱۵ میلیمتر محاسبه شده است در حالیکه برای همین بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ جهت کربناته شدن به میزان ۱۵ میلی متر نیاز به مدت زمان ۱۰۰ سال می باشد [۶۰]. محققین مختلفی معتقدند که عمق کربناسیون بتن بطور مستقیم با کیفیت بتن وابسته می باشد به عنوان مثال افزایش نفوذپذیری بتن می تواند منجر به افزایش عمق کربناسیون بتن گردد [۶۱-۶۲]. Bohm و Muntean معتقدند که کربناسیون بتن شدیداً وابسته به میزان تخلخل بتن می باشد زیرا تخلخل های بتن همان مسیرهای نفوذ CO_2 به داخل بتن می باشند [۶۳]. هرچند این نظریه برخلاف نتایج حاصل از مطالعات Schutter و Audenaert می باشد [۶۴]. بر اساس نتایج مطالعات Roziere و همکارانش میان عمق کربناسیون بتن و پارامترهای دیگری همچون تخلخل بتن، انتشار یون کلراید و نفوذپذیری در برابر گاز هیچگونه ارتباطی موجود نمی باشد [۶۵].

غلظت گاز CO_2 : درخصوص تاثیر غلظت گاز CO_2 بر نفوذ و انتشار آن به داخل بتن، بطور کلی نرخ نفوذ و انتشار گاز CO_2 به داخل بتن مادامیکه غلظت گاز CO_2 کمتر از ۲۰ درصد باشد، با افزایش غلظت CO_2 افزایش می یابد. دلیل اصلی برای این اتفاق این است که هم انتشار گاز CO_2 به داخل بتن و هم سرعت واکنش شیمیایی در نتیجه فرآیند پیش رونده کربناسیون با افزایش های زیاد غلظت CO_2 (بیشتر از ۲۰ درصد) کاهش می یابند. درخصوص غلظت گاز CO_2 در تحقیقات مختلف موجود در ادبیات فنی (مطابق جدول ...)، محققین اندکی از شرایط محیطی طبیعی و یا غلظت نرمال CO_2 در اتمسفر (۰/۰۳ درصد) در تحقیقات خود بهره برده اند و بیشتر مطالعات بر پایه مطالعات آزمایشگاهی و غلظت های زیاد یا خیلی زیاد می باشد. بر اساس مطالعات انجام شده توسط Dhire و همکاران اثبات شده است که بین نتایج آزمون هایی که در شرایط نرمال (غلظت CO_2 برابر با ۰/۰۳۵ درصد) کربناته شده اند با آزمون هایی که تحت غلظت ۴ درصدی از CO_2 کربناته شده اند تفاوت چندانی موجود نمی باشد. Castellote و همکارانش [۵۴] به بررسی تغییرات شیمیایی و تحلیل فازهای تشکیل شده بر روی آزمون های واقع در غلظت های ۳ تا ۱۰۰ درصد از گاز CO_2 پرداختند و نتایج حاصل را با آزمون هایی که بطور طبیعی در غلظت ۰/۰۳ درصدی کربناته شده بودند مقایسه نمودند. نتایج آزمون ها نشان داد که کربناته شدن آزمون ها منجر به یک پلیمریزاسیون پیش رونده از ژل CSH شده و منجر به تشکیل یک ژل کلسیم سیلیکات اصلاح شده و کربنات کلسیم شده است. در واقع کربناسیون CSH و CH همزمان انجام شده و پلیمریزاسیون CSH بعد از کربناته شدن با افزایش غلظت CO_2 افزایش یافته است بطوریکه وقتی غلظت ها از ۱۰ به ۱۰۰ می رسد تقریباً همه CSH ناپدید شده است. بنابراین با تمام این تفاسیر مطابق شکل ۲، زمانیکه یک آزمون بتنی در معرض غلظت های زیادی از گاز CO_2 قرار می گیرد در مرحله اول نفوذ و انتشار گاز به داخل بتن با سرعت صورت می پذیرد در همین مرحله با انجام واکنش های شیمیایی با همان سرعت ذکر شده و تشکیل محصولات حاصل از کربناسیون عملاً حفرات مؤئینه در سطح بتن از محصولات هیدراسیون پر شده و اجازه نفوذ و انتشار بیشتری از گاز CO_2 به داخل بتن داده نمی شود و فرآیند کربناسیون به تدریج کند و کندتر خواهد شد در حالیکه برای غلظت های کمتر مطابق شکل ۲، فرآیند نفوذ و انجام واکنش های شیمیایی با سرعت کمتری انجام می شود بنابراین گاز CO_2 به راحتی به لایه های داخلی خمیر سیمان نفوذ خواهد کرد و عمق کربناسیون با گذشت زمان بیشتر و بیشتر خواهد شد.

نوع سیمان: نوع سیمان هم از جمله پارامترهایی است که بر روی روند کربناتاسیون نقش به سزایی دارد به طوری که گنجایش بتن به منظور تثبیت کردن گاز دی اکسید کربن متناسب با میزان قلیائیتی است که بتن دارد. از آنجایی که بخش اعظم قلیائیت بتن مربوط به هیدروکسید کلسیم می باشد لذا با افزایش هیدروکسید کلسیم سرعت کربناتاسیون کاهش خواهد یافت. کربناته شدن بتنی هایی که در آنها از سیمان معمولی استفاده می شود نسبت به بتن هایی که از سیمان ضد سولفات، سیمان با حرارت زایی کم و یا درصدی از پوزولان استفاده می کنند کمتر مشاهده می شود. دلیل این امر این است که زمانی که از سیمان پرتلند معمولی استفاده می کنیم میزان C_2S در سیمان معمولی (به عنوان یکی از اجزای اصلی به منظور تولید هیدروکسید کلسیم در فرآیند هیدراتاسیون سیمان) بیشتر از سیمان ضد سولفات و سیمان با حرارت زایی کم خواهد بود به همین منظور در سیمان پرتلند معمولی انتظار تشکیل هیدروکسید کلسیم بیشتر و کربناته شدن بیشتری خواهیم داشت.



شکل ۲- مکانیزم نفوذ و انتشار گاز CO_2 به داخل بتن برای (a) غلظت های زیاد از CO_2 و (b) برای غلظت های کم از CO_2

تاثیر عمل آوری: براساس گزارش های موجود در ادبیات فنی مشاهده شده است که شرایط عمل آوری بتن با/بدون خاکستر بادی بر عمق کربناسیون بتن موثر می باشد (شکل ۲). بر اساس تحقیقات انجام شده مشاهده گردید که ۷ روز عمل آوری داخل آب به همراه ۲۱ روز عمل آوری در اتاق با رطوبت ۷۵ الی ۸۵ درصد بهترین شرایط برای کاهش کربناسیون و ۲۸ روز عمل آوری داخل آب بدترین شرایط عمل آوری به لحاظ کربناسیون بتن خواهد بود [۵۵].



شکل ۲- تاثیر عمل آوری بر عمق کربناسیون بتن- ردیف بالا عمل آوری با رطوبت ۵۰ درصد، ردیف پایین ۲۴ ساعت عمل آوری داخل آب

Balaysac و همکارانش مشاهده کردند که با افزایش مدت عمل آوری از ۱ به ۳ روز، عمق کربناسیون کاهش یافته است [۶۶]. از طرف دیگر Bai و همکاران [۶۷] گزارش نمودند که عمل آوری با آب موجب کوچکتر شدن حفرات موئینه در بتن و نهایتاً کاهش جذب موئینه و عمق کربناسیون در بتن می گردد. محققین دیگری [۶۸] مشاهده کردند که با عمل آوری در آب عمق کربناسیون بتن نصف خواهد شد.

شرایط رویارویی المان بتنی: شرایط محیطی همچون رطوبت نسبی، غلظت گاز CO_2 و دمای محیط نقش بسزایی در کربناسیون مواد پایه سیمانی دارند. در مراجع مختلف بارها ذکر شده است که رطوبت مطلوب برای رخداد کربناسیون بین ۵۰ الی ۷۰ درصد می باشد [۵۵]. نرخ انتشار گاز CO_2 وابسته به فشار گاز و مکانیزم انتقال آن به داخل بتن خواهد بود [۵۵]. بطور کلی با افزایش رطوبت از ۶۰ درصد، پیشرفت کربناسیون بتن کاهش خواهد یافت [۴۵]. در تحقیقات Leeman و همکارانش مشاهده شد که ضریب انتشار CO_2 برای کلیه طرح هایی که در شرایط طبیعی اما زیر سایبان قرار داشتند بطوریکه در معرض تر و خشک شدن های ناشی از عوامل جوی قرار نداشتند از مخلوط هایی که در شرایط طبیعی و در تماس با برف و باران بودند کمتر محاسبه گردیده است و این تفاوت بخصوص برای مخلوط های حاوی دوده سیلیس و روباره بیشتر از بقیه احساس شده است. آنها معتقدند که علت کاهش ضریب کربناسیون بتن و ملات در ناحیه تماس با عوامل جوی نسبت به ناحیه محافظت شده و زیر سایبان، افزایش رطوبت موجود در حفرات بتن می باشد. همچنین گزارش شده است که از آنجائیکه مخلوط های حاوی دوده سیلیس و روباره دارای حفرات ریز بیشتری نسبت به طرح شاهد می باشند بنابراین برای یک رطوبت نسبی مشخص، در حفرات موئینه این طرح ها مقدار رطوبت بیشتری ناشی از فرآیند جذب موئینه تجمع یافته و سرعت کربناسیون در آنها کاهش بیشتری خواهد یافت. در مرحله خشک شدن باز به دلیل نفوذپذیری کم در این طرح ها، رطوبت موجود به سختی و برای مدت زمان طولانی قادر خواهد بود تا منافذ و حفرات موئینه را ترک کند به همین دلیل باز شرایط محیا خواهد شد تا کربناسیون برای این طرح ها با سرعت کمتری اتفاق افتد [۴۵].

۶. تاثیر کربناسیون بر پیوند یون‌های کلراید

پدیده کربناسیون در بتن همانگونه که پیش تر توضیح داده شد موجب کاهش pH بتن و نهایتاً از بین رفتن لایه محافظ بر روی میلگرد فولادی خواهد شد بنابراین میلگردهای مدفون در بتن به سرعت خورده خواهند شد. از طرف دیگر آنچه کربناته شدن بتن را همزمان با نفوذ یون‌های کلراید با اهمیت می‌کند مکانیزم آزاد شدن یون‌های کلراید مقید شده به دلیل کربناسیون بتن و بنابراین انتشار مجدد یون‌های کلراید به داخل بتن این بار با گرادیان غلظتی بیشتر می‌باشد [۶۹]. مطالعات انجام شده در زمینه مطالعه نحوه آزاد شدن یون‌های کلراید و انتشار مجدد آنها به داخل بتن به دلیل کربناسیون محدود به سه نوع روش و فرآیند کلی می‌شوند که عبارتند از:

- (۱) آزمون‌ها ابتدا کربناته شده و سپس در معرض یون‌های کلراید قرار داده می‌شوند: به عنوان نمونه Hassan و همکارانش سه آزمون‌ه خمیر سیمانی را ابتدا کربناته کرده و سپس در معرض غلظت‌های مختلف از یون کلراید قرار دادند و در انتها مشاهده کردند که هیچگونه پیوندی از یون‌های کلراید در مخلوط‌های سیمانی انجام نگرفته است. در تحقیق دیگری Saillio و همکاران [۶۹] نیز به نتیجه مشابهی رسیدند؛
- (۲) آزمون‌ها ابتدا در تماس با یون‌های کلراید قرار گرفته و پس از آن کربناته خواهند شد: در این روش که به حالت طبیعی بیشتر نزدیک می‌باشد تحقیقات Suryavanshi [۶۹] نشان داده است که ابتدا یون‌های کلراید توسط فاز آلومیناتی خمیر سیمان (C₃A) جذب شده و پیوند یافته و نمک فریدل تشکیل می‌گردد. در ادامه با کربناته شدن خمیر سیمان (از آنجائیکه پایداری نمک فریدل وابسته به pH خمیر سیمان می‌باشد) حلالیت نمک فریدل افزایش یافته و یون‌های کلراید پیوند یافته دوباره آزاد خواهند شد بنابراین در این حالت کربناسیون موجب کاهش ظرفیت مقید سازی یون‌های کلراید خواهد شد اما اینکه چه مقدار دقیقاً مشخص نمی‌باشد. در این حالت بر اساس مطالعات And Zhu [۶۹] و Yoon [۶۹] مشاهده شد که با کربناته شدن بتن ظرفیت مقید سازی به ۲۵ درصد مقدار اولیه کاهش خواهد یافت؛
- (۳) یون کلراید همراه ساخت آزمون‌ها وارد مخلوط شده و آزمون‌ه همزمان در معرض کربناته شدن قرار می‌گیرد. در این حالت نیز نتایج تحقیقات حاکی از آزادسازی یون‌های مقید یافته و افزایش یون کلراید آزاد می‌باشد [۶۹].

بر اساس مطالعات Liu و همکاران [۶۹] مشاهده گردید که کربناته شدن آزمون‌ه‌های بتنی که در معرض یون کلراید در محیط اتمسفریک بودند منجر به کاهش پیوند یون‌های کلراید شده است بطوریکه برای آزمون‌ه‌های حاوی ۱۵ درصد خاکستر بادی، ظرفیت مقیدسازی یون‌های کلراید از ۱۳ درصد به ۳ درصد تقلیل یافته است. تمامی محققین دلیل این کاهش پیوند یون‌های کلراید را مربوط به آزاد شدن یون‌های پیوند یافته (در واقع از بین رفتن نمک فریدل) می‌دانند.

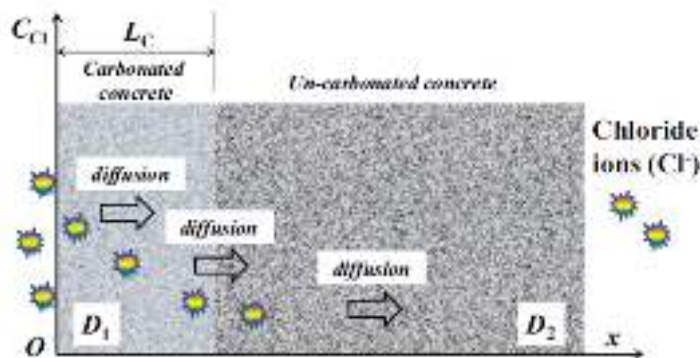
کربناسیون نقش مهمی بر ریزساختار و پیوند یون‌های کلراید خواهد داشت بطوریکه بخصوص زمانیکه از پوزولان استفاده می‌شود با تشکیل کربنات کلسیم و فازهای آلومینو سیلیکاتی موجب کاهش مقدار پرتلندایت، CSH و فازهای AFm و Aft خواهد شد. همچنین کربناسیون موجب کاهش مقدار پیوند یون‌های کلراید با سطوح ماتریس سیمان خواهد شد در همین راستا زمانیکه کربناسیون بصورت کمرنگ صورت می‌پذیرد بطور معمول سه حالت پیش خواهد آمد: (۱) بین یون کلراید و کربنات جهت واکنش با AFm رقابت پیش می‌آید از آنجائیکه کربناسیون زودتر رخ می‌دهد فاز مونوکربوآلومینات در ابتدا تشکیل خواهد شد اما با افزایش غلظت یون کلراید، غلظت مونوکربوآلومینات کاهش و نمک فریدل افزایش می‌یابد (به دلیل جانشینی یونی). اگرچه در مقایسه با مخلوطی که از ابتدا کربناته نشده مقدار نمک فریدل تشکیل یافته کمتر خواهد بود؛ (۲) فرآیند آهک زدایی از AFm و Aft در حین کربناسیون، موجب حرکت آلومینیوم به سمت CSH خواهد شد. از آنجائیکه آلومینیوم به سه یا چهار اتم سیلیسیم متصل می‌باشد دارای پایداری زیادی است و می‌تواند مقداری یون کلراید را جذب و مقید نماید؛ (۳) اتصال آلومینیوم به CSH بارالکتریکی بر روی سطح CSH را تغییر داده و منفی تر خواهد کرد بنابراین CSH مجبور خواهد شد تا مقداری از یون‌های منفی کلراید خود را از دست بدهد. زمانیکه کربناسیون شدید و پررنگ می‌باشد دیگر آثاری از پرتلندایت مشاهده نخواهد شد و مقدار AFm بسیار کم خواهد بود به همین منظور تشکیل نمک فریدل عملاً غیرممکن خواهد شد. همچنین در کربناسیون کامل کربنات کلسیم، پرتلندایت رو آنچنان احاطه نموده که عملاً اجازه تجزیه و تشکیل نمک فریدل داده نمی‌شود. از طرف دیگر بارمنفی ناشی از آلومینیوم بر روی سطوح CSH آنقدر زیاد خواهد بود که کلیه یون‌های کلراید از روی سطح CSH آزاد خواهند شد و عملاً پیوند فیزیکی باقی نخواهد ماند [۷۰].

۷. بررسی تاثیر همزمان رخداد کربناسیون و نفوذ یون کلراید بر خوردگی سازه های بتنی

همواره برای برخی از سازه‌ها با شرایط خاص، همچون سازه‌هایی که در ناحیه اتمسفریک در محیط های دریایی واقع شده‌اند، کربناسیون و نفوذ یون کلراید به داخل بتن ممکن است بصورت همزمان یا متوالی صورت پذیرد. مطالعات مختلف نشان داده است که اصولاً این گونه سازه ها باید برای مکانیزم همزمان کربناته شدن و نفوذ یونهای کلراید بررسی و طراحی شوند زیرا که عملاً مطالعه مستقل هر یک از این پدیده ها منجر به نتایجی غیر دقیق خواهد شد. بطور کلی ترکیب کربناسیون و یون کلراید در عمل در دو حالت رویارویی مشاهده خواهد شد: (۱) یونهای کلراید موجود در هوا (سازه های موجود در ناحیه اتمسفریک و واقع در محیط های دریایی) و (۲) رویارویی بتن با نمک های یخ زدا (سازه های در معرض یخبندان). در حالت اول قطرات آب آلوده به یون کلراید که از آب دریا یا منبع دیگری ناشی می شوند بر روی سطوح بتنی مواجه با محیط آلوده به گاز CO_2 قرار می گیرند. در حالت دوم منبع یون کلراید نمک های یخ زدا هستند که در فصول سرد سال بر روی سازه های بتنی درگیر با یخبندان ریخته می شوند و طبیعتاً سطح بتن در مواجهه همزمان با یون کلراید و گاز CO_2 موجود در اتمسفر قرار می گیرد. اگرچه Costa و Appleton [۷۱] گزارش نمودند که بتن در ناحیه جذر و مد، آنجا که بتن دارای رطوبت بالایی می باشد، همچنان در معرض نفوذ شدید یون کلراید و کربناسیون می باشد. شواهد مختلفی حاکی از آن است که همزمانی کربناسیون و نفوذ یونهای کلراید منجر به تسریع خوردگی میلگردهای مدفون در سازه های بتنی خواهد شد [۷۱].

بطور کلی عملکرد بتن در برابر تهاجم همزمان یون های کلراید و کربناته شدن بتن بسیار پیچیده می باشد. کربناته شدن بتن به طرز قابل ملاحظه ای قادر خواهد بود تا نفوذ یون های کلراید موجود در هوا را تحت تاثیر قرار دهد. به همین دلیل بررسی تاثیر همزمان این دو پدیده از اهمیت بسزایی برخوردار خواهد بود. بر اساس مطالعات مختلفی اثبات شده است که استفاده از خاکستر بادی در سیمان و بتن منجر به افزایش تخلخل خمیر سیمان در سنین اولیه خواهد شد و همین مسئله منجر به کاهش مقاومت بتن در برابر نفوذ یونهای کلراید و گاز CO_2 خواهد شد [۶۹]. براساس مطالعات Li و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۷۲] بر روی مطالعه همزمان نفوذ یونهای کلراید و کربناته شدن بتن گزارش شد که: (۱) کربناسیون بتن در حالت کلی به دلیل تاثیرات ترکیب شده ناشی از پر شدن حفرات موئینه، افزایش رطوبت در داخل حفرات و تغییر در جذب موئینه یون کلراید منجر به افزایش انتشارپذیری یونهای کلراید به داخل بتن خواهد شد؛ (۲) تاثیر کربناسیون بر انتشارپذیری یونهای کلراید برای شرایط رطوبتی متوسط و کم از حفرات موئینه تعیین کننده خواهد بود.

Negla و Page [۷۳] گزارش کردند که با کربناته شدن بتن، کربنات کلسیم درون حفرات موئینه بتن رسوب کرده و تخلخل کلی کاهش می یابد اما موجب افزایش حفرات موئینه با اندازه بزرگتر خواهد شد و همین موجب افزایش نفوذ و انتشار اکسیژن و یون کلراید به داخل بتن کربناته شده خواهد شد. در این حالت هدایت الکتریکی کاهش یافته و نفوذپذیری در برابر گاز افزایش خواهد یافت. از طرف دیگر کربناسیون موجب کاهش ظرفیت جذب یونهای کلراید خواهد شد زیرا در این حالت جاذب های یون کلراید به همراه CSH و نمک فریدل مصرف خواهند شد. بنابراین با شروع کربناسیون از سطح بتن، یونهای کلراید مقید شده آزاد شده و ایجاد یک گرادیان غلظتی در سطح بتن و نهایتاً افزایش نفوذ و انتشار یونها به داخل بتن را در بر خواهند داشت. اگرچه در حین این فرآیند به واسطه کربناته شدن پرتلندایت و CSH مقداری آب درون حفرات آزاد شده و میزان رطوبت درون حفرات بالا خواهد رفت. بنابراین مطابق شکل جهت مدل سازی همواره خصوصیات دولایه کربناته شده و کربناته نشده از یکدیگر تمیز داده شده و رفتار هر یک مستقلاً مورد مطالعه قرار می گیرد. (شکل ۳)



شکل ۳- تصویر شماتیک از مکانیزم نفوذ و انتشار یونهای کلراید در بتن کربناته شده

۸. نتیجه گیری

با توجه به مرور انجام شده بر خوردگی سازه های بتنی بر اثر رخدادهای همزمان کربناسیون و نفوذ یونهای کلراید به داخل بتن، موارد ذیل بصورت خلاصه به عنوان نتیجه گیری عنوان می شود:

- براساس مطالعات مختلف موجود در ادبیات فنی مشاهده شده است که استفاده از پوزولان ها موجب کاهش مقاومت بتن در برابر کربناته شدن خواهد شد؛
- براساس مطالعات مختلف مشاهده شده است که در نتیجه کربناسیون خمیر سیمان، تخلخل خمیر سیمان دستخوش تغییراتی خواهد شد که مطالعات مختلف نشان داده که درخصوص سیمان معمولی این تغییرات در جهت کاهش تخلخل و کاهش اتصال و ارتباط میان حفرات خمیر سیمان خواهد بود و برای سیمان های آمیخته در جهت افزایش تخلخل کلی در مخلوط خمیر سیمان به همراه پوزولان خواهد بود؛
- با کربناته شدن ملات یا خمیر سیمان و با تشکیل کلسیت (CaCO_3) و تجزیه C-S-H عملاً تخلخل آزمون در لایه کربناته شده کاهش خواهد یافت اما حفرات موئینه درشت تر خواهند شد بطوریکه درشت شدن حفرات موئینه می تواند بر انتشارپذیری موثر واقع شود و نهایتاً با کربناته شدن خمیر سیمان مقدار نفوذپذیری و انتشار گاز اکسیژن افزایش یابد؛
- پارامترهای موثر بر کربناسیون بتن عبارتند از: نوع و اجزاء طرح مخلوط بتن، نوع سیمان، دما، رطوبت محیط، غلظت گاز CO_2 و در نهایت شرایط رویارویی المان بتنی؛
- کربناسیون موجب کاهش pH و در نهایت آزاد شدن یونهای کلراید پیوند یافته می شود بنابراین آزاد شدن یونها می تواند منجر به گرایان غلظتی در عمق لایه کربناته شده گردد و نفوذ و انتشار یونها به داخل بتن شدت می یابد؛
- در فرآیند نفوذ همزمان یونهای کلراید و کربناسیون، در حالت کلی کربناسیون بتن به دلیل تاثیرات ترکیب شده ناشی از پر شدن حفرات موئینه، افزایش رطوبت در داخل حفرات و تغییر در جذب موئینه یون کلراید منجر به افزایش انتشارپذیری یونهای کلراید به داخل بتن خواهد شد.

۹. مراجع

[۱] شکرچی زاده، محمد. چینی، مهدی. دوستی، علی. " خوردگی آرماتور در بتن " انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، چاپ اول ۱۳۹۷.

[۲] M. Castellote, C. Andrade, Modelling the carbonation of cementitious matrixes by means of the unreacted-core model, UR-CORE, Cem. Concr. Res. ۳۸ (۱۲) (۲۰۰۸) ۱۳۷۴-۱۳۸۴.

[۳] C.A. García-González, A. Hidalgo, C. Andrade, M.C. Alonso, J. Fraile, A.M. López-Periago, et al., Modification of composition and microstructure of Portland cement pastes as a result of natural and supercritical carbonation procedures, Ind. Eng. Chem. Res. ۴۵ (۱۴) (۲۰۰۶) ۴۹۸۵-۴۹۹۲.

[۴] M. Peter, A. Muntean, S. Meier, M. Böhm, Competition of several carbonation reactions in concrete: a parametric study, Cem. Concr. Res. ۳۸ (۱۲) (۲۰۰۸) ۱۳۸۵-۱۳۹۳.

[۵] H. Kuosa, R.M. Ferreira, E. Holt, M. Leivo, E. Vesikari. Effect of coupled deterioration by freeze-thaw, carbonation and chlorides on concrete service life. Cement & Concrete Composites ۴۷ (۲۰۱۴) ۳۲-۴۰

[۶] F. Pacheco Torgal, S. Miraldo, J.A. Labrincha, J. De Brito. An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC. Construction and Building Materials ۳۶ (۲۰۱۲) ۱۴۱-۱۵۰.

[۷] CISA, Corrosion control in Southern Africa, Corrosion Institute of Southern Africa (CISA), in: John J. McEwan (Ed.), Mintek South Africa, ۲۰۰۴, p. ۱۳۶. ISBN ۰-۶۲۰-۳۲۱۹۸-۹.

[۸] T. Shibata, Cost of corrosion in Japan, Corros. Sci. Technol. ۳۱ (۲) (۲۰۰۲) ۹۷-۱۰۲.

[۹] C. Volkan, Corrosion engineering: the effects and economic impact of corrosion (Chap ۱), Wiley-Scrivener, 2014. 287p.

[۱۰] NACE, Corrosion costs and preventive strategies in the United States FHWARD- ۰۱-156, NACE International, ۲۰۰۲, p. ۱۲. www.nace.org.

[۱۱] R.K. Dhir, P.C. Hewlett, Y.N. Chan, Near-surface characteristics of concrete: prediction of carbonation resistance, Mag. Concr. Res., ۴۱, ۱۹۸۹, pp. ۱۳۷-۱۴۳. No. 148, September.

- [۱۲] H. Cui, W. Tang, W. Liu, Z. Dong, F. Xing, Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms, *Constr. Build. Mater.* ۹۳ (۲۰۱۵) ۵۲۲-۵۲۷.
- [۱۳] H.-W. Song, S.-J. Kwon, Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, *Cem. Concr. Res.* ۳۷ (۲۰۰۷) ۹۰۹-۹۱۵.
- [۱۴] J.M. Chi, R. Huang, C.C. Yang, Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method, *J. Mar. Sci. Technol.* ۱۰ (۱) (۲۰۰۲) ۱۴-۲۰.
- [۱۵] J-K Kim, C-Y Kim, S-T Yi, Y. Lee, Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete, *Cem. Concr. Compos.* ۳۱ (۲) (۲۰۰۹) ۱۳۹-۱۴۴.
- [۱۶] V. Rostami, Y. Shao, A.J. Boyd, Carbonation curing versus steam curing for precast concrete production, *J. Mater. Civ. Eng.* (۲۰۱۲) ۱۲۲۱-۱۲۲۲.
- [۱۷] D.W.S. Ho, R.K. Lewis, The specification of concrete for reinforcement protection performance criteria and compliance by strength, *Cem. Concr. Res.* ۱۸ (۴) (۱۹۸۸) ۵۸۴-۵۹۴.
- [۱۸] E. Vesikari, Carbonation and Chloride Penetration in Concrete with Special Objective of Service Life Modelling by the Factor Approach, Research Report, VTT-R-04771-09, 2009, 39p. http://www.vtt.fi/files/sites/duraint/task_۵_carbonation_and_chloride_penetration_models.pdf (accessed Jan 2016).
- [۱۹] PCA, Types and causes of concrete deterioration, PCA R&D Serial No. ۲۶۱۷. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, ۲۰۰۲. <http://www.cement.org/>.
- [۲۰] W. Liu, H. Cui, Z. Dong, F. Xing, H. Zhang, T.Y. Lo, Carbonation of concrete made with dredged marine sand and its effect on chloride binding, *Constr. Build. Mater.* ۱۲۰ (۲۰۱۶) ۱-۹.
- [۲۱] Vesikari E, Ferreira RM. Frost deterioration process and interaction with carbonation and chloride penetration – analysis and modelling of test results. VTT research report, VTT-R-02782-11; 2011, p. 42.
- [۲۲] Kuosa H. Concrete durability field testing in Finland. In: Proceedings of Nordic concrete research NCR 2011, Finland; June 2011. p. 247-250.
- [۲۳] Vesikari E. Modeling of carbonation and chloride penetration interacted by frost damage in concrete. In: Proceedings of nordic concrete research NCR ۲۰۱۱, Finland; June ۲۰۱۱. p. ۲۵۵-۲۵۸.
- [۲۴] Holt E, Leivo M. Concrete durability based on coupled laboratory deterioration by frost, carbonation and chloride. In: Proceedings of nordic concrete research NCR ۲۰۱۱, Finland; June ۲۰۱۱. p. ۲۳۹-۲۴۲.
- [۲۵] NT Build ۴۹۲, Concrete, mortar and cement-based materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments; ۱۹۹۹. p. ۸.
- [۲۶] CEN/TR ۱۵۱۷۷, Testing the freeze-thaw resistance of concrete. Internal structural damage; April ۲۰۰۶. p. 34.
- [27] Park GK. Durability and carbonation of concrete. *Mag Korean Concr Inst* ۱۹۹۵;۷:۷۴-۸۱.
- [۲۸] J. Khunthongkeaw a, S. Tangtermsirikul a,* , T. Leelawat .A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete .*Construction and Building Materials* ۲۰ (۲۰۰۶) ۷۴۴-۷۵۳.
- [29] Ho D, Lewis R. Carbonation of concrete incorporating fly ash or a chemical admixture. In: First international conference on the use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete, vol. SP-۷۹. Montebello, Canada; ۱۹۸۲. p. ۳۳۳-۴۶.
- [۳۰] Kokubu M, Nagataki S. Carbonation of concrete with fly ash and corrosion of reinforcements in ۲۰ years tests. In: Third international conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, vol. SP-114. Trondheim, Norway, ACI; 1989. p. 315-29.
- [۳۱] Ogha H, Nagataki S. Prediction of carbonation depth of concrete with fly ash. In: Third international conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, vol. SP-114. Trondheim, Norway; 1989. p. 275-294.
- [32] Skjolsvold O. Carbonation depths of concrete with and without condensed silica fume. *ACI Special Publications SP-۹۱*; ۱۹۸۶. p. ۱۰۳۱-48.
- [۳۳] Grimaldi G, Carpio J, Raharinaivo A. Effect of silica fume on carbonation and chloride penetration in mortars. In: Mohammed Alasali, editor. Third CANMET/ACI international conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete; ۱۹۸۹. p. ۳۲۰-۳۴.
- [۳۴] Khan M, Lynsdale C. Strength, permeability, and carbonation of highperformance concrete. *Cem Concr Res* 2002;32:123-31.
- [۳۵] Marlova P. Kulakowski a,* , Fernanda M. Pereira b, Denise C.C. Dal Molin. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. *Construction and Building Materials* ۲۳ (۲۰۰۹) ۱۱۸۹-۱۱۹۵

- [۳۶] Torii K, Kawamura M. Pore structure and chloride permeability of concretes containing fly ash, blast furnace slag and silica fume. Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, vols. SP-132 and 1. Detroit: American Concrete Institute; ۱۹۹۲. p. ۱۳۵-۵۰.
- [۳۷] Elke Gruyaert, Philip Van den Heede, Nele De Belie. Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient – Effect of carbonation on the pore structure. Cement & Concrete Composites ۳۵ (۲۰۱۳) ۳۹-۴۸.
- [۳۸] G.G. Litvan, A. Meyer, Carbonation of granulated blast furnace slag cement concrete during twenty years of field exposure, ACI SP. ۹۱ (۲) (۱۹۸۶) ۱۴۴۵-۱۴۶۲.
- [۳۹] Warda Ashraf. Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities. Construction and Building Materials ۱۲۰ (۲۰۱۶) ۵۵۸-۵۷۰.
- [۴۰] G. Rimmelé, V. Barlet-Gouédard, O. Porcherie, B. Goffé, F. Brunet, Heterogeneous porosity distribution in Portland cement exposed to CO₂-rich fluids, Cem. Concr. Res. ۳۸ (۸) (۲۰۰۸) ۱۰۳۸-۱۰۴۸.
- [۴۱] C.A. García-González, A. Hidalgo, C. Andrade, M.C. Alonso, J. Fraile, A.M. López-Periago, et al., Modification of composition and microstructure of Portland cement pastes as a result of natural and supercritical carbonation procedures, Ind. Eng. Chem. Res. ۴۵ (۱۴) (۲۰۰۶) ۴۹۸۵-۴۹۹۲.
- [۴۲] P.H. Borges, J.O. Costa, N.B. Milestone, C.J. Lynsdale, R.E. Streatfield, Carbonation of CH and C-S-H in composite cement pastes containing high amounts of BFS, Cem. Concr. Res. ۴۰ (۲) (۲۰۱۰) ۲۸۴-۲۹۲.
- [۴۳] J. Han, Y. Liang, W. Sun, W. Liu, S. Wang, Microstructure modification of carbonated cement paste with six kinds of modern microscopic instruments, J. Mater. Civ. Eng. (۲۰۱۴).
- [۴۴] S. Pihlajavaara, Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement paste, Matér. Constr. ۱ (۶) (۱۹۶۸) ۵۲۱-۵۲۷.
- [۴۵] A. Leemann, P. Nygaard, J. Kaufmann, R. Loser, Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete, Cem. Concr. Compos. ۶۲ (۲۰۱۵) ۳۳-۴۳.
- [۴۶] L. De Ceukelaire, D. Van Nieuwenburg, Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete, Cem. Concr. Res. ۲۳ (۱۹۹۳) ۴۴۲-۴۵۲.
- [۴۷] Song HW, Kwon SJ. Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure. Cement Concrete Res ۲۰۰۷;۳۷(۶):۹۰۹-۱۵.
- [۴۸] Claisse PA, El-Sayad H, Shaaban IG. Permeability and pore volume of carbonated concrete. Aci Mater J 1999;96(3):378-81.
- [۴۹] Chang CF, Chen JW. Strength and elastic modulus of carbonated concrete. Aci Mater J ۲۰۰۵;۱۰۲(۵):۳۱۵-21.
- [۵۰] Peter MA, Muntean A, Meier SA, Böhm M. Competition of several carbonation reactions in concrete: a parametric study. Cement Concrete Res ۲۰۰۸;۳۸(۱۲):۱۳۸۵-۹۳.
- [۵۱] Borges PHR, Costa JO, Milestone NB, Lynsdale CJ, Streatfield RE. Carbonation of CH and C-S-H in composite cement pastes containing high amounts of BFS. Cement Concrete Res ۲۰۱۰;۴۰(۲):۲۸۴-۹۲.
- [۵۲] V. Ngala, C. Page, Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes, Cem. Concr. Res. ۲۷ (۷) (۱۹۹۷) ۹۹۵-۱۰۰۷.
- [۵۳] H. Kuosa a, R.M. Ferreira a,b,†, E. Holt a, M. Leivo a, E. Vesikari. Effect of coupled deterioration by freeze-thaw, carbonation and chlorides on concrete service life. Cement & Concrete Composites ۴۷ (۲۰۱۴) 32-40.
- [۵۴] Hongzhi Cui a, Waiching Tang b, Wei Liu a,†, Zhijun Dong c, Feng Xing a.. Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. Construction and Building Materials ۹۳ (۲۰۱۵) ۵۲۲-۵۲۷.
- [۵۵] Branko Šavija a,†, Mladena Lukovic .Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and Opportunities. Construction and Building Materials ۱۱۷ (۲۰۱۶) ۲۸۵-۳۰۱.
- [۵۶] S.E. Pihlajavaara, Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement paste, Mater. Constr. ۵۲ (۱۹۶۸) ۱-۵۲ (۶).
- [۵۷] E.G. Swenson, P.J. Sereda, Mechanism of the carbonatation shrinkage of lime and hydrated cement, J. Appl. Chem. ۱۸ (۴) (۱۹۶۸) ۱۱۱-۱۱۷.
- [۵۸] J.J. Chen, J.J. Thomas, H.M. Jennings, Decalcification shrinkage of cement paste, Cem. Concr. Res. ۳۶ (۵) (۲۰۰۶) ۸۰۱-۸۰۹.
- [۵۹] DuraCrete. Compliance testing for probabilistic design purposes (DuraCrete project document BE^{۹۵}-1347/R8). Netherlands: The European Union-Brite EuRam III; ۱۹۹۹.
- [۶۰] Wiering P. Long time studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure. In: RILEM symposium on durability of concrete under normal outdoor exposure. Hannover; ۱۹۸۴.

- [۶۱] Tam V, Wang K, Tam C. Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. *J Hazard Mater* ۲۰۰۸; ۱۵۲: ۷۰۳-۱۴.
- [۶۲] Brown JH. The effect of exposure and concrete quality: field survey results from some ۴۰۰ structures. In: *The ۵th international conference on the durability of materials and components*. Brighton; ۱۹۹۱. p. ۲۴۹-259.
- [۶۳] Muntean A, Böhm MA. Moving-boundary problem for concrete carbonation: global existence and uniqueness of weak solutions. *J Math Anal Appl* ۲۰۰۹; ۳۵۰: ۲۳۴-۵۱.
- [۶۴] Schutter G, Audenaert K. Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration. *Mater Struct* ۲۰۰۴; ۳۷: ۵۹۱-۶.
- [۶۵] Roziere E, Loukili A, Cussigh F. A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation. *Constr Build Mater* ۲۰۰۹; ۲۳: ۱۹۰-۹.
- [۶۶] Balayssac J, Detriche H, Grandet J. Effects of curing upon carbonation of concrete. *Constr Build Mater* 1995; 9: 91-5.
- [۶۷] Bai J, Wild S, Sabir B. Sorptivity and strength of air-cured and water-cured PC-PFA-MK concrete and the influence of binder composition on carbonation depth. *Cem Concr Res* ۲۰۰۲; ۳۲: ۱۸۱۳-۲۱.
- [۶۸] F. Pacheco Torgal a, S. Miraldo b, J.A. Labrincha b, J. De Brito c. An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC. *Construction and Building Materials* ۳۶ (۲۰۱۲) ۱۴۱-۱۵۰.
- [۶۹] Jun Liu, Qiwen Qi, Xiaochi Chen, Xiaodong Wang, Feng Xing, Ningxu Hana, Yijian He. Degradation of fly ash concrete under the coupled effect of carbonation and chloride aerosol ingress. *Corrosion Science* ۱۱۲ (۲۰۱۶) ۳۶۴-۳۷۲.
- [۷۰] Mickael Saillio, Véronique Baroghel-Bouny, Fabien Barberon. Chloride binding in sound and carbonated cementitious materials with various types of binder. *Construction and Building Materials* ۶۸ (۲۰۱۴) ۸۲-۹۱.
- [۷۱] Y. Wang, S. Nanukuttan, Y. Bai, P.A.M. Basheer. Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes. *Construction and Building Materials* 140 (2017) 173-183.
- [۷۲] Kefei Li, Fuyao Zhao, Yiming Zhang. Influence of carbonation on the chloride ingress into concrete: Theoretical analysis and application to durability design. *Cement and Concrete Research* ۱۲۳ (۲۰۱۹) ۱۰۵۷۸۸.