



مرکز تحقیقات ساختمان و سکن

۲۳۷

گروه سازه‌ها

در سازه های بتن مسلح



دکتر علی اکبر رمضانپور
مهندس رضا پاشایی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



کرناسیون در سازه‌های بتن مسلح

پژوهشگران: دکتر علی اکبر رمضانپور

مهندس رضا پاشایی

رمضانیاپور، علی اکبر

کربناسیون در سازه‌های بتن مسلح / علی اکبر رمضانیاپور، رضا پاشایی .. تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۵.

صفحه شمار گوناگون، مصور.. (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۲۳۷)

کتابنامه: ص. ۹۵

عنوان پشت جلد به انگلیسی: Carbonation in reinforced concrete structures

۱. بتن مسلح ۲. کربناسیون الف. پاشایی، رضا، نویسند همکار ب. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۲۳۷ ج. عنوان

۶۲۰/۱۳۷

TA۴۴۵

مصوبه شماره ۷۴/۱۸۵ چاپ کتاب، کمیته علمی انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن



مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

کربناسیون در سازه‌های بتن مسلح

پژوهشگران: دکتر علی اکبر رمضانیاپور

مهندس رضا پاشایی

نشریه شماره ۲۳۷، چاپ اول پاییز ۱۳۷۵

ویرایش، حروفچینی، گرافیک، چاپ: انتشارات مرکز

تعداد: ۱۰۰۰ نسخه

بها: ۲۰۰۰ ریال

کلیه حقوق چاپ و انتشار اثر به مرکز تعلق دارد

نشانی: بزرگراه شیخ فضل‌الله نوری، بین شهرک قدس و فرهنگیان صندوق پستی: ۱۶۹۶-۱۳۱۴۵

تلفن: ۸۲۵۵۹۴۲-۹ نمابر: ۸۲۵۵۹۴۱

پست الکترونیکی: BHRC@neda.net.ir

دفتر فروش: نرسیده به میدان ولی عصر، مجتمع اداری - تجاری ولی عصر، واحد ۸۲

پیشگفتار

پژوهش‌های علمی در جهان امروز جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند تا آنجا که تحقیق بعنوان بارزترین پدیده «توسعه» شناخته شده و هزینه‌های چشمگیری در کشورهای گوناگون صرف آن می‌گردد.

فعالیت‌های نظام‌یافته و خلاق در جهت افزایش اندوخته‌های علمی و فنی و استفاده از این اندوخته‌ها در طراحی و ابداع روشها و کاربردهای نوین، فرایند «تحقیق و توسعه» را شکل می‌بخشد.

در عصر کنونی، انجام تحقیقات کاربردی و هدف‌دار، رمز اصلی در پیشرفت علم و توسعه کشورها بوده است. در کشور ما نیز هدف اساسی تحقیق و پژوهش، باید معطوف بر حل مشکلات اجرایی حال و آینده و اندیشه و کوشش در جهت یافتن راه حل‌های مناسب برای مسائل اساسی کشور باشد.

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تلاش برای دستیابی به اهداف فوق و آغاز حرکت‌های اساسی برای این مهم را در اولویت برنامه‌های پژوهشی خود قرار داده و انجام پژوهش‌های هدف‌دار جهت تثبیت حلقه واسطه بین «علم و اجرا» و «پژوهش و کارگاه»، همراه با آینده‌نگری و اندیشه‌های نوآورانه به عنوان اصلی‌ترین سیاست پژوهشی خود بکار می‌گیرد. با تأکید بر این باور که به منظور دستیابی به اهداف ارزشی فوق نتایج طرح‌های پژوهشی می‌باید در اختیار جامعه علمی، فنی و صنعتی کشور قرار گیرد، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، پیوسته تلاش کرده است که نتایج طرح‌های پژوهشی خود را به گونه‌ای نظام یافته منتشر نموده و در اختیار جامعه قرار دهد.

حاصل این تلاش گسترده، انتشار و چاپ دهها کتاب و گزارش است که از بدو فعالیت «مرکز» به چاپ رسیده است. مجموعه حاضر تحت عنوان **(کرناسیون در سازه‌های بتن مسلح)** حاصل یکی از طرح‌های پژوهشی است که امید می‌رود با انتشار این مجموعه‌ها، مرکز بتواند بیش از پیش در خدمت اهداف میهن اسلامی مان قرار گیرد.

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن



فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	پیشگفتار
۱۱	مقدمه
۱۳	۱- کلیات
۱۳	۱- ۱ مختصری از مراحل کربناسیون
۱۴	۱- ۲ کاهش دوام
۱۵	۱- ۳ کربناسیون و خوردگی
۱۵	۱- ۴ میزان دی اکسیدکربن محیط
۱۶	۱- ۵ کربناسیون و سولفاتاسیون
۱۶	۱- ۶ ترکیب کلی مطالب
۱۸	۲- مفاهیم فیزیک و شیمی
۱۸	۲- ۱ روند شیمیایی کربناسیون
۱۸	۲- ۲ اختصارات به کار رفته
۱۸	۲- ۳ مکانیزم واکنش‌ها
۲۱	۲- ۴ پروفیل PH
۲۲	۲- ۵ تغییرات مربوط به روند واکنش
۲۳	۲- ۶ بیان فیزیکی کربناسیون
۲۳	۳- اندازه‌گیری عمق کربناسیون
۲۳	۳- ۱ روشهای موجود
۲۳	۳- ۲ معرفهای درجه اسیدی

۲۶	۳-۳ آنالیز کانی شناسی
۲۶	۳-۴ آنالیز حرارتی
۲۶	۳-۵ انتشار اشعه ایکس
۲۷	۳-۶ پرتونگاری نوترونی
۲۷	۳-۷ طیف سنجی مادون قرمز
۲۷	۳-۸ آنالیز شیمیایی
۲۷	۴- نفوذپذیری و انتشارپذیری بتن
۲۸	۴-۱ ساختار فضاهای خالی بتن
۲۸	۴-۲ قانون اول فیک و انتشارپذیری بتن
۲۹	۴-۳ نفوذپذیری
۳۰	۴-۴ اثرات کیفیت سطح بتن
۳۰	۴-۵ ارتباط انتشارپذیری و عمق کربناسیون
۳۱	۴-۶ ارتباط نفوذپذیری و عمق کربناسیون
۳۲	۵- عوامل مؤثر بر کربناسیون
۳۲	۵-۱ سن بتن
۳۴	۵-۲ مشخصات سنگدانه
۳۵	۵-۳ رفتار بتن‌های حاوی مواد بوزولانی
۳۶	۵-۴ غلظت دی اکسیدکربن
۳۷	۵-۵ میزان سیمان، نوع و کیفیت آن
۳۸	۵-۶ آب و هوا و شرایط محیطی
۴۰	۵-۷ روشهای اجرا
۴۰	۵-۸ اثر ترک
۴۳	۵-۹ عمل آوردن
۴۴	۵-۱۰ چگالی
۴۵	۵-۱۱ خرابی ناشی از آتش سوزی
۴۵	۵-۱۲ هندسه عضو
۴۶	۵-۱۳ اسلامپ
۴۶	۵-۱۴ مقاومت
۴۸	۵-۱۵ تنش‌های فشاری و کششی
۴۸	۵-۱۶ کیفیت سطح بتن
۴۹	۵-۱۷ مایل بودن سطح

۵۰	۵- ۱۸ نسبت آب به سیمان.....
۵۱	۵- ۱۹ اهمیت نسبی عوامل مؤثر بر کرناسیون.....
۵۲	۶- اثر کرناسیون بر بتن.....
۵۳	۶- ۱ سنگدانه‌ها.....
۵۳	۶- ۲ کلرید.....
۵۳	۶- ۳ خزش.....
۵۴	۶- ۴ چگالی.....
۵۴	۶- ۵ پتانسیل الکتریکی.....
۵۵	۶- ۶ یخ زدن و آب شدن.....
۵۵	۶- ۷ مدول الاستیسیته.....
۵۵	۶- ۸ مدول گسیختگی.....
۵۵	۶- ۹ حجم فضاهاى خالی.....
۵۶	۶- ۱۰ جمع شدگی (انقباض).....
۵۶	۶- ۱۱ مقاومت.....
۵۸	۶- ۱۲ حمله سولفات‌ها.....
۵۸	۶- ۱۳ سختی سطح.....
۵۸	۶- ۱۴ سیمان هیدراته نشده.....
۵۹	۷- پیش‌بینی عمق تئوریکى کرناسیون.....
۵۹	۷- ۱ فرمول هامادا و فرمول تصحیح شده کیچیتانى.....
۶۱	۷- ۲ انتشار و واکنش دی‌اکسیدکربن.....
۶۳	۷- ۳ تأثیر محیط و رسیدن به حد نهایی.....
۶۵	۷- ۴ تغییرات دیگر در رابطه جذر زمان.....
۶۶	۷- ۵ در نظر گرفتن مقاومت فشاری.....
۶۸	۸- آزمایشهای تسريع شده کرناسیون.....
۶۹	۸- ۱ مراحل ساخت دستگاه.....
۷۲	۸- ۲ روند آزمایشها و نتایج به دست آمده.....
۸۱	۸- ۳ بحث و بررسی نتایج.....
۸۹	۸- ۴ رابطه پیشنهادی برای تعیین عمق کرناسیون.....
۹۵	منابع و مراجع.....



مقدمه

یکی از خرابیهای شایع در سازه‌های بتن مسلح «خوردگی فولاد» می‌باشد. این خرابی هر سال، خسارات هنگفتی به ساختمانها وارد می‌کند. در کشور ما نیز «خوردگی فولاد» صدمات شدیدی به ساختمانهای بتنی مخصوصاً در سواحل و جزایر جنوبی کشور وارد کرده است. یکی از عوامل مؤثر در خوردگی فولاد کربناسیون می‌باشد. علیرغم اینکه کربناسیون به تنهایی نمی‌تواند باعث خوردگی فولاد گردد، لیکن زمینه را برای این خرابی فراهم می‌سازد. بالا بودن غلظت گازدی‌اکسیدکربن در مناطق شهری و افزایش روز افزون آن در سالهای آتی می‌تواند تهدید فزاینده‌ای برای ساختمان‌های بتنی باشد.

در بخش اول این کتاب از مکانیزم کربناسیون، اندازه‌گیری عمق کربناسیون، نفوذپذیری بتن، عوامل مؤثر بر میزان کربناسیون، تأثیر این پدیده بر خواص بتن و پیش‌بینی عمق کربناسیون سخن به میان آورده شده است:

در این بخش، مرجع شماره (۴) به عنوان منبع اصلی انتخاب شده است و منابع دیگر به ترتیب ذکر شده‌اند.

بخش دوم این مجموعه حاصل کاری تحقیقاتی است. باتوجه به اینکه این پدیده بسیار کند بوده و در مدت زمان طولانی بر سازه اثر می‌کند، لذا سرعت بخشیدن به این پدیده و مطالعه خواص بتن در کوتاه مدت همواره مورد توجه محققین بوده است. به منظور تسریع عمل کربناسیون دستگاهی برای حصول به این منظور ساخته شد و با انجام آزمایشهای مختلف عوامل مؤثر بر این پدیده مورد بررسی قرار گرفت.



۱- کلیات

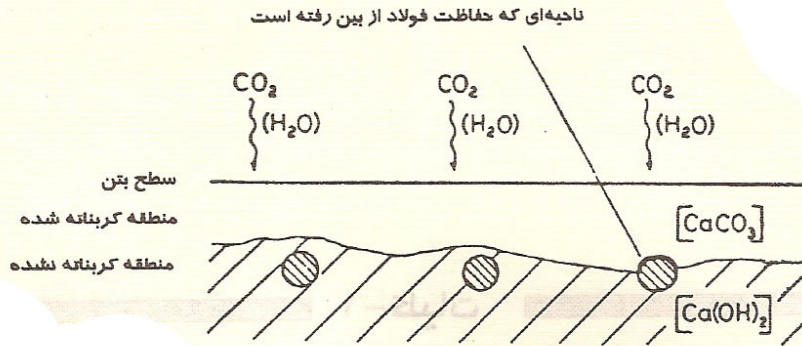
۱-۱ مختصری از مراحل کربناسیون

واژه کربناسیون معمولاً برای بیان اثرهای دی اکسیدکربن موجود در اتمسفر بر روی سیستم‌های دارای مواد سیمانی (بتن معمولی، بتن مسلح، ملات و دوغاب ...) به کار می‌رود به بتنی که تحت این پدیده قرار گرفته باشد، بتن کربناته شده می‌گوییم و در غیر این صورت، آن بتن را کربناته نشده می‌نامیم.

اعضاء تشکیل دهنده یک سازه بتنی دارای درجات متغیر نفوذپذیری گاز و مایع هستند. اگرچه میزان گاز دی اکسیدکربن در هوا کم است، اما از اجزاء اصلی اتمسفر می‌باشد و ممکن است از سطح عضو به داخل آن نفوذ کند. این نفوذ داخلی همراه با یک واکنش با اجزاء تشکیل دهنده بتن به خصوص هیدروکسید کلسیم موجود در سیمان می‌باشد. به مرور زمان بتن شروع به دولایه شدن با مشخصات فیزیکی و شیمیایی مختلف می‌کند. گسترش لایه کربناته شده بستگی به عواملی چون سن، شرایط خارجی و کیفیت بتن دارد. وجه تمایز اصلی در این لایه‌ها میزان PH می‌باشد.

PH بتن غیر کربناته در حدود ۱۲/۶ است. در حالی که PH بتن کربناته شده ممکن است تا حدود ۸/۳ نیز کاهش پیدا کند. اگر چه در مطالب فوق فقط به شرح مختصر روند کربناسیون پرداختیم، اما باید به دو موضوع مهم توجه کنیم. اولاً در روند کربناسیون به نظر می‌رسد گاز دی اکسیدکربن بایک ماده جامد وارد واکنش می‌شود، در صورتی که گاز دی اکسیدکربن ابتدا باید در یک لایه مرطوب حل شود و سپس با قلیایی‌ها به صورت محلول وارد واکنش شود. ثانیاً جسم بتن دارای PH نیست، بلکه همان‌طور که کمیته ریل^۱ مطرح کرده است، PH آب در حال تعادل با جسم بتن اندازه‌گیری می‌شود.

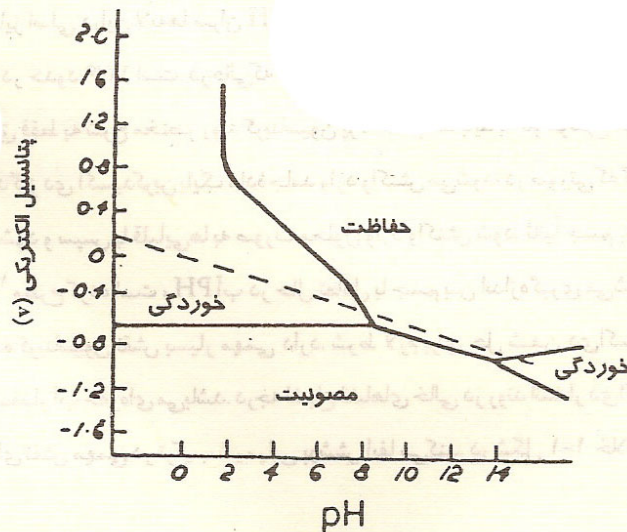
آب حفره‌ای در پدیده کربناسیون نقش بسیار مهمی دارد. شرط لازم برای حل شدن دی اکسیدکربن و اجرای فرآیند کربناسیون وجود حداقل مقدار آب حفره‌ای می‌باشد. درجه اشباع فضاهای خالی در روند انتشار دی اکسیدکربن بسیار مؤثر است. همچنین PH آب حفره‌ای نقش مهمی در ترکیب شیمیایی پوشش ایفا می‌کند. در شکل ۱-۱ خلاصه‌ای از مراحل کربناسیون نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ نمایش ساده مراحل کربناسیون

۲-۱ کاهش دوام

پیشروی جزئی یا کلی کربناسیون در پوشش آرماتورها می‌تواند دوام سازه را با از بین بردن لایه محافظت در اطراف فولاد به مخاطره انداخته و عمر مفید آن را کاهش دهد. مادامی که PH اطراف فولاد در حد معینی باقی بماند، لایه محافظ حراست می‌شود. این حد را می‌توان از نمودار پوربیکس^۱ به دست آورد. فرم ساده شده این نمودار در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ - نمودار ساده شده پوربیکس برای فولاد

نمودار فوق حدود حفاظت فولاد را بر حسب PH و پتانسیل الکتریکی نشان می‌دهد. کربناسیون تهدیدی برای کم شدن PH می‌باشد که در این حالت، لایه محافظ از بین می‌رود و در صورت ایجاد شرایط مساعد، خوردگی آغاز می‌شود. به دلیل غیر همگن بودن بتن، پیشروی کربناسیون الزاماً مقدار ثابتی نیست. کم شدن موضعی حالت غیر فعال^۱ می‌تواند به اندازه از بین رفتن آن در تمامی طول فولاد خطرناک باشد. دلیل این امر آن است که امکان دارد یک پیل خوردگی بین‌اند در منطقه غیر منفعل^۲ و کاتد در منطقه منفعل برقرار شود.

۳-۱ کربناسیون و خوردگی

یکی از عوامل شروع خوردگی بتن مسلح، کربناته شدن آن است. این مسئله ایمنی سازه را به مخاطره می‌اندازد و همانطور که گفته شد، خوردگی فولادها جزو علل اصلی خرابی ساختمانها و سازه‌های بتن مسلح تحت بهره‌برداری می‌باشد. شایان توجه است که شرایط بروز کربناسیون یا خوردگی در محیط‌های مختلف یکسان نیست. شرایط بهینه در هر مکان متفاوت است. به‌طور خلاصه، شرایط رطوبت نسبی که کربناسیون در آن بیشترین اثر را دارد ۵۰٪ تا ۷۰٪ ذکر شده است. در رطوبت خیلی بالا منافذ پر از آب است، بنابر این دی‌اکسیدکربن به سختی نفوذ می‌کند. در رطوبت خیلی پایین نیز نفوذی صورت نمی‌گیرد، زیرا همان‌طور که بیان شد گاز دی‌اکسیدکربن ابتدا بایستی در یک لایه مرطوب حل شود و سپس نفوذ کند. البته در رطوبت بیش از ۸۰٪ هنگامی که اکسیژن و آب در دسترس باشد، مسئله خوردگی جدی است. یونیدویاذیای^۳ و سوامی^۴ نشان داده‌اند که خشک‌ترین بتن‌ها هم آب‌مویین^۵ کافی برای ایجاد خوردگی دارند.

در مورد بتن کربناته شده نیز بیان کرده‌اند که میزان خوردگی با مقاومت الکتریکی نسبت معکوس دارد که با تغییر درصد رطوبت دچار تحول بسیار می‌شود. به گفته داوسن^۶ اگر به واسطه کربناسیون، PH کوچکتر از عدد ۹ شود، حمله یون کلرید تشدید می‌گردد. به‌طور خلاصه، فولادها مورد حمله کربناسیون واقع نمی‌شوند، اما مکانیزم دفاع ذاتی آنها کاهش می‌یابد.

۴-۱ میزان دی‌اکسیدکربن محیط

میزان دی‌اکسیدکربن موجود در اتمسفر حدود ۳۳۰ ppm می‌باشد که این مقدار بستگی به مشخصات محیط دارد. این مقدار در کنار دریا ممکن است تا ۳۰۰ ppm هم کاهش یابد. در حالی که در فضاهای داخلی مقدار ۵۰۰ ppm دور از انتظار نیست. توتی^۷ برای فضاهای داخلی مقدار ۱۰۰۰ ppm را گزارش کرده و دریک مورد به‌خصوص عدد ۱۰۰۰۰ را ثبت شده نیز است.

1 - Passive

2 - Depassive

3 - Bandyopadhyay

4 - Swamy

5 - Capillary Water

6 - Dawson

7 - Tuuti

چندین عامل در میزان دی اکسید کربن محیط اثر می گذارند. قسمت اعظم دی اکسید کربن اتمسفر ناشی از سوختن مواد نفتی، فرآیند اکسیداسیون، تجزیه مواد معدنی کربن دار و پوسیده شدن خاک نباتی زمین می باشد. مقداری از این دی اکسید کربن با فیلتر شدن به وسیله گیاهان و درختان و ذخیره شدن در اقیانوس ها خنثی می گردد. میزان دی اکسید کربن در قرن آینده از 220 ppm تا 1600 ppm تخمین زده می شود، اما باید توجه کرد که اگر تعادل کلی به صورت صحیح انجام نشود، احتمال رسیدن به مقادیر بالاتر نیز وجود دارد. این مسئله تهدیدی برای دوام ساختمانها و سازهایی است که دارای بتن مسلح نمایان می باشند.

۱-۵ کربناسیون و سولفاتاسیون

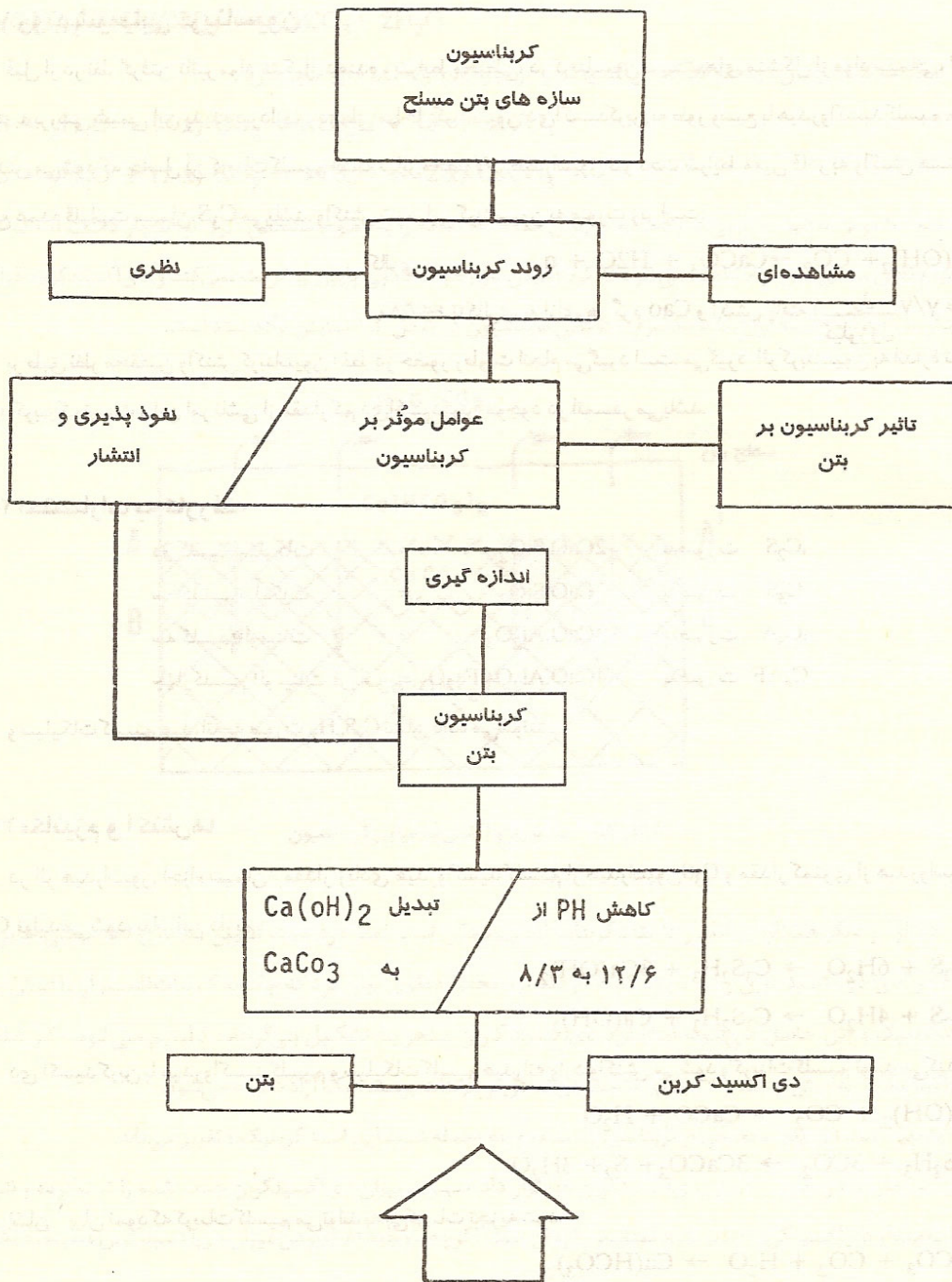
تیسر^۱ طی گزارشی اظهار داشت که به موازات پدیده کربناسیون، در اثر واکنش دی اکسید سولفور اتمسفر با هیدرواکسید کلسیم موجود در بتن، سولفات کلسیم تولید می گردد. اثر سولفاتاسیون مانند کربناسیون کاهش PH می باشد. این اثر در جایی که هوا دارای آلودگی خیلی سنگین باشد، قابل توجه است. غلظت دی اکسید سولفور در اتمسفر چندین هزار برابر کمتر از دی اکسید کربن آن است.

م. ساکوتا^۲ طی گزارشی بیان کرد که در مناطق شهری توکیو و اوساگا گاز سولفور ناشی از خروج دود اتومبیل هادر اتمسفر پخش می شود و PH آب باران را به مقدار زیادی کاهش می دهد. نفوذ این آب باران به داخل بتن، کربناسیون بتن را تسریع می کند. بر طبق نتایج به دست آمده، PH آب باران در توکیو در حدود ۳ اندازه گیری شده و چندین نمونه از بتن های با سطح نمایان نیز که مورد حمله واقع شده اند، مشاهده شد. است. [۵]

شیشل^۳ به عنوان یک یادداشت اختراآمیز مقادیر بالای دی اکسید سولفور را که سبب تشکیل میکروپ سیمان می شوند، ثبت کرد. در نتیجه نیروهای در هم گسیختگی حاصل از میکروپ سیمان می توان سبب خرابی ریز ساختار سیمان بشود و اجازه نفوذ بیشتر دی اکسید کربن را نیز بدهد.

۱-۶ ترتیب کلی مطالب

مطالب عمده ای که در خصوص کربناسیون بایستی بررسی شود، شامل: بررسی و اکشن های شیمیایی، اندازه گیری عمق کربناسیون، نفوذ پذیری و انتشار پذیری بتن، عوامل مؤثر بر کربناسیون، تأثیر کربناسیون بر بتن و پیش بینی عمق کربناسیون می باشد که ترتیب کلی مطالب این بخش در شکل ۱-۳ آورده شده است.

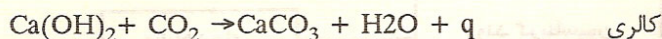


شکل ۱-۳- روند کربناسیون و ترتیب کلی مطالب

۲- مفاهیم فیزیکی و شیمیایی

۱-۲ روند شیمیایی کربناسیون

قبل از در نظر گرفتن تاثیر مواد تشکیل دهنده و شرایط محیطی، در کربناسیون سیستم‌های متشکل از مواد سیمانی، لازم است به بررسی شیمی این پدیده بپردازیم. در طی مراحل کربناسیون دی‌اکسیدکربن به طور وسیع با هیدرواکسید کلسیم وارد واکنش می‌شود که حاصل آن کربنات کلسیم است. سایر محصولات هیدراسیون نیز تحت شرایط معین قادر به واکنش هستند. منبع عمده قلیانیت سیمان C_3S می‌باشد. واکنش شیمیایی کربناسیون به صورت زیر است:



$q \approx 580$ کالری به ازای هر گرم CaO و واکنش یافته $(\frac{\text{مول}}{\text{کیلوژول}} \approx 7/7)$

بر طبق نظر محققین واکنش کربناسیون فقط در حضور رطوبت انجام می‌گیرد است. می‌گیرد. اثر کربناسیون به اندازه‌ی تاثیر اسید کربنیک نیست و این امر ناشی از مقدار کم دی‌اکسیدکربن موجود در اتمسفر می‌باشد.

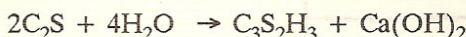
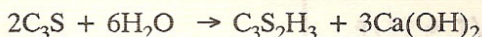
۲-۲ اختصارات به کار رفته

دو کلسیم سیلیکات	=	$2CaO.SiO_2$	به صورت C_2S
سه کلسیم سیلیکات	=	$3CaO.SiO_2$	به صورت C_3S
سه کلسیم آلومینات	=	$3CaO.Al_2O_3$	به صورت C_3A
چهار کلسیم آلومینات فریک	=	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	به صورت C_4AF

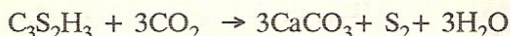
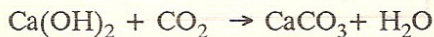
و سیلیکات کلسیم هیدراته به صورت $C_xS_yH_z$ نشان داده می‌شوند.

۳-۲ مکانیزم واکنش‌ها

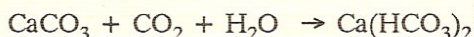
در اثر هیدراسیون اجزاء سیمان، مقدار زیادی هیدرواکسید کلسیم از هیدراسیون C_3S و مقدار کمتری از هیدرواسیون C_2S تولید می‌شود، بنابر این داریم:



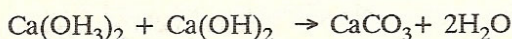
دی‌اکسیدکربن با هیدرواکسید کلسیم و سیلیکات کلسیم هیدراته وارد واکنش می‌شود و کربنات کلسیم تولید می‌کند



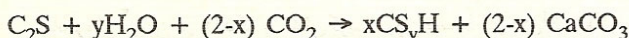
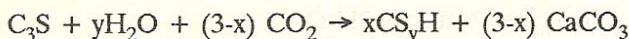
اشان^۱ بیان نمود که کربنات کلسیم می‌تواند به بی‌کربنات تجزیه شود.



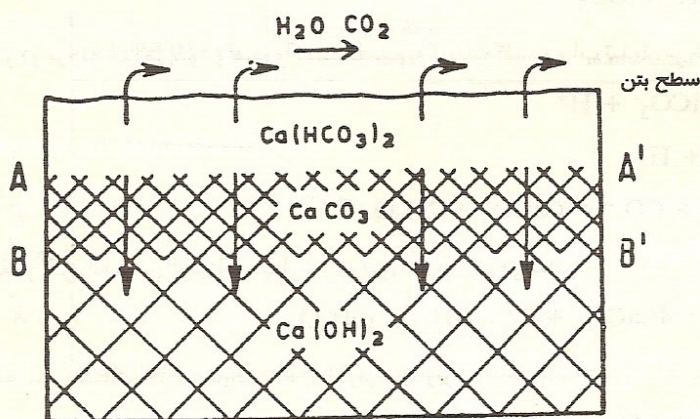
بعضی از بی کربنات ها شسته می شوند اما بعضی دیگر با هیدراکسید کلسیم ترکیب شده و به فرم کربنات کلسیم تبدیل می شوند.



به کمک اشعه ایکس دریافت شده اند که دی اکسید کربن بر اجزاء هیدراته نشده نیز تاثیر دارد



اشان با روش تحلیل حرارتی دریافت که می توان حد لایه کربناته را به وضوح مشخص کرد. او اظهار داشت آب در این مکانیزم نقش مهمی دارد و مشاهده می شود که کربناسیون در رطوبت نسبی پایین پیشرفت نمی کند و دی اکسید کربن قبل از واکنش باید به صورت محلول باشد. مکانیزم شیمیایی کربناسیون در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است.



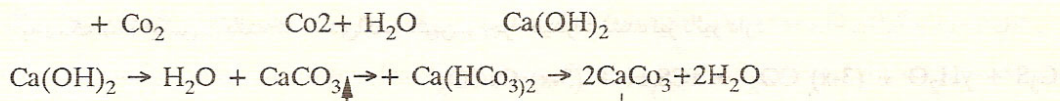
شکل ۱-۲ - مکانیزم واکنش شیمیایی کربناسیون

گنزالز^۱ و دیگر همکارانش اظهار داشتند کربنات کلسیم ممکن است فقط در قسمت تسریع شده رخ دهد، یعنی جایی که مقدار زیادی دی اکسید کربن و آب وجود دارد. درهند نیز محقق دیگری بیان کرد که چگونه کربنات کلسیم از واکنش بین اسید کربنیک و بتن حاصل می شود، اما نفوذ دی اکسید کربن منجر به تشکیل بی کربنات کلسیم می شود. اگر غلظت دی اکسید کربن به بیش از مقدار لازم برای نگه داشتن تعادل بی کربنات برسد، آهک آزاد شسته می شود.

بدیهی است این پدیده بحرانی از کربناسیون اتمسفری به «حمله شیمیایی اسید کربنیک» تغییر می یابد.

بونل^۲ سیمان را در معرض جریان دی اکسید کربن هوا قرار داد. سپس، میزان دی اکسید کربن جذب شده را ثبت کرده و نتیجه گرفت مقدار دی اکسید کربن جذب شده متناسب با زمان است. اگرچه با وجود ثابت بودن میزان دی اکسید کربن محیط، هنگامی

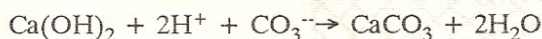
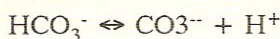
که دی اکسیدکربن در بتن به مقداری بحرانی می رسد، روند جذب آن کاهش می یابد. استویو^۱ خلاصه کاملی از واکنش کربناسیون را به صورت زیر ارائه کرده است:



جانگرممان^۲ بیان می کند که واکنش کربناسیون توسط گاز دی اکسیدکربن حل شده در رطوبت موجود در فضای خالی صورت می گیرد و سپس حمله به وسیله اسید کربنیک انجام می شود. تنها مقدار کمی دی اکسیدکربن با آب وارد واکنش می شود و تشکیل اسید کربنیک می دهد، که ۱/۰ درصد آن به یون های نیدروژن و کربن و بقیه به صورت مولکهای دی اکسیدکربن بدون تغییر در محلول باقی می ماند.



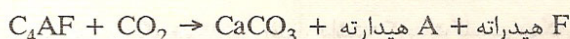
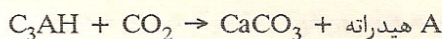
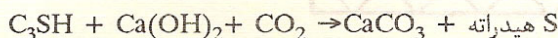
اسید کربنیک در دو مرحله جدا می شود و هیدرواکسید کلسیم به کربنات کلسیم و آب تبدیل می شود.



ونوات^۳ و الکساندر^۴ کربناته شدن آلومینات هیدراته را به صورت زیر بیان می کنند:



میرز^۵ نیز کربناته شدن تک تک اجزاء هیدراته شده را با فرمولهای زیر نشان می دهد:



با پیشرفت عمل کربناسیون، دی اکسیدکربن به سیلیکات های کلسیم، آلومینات ها و فریت ها یا نمک های هیدراته شده حمله می کند و فرم نهایی کربنات کلسیم، هیدرو سیلیکات و آلومینات، اسیدفریک و سولفو هیدرات کلسیم ایجاد می گردد. استینور^۶ بیان می کند که کربناسیون ابتدا به هیدروکسید کلسیم حمله می کند و هنگامی که PH کمتر از ۱۲/۴ شود به سایر ترکیبات نیز حمله می کند.

بنابراین، واکنش اصلی در روند کربناسیون، تبدیل هیدروکسید کلسیم و مقدار کمتری از سیلیکات هیدراته شده به کربنات

1 - Steopoe

2 - Jungermann

3 - Venvat

4 - Alexander

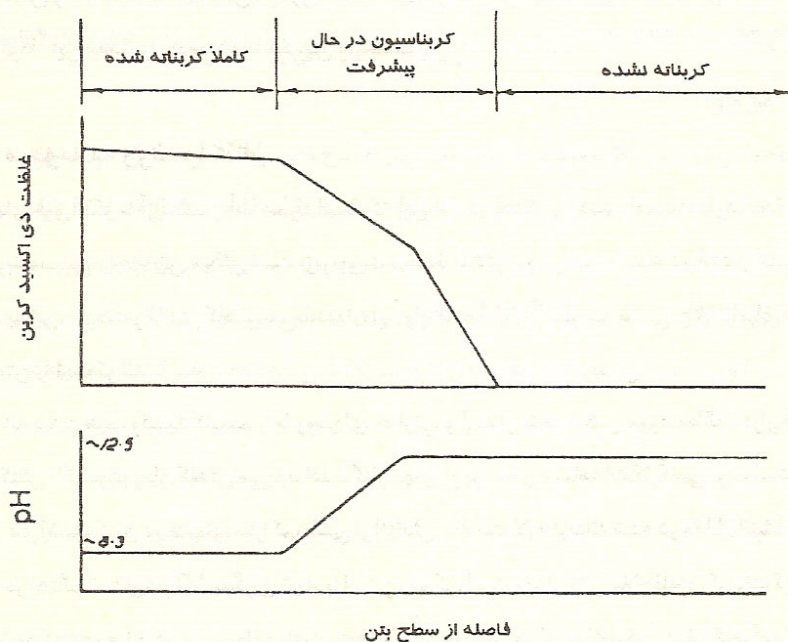
5 - Meyers

6 - Steinour

کلسیم است. مکانیزم واکنش نیازمند تجزیه دی اکسید کربن اتمسفر در آب حفره‌ای و مستلزم فرم ضعیفی از اسید کربنیک می‌باشد که به یون‌های هیدروژن و کربن تجزیه شود. کربناسیون سایر هیدرواکسیدها و ترکیبات هیدراته شده نیز امکان‌پذیر است، اما نقش کمی را در فرآیند کربناسیون ایفا می‌کند.

۲-۴ پروفیل PH

توضیح دیگری برای جنبه‌های شیمیایی پدیده کربناسیون، پروفیل PH است که در بتن کربناته شده و بتن کربناته نشده تفاوت دارد. کمیته اروپایی بتن تغییرات این پروفیل را به صورت شکل ۲-۲ نشان داده است. این شکل نشان دهنده چگونگی تغییرات PH در محدوده‌ای است که بتن در معرض پیشروی کربناسیون قرار گرفته است.



شکل ۲-۲. تغییرات PH در بتن کربناته شده و کربناته نشده

توجه به این نکته ضروری است که اگر چه عمق کربناسیون معمولاً با توجه به تغییرات رنگ محلول معرف فنل‌فتالین مشخص می‌شود، اما واکنش کربناسیون در ماورای این سطح نیز در حال پیشرفت می‌باشد.

آب حفره‌ای در حال تعادل با بتن کربناته نشده دارای PH در حدود ۱۲/۵ تا ۱۳/۵ می‌باشد که ناشی از هیدروکسید کلسیم حل شده و احتمالاً قلیائیت ناشی از سنگدانه‌هاست. ورود دی اکسید کربن و واکنش آن با هیدروکسید کلسیم سبب کاهش PH می‌گردد. این امر سبب انحلال جزیی و در پی آن کربناته شدن سیلیکات کلسیم هیدراته می‌شود. لایه به طور کامل کربناته شده،

دارای PH در حدود ۸/۳ است. حدمیانی لایه‌ها، بین منطقه کربناته شده و کربناته نشده ممکن است هیدروکسید کلسیم اضافی باشد که از داخل منتشر شده است و ناشی از اختلاف غلظت کربناسیون است عمق این منطقه میانی ممکن است به چند میلی متر محدود شود.

در عمل PH کمتر از عدد ۸/۳ نخواهد شد. هاکوفنش لاکه^۱ دریافت که میزان PH در منطقه کربناته نشده از ۱۱/۵ تا ۱۲/۶ تغییر می‌کند و این تغییرات در منطقه کربناته از ۱۱ تا ۱۲/۴ می‌باشد. نیومن^۲ و همکارانش نیز تغییرات ۱۲ تا ۱۲/۴ را در منطقه کربناته شده و مقادیر ۱۰/۴ تا ۱۲/۱ را برای منطقه کربناته نشده گزارش داده‌اند و هر دو گزارش به درصد هیدروکسید کلسیم توجهی خاصی شده است. در بتن کربناته نشده مقادیر ۰/۲۲٪ تا ۳/۸۵٪ و از ۱/۲۶٪ تا ۶/۰۳٪ و در منطقه کربناته شده مقادیر ۰/۰۸٪ تا ۱/۱۰٪ و از ۰/۲۷٪ تا ۱/۶۲٪ برای هیدروکسید کلسیم به دست آمده است. بنابر این، اگر چه کاهش PH به آن اندازه که بعضی محققین حدس زده‌اند نیست، کم شدن هیدروکسید کلسیم موجب می‌شود که میزان PH به زیر حد لازم برای حفاظت فولادها برسد که گودا^۳ این مقدار را حدود ۱۱/۵ تخمین زده است.

۲-۵ تغییرات مربوط به روند واکنش

تمام واکنشهای فوق‌الذکر با آزاد شدن آب همراه است، که این امر در آهنگ و اکشن اهمیت دارد. محققین خاطرنشان ساخته‌اند که رطوبت نسبی داخل بتن ممکن است از رطوبت محیط بیشتر شود و این مسئله در انتشار گازدی اکسید ایجاد اشکال می‌کند. بنابر این، سرعت و اکشن کاهش می‌یابد. پارول^۴ و پیهلاه جاوارا^۵ رطوبت نسبی ۴۰٪ را برای محیط و رطوبت نسبی ۷۰٪ برای بتن را ثبت کردند.

گیلوت^۶ کربناته شدن هیدروکسید کلسیم را با روشهای حرارتی و انتشار اشعه ایکس مورد مطالعه قرار داد و خاطرنشان ساخت سرعت واکنش با گذشت زمان کاهش می‌یابد اغلب گزارشهای او بر اساس مشاهدات کارگاهی بوده است. آهنگ انتشار دی اکسید کربن در بتنهای متراکم، ناشی از افزایش مقاومت لایه کربناته شده در مقابل انتشار است، که امکان دارد باعث تعادل در آهنگ انتشار دی اکسید کربن شود. بنابر این، ممکن است مقدار قابل ملاحظه‌ای کربنات کلسیم ایجاد شده در عمق تشکیل شود که تجمع آن در این منطقه باعث متوقف کردن واکنش می‌گردد کولیکر^۷ فرض کرد آهنگ واکنش ثابت نیست، زیرا یک لایه کربنات کلسیم روی فاز مایع تشکیل می‌شود و تا هنگامی که این لایه خشک نشده و ترک نخورده، از پیشرفت بعدی واکنش جلوگیری می‌شود.

1 - Hachofenschlake

2 - Newaman

3 - Gouda

4 - Paroll

5 - Pihlajavaria

6 - Gillot

7 - Koelliker

۲-۶ بیان فیزیکی کربناسیون

کربناسیون بر مشخصات مقاومت، جمع‌شدگی و خزش بتن تاثیر می‌گذارد. این اثرها در فصول بعد مفصلاً بحث شده است. یکی از مسائل مهم در مطالعات مربوط به روند کربناسیون انتشارپذیری نسبی بتن می‌باشد. به‌طور کلی، کربناسیون مقاومت انتشارپذیری بتن را افزایش می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهد که هنگام کربناسیون، در رطوبت ۶۲/۵٪ جمع‌شدگی اتفاق می‌افتد که با اندازه‌گیری خطی قابل محاسبه است. همچنین، افزایش در حدود ۱۱/۲٪ در چگالی بتن مشاهده می‌شود.

۳- اندازه‌گیری عمق کربناسیون

۱-۳ روشهای موجود

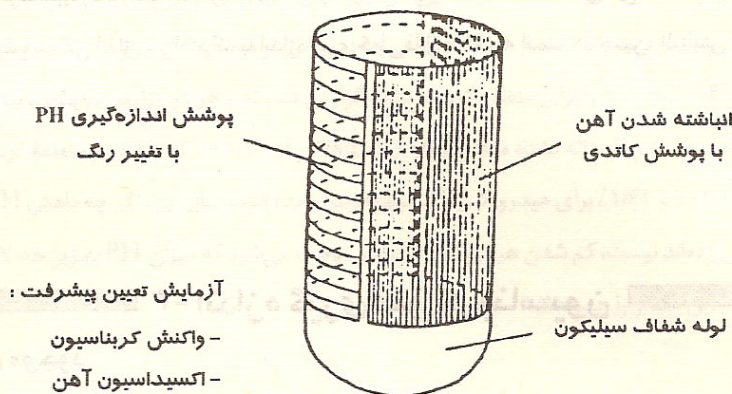
عامل قابل توجه در اغلب مطالعات مربوط به کربناسیون بتن مسلح تغییر PH می‌باشد که این مسئله به زمان ریختن بتن وابسته است. بنابر این، ساده‌ترین روش برای اندازه‌گیری عمق کربناسیون، استفاده از عامل معرف قلئائیت محیط می‌باشد. در ژوئیه سال ۱۹۸۴ سازمان استاندارد بین‌المللی (ISO) اولین پیش‌نویس پیشنهادی برای تعیین عمق کربناسیون را ارائه کرد. این پیشنهاد بر اساس گزارش کمیته 18- RILEM-CPC بود که بعدها منتشر گردید. آنها به کار بردن فنل فتالئین را بهترین روش برای تشخیص لایه کربناته شده معرفی کردند. برای تشخیص لایه کربناته شده از غیر کربناته به ویژه در آزمایشگاه روشهای گوناگونی وجود دارد که شامل موارد زیر است:

- عامل معرف درجه اسیدی
- آنالیز کانی شناسی
- آنالیز حرارتی
- انتشار اشعه ایکس
- پرتونگاری نوترونی
- طیف سنجی مادون قرمز
- آنالیز شیمیایی

۳-۲ معرفهای درجه اسیدی

معرفهای مناسب برای آشکار ساختن بتن کربناته شده عبارتند از: فنل فتالئین (Phenolphthalin) که در PH برابر ۹/۲، روناس زرد (Aizarin yellow) که در PH حدود ۹-۱۰، تیمول فتالئین (Thymalphtholein) که در PH ۱۰/۵-۹/۳ و نفتول سبز (naphthol green) B که در PH حدود ۱۰-۸ تغییر رنگ می‌دهند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، فنل فتالئین معرفی است که ریلیم توصیه کرده است. سطح حاوی هیدروکسید کلسیم (سطح کربناته نشده) در تماس با فنل فتالئین ارغوانی

رنگ می‌شود سطح حاوی کربنات کلسیم (سطح کربناته شده) تغییر رنگ نمی‌دهد. لانگوت^۱ و کوارتایت^۲ دستگاه جدیدی پیشنهاد کردند که شامل یک لوله شفاف بوده و یک طرف آن با معرف PH پوشانیده می‌شود. این وسیله که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، همزمان با بتن ریزی درون قالب قرار داده می‌شود، به‌طوری که عمق کربناسیون در طول زمان مشاهده می‌گردد.



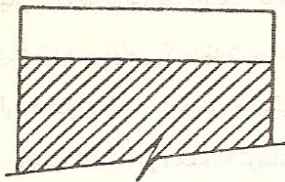
شکل ۱-۳- وسیله‌ای برای اندازه‌گیری در جای انتشار دی‌اکسید کربن و اکسیژن

ریلم پیشنهاد می‌کند فنل فتالین به‌صورت محلول ۱٪ در الکل اتیل (ethyl alcohol) ۷۰٪ حل شود. محلول فوق به سطح تازه شکسته شده بتن پاشیده می‌شود. این سطح بایستی عاری از گرد و خاک باشد. بریدن و صاف کردن سطح بتن کنده شده برای استفاده از فنل فتالین توصیه نمی‌شود.

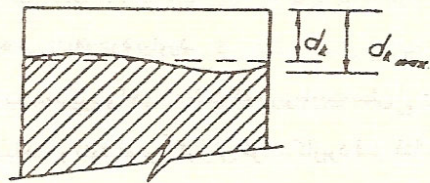
پیشنهاد می‌شود قرائت یکبار بلافاصله پس از شکستن سطح بتن و بار دیگر ۲۴ ساعت بعد صورت گیرد. مناطقی که پس از ۲۴ ساعت کمرنگ می‌شوند به عنوان منطقه کربناته شده مورد قضاوت قرار می‌گیرند. به‌علت غیر همگن بودن بتن، پیشروی کربناسیون به سختی در یک خط راست ظاهر می‌شود. بنابراین، لازم است هم عمق متوسط (dk) و هم حداکثر عمق نفوذ (dk_{max}) ثبت شود. این روش برای هر سه حالت پروفیل پیشروی کربناسیون نشان داده شده در شکل ۲-۳ کاربرد دارد.

روش دیگری که برپایه تحقیقات مهندسی ژاپنی استوار است، به کار بردن نمونه استوانه‌ای و محاسبه اختلاف در منطقه رنگی شده و رنگی نشده در هر دو انتها و در طول مقطع عمودی جدا شده می‌باشد؛ در نهایت میانگین آنها به عنوان عمق کربناسیون ارائه می‌شود. (شکل ۳-۳)

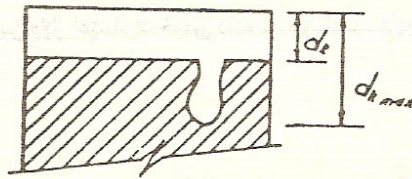
محققین در خصوص کاربرد با احتیاط فنل فتالین به عنوان معرف در کربناسیون نظرات مختلفی بیان کرده‌اند. در گزارش هالسد^۳ به کمیت ریلم آمده است معرف فوق نمی‌تواند بین کربناسیون و سولفاتاسیون را تشخیص دهد. اثرهای سولفاتاسیون در



شکل الف

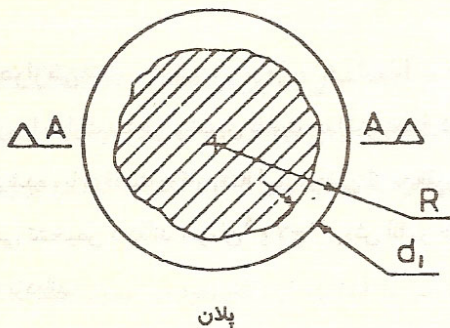


شکل ب



شکل ج

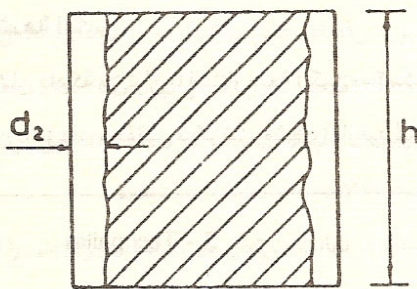
شکل ۲-۳ اندازه گیری پروفیل پیشروی کربناسیون، طبق پیشنهاد کمیته ریل



پلان

A = مساحت سطح مقطع

B = مساحت سطح مقطع رنگی شده



مقطع A-A

$$d_1 = R - \sqrt{\frac{B}{\pi}}$$

$$d_2 = \frac{1}{2h}(A-B)$$

شکل ۳-۳ - اندازه گیری پروفیل پیشروی کربناسیون طبق نظر انجمن مهندسين ژاپني

بخش ۱ - ۵ بیان شد، که در شرایط طبیعی اهمیت چندانی ندارد. همچنین در این گزارش بیان شده که جریان رطوبت مربوط به آب آهک اشباع شده در نواحی کربناته شده، می‌تواند شکل ارغوانی درهمی را به وجود بیاورد.

هامادا^۱ کاربرد فنل فتالئین را به بتن معمولی با رطوبت کمتر از ۱۵٪ محدود کرد و اظهار داشت که در رطوبت بیش از ۳۰٪ پراکندگی هیدروکسید کلسیم در محدوده کربناته شده قابل توجه است. بایلگ^۲ و تئوفیلوس^۳ گزارش کردند کاربرد فنل فتالئین در جایی که سیمان سفید به کار رفته با اشکال همراه است. کابره^۴ نیز بیان کرد در حالت خاصی از کربناسیون که هیدراکسید در ساختمان سیلیکات کلسیم هیدراته وجود دارد، فنل فتالئین ممکن است نتواند لایه کربناته شده را به وضوح آشکار سازد به جز موارد خاص فوق‌الذکر فنل فتالئین قابل اعتماد تشخیص داده شده و ثابت شد که کاربرد آن چندان حساس نیست.

۳-۳ آنالیز کانی شناسی

این روش با استفاده از مقطع نازکی از بتن صورت می‌گیرد که نمونه عمود بر وجهی که در معرض هوا قرار دارد، برداشته می‌شود. در گزارش مایر^۵ آمده است در جایی که ژل سیمان همگن و نورپلاریزه می‌باشد، کربنات کلسیم انعکاس دو برابر می‌دهد؛ در حالی که هیدروکسید کلسیم انعکاس کمتری دارد. دلویه^۶ نیز پیشنهاد کرد که میزان کربناسیون با ضریب حیات^۷ یا شاخص سن^۸ که براساس آنالیز کانی‌شناسی استوار است، بیان شود.

۳-۴ آنالیز حرارتی

در این روش با حرارت سنجی و تعیین تفاوت حداکثر منطقه کربناته شده را از کربناته نشده تشخیص داد. این روش در تحقیقات انجام شده، با موفقیت به کار رفته است. بعضی از محققین این روش را برای مطالعه فرآیند کربناسیون مناسب‌تر از روشهای معمولی تشخیص داده‌اند. سومان^۹ و لاج^{۱۰} روش آنالیز حرارتی را برای تشخیص کلسیت I کلسیت II و واتریت^{۱۱} و آراگونیت به کار برده‌اند.

۳-۵ انتشار اشعه ایکس

فورستر^{۱۲} نشان داد که می‌توان با انتشار اشعه ایکس به کمک خطوط تولید شده از کلسیت، واتریت و آراگونیت، آنها را از سایر اجزاء سیمان تمیز داد. محققین دیگر نیز روشهای کار برد اشعه ایکس را ارائه کرده‌اند.

1 - Hamada

2 - Baileg

3 - Theophilas

4 - Cabrera

5 - Mayer

6 - Deloye

7 - Vitality

8 - age index

9 - Sauman

10 - Lach

11 - Vaterite

12 - Forrester

۳-۶ پرتونگاری نوترونی

این روش نیز آزمایشی غیر مخرب است که شامل ثبت عبور نوترون حرارتی از میان بتن می‌باشد، که این امر با آزاد شدن آب طبیعی و آب غیر تبخیر شدنی در اثر کربناسیون صورت می‌گیرد.

۳-۷ طیف سنجی مادون قرمز

یکی از روشهای دیگر غیر مخرب کاربرد طیف سنجی مادون قرمز است که برای آشکار کردن کربناسیون به کار می‌رود. این روشهابه درجهٔ فرآیند واکنش کربناسیون و مراحل هیدروسیلیکات کلسیم بستگی دارد.

۳-۸ آنالیز شیمیایی

روش آنالیز شیمیایی بتن به منظور نشان دادن نسبت دی اکسیدکربن به هیدروکسیدکلسیم به کار می‌رود. این روش مورد توجه بسیار واقع شده است.

۴ - نفوذپذیری^۱ و انتشارپذیری^۲ بتن

نقش نفوذپذیری بتن و پدیده انتشار گاز در بتن، آزمایش‌های دقیقی می‌طلبد. توجه کلی روی فضاهای خالی بتن با اندازه‌گیری نفوذپذیری مایعات و انتشار گاز در آن انجام می‌شود که در روشهای آزمایشگاهی، مشکلاتی در زمینهٔ مدل کردن نمونه برای اندازه‌گیری نفوذپذیری وجود دارد.

در غلظت معمولی اتمسفر ورود دی اکسیدکربن به ساختمان فضای خالی قابل نفوذ بتن سبب اختلاف غلظت و ایجاد مکانیزم انتشار می‌شود. انتشار از میان فضاهای خالی مویینه به هم پیوسته و ترک‌های ریز و فضاهای خالی که به وسیله این شبکه مویینه قطع می‌شود صورت می‌پذیرد. در شرایط محیطی معین، در فضای خالی سنگدانه‌ها نیز سیستم انتقال داریم. در توجیه رفتار تئوریکی پدیدهٔ کربناسیون، فرض می‌شود که آهنگ ورود دی اکسیدکربن با قانون اول فیک^۳ مدل شود. تغییرات و طول مسیر در یک ضخامت داده شده، باعث می‌شود که نتوان ضریب انتشارپذیری را در این قانون مشخص کرد. ارزیابی ضریب انتشارپذیری مؤثر و ضریب انتشارپذیری ویژه، می‌تواند در تمام حالات برای مقایسه مفید باشد.

جریان مایعات از درون بتن با قانون دارسی^۴ مدل می‌شود و در نهایت می‌توان ضریب نفوذپذیری بتن را ارزیابی کرد. البته

1 - Permeability

2 - diffusion

3 - Fick

4 - Darcy

مشکلات مربوط به تعیین ضریب انتشار پذیری بتن، در اینجا نیز وجود دارد

۴-۱ ساختار فضاهای خالی بتن

اسمالچیک^۱ بیان کرد که دی اکسید کربن در فضاهای خالی با قطر بزرگتر از $10^{-8} \times 3$ mm جریان می یابد. اما فورستر در گزارش کمیته کربناسیون، این مقدار را $10^{-6} \times 2$ mm ذکر کرده است، در حالی که پیروت^۲ مقدار $10^{-6} \times 5$ mm را پیشنهاد نموده است. هنگامی که بتن سخت می شود، چهار نوع فضای خالی دیده می شود. کوچکترین این فضاها، فضاهای ژلی است که قطر ۱ تا $10^{-6} \times 8$ mm دارد. در اثر آب مخلوط شده در بتن، فضاهای مویینه به وجود می آید که فضاهای اصلی را تشکیل می دهد. قطر این فضاها از $10^{-6} \times 8$ mm تا $10^{-3} \times 0.13$ mm تغییر می کند. حبابهای هوا از محبوس شده در هنگام تراکم به وجود می آیند که قطر آنها از $10^{-6} \times 10$ تا 2 mm متغیر است. ممکن است فضاهای خالی سنگدانه ها نیز وجود داشته باشد. تخلخل سنگدانه های معمولی از صفر تا ۲۰٪ تغییر می کند؛ درحالی که این تغییرات برای سنگدانه های سبک ۳۰٪ تا ۴۰٪ است. همچنین ممکن است ترک های ریزی بین قسمتهای زیر سنگدانه ها و سیمان ایجاد شود.

شبکه فضاهای خالی مویینه بیشترین اثر را بر سهولت نفوذ مایعات در بتن دارند. همان طور که ذکر شد، فضاهای خالی ژلی خیلی کوچک هستند و حبابهای هوای ایجاد شده نیز معمولاً محبوس اند و به یکدیگر راه ندارند. فضاهای خالی سنگدانه ها نیز خیلی کوچک هستند و به دلیل اینکه با خمیر سیمان احاطه می شوند، جزو شبکه نفوذپذیری به حساب نمی آیند.

۴-۲ قانون اول فیک و انتشار پذیری بتن

انتشار فرآیند انتقال جریان ماده است که در اثر اختلاف غلظت به وجود می آید. مکانیزم انتقال واقعی با حرکات تصادفی مولکولها تعریف می شود. این مولکولها دائماً در حال تصادم با مولکولهای مصالحی هستند که انتشار را از درون آنها صورت می گیرد. فیک پی برد که این مراحل شبیه هدایت حرارت می باشد و با معادلات انتقال گرمای فوریه منطبق است؛ لذا قانون اول خود را به شرح زیر ارائه کرد:

$$Q = -DA \frac{dc}{dx}$$

Q = میزان مواد منتقل شده

D = ضریب انتشار پذیری

A = مساحت سطح مقطعی که انتشار از درون آن صورت می گیرد

$\frac{dc}{dx}$ = گرادیان غلظت

(که C غلظت ماده متصاعد شده و X فاصله صفحه مرجع و مقطع عرضی است. علامت منفی نشان دهنده این است که جهت جریان مخالف با جهت افزایش غلظت است).

ضریب انتشار مشخص شده در معادلات فوق، برای مصالح ایزوتروپیک صدق می‌کند، ولی برای بتن نمی‌تواند به درستی ارزیابی شود؛ زیرا جریان به ساختار فضاهای خالی قابل نفوذ محدود می‌شود. فاصله‌ای که مولکولها از میان فضاهای خالی طی می‌کنند، از ضخامت نمونه بیشتر است؛ زیرا این مسیر مستقیم نیست و به صورت مارپیچ است. ثانیاً قطر فضاهای خالی ممکن است آنقدر کوچک باشد که حرکت تصادفی مولکولها را محدود کند.

دایمون^۱ و همکارانش بیان کردند بیشترین انتشار وقتی اتفاق می‌افتد که قطر فضاهای موئینه از ده برابر مسیر آزاد مولکولی انتشار تجاوز کند.

چنانچه قطر فضاهای موئینه کمتر از این مقدار باشد، مولکولهای منتشره به جدار لوله برخورد می‌کنند. در شرایط معمول حرارت و فشار، مسیر آزاد متوسط بیشتر گازها در حدود 10^{-6} (۱۰۰-۵۰) mm می‌باشد. این حدود مطابق با قطر فضاهای خالی موئینه است که قبلاً اشاره شد.

انتشار گاز درون بتن به درصد رطوبت نیز بستگی دارد. توتی با آزمایشهای متعدد دریافت که درصد رطوبت مهمترین عامل مؤثر در آزمایشهای تعیین ضریب انتشار است

هاورنس^۲ بیان کرد که انتشار اکسیژن و دی‌اکسید کربن محلول، 10^4 تا 10^5 مرتبه سریعتر از حالت عادی صورت می‌گیرد.

۳-۴ نفوذ پذیری

اگر چه نفوذ دی‌اکسید کربن به بتن یک پدیده انتشار است لیکن نفوذ پذیری نسبی بتن اغلب با آزمایش جریان ایجاد شده با فشار مشخص می‌شود. طبق فرمول دارسی داریم:

$$Q = -KA \frac{dp}{dx}$$

Q = میزان سیال انتقال یافته (دبی)

K = ضریب نفوذپذیری

A = مساحت سطح مقطع عرضی جریان

$$\frac{dp}{dx} = \text{گرادیان فشار}$$

(P فشار و x فاصله بین صفحه مرجع و مقطع عرضی است).

فرمول فوق برای جریان لایه‌ای واقعیت دارد و برای اندازه‌گیری نفوذپذیری باید به شرایط جریان پایدار برسیم. به دلیل تراکم پذیری گازها، بعضی تعدیلات در کاربرد رابطه فوق لازم است.

از آنجا که نفوذپذیری برای مصالح داده شده مقداری واحد است «نفوذپذیری ذاتی» به صورت زیر بیان می‌شود

$$k = \frac{K\mu}{\gamma}$$

k = نفوذپذیری ذاتی

K = ضریب نفوذپذیری داری

μ = ویسکوزیته

γ = وزن مخصوص

در عمل، روشهای آزمایشهای متعددی وجود دارد که به جای نفوذپذیری دقیق، نفوذپذیری نسبی را تعیین می‌کند.

۴-۴ اثرات کیفیت سطح بتن

برای انجام آزمایشهای نفوذپذیری و انتشار سطح نمونه باید بریده شود، لیکن در عمل سطوح بتن قالببندی شده یا ماله کشی شده هستند. بررسی این مسئله در پدیده کرناسیون اهمیت زیادی دارد؛ زیرا کرناسیون پدیده‌ای است که از سطح بتن شروع می‌شود. براون^۱ خاطرنشان ساخت که در بتن اشباع جریان اکسیژن درون سطح قالبگیری شده یک چهاردهم سطح بریده شده است. انستیتوی جهانی تحقیقات صنعتی استاندارد در گزارشی در مورد نمونه‌های بتنی مربوط به ۵۶ سال قبل اعلام کرد که در سطح قطع شده جریان دو برابر بیشتر از سطح قالب گیری شده است. مسئله قابل توجه دیگر این است که کرناسیون در بتن ممکن است نفوذپذیری را کاهش دهد. این اثر را محققین مختلف و از جمله کمیته ریلیم گزارش کرده‌اند.

۴-۵ ارتباط انتشارپذیری و عمق کرناسیون

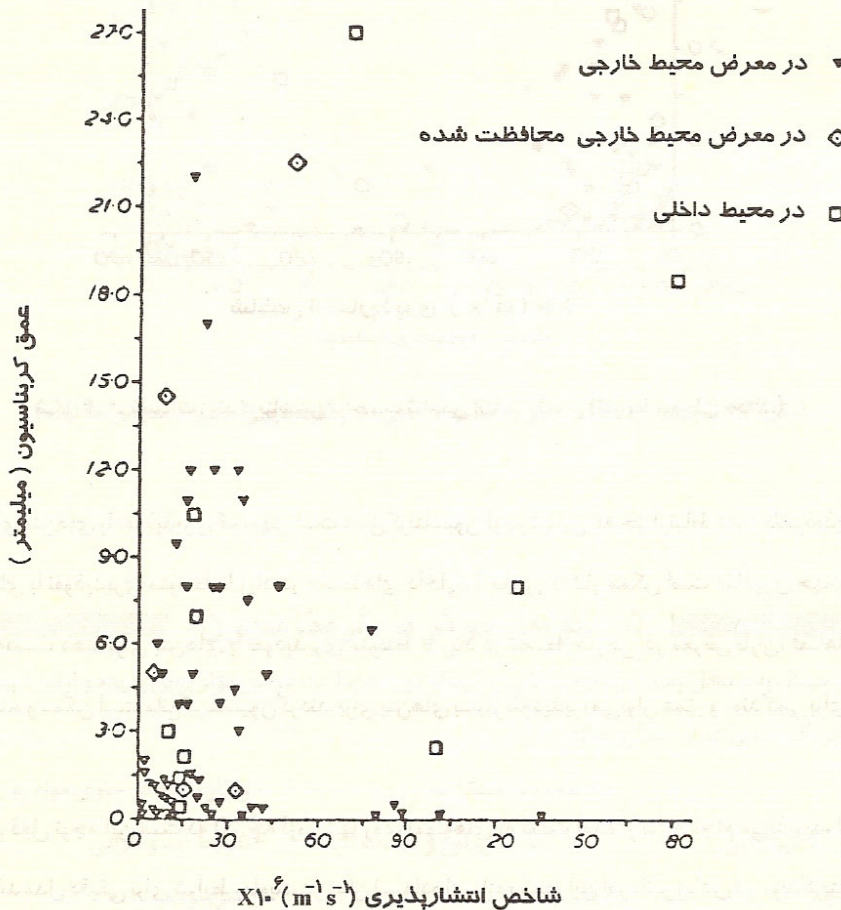
مطالعات اولیه همبستگی خطی ضعیفی را بین انتشارپذیری و کرناسیون نشان می‌دهد. برای هر دو حالت مغزه‌های افقی و قائم در نظر گرفته شده است و حداکثر میزان کرناسیون در بتن‌های با انتشارپذیری بالا بوده است. در خصوص شرایط محیطی، برای نمونه‌های واقع در محیط داخلی که در نیمه بالایی محدوده انتشارپذیری قرار دارند، عمق کرناسیون به صورت تصاعدی بالا می‌رود. برای بتن‌های در معرض باران که در نیمه بالایی محدوده انتشارپذیری قرار دارند، کرناسیون در حدود یک میلیمتر و کمتر می‌باشد که این امر مربوط به اشباع بودن بتن است. (شکل‌های ۱-۴ و ۲-۴)

بین انتشارپذیری اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و مقادیر به دست آمده در کارگاه تفاوت‌هایی وجود دارد. یکی از اختلاف‌ها ناشی از تفاوت درصد رطوبت نمونه‌های آزمایشگاهی نسبت به نمونه‌های به دست آمده در کارگاه می‌باشد. دیگر اینکه نمونه‌های آزمایشگاهی دارای لبه بریده شده و صاف هستند؛ در صورتی‌که، در کارگاه تفاوت زیادی در کیفیت سطح وجود دارد.

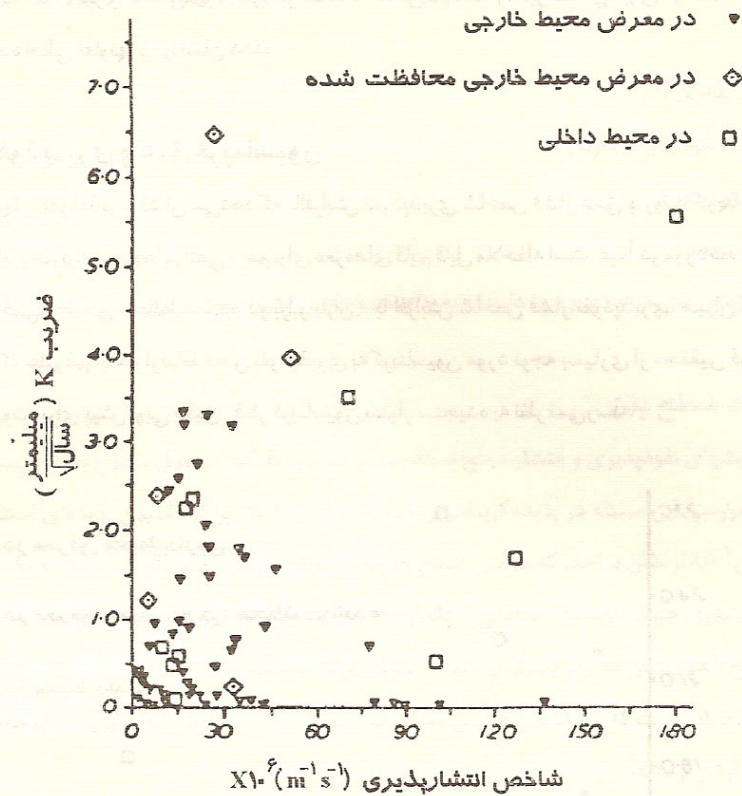
مشکل دیگر در اندازه گیری انتشارپذیری بتن این است که امکان دارد اندازه گیر انتشارپذیری در منطقه کربناته شده نسبت به بتن کربناته نشده اصلی تفاوتی را نشان دهد.

۴-۶ ارتباط نفوذ پذیری و عمق کربناسیون

نتایج آزمایشهای نفوذپذیری نشان می دهد که با افزایش نفوذپذیری شاخص فشار عمق و روند کربناسیون روبه کاهش می گذارد. این تمایل هم برای مغزه های افقی و هم برای مغزه های قائم قابل ملاحظه است. عیناً در مورد سه حالت محیطی (در معرض محیط داخلی، خارجی محافظت شده در معرض محیط خارجی) با افزایش شاخص فشار نفوذپذیری، میزان کربناسیون کاهش می یابد (شکل ۴-۳). علیرغم اینکه ارتباط دادن نفوذپذیری به کربناسیون مورد توجه بسیاری از محققین قرار دارد، ولی برخی معتقدند که این روش برای پیش گویی دقیق رفتار کربناسیون بسیار سنجیده به نظر نمی رسد.



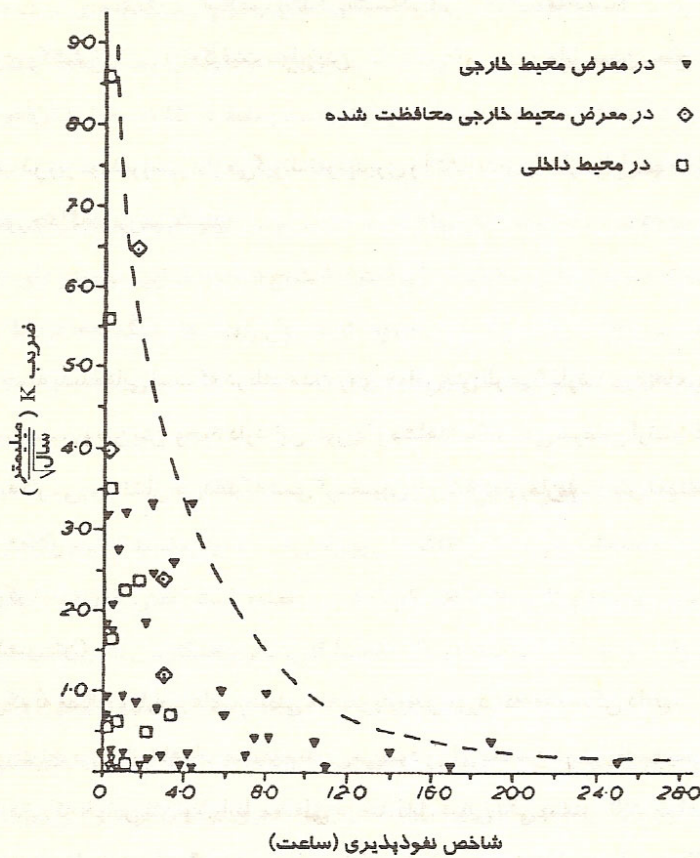
شکل ۴-۱- تغییرات عمق کربناسیون نسبت به شاخص انتشار پذیری در شرایط محیطی مختلف



شکل ۴-۲. تغییرات روند کرناسیون بر حسب شاخص انتشار پذیری (شرایط محیطی مختلف)

بنابراین برای بتن‌های با نفوذپذیری کم، بهتر است عمق کرناسیون از روشهایی به جز ارتباط دادن با نفوذپذیری به دست آید. برای بتن‌های با نفوذپذیری متوسط تا زیاد در محیط‌های داخلی، آزمایش انتشار ممکن است مقادیری جهت پیش‌گویی تمایلات آتی به دست دهد. برای بتن‌های با نفوذپذیری متوسط تا زیاد در محیط خارجی در معرض باران، فضاهای خالی به آسانی اشباع شده و ممکن است مانع کرناسیون گردند. برای بتن‌های بسیار نفوذپذیر، می‌توان عمق و روند کمی برای کرناسیون پیش‌بینی کرد.

نکته اصلی قابل توجه این است که اگر چه آزمایشها روی نمونه‌های به دست آمده از سازه انجام می‌پذیرند، لیکن شرایط نمونه‌ها نمی‌تواند مدل دقیقی برای شرایط رطوبت در زمان استفاده از سازه باشد و این امر تاثیر زیادی در روند کرناسیون دارد.



شکل ۳-۴ تغییرات روند کربناسیون بر حسب شاخص فشار نفوذپذیری (شرایط محیطی متفاوت)

۵- عوامل مؤثر بر کربناسیون

در بررسی مسئله به حداقل رسانیدن اثرات زیان آور کربناسیون، لازم است عوامل مؤثر بر این پدیده و ارتباط بین آنها به دقت مورد ارزیابی قرارگیرد. این عوامل عبارتند از:

- سن بتن
- مشخصات سنگدانه
- رفتار بتن‌های حاوی مواد پوزولانی
- غلظت دی اکسید کربن
- میزان سیمان، نوع و کیفیت آن
- شرایط آب و هوایی
- روشهای اجرا
- اثر ترک‌ها
- عمل آوردن
- دانسیته (چگالی)
- فضاهای خالی
- خرابی ناشی از آتش سوزی

- هندسه عضو
- اسلامپ (حد فرونشستگی)
- مقاومت
- تنش‌های فشاری و کششی
- کیفیت سطح بتن
- مایل بودن سطح
- نسبت آب به سیمان

عوامل فوق به ترتیب در زیر مورد بررسی قرار می‌گیرند. نفوذپذیری و انتشارپذیری که از عوامل مهم مؤثر در کرناسیون هستند، در بخش قبل به طور جداگانه بررسی شدند.

۱-۵ سن بتن

کرناسیون از جمله پدیده‌هایی است که در بلند مدت روی خواص بتن اثر می‌گذارد. تئوری‌های مختلفی به منظور تشریح ارتباط بین عمق کرناسیون و سن بتن وجود دارد. این تئوری‌ها و مشاهدات کارگاهی به وضوح ارتباط غیر خطی رانشان داده‌اند. رابطه زیر که اغلب به کار می‌رود، نشان می‌دهد که عمق کرناسیون با ریشه دوم زمان (سن بتن) متناسب است.

$$x = K \sqrt{t}$$

X = عمق کرناسیون

t = زمان (سن بتن)

K = ثابتی که به مصالح و پارامترهای محیطی منحصر به محل مورد مطالعه بستگی دارد.

مقدار K به صورت تجربی یا با مشاهدات مستقیم تعیین می‌شود و برای یک بتن در شرایط محیطی مشخص، مقدار واحدی دارد. این مقدار تا زمانی که خواص بتن و شرایط محیطی در حد قابل قبولی باقی بمانند، ثابت خواهد بود. شواهد کافی وجود دارد که نشان می‌دهد فرمول فوق برای گروه نمونه‌های مشخص (مقاومت و شرایط محیطی مختلف)، ابزاری مفید جهت پیشگویی روند کرناسیون است.

۲-۵ مشخصات سنگدانه‌ها

نوع، اندازه و شکل سنگدانه‌ها از خصوصیات مهم در سنگدانه‌ها می‌باشند که در پشیروی کرناسیون مؤثرند. شاکلوک^۱ برای سنگدانه‌های زبر و سبک، افزایش پوششی به اندازه ۱۰ mm را پیشنهاد می‌کند، زیرا سرعت کرناسیون در این حالت زیاد خواهد بود. کاربرد سنگدانه‌های متراکم مشکلاتی ایجاد می‌کند؛ چنان که اورت^۲ خاطرنشان می‌سازد، جمع‌شدگی کرناتی باعث می‌شود در سطح تماس بین سنگدانه‌های متراکم و خمیر سیمان جدایی بیفتد و مسیرهای قابل نفوذ در بین این دو سطح تشکیل گردد. بدیهی است وسعت چنین مسیرهایی بستگی به اندازه سنگدانه‌ها دارد.

ریچارد سن^۳ در بررسی‌هایش شش اندازه اسمی برای سنگدانه‌ها تشخیص داده است. این تمایزها هیچ ارتباطی با روند یا

1 - Shacklock

2 - Everett

3 - Richardson

عمق کربناسیون نشان نمی‌دهند. گریمر^۱ با مطالعه بتن‌های با سنگدانه‌های معمولی و سنگدانه‌های سبک دریافت که در حالت کلی، اختلاف بین عمق متوسط کربناسیون و عمق ماکزیمم تقریباً برابر با نصف اندازه سنگدانه‌ها است. ریچارسن طی آزمایش‌های انجام شده دریافت که ۱۵٪ نمونه‌ها از شرایط فوق فراتر رفتند و فقط در ۵٪ نمونه‌ها اختلاف بین عمق متوسط و ماکزیمم از اندازه سنگدانه‌ها بیشتر شد.

سومین مشخصه قابل توجه در سنگدانه‌ها شکل آنها است در این خصوص جینز^۲ خاطر نشان می‌کند که برای کارایی لازم، سنگدانه‌های گردگوشه نسبت به سنگدانه‌های شکسته، به آب کمتری احتیاج دارند؛ بنابر این، دوام بتن‌های حاوی سنگدانه‌های گردگوشه بیشتر است. همچنین، نظریه مؤلفینی که عمق و روند کربناسیون را به شکل سنگدانه‌ها مربوط کرده‌اند، تایید شده است، اما کوچک بودن نمونه مانع پیشگویی‌های بعدی می‌شود.

۳-۵ رفتار بتن‌های حاوی مواد پوزولانی

کارادی^۳ در گزارش خود خاطر نشان می‌کند که واکنش‌های پوزولانی درصد هیدروکسید کلسیم را کاهش می‌دهند تا حدی که مقاومت در برابر کربناسیون به مقدار قابل ملاحظه‌ای کم شود. متا^۴ معتقد است کاهش نفوذپذیری بتن حاوی سیمان به وسیله مواد پوزولانی، می‌تواند این اثر را خنثی کند. در یک مقایسه کلی، مایر و همکارانش نشان دادند که میزان کربناسیون در بتن‌های حاوی سیمان با مواد سرباره‌ای (۶۰٪ سرباره)، دو و نیم برابر بتن‌های معمولی است. آریزامی^۵ و همکارانش دریافتند که میزان کربناسیون در بتن حاوی سیمان با ۴۰٪ سیلیس نسبت به بتن حاوی سیمان با ۶۰٪ سرباره بیشتر است. در مورد بتن حاوی میکروسیلیس، فونتنی^۶ اظهار داشت، کاهش نفوذپذیری می‌تواند اثر مربوط به کم شدن ذخیره قلیائیت در بتن را کاهش دهد.

ماگه و اسکسوفولد^۷ آزمایش‌های بسیاری در خصوص پیشرفت کربناسیون در بتن حاوی میکروسیلیس انجام دادند. گیورف و ونسلند^۸ بیان کردند که افزودن فوق روان‌کننده به میکروسیلیس می‌تواند تا حد زیادی در کاهش کربناسیون مؤثر باشد. اگر میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان به کار رود، می‌تواند قلیائیت را کاهش دهد. از طرف دیگر، چنانچه میکروسیلیس به سیمان اضافه شود به علت وجود سیمان اولیه حالت قلیایی کلی محیط با افزودن میکروسیلیس کاهش چشمگیری نمی‌یابد. [۶]

توسکایاما^۹ و همکارانش خاطر نشان کردند که برای نسبت‌های یکسان آب به سیمان، بتن حاوی سیمان با خاکستر بادی کمتر

1 - Grimer

2 - Janes

3 - Carraddi

4 - Mehta

5 - Arizami

6 - Fontenay

7 - Mage

8 - Ggorv

9 - Tuskayama

از بتن معمولی کربناته می‌شود. این مورد با نظر ویثینگ^۱ و شولز^۲ مغایر است. اما باید توجه داشت که اگر مخلوط‌ها برای مقاومت‌های یکسان طراحی شوند، در سیمان‌های مخلوط که احتیاج به آب کمتری دارند، میزان کربناته شدن نیز کمتر می‌شود. شوپرت^۳ و لیوان دوسکی^۴ میزان کربناسیون مساوی را در بتن‌های معمولی و بتن‌های سیمان با خاکستر بادی برای مقاومت‌های فشاری مشابه گزارش کرده‌اند، اما لوئیس^۵ و هو^۶ در مشاهدات خود چنین مواردی را تایید نکرده‌اند. ماتیوس^۷ یکسان بودن میزان کربناسیون را برای مورد فوق، به بتن‌هایی با مقاومت بالاتر از 25 N/mm^2 محدود کرده است. مشابه چنین محدودیتی را سیلو^۸ گزارش داده و تایید نمود است که نسبت خاکستر بادی در سیمان نباید از $0/4$ تجاوز نماید. رفتار بتن‌های حاوی سیمان سرباره‌ای شبیه خاکستر بادی است.

اسمالچیک، شرودر^۹ مسئله نگهداری را مورد تاکید فراوان قرار داده‌اند این امر احتمالاً ناشی از واکنش‌های بلندمدت بتن‌های حاوی سیمان به مواد پوزولانی است.

۴-۵ غلظت دی اکسیدکربن

غلظت معمول دی اکسیدکربن در اتمسفر $0/3$ درصد است و در شرایط مختلف، مقادیر بیشتر نیز گزارش شده است. پروفیسور نوویل^{۱۰} بیان کرده که این مقدار در فضای داخل ساختمان به $0/1$ درصد نیز می‌رسد و در شهرها از $0/3$ درصد تا 1 درصد متغیر است. نیش^{۱۱} خطر نشان ساخت در داخل گاراژ و مکان‌هایی که رفت و آمد زیاد اتومبیل وجود دارد، مقدار این گاز در حدود $0/3$ درصد است. توتی مقدار دی اکسیدکربن حدود 1 درصد را در یک خاک سنگدانه‌ای ثبت نمود. هامادا^{۱۲} نیز خرابی ناشی از غلظت بالای دی اکسیدکربن در یک دودکش را گزارش کرد.

الکساندر واردلو^{۱۳} با محاسبات شیمیایی دریافته که در شرایط معمولی نسبت به محیط با غلظت 100 درصد اسیدکربن یک سوم جمع‌شدگی کربنات رخ می‌دهد. کلم^{۱۴} و برگر^{۱۵} پی‌بردند که کربناسیون تسریع شده با مقادیر بالای دی اکسیدکربن اثرهای متفاوتی نسبت به کربناسیون در حالت معمولی ایجاد می‌کند. واتانده^{۱۶} و همکارانش مطرح کردند که این پدیده ممکن است ناشی از شکل بی‌کربنات کلسیم در برابر کربنات کلسیم باشد. بنابراین، کاربرد آزمایش تسریع شده با غلظت بالای دی اکسیدکربن روش صحیحی برای مدل کردن رفتار شرایط محیطی بلند مدت نیست.

1 - Wieing

2 - Scholz

3 - Schubert

4 - Lewandowski

5 - Lewis

6 - Ho

7 - Matthaws

8 - Scislew

9 - Schroder

10 - Neville

11 - Nischer

12 - Hamada

13 - Wardlaw

14 - Klemm

15 - Berger

16 - Watande

۵-۵ میزان سیمان، نوع و کیفیت آن

نتایج تجربیات گذشته نشان می‌دهد که افزایش مقدار سیمان مصرفی، مقاومت در برابر کربناته شدن را زیاد می‌کند. دلیل این امر دو چیز است: اولاً غلظت مواد قلیایی متناسب با درصد سیمان مصرفی می‌باشد. ثانیاً بیشترین نفوذپذیری بتن مربوط به خمیر سیمان است، که با افزایش درصد سیمان کاهش می‌یابد. براون بیان کرد که بتن با درصد سیمان 500 kg/m^3 ، سه‌برابر دیرتر از بتن با درصد سیمان 200 kg/m^3 که دارای همان نفوذپذیری است، کربناته می‌شود.

در خصوص نوع سیمان، یورو^۱ و نسلند^۲ بیان کردند که درصد هیدروکسید کلسیم در یک سیمان پرتلند هیدراته شده بین ۱۵ تا ۳۰ درصد وزنی سیمان هیدراته نشده است. در سیمانهای دیگر از جمله سیمانهای پرتلند پوزولانی و سرباره آهن‌گذاری که مقادیر هیدروکسید کلسیم محدود شده است، ذخیره قلیائیت کاهش می‌یابد.

کاسایی^۳ و همکارانش گزارش کردند که سیمان ضدسولفات و به میزان بیشتر از آن، ملاتهای زودگیر نسبت به سیمانهای معمولی کمتر کربناته می‌شود. علت این امر در سیمانهای زودگیر، ریزتر بودن دانه‌های سیمان و یا افزایش درصد C_3S است. سیمان ضدسولفات نیز دارای مقادیر زیاد C_3S و مقادیر کم C_2S می‌باشد. در مقابل پروفوسور نوئل به نقل از میر بیان می‌کند که عمق کربناسیون در سیمان ضدسولفات ۵۰ درصد و در سیمان پرتلند آهن‌گذاری تا ۲۰۰ درصد بیشتر از عمق کربناسیون نسبت به سیمان معمولی است [۲].

کیفیت سیمان را می‌توان با عدد ریزی بلین^۴ سنجید. جدول ۵-۱ در گزارش و نوات و الکساندر آمده است که هر چه عدد بلین بزرگتر باشد (یابه عبارتی ذرات سیمان ریزتر باشند)، عمق کربناسیون بیشتر کاهش می‌یابد.

جدول ۵-۱- تاثیر عدد بلین در عمق کربناسیون

عمق کربناسیون (mm)	عدد ریزی بلین (cm^2/g)
۱۴	۲۵۰۰
۱۳	۳۰۰۰
۱۳	۳۵۰۰
۱۰/۵	۴۰۰۰
۱۰/۵	۴۵۰۰
۱۰	۵۰۰۰

مقادیر به دست آمده در جدول فوق، با استفاده از آزمایشهای تسریع شده تعیین شده است که مسلماً مقادیر عمق کربناسیون در

1 - Gjorv

2 - Vennesland

3 - Kasai

4 - Blaine

کارگاه کمتر می باشد.

۵-۶ آب و هوا و شرایط محیطی

شرایط آب و هوایی و محیطی متفاوت اثرهای زیادی در عمق کربناسیون دارد. شرایط آب و هوایی شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، بارندگی، جهت باد غالب و تابش آفتاب است. مناطق آب و هوایی یک کشور شامل شهری، حومه شهری، روستایی و کنار دریا است. این تقسیم بندی بر مبنای غلظت دی اکسید کربن صورت گرفته است. در مناطق شهری بیشترین و کنار دریا کمترین غلظت دی اکسید کربن را دارا هستند. در مواردی می توان ناحیه دیگری به نام ناحیه «صنعتی» به مناطق فوق افزود. در آیین نامه استاندارد انگلستان نیز همین چهار ناحیه ذکر شده و ناحیه کنار دریا در بالای ناحیه روستایی قرار گرفته است. این تغییر به دلیل وجود غلظت بالای نمک در این محیط است. گروههای تحقیقاتی شرایط در معرض بودن را به سه دسته تقسیم کرده اند که عبارتند از: خارجی در معرض باران، خارجی محافظت شده در برابر باران و داخلی.

۵-۶-۱ دمای هوا

در آزمایشهایی که ماری^۱ و همکارانش انجام دادند در رطوبت نسبی ۸۰٪ افزایش دما از ۲۰ درجه سانتیگراد به ۴۰ درجه سانتیگراد باعث تغییر میزان کربناسیون از ۰/۸ تا ۱/۸ برابر میزان اولیه گردید. در گزارش دیگری آمده است که میزان کربناسیون با افزایش دما زیاد می شود تا به یک دمای بحرانی برسد. بالاتر از این دما مقدار آب آزاد کمتر از مقدار لازم برای واکنش کربناسیون می شود. سپس با افزایش دما، میزان کربناسیون کاهش می یابد. فریدمان^۲ بیان کرد بحرانی ترین دما، دمایی است که در آن آب آزاد شده ناشی از کربناسیون، بخار می شود، ولی این دما آنقدر زیاد نیست که بتواند بتن را تا حد متوقف کردن واکنش خشک کند.

۵-۶-۲ رطوبت نسبی و بارش باران

الکساندر و واردلو^۳ روی نمونه های کوچک ملات آزمایشهایی انجام دادند و تاثیر رطوبت نسبی را در کربناته شدن بتن بررسی کردند. این نتایج در شکل ۵-۱ نشان داده شده اند. نمودار به دست آمده با نظریه محققین دیگری مانند استرالینگ و وریک^۴ نیز مطابقت دارد.

در رطوبت کمتر از ۲۵٪، مقدار آب برای حل شدن دی اکسید کربن و شروع واکنش کافی نیست. با افزایش رطوبت نسبی، میزان کربناسیون زیاد می شود تا اینکه به حداکثر مقدار حدود ۵۰ تا ۷۰٪ برسد. بالاتر از این درصد، میزان کربناسیون به سرعت

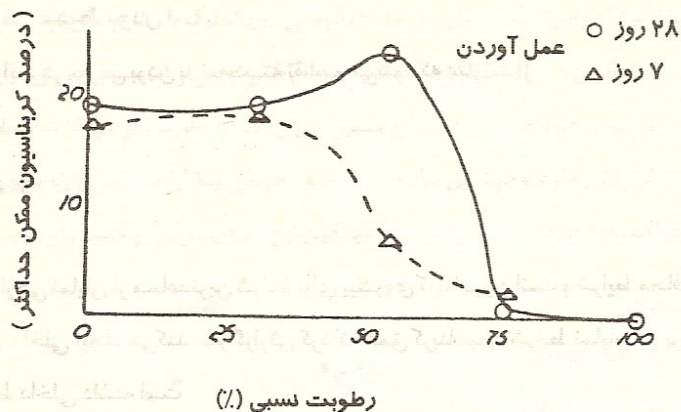
1 - Mari

2 - Freedman

3 - Wardlaw

4 - Straling

5 - Verbeck



شکل ۱-۵ میزان کربناته شدن - رطوبت نسبی

کاهش می یابد و در رطوبت نسبی خیلی بالا واکنش بسیار کند انجام شود؛ زیرا در این حالت، آب تمام حفره ها را پر می کند و مانع از نفوذ دی اکسید کربن می گردد.

بررسی اثرهای محیطی نشان می دهد که با کم شدن بارش باران، کربناسیون افزایش می یابد. بارش به دو صورت بر درصد رطوبت بتن اثر می گذارد:

اولاً باران در رطوبت نسبی همه نقاط اثر می گذارد. ثانیاً باد ممکن است باران را به طرف سطوح قائم براند و باعث نفوذ آب به سطوح قائم نیز بشود.

شرایط بهینه برای کربناسیون و خوردگی متفاوت است. اما شرایط هوای خشک و در پی آن آب و هوای مرطوب (سیکلهای ترو خشک) ممکن است منجر به خرابی شود. زیرا شرایط اولیه برای کربناته شدن مناسب است؛ در حالی که در دوره مرطوب امکان دارد روند خوردگی تقویت شود. کرونه^۱ بیان کرد که سیکل خشک شدن و مرطوب شدن میزان کربناسیون را افزایش می دهد.

۵-۶-۳ نوع محیط

منابع مهم تولید دی اکسید کربن در هوا، کارخانه ها و تردد و سائط نقلیه هستند. در مقابل، درختان و گیاهان به عنوان فیلتر دی اکسید کربن عمل می کنند. به همین دلیل، فرض می شود که غلظت دی اکسید کربن از مناطق شهری به حومه شهری و از حومه شهری به روستایی و از روستایی به کنار دریا کاهش پیدا می کند. ریچاردسن تاثیر انواع محیط را در روند کربناسیون نشان داده است (شکل ۲-۵). صرفه نظر از تقسیم بندی شرایط محیطی، در شرایط داخلی همواره غلظت های بالاتری از دی اکسید کربن مورد انتظار است.

1 - Kroone

۵-۶-۴ شرایط در معرض محیط بودن

همان‌طور که بحث شد، شرایط در معرض بودن به سه دسته تقسیم می‌شود که عبارتند از:

- خارجی، نمایان در برابر باران

- خارجی، حفاظت شده در برابر باران

- داخلی

ویریک^۱ دریافت شرایط خارجی نمایان از مساعدترین شرایط برای پیشروی کربناسیون است و شرایط محافظت شده عمقی در حدود ۳۰٪ کمتر از شرایط داخلی ایجاد می‌کند. میر گزارش کرد که عمق کربناسیون شرایط نمایان در برابر باران کاهشی در حدود ۶۵٪ نسبت به شرایط داخلی داشته است.

ریچاردسن در بررسیهایش نمونه‌های بسیار زیادی ارائه کرده است که موارد فوق را تایید می‌کند. (شکل ۳-۵) توتی بیان کرد که کاهش روند کربناسیون در شرایط مرطوب ممکن است ناشی از سهولت انتشار معکوس یون هیدروکسید کلسیم باشد.

۵-۷ روشهای اجرا

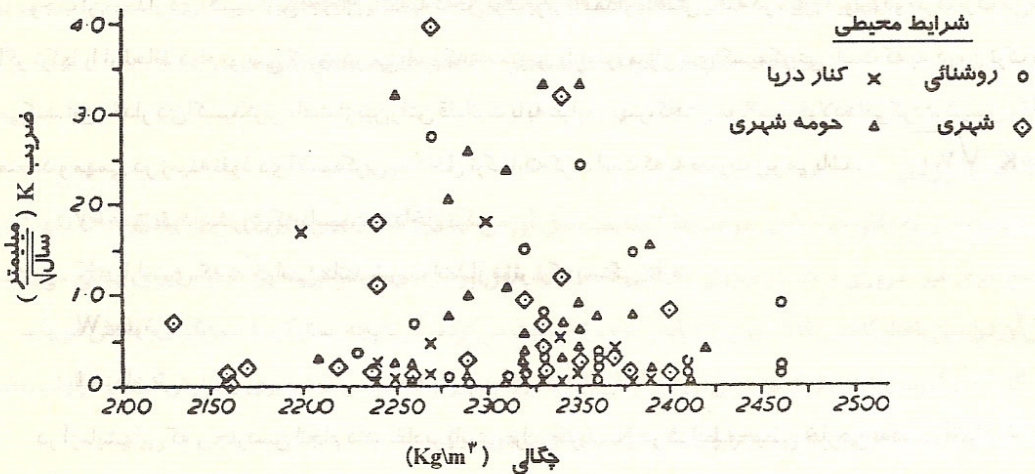
کاره^۲ گزارش می‌دهد که درجه کربناته شدن به ترتیب در روشهای اجرایی زیر کاهش می‌یابد: بتن درجا، بتن پیش‌ساخته، پیش‌ساخته پیش‌تنیده یا پس‌کشیده. کاهش درجه کربناسیون هم ناشی از روند حداکثر نفوذ و نیز عمق می‌باشد.

۵-۸ اثر ترک

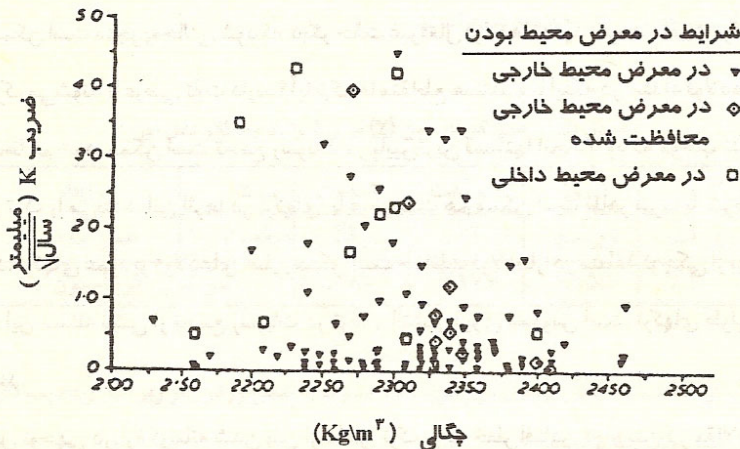
رفتار دی‌اکسید کربن در ترک با رفتار آن در تماس با سطح بتن در معرض محیط متفاوت است. در حالی که ذخیره دی‌اکسید کربن مربوط به سطح بتن در تماس با هوا نامحدود است، حجم دی‌اکسید کربن موجود در ترک باید به دو سطح حمله کند. شدت این حمله با گذشت زمان کاهش می‌یابد. ریچاردسن در بررسیهای خود که شامل ۱۶ نمونه ترک‌خورده بود، با آزمایشهایی نشان داد که بین محیط داخلی و خارجی اختلاف وجود دارد. نمونه‌های خارجی که در معرض باران قرار داشتند کمترین کربناسیون را نشان دادند. اما نمونه‌های داخلی دارای درجه بالایی از کربناسیون بودند. مجموعه نمونه‌های مورد مطالعه شامل یک محدوده ترک به عرض ۰/۵ mm تا ۰/۸ mm بود. در تمام حالتها به جز یک حالت، تمام ترکها کربناته شده بودند، که نشان دهنده نفوذ دی‌اکسید کربن به داخل ترک بود. با آن که در محیط خارجی، پیشروی کربناسیون از وجوه ترکها به‌ندرت از ۱ mm تجاوز می‌کرد؛ در حالت مشابه آن در محیط داخل، پیشروی این عمق تا ۱۰ mm نیز مشاهد شد.

از آنجایی که عرض ترکها نمی‌تواند عامل کنترل‌کننده باشد، بعضی از مشخصات ترک در رفتار محیط داخلی و خارجی

تفاوت دارد شیشل بیان کرد که وجود مقدار قابل ملاحظه‌ای آلودگی در یک ترک باعث دشواری ورودی دی اکسیدکربن می‌گردد. میزان انتشار دی اکسیدکربن در ترک بستگی به اندازه فضاهای خالی و پیچ و خم مسیر جریان دارد. فضاهای خالی در عرض ترکها محسوس است و پیچ و خمها بستگی به موانع مسیر جریان مانند رطوبت، گرد و خاک و محصولات ناشی از واکنش شیمیای کربناسیون و خوردگی دارد. وجود این موانع در شرایط محیطی نمایان در برابر باران بدیهی است. بنابر این، می‌توان ضریب پخش موثر دی اکسیدکربن در ترک را با محاسبه میانگین این ضریب در هوا و جسم بتن به دست آورد.



شکل ۲- تاثیر انواع محیط در روند کربناسیون



شکل ۳- تاثیر شرایط در معرض محیط بودن در روند کربناسیون

اگر ضریب انتشار خیلی کوچک باشد، غلظت دی اکسیدکربن در ترک ممکن است خیلی کم شود. همچنین امکان دارد انتشار معکوس هیدروکسید کلسیم به وجه ترکها، باعث محدود کردن میزان کربناسیون به مقادیر در حدود ۱ mm از وجه ترک شود.

مقادیر بیشتر ضریب انتشار، پیشروی اعماق بیشتر کربناسیون را امکان پذیر می سازند. ضریب پخش مؤثر در ترک به رطوبت نیز بستگی دارد که ممکن است در طول ترک تغییر کند و ورود گرد و خاک و غبار به داخل ترک به وسیله باران و باد و همچنین تجمع محصولات واکنش های انجام یافته، می تواند ضریب انتشار را به طور محسوسی کاهش دهد.

بدیهی است که ضریب انتشار بتن نقش عمده ای در روند کربناته شدن ایفا می کند و نیز تصور می شود که پیشروی کربناسیون روی هر وجه ترک نمی تواند از نصف مقادیر مربوط به سطح بتن تجاوز کند. احتمال رسیدن به یک جریان دایم نیز وجود دارد که به موجب آن، مقدار دی اکسید کربن جریان یافته به داخل ترک برابر با مقدار واکنش یافته در میان دیواره دو طرف ترک می شود. اگر ترکها را از لحاظ دوام بررسی کنیم، در می یابیم که مهمترین پارامتر، میزان دی اکسید کربنی است که به درون ترک نفوذ می کند. این مقدار دی اکسید کربن باعث از بین رفتن قلیائیت یا به عبارت بهتر، کاهش محافظت فولادهای گردد. شیشل مقالات متعدد و مهمی در زمینه نفوذ دی اکسید کربن به داخل ترک ارائه کرده است که به صورت زیر می باشد:

$$Y = K \sqrt{Wt}$$

Y = عمق نفوذ پیشروی کربناسیون به داخل ترک

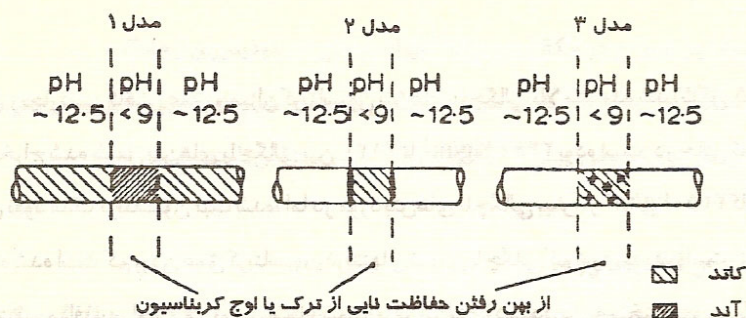
K = پارامتری که به خواصی مانند ضریب انتشار مؤثر ترک بستگی دارد

W = عرض ترک

t = زمان

در آزمایشهایی که ریچاردسن انجام داد، مقادیر پایینی برای ضریب K در شرایط محیطی خارجی به دست آمد که احتمالاً ناشی از تجمع رطوبت و گرد و خاک در ترک است و باعث کاهش زیاد ضریب انتشار می گردد. گسترش و پیشروی محدود و کم کربناسیون در هر طرف ترک، ممکن است ناشی از رطوبت باشد که به انتشار معکوس یون های هیدروکسید کلسیم کمک می کند. مجموع این اثرها ممکن است منجر به حالتی شود که دیگر حالت غیرفعال فولادها تهدید نگردد. ماهیت ترکها اغلب خیلی مهم است. آیا ترک ها نازک می شوند یا عرضی ثابت دارند؟ آیا ترک ها متقاطع هستند و یا اینکه در امتداد فولادهای اصلی قرار دارند. اگر عرض ترک ها کم شود، ممکن است تجمع رسوبات در پایین ترین قسمتها ایجاد شود که موجب تنگ شدن آن قسمتها می شود و به تدریج ترک را می بندد. این اثرها در ترکهای با عرض ثابت هم ممکن است ظاهر شود؛ به شرطی که عرض ترک به اندازه کافی کم باشد. ترکهای عمود بر فولادهای اصلی ممکن است حفاظت فولادها را در منطقه کوچکی از بین ببرد، اما خوردگی ادامه پیدا نکند که این مسئله ناشی از تجمع رسوبات در ترک و انتشارپذیری معکوس است. ترکهای طولی کمتر قادر به دفاع خود به خودی هستند.

تفسیرهای قابل توجهی درباره کربناته شدن بتن از داخل ترک و به خطر افتادن دوام بتن در مقالات آورده شده است. شیشل در یکی از مقالات بیان کرد که در ترکهایی به عرضی 0.15mm تا 0.35mm بهبود خود بخودی می تواند صورت بگیرد که این امر ناشی از رسوب مواد در ترک می باشد. او مطرح کرد در صورتی که کربناته شدن بتن در داخل ترک باعث کاهش قلیائیت موضعی آرماتورها گردد، سه حالت برای آند و کاند می تواند فرض کرد که در شکل ۴.۵ آورده شده است.



شکل ۴- مدل‌های خوردگی در منطقه‌ای که کاهش قلئائیت محلی وجود دارد.

۵-۹ عمل آوردن

دست یافتن به مقاومت طراحی در شرایط نامناسب عمل آوردن، ممکن است منجر به این گمان اشتباه گردد که نگهداری صحیح امری غیر ضروری است. در صورتی که ثابت شده است عمل آوردن صحیح در تولید بتن با دوام امری حیاتی می‌باشد. عمل آوردن بتن باعث کاهش نفوذپذیری و افزایش ذخیره قلئائیت می‌گردد، در نتیجه عمق کربناسیون بسیار کاهش می‌یابد. گروپ^۱ و لورنس با افزایش زمان عمل آوردن از ۱ روزه ۳ روز، پنج برابر کاهش در نفوذپذیری را گزارش کردند. افزایش زمان نگهداری از ۳ روز به ۲۸ روز باعث نه برابر کاهش در نفوذپذیری خواهد شد.

اسمالچیک مقدار ۵۰٪ کاهش در عمق کربناسیون را در مورد نمونه‌هایی با ۲۸ روز عمل آوردن نسبت به نمونه‌های مشابه، ولی با ۳ روز عمل آوردن ثبت کرد. کورز^۲ برای نمونه‌های عمل آورده شده در چهار حالت مختلف، پس از ۹۰ روز، عمق کربناسیون را به دست آورد. این نتایج در جدول ۱۵ خلاصه شده است.

جدول ۱۵- عمق کربناسیون (%) برای شرایط مختلف عمل آوردن

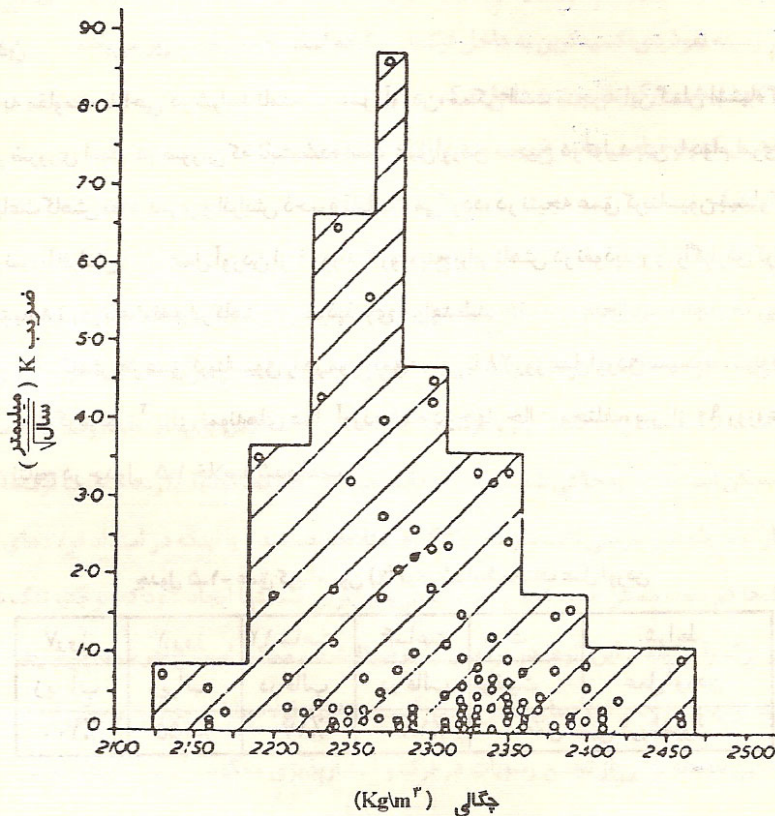
شرایط	مدت	۶ ساعت	۱۲ ساعت	۱ روز	۷ روز
عمل آوردن	موقعیت	در قالب	در قالب	زیر آب	زیر آب
عمق نسبی کربناسیون		٪۱۸۰	٪۱۷۰	٪۱۵۵	٪۱۰۰

سبسی^۳ خاطرنشان ساخت که عمل آوردن در رطوبت بالا نسبت به عمل آوردن در زیر آب ارجحیت دارد، زیرا ممکن است منجر به شسته شدن هیدروکسید کلسیم گردد.

عمل آوردن در بخار باعث کامل شدن هیدراسیون سیمان می‌گردد که این امر با کاهش نفوذپذیری و تولید مقدار کافی هیدرواکسید کلسیم همراه است.

۱۰-۵ چگالی

در بررسی‌های ریچاردسن کاهش عمق و میزان کربناسیون بتن‌های با چگالی بالا مشاهده شد. (شکل ۵.۵) نمونه‌های استخراج شده شامل بتن‌های با چگالی بین ۲۱۳۰ تا 2460 Kg/m^3 بوده است. در حالی که در مورد بتن‌های با چگالی کم عمق‌های نفوذ اندک کربناسیون ثبت شده، اما در مورد بتن‌های با چگالی بیش از 2250 kg/m^3 کاهش تصاعدی عمق کربناسیون مشاهده شده است. کم بودن عمق کربناسیون در بتن‌های نمایان با چگالی کم امری بدیهی است، زیرا این بتن‌ها دارای نفوذپذیری بالا هستند و منافذ به راحتی می‌توانند اشباع شوند؛ بنابر این، دی‌اکسیدکربن به سختی نفوذ می‌کند. کاری^۱ جهت یافتن رابطه‌ای بین چگالی و عمق کربناسیون مطالعاتی انجام داد. او بیان کرد که هم عمق کربناسیون و هم چگالی به



شکل ۵-۵ تغییرات روند کربناسیون با چگالی

درجه تراکم و عمل آوردن بتن بستگی دارند. به علاوه، او اظهار داشت اگر چه داشتن همبستگی مناسب بین چگالی و عمق

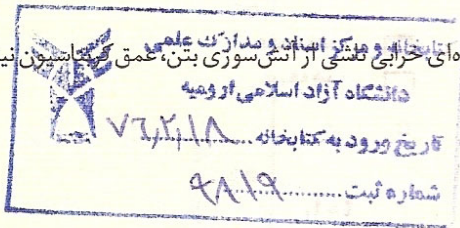
کربناسیون بعید است، تغییر کوچکی در چگالی می‌تواند تغییرات بزرگی در نفوذپذیری ایجاد کند.

بنابر این، به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گرفت که در بتن‌های سنگین کم شدن عمق کربناسیون قابل پیش‌بینی است ریچاردسن به‌عنوان معیار، بتن‌های با وزن مخصوص بیش از 2375 kg/m^3 را بتن سنگین نامیده است.

۵-۱۱ خرابی ناشی از آتش سوزی

هامادا در گزارش خود آورده است که در بتن‌های در معرض آتش‌سوزی تا دمای 600°C سانتیگراد، کربناسیون روندی طبیعی دارد. آزمایش‌هانشان می‌دهد که در دمای بالاتر از 700°C سانتیگراد، میزان کربناسیون برابر با 25 mm در هر ساعت زمان آتش‌سوزی می‌باشد.

مطالب فوق دال بر این مطلب مهم است که در بررسی‌های سازه‌ای خرابی ناشی از آتش‌سوزی بتن، عمق کربناسیون نیز باید در نظر گرفته شود.



۵-۱۲ هندسه عضو

در فرآیند کربناسیون هندسه عضو شامل ابعاد فیزیکی عضو، ابعاد هندسی مقطع، امتداد قالب‌گیری و اثر گوشه‌ها است.

اندازه فیزیکی اعضاء، در تیرها و ستون‌هایی که از دو یا چند وجه امکان کربناته شدن دارند مهم است.

همان‌طور که در شکل ۵-۶ آمده است، در حالی که انتشار دی‌اکسید کربن درون سطح اصلی ادامه دارد، سطح در دسترس برای کربناته شدن کم می‌شود. بنابر این، میزان پیشروی جبهه کربناسیون در این حالت نسبت پیشروی در حالت تک محوری بیشتر خواهد بود. این اثرها در بیشتر اعضاء قابل چشم‌پوشی است؛ اما برای اعضاء با ابعاد کوچک مسئله چشمگیری است، زیرا می‌تواند چندین سال از عمر مفید سازه بکاهد.

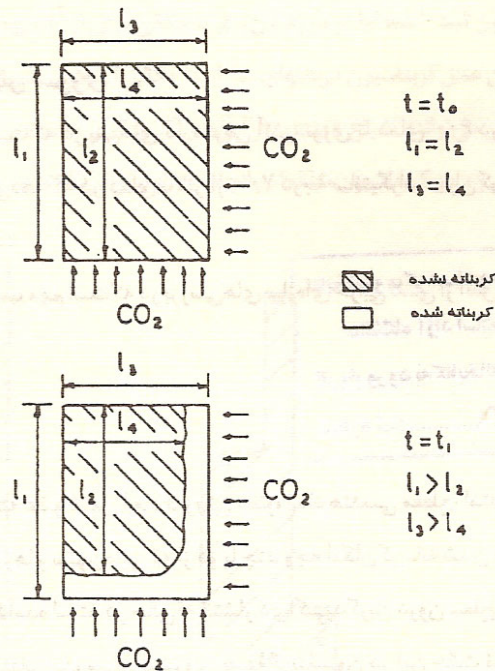
توتی و نویل اثر ضخامت مقطع در کربناسیون را روشن ساخته‌اند. در مقاطع نازک، عمق بیشتری برای کربناته شدن قابل پیش‌بینی است؛ زیرا اثر تغییرات جوی دما و رطوبت نسبی در مقاطع نازک بیشتر است. تفسیرهای بعدی در مورد واکنش ساختمان مقطع، در مقابل آزاد شدن رطوبت در خلال روند کربناسیون است. اگر قطعه نازک باشد، به احتمال زیاد در مقابل تغییرات محیط واکنش نشان می‌دهد. در صورتیکه در مقاطع ضخیم، ایجاد فشار بخار از ورود بیشتر دی‌اکسید کربن جلوگیری می‌کند. کاسایی و همکارانش ذکر کردند که عمق کربناسیون در یک مکعب بتنی به ابعاد $1 \times 1 \times 1 \text{ m}$ دور شدن از سطح عضو کاهش می‌یابد. در مغزه‌های گرفته شده نیز مشخص گردید که مقاومت مغزه‌های گرفته شده از پایین یک دیوار یا ستون بتنی معمولاً بیشتر از مناطق فوقانی آن است.

براون گزارش کرد که نفوذ دو محوری دی‌اکسید کربن در گوشه تیرها و ستون‌ها می‌تواند احتمال و آمدن بتن را افزایش دهد.

هامادا اظهار داشت که خرابی ناشی از یخ‌زدگی گوشه ساختمانها باعث نفوذپذیری بیشتر و در نتیجه، افزایش کربناسیون می‌گردد.

۱۳-۵ اسلامپ

هامادا و آبه^۱ در یافتند که افزایش اسلامپ باعث زیاد شدن عمق کرناسیون می‌گردد. البته، این اختلاف قابل توجه نیست در تفسیر دیگری اهمیت نسبت W/C ثبت شده است.



شکل ۵-۶ پروفیل کرناسیون تحت نفوذ دو محوری

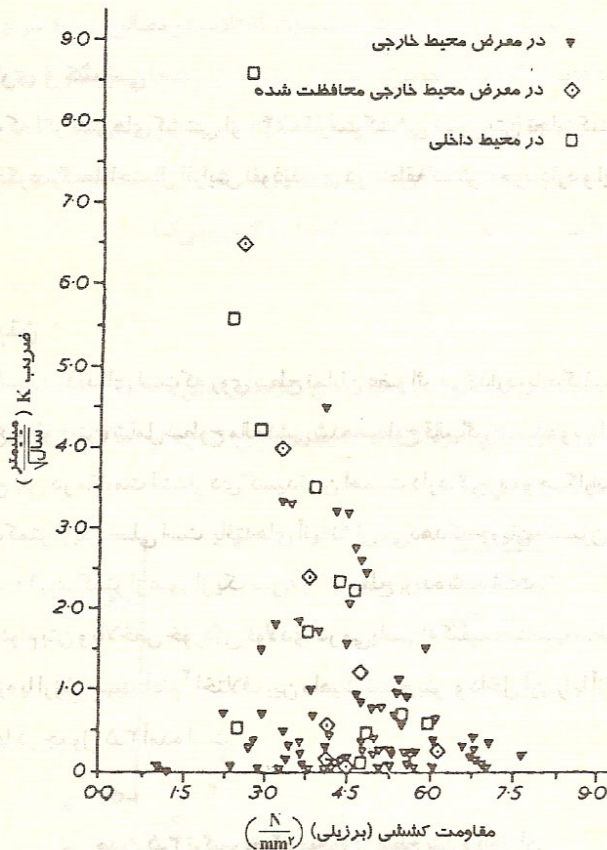
۱۴-۵ مقاومت

معمولاً مقاومت بتن، نشان دهنده کیفیت مصالح است که ارتباط بین مقاومت و روند کرناسیون را تقویت می‌کند. محققین بسیاری به بررسی این ارتباط پرداخته‌اند. پیهلاجوارا فرمولی برای پیش‌بینی عمق کرناسیون بر اساس شرایط خارجی و تقسیم‌بندی مقاومت بیان کرد. در این فرمول، مقاومت به سه دسته کم، متوسط و زیاد تقسیم بندی شده است.

در حالی که در شرایط نمایان مقادیر خیلی کم عمق کرناسیون ثبت شده است؛ برای مقاومت‌های بیشتر، کاهشی تصاعدی در عمق کرناسیون وجود دارد. سوامی، باندپویادی و گریمر با آزمایش بخش رویی تیرها و دال‌ها نشان دادند که سطوح بالای نسبت به سطوح پایین کمتر کرناته می‌شوند. حرکت سیمان به سمت بالا به عنوان یکی از دلایل این امر پیشنهاد شده است. در مورد تیرها و سقف‌ها، اختلاف نفوذپذیری سطح بالایی ماله کشی شده و سطح پایین قالب بندی شده نیز می‌تواند عاملی در جهت کمتر بودن عمق کرناسیون باشد. جدول ۵-۲ تقسیم بندی مقاومت را بر اساس آزمایشهای ریچاردسن نشان می‌دهد.

جدول ۲-۵ تقسیم بندی مقاومت

طبقه بندی مقاومت	کم	متوسط	زیاد
مقاومت کششی (برزیلی) N/mm^2	$< 2/75$	$2/75 - 5/5$	$> 5/5$



شکل ۲-۵ روند کربناسیون - مقاومت (با تغییر شرایط محیطی)

نیشرنشان داد که برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه، کاهش مقاومتی به اندازه $10 N/mm^2$ ، تقریباً سه برابر افزایش عمق کربناته شدن بتن ایجاد می شود که بسیاری از گزارشهای رسیده به کمیسیون کربناسیون در مورد بتن های با مقاومت بیش از $30 N/mm^2$ آن را تایید کرده اند بسیاری از محققین نیز کاهش عمق کربناسیون را با افزایش مقاومت مورد تایید قرار داده اند. باندیوپادیایی و سوامی دریافتند که در بتن سبک نیز می توان با افزایش مقاومت، شاهد کاهش عمق کربناسیون بود. اسمالچیک بیان کرد که عمق کربناسیون با ریشه دوم مقاومت بتن نسبت به معکوس دارد. لوئیس و هو نیز اظهار داشتند در مقاومت های بیش از $60 N/mm^2$ کربناسیون فقط یک اثر ظاهری دارد.

در گزارش شماره ۱۱ انجمن فنی بتن آمده است که مغزه‌های قائم حفر شده نسبت به مغزه‌های افقی حفر شده افزایش مقاومتی در حدود ۷ تا ۹ درصد نشان می‌دهند؛ در حالی که هر دو مغزه متعلق به یک مخلوط بتن بوده‌اند. بنابر این، گزارش ریچاردسن که در آن کمتر بودن عمق کرناسیون در مغزه‌های قائم نسبت به مغزه‌های افقی مطرح شده است، از نظر مقایسه مقاومتها قابل توجه است.

۱۵-۵ تنش‌های فشاری و کششی

موسکوین^۱ بیان کرد، که اگر تنش‌های کششی از ۴۰٪ مقاومت کششی نهایی بتن تجاوز کنند، دوام بتن مورد تهدید قرار می‌گیرد؛ زیرا به غیر از عملکرد ترک‌ها، احتمال افزایش نفوذپذیری در منطقه کشش وجود دارد و این امر باعث اختلاف در میزان کرناسیون می‌گردد.

۱۶-۵ کیفیت سطح بتن

با توجه به اینکه کرناسیون پدیده‌ای است که روی سطح نمایان عضو اثر می‌گذارد، باید کیفیت سطح و لایه‌های زیر سطح مورد توجه قرار گیرند. انواع سطوح بتن، شامل سطوح ماله کشی شده، سطوح قالب‌گیری شده و سطوح به صورت ویژه عمل آورده شده هستند. کیفیت سطح بتن در مقاومت انتشار دی‌اکسیدکربن اهمیت دارد. گیورف و همکارانش ثابت کردند که نفوذپذیری در سطوح قالب‌گیری شده کمتر از بتن اصلی است. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که جریان اکسیژن از میان یک نمونه با دو سطح قالب‌گیری شده، در حدود ۱۰ برابر کمتر از عبور از یک نمونه با دو سطح بریده شده است.

بنابراین، در خصوص دوام بتن و بالاخص خوردگی فولادی در می‌یابیم که کیفیت مناسب سطح تمام شده در چند میلیمتر انتهایی پوشش به چه اندازه با ارزش است. آدام^۲ اختلاف بین ماهیت سطح بتن و داخل آن را با آنالیز این دو منطقه تعیین کرد. خلاصه نتایج این بررسی‌ها در جدول ۳-۵ آمده است.

جدول ۳-۵ ترکیب مصالح موجود در سطح بتن و داخل آن

	موقعیت	سطح بتن	داخل بتن
ترکیب بتن	سیمان	۵۰٪	۱۶٪
	آب	۲۵٪	۸٪
	سنگدانه‌ها	۲۵٪	۷۵٪

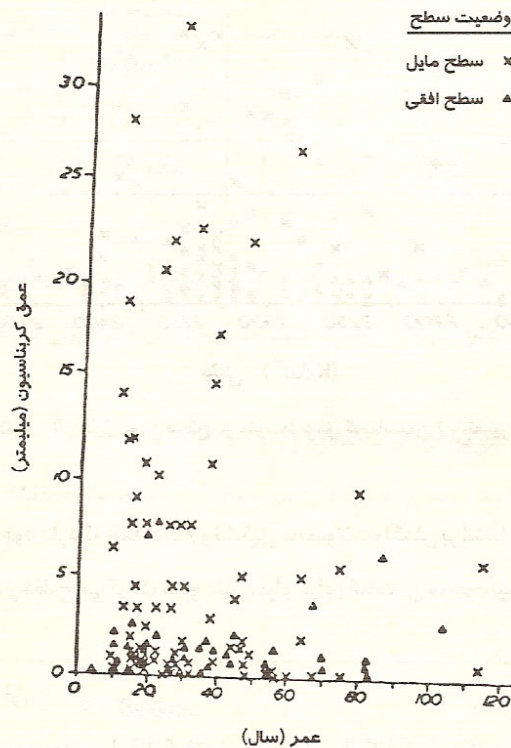
جدول ۳-۵ نشان می‌دهد در حالی که نسبت آب به سیمان در دو منطقه یکسان است، درصد بالای سیمان در سطح بتن اهمیت خاصی برخوردار است، این امر ممکن است ناشی از حرکت سیمان به سطح بتن باشد که قبلاً شرح داده شد. در

بررسی‌های ریچاردسون تمام سطوح بتن‌های مورد مطالعه کربناته شده بودند؛ اما فقط در یک سوم از نمونه‌ها، پیشروی کربناسیون از ۱ mm تجاوز کرد. کربناته شدن بتن نهایتاً به حدی می‌رسد که باعث غیر قابل نفوذ شدن سطح خواهد شد و دی‌اکسید کربن دیگر نمی‌تواند به آن نفوذ کند. در نهایت روند کربناسیون سبب کاهش نفوذپذیری و ایجاد سطح نفوذناپذیر خواهد شد.

پخش سنگدانه‌های ریز نزدیک سطح بتن ممکن است باعث ایجاد اختلاف در مصالح موجود در جسم بتن و مصالح پوشش گردد که ناشی از تماس سنگدانه‌ها با شبکه میلگردها می‌باشد. عامل مهم، نسبت ضخامت پوشش اسمی به اندازه سنگدانه‌هاست که به‌خصوص در سطوح قالب‌بندی شده اهمیت بیشتری دارد. آدام اظهار داشت این نسبت برای سطوح قائم باید $1/8$ تا 2 و برای سطوح افقی $1/2$ تا $1/3$ باشد. سوامی و بادیوپادهای نیز پیشنهاد کردند که در بتن سبک، پوشش می‌بایست به اندازه ۵ mm بیشتر در نظر گرفته شود که این امر از کربناته شده خود سنگدانه‌ها جلوگیری می‌کند.

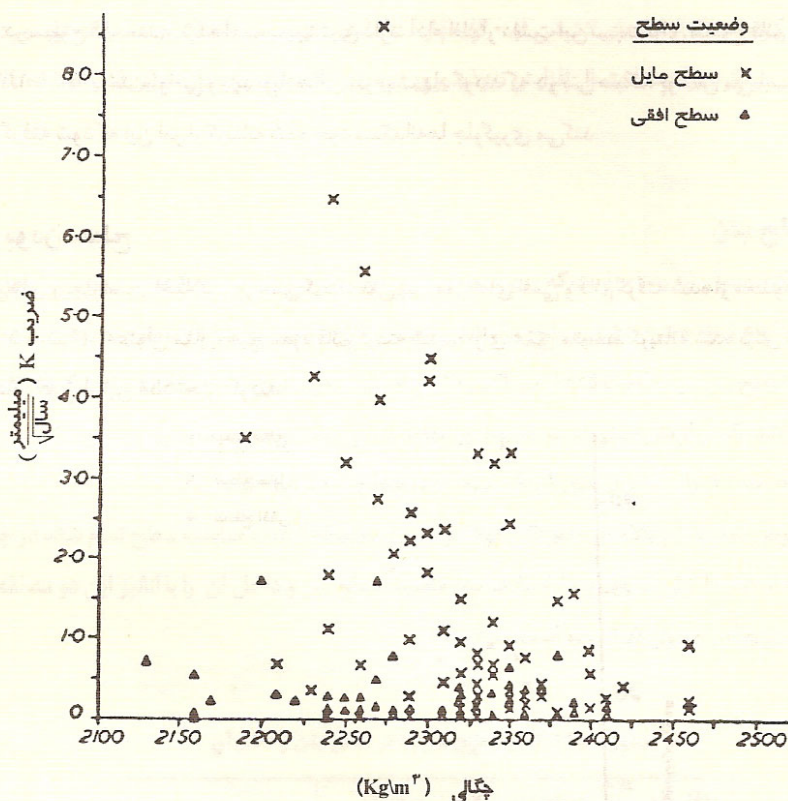
۵-۱۷ مایل بودن سطح

در بررسی‌های ریچاردسن، اختلافی در عمق کربناسیون بین مغزه‌های افقی و قائم گرفته شده از محدوده فشاری مشاهده شد (شکل‌های ۸-۵، ۹-۵). به‌عنوان مثال، هیچ مغزه قائم گرفته شده دارای عمق متوسط کربناته شده بیش از ۸ mm نبوده در حالی که مغزه‌های افقی از این عدد تجاوز کردند.



شکل ۵-۸- اثر مایل بودن سطح در عمق متوسط کربناسیون (با تغییر سن بتن)

از آنجایی که دو گروه از یک محدوده نمونه گیری شده بودند، اختلاف میزان کربناسیون مربوط به تغییرات درصد رطوبت و طبیعت سطح بتن در این دو حالت است. همانطور که قبلاً اشاره شد، انتشار دی اکسید کربن در بتن اشباع بسیار کند صورت می گیرد. در سطوح افقی، آب باران می تواند روی سطوح قرار گیرد. و نفوذ کند. اما در سطوح افقی به مدت طولانی مرطوب باقی می ماند و نفوذ آب احتمالاً عمیق تر است گروهی از محققین نیز اختلاف میزان کربناسیون در این دو سطح را به سطح نهایی بتن مربوط دانسته اند. در سطوح قائم عمده تاً سطح بتن قالب گیری شده است، ولی در سطح افقی بتن ماله کشی شده است.



شکل ۹-۵ - اثر مایل بودن سطح در متوسط عمق کربناسیون (با تغییر چگالی بتن)

در اینجا این احتمال نیز وجود دارد که امتداد فرم و تشکیل محصولات واکنش بر انتشار پذیری بتن تاثیر گذارند. این فرضیه در بحث های عملی به طور مکرر مطرح می گردد، هیچ دلیلی برای اثبات آن موجود نیست.

۵-۱۸ نسبت آب به سیمان

این مشخصه در مقالات مورد توجه بسیار قرار گرفته است. کمیته ریلیم گزارش کرد که در عمل، بتن کربناته نشده را می توان با

به کار بردن نسبت آب پایین به سیمان تولید کرد. سائیتو^۱ نیز بیان کرد که در روند کرناسیون نسبت به آب سیمان نقش مهمتری در مقایسه با نسبت سیمان به تنهایی ایفا می‌کند. در بسیاری از تحقیقات بر اهمیت عمل آوردن تاکید شده است. بگت^۲ نشان داد رژیم عمل آوردن با افزایش نسبت به آب سیمان بسیار سنگین‌تر می‌شود.

مشاهدات کرناته شدن برای بتن‌های با نسبت W/C مختلف نشان می‌دهد که میزان کرناسیون با کاهش نسبت W/C کم می‌شود، این کاهش به ویژه در نسبت‌های زیر ۰/۶ شدیدتر است. طبق نظریه توتی دلیل این امر آن است که در نسبت پایین آب به سیمان فضاهای موئینه قادر به نگهداری تماس و اتصال با یکدیگر نیستند و عامل آن کاهش مقدار و حجم این فضاهاست. عده‌ای از محققین، به مقایسه عمق کرناسیون برای نسبت‌های مختلف W/C پرداخته‌اند، که نتایج در جدول ۴-۵ آمده است.

جدول ۴-۵- مقایسه نسبی تاثیر نسبت آب به سیمان

منبع	مقادیر نسبی کرناسیون	نسبت آب به سیمان
ژیل ^۳	۱:۱/۲، ۱/۳، ۱/۴، ۳/۸	۰/۵، ۰/۶۵، ۰/۷۸، ۰/۸۲، ۱/۲۹
هامدا	۱:۲، ۵	۰/۵، ۰/۶۵، ۰/۷۵
کاسایی	۱:۲، ۵	۰/۵، ۰/۶۵
ماتیس	۱:۲	۰/۵۵، ۰/۸۵
میر	۱:۲، ۴	۰/۵، ۰/۸
نیشتر	۱:۲، ۴	۰/۴، ۰/۵، ۰/۷
والز ^۴	۱:۲، ۵، ۵	۰/۴۵، ۰/۶، ۰/۸

در یک گزارشی دیگر، لورنس^۵ و گروپ^۶ بیان کردند که ۵٪ افزایش در نسبت آب به سیمان، می‌تواند موجب ۱/۶ برابر افزایش در نفوذپذیری شد. این امر تاثیر سودمند کاهش نسبت آب به سیمان را در میزان کرناسیون تایید می‌کند.

۱۹-۵ اهمیت نسبی عوامل مؤثر بر کرناسیون

در جدول ۵-۵ (ریچاردسن) اهمیت نسبی تاثیرات بررسی شده است. تعداد ستاره‌ها نشان دهنده درجه اهمیت است.

1 - Saito

2 - Beakett

3 - Gille

4 - Walz

5 - Lawrence

6 - Grube

جدول ۵۵ ارزیابی موضوعی اهمیت نسبی عوامل موثر بر کربناسیون

عامل	درجه اهمیت
سن	***
مشخصات سنگدانه‌ها	*
سیمانهای مخلوط	(**)
غلظت دی اکسیدکربن	**
درصد سیمان، نوع و کیفیت آن	*
شرایط آب و هوایی و در معرض محیط بودن	****
روش اجرا	*
ترک خوردگی	**
عمل آوردن	****
چگالی	*
خرابی ناشی از آتش سوزی	(*)
هندسه عضو	*
نفوذ پذیری و انتشار	****
مقاومت	**
ناحیه تنشی	*
کیفیت سطح بتن	***
وضعیت شیب سطح بتن	***
نسبت آب به سیمان	*****
نشان دهنده حالت خاص	()

۶- اثر کربناسیون بر بتن

به جز اثر دی اکسیدکربن بر هیدراکسید کلسیم که نتیجه آن کم شدن قلیائیت بتن است، کربناسیون اثرهای دیگری نیز دارد. بعضی از این اثرها سودمند هستند و ممکن است میزان کربناسیون را نیز اصلاح کنند. اثر کربناسیون در عوامل زیر بررسی شده است:

- | | | |
|-------------------|-------------------|-------------------------|
| - سنگدانه‌ها | - کلرید | - خزش |
| - چگالی | - پتاسیل الکتریکی | - رفتار یخ زدن و آب شدن |
| - مدول الاستیسته | - مدول گسیختگی | - حجم فضاهای خالی |
| - حجم فضاهای خالی | - جمع شدگی | - مقاومت |
| - حمله سولفات‌ها | - سختی سطح | - سیمان هیدراته نشده |

اگرچه بررسی مطالب فوق نشان می‌دهد که کربناته شدن بتن، ممکن است بسیاری از خواص آن را تحت تاثیر قرار دهد،

درمی یابیم که تاثیر اصلی کربناسیون کاهش فضاهای داخلی و نفوذپذیری بتن است.

۱-۶ سنگدانه‌ها

مالینوسکی ایتال^۱ پس از مطالعه ساختمانهای روم باستان دریافت که سنگدانه‌های در روند کربناسیون مورد حمله واقع شده بودند، اما این عمق از ده میکرون تجاوز ننموده است. گاسکین^۲ در دو مقاله منتشر شده در سال ۱۹۵۰ بیان کرد در جایی که سنگدانه‌های تحت واکنش در دسترس باشند، کربناسیون می‌تواند تاثیر بسزایی داشته باشد. او دریافت که کربناسیون اثر قلیایی سنگدانه‌های تحت واکنش را با ایجاد پوسته نفوذناپذیری از کربنات کلسیم در اطراف سنگدانه‌ها کاهش می‌دهد.

۲-۶ کلرید

یون کلرید نیز یکی از عوامل مؤثر در خوردگی فولاد است. به همین دلیل میزان یون کلرید مجاز در بتن محدود شده است. محققین بیان کرده‌اند که کربناته شدن بتن، به واسطه تجزیه کلرو آلومینات که به یون کلرید چسبیده است، می‌تواند خطر نفوذ کلریدها را تشدید کند. احتمال وقوع خوردگی بستگی به میزان کلرو موجود در بتن دارد که با درصد وزن کلر نسبت به وزن سیمان سنجیده می‌شود. آیین نامه BS12 انگلستان سه حالت زیر را بر حسب میزان کلرید در نظر می‌گیرد:

- ۱ - خوردگی کم: هنگامی که وزن کلرو موجود در بتن کمتر از $0/4$ درصد وزن سیمان است
 - ۲ - خوردگی متوسط: هنگامی که وزن کلرو موجود در بتن بین $0/4$ تا 1 درصد وزن سیمان است.
 - ۳ - خوردگی زیاد: هنگامی که وزن کلرو موجود در بتن بیش از 1 درصد وزن سیمان است
- اگر بتن، کربناته شده باشد، احتمال وقوع خوردگی در تمام حالات فوق وجود دارد. این مسئله در شکل (۱-۶) نشان داده شده است. [۷]

۳-۶ خزش

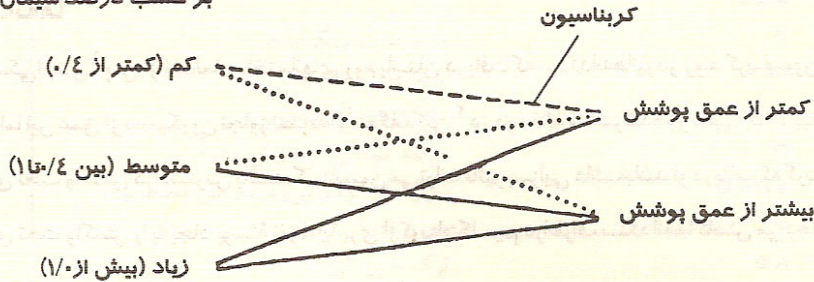
اثر کربناسیون در خزش بستگی به غلظت دی اکسید کربن و انجام بارگذاری پیش و یا پس از کربناسیون دارد. بونفیلدا^۳ و فورستر توافق کردند که اگر بارگذاری بعد از عمل کربناته شده صورت گیرد، کاهشی در میزان خزش دیده خواهد شد؛ ولی اگر بارگذاری قبل از عمل کربناسیون صورت گیرد، در طی روند کربناته شدن خزش افزایش می‌یابد. علت این امر آن است که ساختار ظرفیت باربری در خلال تبدیل هیدروکسید کلسیم به کربنات کلسیم موقتاً ضعیف می‌شود. این اثر در غلظت معمولی اتمسفر، چندان محسوس نیست.

1 - Malinowskietietal

2 - Gaskin

3 - Buenfield

درصد یون کلرید
بر حسب درصد سیمان



راهنما

- - - خطر خوردگی کم در تمام شرایط محیطی
- خطر خوردگی متوسط در شرایط مرطوب
- خطر خوردگی زیاد با شرایط محیطی مرطوب و بتن با کیفیت پایین تشدید می شود

شکل ۱-۶- خطر خوردگی

۴-۶ چگالی

پالاتوس و لیتوال^۲ بیان کردند که کربناته شدن می توان چگالی بتن را افزایش دهد. این افزایش از ۱٪ تا ۴٪ متغیر است. وربک در اثر کربناسیون افزایش وزنی تا ۴٪ را مشخص کرد. او با آزمایش روی ملاتها افزایش وزنی در حدود ۴٪ را در اثر کربناسیون ثبت نمود. با توجه به اینکه هیچ تغییر حجمی در نمونه ها ایجاد نشده بود، بنابر این چگالی بتن ۴٪ افزایش داشت. اثر کربناسیون در حجم فضاهای خالی، در بخش های بعد بررسی می شود.

۵-۶ پتانسیل الکتریکی

اندازه گیری پتانسیل الکتریکی بتن برای تشخیص احتمال خوردگی به کار می رود. برای مثال، پتانسیل الکترو شیمیایی کمتر از ۲۰۰ mv تغییرات کمی را در خوردگی نشان می دهد. اما خوردگی زمانی رخ می دهد که این مقدار به حدود ۳۵۰ mv برسد. کربناسیون باعث افزایش پتانسیل الکتریکی تا ۱۰۰ می گردد. براون و همکارانش بیان کردند که علت این پدیده به علت وجود پتانسیل در سطح بین ولایه بتن کربناته شده و کربناته نشده است.

۶-۶ یخ زدن و آب شدن

هلیس دورف^۱ همکارانش در دانشگاه کارل سرویه^۲ در گزارشی بیان کردند که کربناته شدن باعث مقاومت بیشتر بتن در مقابل روند یخ زدن و آب شدن آن می‌شود. این امر ناشی از بهبود ساختار فضاهای خالی بتن است. با تشکیل محصولات واکنش کربناسیون حجم فضاهای خالی کاهش می‌یابد، بنابر این، نفوذ آب مشکل‌تر شده و از خطرات یخ‌زدگی کاسته می‌شود.

۶-۷ مدول الاستیسیته

همانطور که قبلاً ذکر شد بتن کربناته شده، شکننده‌تر است. میرز و جونز^۳ افزایش محسوسی در مدول الاستیسیته نمونه‌های بتن کربناته شده مشاهده کردند.

۶-۸ مدول گسیختگی

مانز^۴ و شاتر^۵ طبق گزارشی بیان کردند که بتن کربناته شده در نهایت نسبت به بتن غیر کربناته دارای مقاومت بیشتری است. با روند خزش، کاهش موقت در مدول گسیختگی در خلال کربناته شدن بتن آشکار می‌شود.

۶-۹ حجم فضاهای خالی

در اثر کربناسیون نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد و فضاهای خالی بتن نیز تغییر می‌کنند. بررسی و آزمایش‌ها نشان می‌دهند که در کربناسیون قطر فضاهای کوچکتر کاهش می‌یابد. اما این اثر آن در فضاهای بزرگ، مهم و قابل توجه نیست. هلیس دورف و همکارانش دریافتند که در اثر کربناسیون، کاهش در حدود ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ انگستروم در اندازه‌های فضاهای خالی رخ می‌دهد. هوست^۶ و همکارانش نیز مطرح کردند که این کاهش در حفره‌های بیش از ۲۰۰۰ انگستروم محسوس‌تر است. تحقیقات پیه‌لجاوارا نشان می‌دهد که کربناسیون کل فضاهای خالی را کاهش می‌دهد، اما این اثر در حفره‌های بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ انگستروم بیش از حفره‌های کوچکتر است. رمضانپور طی تحقیقاتی در دانشگاه لیدز^۷ نشان داده شده که تأثیرات این پدیده در حفره‌های بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ انگستروم بیشتر است [۸].

کوری با انجام آزمایش‌هایی بیان کرد که اگر گاز نیتروژن با فشار به داخل بتن تزریق شود، در اثر باز شدن ترک‌های کوچک، نفوذپذیری افزایش می‌یابد. در حالی که تزریق گاز دی‌اکسید کربن باعث کاهش نفوذپذیری می‌شود. بنابر این، اتفاق نظر به این است که کربناته شدن بتن باعث کاهش حجم فضاهای خالی آن می‌گردد. این امر ممکن است در بعضی خواص تغییراتی ایجاد کند، که در ادامه این فصل به بررسی آن می‌پردازیم.

1 - Hilsdorf

2 - Karlsruhe

3 - Jones

4 - Manns

5 - Schatz

6 - Houst

7- Leeds

۶-۱۰ جمع شدگی (انقباض)

انقباض ناشی از کربناته شدن بتن را به کاهش آب تبخیر نشده در ژل سیمان نسبت می‌دهند. تئوریهای مختلفی برای بیان این پدیده عنوان شدن است. الکساندر، واردلو و لی^۱ معتقدند که آب آزاد شده در روند کربناسیون باعث انقباض می‌گردد. پاور^۲ استدلال کرد که انقباض به واسطه تجزیه بلورهای هیدروکسید کلسیم تحت فشار به کربنات کلسیم و رسوب آنها در مکانهای بدون فشار صورت می‌گیرد. این عمل، فشارپذیری خمیر سیمان سخت شده را بیشتر می‌کند و باعث افزایش انقباض می‌گردد.

در فرضیه دیگری که سوانسن^۳ و سردا^۴ مطرح کردند، انقباض حاصل از کربناسیون را به دو پدیده نسبت دادند. یکی از این پدیده‌ها مربوط به انقباض آهک آزاد و دیگری مربوط به جمع‌شدگی به علت هیدراسیون و پلیمریزاسیون اکسید کلسیم هیدراته حاصل از کربناسیون بود. در رطوبت نسبی ۵۰٪، اگر کربناته شدن پس از خشک شدن بتن صورت گیرد، بیشترین انقباض حاصل خواهد شد، در صورتی که خشک شدن و کربناته شدن همزمان انقباض کمتری ایجاد می‌کند. علت این امر آن است که بخش عمده‌ای از کربناته شدن در رطوبت نسبی بالای ۵۰٪ اتفاق می‌افتد [۸].

در شکل‌های ۲.۶ و ۲.۷ اثر مذکور به‌وضوح مشخص شده است. در سال ۱۹۳۵، برچم^۵ انقباض سازه‌هایی که در مجاورت با دی‌اکسیدکربن قرار داشتند، مشاهده کرد. در انگلستان، از دی‌اکسیدکربن برای جلوگیری از ترک‌های احتمالی قطعات پیش‌ساخته استفاده می‌شد. ده سال بعد، امریکایی‌ها پی بردند که این تکنیک، ایجاد انقباض اولیه در سیستم، قبل از بهره‌برداری از سازه می‌باشد. این انقباض اولیه مستلزم وجود گاز دی‌اکسید کربن است که اغلب از دودکش‌ها خارج می‌شود. قطعه باید به مدت ۱۶ ساعت در مجاورت با گاز قرار گیرد غلظت معمول گاز حدود ۲۰٪ است. انقباض اولیه باعث بهبود پایداری بتن و کاهش ترک‌ها می‌شود.

۶-۱۱ مقاومت

اطلاعات موجود نشان می‌دهند که افزایش مقاومت بستگی به درجه کربناسیون و مقاومت بتن دارد. کرونه افزایش مقاومت تامیزان ۱۰۰٪ را به کمیسون کربناسیون گزارش داده است. گوتمان^۶ افزایش مقاومت تا ۴۰٪ را ثبت کرد. مانز و شاتز با مغزه گرفتن از سازه‌های بتنی دریافتند که قرار دادن نمونه‌ها در معرض دی‌اکسیدکربن موجب ۵۵٪ افزایش مقاومت می‌شود. پیهلجاوارا در تحقیق خود افزایش مقاومت ۳۰٪ را در آزمایش مقاومت تیرهای با مقاومت فشاری 30 N/mm^2 مشاهده نمود، اما فقط ۱۰٪ افزایش مقاومت برای تیرهایی با مقاومت فشاری 55 N/mm^2 را گزارش کرد. این کاهش نشان می‌دهد که کربناته در مقاومت‌های بیش از 60 N/mm^2 ، تاثیر کمی در مقاومت بتن دارد. برگر و کلم دریافتند که مقاومت نمونه‌های ملات کربناته

1 - Lea

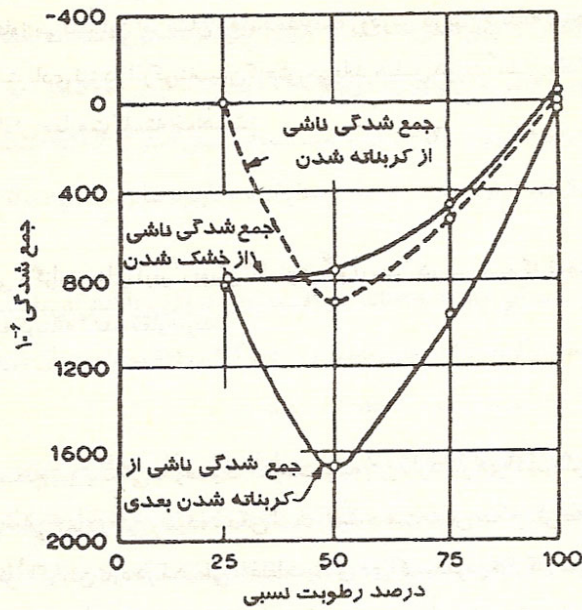
2 - Power

3 - Swenson

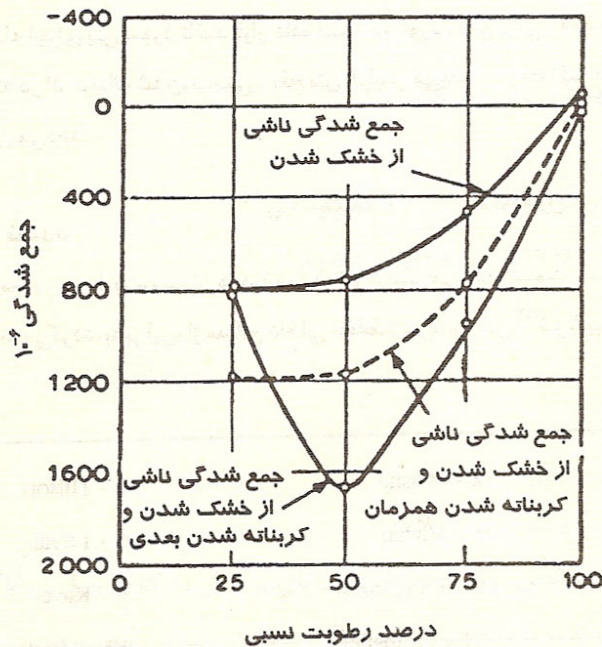
4 - Sereda

5 - Berchem

6 - Guttman



شکل ۲- جمع شدگی ناشی از خشک شدن و جمع شدگی ناشی از کربناته شدن در رطوبتهای نسبی مختلف [۲]



شکل ۳- اثر خشک شدن و کربناته شدن متوالی بر جمع شدگی [۲]

شده بعد از ۳ روز به حداکثر خود می‌رسد. در ملاتهای کربناته نشده مقاومت اولیه افزایش می‌یابد و بعد از ۱۴ روز از پیک مقاومت ملات کربناته شده تجاوز می‌کند. این امر نشان دهنده مقاومت زودرس در بتن کربناته شده است. فدل^۱ و واشا^۲ گزارش کردند که مقاومت بتن با خاکستر بادی نیز در اثر کربناسیون کاهش می‌یابد. هیلز دورت^۳ نشان داد که در بتن حاوی درصد بالایی تفال ه آهن گذاری از میزان افزایش مقاومت کاسته خواهد شد.

۶-۱۲ حمله سولفات‌ها

با توجه به بحث‌های قبلی و گزارش‌های آربر^۴، یویان^۵، لیتوای^۶ و آردت^۷ در می‌یابیم که نمونه‌های کربناته شده در مقابل حمله سولفات‌ها نسبت به نمونه کربناته نشده مقاوم‌ترند.

۶-۱۳ سختی سطح

اثرات دی‌اکسیدکربن بر سطح بتن بستگی به وضعیت مقاومت اولیه بتن دارد. اثر دی‌اکسیدکربن بر روی سطح نارس، باعث نرمی سطح بتن می‌گردد، در حالی که، در بتن رسیده ممکن است باعث سخت شدن سطح بتن بشود. بر طبق گزارش فریمان^۸ و کوثر^۹ اگر بتن تازه در محیطی با غلظت بالای دی‌اکسیدکربن قرار گیرد، سطح بتن نرم و رنگ آن سفید و غیر قابل استفاده خواهد شد. کندال^{۱۰} اظهار داشت که این اثر تا ۲۴ ساعت پس از ریختن بتن رخ می‌دهد و تاکید کرد که لایه نرم فقط چند میلی متر ضخامت دارد. این امر در بتن‌هایی رخ می‌دهد که در زمستان در فضاهای بسته تهیه می‌شوند و برای گرم نگاه داشتن بتن از وسیله گرمازا استفاده می‌کنند و گاز ناشی از سوختن نمی‌تواند از محیط خارج شود. یکی از محققین این موضوع را چندین بار در مجله اجرای بتن، مورد تاکید قرار داده است. در مورد سطح بتنی که به مقاومت کافی رسیده باشد، درانسفیلد^{۱۱} اظهار داشت که در اثر کربناته شدن، سختی سطح بتن افزایش می‌یابد و در حداکثر مقدار خود، ۵۰٪ افزایش در قرائت چکش اشمیت را نشان می‌دهد.

۶-۱۴ سیمان هیدراته نشده

هانت^{۱۲} ملاحظه کرد که در مجاورت رطوبت، سیمان هیدراته نشده نیز کربناته می‌شود. قسمت عمده سیمان هیدراته نشده در لایه‌های مجاور سطح، کربناته می‌گردد، بنابر این، از مصالح داخلی حفاظت می‌شود. بئل^{۱۳} نیز شبیه این مطلب را گزارش کرده است.

1 - Feddel

2 - Washa

3 - Hilsort

4 - Arber

5 - Vivian

6 - Litvai

7 - Aardt

8 - Freeman

9 - Kaver

10 - Kandall

11 - Dransfield

12 - Hunt

13 - Bannell

۷- پیش‌بینی عمق تئوریک کربناسیون

بررسی رفتار نظری پدیده کربناسیون نشان می‌دهد که میزان عمق کربناسیون متناسب با جذر زمان است. رابطه بین عمق کربناسیون و جذر زمان اولین بار در سال ۱۹۲۸ بیان شد. این رابطه شامل خواص موجود در بتن و نسبت آب به سیمان است. با تعدیل این رابطه فرمول دیگری برای نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۶ ارائه شد. این رابطه برای سیمان پرتلند معمولی و شن و ماسه رودخانه‌ای کاربرد داشت. عوامل تعدیل‌کننده کاربرد سایر سیمانها، سنگدانه‌ها و یا انواع سطح‌ها بعداً منتشر شد.

بررسی قوانین فیزیکی و شیمیایی مربوط به انتشار دی‌اکسیدکربن در بتن و واکنش آن باجسم بتن باعث شد که بسیاری از محققین رابطه جذر زمان را مطرح کنند. با استنتاج ریاضی و در نظر گرفتن فرضیه‌ها می‌توان دریافت که کربناسیون دارای یک حد نهایی است. این نتیجه در شرایط عملی نیز مشاهده شده است.

گروهی از محققین زمان شروع واکنش را در نظر گرفته آن را به رابطه جذر زمان اضافه می‌کنند.

پارامترهایی مانند مقاومت فشاری، درصد سیمان و میزان الکل جذب شده نیز در فرمول عمق کربناسیون وارد می‌شوند.

یک محقق آلمانی از بررسیهای نظری پیشروی نفوذ کربناسیون در بتن ترک خورده استفاده کرد. با برداشتی کلی از تئوریهای نشان داده شده، می‌توان ارتباط جذر زمان را با عمق کربناسیون به صورت زیر نشان داد:

$$X = K\sqrt{t}$$

$$X = \text{عمق کربناسیون}$$

$$t = \text{زمان}$$

$$K = \text{ضریبی که بستگی به شرایط مصالح دارد}$$

۷-۱ فرمول هامادا و فرمول تصحیح شده کیجیتانی^۱

هامادا ویوچیدا^۲ در سال ۱۹۸۲ فرمول هامادا را منتشر کردند.

$$t = \frac{0.3(1+3W_0)}{(w_0 - 0.3)^2} X^2$$

در این فرمول:

$$t = \text{زمان به سال}$$

$$w = \text{نسبت آب به سیمان و}$$

$$X = \text{عمق کربناسیون به سانتیمتر می‌باشد.}$$

این فرمول برای اولین بار رابطه کاهش در آهنگ کربناسیون را با زمان نشان داد که در عمل با $\sqrt{t}$ متناسب است. ژاپنی‌ها در

تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که در خواص مصالح، نسبت آب به سیمان، بیشترین ارتباط را با کرناسیون دارد کیچیتانی در نهایت، دو فرمول برای نسبتهای متفاوت آب به سیمان ارائه کرد.

$$t = \frac{0.3(1.15+3w)}{(w-0.25)^2} x^2 \quad \text{برای } W/c > 0.6$$

$$t = \frac{7.2}{(4.6W-1.76)^2} x^2 \quad \text{برای } W/c < 0.6$$

W = نسبت آب به سیمان

نیشی^۱ اختلاف اولین فرمول کیچیتانی و فرمول هامادا را بیان کرد. او خاطر نشان ساخت که هامادا از «ماسه خشک شده در هوا» استفاده کرده است. درحالی که کیچیتانی ماسه خشک شده سطحی را به کار برده است. نیشی ارتباط بین این دو رابطه را به صورت زیر بیان کرد:

$$W_o = W + 0.05$$

پس، این فرمول بستگی به نسبت آب به سیمان دارد. در فرمولهای بالا، ضرایب براساس آزمایشهایی بر روی نمونههای ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی و شن و ماسه رودخانه‌ای است. برای حالت‌های دیگر، ضریب R در فرمول منظور می‌شود.

$$t = \frac{0.3(1.15+3w)}{R^2(w-0.25)^2} x^2 \quad \text{برای } W/c > 0.6$$

$$t = \frac{7.2}{R^2(4.6w-1.76)^2} x^2 \quad \text{برای } W/c > 0.6$$

ضریب R به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$R = r_c r_a r_s$$

r_c = ضریب مربوط به نوع سیمان

r_a = ضریب نوع سنگدانه‌ها

r_s = نماینده فعال بودن سطح

هامادا ضرایب فوق را ارائه کرد که در جدول ۱ آمده است. کیچیتانی نیز ضریب R را ارائه کرد که در جدول ۲ نشان داده شده است.

فرمول کیچیتانی به صورت زیر باز نویسی شد

$$x = (1.714w - 0.656) \sqrt{t}$$

جدول ۱-۶- مقادیر ضرایب مؤثر در R

ضریب rc	سیمان پرتلند زودگیر معمولی ۰/۶ ۱	سیمان سرباره‌ای ۶۰٪ سرباره ۳۰-۴۰٪ سرباره ۲/۲ ۱/۴	سیمان پوزولانی ۱/۷	سیمان حاوی خاکستر بادی ۱/۹
ضریب ra	شن و ماسه رودخانه‌ای ۱	ماسه رودخانه‌ای شن بازالتی ۱/۲	شن و ماسه بازالتی ۲/۹	خاکستر ۳/۳
ضریب rs	جلگه ۱	مواد سازنده حباب هوا ۰/۶	مواد پراکنده سازه ۰/۴	

جدول ۲-۶- مقادیر ضریب R

شن و ماسه بازالتی AE. DA.	شن و ماسه بازالتی AE. DA.	شن و ماسه رودخانه‌ای AE. DA.
۲/۹ ۱/۸ ۱/۱	۱/۲ ۰/۸ ۰/۵	۱ ۰/۶ ۰/۴
۱/۸ ۱ ۰/۷	۰/۷ ۰/۴ ۰/۳	۰/۶ ۰/۴ ۰/۲
۴/۱ ۲/۴ ۱/۶	۱/۷ ۱ ۰/۷	۱/۴ ۰/۸ ۰/۶
۶/۴ ۳/۸ ۲/۶	۲/۶ ۱/۶ ۱/۱	۲/۲ ۱/۳ ۰/۹
۴/۹ ۳ ۲	۲ ۱/۲ ۰/۸	۱/۷ ۱ ۰/۷
۵/۵ ۳/۳ ۲/۲	۲/۳ ۱/۴ ۰/۹	۱/۹ ۱/۱ ۰/۸

AE = ماده سازنده حباب هوا

DA = ماده پراکنده ساز

رابطه فوق را می‌توان با رابطه توسکایام^۱ و همکارانش که برای بتن بدون خاکستر بادی است، مقایسه کرد.

$$x = (1.187w - 0.493)\sqrt{t}$$

روابطی که تاکنون آورده شد، تغییرات وسیعی از مشخصات مصالح را در بر می‌گیرد، ولی شامل شرایط محیطی و شرایط

نمایان بودن بتن نیست که چنین عواملی در میزان کرناسیون ساختمانهای تحت بهره‌برداری مؤثر و مهم است.

۷-۲ انتشار و واکنش دی اکسید کربن

مفهومی اساسی در فرمول هامادا، متناسب بودن عمق کرناسیون با زمان است، الکساندر بر این مفهوم تاکید کرد که روند

کرناسیون با عمق آن نسبت عکس دارد.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k_1}{x}$$

$$\int x dx = \int k_1 dt$$

$$x^2 = 2k_1 t$$

$$x = \sqrt{2k_1 t} = k_2 \sqrt{t}$$

بسیاری از محققین با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی کربناسیون پیشرفتهایی در این امر حاصل کردند. به عنوان مثال، روابط زیر شبیه گفته اینگل فراید^۱ است و کلیه واحدهای براساس سیستم S.I. تنظیم شده است.

$$dn = -DA \frac{C_1 - C_2}{\Delta x} dt$$

n = مقدار دی اکسید کربن منتشر شده از داخل عضو (بر حسب کیلوگرم)

D = ضریب انتشار

A = مساحت سطح مقطع

C_1 و C_2 = غلظت دی اکسید کربن (Kg/m^3)

x = فاصله m

t = زمان t

$$dn = adv = aAdx$$

فرایند شیمیایی واکنش به صورت زیر بیان می شود:

a = مقدار معادل دی اکسید کربن لازم، برای واکنش با هیدروکسید کلسیم در حجم واحد بتن

dv = حجم عضو

بنابر این اگر:

$$dn = DA \frac{|C_1 - C_2|}{x} dt$$

سپس

$$aA dx = DA \frac{|C_1 - C_2|}{x} dt$$

و

$$x dx = D \frac{|C_1 - C_2|}{a} dt$$

باشد، حال با انتگرال گیری،

$$x^2 = 2D \frac{|C_1 - C_2|}{a} t$$

با فرض اینکه غلظت دی اکسید کربن در عمق کربناته شده صفر باشد، داریم:

$$C_2 = 0$$

$$x = \sqrt{\frac{2D C_1 t}{a}}$$

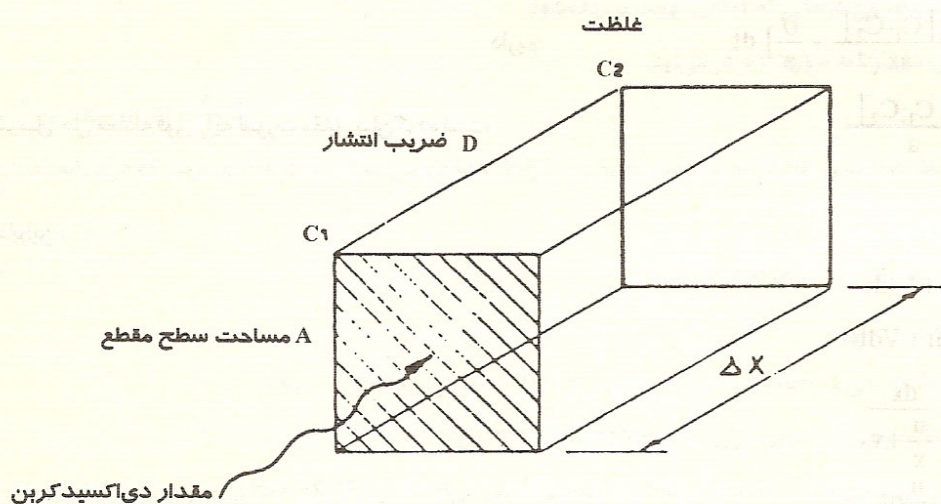
کلوفن^۱ ثابت‌های C_1 و a را به صورت زیر عنوان نمود:

$$C_1 = 0.6 \times 10^{-3} \text{ Kg/m}^3$$

$$a = 10 - 50 \text{ Kg/m}^3$$

۳-۷ تاثیر محیط و رسیدن به حدنهایی

اساس تئوری فوق این بود که در هر محیط ضریب انتشار در عمق لایه کربناته شده ثابت و مقدار هیدروکسید کلسیم در عضو مورد مطالعه مقدار ثابتی است. همان طور که قبلاً ذکر شد، تغییرات میزان رطوبت بتن و توزیع کربنات کلسیم در فضاهای خالی و احتمال تجمع کربنات کلسیم در امتداد یک جبهه معین، می تواند منجر به کاهش ضریب انتشار شود. به علاوه، انتشار معکوس هیدروکسید کلسیم و در پی آن کاهش غلظت در واکنش موثر است. محققینی چون مارتین^۲، رکیوسن^۳ و



شکل ۴-۶- انتشار دی اکسید کربن از داخل یک قطعه بتن

شیسل این تعدیل را بیان کردند.

در این روش، ضریب انتشار با مقدار متوسط D_m جایگزین می شود.

$$D_m = D(1-fx)$$

$$f = \text{ضریب محیطی}$$

با فرض اینکه ورود مقداری دی اکسید کربن اضافی $b \text{ (Kg/m}^2\text{S)}$ به عضو لازم است با انتشار معکوس هیدروکسید کلسیم

1 - Klopfen

2 - Martin

3 - Rqusen

واکنش یابد، این معادلات قبل به صورت زیر درمی آید:

$$dn = D(1-fx)A \frac{|C_1 - C_2|}{x} dt$$

$$dn = aAdx + bAdt$$

$$aAdx + bAdt = D(1-fx)A \frac{|C_1 - C_2|}{x} dt$$

$$adx = D(1-fx) \frac{|C_1 - C_2|}{x} dt - bdt$$

$$dx = \left[\frac{D(1-fx) |C_1 - C_2|}{ax} - \frac{b}{a} \right] dt$$

$$\sigma = fD |C_1 - C_2| + b$$

اگر:

$$dx = \left[\frac{D |C_1 - C_2|}{ax} - \frac{\sigma}{a} \right] dt$$

داریم:

$$U = \frac{D |C_1 - C_2|}{a}$$

$$V = -\frac{\sigma}{a}$$

شیسل حل معادله فوق را به صورت مقابل بیان کرده است:

و

بنابراین:

$$dx = \left[\frac{u}{x} + V \right] dt$$

$$dx = \frac{u}{x} dt + V dt$$

$$dt = \frac{dx}{\frac{u}{x} + V}$$

$$v dt = dx - \frac{u}{x} dt$$

$$= dx - \frac{u}{x} \frac{dx}{\frac{u}{x} + V}$$

$$= dx - u \frac{\frac{dx}{x}}{u + Vx}$$

با انتگرال گیری داریم:

$$Vt = x - \frac{u}{V} \ln(u + Vx) + c$$

$$t = \frac{x}{V} - \frac{u}{V^2} \ln(u + Vx) + c$$

$$C = \frac{u}{V^2} \ln U$$

حال اگر $x=0$ و $t=0$ باشد، داریم:

$$t = \frac{x}{V} - \frac{u}{V^2} \ln(u + Vx) + \frac{U}{V^2} \ln U$$

$$t = \frac{x}{V} - \frac{U}{V^2} \ln \frac{U + Vx}{U}$$

با جای گذاری U و V در عبارت فوق خواهیم داشت :

$$t = \left[-\frac{a}{b}x + \frac{a^2}{b^2} \frac{D|c_1 - c_2|}{a} \right] \ln \left| 1 - \frac{a}{D} \frac{dx}{|c_1 - c_2|} \right|$$

$$= \left[-\frac{a}{b}x + \frac{D|c_1 - c_2|}{b} \right] \ln \left| 1 - \frac{bx}{D|c_1 - c_2|} \right|$$

$$dx = \left[\frac{D|C_1 - C_2|}{ax} - \frac{\sigma}{a} \right] dt$$

با در نظر گرفتن مجدد معادله اصلی

همان طوری که t به سمت بی نهایت میل می کند، مقادیر داخل کروه به صفر نزدیک می شود.

$$\frac{D|C_1 - C_2|}{ax_{\infty}} = \frac{b}{a} \quad x_{\infty} = \frac{D|C_1 - C_2|}{\sigma}$$

x_{∞} عمق کرناسیون درحالی که t به بی نهایت نزدیک شود.

بنابراین، مقدار t به صورت زیر در می آید.

$$t = \frac{a}{b} \left[x + x_{\infty} \ln \left(1 - \frac{x}{x_{\infty}} \right) \right]$$

پس، عمق کرناسیون تحت شرایط معین محیطی و شرایط نمایان بودن ممکن است به حدی برسد که در شرایط عملی نیز

مشاهده می شود.

آزمایش مقادیر زیر را برای نشان می دهد:

الف) در شرایط داخلی $b=0$

ب) در شرایط خارجی محافظت شده در برابر باران $b = 0.8 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^2\text{s}$ 1.5×10^{-1}

ج) در شرایط خارجی در معرض باران $b = 0.8 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^2\text{s}$ 2.8×10^{-1}

بنابراین، بیشترین میزان کرناسیون در شرایط داخلی اتفاق می افتد؛ در حالی که، کمترین میزان مورد انتظار در شرایط

خارجی مرطوب می باشد. (در باره این مسئله در فصلهای قبل به تفصیل بحث شد.)

۷-۴ تغییرات دیگر در رابطه جذر زمان

برای در نظر گرفتن انحرافات مشاهده شده از رابطه $\sqrt{t}$ ، پارامتری تحت عنوان دوره مقدماتی کرناسیون به کار رفته است. به

عنوان مثال، الکساندرا^۱ فرمول زیر را به کمیته کرناسیون ارائه کرد:

$$X = A\sqrt{t} + B$$

A و B = پارامترهایی که بستگی به درصد سیمان، نوع سیمان و نسبت آب به سیمان دارند.

فونتنای^۱ مثالی عملی ارائه کرده است که مبتنی بر انجام دادن آزمایشهایی در خاور میانه است.

$$x_1 = 4.3(w/c - 0.4)\sqrt{t} + 1$$

$$X_2 = 5.3(w/c - 0.2)\sqrt{t} + 2$$

X_1 = عمق کرناسیون بتنی که ۲۸ روز نگهداری و عمل آورده شده است.

X_2 = عمق کرناسیون بدون عمل آوردن و در فضای داخل

X_3 = عمق کرناسیون بدون عمل آوردن و در فضای خارج

$$\frac{w}{c} = \text{نسبت آب به سیمان}$$

$$t = \text{سن بتن (ماه)}$$

int مقدار تصحیح شده (برای مثال ۱/۸۳ برابر ۱ در نظر گرفته می شود)

لودویگ^۲ نیز رابطه $x = A\sqrt{t} + B$ را به کار برده که اثر افزایش درصد سرباره در عمق کرناسیون را در سیمان های مخلوط بیان می کند. بر اساس یافته ها، افزایش درصد سرباره سبب کاهش پارامتر B می شود تا حدی که ممکن است مقدار آن منفی گردد؛ هر چند که افزایش سریع تر پارامترها A باعث بی اثر کردن آن و در نتیجه افزایش میزان کرناسیون می شود. هوست^۳ و همکارانش نیز یک مدل عددی پیشنهاد کردند که براساس معادلات دیفرانسیل نفوذ دی اکسیدکربن در بتن استوار است و برای پیش گویی عمر طراحی سازه به کار می رود.

$$x = A \sqrt[n]{t}$$

فرمول دیگری که از رابطه $\sqrt[n]{t}$ گرفته شده، به صورت زیر است:

آلکسیف^۴ و ریزنقال^۵ مقادیر n را به صورت زیر تعیین کرده اند:

$$W/c = 0.6, n = 1.92$$

$$W/c = 0.7, n = 2.54$$

همانطور که قبلاً گفته شد، رابطه $\sqrt[n]{t}$ می تواند برای بتن هایی که در شرایط داخلی قرار دارند، به کار رود. شیسل پیشنهاد کرد که برای بتن های در معرض شرایط خارجی $n > 2$ در نظر گرفته شود.

۵-۷ در نظر گرفتن مقاومت فشاری

مدت مدیدی است که کیفیت بتن، به خصوص در نمونه های مکعبی و استوانه ای که ۷ و ۲۸ روز از سن آنها گذشته باشد، با مقاومت فشاری تعیین می شود.

با آن که محققین ژاپنی نسبت آب به سیمان را به عنوان پارامتری برای نشان دادن مشخصات بتن به کار بردند. سایر

1 - Fontenay

2 - Ludwig

3 - Haust

4 - Alekeev

5 - Rpzental

پژوهشگران مقاومت فشاری را به عنوان عاملی مهم در کرناسیون مد نظر قرار دادند. اسمالچیک خاطر نشان ساخت کرناسیون با افزایش تخلخل موئینه زیاد می شود و با افزایش درصد اکسید کلسیم کاهش می یابد. از طرفی، مقاومت فشاری بتن با افزایش تخلخل موئینه کاهش می یابد و با افزایش درصد اکسید کلسیم زیاد می شود. بنابراین داریم:

$$x \sim \frac{1}{\sqrt{f_c}}$$

f_c = مقاومت فشاری

رابطه فوق زمینه ساز فرمول دیگری می باشد که اسمالچیک ارائه کرده است.

$$x = a \left(\frac{w/c}{\sqrt{N_T}} - b \right) \sqrt{t}$$

X = عمق کرناسیون

a, b = پارامترهای که بستگی به شرایط نمایان بودن دارد.

$\frac{w}{c}$ = نسبت آب به سیمان

N_T = مقاومت فشاری در روز اندازه گیری

t = زمان در معرض بودن (ماه)

(مقاومت فشاری بر حسب Kg/cm^2)

در صورتی که مقاومت فشاری به طور متناوب با زمان افزایش پیدا کند. اسمالچیک با آزمایش های متعدد، به تعیین عمق کرناسیون بر حسب مقاومت فشاری پرداخت.

$$x = 8.46 \left[10 \frac{w/c}{\sqrt{N_T}} - 0.193 - 0.076 \frac{w}{c} \right] \sqrt{t} + 0.95$$

$$x = 7.00 \left(10 \frac{w/c}{\sqrt{N_T}} - 0.175 \right) \sqrt{t} - 0.50$$

رابطه فوق برای نسبت آب به سیمان 0.45 اعتبار دارد.

نیشر در آزمایشهای خود، برای بتن های در معرض محیط خارجی رابطه زیر را بیان کرد:

$$x = 103.4 \exp^{-0.123B}$$

در شرایط محافظت شده از باران رابطه زیر صدق می کند:

$$x = 34.1 \exp^{-0.034B}$$

X = عمق کرناسیون

B = مقاومت فشاری ۲۸ روزه (N/mm^2)

بنابر این، به ازاء کاهش مقاومت به اندازه $10 N/mm^2$ ، سه برابر افزایش عمق کرناسیون حاصل می گردد.

پیهلاجوارا نیز فرمولی به صورت $x = B \sqrt{t}$ پیشنهاد کرد. از آنجا که مقدار B بین 0.1 تا 1 تغییر می کند و این تغییرات به مقاومت بتن و شرایط در معرض بودن آن بستگی دارد، اگر t بر حسب سال باشد، ضریب B به صورتی است که عمق کرناسیون بر حسب سانتیمتر به دست می آید. مقادیر پیشنهادی در جدول ۳-۱ نشان داده شده است.

جدول ۳-۶- مقادیر پارامتر B در فرمول پیهلاوارا (مقادیر بر حسب Cm است).

مقاومت زیاد	مقاومت متوسط		مقاومت کم		کیفیت بتن
	محیط داخل	محیط خارج	محیط داخل	محیط خارج	
	(مرطوب)	(مرطوب)	(مرطوب)	(مرطوب)	شرایط محیط
۰/۲	۰/۱	۰/۵	۱	۰/۶	B

۸- آزمایشهای تسریع شده کربناسیون [۱]

همان طور که قبلاً ذکر شد، کربناسیون پدیده‌ای است که در مدت بلند مدت اثر می‌کند. بنابراین، برای بررسی این پدیده در شرایط معمولی باید نمونه‌های ساخته شده سالها در معرض شرایط طبیعی قرار گیرد و ضمناً تغییرات محیطی نیز همواره ثبت شود. لذا این روش بسیار وقت‌گیر و پرهزینه خواهد بود و از جمله پروژه‌های تحقیقاتی بلند مدت است. به موازات برنامه‌های آزمایشگاهی بلندمدت در مورد تأثیر کربناسیون در بتن، محققین همواره در صدد یافتن روشهای تسریع شده برای بررسی این پدیده بوده‌اند. در این راستا، دستگاهی مشابه مدل طرح شده رضانیانپور در دانشگاه لیذر ساخته شد. [۸]

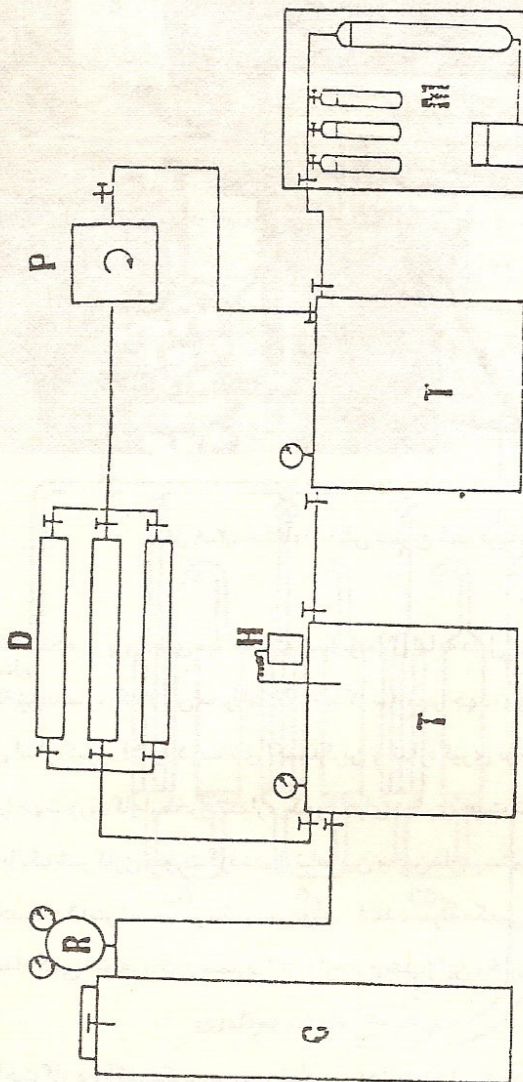
از جمله عوامل مهم در تسریع پدیده کربناسیون، افزایش غلظت دی اکسیدکربن نسبت به غلظت این گاز در محیط می‌باشد. سرعت آزمایشهای تسریع شده در دانشگاه لیذر ۲۵۲۰ برابر شرایط معمولی است، که این سرعت در غلظت دی اکسیدکربن ۵۰٪ حاصل شده است. گویرگویی^۱ طی آزمایشهایی با غلظت ۴٪ دی اکسیدکربن، نشان داد که یک هفته آزمایش تسریع شده معادل ۲/۵ سال شرایط نمایان خارجی است. از طرف دیگر همان طور که در بخش (۵-۵) مطرح شده ریچاردسن و محققین دیگر بیان کرده‌اند که غلظت بالای دی اکسیدکربن به دلیل ایجاد اثرهای مغایر با شرایط معمولی، روش مناسبی برای مدل کردن رفتار بلند مدت پدیده کربناسیون نیست. [۴]. بنابراین علیرغم طولانی شدن مراحل کار، سعی بر این است که از غلظت کم گاز استفاده شود.

از طرف دیگر، واکنش کربناسیون همواره با آزاد شدن آب توأم است. باتوجه به اینکه در آزمایش تسریع شده، فضای مخزن های مورد استفاده محدود است، لذا انتظار می‌رود درصد رطوبت محیط سریعاً بالا رود و به حالت اشباع برسد. در چنین حالتی، گاز دی اکسیدکربن نمی‌تواند نفوذ کند و روند پیشروی کربناسیون بسیار کند می‌شود. بنابراین، برای ایجاد شرایط بحرانی، لازم است با استفاده از تمهیداتی، مقدار درصد رطوبت را کاهش داد و به مقدار بهینه آن یعنی تقریباً ۷۵ درصد رساند. افزایش فشار نیز می‌تواند یکی از عوامل تسریع کننده در این آزمایش باشد. چون سیستم ساخته شده قابلیت تحمل فشار بالا را نداشت، لذا در آزمایش از فشارهای پائین استفاده شد، در طی آزمایشها سعی شد که میزان درصد دی اکسیدکربن، درصد رطوبت، دما و فشار در زمانهای مورد نیاز اندازه گیری شود. از جمله عوامل مؤثر در کربناسیون، نسبت آب به سیمان است، که اثر آن تغییر دادن نسبت آب به سیمان از ۰/۳۵ تا ۰/۷ مورد

بررسی قرار گرفت. اثر سیمان نوع یک، ضد سولفات و سیمان حاوی ۲۰٪ دیاتومه نیز مطالعه گردید. عمل آوردن، عامل مهم دیگری در عمق کربناسیون است که حالت‌های مختلف عمل آوردن از صفر روز تا ۲۸ روز در این آزمایش بررسی شد. به دلیل کم بودن حجم مخزن‌های مورد استفاده در آزمایش و زیاد بودن تعداد نمونه‌ها، از نمونه‌های ۵×۵ سانتی‌متر ملات استفاده شد.

۱-۸ مراحل ساخت دستگاه

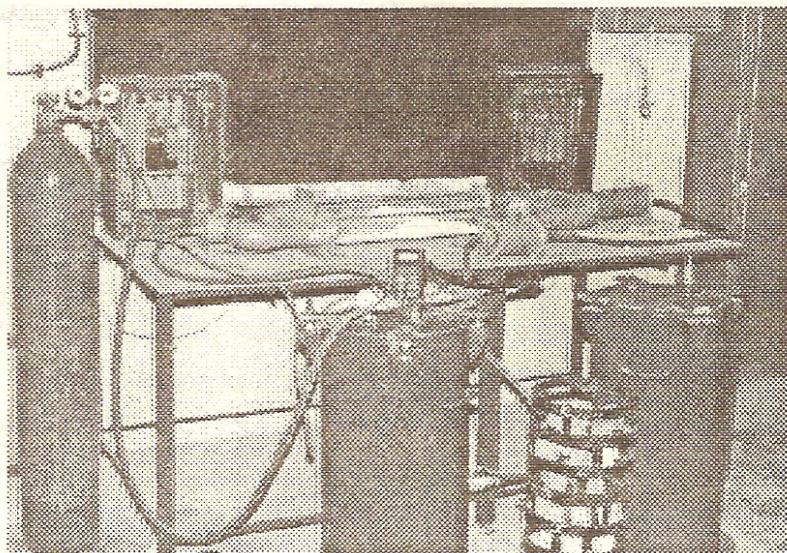
دستگاه آزمایش تسریع شده کربناسیون شبیه مدل شکل ۱-۸ ساخته شد.



$C =$ مخزن گاز CO_2 $P =$ پمپ گردش دهنده $T =$ مخزن نمونه‌ها
 $M =$ وسیله اندازه‌گیری غلظت CO_2 $H =$ وسیله اندازه‌گیری دما، رطوبت $D =$ لوله‌های خشک‌کن

شکل ۱-۸ نمایی از دستگاه آزمایش کربناسیون تسریع شده

همانطور که از مدل ارائه شده مشخص است، سیستم کلی دستگاه شامل کپسول محتوی گاز اکسیدکربن، مخزن قرارگیری نمونه ها، سیستم پائین آوردن رطوبت محیط با استفاده اندازه گیری درصد گازکربنیک داخل مخازن، وسیله اندازه گیری درصد گازکربنیک داخل مخازن، وسیله اندازه گیری درجه حرارت و رطوبت داخل سیستم و فشارسنج می باشد. شکل ۸-۲ نمونه ساخته شده این دستگاه را نشان می دهد.



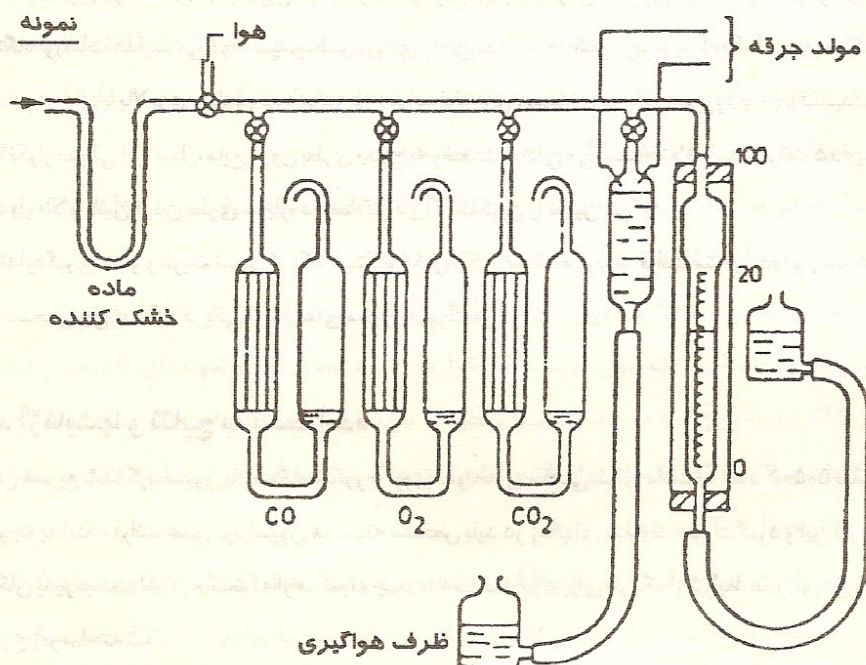
شکل ۸-۲. دستگاه آزمایش تسریع شده کربناسیون

مخزن های مورد استفاده در پروژه های قبل ساخته شده بود، [۳] اما به دلیل کم بودن ورودی و خروجی های آنها، تغییراتی در آنها داده شد. در مخزن شماره یک، شش مجرا استفاده شد که سه مجرا جهت ورود و خروج گاز و برگشت گاز از خشک کن، و سه مجرای دیگر برای اندازه گیری فشار، درصدی اکسیدکربن و اندازه گیری توأم رطوبت و دما در نظر گرفته شد. در مخزن شماره دو نیز یک مجرا جهت ورود گاز از مخزن شماره یک و مجرای دیگری جهت انتقال گاز به لوله خشک کن در نظر گرفته شد. قطع و وصل هر مجرا با یک شیر گازی صورت گرفت و ارتباط بین مخزن ها و سیستم خشک کن نیز به وسیله شیلنگ برقرار شد. حجم هر مخزن حدود ۹۰ لیتر است و هر مخزن می تواند ۸۰ عدد نمونه مکعبی شکل $5 \times 5 \times 5$ سانتی متر را درون خود جای دهد. در آزمایش با تعداد کمی نمونه، مخزن شماره ۲ از مدار خارج شد. از این مخازن می توان برای نمونه های بتنی نیز استفاده کرد.

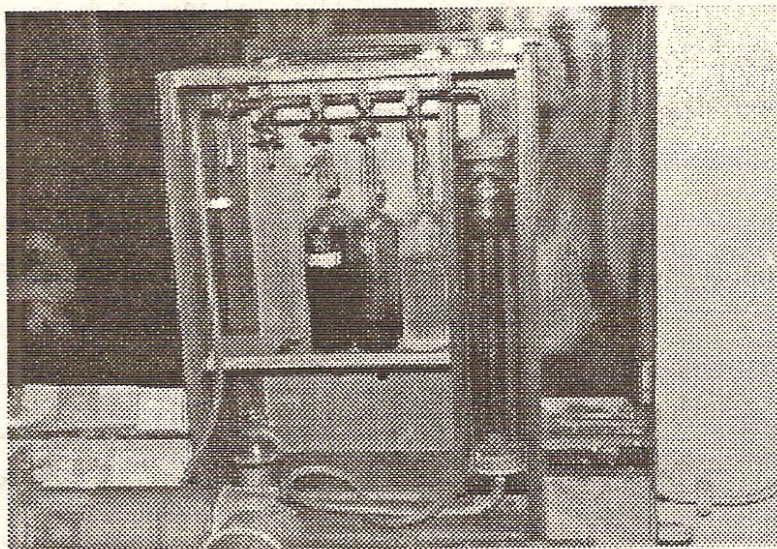
برای پخش یکنواخت گاز دی اکسیدکربن بر روی تمام نمونه ها، سبدهایی ساخته شد، که نمونه ها درون آن قرار گرفتند و سپس سبدها بر روی یکدیگر گذاشته شدند. به این ترتیب، گاز به راحتی از تمام وجوه بانمونه ها تماس پیدا کرد.

جهت کاهش درصد رطوبت موجود در مخازن به دلیل آزاد شدن آب در طی کربناسیون، دو لوله نشکن شیشه‌ای تهیه شد و درون آنها از ماده خشک کن پر گردید. برای اینکه بتوان این لوله‌ها را از مدار خارج کرد و مواد خشک کن را تعویض نمود، اتصالات فلانژی برای این لوله‌ها ساخته شد. مناسب‌ترین ماده خشک کن پرکلریدمنیزیم ($Mg(ClO_4)_2$) بود که این ماده با دی‌اکسیدکربن واکنش نمی‌دهد، ولی به دلیل کمیاب بودن و بهای زیاد آن، در این پروژه از کلرورکلسیم ($CaCl_2$) استفاده شد. برای به گردش در آوردن مخلوط هوا-دی‌اکسیدکربن داخل مخزن ها و عبور دادن آنها از میان خشک کن از دو پمپ هواکش استفاده گردید. این پمپها طوری درون لوله‌های پلیکا جاسازی شدند که هیچ‌گونه تبدیلی با بیرون نداشته باشند. یکی از این پمپها بین دو مخزن و دیگری در ابتدای لوله خشک کن قرار داده شد.

برای اندازه‌گیری درصد گاز دی‌اکسیدکربن از دستگاه اورسات (orsat) استفاده گردید. از این دستگاه برای تعیین درصد گاز اکسیژن و منواکسیدکربن نیز می‌توان استفاده کرد. همان طور که در شکل ۳-۸ و ۴-۸ مشاهده می‌شود، این دستگاه از یک ظرف کالیبره شده تشکیل گردیده است که از طریق یک لوله با تعدادی شیر به حبایهای شیشه‌ای U شکل حاوی معرف های شیمیایی مربوط می‌شود. برای افزایش منطقه مرطوب جذب گاز، لوله های U شکل با لوله های شیشه‌ای پر شده‌اند و برای تعیین درصد دی‌اکسیدکربن از معرف KOH با غلظت ۱۰٪ استفاده گردید.



شکل ۳-۸ نمودار دستگاه اورسات



شکل ۴-۸ تصویری از دستگاه اورسات مورد استفاده

برای اندازه‌گیری درصد دی‌اکسیدکربن در هر مرحله از آزمایش، با باز کردن شیر ورودی، مخلوط هوا و دی‌اکسیدکربن به داخل دستگاه اورسات هدایت می‌شود، سپس، شیر ورودی را می‌بندیم و بعد شیر مربوط به KOH را باز می‌کنیم تا گاز وارد این مخزن شود. حال با بالا بردن بطری سرباز، گاز در اطراف لوله‌های شیشه‌ای به پائین می‌رود و دی‌اکسیدکربن آن جذب می‌گردد. با تکرار متوالی این عمل، مایع درون بطری مدرج به وضعیت تعادلی می‌رسد. اختلاف اعداد قرائت شده پس از باز کردن شیر و چند بار بالا و پائین کردن بطری سرباز، در صد گاز دی‌اکسیدکربن را تعیین می‌کند.

برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی از یک دستگاه الکترونیکی استفاده گردید. قرائت متوالی دما و رطوبت نسبی با قرار دادن میله سنجش این دستگاه در یکی از شیرهای مخزن، صورت می‌گرفت.

۲-۸ روند آزمایشها و نتایج به دست آمده

آزمایش تسریع شده کربناسیون با دستگاه مذکور بر روی نمونه‌های مکعبی شکل ملات به ابعاد $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متر صورت گرفت. با توجه به اینکه قرائت عمق کربناسیون هر نمونه مشخص باید در زمانهای متفاوت صورت گیرد و این کار جز با شکستن نمونه‌ها امکان پذیر نیست. لذا لازم است که از هر نمونه چند عدد ساخته شود. برای هر یک از شرایط عمل آوردن خاص، سه گروه نمونه به شرح زیر ساخته شد.

گروه اول: ملات با سیمان نوع یک

گروه دوم: ملات با سیمان ضد سولفات

گروه سوم: ملات با سیمان معمولی حاوی ۲۰٪ دیاتومه

تجزیه شیمیایی مشخصات سیمان و دیاتومه به کار رفته در آزمایش، در جدول ۱-۸ نشان داده شده است.

جدول ۱-۸- مشخصات سیمان و دیاتومه بکار رفته

افت سرخ شدن	SO ₃	Mgo	cao	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ترکیب مصالح
۱/۸	۳/۴۶	۳/۵	۶۲/۸	۳/۸۵	۴/۳	۲۲/۸	سیمان پرتلند
۳/۹۴	.	.	.	۱/۱	۱/۶	۹۲/۵۴	دیاتومه

در هر یک از گروه‌های ذکر شده، نسبت آب به سیمان نیز به صورت زیر تغییر داده شد.

$$\frac{\text{آب}}{\text{سیمان}} = ۰/۳۵، ۰/۴، ۰/۴۵، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷$$

بنابراین، با تغییر درصد رطوبت در هر گروه ۶ سری نمونه خواهیم داشت که در مجموع ۱۸ سری نمونه متفاوت حاصل می‌شود. هر سری دارای ۴ نمونه یکسان است که در یک قالب فلزی چهار تایی ریخته می‌شود. بنابراین، برای هر دوره عمل آوردن خاص ۱۸ سری نمونه چهار تایی، یا به عبارتی ۷۲ عدد نمونه مکعبی شکل مورد آزمایش قرار گرفت. زمانهای نگهداری عبارت بودند از:

۲۸، ۷، ۳، ۱، صفر = زمانهای عمل آوردن (روز)

بنابراین، تعداد نمونه‌های ساخته شده برای تعیین عمق کرناسیون تسریع شده برابر با $۷۲ \times ۵ = ۳۶۰$ عدد بود که تعداد ۷۲ عدد نمونه نیز برای تعیین مقاومت فشاری و ارتباط دادن عمق کرناسیون به مقاومت در نظر گرفته شد. بنابراین در مجموع تعداد ۴۳۲ عدد نمونه ساخته شد.

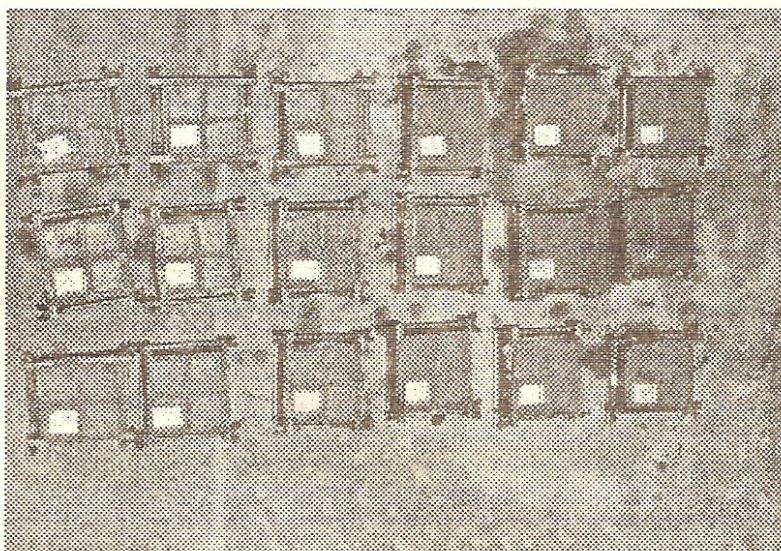
ماسه مصرفی دانه بندی شد و با سرند کردن روی الک ۴/۷۶ میلی‌متر، در ناحیه ۱ منحنی دانه‌بندی مربوط به آئین‌نامه BS ۸۸۲ قرار گرفت.

نسبت وزن سیمان به ماسه مصرفی ۱ به ۳ در نظر گرفته شد و بهینه مقدار ماسه برای هر چهار قالب ۹۰۰ گرم تعیین گردید. با ساخت یک سری نمونه به صورت آزمایشی، مشخص شد که نمونه‌های با درصد رطوبت کمتر از ۰/۴۵ نیاز به روان کننده دارند. به همین منظور در مورد درصد رطوبت‌های ۰/۳۵ و ۰/۴ و ۰/۴۵ به ترتیب از مقادیر ۳ و ۲/۵ و ۲ درصد روان کننده مایع استفاده گردید. بنابراین، در هر نمونه سازی، مصالح مصرفی طبق جدول ۲-۸ تهیه شد.

پس آماده شدن مصالح، آنها را در مخلوط‌کن ریخته و پس از اینکه عمل اختلاط به خوبی صورت گرفت، ملات آماده شده درون قالبهای فلزی روغن کاری شده قرار گرفتند. سپس با لرزاندن عمل تراکم صورت گرفت. (شکل ۵-۸) نمونه‌های ریخته شده به مدت ۲۴ ساعت در داخل محیط آزمایشگاه در قالب نگهداری و سپس از قالب خارج شدند و برحسب زمان مشخص شده برای عمل آوردن در داخل اتاق مخصوص در زیر آب قرار گرفتند. این اتاق دارای رطوبت ثابت ۶۰٪ و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود.

در هر مرحله از آزمایش تعداد ۲۲ نمونه در داخل ۸ سبد قرار دادیم و در داخل مخزن گذاشته شده سپس، درب مخزن با واشر و خمیر بسته و گاز به درون مخزن فرستاده شد. با چند بار پر و خالی کردن گاز در هر مرحله، هوای موجود در مخزن تخلیه شده و در نتیجه، غلظت گاز کمی افزایش یافت. سپس پمپهای گردش دهنده هوا به کار افتاد تا مخلوط گاز، هوا و رطوبت ناشی از واکنش کربناسیون از درون خشک کن عبور کند و رطوبت ایجاد شده جذب کلرور کلسیم گردد. با توجه به اینکه کلرور کلسیم از جمله مصالح ایده آل برای جذب رطوبت نبود، لذا نتوانست کاهش کلی در درصد رطوبت ایجاد نماید. ضمناً به دلیل تغییر مقطع شدید از شلنگ به قطر ۰/۵ اینچ به لوله پلیکا به قطر ۴ اینچ، افت شدیدی در قدرت سیرکولاسیون پمپها ایجاد گردید.

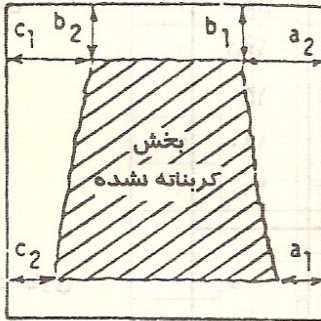
غلظت گاز دی اکسیدکربن، بلافاصله پس از قرار دادن نمونه ها در مخزن اندازه گیری شد. چون در بلند مدت، احتمال خروج گاز از واشرهای رفت، یکبار دیگر قبل از خارج کردن نمونه ها از مخزن، قرائت درصد گاز دی اکسیدکربن صورت گرفت. اگر بین این دو قرائت اختلافی وجود داشت، میانگین این دو مقدار ثبت گردید. غلظت گاز دی اکسیدکربن، همانطور که شرح داده شد، با دستگاه اورسات اندازه گیری گردید.



شکل ۸- مجموعه نمونه های ریخته شده برای یک دوره عمل آوردن خاص

پس از مدت زمان معین، در مخزن باز و ۱۸ عدد نمونه را از داخل آن بیرون آورده شد، سپس، با دو نیم کردن نمونه ها و پاشیدن محلول فنل فتالئین ۲٪ در الکل اتیلیک بر روی نمونه ها، عمق کربناسیون تعیین گردید. در صورتی که نمونه ها در صفحه ای به موازات، سطح ماله کشی شده، نمونه شکسته شوند، کافی است میانگین

قرائت در چهار وجه به عنوان عمق کربناسیون ثبت گردد. اگر نمونه‌ها در صفحه‌ای عمود بر سطح ماله کشی شده شکسته شوند، لازم است میانگین قرائت‌های مربوط به وجوه قالب بندی شده به عنوان عمق کربناسیون در نظر گرفته شود، زیرا نفوذ گاز از سطح ماله کشی شده کمتر از بقیه سطوح است. شکل ۸-۶ نحوه محاسبه کربناسیون را در این حالت نشان می‌دهد. [۸]



$$a = \frac{a_1 + a_2}{2}$$

$$b = \frac{b_1 b_2}{2}$$

$$c = \frac{c_1 c_2}{2}$$

$$d = \frac{a + b + c}{3}$$

شکل ۸-۶ نحوه محاسبه عمق کربناسیون

پس از قرائت عمق کربناسیون، مجدداً در مخزن بسته شد و تمام مراحل قبل تکرار گردید. بنابراین، برای هر دوره عمل آوردن، چهار بار در مخزن باز شد و قرائت عمق کربناسیون صورت گرفت. در نمونه‌های بدون عمل آوری، به دلیل کربناته شدن سریع نمونه‌ها قرائت در زمانهای ۱، ۲، ۴، ۱۲ روز انجام شد. در مورد نمونه‌های دیگر که در زمانهای مختلف عمل آورده شده بودند، سعی شد که قرائت در زمانهای یکسان صورت گیرد.

قرائت عمق کربناسیون برای هر دوره عمل آوردن خاص به همراه سایر قرائتهای مربوط به غلظت دی‌اکسید کربن، رطوبت نسبی، درجه حرارت و فشار در جدول ۸-۳ آورده شده است.

برای ارتباط دادن مقاومت فشاری به عمق کربناسیون یک سری از نمونه‌ها پس از ۷ روز عمل آوردن در زیر آب مورد آزمایش فشاری قرار گرفتند، که نتایج میانگین حاصل از سه قرائت برای هر نمونه، در جدول ۸-۴ آورده شده است.

جدول ۲-۸ مشخصات و میزان مصالح مصرفی برای هربار نمونه سازی

شماره	ماسه (گرم)	سیمان (گرم)	افزودنی (گرم)	آب سیمان	آب (cc)
۱	۹۰۰	۳۰۰	-	۰/۳۵	۱۰۵
۲	۹۰۰	۳۰۰	-	۰/۴	۱۲۰
۳	۹۰۰	۳۰۰	-	۰/۴۵	۱۳۵
۴	۹۰۰	۳۰۰	-	۰/۵	۱۵۰
۵	۹۰۰	۳۰۰	-	۰/۶	۱۸۰
۶	۹۰۰	۳۰۰	-	۰/۷	۲۱۰
۷	۹۰۰	۳۰۰	-	۰/۳۵	۱۰۵
۸	۹۰۰	۳۰۰	-	۰/۴	۱۲۰
۹	۹۰۰	۳۰۰	-	۰/۴۵	۱۳۵
۱۰	۹۰۰	۳۰۰	-	۰/۵	۱۵۰
۱۱	۹۰۰	۳۰۰	-	۰/۶	۱۸۰
۱۲	۹۰۰	۳۰۰	-	۰/۷	۲۱۰
۱۳	۹۰۰	۲۴۰	۶۰	۰/۳۵	۱۰۵
۱۴	۹۰۰	۲۴۰	۶۰	۰/۴	۱۲۰
۱۵	۹۰۰	۲۴۰	۶۰	۰/۴۵	۱۳۵
۱۶	۹۰۰	۲۴۰	۶۰	۰/۵	۱۵۰
۱۷	۹۰۰	۲۴۰	۶۰	۰/۶	۱۸۰
۱۸	۹۰۰	۲۴۰	۶۰	۰/۷	۲۱۰

گروه ۱: ملات حاوی
سیمان نوع یک

گروه ۲: ملات حاوی
سیمان ضد سولفات

گروه ۳: ملات حاوی
سیمان با ۲۰ درصد دیاتومه

جدول ۸-۳ الف: نتایج عمق کربناسیون برای نمونه های بدون عمل آوردن

شماره نمونه	نوع سیمان	عمق کربناسیون (mm)			
		روز ۱	روز ۲	روز ۴	روز ۱۲
۱	سیمان پورتلند	۰	۱	۱	۱
۲		۰/۵	۱/۵	۲	۳
۳		۱	۲/۵	۳	۳/۵
۴		۲	۴	۴	۴/۵
۵		۳	۴	۴	۱۵
۶		۳/۵	۴/۵	۷	۲۵*
۷	سیمان ضد سولفات	۰/۵	۱	۱	۲
۸		۱	۱/۵	۲	۲
۹		۱	۱/۵	۲	۳
۱۰		۲	۲	۳	۴
۱۱		۳	۴/۵	۴/۵	۱۰
۱۲		۳	۶	۶	۲۵*
۱۳	سیمان حاوی ۲۰٪ پیا تومه	۰/۵	۱	۲	۲
۱۴		۱	۲	۲	۴
۱۵		۳	۳	۳	۵
۱۶		۳	۳/۵	۸	۱۰
۱۷		۳	۳/۵	۸	۱۰
۱۸		۴/۵	۸	۲۰	۲۵*
غلظت CO ₂		۴/۵	۵/۵	۴	۴
رطوبت نسبی %		۸۵	۸۰	۸۰	۸۵
درجه حرارت C		۱۴	۱۴	۱۲	۱۴
فشار (اتمسفر)		۰/۳۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۳

* در این حالت، نمونه کاملاً کربناته شده بود.

جدول ۸-۳- ب: نتایج عمق کربناسیون برای نمونه های ۱۱ روز عمل آوردن

شماره نمونه	نوع سیمان	عمق کربناسیون (mm)			
		۲روز	۷روز	۱۲روز	۲۴روز
۱	سیمان نوع یک	۰	۰	۰	۰
۲		۰	۰	۰	۰
۳		۰	۰	۰	۰
۴		۰	۰	۱	۱
۵		۱/۰۵	۱	۱	۱/۵
۶		۱	۱/۵	۱/۵	۲
۷	سیمان ضد سولفات	۰	۰	۰	۰
۸		۰	۰	۰	۰
۹		۰	۰	۰	۰
۱۰		۰	۱	۱	۱
۱۱		۰/۵	۲	۲	۲
۱۲		۱/۵	۲	۲	۲
۱۳	سیمان حاوی ۲۰٪ دیاتومه	۰	۰	۰	۰
۱۴		۰	۰	۱	۱
۱۵		۰	۰	۱	۱
۱۶		۲	۲	۲	۲
۱۷		۲	۲	۲	۲
۱۸		۴	۴	۴	۴
غلظت CO ₂		۴/۵	۳/۵	۴	۴
رطوبت نسبی %		۸۵	۸۰	۸۵	۷۵
درجه حرارت C		۱۳	۱۴	۱۴	۱۴
فشار (آتمسفر)		۰/۴	۰/۳۵	۰/۳	۰/۳۵

جدول ۳-۸- پ: نتایج عمق کربناسیون برای نمونه های با ۳ روز عمل آوردن

شماره نمونه	نوع سیمان	عمق کربناسیون (mm)			
		۲روز	۴روز	۱۲روز	۲۴روز
۱	سیمان نوع پیک	۰	۰	۰	۰
۲		۰	۰	۰	۰
۳		۰	۰	۰	۰
۴		۰	۰	۰	۰/۵
۵		۰	۰/۵	۱	۱
۶	سیمان ضدسولفات	۰	۱	۱	۱/۵
۷		۰	۰	۰	۰
۸		۰	۰	۰	۰
۹		۰	۰	۰	۰
۱۰		۰	۰	۱	۱
۱۱	سیمان حاوی ۲۰٪ دیاتومه	۰	۱	۱	۱/۵
۱۲		۰	۱	۱/۵	۱/۵
۱۳		۰	۰	۰	۰
۱۴		۰	۰	۰	۰
۱۵		۰	۰	۰	۰
۱۶		۰	۱	۱	۱/۵
۱۷		۰	۱	۲	۱/۵
۱۸		۰/۵	۲	۲	۲/۵
غلظت CO ₂		۴	۴	۵/۵	۴
رطوبت نسبی %		۸۵	۷۵	۸۰	۷۵
درجه حرارت C		۱۳	۱۴	۱۴	۱۴
فشار (اتمسفر)		۰/۳	۰/۳	۰/۳۵	۰/۳

جدول ۸-۳- ت: نتایج عمق کرناسیون برای نمونه های ۷ روز عمل آوردن

شماره نمونه	نوع سیمان	عمق کرناسیون (mm)		
		روز ۴	روز ۱۲	روز ۲۴
۱	سیمان نوع پیک	۰	۰	۰
۲		۰	۰	۰
۳		۰	۰	۰
۴		۰	۰	۰/۵
۵		۰	۰	۰/۵
۶		۰	۰/۵	۱
۷	سیمان ضدسولفات	۰	۰	۰
۸		۰	۰	۰
۹		۰	۰	۰
۱۰		۰	۰	۰/۵
۱۱		۰	۰	۱/۵
۱۲		۰	۱	۱/۵
۱۳	سیمان حاوی ۲۰٪ دیاتومه	۰	۰	۰
۱۴		۰	۰	۰
۱۵		۰	۰	۰
۱۶		۰	۰	۱
۱۷		۰	۱	۱/۵
۱۸		۰	۱/۵	۲
غلظت CO ₂		۴	۴/۵	۴
رطوبت نسبی %		۰/۹	۰/۸۵	۰/۸۵
درجه حرارت C		۱۲	۱۳	۱۲
فشار(اتمسفر)		۰/۳۵	۰/۳	۰/۳

جدول ۳-۸: نتایج عمق کربناسیون برای نمونه های ۲۸ روز عمل آوردن

شماره نمونه	نوع سیمان	عمق کربناسیون (mm)			
		۷روز	۱۲روز	۱۴روز	۲۴روز
۱	سیمان نوع یک	۰	۰	۰	۰
۲		۰	۰	۰	۰
۳		۰	۰	۰	۰
۴		۰	۰	۰	۰
۵		۰	۰	۰	۰
۶		۰	۰	۰	۱
۷	سیمان ضدسولفات	۰	۰	۰	۰
۸		۰	۰	۰	۰
۹		۰	۰	۰	۰
۱۰		۰	۰	۰	۰
۱۱		۰	۰	۰	۱
۱۲		۰	۰	۰	۱
۱۳	سیمان حاوی ۲۰٪ دیاتومه	۰	۰	۰	۰
۱۴		۰	۰	۰	۰
۱۵		۰	۰	۰	۰
۱۶		۰	۰	۰	۱
۱۷		۰	۰	۱	۱
۱۸		۰	۱	۱	۲
غلظت CO ₂		۰/۴۵	۰/۴	۰/۵	۰/۵
رطوبت نسبی %		۰/۸۵	۰/۸	۰/۸	۰/۷
درجه حرارت C		۱۲	۱۲	۱۲	۱۳
فشار(اتمسفر)		۰/۳	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳

۳-۸ بحث و بررسی نتایج

بررسی نتیجه آزمایشها، در موارد زیر صورت گرفته است:

۳- تأثیر سیمانهای مختلف و مواد پوزولانی

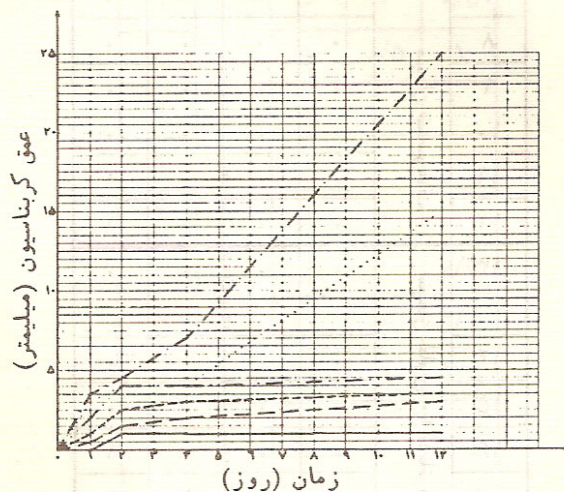
۱- تأثیر نسبت آب به سیمان

۴- تأثیر مقاومت

۲- تأثیر عمل آوردن

۱-۳-۸ تأثیر نسبت آب به سیمان

همان طور که در بخش کربناسیون نیز ذکر شد، نسبت آب به سیمان عامل مؤثری در میزان کربناسیون می باشد. تأثیر نسبت آب به سیمان در آزمایشهای تسریع شده نیز به وضوح مشخص گردید. در مورد نمونه های بدون عمل آوری، با مراجعه به نتایج آزمایش و یا شکل ۷-۸ در خصوص سیمان معمولی، مشاهده می شود که هرچه نسبت آب به سیمان افزایش یابد، عمق کربناسیون بیشتر می گردد. البته نتایج به دست آمده تا ۲ روز نیز دقیقاً مؤید این است که افزایش نسبت آب به سیمان باعث افزایش عمق کربناسیون می شود؛ ولی این افزایش چشمگیر نیست. در نتایج ۴ روزه، جهشی در عمق کربناسیون نمونه با نسبت آب به سیمان ۰/۷ مشاهده می شود. در نتایج ۱۲ روزه، اختلاف زیادی در عمق کربناسیون نمونه های با نسبت آب به سیمان ۰/۶ و ۰/۷ نسبت به سایر نمونه ها مشاهده می شود. به طوری که عمق کربناسیون در نمونه دارای نسبت آب به سیمان ۰/۷، حدود ۵/۵ برابر نمونه دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵ است.

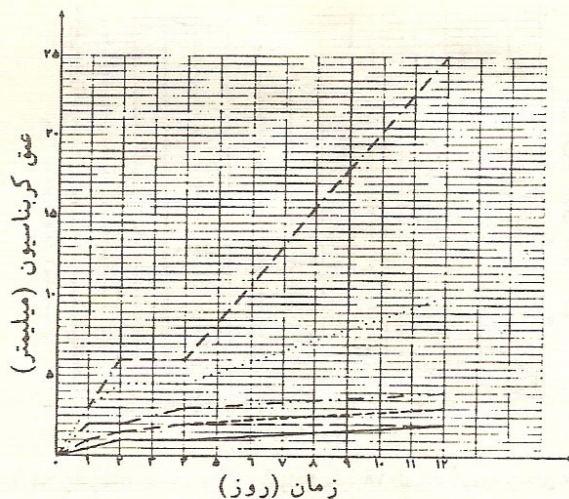


نمونه شماره ۶ (نسبت آب به سیمان ۰/۷)	_____
نمونه شماره ۵ (نسبت آب به سیمان ۰/۶)	
نمونه شماره ۴ (نسبت آب به سیمان ۰/۵)	_____
نمونه شماره ۳ (نسبت آب به سیمان ۰/۴۵)	_____
نمونه شماره ۲ (نسبت آب به سیمان ۰/۴)	_____
نمونه شماره ۱ (نسبت آب به سیمان ۰/۳۵)	_____

شکل ۷-۸ نتایج کربناسیون برای نمونه های با سیمان نوع یک بدون عمل آوری

در مورد نمونه های دارای سیمان ضد سولفات و شرایط بدون عمل آوری، با افزایش نسبت آب به سیمان، عمق کربناسیون

نیز افزایش می یابد. این نمونه ها رفتاری مشابه نمونه های با سیمان معمولی دارند. (شکل ۸-۸)



نمونه شماره ۱۲ (نسبت آب به سیمان ۰/۷)	
نمونه شماره ۱۱ (نسبت آب به سیمان ۰/۶)	
نمونه شماره ۱۰ (نسبت آب به سیمان ۰/۵)	
نمونه شماره ۹ (نسبت آب به سیمان ۰/۴۵)	
نمونه شماره ۸ (نسبت آب به سیمان ۰/۴)	
نمونه شماره ۷ (نسبت آب به سیمان ۰/۳۵)	

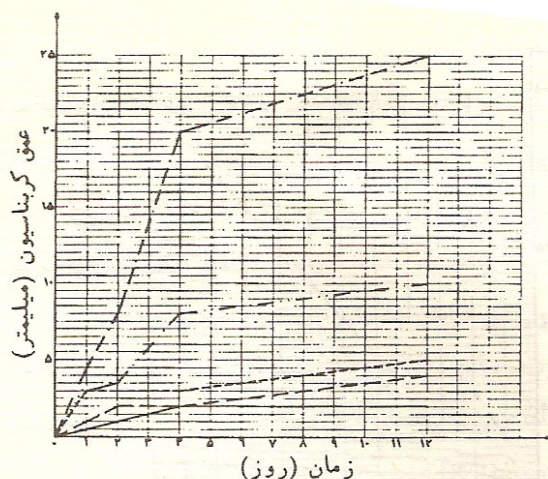
شکل ۸-۸ نتایج کربناسیون برای نمونه‌های با سیمان ضد سولفات - بدون عمل آوری

در نمونه‌های حاوی دیاتومه و بدون عمل آوری نیز همان طور که در شکل ۹-۸ نشان داده می‌شود، اثرات نسبت آب به سیمان مشهود است. البته در این حالت، میزان عمق کربناسیون نسبت به نمونه‌های با سیمان معمولی و سیمان ضد سولفات بیشتر است که این اختلاف در نسبت‌های آب به سیمان کمتر از ۰/۴۵ چندان محسوس نیست.

در مورد نمونه‌های با ۱ روز عمل آوری، با مراجعه به نتایج مندرج در جدول ۳-۸. ب ملاحظه می‌شود که عمق کربناسیون در نسبت‌های آب به سیمان کمتر از ۰/۴۵ در حدود صفر است، این مطلب در نمونه‌های دارای دیاتومه نیز صدق می‌کند. با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۵ تا ۰/۷ مقادیر عمق کربناسیون نیز افزایش می‌یابد. البته اگر خطای قرائت عمق کربناسیون در حدود ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شود، ملاحظه می‌شود که این افزایش بسیار کند صورت می‌پذیرد.

با مراجعه به نتایج مربوط به نمونه‌های با عمل آوری ۲۸، ۷۰، ۳ روز نیز می‌توان دریافت که هر چه مدت عمل آوردن بیشتر شود، تغییرات نسبت آب به سیمان حساسیت خود را از دست می‌دهد.

بنابراین، در نسبت‌های آب به سیمان پائین، به دلیل اینکه مقادیر و حجم فضاهای مویینه کاهش پیدا می‌کند، این فضاها دیگر قادر به حفظ ارتباط با یکدیگر نیستند و در نتیجه، نفوذ دی اکسید کربن در این حالت به سختی صورت می‌گیرد. در صورتی که این نمونه‌ها حتی به مدت ۱ روز عمل آورده شوند، کاهش زیادی در عمق کربناسیون حاصل می‌گردد.



نمونه شماره ۱۸ (نسبت آب به سیمان ۰/۷)	-----
نمونه شماره ۱۷ (نسبت آب به سیمان ۰/۶)	
نمونه شماره ۱۶ (نسبت آب به سیمان ۰/۵)	-----
نمونه شماره ۱۵ (نسبت آب به سیمان ۰/۴۵)	-----
نمونه شماره ۱۴ (نسبت آب به سیمان ۰/۴)	-----
نمونه شماره ۱۳ (نسبت آب به سیمان ۰/۳۵)	-----

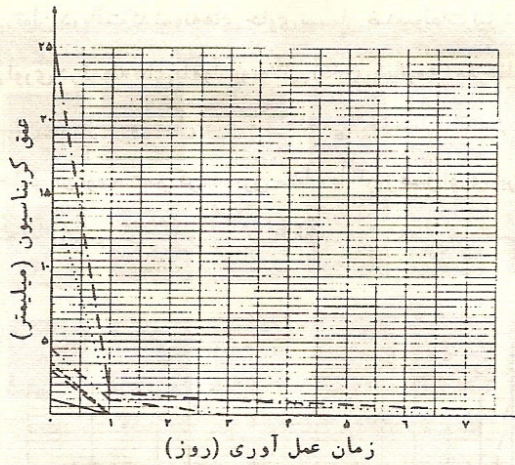
شکل ۹-۸ نتایج کربناسیون برای نمونه‌های باسیمان نوع یک حاوی دیا تومه - بدون عمل آوری

۲-۳-۸ تأثیر عمل آوردن

یکی از عوامل مهم در ساخت بتن با دوام، عمل آORN صحیح است. عمل آORN بتن به علت کاهش نفوذپذیری و افزایش ذخیره قلیانیت، موجب کم شدن عمق کربناسیون می‌گردد. تأثیر عمل آوردن بتن در نمونه‌های حاوی سیمان نوع یک در شکل ۱۰-۸ نشان داده شده است. جهت سهولت مقایسه، نتایج مربوط به قرائت ۱۲ روزه درج شده است و به دلیل اینکه پس از دوره عمل آوردن ۲۸ روزه، عمق کربناسیون عملاً صفر می‌شود، لذا از درج دوره عمل آوردن ۲۸ روزه صرف‌نظر شده است.

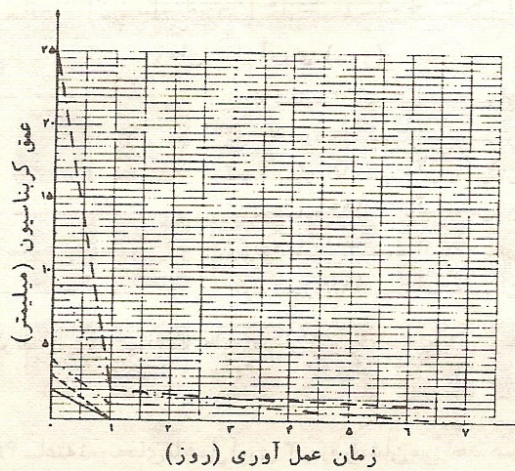
با توجه به شکل ۱۰-۸ در می‌یابیم بتن بدون عمل آوری دارای مقادیر بالایی از عمق کربناسیون است. در نمونه‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۶ و ۰/۷، عمق کربناسیون چندین برابر نمونه‌های با نسبت آب به سیمان کمتر می‌باشد. حال با اعمال تنها ۱ روز عمل آوری برای بتن، کاهش عمق کربناسیون برای تمام نسبت‌های آب به سیمان حاصل می‌گردد. حتی در مورد نمونه‌های دارای نسبت آب به سیمان بالا نیز عمق کربناسیون به شدت کاهش می‌یابد، به طوری که در حالت نسبت آب به سیمان ۰/۷، حدود ۱۲ برابر و در حالت نسبت آب به سیمان ۰/۶ حدود ۷ برابر کاهش در عمق کربناسیون مشاهده می‌شود. در این حالت، عمق کربناسیون برای نمونه‌های با نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۵ به صفر نزدیک می‌گردد.

با افزایش دوره عمل آوردن از ۱ روز به ۳ روز شاهد کاهش بیشتر عمق کربناسیون هستیم. با افزودن دوره عمل آوردن تا ۷ روز عملاً تغییرات عمق کربناسیون نسبت به حالت ۳ روز بسیار کم می‌شود و برای تمام حالتها، عمق کربناسیون صفر می‌گردد.



- نمونه شماره ۶ (نسبت آب به سیمان ۰/۷) _____
- نمونه شماره ۵ (نسبت آب به سیمان ۰/۶)
- نمونه شماره ۴ (نسبت آب به سیمان ۰/۵) _____
- نمونه شماره ۳ (نسبت آب به سیمان ۰/۴۵) _____
- نمونه شماره ۲ (نسبت آب به سیمان ۰/۴) _____
- نمونه شماره ۱ (نسبت آب به سیمان ۰/۳۵) _____

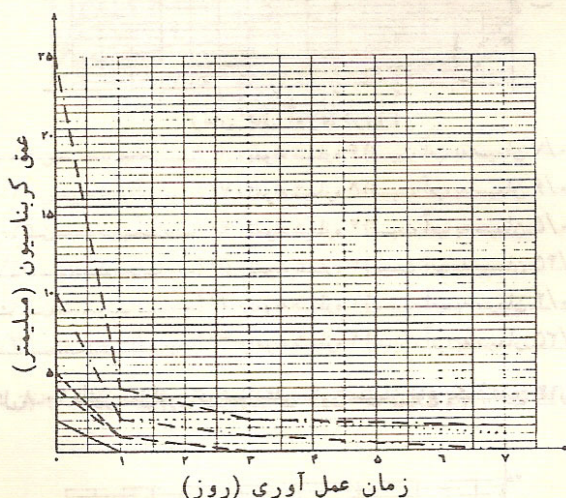
شکل ۸-۱۰ تأثیر عمل آوری در نمونه‌های حاوی سیمان نوع یک (نتایج ۱۲ روزه)



- نمونه شماره ۱۲ (نسبت آب به سیمان ۰/۷) _____
- نمونه شماره ۱۱ (نسبت آب به سیمان ۰/۶)
- نمونه شماره ۱۰ (نسبت آب به سیمان ۰/۵) _____
- نمونه شماره ۹ (نسبت آب به سیمان ۰/۴۵) _____
- نمونه شماره ۸ (نسبت آب به سیمان ۰/۴) _____
- نمونه شماره ۷ (نسبت آب به سیمان ۰/۳۵) _____

شکل ۸-۱۱ تأثیر عمل آوری در نمونه‌های حاوی سیمان ضد سولفات (نتایج ۱۲ روزه)

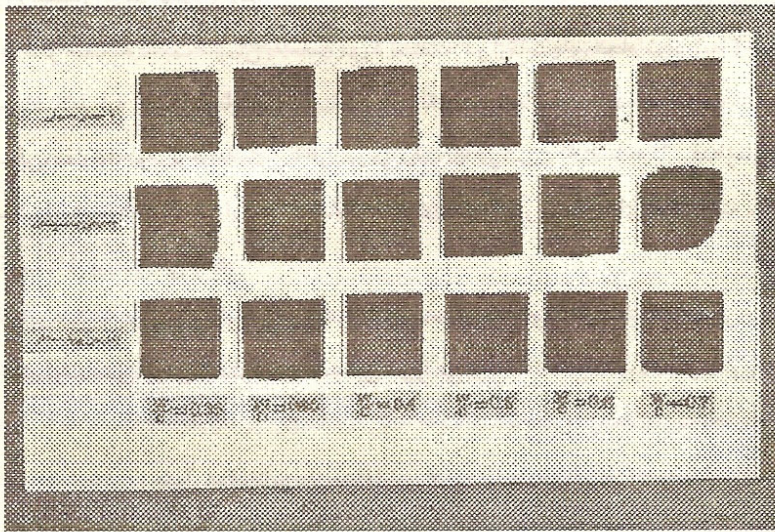
با مراجعه به شکل ۱۱-۸ می توان دریافت که نمونه های حاوی سیمان ضدسولفات نیز دارای رفتاری مشابه رفتار فوق می باشند. در شکل ۱۲-۸ تأثیر عمل آوری در نمونه های با مواد پوزولانی (دارای دیاتومه) ملاحظه می شود. در این حالت نیز کاهش قابل ملاحظه ای در عمق کربناسیون پس از ۱ روز عمل آوری مشاهده می گردد، اما این کاهش به اندازه حالت های قبل نیست. با ۷ روز عمل آوری برای نمونه های حاوی دیاتومه، عمق کربناسیون مشابه با ۳ روز عمل آوری برای نمونه های با سیمان نوع یک و نمونه های با سیمان ضد سولفات حاصل می گردد. پس در این حالت، کاهش عمق کربناسیون می بایست دوره عمل آوری را افزایش دهد.



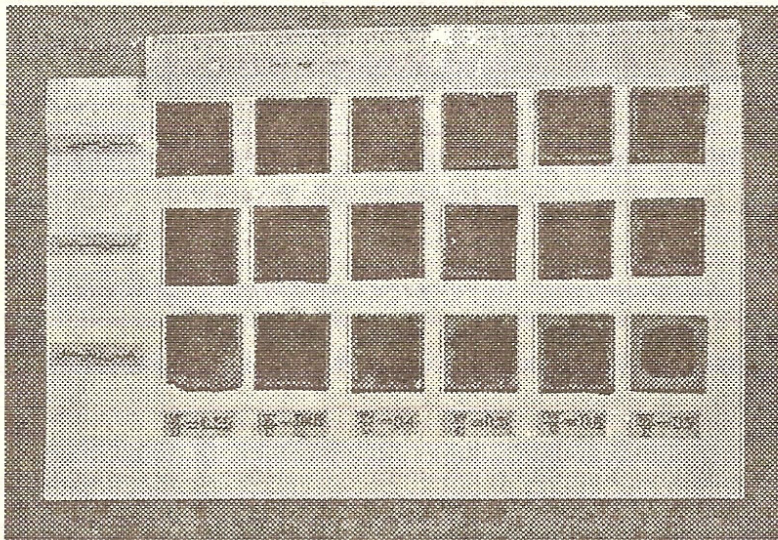
نمونه شماره ۱۳ (نسبت آب به سیمان ۰/۷)	_____
نمونه شماره ۱۴ (نسبت آب به سیمان ۰/۶)	
نمونه شماره ۱۵ (نسبت آب به سیمان ۰/۵)	_____
نمونه شماره ۱۶ (نسبت آب به سیمان ۰/۴۵)	_____
نمونه شماره ۱۷ (نسبت آب به سیمان ۰/۴)	_____
نمونه شماره ۱۸ (نسبت آب به سیمان ۰/۳۵)	_____

شکل ۱۲-۸ تأثیر عمل آوری در نمونه های حاوی سیمان نوع یک آمیخته با دیاتومه (نتایج ۱۲ روزه)

شکل ۱۳-۸ نتایج آزمایش ۴۸ ساعته نمونه های با عمل آوری ۳ روزه را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، عمق کربناسیون در تمام حالتها برابر با صفر است و با پاشیدن فنل فتالین، تمام سطح نمونه ها ارغوانی رنگ می شود. شکل ۱۴-۸ نیز نتایج ۴۸ ساعته نمونه های بدون عمل آوری را نشان می دهد که در این حالت، تقریباً تمامی نمونه ها کربناته می شود. در هر سری با افزایش نسبت آب به سیمان عمق بیشتری کربناته می گردد. مقایسه این دو حالت تأثیر دوره عمل آوری بتن را در عمق کربناسیون به وضوح نشان می دهد.



شکل ۱۳-۸ نتایج آزمایش ۴۸ ساعته کربناسیون روی نمونه‌های دارای سه روز عمل آوری



شکل ۱۴-۸ نتایج آزمایش ۴۸ ساعته کربناسیون روی نمونه‌های بدون عمل آوری

۳-۸ تأثیر انواع سیمان و مواد پوزولانی

در ابتدا لازم به ذکر است که نسبت سیمان به ماسه مورد استفاده در آزمایشهای انجام شده ۱ به ۳ بوده است. بعضی از محققین نیز نسبت اختلاط ۱ به ۵ را در آزمایشهای کربناسیون و دیگر آزمایشها توصیه کرده اند. شواهد نشان داده اند که درصد بیشتر سیمان مصرفی، مقاومت در برابر کربناسیون را افزایش می دهد، لذا در نسبت اختلاط به کار رفته زمان بیشتری لازم است تا نمونه کربناته شود. ولی از طرف دیگر، در این حالت تفاوت عمق کربناسیون در سیمان های به کار رفته محسوس تر می شود و رفتار سیمان ها تقریباً قابل بررسی می گردد.

در تمام دوره های عمل آوری، نمونه های دارای دیاتومه نسبت به نمونه های دیگر عمق کربناسیون بیشتری داشتند. این اختلاف در دوره های کوتاه عمل آوردن بیشتر است. علت این امر را می توان به کاهش ذخیره قللیت این نمونه ها نسبت داد.

جدول ۴-۸ نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه (باروز عمل آوردن)

مقاومت فشاری (kg/cm ²)	نیروی وارده kg	متوسط قرائت دستگاه	نوع سیمان	شماره نمونه
۳۳۷	۸۴۱۹	۶۸۴۵	سیمان نوع یک	۱
۳۳۵	۸۳۷۶	۶۸۱۰		۲
۳۳۳	۸۳۲۷	۶۷۷۰		۳
۲۳۸	۵۹۵۳	۴۸۴۰		۴
۱۴۶	۳۶۶۵	۲۹۸۰		۵
۱۰۹	۲۷۳۱	۲۲۲۰		۶
۴۵۸	۱۱۴۵۱	۹۳۱۰	سیمان ضد سولفات	۷
۴۵۶	۱۱۴۰۲	۹۲۷۰		۸
۴۵۰	۱۱۲۵۵	۹۱۵۰		۹
۳۱۲	۷۸۱۱	۶۳۵۰		۱۰
۲۰۱	۵۰۴۳	۴۱۰۰		۱۱
۱۱۸	۲۹۵۲	۲۴۰۰		۱۲
۲۱۶	۵۳۹۹	۴۳۹۰	سیمان حاوی ۲۰٪ دیاتومه	۱۳
۲۲۱	۵۵۲۳	۴۴۹۰		۱۴
۲۱۹	۵۴۷۴	۴۴۵۰		۱۵
۲۰۹	۵۲۲۸	۴۲۵۰		۱۶
۱۵۰	۳۷۵۲	۳۰۵۰		۱۷
۹۷	۲۴۲۹	۱۹۷۵		۱۸

* - نیروی وارده = عدد قرائت شده از دستگاه $\times 1/23$ (ضریب دستگاه)

نمونه‌های حاوی سیمان ضد سولفات در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵ و کمتر دارای رفتاری مشابه با نمونه‌های دارای سیمان نوع یک بودند. در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۶ و ۰/۷ به جز در مورد نمونه‌های بدون عمل آوری، در بقیه حالات افزایش نامحسوسی در عمق کربناسیون این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های با سیمان نوع یک مشاهده شد. شکل ۱۴-۸ تصویر مناسبی از روند کربناسیون در نمونه‌های با سیمان‌های مختلف نشان می‌دهد.

۴-۳-۸ تأثیر مقاومت

جدول ۴-۸ نشان می‌دهد که افزایش نسبت آب به سیمان باعث کاهش مقاومت فشاری می‌گردد. این کاهش مقاومت در نسبت‌های بالای آب به سیمان محسوس‌تر است. علت این کاهش مقاومت را می‌توان به افزایش فضا‌های مویینه در نمونه نسبت داده می‌دانیم که هر چه تخلخل فضا‌های مویینه بیشتر شود، عمق کربناسیون نیز افزایش می‌یابد. از طرفی، چون مقاومت با تخلخل نسبت عکس دارد، پس هر چه مقاومت بتن بیشتر شود، عمق کربناسیون کمتر می‌گردد. با مراجعه به جدول ۴-۸ می‌توان این روند را مشاهده کرد.

۴-۸ رابطه پیشنهادی برای تعیین عمق کربناسیون

همان طور که در بخش روابط نظری کربناسیون ذکر شد، بین اکثر محققین توافق کلی در مورد ارتباط عمق کربناسیون با جذر زمان در نمونه‌های واقع در شرایط محیط داخلی و خارجی وجود دارد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x = k\sqrt{t} \quad (۱)$$

در رابطه فوق، مقدار k به عوامل مختلفی مانند نسبت آب به سیمان، مقاومت بتن، تخلخل، نوع سیمان، نوع سنگدانه، مواد افزودنی، مواد اضافه شده، شرایط محیطی و شرایط نمایان بودن بستگی دارد. محققین همواره سعی کرده‌اند جهت سهولت در کاربرد روابط مربوط به k ، فقط پارامترهای مؤثر را در نظر بگیرند.

پژوهشگرانی که در مورد آزمایش‌های تسریع شده کربناسیون فعالیت داشته‌اند، رابطه فوق را در این حالت نیز تأیید کرده‌اند. نتایج آزمایش‌های انجام شده در این پروژه (همان طور که در شکل‌های ارائه شده در بخش قبل نیز مشهود است)، حاکی از تأیید رابطه فوق می‌باشد و بهترین منحنی عبوری از نقاط به دست آمده، یک تابع نمائی است. لذا کافی است پارامتر k به نحوی فرموله شود تا بتواند در شرایط مختلف تسریع شده، عمق کربناسیون را با دقت مناسبی تخمین زند.

عوامل مؤثر در مقدار k در این پروژه، عبارت است از: مقاومت فشاری، نسبت آب به سیمان، زمان عمل آوری و نوع سیمان به کار رفته. همه این عوامل به نوعی در مقاومت فشاری نیز مستتر می‌باشد و به همین دلیل است که عمق کربناسیون با عکس جذر مقاومت ارتباط دارد. بنابراین، برای تعیین عمق کربناسیون، باید رابطه‌ای ارائه شود که تابع عوامل فوق باشد. در این راستا، پس از بررسی روابط متعدد موجود، رابطه‌ای مشابه با رابطه کلی اسمالچیک برای پیش بینی عمق کربناسیون ارائه گردید.

اسمالچیک رابطه خود را برای بتن‌های واقع در شرایط محیطی به صورت زیر ارائه کرد:

$$X = \left[a \frac{w/c}{\sqrt{Nt}} - b \right] \sqrt{t}$$

a و b پارامترهایی هستند که به شرایط نمایان بودن بتن بستگی دارند. $\frac{w}{c}$ نسبت آب به سیمان است و N_T مقاومت

فشاری بتن می‌باشد.

رابطه پیشنهادی این پروژه جهت تعیین عمق کرناسیون با روش تسریع شده و در شرایط آزمایشگاهی فوق به

صورت زیر می‌باشد:

$$x = A \left[\frac{w/c}{\sqrt{f_c}} \right] \sqrt{t}$$

x = عمق کرناسیون (mm)

t = زمان قرارگرفتن نمونه در دستگاه (روز)

f_c = مقاومت ۷ روزه با ۷ روز عمل‌آوری

$\frac{w}{c}$ = نسبت آب به سیمان

A = ضریبی است که بر حسب مدت عمل‌آوری مشخص می‌شود.

لذا با توجه به داشتن عمق کرناسیون در زمانهای مختلف، مقدار k برای هر نمونه مشخص با استفاده از رابطه $x = k\sqrt{t}$ در زمانهای مختلف قرائت شده به دست می‌آید. مقادیر متوسط k در جدول ۸ - ۵ آورده شده است. همان طور که قبلاً نیز مطرح شد، k روند یا "آهنگ کرناسیون" نامیده می‌شود و در بسیاری از مقالات، محققین از آن به عنوان کرناسیون نیز نام برده‌اند، زیرا k نشان دهنده مقاومت نمونه در برابر کرناسیون می‌باشد.

مقادیر A با توجه به مدت عمل‌آوری نمونه‌ها پس از اجرای یک دوره آزمون و خطا و گرد کردن مقادیر آن به صورتی انتخاب شد که مقادیر نظری k بتواند ارتباط خوبی با مقادیر به دست آمده از آزمایش داشته باشد، مقادیر A در جدول ۶۸ آمده است. براساس مقادیر فوق و داشتن مقادیر مقاومت فشاری و نسبت‌های آب به سیمان، مقادیر نظری k در جدول ۷۸ ارائه شده است. با مقایسه این مقادیر با مقادیر واقعی k که در جدول ۵۸ آورده شد، مشاهده می‌گردد که مقادیر محاسباتی هماهنگی خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. لازم به ذکر است که آزمایش تسریع شده به دو منظور می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد:

۱- جهت مقایسه و ارزیابی عوامل مؤثر بر کرناسیون

۲- به دست آوردن روابطی برای تعیین عمق کرناسیون در حالت تسریع شده و ارتباط آن با شرایط معمولی محیط.

هدف اصلی این پروژه ارزیابی عوامل مؤثر بر کرناسیون است. ارتباط روابط مربوط به عمق کرناسیون در حالت تسریع شده به شرایط معمولی محیط در صورتی میسر است که نمونه‌هایی با شرایط مشابه مورد استفاده در آزمایش تسریع شده، ساخته

شود و در مدت زمان طولانی در شرایط محیط قرار گیرد. سپس، عمق کرناسیون این نمونه‌ها تعیین گردد. لذا رابطه ارائه شده فقط در حالت تسریع شده (تحت شرایط آزمایشگاهی معین) صدق می‌کند.

جدول ۸- ۵ مقادیر k به دست آمده از آزمایش

شماره نمونه	نوع سیمان	زمان عمل آوری				
		۵روز	۱روز	۳روز	۷روز	۲۸روز
۱	سیمان فنی یک	۰/۳۸	۰	۰	۰	۰
۲		۰/۷۳	۰	۰	۰	۰
۳		۱/۱۳	۰	۰	۰	۰
۴		۱/۷۸	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۰۳	۰
۵		۲/۷۹	۰/۳۳	۰/۱۹	۰/۰۳	۰
۶		۳/۹۱	۰/۵۳	۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۰۵
۷	سیمان ضد سولفات	۰/۵۷	۰	۰	۰	۰
۸		۱/۸۲	۰	۰	۰	۰
۹		۰/۸۳۷	۰	۰	۰	۰
۱۰		۱/۵۱	۰/۲۱۷	۰/۱۲	۰/۰۳	۰
۱۱		۲/۱۷۹	۰/۵۲	۰/۲۸	۰/۱	۰/۰۵
۱۲		۴/۳۶	۰/۷	۰/۳۱	۰/۲	۰/۰۵
۱۳	سیمان حاوی ۲۰٪ دیاتومه	۰/۵۷	۰	۰	۰	۰
۱۴		۱/۰۲	۰/۱۲	۰	۰	۰
۱۵		۲/۰۲	۰/۱۲۲	۰	۰	۰
۱۶		۳/۰۹	۰/۷۹	۰/۲۸	۰/۰۷	۰/۰۵
۱۷		۳/۲۲	۰/۷۹	۰/۳۵	۰/۲	۰/۱۳
۱۸		۶/۸۴	۱/۶۷	۰/۶۹	۰/۲۸	۰/۲۴

*: مقادیر کمتر از ۰/۰۵ برابر با صفر در نظر گرفته شده است.

جدول ۸- ۶ مقادیر بر حسب زمان عمل آوری

زمان عمل آوری (روز)	۰	۱	۳	۷	۲۸
A	۱۰	۲	۱	۰/۵	۰/۳

رابطه مذکور نشان می دهد که عمق کربناسیون با نسبت آب به سیمان رابطه مستقیم دارد و با عکس ریشه دوم مقاومت نیز متناسب است و زمان عمل آوری نیز با تعریف ضریب A، همان طور که در جدول ۸-۶ ارائه شده، تأثیر به سزایی در عمق کربناسیون دارد. همان طور که مشاهده می شود، ۳ روز عمل آوری حدود ۱۰ برابر و ۷ روز عمل آوری تقریباً ۲۰ برابر نسبت به حالت بدون عمل آوری در کاهش مقادیر عمق کربناسیون مؤثر هستند. مقادیر ضریب همبستگی بین مقادیر k آزمایشی و پیشنهادی در جدول ۸-۸ آورده شده است که در اکثر موارد، همبستگی خوبی بین این مقادیر وجود دارد.

جدول ۸-۷ مقادیر k به دست آمده از رابطه پیشنهادی

شماره نمونه	نوع سیمان	زمان عمل آوری				
		۵روز	۱روز	۳روز	۷روز	۲۸روز
۱	سیمان پرتلند	۰/۶	۰/۱۲	۰/۰۶	۰	۰
۲		۰/۶۹	۰/۱۳	۰/۰۶۹	۰	۰
۳		۰/۷۸	۰/۱۵	۰/۰۷۸	۰	۰
۴		۱/۰۲	۰/۲۰	۰/۱	۰	۰
۵		۱/۵۷	۰/۳۱	۰/۱۶	۰/۰۹	۰
۶		۲/۱۲	۰/۴۲	۰/۲۱	۰/۱۰	۰/۰۶
۷	سیمان ضد سولفات	۰/۵	۰/۱	۰	۰	۰
۸		۰/۶	۰/۱۲	۰/۰۶	۰	۰
۹		۰/۷	۰/۱۴	۰/۰۷	۰	۰
۱۰		۰/۹	۰/۱۸	۰/۰۹	۰	۰
۱۱		۱/۳	۰/۲۶	۰/۱۳	۰/۰۷۵	۰
۱۲		۲	۰/۴	۰/۲	۰/۱	۰/۰۶
۱۳	سیمان حاوی ۲۰٪ پودر پسته	۰/۷	۰/۱۴	۰/۰۷	۰	۰
۱۴		۰/۹	۰/۱۸	۰/۰۹	۰	۰
۱۵		۰/۹	۰/۱۸	۰/۰۹	۰	۰
۱۶		۱/۱	۰/۲	۰/۱۳	۰	۰
۱۷		۱/۳	۰/۲۶	۰/۱۳	۰/۰۶	۰
۱۸		۸	۲/۲	۰/۴۴	۰/۲۲	۰/۰۶۶

جدول ۸-۸. ضریب همبستگی (r) بین مقادیر K آزمایشی و پیشنهادی

شماره نمونه	نوع سیمان	زمان عمل آوری (روز)				
		۰	۱	۳	۷	۲۸
۱	فنی					
۲						
۳		۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۷۹	۱
۴						
۵						
۶						
۷	خسوفات					
۸						
۹		۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۸۹	۰/۹۶	۰/۶۳
۱۰						
۱۱						
۱۲						
۱۳	معمولی دیاتومه حاوی ۲۰٪ دیاتومه					
۱۴						
۱۵		۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۸۵
۱۶						
۱۷						
۱۸						

منابع و مراجع

- ۱- رضا پاشائی، "بررسی پدیده کربناسیون و نفوذ یون کلر در سازه های بتن مسلح؛ استاد راهنما دکتر رضانیانپور، ۱۳۷۰
- ۲- هرمز فامیلی، "بتن شناسی" جهاد دانشگاهی دانشگاه، علم و صنعت، ۱۳۶۸
- ۳- شهرام وثوق، "بررسی خواص مهندسی و دوام بتن های ساخته شده از پوسته برنج" استاد راهنما دکتر رضانیانپور، ۳۶۸
- 4-Marc G.Richardson,"carbonation of reinforced concrete" CITIS Ltd. publishers.Dublin,London and New York,1988.
- 5-M.Sakuta,T.Izumi,sugiyama, and K.Tanaka" Measures to Restrain Rate of Carbonation in Concrete". Sp100-100 Concrete Durability Katharine and Bryant Mather International Conference-1989
- 6-p.FidJestol." Reinforcement Corrosion and the Use of CSF- Based Additives" sp 100-73. concrete Durability katharine and Bryant Mather international conference. 1989.
- 7-"The Durability of Steel in Concrete: part 2, Diagnosis and assessment of corrosion-cracked concrete."Building Research Establishment Digest.264 August1982
- 8- ALi Akbar Ramezaniانpour." properties and durability of pozzolanic cement mortars and concretes."ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering , The University of Leeds. April 1987.