

ارائه روابط تجربی جهت بررسی اثرات یخ زدگی بتن معمولی

داود مستوفی نژادⁱ؛ سید مهدی حسینیانⁱⁱ

چکیده

بدون شک تخریب سازه‌های بتنی بر اثر سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن یکی از مسائل اساسی بتن سازی در مناطق سردسیر محسوب می‌شود. عوامل زیادی بر دوام بتن در مقابل یخبندان تاثیر می‌گذارند که می‌توان به مواردی از قبیل مقدار آب مصرفی، مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، شرایط عمل آوری، میزان هوای بتن و تعداد سیکل‌های یخ‌زدن و ذوب شدن اشاره کرد. هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر بعضی از این عوامل در راستای دستیابی به روابط تجربی به منظور تبیین اثرات یخ زدگی بر بتن معمولی است. در این ارتباط به بررسی نقش مقادیر مختلف نسبت آب به سیمان (۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸) و میزان هوا (۳، ۴/۵، ۶ و ۷/۵ درصد) در کنار تعداد سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن، بر دوام بتن معمولی در برابر یخبندان پرداخته شد. در مجموع ۲۸۸ نمونه بتن ساخته و مراقبت شد. نمونه‌ها تحت آزمایش ذوب و انجماد بر اساس استاندارد ASTM C666B، پس از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل قرار گرفتند. در نهایت بر اساس اطلاعات تجربی، روابطی برای سنجش دوام بتن معمولی در برابر یخبندان ارائه شد.

کلمات کلیدی

دوام بتن، ذوب و انجماد، مقاومت فشاری، نسبت آب به سیمان، تغییر طول، تغییر وزن، جذب آب، بتن هوادار.

Semi-Experimental Relation for Prediction of Frost Resistance of Normal Concrete

D. Mostofinejad, M. Hoseinian

ABSTRACT

The freezing and thawing is one of the major problems of the concrete industry in cold climates. There are many parameters that effect the durability of concrete under freezing and thawing cycles; some of them are water content, cement content, water-to-cement ratio, curing condition, air content, and the number of freezing and thawing cycles. The aim of this study, is investigation of the effects of some of these parameters to extract some experimental relation to explain the frost resistance of normal concrete (NC). To do so, the effect of three key parameters, i.e. the role of water- cement ratio (0.5, 0.6, 0.7 and 0.8) and air content (3, 4.5, 6 and 7.5%) in addition to number of freeze-thaw cycles was studied on the normal concrete under freezing. Totally, 288 normal concrete specimens were cast and cured; then tested based on ASTM C666B under 45, 100 and 150 cycles of freezing and thawing. Finally using the experimental data, some expressions were proposed regarding the durability of normal concrete under freezing.

KEYWORDS

Durability of concrete, Freeze-Thaw, Compressive Strength, Water-Cement Ratio, Length Change, Weight Change, Absorption, Air entrainment.

ⁱ دانشیار دانشکده مهندسی عمران؛ دانشگاه صنعتی اصفهان.

ⁱⁱ مربی گروه عمران؛ دانشگاه بوعلی سینا: mhoseinian000@yahoo.com

خالص یخزده، فشار اسمزی و در نتیجه آن فشار هیدرولیکی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، حباب‌های هوا و حفره‌های مویینه خالی، با هدایت جریان آب به داخل خود، مقداری از فشار ناشی از تشکیل یخ را مستهلک می‌سازند [۱].

میزان خرابی ناشی از تناوب‌های یخ‌زدن و آب شدن، از پوسته شدن سطحی تا تجزیه کامل بتن تغییر می‌کند. این خرابی‌ها از سطوح خارجی بتن آغاز می‌شوند و به عمق آن گسترش می‌یابند [۱]. جداول حاشیه خیابان‌ها که مدت‌های طولانی مرطوب باقی می‌مانند، از هر بتن دیگر در برابر یخبندان آسیب پذیرتر هستند.

کفایت مقاومت بتن در برابر یخبندان را می‌توان با آزمایش‌های یخ‌زدن و آب شدن تعیین کرد. دو روش به وسیله استاندارد ASTM C666 توصیه شده است. در هر دوی این روش‌ها یخ‌زدن سریع اعمال می‌شود؛ اما در یک روش یخ‌زدن و آب شدن در آب و در روش دیگر یخ‌زدن در هوا و آب شدن در آب انجام می‌گیرد. حالت یخ‌زدن نمونه‌های اشباع شده در آب چندین برابر شدیدتر از حالت یخ‌زدن آنها در هواست [۱۴].

اولین تحقیقات پیرامون تاثیر عمل یخ‌زدن بر بتن از اوایل دهه ۳۰ به وسیله پاورز شروع شد. پاورز در تحقیقات خود در سال ۱۹۶۱ نشان داد که علت تخریب ملات سیمان در اثر یخبندان، تنش‌های ایجاد شده در خلل و فرج ملات سیمان در اثر فشار هیدرولیکی است. این فشار از مقاومت در برابر حرکت آب از ناحیه یخ زدگی ناشی می‌شود. او معتقد بود که بزرگی این فشار به عوامل زیر بستگی دارد: سرعت یخ‌زدن آب، درصد اشباع، ضریب نفوذپذیری ملات سیمان و طولی که آب طی می‌کند تا به نزدیک‌ترین محل رهایی از فشار برسد [۲].

از آن به بعد محققین زیادی در زمینه عوامل موثر بر یخ‌زدگی بتن مطالعه کرده‌اند که از جمله می‌توان به تحقیقات مالهوترا در سال ۱۹۸۶ [۱۱]، پیگن و همکاران در سال ۱۹۹۱ [۱۵]، بورگ و اوست در سال ۱۹۹۲ [۱۵]، هوتون در سال ۱۹۹۴ [۱۰]، مرزوک و چیانگ در سال ۱۹۹۴ [۱۲] و باورز و همکاران در سال ۱۹۹۶ [۹] اشاره کرد.

از آنجا که پارامترهایی همچون نسبت آب به سیمان، میزان هوای موجود در بتن و تعداد سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن بر مقاومت بتن در برابر یخبندان تاثیر بسزایی دارند، در این تحقیق، به بررسی تاثیر این عوامل در راستای دستیابی به روابط تجربی برای تبیین اثرات یخ زدگی بر بتن معمولی همت گماشته شد.

یخ‌زدن و آب شدن‌های متوالی^۱ یکی از دلایل عمده خرابی‌های بتن است. این نوع خرابی در مناطق سردسیر ایران بخصوص در مناطق غربی و شمال غربی بسیار رایج است. در این رابطه، به منظور اعمال ضوابط فنی و رعایت اصول طراحی دوام^۲ سازه‌های بتنی، نیاز مبرمی به مدل‌های ساده و کارا احساس می‌شود. از آنجایی که ابداع چنین روش‌هایی به‌تازگی مورد توجه قرار گرفته‌اند، در این تحقیق سعی می‌شود تاثیر یخ‌زدن و آب شدن متناوب بر بتن، بررسی و مدلسازی شود.

آب موجود در بتن؛ که محلولی از نمک‌های گوناگون است، در دمایی پایین‌تر از صفر درجه سانتی‌گراد یخ می‌زند. به‌علاوه، هر قدر اندازه حفره‌های پر از آب موجود در بتن کوچک‌تر باشد، دمایی که در آن آب یخ می‌زند، پایین‌تر خواهد آمد. حفره‌های بتن، ابعاد بزرگ تا خیلی کوچک دارد؛ بنابراین برای آب محبوس شده در آنها، نقطه انجماد یکسانی وجود نخواهد داشت. از طرفی، حفره‌های ژل آنقدر کوچکند که امکان یخ‌زدن آب در آنها بسیار کم است؛ بنابراین قسمت بیشتر یخبندان در حفره‌های مویینه رخ خواهد داد [۱].

هنگامی که آب یخ می‌زند، افزایش حجمی در حدود ۹ درصد در آن به‌وجود می‌آید. هنگامی که دمای بتن پایین می‌آید، یخبندان به‌تدریج به‌گونه‌ای رخ می‌دهد که آبی که هنوز در حفره‌های مویینه یخ نزده است، بر اثر افزایش حجم یخ، در معرض فشار هیدرولیکی قرار می‌گیرد. اگر این فشار آزاد نشود، ممکن است باعث ایجاد تنش‌های کششی داخلی شود. این امر سبب ایجاد گسیختگی‌های موضعی در بتن می‌شود. در هنگام آب شدن، انبساطی که به‌وسیله یخ، ایجاد شده است، باقی می‌ماند؛ به‌طوری که در جذب آب بعدی فضای بیشتری در بتن وجود خواهد داشت. در نتیجه، در یخبندان بعدی انبساط بیشتری رخ خواهد داد. بنابراین تناوب‌های یخ‌زدن و آب شدن اثر تجمعی دارند و می‌توان تشابهی بین این عمل و گسیختگی ناشی از خستگی تصور کرد [۱۳]. این عمل عمدتاً در خمیر سیمان اتفاق می‌افتد و منافذ بزرگ تر بتن که در اثر تراکم ناقص به‌وجود می‌آیند، معمولاً پر از هوا بوده و به‌میزان قابل ملاحظه‌ای در معرض عمل یخ‌زدن واقع نمی‌شوند [۱۳].

دو فرایند وجود دارند که به‌نظر می‌رسد در افزایش فشار هیدرولیکی آب یخ‌زده در حفره‌های مویینه شرکت دارند. در فرایند اول، به‌دلیل عدم وجود تعادل ترمودینامیکی بین آب ژل و یخ، انتشار آب ژل به طرف حفره‌های مویینه باعث رشد یخ می‌شود و در نتیجه، فشار هیدرولیکی افزایش می‌یابد. در فرایند دوم با افزایش موضعی غلظت محلول بر اثر جداسدن آب

۲- مصالح مورد استفاده

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ I (منطبق بر استاندارد ASTM-C-150 [6]) و همچنین از ریزدانه آهکی^۲، با مدول نرمی ۲/۴۶، چگالی ۲/۴۷۸، جذب آب ۱/۶٪ و رطوبت طبیعی ۰/۳٪ استفاده شد. در تحقیق مورد نظر از درشت دانه شکسته آهکی با حداکثر قطر ۹/۵ میلیمتر استفاده شد. درشت دانه آهکی دارای چگالی ۲/۶۴، وزن مخصوص خشک و میله خورده 1460 kg/m^3 و میزان جذب آب ۰/۷٪ بود. در این تحقیق از افزودنی هوازا، تشکیل شده از نوعی صمغ مرکب از مواد مصنوعی، به صورت مایع، با چگالی ۱/۰۱ و با نام تجاری ماده هوازای سیکا، محصول کشور سوئیس استفاده شد.

۳- روش انجام تحقیق

در تحقیق حاضر از افت مقاومت فشاری^۳ بتن، درصد کاهش طول^۴ و وزن^۱ آن و همچنین از میزان جذب آب^۵ بتن به عنوان معیارهایی برای سنجش میزان دوام بتن در برابر یخبندان استفاده شد. جهت بررسی اثر نسبت آب به سیمان بر دوام بتن در برابر یخبندان، از چهار نسبت آب به سیمان ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸ استفاده شد. همچنین برای بررسی اثر میزان هوای موجود^۶ در بتن بر دوام آن در برابر یخبندان، از چهار

درصد مختلف حباب‌های هوا به میزان ۳ درصد (غیر عمدی)، ۴/۵، ۶ و ۷/۵ درصد (عمدی) استفاده شد. نمونه‌هایی که تحت اثر سیکل‌های متناوب یخ‌زدن و آب شدن قرار می‌گرفتند، به مدت ۱۴ روز قبل از شروع آزمایش یخبندان درون حوضچه‌های آب به صورت مستغرق نگهداری شدند. سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن طبق ASTM C-666B روی نمونه‌ها انجام گرفت [7]. بنابر توصیه‌های این استاندارد، هر سیکل یخ‌زدن و آب شدن ۳ ساعت به طول انجامید که در ۲۰٪ این زمان، نمونه‌ها در حالت غیر انجماد و در ۸۰٪ زمان فوق، نمونه‌ها در حالت انجماد قرار گرفتند. به دلیل انجام سیکل‌های یخبندان به وسیله نیروی انسانی و نیز به دلیل محدودیت زمان کاری آزمایشگاه، در هر شبانه روز تنها انجام سه سیکل ذوب و انجماد امکان پذیر بود؛ به همین خاطر در ساعات غیر اداری بنا به توصیه استاندارد ASTM C-666 نمونه‌ها در حالت انجماد قرار گرفتند.

طرح اختلاط بتن بر اساس آئین نامه^۳ ACI 211 [3] صورت گرفت که نتیجه آن در جدول (۱) خلاصه شده است. به دلیل کثرت تعداد نمونه‌ها و محدودیت حجم دستگاهی که آزمایش یخ‌زدن و آب شدن با آن انجام می‌گرفت، تمام نمونه‌ها از نوع مکعبی به ابعاد ۷۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

جدول (۱): نسبت‌های وزنی طرح اختلاط بتن معمولی با درشت دانه آهکی

شماره مخلوط	نسبت آب به سیمان	درصد هوا	آب (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	ریزدانه (kg/m^3)	درشت دانه (kg/m^3)	ماده هوازا*
N1	۰/۵	۳	۲۳۹	۴۵۶	۸۰۲	۷۳۰	۰
N2		۴/۵	۲۱۲	۴۰۴	۸۷۱		۰/۰۵
N3		۶	۲۱۲	۴۰۴	۸۳۲		۰/۱
N4		۷/۵	۲۱۲	۴۰۴	۷۹۶		۰/۱۵
N5	۰/۶	۳	۲۳۹	۳۸۰	۸۶۲	۷۳۰	۰
N6		۴/۵	۲۱۲	۳۳۶	۹۲۵		۰/۰۶
N7		۶	۲۱۲	۳۳۶	۸۸۷		۰/۱۲
N8		۷/۵	۲۱۲	۳۳۶	۸۵۰		۰/۱۸
N9	۰/۷	۳	۲۳۹	۳۲۶	۹۰۵	۷۳۰	۰
N10		۴/۵	۲۱۴	۲۸۹	۹۶۲		۰/۰۷
N11		۶	۲۱۴	۲۸۹	۹۲۵		۰/۱۴
N12		۷/۵	۲۱۴	۲۸۹	۸۸۷		۰/۲۱
N13	۰/۸	۳	۲۴۰	۲۸۵	۹۲۸	۷۳۰	۰
N14		۴/۵	۲۱۴	۲۵۳	۹۹۱		۰/۰۸
N15		۶	۲۱۴	۲۵۳	۹۵۳		۰/۱۱
N16		۷/۵	۲۱۴	۲۵۳	۹۱۱		۰/۲۴

* بر حسب درصد وزنی سیمان مصرفی

۴- تعیین اسلامپ و میزان هوا

پس از ساخت بتن، آزمایش اسلامپ مطابق استاندارد ASTM C-143 [۸] و آزمایش تعیین درصد هوا مطابق استاندارد ASTM C-231 [۵] بر بتن تازه انجام گرفت. جدول ۲ نتیجه آزمایش اسلامپ و هوا را نشان می‌دهد.

۵- مقاومت فشاری بتن در معرض یخبندان

جدول ۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن (حاصل از

میانگین سه آزمایش) بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل یخ‌زدن و آب شدن متوالی را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که اعداد صفر در این جدول معرف نمونه‌هایی است که کاملاً منهدم شده‌اند. همچنین در جدول فوق نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن شاهد در سنین ۲۸، ۴۶ و ۶۳ روز (همزمان با اتمام سیکل‌های ذوب و انجماد ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰) حاصل از میانگین سه آزمایش فشاری نیز برای مقایسه آورده شده است.

جدول (۲): اسلامپ و درصد هوای مخلوط بتن معمولی (N)

شماره مخلوط بتن	اسلامپ mm	درصد هوا	شماره مخلوط بتن	اسلامپ mm	درصد هوا
N1	۱۰۰	۳	N9	۱۱۰	۲/۶
N2	۷۰	۴/۶	N10	۸۰	۴/۵
N3	۹۰	۶	N11	۱۰۰	۶/۲
N4	۱۱۰	۷/۷	N12	۱۲۰	۷/۴
N5	۱۰۰	۲/۸	N13	۱۲۰	۲/۹
N6	۸۰	۴/۴	N14	۸۰	۴/۷
N7	۹۰	۶/۱	N15	۱۰۰	۶
N8	۱۱۰	۷/۵	N16	۱۳۰	۷/۴

جدول (۳): مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال، در نمونه‌های تحت تاثیر سیکل‌های یخبندان و نمونه‌های شاهد

شماره مخلوط	W/C	A (%)	$f'_{c_{45\text{ cycles}}}$	$f'_{c_{100\text{ cycles}}}$	$f'_{c_{150\text{ cycles}}}$	$f'_{c_{28}}$	$f'_{c_{46}}$	$f'_{c_{63}}$
N1	.۱۵	۳	۲۲/۶	۱۴/۰	۰	۲۵/۸	۲۸/۷	۲۹/۰
N2		۴/۵	۲۸/۲	۲۷/۵	۲۶/۵	۳۲/۶	۳۴/۶	۳۵/۶
N3		۶	۲۵/۷	۲۵/۳	۲۴/۷	۲۹/۳	۳۱/۵	۳۲/۰
N4		۷/۵	۲۲/۹	۲۲/۷	۲۲/۲	۲۷/۲	۲۹/۰	۲۹/۴
N5	.۱۶	۳	۱۸/۱	۸/۱	۰	۲۰/۰	۲۹/۴	۳۰/۸
N6		۴/۵	۲۰/۷	۱۹/۷	۱۸/۳	۲۵/۰	۲۶/۸	۲۷/۴
N7		۶	۱۸/۶	۱۸/۳	۱۷/۶	۲۲/۲	۲۴/۰	۲۴/۳
N8		۷/۵	۱۷/۵	۱۷/۳	۱۱/۸	۱۹/۵	۲۰/۹	۲۱/۳
N9	.۱۷	۳	۱۲/۰	۲/۹	۰	۲۱/۸	۲۲/۲	۲۳/۸
N10		۴/۵	۱۲/۹	۱۲/۱	۱۱/۷	۱۸/۲	۱۹/۲	۱۹/۹
N11		۶	۱۳/۵	۱۲/۷	۱۲/۲	۱۱/۲	۱۷/۲	۱۷/۶
N12		۷/۵	۱۲/۸	۱۲/۶	۱۲/۲	۱۴/۸	۱۵/۸	۱۱/۲
N13	.۱۸	۳	۸/۵	۰	۰	۱۱/۱	۱۷/۱	۱۷/۵
N14		۴/۵	۸/۶	۶/۸	۵/۵	۱۳/۵	۱۴/۴	۱۴/۸
N15		۶	۸/۸	۸/۱	۷/۵	۱۱/۶	۱۲/۴	۱۲/۷
N16		۷/۵	۹/۴	۹/۲	۸/۶	۱۱/۴	۱۲/۱	۱۲/۴

۵-۱- تأثیر تعداد سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن بر مقاومت فشاری بتن در حین یخبندان

جدول (۴) افت متوسط مقاومت فشاری بتن (متوسط، بازای چهار درصد متفاوت هوای بتن تازه) را بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل یخ‌زدن و آب شدن متناوب را ارائه می‌دهد. برای مقایسه،

جدول (۴): تأثیر تعداد سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن متناوب بر مقاومت فشاری بتن معمولی در معرض یخبندان.

W/C	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸
$\overline{f'_c} 100 \text{ cycles} / \overline{f'_c} 45 \text{ cycles}$	۰/۸۹	۰/۸۵	۰/۷۸	۰/۶۸
$\overline{f'_c} 150 \text{ cycles} / \overline{f'_c} 100 \text{ cycles}$	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۸۷	۰/۸۹
$\overline{f'_c} 150 \text{ cycles} / \overline{f'_c} 45 \text{ cycles}$	۰/۷۳	۰/۷۰	۰/۶۸	۰/۶۱

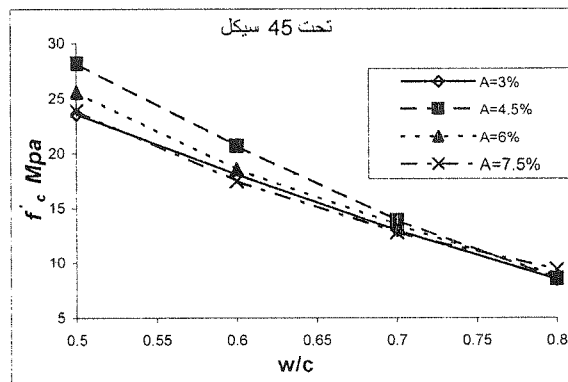
جدول (۵): رشد مقاوت فشاری بتن شاهد در طول زمان.

W/C	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸
$\overline{f'_c} 46 / \overline{f'_c} 28$	۱/۰۷	۱/۰۷	۱/۰۶	۱/۰۷
$\overline{f'_c} 63 / \overline{f'_c} 46$	۱/۰۲	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۲
$\overline{f'_c} 63 / \overline{f'_c} 28$	۱/۰۹	۱/۱	۱/۰۹	۱/۰۹

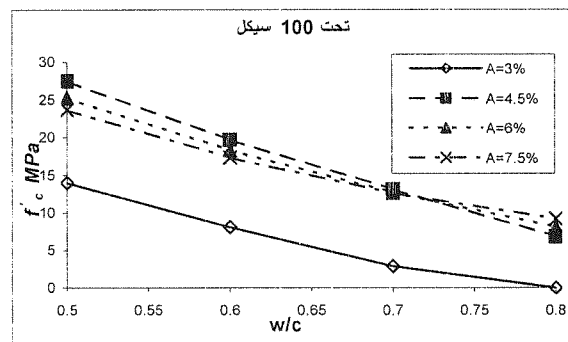
۵-۲- تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن در معرض یخبندان

به سیمان بر افزایش دوام بتن در برابر سیکل‌های متناوب یخ‌زدن و آب شدن پی‌برد.

با تنظیم اشکال (۱-الف) تا (ج)، اثر نسبت آب به سیمان را بر مقاومت فشاری بتن در حین یخبندان بررسی کرده ایم. برای مقایسه اثر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن هنگامی که بتن تحت سیکل‌های یخبندان قرار نمی‌گیرد (بتن شاهد)، اشکال (۲-الف) تا (ج) را بررسی کردیم. شکل‌های (۱-الف، ب و ج) به ترتیب نشان دهنده مقاومت فشاری بتن در مقابل نسبت‌های آب به سیمان بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل یخ‌زدن و آب شدن بوده و شکل‌های (۲-الف، ب و ج) به ترتیب نشان دهنده مقاومت فشاری بتن شاهد در مقابل نسبت‌های آب به سیمان بعد از ۲۸، ۴۶ و ۶۳ روز (هم‌زمان با اتمام سیکل‌های ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰) می‌باشند. شکل‌های (۱-الف تا ج) نشان می‌دهند که در بتن معمولی بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل یخ‌زدن و آب شدن متوالی و به‌ازای چهار درصد هوای ۳ (در بتن بدون هوا و به صورت غیر عمدی) ۴/۵، ۶ و ۷/۵ (در بتن هوادار و بصورت عمدی)، به کارگیری نسبت آب به سیمان کمتر، بیشترین رشد را در مقاومت فشاری نهایی بتن ایجاد کرده است. مطابق اشکال مذکور هر چه تعداد سیکل‌های یخبندان افزایش می‌یابد، اثر کاهش نسبت آب به سیمان بر افزایش مقاومت فشاری بتن (افزایش دوام) در حین یخبندان آشکارتر می‌شود؛ بنابراین در اینجا می‌توان به اهمیت نسبت آب



شکل (۱-الف): تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بعد از ۴۵ سیکل

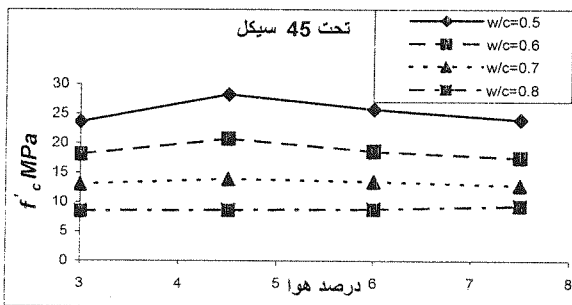


شکل (۱-ب): تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بعد از ۱۰۰ سیکل

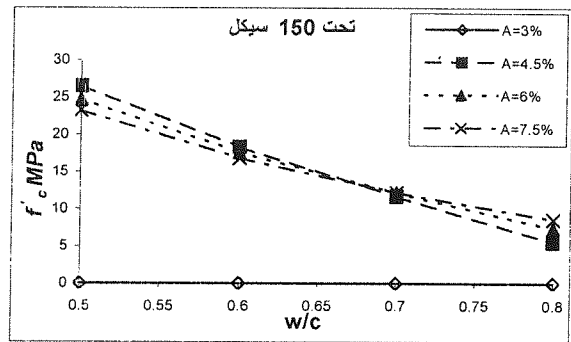
۵-۳- تأثیر درصد هوای بتن تازه بر مقاومت فشاری

بتن در حین یخبندان

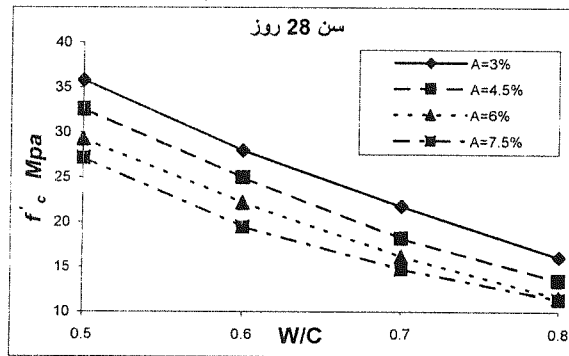
با تنظیم اشکال (۳-الف تا ج) اثر درصد هوای بتن تازه را بر مقاومت فشاری بتن در حین یخبندان بررسی کردیم. برای مقایسه اثر درصد هوای بتن تازه بر مقاومت فشاری بتن هنگامی که بتن تحت سیکل‌های یخبندان قرار نمی‌گیرد (بتن الف، ب و ج) به ترتیب نشان دهنده مقاومت فشاری بتن در مقابل درصد هوای بتن تازه بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل یخ‌زدن و آب شدن بوده و شکل‌های (۴-الف، ب و ج) به ترتیب نشان دهنده مقاومت فشاری بتن شاهد در مقابل درصد هوای بتن تازه بعد از ۲۸، ۴۶ و ۶۳ روز (هم‌زمان با اتمام سیکل‌های متناوب یخ‌زدن برابر با ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰) می‌باشند. شکل‌های (۲) نشان می‌دهند که در بتن معمولی بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل یخ‌زدن و آب شدن متوالی و به ازای چهار نسبت آب به سیمان ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸، به کارگیری ۴/۵ درصد هوا در بتن تازه بیشترین رشد را در مقاومت فشاری نهایی بتن و به کارگیری ۲ درصد هوا (میزان هوای اتفاقی موجود در بتن بدون مواد هوازا) کمترین رشد را در مقاومت فشاری نهایی بتن ایجاد کرده است. به عبارت دیگر، میزان بهینه هوا برای رسیدن به مقاومت فشاری بالاتر برای بتنی که تحت سیکل‌های متناوب ذوب و انجماد قرار می‌گیرد، ۴/۵ درصد است. همچنین در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که در بتن‌هایی که تحت اثر یخبندان واقع نمی‌گردند (بتن‌های شاهد) با افزایش درصد هوای بتن تازه مقاومت فشاری بتن به طور قابل ملاحظه‌ای افت می‌کند. با توجه به شکل‌های (۳)، عموماً بازای ۱٪ افزایش میزان هوا، مقاومت فشاری بتن به طور متوسط حدود ۶٪ کاهش می‌یابد. این در حالی است که نویل^۱ عقیده دارد، بازای ۱٪ افزایش هوا مقاومت فشاری بتن حدود ۵/۵٪ کاهش می‌یابد [۱۳]. همچنین انجمن ۳۶۳ بتن آمریکا نیز بیان می‌دارد، بازای ۱٪ افزایش هوای بتن، مقاومت فشاری آن در حدود ۵ تا ۷ درصد کاهش می‌یابد [۴].



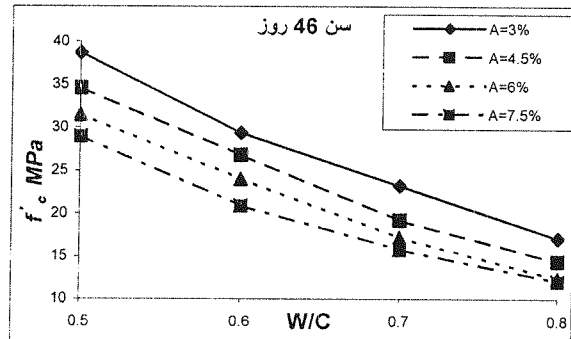
شکل (۳-الف): تأثیر درصد هوا بر مقاومت فشاری بتن بعد از ۴۵ سیکل



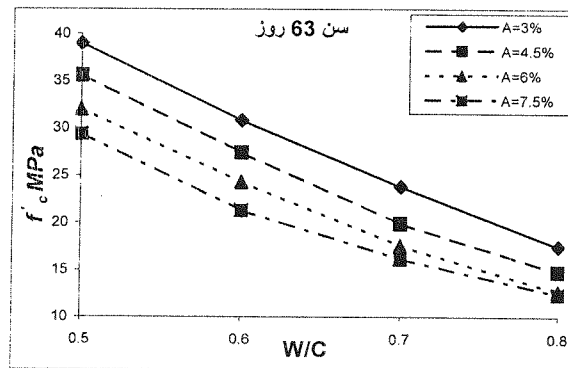
شکل (۱-ج): تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن بعد از ۱۵۰ سیکل



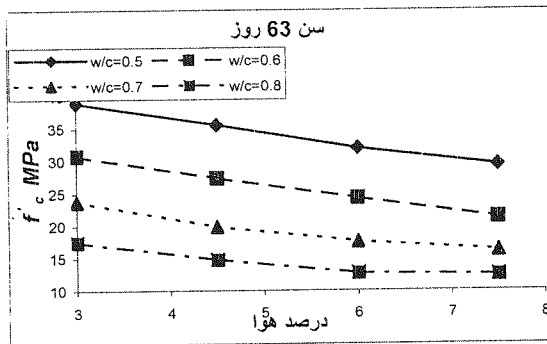
شکل (۲-الف): تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن شاهد در سن ۲۸ روزه



شکل (۲-ب): تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن شاهد در سن ۴۶ روزه



شکل (۲-ج): تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن شاهد در سن ۶۳ روزه



شکل (ج-۴): تاثیر درصد هوا بر مقاومت فشاری بتن شاهد در سن ۶۳ روزه

۵-۴- تخمین مقاومت فشاری بتن معمولی در حین یخبندان

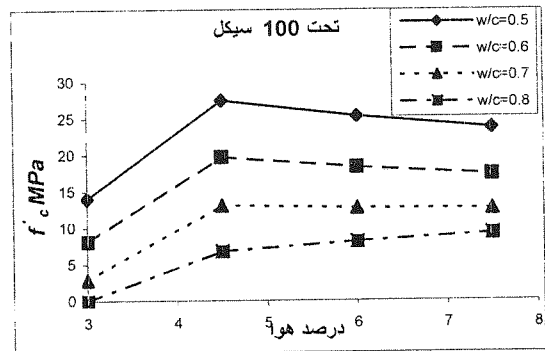
از مهم‌ترین عوامل موثر در شکل‌گیری مقاومت فشاری بتن در حین یخبندان می‌توان به سه عامل نسبت آب به سیمان، درصد هوای موجود در بتن تازه و تعداد سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن متوالی اشاره نمود. حال به منظور بررسی اثر توأم عوامل فوق در شکل‌گیری این خاصیت مهم بتن، به ارزیابی هم‌زمان داده‌های مقاومت فشاری بتن (حاصل از آزمایش) و سه متغیر نسبت آب به سیمان، درصد هوای موجود در بتن تازه و تعداد سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن متوالی پرداخته و با برقراری رگرسیون چند متغیره^۱، مطابق فرمول (۱) رابطه‌ای ارائه می‌شود که می‌تواند مقاومت فشاری بتن را بر اساس سه متغیر تعیین‌کننده فوق، با دقتی مناسب تخمین بزند:

$$f'_c = \frac{15.97A^{0.98}}{\left(\frac{W}{C}\right)^{0.51} N^{0.10}}, R^2=0.93 \quad (1)$$

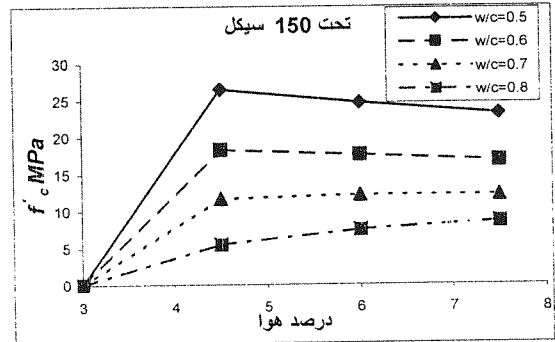
محدوده قابل قبول برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ تا ۰/۸، برای درصد هوای موجود در بتن تازه ۳ تا ۷/۵ درصد و تعداد سیکل‌های ذوب و انجماد ۰ تا ۱۵۰ سیکل است.

۶- درصد جذب آب بتن در معرض یخبندان

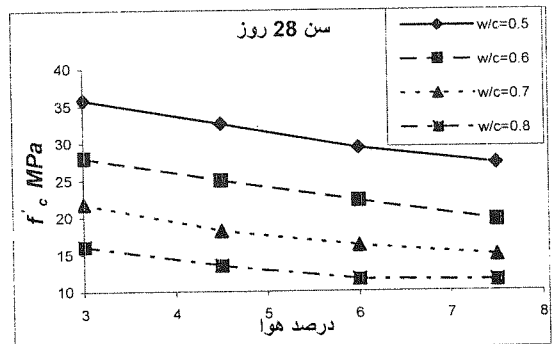
از دیگر پارامترهایی که می‌توان به وسیله آن دوام بتن در برابر یخبندان را بررسی کرد، درصد جذب آب نمونه‌های بتنی بعد از سیکل‌های متناوب ذوب و انجماد است [۱۲]. در تحقیق حاضر میزان جذب آب نمونه‌های بتنی بعد از اتمام سیکل‌های یخبندان اندازه‌گیری شدند و با میزان جذب آب بتن شاهد مقایسه شدند. جدول (۵) نتایج آزمایش درصد جذب آب نمونه‌های بتنی (Ab) حاصل از میانگین سه آزمایش را بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل یخ‌زدن و آب شدن متوالی نشان داده و با میزان جذب آب بتن شاهد مقایسه می‌کند.



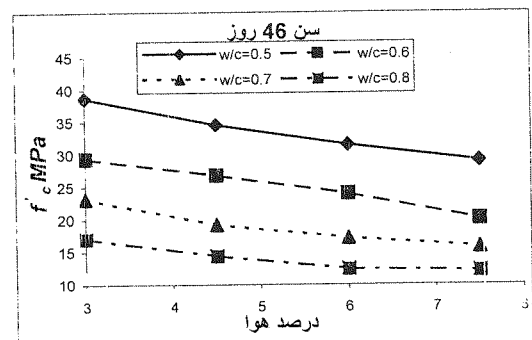
شکل (ب-۳): تاثیر درصد هوا بر مقاومت فشاری بتن شاهد بعد از ۱۰۰ سیکل



شکل (ج-۳): تاثیر درصد هوا بر مقاومت فشاری بتن شاهد بعد از ۱۵۰ سیکل



شکل (الف-۴): تاثیر درصد هوا بر مقاومت فشاری بتن شاهد در سن ۲۸ روزه



شکل (ب-۴): تاثیر درصد هوا بر مقاومت فشاری بتن شاهد در سن ۴۶ روزه

جدول (۵): درصد جذب آب در نمونه‌های بتن معمولی تحت سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن متوالی و نمونه‌های بتن شاهد

Ab (%)	Ab, 150 cycles (%)	Ab, 100 cycles (%)	Ab, 45 cycles (%)	A (%)	W/C	شماره مخلوط
۷/۱۸	۱۱/۶۵	۷/۶۲	۷/۲۸	۲	۰/۵	N1
۶/۶۶	۸/۲۱	۶/۷۸	۶/۸۲	۴/۵		N2
۵/۸۴	۶/۹۹	۶/۳۳	۶/۰۱	۶		N3
۵/۲۸	۶/۵۱	۶/۱	۵/۴۴	۷/۵		N4
۷/۵۵	۲۰/۴۲	۱۱/۳۱	۷/۸۱	۳	۰/۶	N5
۶/۹۳	۹/۳۱	۷/۸۵	۷/۱۵	۴/۵		N6
۶/۸	۷/۶۶	۷/۳۲	۷/۰۵	۶		N7
۶/۰۴	۶/۹۵	۶/۴۱	۶/۱۲	۷/۵		N8
۸/۰۶	۲۳/۰۱	۱۱/۲۱	۸/۳۱	۳	۰/۷	N9
۷/۳۲	۱۱/۲۵	۸/۳۳	۷/۴۱	۴/۵		N10
۷/۱۴	۹/۸۱	۷/۹۵	۷/۳۱	۶		N11
۶/۵	۷/۴۲	۷/۱	۶/۸۴	۷/۵		N12
۸/۵۳	---	۲۰/۳۷	۸/۷۲	۲	۰/۸	N13
۷/۴۸	۱۴/۳۶	۹/۳۹	۷/۷۵	۴/۵		N14
۷/۳۲	۱۳/۹۲	۸/۱۷	۷/۶۶	۶		N15
۷/۰۲	۷/۹۹	۷/۸۷	۷/۲۸	۷/۵		N16

با تنظیم اشکال (۵-الف تا ج) اثر نسبت آب به سیمان را بر جذب آب نمونه‌های بتنی در حین یخبندان بررسی کردیم. شکل‌های (۵-الف، ب و ج) به ترتیب نشان دهنده میزان جذب آب نمونه‌های بتنی در مقابل نسبت‌های آب به سیمان بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل یخ‌زدن و آب شدن است. شکل‌های مذکور نشان می‌دهند که در بتن معمولی بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل یخ‌زدن و آب شدن متوالی و به ازای چهار درصد هوای جذب آب (بیشترین دوام) را در بتن ایجاد کرده است؛ بدین ترتیب در اینجا نیز می‌توان به اهمیت نسبت آب به سیمان بر افزایش دوام بتن در برابر سیکل‌های متناوب یخ‌زدن و آب شدن پی‌برد.

۶-۱- تأثیر تعداد سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن متناوب بر جذب آب بتن در معرض یخبندان

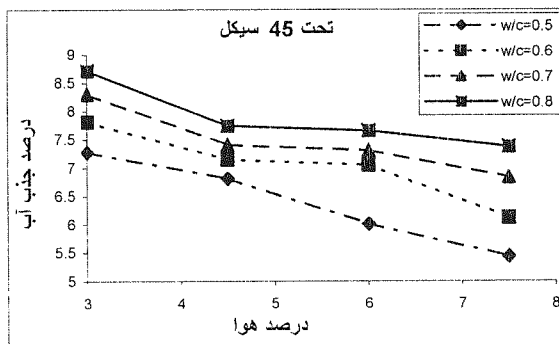
جدول (۶) جذب آب متوسط نمونه‌های بتنی (متوسط، به ازای چهار درصد متفاوت هوای بتن تازه) ساخته شده با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل متناوب یخ‌زدن و آب شدن را ارائه می‌کند. جدول مذکور نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن متوالی، میزان جذب آب بتن یا به عبارت دیگر تخریب آن افزایش می‌یابد.

۶-۲- تأثیر نسبت آب به سیمان بر جذب آب نمونه‌های بتنی در معرض یخبندان

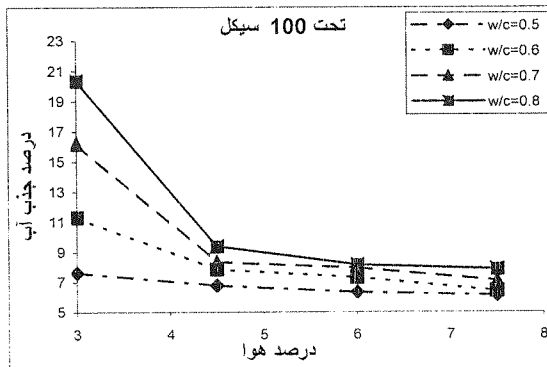
جدول (۶): تأثیر تعداد سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن متناوب بر جذب آب بتن معمولی در حین یخبندان

۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۵	W/C
۱/۴۵	۱/۳۲	۱/۱۷	۱/۰۵	$\overline{Ab}_{100 \text{ cycles}} / \overline{Ab}_{45 \text{ cycles}}$
---	۱/۷۲	۱/۵۸	۱/۵۰	$\overline{Ab}_{150 \text{ cycles}} / \overline{Ab}_{45 \text{ cycles}}$
---	۱/۳۰	۱/۳۵	۱/۴۲	$\overline{Ab}_{150 \text{ cycles}} / \overline{Ab}_{100 \text{ cycles}}$

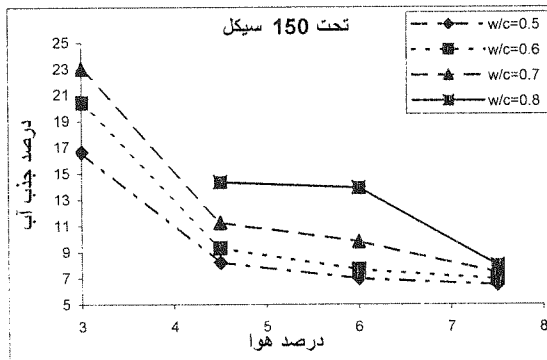
دیده می‌شود، به ازای حداقل ۴/۵ درصد هوا در بتن تازه (بتن هوادار) و به خصوص برای نسبت‌های آب به سیمان پایین، درصد جذب آب نمونه‌ها بسیار کم شده است. این در حالی است که به ازای ۳ درصد هوا در بتن تازه (که همان میزان هوای اتفاقی موجود در بتن بدون مواد هوازا است)، درصد جذب آب نمونه‌ها بسیار چشمگیر می‌باشد. برای مقایسه، شکل (۷) اثر میزان هوا را در کاهش جذب آب بتن شاهد نمایش می‌دهد. شکل (۸) نیز اثر نسبت آب به سیمان را بر میزان جذب آب بتن شاهد ارائه می‌دهد.



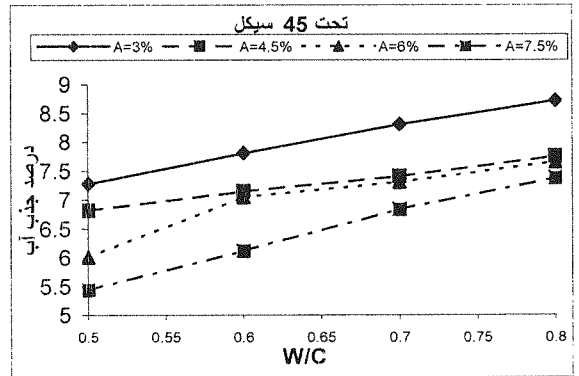
شکل (۶-الف): تاثیر درصد هوا بر میزان جذب آب بعد از ۴۵ سیکل



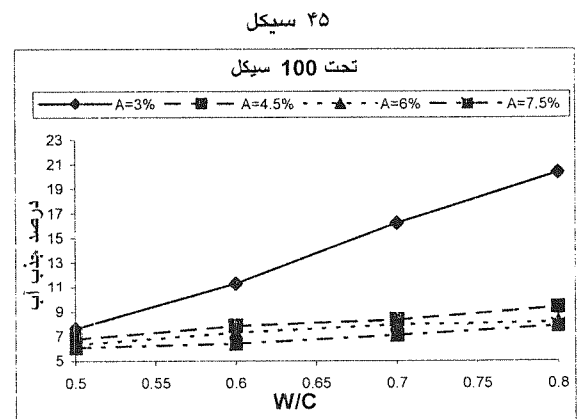
شکل (۶-ب): تاثیر درصد هوا بر میزان جذب آب بعد از ۱۰۰ سیکل



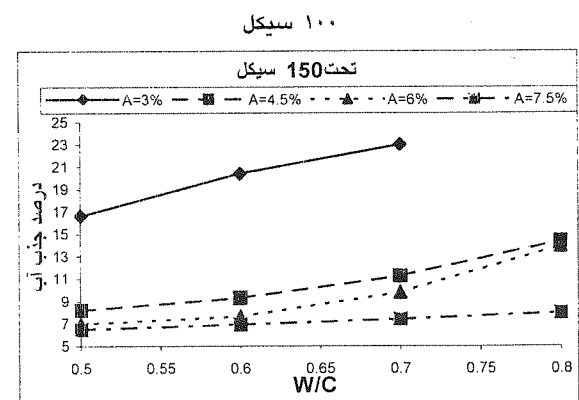
شکل (۶-ج): تاثیر درصد هوا بر میزان جذب آب بعد از ۱۵۰ سیکل



شکل (۵-الف): تاثیر نسبت آب به سیمان بر میزان جذب آب بعد از



شکل (۵-ب): تاثیر نسبت آب به سیمان بر میزان جذب آب بعد از



شکل (۵-ج): تاثیر نسبت آب به سیمان بر میزان جذب آب بعد از

۳-۶- تأثیر درصد هوای بتن بر میزان جذب آب

نمونه‌های بتنی در معرض یخبندان

با تنظیم اشکال (۶-الف تا ج) اثر درصد هوای بتن تازه را بر میزان جذب آب نمونه‌های بتنی در حین یخبندان بررسی کردیم. شکل‌های (۶-الف، ب و ج) به ترتیب نشان دهنده میزان جذب آب نمونه‌های بتنی در مقابل درصد هوای بتن تازه بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل یخ‌زدن و آب شدن است. در اشکال فوق

درصد کاهش وزن نمونه‌های بتنی حاصل از میانگین سه آزمایش را بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل یخ‌زدن و آب شدن متوالی نشان می‌دهد. در این جدول، درصد تغییر طول، نسبت به طول اولیه و میزان کاهش وزن نسبت به وزن اولیه نمونه بتنی محاسبه شده است. جدول مذکور نشان می‌دهد که با افزایش نسبت آب به سیمان و با کاهش میزان هوای موجود در بتن، میزان کاهش طول و کاهش وزن یا به عبارت دیگر میزان تخریب افزایش می‌یابد. شکل‌های (۹) و (۱۰) نیز همین موضوع را ثابت می‌کنند. شکل (۹) کاهش اثر نسبت آب به سیمان را در افزایش دوام بتن بدون مواد هوازا، بعد از ۱۵۰ سیکل متوالی نشان می‌دهد. در شکل مورد نظر، نسبت آب به سیمان از ۰/۵ تا ۰/۸ به ترتیب ۰/۸، ۰/۷، ۰/۶ و ۰/۵ است. شکل (۱۰) نیز تاثیر میزان هوای موجود در بتن را در افزایش دوام آن در برابر یخبندان بعد از ۱۰۰ سیکل متوالی برای نسبت آب به سیمان ۰/۸ نشان می‌دهد.

۷-۱- تخمین میزان تغییر طول و کاهش وزن نمونه‌های

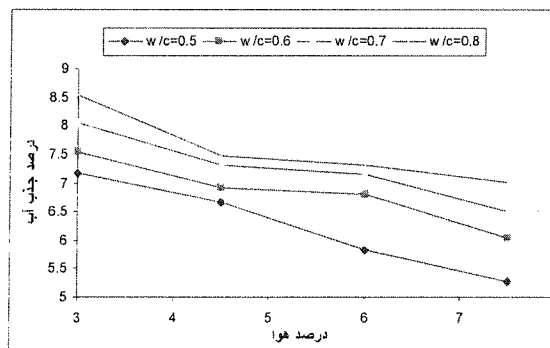
بتنی در معرض یخبندان

در این تحقیق به ارزیابی همزمان داده‌های کاهش طول بتن در حین یخبندان و سه متغیر تعداد سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن متوالی، نسبت آب به سیمان و درصد هوای موجود در بتن تازه پرداخته شد. سپس با برقراری رگرسیون چند متغیره، مطابق فرمول (۳) رابطه‌ای ارائه شد. این رابطه قادر است، تغییر طول بتن در حین یخبندان را بر اساس سه پارامتر تعیین کننده فوق، با دقتی بسیار مناسب تخمین بزند.

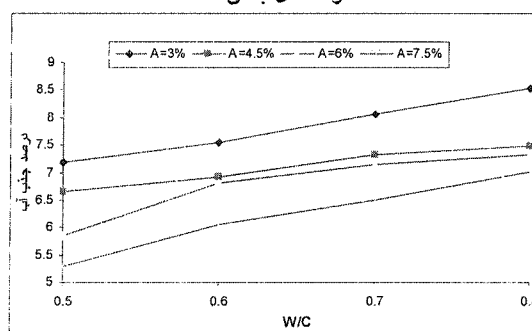
$$\Delta L / L = \frac{501.69N^{0.81} \left(\frac{W}{C}\right)^{4.29}}{A^{4.43}} - 0.15, R^2=0.94 \quad (3)$$

همچنین با برقراری رگرسیون چند متغیره، مطابق فرمول (۴) رابطه‌ای برای تخمین میزان کاهش وزن بتن ارائه شد. محدوده قابل قبول برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ تا ۰/۸، برای درصد هوای موجود در بتن تازه ۲ تا ۷/۵ درصد و تعداد سیکل‌های ذوب و انجماد ۰ تا ۱۵۰ سیکل است.

$$\Delta M / M = \frac{818.08N^{0.60} \left(\frac{W}{C}\right)^{3.44}}{A^{3.64}} - 0.9, R^2=0.94 \quad (4)$$



شکل (۷): تاثیر میزان هوای موجود در بتن تازه بر میزان جذب آب نمونه‌های بتنی شاهد



شکل (۸): تاثیر نسبت آب به سیمان بر میزان جذب آب نمونه‌های بتنی شاهد

۶-۴- تخمین میزان جذب آب نمونه‌های بتنی در حین یخبندان

در این تحقیق به ارزیابی همزمان داده‌های میزان جذب آب بتن (حاصل از آزمایش) و سه متغیر نسبت آب به سیمان، درصد هوای موجود در بتن تازه و تعداد سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن متوالی پرداخته و با برقراری رگرسیون چند متغیره، مطابق فرمول (۲) رابطه‌ای ارائه می‌شود که می‌تواند میزان جذب آب بتن را بر اساس سه متغیر تعیین کننده فوق، با دقتی مناسب تخمین بزند.

$$Ab = \frac{6.89N^{0.38} \left(\frac{W}{C}\right)^{0.91}}{A^{0.74}} + 1, R^2=0.80 \quad (2)$$

محدوده قابل قبول برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ تا ۰/۸، برای درصد هوای موجود در بتن تازه ۲ تا ۷/۵ درصد و تعداد سیکل‌های ذوب و انجماد ۰ تا ۱۵۰ سیکل است می‌باشد.

۷- تغییر طول و کاهش وزن نمونه‌های بتنی در معرض یخبندان

درصد تغییر طول و میزان کاهش وزن نمونه‌های بتنی در حین یخبندان از دیگر پارامترهایی است که نشان دهنده میزان دوام بتن در برابر سیکل‌های متناوب یخ‌زدن و آب شدن می‌باشد [۱۲]. جدول (۷) نتایج آزمایش درصد تغییر طول و

جدول (۷): درصد تغییر طول و کاهش وزن تحت سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن متوالی

$\Delta M/M$ 150 cycles (%)	$\Delta M/M$ 100 cycles (%)	$\Delta M/M$ 45 cycles (%)	$\Delta L/L$ 150 cycles (%)	$\Delta L/L$ 100 cycles (%)	$\Delta L/L$ 45 cycles (%)	A (%)	W/C
۷۶/۰۵	۴۲/۱۱	۱۹/۰۷	۳۷/۹	۱۱/۶۸	۶/۸۱	۳	۰/۱۵
۲/۴۷	۲/۰۹	۰/۹۶	۰/۱۸۳	۰/۷۰	۰/۳۲	۴/۵	
۱/۰۸	-۰/۷۲	.	۰/۳۶	۰/۳۴	.	۶	
.	۷/۵	
۸۹/۴۱	۵۱/۳۵	۲۰/۳۴	۵۲/۷	۲۱/۳۵	۷/۳	۳	۰/۱۶
۸/۳۱	۵/۱۱	۴/۰	۲/۱۸۵	۱/۷۵	۱/۳۵	۴/۵	
۲/۷۶	۱/۶۷	۱/۲۰	۰/۱۹۳	۰/۵۶	۰/۴	۶	
۰/۶۳	۰/۵۴	.	۰/۲۱	۰/۱۸	.	۷/۵	
۹۵/۱۸	۶۴/۶۲	۲۴/۱۴	۶۳/۶	۲۹/۲۷	۸/۸	۳	۰/۱۷
۱۷/۵۵	۱۲/۸۲	۹/۳۸	۶/۲۳	۴/۴۷	۳/۲۳	۴/۵	
۶/۱۷	۵/۵۶	۳/۵۶	۲/۱۰	۱/۸۹	۱/۲	۶	
۱/۳۷	۰/۹۹	.	۰/۴۶	۰/۳۳	.	۷/۵	
۱۰۰	۸۱/۸۴	۳۰/۳۳	۱۰۰	۴۳/۳۸	۱۱/۳۵	۳	۰/۱۸
۳۵/۰۵	۲۷/۷۱	۱۹/۷۲	۱۳/۴	۱۰/۲۵	۷/۰۶	۴/۵	
۱۴/۹۶	۱۲/۵۵	۹/۳۸	۵/۲۶	۴/۳۷	۳/۲۳	۶	
۳/۸۸	۳/۵۶	۳/۲۶	۱/۳۱	۱/۲	۱/۱	۷/۵	

۸- نتایج

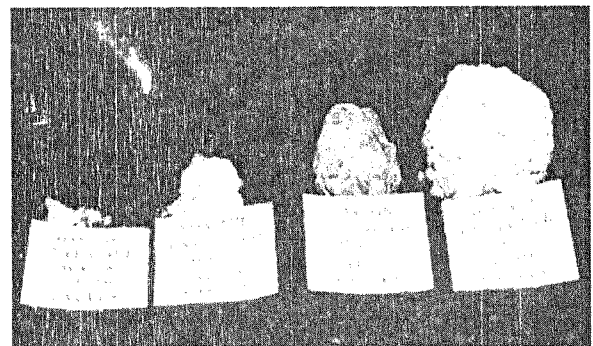
نتایج حاصل از تحقیق انجام شده را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد:

۱) همواره کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، مقاومت فشاری بتن در حین یخبندان را افزایش می‌دهد. همچنین کاهش نسبت آب به سیمان، میزان تخریب ظاهری (کاهش طول و کاهش وزن) و میزان تخریب درونی (جذب آب) بتن را در برابر سیکل‌های ذوب و انجماد کاهش می‌دهد.

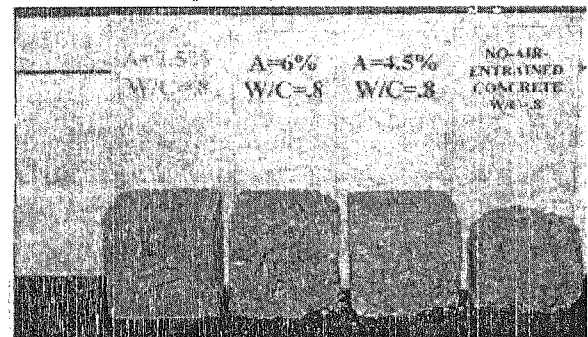
۲) حداکثر مقاومت فشاری برای بتن معمولی بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل یخ‌زدن و آب شدن، در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵ تا ۰/۷، به ازای ۴/۵٪ هوای موجود در بتن و در نسبت آب به سیمان ۰/۸، بازای ۷/۵٪ هوای موجود در بتن حاصل شد.

۳) عموماً ایجاد هوا در بتن تا ۷/۵ درصد، به افزایش مقاومت فشاری بتن در حین یخبندان نسبت به حالتی که در مخلوط بتن ماده‌ی هوازا وجود نداشته باشد، منجر می‌شود.

۴) کمترین میزان کاهش طول، کاهش وزن و جذب آب در بتن معمولی بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل یخ‌زدن و آب شدن، به‌ازاء ۷/۵ درصد هوای موجود در بتن حاصل شد.



شکل (۹): اثر کاهش نسبت آب به سیمان در افزایش دوام بتن بدون مواد هوازا بعد از ۱۵۰ سیکل



شکل (۱۰): تاثیر میزان هوای موجود در بتن بر افزایش دوام آن بعد از ۱۵۰ سیکل، برای نسبت آب به سیمان ۰/۸

American Society for Testing and Materials, "Standard Specification for Portland Cement," ASTM C150-97, ASTM Standard for Concrete and Mineral Aggregate, V. 04.02, Standard Designation, C150-97, November, 1997.

American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing," ASTM C666-92, ASTM Standard for Concrete and Mineral Aggregate, V. 04. 02, Standard Designation, C666-92, November, 1992.

American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete," ASTM C143-90, ASTM Standard for Concrete and Mineral Aggregate, V. 04.02, Standard Designation, C143-90, November, 1997.

Bowser, J. D., Krause, G., and Tadros, K., "Freeze-Thaw Durability of High-Performance Concrete Masonary Units." ACI Materials Journal, V. 93, No. 4, July-August, pp.387-415, 1996.

Hooton, R. D., "Influence of Silica Fume Replacment of Cement on Physical Properties and Resistance to Sulphate Attack, Freezing and Thawing and Alkali-Silica Reactivity," ACI Materials Journal, V. 90, No. 2, March-April, pp.143-151, 1993.

Malhotra, V. M., "Role of Silica Fume in Enhancing the Durability of Concrete-A Review," International Conference on Engineering Material, V. 1, pp. 677-689, Ottawa, Canada, June 8-11, 1997.

Marzouk, H. and Jiang, D., "Effects of Freezing and Thawing on The Tension Properties of High-Strength Concrete," ACI Materials Journal, V. 91, No. 6, November-December, pp. 557-586, 1994.

Neville, A. M., and Brooks, J. J., "Concrete Technology," London, 1990.

Neville, A. M., "Properties of Concrete," Pitman, London, 1982.

Zia, P., Ahmad, S., and Leming, M., "High Performance Concrete," USA, 1994.

(۵) برای بتن معمولی همواره کاهش نسبت آب به سیمان، ر به کم شدن میزان کاهش طول، کاهش وزن و جذب آب و در نتیجه افزایش دوام بتن در حین یخبندان منجر شده است.

[۶]

(۶) ایجاد هوا در بتن، کاهش تخریب بتن را در حین یخبندان نسبت به حالتی که در مخلوط بتن هوا وجود نداشته باشد به دنبال خواهد داشت.

[۷]

(۷) به منظور پیش بینی مقاومت فشاری بتن معمولی، میزان میزان جذب، کاهش طول و کاهش وزن بتن ساخته شده با

[۸]

نسبت آب به سیمان در محدوده ۰/۵ تا ۰/۸ و میزان هوای ۳ تا ۷/۵ درصد، هنگامی که بتن فوق در معرض سیکل‌های متناوب یخ‌زدن و آب شدن قرار می‌گیرد، می‌توان به ترتیب از روابط (۱)، (۲)، (۳) و (۴) که بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر حاصل شده است، استفاده کرد.

[۹]

۹- مراجع

- [۱] [۱۰] رمضانپور، علی‌اکبر و پیدایش، منصور؛ دوام بتن و نقش سیمان‌های پوزولانی. انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، چاپ اول، ۱۳۷۶.
- [۲] [۱۱] ACI Committee 201, "Guide to Durable Concrete," (ACI 201.2R-92), ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, 2000.
- [۳] [۱۲] ACI Committee 211, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy Weight, and Mass Concrete," (ACI 211.1-91), ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, 2000.
- [۴] [۱۳] ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete," (ACI 363 R-84), ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, 2000.
- [۵] [۱۴] American Society for Testing and Materials, "Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method," ASTM C231-97, ASTM Standard for Concrete and Mineral Aggregate, V. 04.02, Standard Designation, C231-97, November, 1997.
- [۱۵]

زیر نویس‌ها

^۱Freeze-Thaw Cycles

^۲Durability

^۳Limestone

^۴Compressive Strength

^۵Length Change

^۶Weight Change

^۷Absorption

^۸Air Content

^۹Neville

^{۱۰} Multiple Regression

