بررسی اثر درشت دانه، نسبت آب به مواد سیمانی و میکروسیلیس بر یخ‌زدگی بتن با مقاومت زیاد

داود مستوفی‌نژاد[*] و سید مهدی حسینیان [**]

دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا همدان

(دریافت مقاله: ۸۳/۱۰/۲- دریافت نسخه نهایی: ۸۵/۱/۲۹)

چکیده – **مشخصات اجزای بتن بر خصوصیات دوام بتن با مقاومت بالا و یا با عملکرد بالا در مقابل یخبندان تاثیر به‌سزایی خواهند گذاشت. بدون شک تشخیص دقیق این ارتباط، به انتخاب صحیح نوع و درصد اجزای بتن در هر پروژهٔ مشخص منجر خواهد شد. هدف از این تحقیق، بررسی امکان دستیابی به مدلهای تجربی- ریاضی برای تبیین اثرات یخ‌زدگی بر بتن با مقاومت بالاست. در این راستا نقش مقاومت فشاری دو نوع درشت دانه (آهکی و کوارتزیتی)، مقادیر مختلف میکروسیلیس جایگزینی (۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد)، و نسبت آب به مواد سیمانی (۰/۲۵،۰/۳۰ و ۰/۴) در کنار تعداد سیکلهای ذوب و انجماد برروی دوام بتن با مقاومت بالا در برابر یخبندان مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع ۴۳۲ نمونهٔ بتن با مقاومت بالا ساخته و تحت آزمایش ذوب و انجماد بر اساس استاندارد ASTM C666B قرار گرفتند. در نهایت با رگرسیون در اطلاعات تجربی، روابطی برای سنجش دوام بتن با مقاومت بالا در برابر یخبندان ارائه شد.**

واژگان کلیدی : دوام بتن در برابر ذوب و انجماد، نسبت آب به مواد سیمانی ، میکروسیلیس، درشت دانه، مقاومت فشاری، تغییر طول، تغییر حجم، جذب آب.

An Investigation of Coarse Aggregate, Water-Cement Ratio, and Silika Fume on Frost Resistance of HS Concrete

D. Mostofinejad and M. Hoseinian

Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology
Department of Civil Engineering, Hamedan Buali Sina University

Abstract: ***It is well known that the characteristics of concrete components greatly affect the durability of high strength/high performance (HS/HP) concrete against frost action. Undoubtedly, precise recognition of this relationship leads***

* – دانشیار ** – مربی

to appropriate selection of the type and proportions of concrete components in any particular project. In the current study, the aim is to investigate the possibility of developing some mathematical-experimental models to explain the frost resistance of high-performance concrete, regarding the role of some of its main components. To do so, the effects of four key elements, i.e. water, silica fume, coarse aggregate, and number of freeze-thawing cycles, were studied on the frost resistance of HS/HP concrete were studied. 24 concrete mix designs including 3 ratios of water to cementitious materials, i. e. 0.4, 0.3, and 0.25; 4 ratios of silica fume to cementitious materials, i.e. 0, 5, 10, and 15 percent; and 2 types of coarse aggregates, i. e. Limestone and Quartzite were utilized for HS/HP concrete. Overall, about 432 concrete cubes were cast, cured and tested under freeeze-thaw cycles. Finally, some models were proposed for describing the frost resistance of high strength concrete.

Keywords: ***Freeze–thaw durability, Compressive strength, Water-cement ratio, Length change, Weight change, Absorption, Silica fume.***

فهرست علائم

$\overline{Ab.}$	متوسط میزان جذب آب نمونه‌های بتنی	$f_{a,Q}$	مقاومت فشاری سنگ کوارتزیتی
$Ab.$	میزان جذب آب نمونه‌های بتنی	$f'_{c_{63}}$	مقاومت ۶۳ روزه
$Er_{f'c}$	میزان خطای مقاومت فشاری تخمینی	$\overline{f'_c}$	متوسط مقاومت فشاری
$Er_{\Delta L/L}$	میزان خطای درصد تغییر طول تخمینی	N	تعداد سیکلهای ذوب و انجماد
Er_{Ab}	میزان خطای درصد جذب آب تخمینی	R^2	ضریب همبستگی
$Er_{\Delta M/M}$	میزان خطای درصد کاهش وزن تخمینی	SF	درصد میکروسیلیس جایگزینی سیمان
f_a	مقاومت فشاری درشت دانه	$w_{SSD,Q}$	میزان جذب آب حالت اشباع با سطح خشک
$f_{a,L}$	مقاومت فشاری سنگ آهکی	W/C	نسبت آب به مواد سیمانی
f'_c	مقاومت فشاری بتن	$\Delta L/L$	میزان تغییر طول
$f'_{c_{28}}$	مقاومت ۲۸ روزه	$\Delta M/M$	میزان تغییر وزن
$f'_{c_{80}}$	مقاومت ۸۰ روزه	SF/C	درصد وزنی میکروسیلیس جایگزینی سیمان

۱- مقدمه

امروزه خرابیهای بتن نظر اکثر کارشناسان بتن را به خود معطوف داشته‌است. هزینهٔ مرمت پاره‌ای از این خرابیها حتی بالاتر از هزینه ساخت سازه براورد شده است؛ لذا عمر مفید بتن در زمان طرح و ساخت سازه باید بررسی و مورد تضمین قرارگیرد.

یخ زدن و آب شدن‌های متوالی یکی از دلایل عمدهٔ خرابیهای بتن است. این نوع خرابی در مناطق سردسیر ایران به‌خصوص در مناطق غربی و شمال غربی بسیار رایج است. در این رابطه به منظور اعمال ضوابط فنی و رعایت اصول طراحی دوام سازه‌های بتنی، نیاز مبرمی به مدلهای ساده و کارا احساس می‌شود. از آنجایی که ابداع چنین روشهایی به تازگی مورد توجه قرار گرفته‌اند، در این مقاله سعی می‌شود تاثیر یخ زدن و آب شدن متناوب بر بتن با مقاومت بالا، مورد بررسی و مدلسازی قرارگیرد.

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. خسارات ناشی از یخ زدگی بتن را می‌توان از چند طریق بررسی کرد که متداولترین روش، اندازه‌گیری تغییرات مدول الاستیسیتهٔ دینامیکی نمونه است. این مدول نمایانگر تغییرات تقریبا خالص الاستیک در بتن است و تحت تاثیر

خزش واقع نمی‌شود. کاهش در این مدول پس از تعداد سیکلهای یخ زدن وآب شدن، نمایانگر صدمه دیدن بتن می‌باشد. با این روش می‌توان قبل از اینکه خسارات وارد بر بتن با چشم و یا هر روش دیگر مشاهده شود، به وجود آن پی‌برد [۱]. با این وجود به‌جز اندازه‌گیری تغییرات مدول الاستیسیتهٔ دینامیکی، روشهای دیگری نیز برای سنجش خرابی بتن در اثر یخ‌زدگی، از جمله اندازه‌گیری تغییر در وزن و حجم توسط محققان به‌کار گرفته می‌شود [۱].

تا کنون اطلاعات کم (و حتی متضاد) در خصوص یخ زدن و آب شدن بتن‌های با مقاومت بالا ارائه شده است. فیلئو در سال ۱۹۸٦ نتایج عالی برای دوام بتن‌های با مقاومت بالا با نسبت آب به سیمان ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ با یا بدون حباب هوا منتشر کرده است. او نتایج به‌دست آمده را ناشی از کاهش شدید آب قابل یخ زدن و همچنین بالا بودن مقاومت کششی در بتن‌های با مقاومت بالا دانسته است. در حالی‌که وایتینگ در سال ۱۹۸۷ نتایج معکوسی در خصوص ضعف بتن‌های با مقاومت بالا در مقابل سیکلهای متناوب یخ زدن و آب شدن منتشر کرده است [۲].

در همین راستا بورگ و اوست در سال ۱۹۹۲، دوام پنج بتن با مقاومت بالای بدون هوا را در برابر یخبندان بررسی کردند. نسبت آب به مواد سیمانی بین ۰/۲۲ تا ۰/۲۹ در نظرگرفته شده بود و مقاومت ۲۸ روزهٔ نمونه‌های استوانه ای ۳۰۰ × ۱۵۰ میلی‌متر و عمل آوری شده در رطوبت، بین ۸۰ تا ۱۲۱ MPa متغیر بود. میزان میکروسیلیس مصرفی دارای بازه‌ای در محدودهٔ ۰ تا ۱٦ درصد بود. در بین این پنج بتن، تنها بتن با مقاومت بالاتر، نسبت آب به سیمان کمتر و دارای بیشترین مقدار میکروسیلیس، بدون هیچ گونه تخریب، ۱٤۰۰ سیکل را تحمل کرد. این در حالی بود که چهار بتن دیگر در اثر سیکلهای ذوب و انجماد تخریب شدند [۳].

در سال ۱۹۹۱، گالییوتا و همکاران دوام بتن میکروسیلیسی را در برابر یخبندان بررسی کردند. میزان میکروسیلیس مورد استفاده ۲۰ درصد بود. آنها به این نتیجه رسیدند که بتن‌های میکروسیلیسی با و بدون هوا دوام کمی‌در برابر یخبندان از خود نشان می‌دهند. در نمونه‌های بتنی این محققان بعد از ۱۰۰ سیکل، در بتن بدون هوا ۸۰٪ و در بتن هوادار ٤۰٪ فاکتور دوام کاهش یافت. بعد از ۲۵۰ سیکل ذوب و انجماد، بتن بدون هوا و بدون میکروسیلیس به فاکتور دوام ٦۰٪ رسید، در حالی‌که نمونه‌های بدون میکروسیلیس و هوادار هیچگونه تخریبی نداشتند. آنها علت را این‌طور بیان داشتند که به دلیل مصرف زیاد میکروسیلیس، فاصلهٔ حباب‌های هوا افزایش یافته که این امر باعث کاهش دوام بتن میکروسیلیسی شده است. میزان هوای بتن تازه در بتن هوادار برابر با ۵٪ در نظر گرفته شده بود [۳].

در سال ۱۹۹۲ اثر مراقبت از بتن در آب اشباع به مدت ۷، ۱٤، ۲۱ و ٥٦ روز و قبل از وقوع یخبندان، بر دوام بتن در مقابل سیکلهای یخ‌زدن و آب شدن توسط کوهن و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. بتن مورد استفاده، بتن بدون هوای با مقاومت بالا با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ بود.آنها در تحقیقات خود به نتایج زیر رسیدند [۴]:

۱- تحت سیکلهای یخبندان، رفتار بتن معمولی با بتن حاوی میکروسیلیس متفاوت است. این تحقیقات نشان می‌دهند که میکروسیلیس مقاومت در مقابل یخ‌زدن بتن را بهبود می‌بخشد.
۲- به عقیدهٔ آنها به نظر نمی‌رسد که میکروسیلیس دوام ذاتی بتن در برابر یخبندان را بهبود نبخشد.
۳- به نظر نمی‌رسد که افزایش مراقبت از بتن معمولی و میکروسیلیسی هوادار از ۷ روز به ۱٤،۲۱ و ٥٦ روز، اثری بر دوام بتن در برابر یخبندان داشته باشد.
٤- به عقیدهٔ آنها استفاده از استاندارد ASTM C666 برای تعیین دوام بتن حاوی میکروسیلیس در برابر یخبندان، روش مناسبی است.

تحقیقات دیگری توسط هوتون در سال ۱۹۹۳ برای بررسی اثر ۰ تا ۲۰ درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان بر دوام بتن در مقابل سیکلهای یخ زدن و آب شدن، حمله سولفاتها، واکنش قلیایی سنگدانه‌ها و خواص مکانیکی [۵]،

توسط مرزوک و جیانگ در سال ۱۹۹٤ در مورد اثر سیکلهای یخ زدن وآب شدن بر روی خواص بتن با مقاومت بالا [۶]، و توسط باوزر و همکاران در سال ۱۹۹٦ در مورد اثر سنگدانه‌ها بر دوام بتن حاوی میکروسیلیس در برابر یخبندان انجام گرفت [۷]. نتایج تحقیقات آنها به این قرار است. در تحقیقات هوتون افزایش ۱۰ درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان، برای مقاومت در برابر یخزدن و آب شدن کافی تشخیص داده شد [۵]. مرزوک و جیانگ به این نتیجه رسیدند که مدول الاستیسیتهٔ دینامیکی نسبی بتن با مقاومت بالا بعد از سیکلهای یخ زدن وآب شدن، بیشتر از مدول الاستیسیتهٔ دینامیکی در بتن معمولی است [۶] و باوزر و همکاران به این نتیجه رسیدند که در بتن با سنگدانه‌های معمولی با افزایش درصد مواد سیمانی، دوام در برابر یخبندان کاهش یافت. اما در بتن دارای سنگدانه‌های سبک، عکس این عمل اتفاق افتاد. به عبارت دیگر با افزودن میکروسیلیس، دوام بتن در برابر یخبندان افزایش یافت.

همچنین در سال ۱۹۹۷ در مرکز تکنولوژی بتن پیشرفتهٔ کانادا، تحقیقاتی در زمینهٔ تاثیر میکروسیلیس بر دوام بتن توسط مالهوترا انجام گرفت. بتن مورد استفاده، بتن هوادار شامل ۰ تا ۳۰ درصد وزنی میکروسیلیس جایگزین سیمان با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/٤ بود. نتایج آزمایشها به این شرح است که استفاده از میکروسیلیس باعث بهبود دوام بتن در برابر سیکلهای متناوب یخ زدن و آب شدن می‌شود؛ مگر بتن‌هایی که شامل ۲۰ تا ۳۰ درصد میکروسیلیس‌اند. مالهوترا علت این امر را این‌طور بیان داشت که مقدار زیاد میکروسیلیس، باعث ایجاد یک ماتریس سیمان با چگالی زیاد می‌شود که ممکن است اثر معکوس بر روی توانایی تغییر شکل بتن در برابر فشار ناشی از انبساط آب یخ زده داشته باشد [۸].

۲- هدف

پارامترهای زیادی بر دوام بتن‌های معمولی و بتن با مقاومت بالا در مقابل یخبندان نقش دارند که برخی شناخته شده و برخی هنوز ناشناخته باقی مانده‌اند؛ پاره‌ای تحت کنترل بوده و پاره‌ای دیگر خارج از کنترل هستند. از جمله عوامل شناخته شده و تحت کنترل، می‌توان به مواردی از قبیل مقدار آب مصرفی، مقدار مواد سیمانی، نسبت آب به مواد سیمانی، مقدار میکروسیلیس جایگزینی، حجم درشت دانه بر حسب نسبتی از حجم کل بتن، بزرگترین بعد درشت دانه، بافت و شکل ظاهری درشت دانه، مدول الاستیسیتهٔ درشت دانه، روانی بتن، تراکم بتن، شرایط عمل آوری، عمر بتن، چگالی بتن، نوع سیمان، شکل و اندازهٔ نمونهٔ بتنی، درصد هوای محبوس در بتن، میزان حبابهای هوای ایجاد شده در بتن، تعداد سیکلهای یخزدن و آب شدن، سرعت یخبندان، میزان اشباع قبل از شروع یخبندان و ... اشاره کرد. هدف از این تحقیق، دستیابی به مدلهای تجربی- ریاضی برای تعیین اثرات یخزدگی بر بتن با مقاومت بالا، با لحاظ کردن بعضی از عوامل موثر بر دوام است. اثرات یخزدگی از سنجش افت مقاومت فشاری و نیز مشاهدات بر روی تغییر طول، وزن یا میزان جذب نمونه‌های بتنی بررسی می‌شود. بدین منظور با انجام آزمایش یخزدن و آب شدن برروی نمونه‌های مختلف، سعی می‌شود، ارتباط مناسب بین مشخصات ملات و درشت دانه، درصد هوا و دوام بتن با مقاومت بالا در برابر یخبندان، برقرار شود. دو جزء بتن‌های با مقاومت بالا (ملات و سنگدانه) را در یک تقسیم بندی دیگر، می‌توان بر اجزای اصلی درشت دانه، ریزدانه، سیمان، میکروسیلیس، آب و فوق روان کننده تقسیم کرد. از میان اجزای فوق به بررسی نقش مقاومت فشاری درشت دانه‌ها، مقادیر مختلف میکروسیلیس و آب در کنار تعداد سیکلهای یخبندان برروی دوام بتن‌های با مقاومت بالا در برابر یخبندان پرداخته شده است. این در حالی است که از نقش سایر مشخصات درشت دانه (درصد حجمی در بتن، دانه بندی، بزرگترین اندازهٔ دانه‌ها، شکل و بافت سطحی دانه‌ها و ...)، و نیز از نقش ریزدانه و فوق روان کننده، نوع سیمان، سرعت یخبندان و میزان اشباع نمونه‌ها، با ثابت نگه داشتن آنها صرف‌نظر شده است. براساس اطلاعات نگارندگان، اگرچه اثر برخی از عوامل سازندهٔ

بتن‌های با مقاومت بالا به‌صورت جداگانه توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است، اما تاکنون مطالعهٔ جامعی در زمینهٔ اثر هم‌زمان مقادیر مختلف چهار عنصر میکروسیلیس، درشت دانه، آب و تعداد سیکلهای یخ‌زدن و آب شدن بر دوام بتن با مقاومت بالا، در برابر یخبندان انجام نشده است. ارائهٔ مدلهای تجربی- ریاضی که مبین دوام بتن‌های با مقاومت بالا بر حسب مشخصات اجزای شاخص آن باشد، می‌تواند افق تازه‌ای در شناخت هر چه بهتر دوام چنین بتن‌هایی در برابر یخبندان بگشاید. با داشتن مدل ریاضی اثر متقابل بین میکروسیلیس، سنگدانه و نسبت آب به مواد سیمانی در کنار تعداد سیکلهای یخ‌زدن و آب شدن، می‌توان بتنی با مقاومت بالا و یا با عملکرد بالا ساخت که در برابر سیکلهای یخ‌زدن و آب شدن مقاوم باشد. نتایج حاصل برای استفاده در مناطق سردسیر دنیا به ویژه کشور عزیزمان ایران بسیار مناسب خواهند بود.

۳- مصالح مورد استفاده

مصالحی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند، عبارت‌اند از:

- سیمان پرتلند نوع I (منطبق بر استاندارد ASTMC-150 [۹])،
- میکروسیلیس با چگالی ۲/۲۱ و درصد خلوص بیش از ۹۹٪ (SiO_2>99%)،
- ریزدانهٔ آهکی، با مدول نرمی ۲/٤٦، چگالی ۲/٤۷۸، جذب آب ۱/٦٪ و رطوبت طبیعی ۰/۳٪،
- درشت دانهٔ شکستهٔ آهکی و کوارتزیتی[1] با حداکثر قطر ۹/۵ میلی‌متر. درشت دانه‌های آهکی و کوارتزیتی به ترتیب چگالی ۲/٦٤ و ۲/۸٤۹، و وزن مخصوص خشک و میله خوردهٔ ۱٤٦۰kg/m^3 و ۱۷۰۰ kg/m^3 داشتند. همچنین درصد جذب آب آنها برای درشت دانه‌های آهکی ۱/٦٪، و برای درشت دانه‌های کوارتزیتی ۰/٤٪ بود.
- فوق روان کنندهٔ ملامین فرمالدئید سولفانات[2]، به‌صورت محلول ٤۰٪ (٤۰٪ پودر فوق روان کننده خالص و ٦۰٪ آب)، و با چگالی ۱/۲٤۷.

٤- روش انجام تحقیق

در تحقیق حاضر برای بررسی اثر نسبت آب به مواد سیمانی بر دوام بتن در برابر یخبندان، از سه نسبت ۰/۳،۰/۲۵ و ۰/٤ استفاده شد. همچنین برای بررسی اثر میکروسیلیس جایگزینی، از چهار درصد ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵، و برای بررسی نوع سنگدانه از دو نمونه درشت دانه (آهکی و کوارتزیتی، با دانه بندی مشابه) در سه سیکل یخ‌زدن و ذوب شدن (٤۵ سیکل هم‌زمان با سن ۲۸ روزه بتن، ۱۵۰ سیکل و ۲۰۰ سیکل) و با سه تکرار برای هر آزمایش بهره گرفته شد. نمونه‌هایی که تحت اثر سیکلهای متناوب یخ‌زدن و آب شدن قرار می‌گرفتند، به مدت ۱٤ روز قبل از شروع آزمایش یخبندان درون حوضچه‌های آب به‌صورت مستغرق نگهداری شدند. آزمایش یخ‌زدن و آب شدن طبق ASTM C-666B روی نمونه‌ها انجام گرفت [۱۰]. 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 توسط نیروی انسانی و نیز به دلیل محدودیت زمان کاری آزمایشگاه، در هر شبانه روز تنها انجام سه سیکل ذوب و انجماد امکانپذیر بود؛ بدین ترتیب در زمانی که اعمال سیکلها متوقف بود (عمدتا در شب)، بنا به توصیهٔ استاندارد ASTM C-666، نمونه‌ها در حالت انجماد قرار گرفتند. پس از تکمیل سیکلهای متناوب یخ‌زدن و آب شدن مورد نظر، از افت مقاومت فشاری[3] بتن، درصد کاهش طول[4] و وزن[5] آن، و همچنین از میزان جذب آب[6] بتن به عنوان معیارهایی برای سنجش میزان دوام بتن در برابر یخبندان استفاده شد.

در جدولهای (۱) و (۲)، طرح اختلاط بتن با مقاومت بالا به‌صورت خلاصه ارائه شده است. به دلیل کثرت تعداد نمونه‌ها و محدودیت حجم دستگاهی که آزمایش یخ زدن و آب شدن با آن انجام می‌گرفت، تمام نمونه‌ها از نوع مکعبی به ابعاد ۷۰ میلی‌متر در نظر گرفته شدند.

جدول ۱- نسبتهای وزنی طرح اختلاط بتن با درشت دانهٔ آهکی

آب به مواد سیمانی	میکروسیلیس به مواد سیمانی	سیمان (kg/m^3)	میکروسیلیس (kg/m^3)	ریزدانه (kg/m^3)	درشت دانه (kg/m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)	آب (kg/m^3)
۰/٤	۰	٤۰۰	۰	۷٤۳	۱۰۵٦	۱۳	۱٦۹
	۵	۳۸۰	۲۰	۷۳٦			
	۱۰	۳٦۰	٤۰	۷۲۹			
	۱۵	۳٤۰	٦۰	۷۲۳			
۰/۳	۰	۵۰۰	۰	٦۸۲	۱۰۵٦	۲۱	۱۵٤
	۵	٤۷۵	۲۵	٦۷٤			
	۱۰	٤۵۰	۵۰	٦٦۵			
	۱۵	٤۲۵	۷۵	٦۵۷			
۰/۲۵	۰	٦۰۰	۰	۵۹۲	۱۰۵٦	۳٦	۱٤۳
	۵	۵۷۰	۳۰	۵۸۱			
	۱۰	۵٤۰	٦۰	۵۷۳			
	۱۵	۵۱۰	۹۰	۵٦۳			

جدول ۲- نسبتهای وزنی طرح اختلاط بتن با درشت دانهٔ کوارتزیتی

آب به مواد سیمانی	میکروسیلیس به مواد سیمانی	سیمان (kg/m^3)	میکروسیلیس (kg/m^3)	ریزدانه (kg/m^3)	درشت دانه (kg/m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)	آب (kg/m^3)
۰/٤	۰	٤۰۰	۰	۷٤۳	۱۱٤۰	۱۳	۱٦۷
	۵	۳۸۰	۲۰	۷۳٦			
	۱۰	۳٦۰	٤۰	۷۲۹			
	۱۵	۳٤۰	٦۰	۷۲۳			
۰/۳	۰	۵۰۰	۰	٦۸۲	۱۱٤۰	۲۱	۱۵۱
	۵	٤۷۵	۲۵	٦۷٤			
	۱۰	٤۵۰	۵۰	٦٦۵			
	۱۵	٤۲۵	۷۵	٦۵۷			
۰/۲۵	۰	٦۰۰	۰	۵۹۲	۱۱٤۰	۳٦	۱٤۰
	۵	۵۷۰	۳۰	۵۸۱			
	۱۰	۵٤۰	٦۰	۵۷۳			
	۱۵	۵۱۰	۹۰	۵٦۳			

۵- مقاومت فشاری بتن در معرض سیکلهای یخبندان

جدول (۳) نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن بعد از ٤۵، ۱۵۰ و ۲۰۰ سیکل یخزدن و آب شدن متوالی را نشان می‌دهد. جدول (٤) نیز نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن شاهد در سنین ۲۸، ٦۳ و ۸۰ روزه (هم‌زمان با اتمام سیکلهای ٤۵، ۱۵۰ و ۲۰۰) را نشان می‌دهد.

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

جدول (۵) ارائه دهندهٔ افت متوسط مقاومت فشاری بتن (متوسط به‌ازای چهار درصد متفاوت میکروسیلیس جایگزینی) بعد از ٤۵، ۱۵۰ و ۲۰۰ سیکل یخزدن و آب شدن متناوب است. در جدول فوق مشاهده می‌شود که عموماً با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، تأثیر تعداد سیکلهای یخزدن و آب شدن

جدول ۳- مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با درشت دانهٔ آهکی و کوارتزیتی (بر حسب مگاپاسکال) در معرض سیکلهای یخبندان

W/C	SF (%)	بتن با درشت دانهٔ آهکی			بتن با درشت دانهٔ کوارتزیتی		
		$f_{c,}$ At 45 Cycles	$f_{c,}$ At 150 Cycles	$f_{c,}$ At 200 Cycles	$f_{c,}$ At 45 Cycles	$f_{c,}$ At 150 Cycles	$f_{c,}$ At 200 Cycles
۰/٤	۰	٥٦/۰۳	٤۲/۷٤	۳۰/۸۳	۷۲/٥٦	٦٦/٤۲	٥۹/۸٦
	٥	٦٤/۹۷	٦۰/۲۸	٥۱/۸۷	۷۹/٦۳	۷٦/۸٤	۷۲/۱۱
	۱۰	٦۸/٥	٦۷/۷۲	٦٦/۷۷	۸٤/٦۱	۸٤/۲۸	۸۳/٦۰
	۱٥	٦٦/۳۳	٦٤/۹۹	٦۱/۹۷	۸۰/۷۰	۸۰/٦۲	۸۰/٤۷
۰/۳	۰	۷۰/۲۸	٦۳/۲۳	٥٤/۷۷	۸۱/۰۳	۷۸/٤۲	۷۳/۷۸
	٥	۷٤/۷۸	۷۲/۰۱	٦٥/۷۸	۸٦/۰٥	۸٤/۸۲	۸۲/۲٦
	۱۰	۸٤/۷۲	۸٤/۱۷	۸۳/۲۸	۹٥/۸۱	۹٥/٦۱	۹٥/۲۳
	۱٥	۸۰/۲۳	۷۹/٤٤	۷۸/٤٤	۸۹/۹۹	۸۹/٤٦	۹۰/۰۸
۰/۲٥	۰	۷٥/۳۹	۷۳/۳٤	٦۸/۳٤	۸۹/۷٥	۸۷/۸	۸٦/۳
	٥	۸۰/۳٦	۷۹/۲۹	۷٦/٥۰	۹۷/۸٥	۹۷/٥۳	۹٦/۳٦
	۱۰	۸٦/۷۹	۸٦/٦۳	۸٦/۲٦	۱۰۹/۰۹	۱۰۹/۰۹	۱۰۸/۸٤
	۱٥	۸٤/۳۲	۸۳/۸۰	۸۳/۰٤	۱۱۱/۱۷	۱۱۰/۹	۱۱۰/٤۹

جدول ٤- مقاومت فشاری بتن‌های شاهد ساخته شده با درشت دانهٔ آهکی و کوارتزیتی

W/C	SF (%)	بتن با درشت دانهٔ آهکی			بتن با درشت دانهٔ کوارتزیتی		
		$f_{c\ 28}$ (Mpa)	$f_{c\ 63}$ (MPa)	$f_{c\ 80}$ (MPa)	$f_{c\ 28}$ (MPa)	$f_{c\ 63}$ (MPa)	$f_{c\ 80}$ (MPa)
۰/٤	۰	٦٥/۷	۷۲/۱٤	۷٥/۲۲	۷۹/٤	۸٦/۹۸	۹۰/٦
	٥	۷۱/۸۷	۷۸/٦	۸۲/۱۸	۸٥/۸	۹۱/٦۸	۹٥/٥
	۱۰	۷٥/٦۱	۸۳/۰۹	۸٦/٤۹	۹۰/۹۸	۹٦/۰٦	۱۰۰/۰۷
	۱٥	۷۲/۳٥	۷۹/۲۹	۸۲/۷٤	۸٦/۸۲	۹۳/۲۱	۹۷/۸۱
۰/۳	۰	۷۹/۸	۸۱/۷	۸٥/۱	۸۸/۲۷	۹٥/۸۱	۹۹/۷٥
	٥	۸۲/٦۲	۸٥/۳	۹۰/۹٥	۹۲/۷۱	۱۰۰/٥۱	۱۰٤/۷٦
	۱۰	۹۱/۱	۹۸/٦۷	۱۰٥/۹۱	۱۰۳/۰۲	۱۱۰/٥۸	۱۱٦/٤۱
	۱٥	۸۸/۲۲	۹٥/۷۸	۱۰۳/۹۱	۹٦/۸٦	۱۰٥	۱۰۹/٤٥
۰/۲٥	۰	۸٤/۳۸	۸٦/۳۱	۸۹/۹۱	۷۹/۲۱	۱۰٥/۸۲	۱۱۰/۲۳
	٥	۸۸/٥۱	۹۱/۷۹	۹٥/٥۳	۱۰٥/۳۱	۱۱٤/٦٤	۱۱۹/٤۲
	۱۰	۹٤/٦٦	۱۰۳/۸۱	۱۱۰/۰٥	۱۱۷/۳	۱۲٦/۰٥	۱۳۱/۳
	۱٥	۹۷/۳۷	۱۰۸/٤۷	۱۱۷/۱٦	۱۱۹/٥٤	۱۲۷/۷۳	۱۳۳/۰٥

جدول ٥- تاثیر تعداد سیکلهای یخزدن و آب شدن متناوب بر مقاومت فشاری بتن

نسبت آب به مواد سیمانی		۰/٤	۰/۳	۰/۲٥
بتن با درشت دانهٔ آهکی	$f_{c\ at\ 150\ cycles}/f_{c\ at\ 45\ cycles}$	۰/۹۲	۰/۹٦	۰/۹۹
	$f_{c\ at\ 200\ cycles}/f_{c\ at\ 150\ cycles}$	۰/۹۰	۰/۹٤	۰/۹۷
	$f_{c\ at\ 200\ cycles}/f_{c\ at\ 45\ cycles}$	۰/۸۳	۰/۹۱	۰/۹٦
بتن با درشت دانهٔ کوارتزیتی	$f_{c\ at\ 150\ cycles}/f_{c\ at\ 45\ cycles}$	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۹
	$f_{c\ at\ 200\ cycles}/f_{c\ at\ 150\ cycles}$	۰/۹٦	۰/۹۸	۰/۹۹
	$f_{c\ at\ 200\ cycles}/f_{c\ at\ 45\ cycles}$	۰/۹۳	۰/۹۷	۰/۹۸

جدول ٦- رشد مقاومت فشاری بتن شاهد در طول زمان

نسبت آب به مواد سیمانی		۰/٤	۰/۳	۰/۲۵
بتن با درشت دانهٔ آهکی	$f_{c\,28}/f_{c\,63}$	۱/۰۱	۱/۰۵	۱/۰۸
	$f_{c\,63}/f_{c\,80}$	۱/۰٤	۱/۰٦	۱/۰۵
	$f_{c\,28}/f_{c\,80}$	۱/۱۵	۱/۱٦	۱/۱٤
بتن با درشت دانهٔ کوارتزیتی	$f_{c\,28}/f_{c\,63}$	۱/۰۸	۱/۰۹	۱/۱۲
	$f_{c\,63}/f_{c\,80}$	۱/۰٤	۱/۰٤	۱/۰٤
	$f_{c\,28}/f_{c\,80}$	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱٦

جدول ۷- تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی بر مقاومت فشاری بتن در طول سیکلهای یخبندان

بتن ساخته شده با درشت دانهٔ	تعداد سیکل‌های یخبندان	$\frac{\overline{fc}(W/C=0.25)}{\overline{fc}(W/C=0.3)}$	$\frac{\overline{fc}(W/C=0.3)}{\overline{fc}(W/C=0.4)}$	$\frac{\overline{fc}(W/C=0.25)}{\overline{fc}(W/C=0.4)}$
آهکی	٤۵	۱/۰٦	۱/۲۱	۱/۲۸
	۱۵۰	۱/۰۹	۱/۲۸	۱/٤
	۲۰۰	۱/۱۳	۱/۳۹	۱/۵۸
کوارتزیتی	٤۵	۱/۱۵	۱/۱۱	۱/۲۸
	۱۵۰	۱/۱٦	۱/۱۳	۱/۳۲
	۲۰۰	۱/۱۸	۱/۱٦	۱/۳٦

جدول ۸- تاثیر نوع درشت دانه بر مقاومت فشاری بتن در طول سیکلهای یخبندان

نسبت مقاومت فشاری بتن	تعداد سیکل‌های یخبندان	W/C			نسبت جذب آب سنگ	نسبت مقاومت فشاری سنگ
		0.4	0.3	0.25	$w_{SSD,\,Q}/w_{SSD,\,L}$	$f_{a,\,Q}/f_{a,\,L}$
$\overline{fc}_{,L}/\overline{fc}_{,Q}$	٤۵	۱/۲٤	۱/۱٤	۱/۲۵	۰/٦۷	۳/۲۱
	۱۵۰	۱/۳۳	۱/۱۷	۱/۲۵		
	۲۰۰	۱/٤۷	۱/۲۲	۱/۲۸		

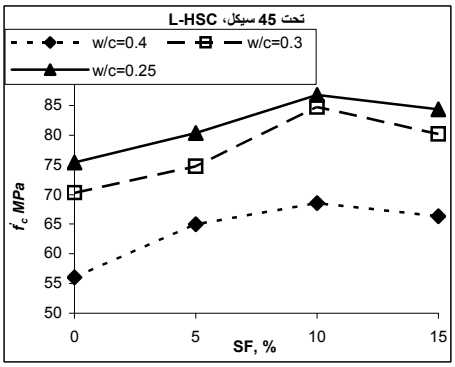
متوالی در افت مقاومت فشاری بتن کاهش یافته است. برای مقایسه، تأثیر زمان بر رشد متوسط مقاومت فشاری بتن شاهد که تحت اثر یخبندان قرار ندارد، در جدول (٦) نشان داده شده است. در جدولهای فوق مقاومت ۲۸، ٦۳ و ۸۰ روزهٔ بتن هم‌زمان با اتمام سیکلهای ٤۵، ۱۵۰ و ۲۰۰ اندازه‌گیری شده‌اند.

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

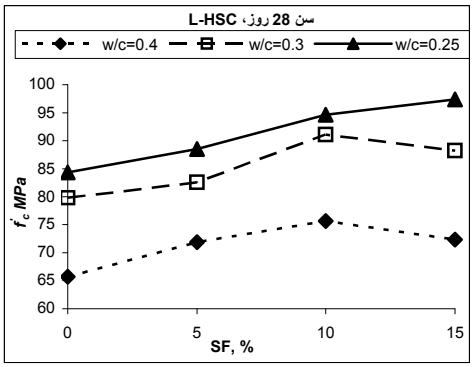
جدول (۷) نسبت متوسط مقاومت فشاری بتن (متوسط، به‌ازای چهار درصد متفاوت میکروسیلیس جایگزینی)، را بر اساس تغییر نسبت آب به مواد سیمانی ارائه می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، کاهش نسبت آب به مواد سیمانی منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن در حین یخبندان شده است. مطابق این جدول هر چه تعداد سیکلهای یخبندان افزایش می‌یابد، اثر کاهش نسبت آب به مواد سیمانی بر افزایش مقاومت فشاری بتن در حین یخبندان آشکارتر می‌شود.

۵-۳- تأثیر نوع درشت دانه بر مقاومت فشاری بتن در معرض یخبندان

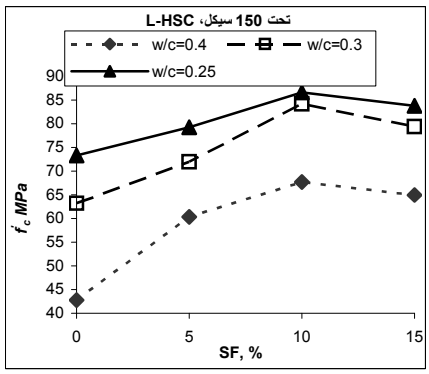
جدول (۸) نسبت متوسط مقاومت فشاری بتن با درشت



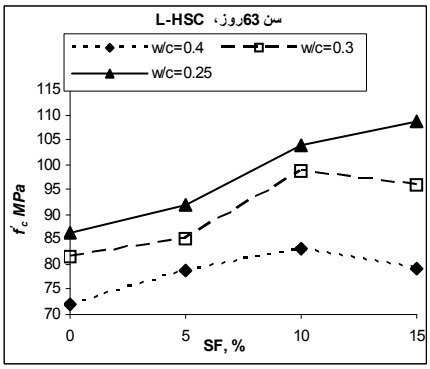
شکل ۱- مقاومت فشاری بتن با درشت دانهٔ آهکی در مقابل درصدهای میکروسیلیس بعد از ٤٥ سیکل



شکل ۲- مقاومت فشاری بتن شاهد با درشت دانهٔ آهکی در مقابل درصدهای میکروسیلیس بعد از ۲۸ روز



شکل ۳- مقاومت فشاری بتن با درشت دانهٔ آهکی در مقابل درصدهای میکروسیلیس بعد از ۱۵۰ سیکل

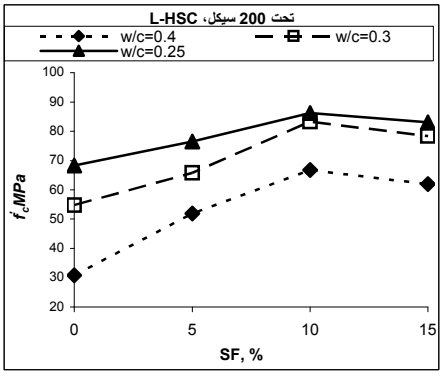


شکل ٤- مقاومت فشاری بتن شاهد با درشت دانهٔ آهکی در مقابل درصدهای میکروسیلیس بعد از ٦٣ روز

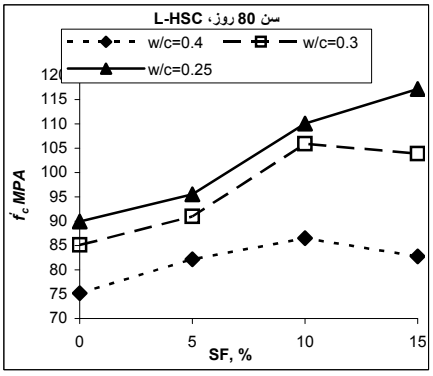
دانهٔ کوارتزیتی (متوسط، بازای چهار درصد متفاوت میکروسیلیس جایگزینی)، را به متوسط مقاومت فشاری بتن با درشت دانهٔ آهکی را ارائه داده و با نسبت مقاومت فشاری درشت دانهٔ آنها و جذب آب حالت اشباع با سطح خشک آنها مقایسه می‌کند. جدول (۸) نشان می‌دهد که استفاده از درشت دانه‌های با مقاومت بیشتر و جذب آب کمتر، بتن با مقاومت فشاری بیشتر در حین یخبندان تولید می‌کند. اثر نوع سنگدانه در سیکلهای بالاتر یخزدن و آب شدنهای متوالی بیشتر معلوم می‌شود.

٥-٤- تأثیر درصد میکروسیلیس جایگزینی بر مقاومت فشاری بتن در معرض یخبندان

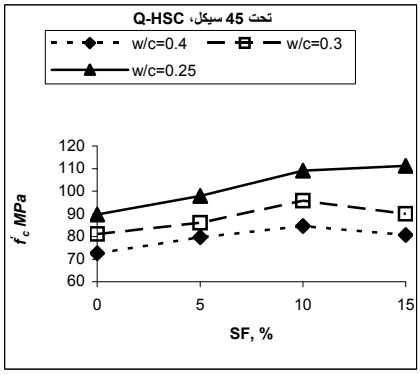
با تنظیم شکلهای (۱)، (۳) و (٥) اثر درصد میکروسیلیس جایگزینی بر مقاومت فشاری بتن در حین یخبندان برای بتن ساخته شده با درشت دانه آهکی مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسهٔ اثر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن هنگامی‌که بتن تحت سیکلهای یخبندان نباشد (بتن شاهد)، شکلهای (۲)، (٤) و (٦) برای بتن ساخته شده با درشت دانهٔ آهکی بعد از ۲۸، ٦٣ و ۸۰ روز مورد بررسی قرار می دهد. شکلهای (۱)، (۳) و (٥) نشان می‌دهند که بعد از ٤٥، ۱٥۰ و ۲۰۰ سیکل یخزدن و آب شدن متوالی، به کارگیری میکروسیلیس جایگزین سیمان به میزان ۱۰٪ بیشترین رشد را در مقاومت فشاری نهایی بتن ایجاد کرده است. همچنین شکلهای (۲)، (٤) و (٦) نشان می‌دهند که در بتن‌های شاهد با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/٤ و ۰/۳، به کارگیری میکروسیلیس جایگزین سیمان به میزان ۱۰٪ بیشترین رشد را در مقاومت فشاری نهایی بتن در سه سن ۲۸، ٦٣ و ۷۰ روز ایجاد کرده است. این درحالی است که در بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۲٥٪ به کارگیری میکروسیلیس



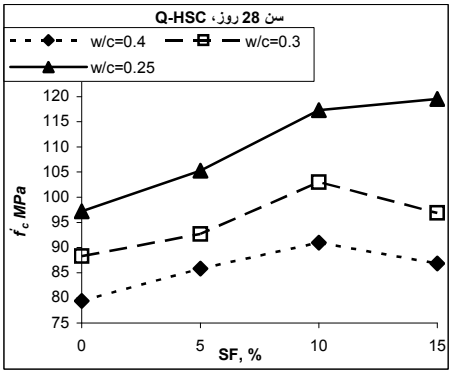
شکل ۵- مقاومت فشاری بتن با درشت دانهٔ آهکی در مقابل درصدهای میکروسیلیس بعد از ۲۰۰ سیکل



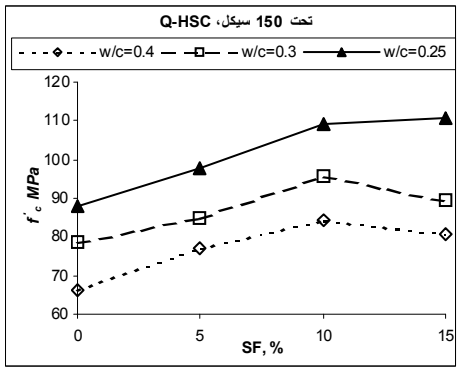
شکل ٦- مقاومت فشاری بتن شاهد با درشت دانهٔ آهکی در مقابل درصدهای میکروسیلیس بعد از ۸۰ روز



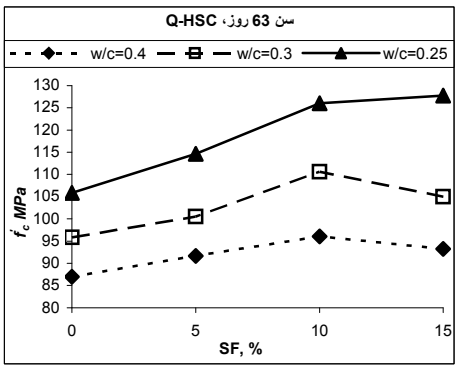
شکل ۷- مقاومت فشاری بتن با درشت دانهٔ کوارتزیتی در مقابل درصدهای میکروسیلیس بعد از ٤٥ سیکل



شکل ۸- مقاومت فشاری بتن شاهد با درشت دانهٔ کوارتزیتی در مقابل درصدهای میکروسیلیس بعد از ۲۸ روز



شکل ۹- مقاومت فشاری بتن با درشت دانهٔ کوارتزیتی در مقابل درصدهای میکروسیلیس بعد از ۱۵۰ سیکل



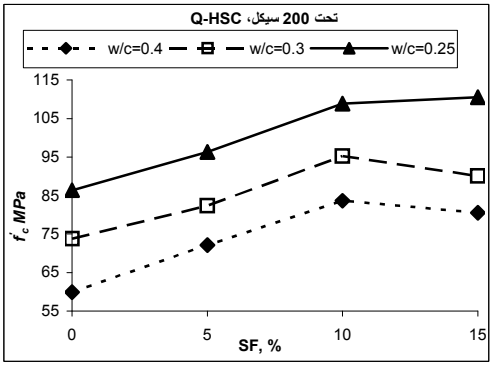
شکل ۱۰- مقاومت فشاری بتن شاهد با درشت دانهٔ کوارتزیتی در مقابل درصدهای میکروسیلیس بعد از ٦٣ روز

به میزان ۱۵٪، بیشترین رشد را در مقاومت فشاری بتن ایجاد کرده است. در شکلهای مذکور مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکلهای یخزدن و آب شدن متوالی، اثر میکروسیلیس جایگزینی در افزایش مقاومت فشاری بتن در حین یخبندان به‌طور محسوستری مشخص می‌شود.

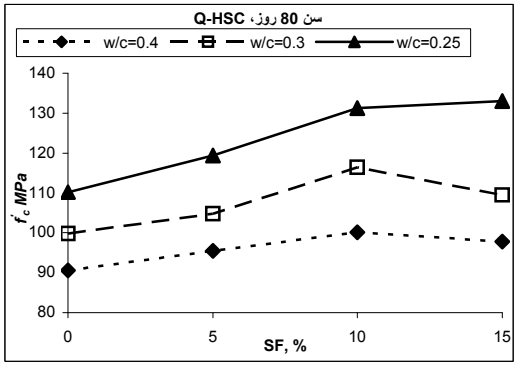
همچنین با تنظیم شکلهای (۷) تا (۱۲) مسئله فوق, برای بتن ساخته شده با درشت دانهٔ کوارتزیتی مورد بررسی قرار گرفت. این شکلها نشان می‌دهند که در بتن ساخته شده با درشت دانهٔ

جدول ۹- میزان خطای به‌دست آمده برای پارامترهای معادلهٔ (۱)

پارامترها	۰/۰۵	۰/٦۵	۰/۰۹	۰/۱۹	۱٤/۱
میزان خطا	۰/۰۱۵	۰/۰۵	۰/۰۰۹	۰/۰۱۷	۰/۱۲۸



شکل ۱۱- مقاومت فشاری بتن با درشت دانهٔ کوارتزیتی در مقابل درصدهای میکروسیلیس بعد از ۲۰۰ سیکل



شکل ۱۲- مقاومت فشاری بتن شاهد با درشت دانهٔ کوارتزیتی در مقابل درصدهای میکروسیلیس بعد از ۸۰ روز

کوارتزیتی در هر سیکل یخزدن و آب شدن متوالی برای نسبتهای آب به مواد سیمانی ۰/٤ و ۰/۳، به کارگیری میکروسیلیس جایگزین سیمان به میزان ۱۰٪، بیشترین رشد را در مقاومت فشاری نهایی بتن ایجاد کرده است. این در حالی است که در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲۵، در سیکلهای اندازه‌گیری شده یخزدن و آب شدنهای متوالی، به کارگیری میکروسیلیس جایگزین سیمان به میزان ۱۵٪، بیشترین رشد را در مقاومت فشاری بتن ایجاد کرده است. شکلهای فوق نشان می‌دهند که همین موضوع در مورد بتن شاهد نیز صادق است. در شکلهای مذکور مشاهده می‌شود که هر چه تعداد سیکلهای یخزدن و آب شدن متوالی بیشتر می‌شود، اثر میکروسیلیس جایگزینی در افزایش مقاومت فشاری بتن در حین یخبندان، بیشتر می‌شود.

۵-۵- تخمین مقاومت فشاری بتن با مقاومت بالا در حین یخبندان

در این تحقیق به ارزیابی هم‌زمان داده‌های مقاومت فشاری بتن (حاصل از آزمایش) و چهار پارامتر آب به مواد سیمانی، درصد میکروسیلیس جایگزینی، مقاومت فشاری درشت دانه و تعداد سیکلهای یخزدن و آب شدن متوالی پرداخته و با برقراری رگرسیون چند متغیره[۷] با استفاده از نرم افزار اکسل [۱۲] مطابق معادلهٔ (۱)، مدلی ارائه شد.

$$f'_c = \frac{14.1 f_a^{0.19} (\frac{SF}{C}+1)^{0.09}}{(\frac{W}{C})^{0.65} N^{0.05}} \quad , Er_{f'c}=0.8 \ \& \ R^2=0.87 \quad (۱)$$

جدول (۹)، میزان خطا را برای پارامترهای معادلهٔ فوق در سطح اعتماد ۹۵٪ ارائه می‌دهد. میزان خطا برای هر پارامتر ، به این معناست که پارامتر فوق در بازه، پارامتر ± میزان خطای پارامتر تغییر می‌کند.

محدودهٔ قابل قبول برای مقاومت فشاری درشت دانه ۱۱۰تا ۳۲۸ مگاپاسکال، برای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲۵ تا ۰/٤ و برای درصد وزنی میکروسیلیس جایگزینی سیمان ۰ تا ۰/۱۵ و تعداد سیکلهای یخزدن و آب شدن تا ۲۰۰ سیکل است.

٦- درصد جذب آب بتن در حین یخبندان

در تحقیق حاضر نمونه‌های بتنی که برای آزمایش فشاری طرح شدند، همزمان تحت آزمایش جذب آب نیز قرار گرفتند.

جدول ۱۰- میزان جذب آب بتن‌های ساخته شده با درشت دانهٔ آهکی و کوارتزیتی در حین یخبندان

	W/C	SF(%)	بتن با درشت دانهٔ آهکی			بتن با درشت دانهٔ کوارتزیتی		
			Ab $_{n=45}$ (%)	Ab $_{n=150}$ (%)	Ab $_{n=200}$ (%)	Ab $_{n=45}$ (%)	Ab $_{n=150}$ (%)	Ab $_{n=200}$ (%)
۱	۰/٤	۰	٦/۲۳	۸/۲٥	۱۲/۹۳	٥/۸٥	۷/۳	۱۰/۰۱
۲		٥	٥/٤٤	٥/٦٥	٥/۹۱	٥/۱۱	٥/۲٥	٥/۸۷
۳		۱۰	٥/۳٥	٥/٥۲	٥/۷۷	٤/۹۲	٥/۱٤	٥/٤٥
٤		۱٥	٥/۲٥	٥/۳٥	٥/٥	٤/۷٥	٤/۸٦	٥/۱
٥	۰/۳	۰	٥/۸	٦/۷۲	۹/۰۷	٥/۱۱	٥/۹	۸/۰٤
٦		٥	٤/۷	٤/۸	٥/۱٥	٤/۳۱	٤/٤۳	٤/۷۸
۷		۱۰	٤/۳٤	٤/٤٦	٤/۸۲	٤/۲۲	٤/۳٥	٤/٦٥
۸		۱٥	۳/۸٤	۳/۹٥	٤/۲۷	٤/۰۳	٤/۱۷	٤/٤٥
۹	۰/۲٥	۰	٥/۲۱	٦/۲٥	۸/۳۱	٤/۸۲	٥/٤	٦/٦
۱۰		٥	۳/٦۷	۳/۷۹	¼	۳/٤۷	۳/٥۹	۳/۹
۱۱		۱۰	۳/٥٤	۳/٦۸	۳/۹۹	۳/۲۲	۳/٤٥	۳/۷۳
۱۲		۱٥	۳/٥۲	۳/٦٤	۳/۹۱	۳/۱	۳/۲۲	۳/٥

جدول ۱۱- میزان جذب آب بتن‌های شاهد ساخته شده با درشت دانهٔ آهکی و کوارتزیتی

	W/C	SF(%)	Ab, %	
			بتن با درشت دانهٔ آهکی	بتن با درشت دانهٔ کوارتزیتی
۱	۰/٤	۰	٥/٦۱	٥/۲۷
۲		٥	٤/۹٤	٤/٦
۳		۱۰	٤/۸۱	٤/٤۸
٤		۱٥	٤/۷٦	٤/۳٥
٥	۰/۳	۰	٥/۲۲	٤/٦
٦		٥	٤/۲۳	۳/۸۸
۷		۱۰	۳/۹٥	۳/۸٤
۸		۱٥	۳/۷٦	۳/٦۹
۹	۰/۲٥	۰	٤/٦۹	٤/۳٤
۱۰		٥	۳/٤	۳/۱۲
۱۱		۱۰	۳/۲۲	۲/۹۳
۱۲		۱٥	۳/۱۸	۲/۸٤

جدول (۱۰) نتایج آزمایش فوق را نشان می‌دهد. برای مقایسه جدول (۱۱) نیز میزان جذب آب بتن شاهد را ارائه می‌دهد.

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

جدول (۱۲) ارائه دهنده میزان جذب آب متوسط نمونه‌های بتنی (متوسط، به ازای چهار درصد متفاوت میکروسیلیس جایگزینی) بعد از ٤٥، ۱٥۰ و ۲۰۰ سیکل متناوب یخزدن و آب شدن است. 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. همچنین در جدول مذکور دیده می‌شود که با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی

جدول ۱۲- تاثیر تعداد سیکلهای یخزدن و آب شدن متناوب بر میزان جذب آب بتن در معرض سیکلهای یخبندان

نوع درشت دانه	نسبت جذب آب	W/C		
		۰/٤	۰/۳	۰/۲۵
آهکی	$\overline{Ab}_{n=150} / \overline{Ab}_{n=45}$	۱/۱۱	۱/۰۷	۱/۰۹
	$\overline{Ab}_{n=200} / \overline{Ab}_{n=150}$	۱/۲۲	۱/۱۷	۱/۱٦
	$\overline{Ab}_{n=200} / \overline{Ab}_{n=45}$	۱/۳۵	۱/۲۵	۱/۲۷
کوارتزیتی	$\overline{Ab}_{n=150} / \overline{Ab}_{n=45}$	۱/۰۹	۱/۰۷	۱/۰۷
	$\overline{Ab}_{n=200} / \overline{Ab}_{n=150}$	۱/۱۷	۱/۱٦	۱/۱۳
	$\overline{Ab}_{n=200} / \overline{Ab}_{n=45}$	۱/۲۸	۱/۲٤	۱/۲۱

جدول ۱۳- تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی بر میزان جذب آب بتن در حین یخبندان

درشت دانه مصرفی	تعداد سیکلهای یخبندان	$\frac{\overline{Ab}(w/c=0.4)}{\overline{Ab}(w/c=0.3)}$	$\frac{\overline{Ab}(w/c=0.3)}{\overline{Ab}(w/c=0.25)}$	$\frac{\overline{Ab}(w/c=0.4)}{\overline{Ab}(w/c=0.25)}$
آهکی	٤۵	۱/۱۹	۱/۱۷	۱/٤۰
	۱۵۰	۱/۲٤	۱/۱۵	۱/٤۳
	۲۰۰	۱/۲۹	۱/۱۵	۱/٤۹
کوارتزیتی	٤۵	۱/۱۷	۱/۲۱	۱/٤۱
	۱۵۰	۱/۲۰	۱/۲۰	۱/٤٤
	۲۰۰	۱/۲۱	۱/۲٤	۱/٤۹

جدول ۱٤- تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی بر میزان جذب آب بتن شاهد

درشت دانه مصرفی	$\frac{\overline{Ab}(w/c=0.4)}{\overline{Ab}(w/c=0.3)}$	$\frac{\overline{Ab}(w/c=0.3)}{\overline{Ab}(w/c=0.25)}$	$\frac{\overline{Ab}(w/c=0.4)}{\overline{Ab}(w/c=0.25)}$
آهکی	۱/۷۲	۱/۱۸	۱/۳۹
کوارتزیتی	۱/۱۷	۱/۲۱	۱/٤۱

عمدتاً رشد میزان جذب آب در اثر افزایش تعداد سیکلهای ذوب و انجماد کمتر می‌شود.

٦-۲- تأثیر نیست آب به مواد سیمانی بر میزان جذب آب نمونه‌های بتنی در حین یخبندان

جدول (۱۳) میزان جذب آب متوسط نمونه‌های بتنی (متوسط، به‌ازای چهار مقدار مختلف میکروسیلیس جایگزینی) بعد از سه سیکل ٤۵، ۱۵۰ و ۲۰۰ را برحسب تغییر نسبت آب به مواد سیمانی ارائه می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، در هر سیکل یخزدن و آب شدن متوالی و برای دو نوع درشت دانهٔ به کار رفته، کاهش نسبت آب به مواد سیمانی منجر به کاهش میزان جذب آب نمونه‌های بتنی (افزایش دوام) شده است. برای مقایسه جدول (۱٤) نیز میزان جذب آب متوسط نمونه‌های بتنی شاهد را برحسب تغییر نسبت آب به مواد سیمانی ارائه می‌دهد.

جدول ۱۵- تاثیر نوع درشت دانه بر جذب آب بتن در معرض سیکلهای یخبندان[$(\overline{Ab})Q / (\overline{Ab})L$]

نسبت مقاومت فشاری سنگ $f_{a,L} / f_{a,Q}$	نسبت جذب آب سنگ $w_{SSD,Q}/w_{SSD,L}$	تعداد سیکلهای یخبندان	W/C		
			۰/٤	۰/۳	۰/۲۵
۳/۲۱	۰/٦۷	٤۵	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۲
		۱۵۰	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۰
		۲۰۰	۰/۸۸	۰/۹٤	۰/۸۸

جدول ۱٦- تاثیر نوع درشت دانه بر جذب آب بتن شاهد [$(\overline{Ab})Q / (\overline{Ab})L$]

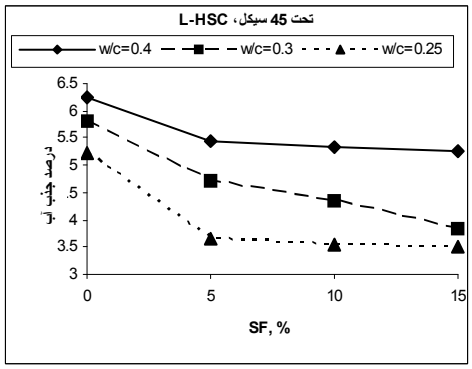
نسبت مقاومت فشاری سنگ $f_{a,L} / f_{a,Q}$	نسبت جذب آب سنگ $w_{SSD,Q}/w_{SSD,L}$	W/C		
		۰/٤	۰/۳	۰/۲۵
۳/۲۱	۰/٦۷	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۱

۶-۳- تأثیر نوع درشت دانه بر جذب آب بتن در حین یخبندان

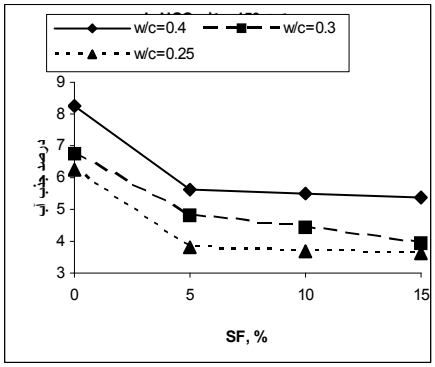
جدول (۱۵) نسبت متوسط جذب آب نمونه‌های بتنی (متوسط، به‌ازای چهار درصد مختلف میکروسیلیس جایگزینی) ساخته شده با درشت دانه کوارتزیتی را به متوسط جذب آب نمونه‌های بتنی ساخته شده با درشت دانه آهکی، ارائه داده و با نسبت مقاومت فشاری درشت دانه آنها و جذب آب حالت اشباع با سطح خشک آنها مقایسه می‌کند. جدول فوق نشان می‌دهد که استفاده از درشت دانه با مقاومت بیشتر و جذب آب کمتر در هر سیکل از یخزدن و آب شدنهای متوالی، بتن با جذب آب کمتر و دوام بیشتر در برابر یخبندان تولید می‌کند. برای مقایسه جدول (۱٦) نیز نسبت متوسط جذب آب نمونه‌های بتنی (متوسط، به‌ازای چهار درصد مختلف میکروسیلیس جایگزینی) ساخته شده با درشت دانه کوارتزیتی را به متوسط جذب آب نمونه‌های بتنی ساخته شده با درشت دانه آهکی ارائه می‌دهد.

٦-٤- تأثیر درصد میکروسیلیس جایگزینی بر میزان جذب آب نمونه‌های بتنی در حین یخبندان

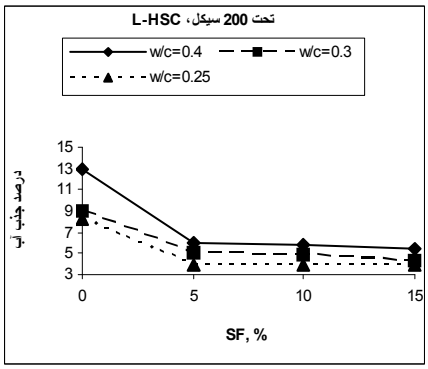
به منظور بررسی میزان تأثیر میکروسیلیس جایگزینی بر میزان جذب آب نمونه‌های بتنی در حین سیکلهای متناوب یخزدن و آب شدن، شکلهای (۱۳-الف تا ج) تنظیم شدند. همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش میزان میکروسیلیس جایگزین سیمان سبب کاهش میزان جذب آب بتن (افزایش دوام) در حین یخبندان می‌شود. مطابق این شکلها درصد بهینهٔ میکروسیلیس جایگزینی برای افزایش دوام بتن دارای درشت دانه آهکی در برابر سیکلهای متناوب یخزدن و آب شدن ۱۵٪ است. با تنظیم شکلهای (۱٤-الف تا ج) مسئله فوق برای بتن ساخته شده با درشت دانه کوارتزیتی مورد بررسی قرار گرفت. همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش میزان میکروسیلیس جایگزین سیمان سبب کاهش میزان جذب آب بتن (افزایش دوام) در حین یخبندان می‌شود. مطابق این شکلها درصد بهینهٔ میکروسیلیس جایگزینی برای افزایش دوام بتن دارای درشت دانه کوارتزیتی در برابر سیکلهای متناوب یخزدن و آب شدن ۱۵٪ می‌باشد. شکلهای (۱۵ الف و ب) به ترتیب نشان دهندهٔ میزان جذب آب نمونه‌های بتنی شاهد ساخته شده با درشت دانه آهکی و کوارتزیتی در مقابل درصدهای به کار رفته میکروسیلیس بوده و برای مقایسه با میزان جذب آب بتن‌های اصلی ارائه شده‌اند.



(الف)

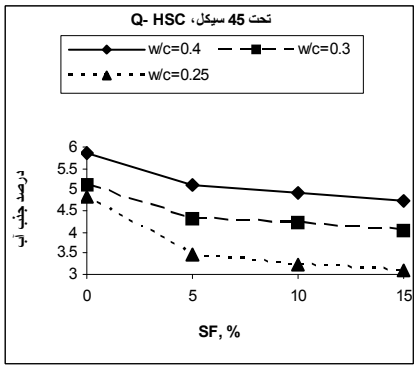


(ب)

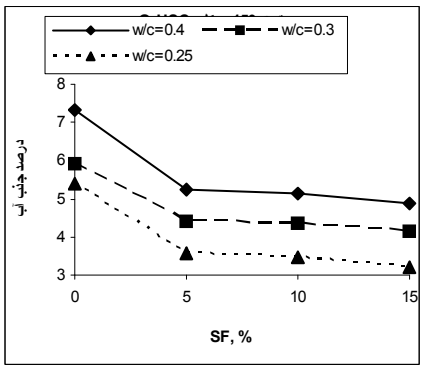


(ج)

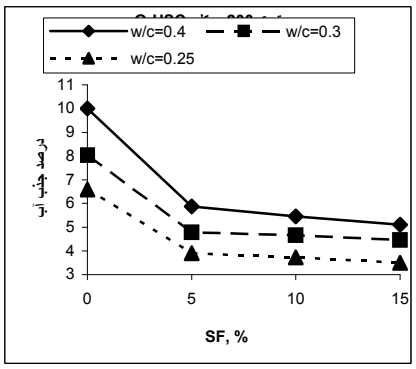
شکل۱۳- میزان جذب آب نمونه‌های بتنی با درشت دانهٔ آهکی برحسب درصد میکروسیلیس جایگزینی بعد از الف) ٤٥، ب) ۱۵۰ و ج) ۲۰۰ سیکل



(الف)



(ب)

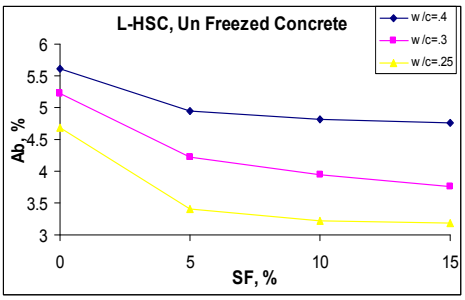


(ج)

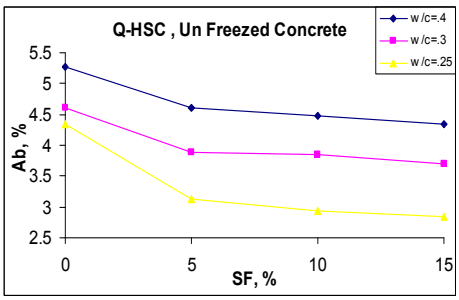
شکل۱٤- میزان جذب آب نمونه‌های بتنی با درشت دانهٔ کوارتزیتی برحسب درصد میکروسیلیس جایگزینی بعد از الف) ٤٥، ب) ۱۵۰ و ج) ۲۰۰ سیکل

۶-۵- تخمین میزان جذب آب نمونه‌های بتنی با مقاومت بالا در حین یخبندان

اینک با برقراری رگرسیون چند متغیره مطابق رابطه (۲) مدلی ارائه می‌شود که می‌تواند میزان جذب آب بتن در حین یخبندان را براساس چهار پارامتر تعیین کننده فوق (نسبت آب به مواد سیمانی، درصد میکروسیلیس جایگزینی، مقاومت فشاری



(الف)



(ب)

شکل ۱۵- میزان جذب آب نمونه‌های بتنی شاهد ساخته شده با
الف) درشت دانه آهکی، و ب) با درشت دانه کوارتزیتی، در مقابل درصدهای به کار رفتهٔ میکروسیلیس

جدول ۱۷- میزان خطای به‌دست آمده برای پارامترهای معادلهٔ (۲)

پارامترها	۱۸/۸۷	۱/٤٤	۰/۱۹	۰/۱۱۹	۰/۳
میزان خطا	۰/۲۵	۰/۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲

درشت دانه و تعداد سیکلهای یخزدن و آب شدن متوالی)، با دقتی بسیار مناسب تخمین بزنند. در این معادله، محدودهٔ قابل قبول برای این چهار پارامتر همان محدوده‌ای‌است که در معادله (۱) ذکر شد.

$$Ab = \frac{11.43N^{0.19}(\frac{W}{C})^{1.44}}{f_a{}^{0.119}(\frac{SF}{C}+1)^{0.3}} + 2.1 \quad ,$$

$$Er_{Ab}=0.16 \quad \& \quad R^2=0.89 \qquad (۲)$$

جدول (۱۷) هم میزان خطا را برای پارامترهای معادلهٔ فوق در سطح اعتماد ۹۵٪ ارائه می‌دهد.

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 دهندهٔ میزان دوام بتن در برابر سیکلهای متناوب یخزدن و آب شدن است [۱۱]. جدول (۱۸) و (۱۹) به ترتیب نتایج آزمایش درصد تغییر طول و درصد کاهش وزن نمونه‌های بتنی حاصل از میانگین سه آزمایش بعد از ٤۵، ۱۰۰ و ۲۰۰ سیکل یخزدن و آب شدن متوالی نشان می‌دهد. قابل ذکر است که میزان تغییر طول توسط کولیس دیجیتالی در هر وجه و در سه نقطه از آن وجه اندازه‌گیری شد.

۷-۱- تخمین میزان تغییر طول و کاهش وزن نمونه‌های بتنی در معرض یخبندان

اینک با برقراری رگرسیون چند متغیره مطابق معادلات (۳) و (٤) مدلی ارائه می‌شود که می‌تواند تغییر طول و کاهش وزن بتن در حین یخبندان را بر اساس چهار پارامتر تعداد سیکلهای یخزدن و آب شدن، نسبت آب به مواد سیمانی، درصد میکروسیلیس جایگزینی و مقاومت فشاری درشت دانه، با دقتی بسیار مناسب تخمین بزنند. در این معادلات، محدودهٔ قابل قبول برای این چهار پارامتر همان محدوده‌ای است که در معادلهٔ (۱) ذکر شد.

$$\Delta L/L = \frac{4.12N^{0.77}(\frac{W}{C}-0.2)^{0.68}}{(\frac{SF}{C}+1)^{1.35}f_a{}^{0.58}} \quad ,$$

$$Er_{\Delta L/L}=0.048 \quad \& \quad R^2=0.92 \qquad (۳)$$

$$\Delta M/M = \frac{25.94N^{0.95}(\frac{W}{C})^{2.42}}{(\frac{SF}{C}+1)^{1.49}f_a{}^{0.65}} - 0.025 \quad ,$$

$$Er_{\Delta M/M}=0.054 \ \& \ R^2=0.92 \qquad (٤)$$

جدول ۱۸- تغییر طول نمونه‌های بتنی ساخته شده با درشت دانهٔ آهکی و کوارتزیتی تحت اثر سیکلهای یخزدن و آب شدن

W/C	SF/C (%)	ΔL/L (%)					
		نمونه‌های ساخته شده با درشت دانه آهکی			نمونه‌های ساخته شده با درشت دانه کوارتزیتی		
		بعد از ٤٥ سیکل	بعد از ۱۵۰ سیکل	بعد از ۲۰۰ سیکل	بعد از ٤٥ سیکل	بعد از ۱۵۰ سیکل	بعد از ۲۰۰ سیکل
۰/٤	۰	۱/٦٤۰	۷/٦۰۳	۱۳/۱۹۹	۰/٤٤۷	۲/٥٤۷	٤/۷۲۸
	٥	۰/۱٥۱	۰/٤۳٤	۰/۷۷۰	۰/۰٥٤	۰/۲۰٦	۰/۳٥۸
	۱۰	۰	۰/۰٥۷	۰/۰۸٦	۰	۰	۰/۰٤
	۱٥	۰/۰۳۳	۰/۱۰۳	۰/۲۲٤	۰	۰/۰٤	۰/۰۸۷
۰/۳	۰	۰/۸۳۲	۳/۳۰۱	٦/۲۳٤	۰/۳۳۱	۱/۱۱٦	۲/٤۷۱
	٥	۰/۱۳۲	۰/۲۳٤	۰/٤٦٥	۰/۰٥۰	۰/۰۹۰	۰/۱۷۰
	۱۰	۰	۰/۰۳۱	۰/۰٥۷	۰	۰	۰/۰۲۱
	۱٥	۰	۰/۰٥۰	۰/۰۷٦	۰	۰/۰۲٤	۰/۰۳۳
۰/۲٥	۰	۰/٤٦۹	۱/۱۱۹	۲/٦۹۲	۰/۱۸۷	۰/۷۱۷	۱/۰٤۸
	٥	۰/۰٥۹	۰/۱۳۰	۰/۲٤۰	۰/۰۲۳	۰/۰۳٥	۰/۰۷۷
	۱۰	۰	۰	۰/۰۲۲	۰	۰	۰
	۱٥	۰	۰/۰۲۹	۰/۰٥۱	۰	۰	۰/۰۰۲

جدول ۱۹- کاهش وزن نمونه‌های بتنی ساخته شده با درشت دانهٔ آهکی و کوارتزیتی تحت اثر سیکلهای یخزدن و آب شدن

W/C	SF/C (%)	ΔM/M(%)					
		نمونه‌های ساخته شده با درشت دانه آهکی			نمونه‌های ساخته شده با درشت دانه کوارتزیتی		
		بعد از ٤٥ سیکل	بعد از ۱۵۰ سیکل	بعد از ۲۰۰ سیکل	بعد از ٤٥ سیکل	بعد از ۱۵۰ سیکل	بعد از ۲۰۰ سیکل
۰/٤	۰	٤/۸٤	۲۱/۱۲	۳٤/٦	۱/۳٤	۷/٤٥	۱۳/٥۲
	٥	۰/٤٥۳	۱/۲۹٥	۲/۲۹۳	۰/۱٦	۰/٦۲	۱/۰۷
	۱۰	۰/۰٤۱	۰/۱۷	۰/۲٥۷	۰	۰/۰٦	۰/۱۲
	۱٥	۰/۱	۰/۳۰۸	۰/٦۷	۰/۰٤	۰/۱۲	۰/۲٦
۰/۳	۰	۲/٤۷۸	۹/٥۸	۱۷/٥٦	۰/۹۹	۳/۳۱	۷/۲۳
	٥	۰/٤۰	۰/۷۰	۱/۳۹	۰/۱٥	۰/۲۷	۰/٥۱
	۱۰	۰	۰/۰۹	۰/۱۷	۰	۰/۰۳	۰/۰٦
	۱٥	۰/۰٥	۰/۱٥	۰/۲۳	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۱
۰/۲٥	۰	۱/٤	۳/۳۲	۷/۸٦	۰/٥٦	۲/۱٤	۳/۱۱
	٥	۰/۱۸	۰/۳۹	۰/۷۲	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۲۳
	۱۰	۰	۰/۰۳	۰/۰٦	۰	۰	۰/۰۲
	۱٥	۰	۰/۰۹	۰/۱٥	۰	۰/۰٤	۰/۰٦

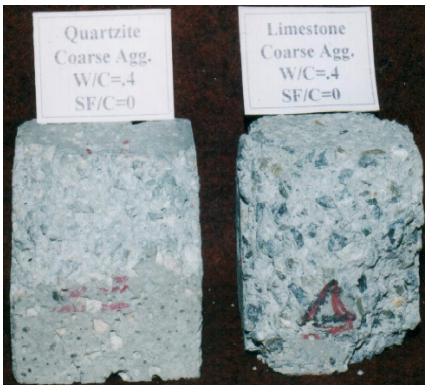
جدول ۲۰- میزان خطای به‌دست آمده برای پارامترهای معادلهٔ (۳)

پارامترها	٤/١٢	٠/٦٨	٠/٧٧	٠/٥٨	١/٣٥
میزان خطا	٠/٧	٠/١	٠/٠٨	٠/٠٩	٠/٠٥

جدول ۲۱- میزان خطای به‌دست آمده برای پارامترهای معادلهٔ (٤)

پارامترها	٢٥/٩٤	٢/٤٢	٠/٩٥	٠/٦٥	١/٤٩
میزان خطا	٠/٨٤	٠/٣٣	٠/١٠	٠/١١	٠/٠٦

شکل١٦- تاثیر درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان بر دوام بتن



شکل١٧- تاثیر نوع درشت دانه بر دوام بتن

جداول (۲۰) و (۲۱) به ترتیب میزان خطا را برای پارامترهای معادلات (۳) و (٤) در سطح اعتماد ۹۵٪ ارائه می‌دهند.

معادلات فوق با دارا بودن ضریب همبستگی خوب، مدلی بسیار مناسب برای پیش بینی دوام بتن با مقاومت بالا در حین یخبندان هستند. همان‌طور که در معادلات (۳) و (٤) دیده می‌شود، با به کارگیری درشت دانه‌های با مقاومت بالاتر، می‌توان به بتن با دوام بیشتر، در برابر یخبندان دست یافت. همچنین استفاده از میکروسیلیس جایگزین سیمان، میزان تخریب بتن با مقاومت بالا را در برابر یخبندان کاهش می‌دهد. شکل (١٦) چهار نمونه بتنی را بعد از ۲۰۰ سیکل نشان می‌دهد، که همگی دارای نسبت آب به سیمان ۰/٤ و با درشت دانه آهکی می‌باشند. نمونه‌ها ازراست به چپ به ترتیب دارای ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد میکروسیلیس‌اند. آنچه از شکل فوق دیده می‌شود اثر افزایش میکروسیلیس بر کاهش میزان تخریب نمونه‌هاست. شکل (۱۷) نیز دو نمونه بتنی با نسبت آب به سیمان ۰/٤ و بدون میکروسیلیس را بعد از ۲۰۰ سیکل نشان می‌دهد. نمونه‌ها از راست به چپ دارای درشت دانه آهکی و کوارتزیتی‌اند. دیده می‌شود، که نمونه دارای درشت دانه کوارتزیتی دوام بیشتری نسبت به نمونه دارای درشت دانه آهکی از خود نشان داده است.

۷- نتایج

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

۱- کمترین افت مقاومت فشاری، کاهش طول و کاهش وزن، در بتن با مقاومت بالا بعد از ٤۵، ۱۵۰ و ۲۰۰ سیکل یخ‌زدن و آب شدن، به‌ازای ۱۰٪ میکروسیلیس جایگزینی حاصل شد. همچنین کمترین میزان جذب آب در بتن با مقاومت بالا بعد از سیکلهای مذکور، به‌ازا ۱۵٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان حاصل شد.

۲- همواره کاهش نسبت آب به مواد سیمانی تا میـزان لازم بـرای انجام هرچه بیشتر هیدراتاسیون، مقاومت فشاری بتن در حـین یخبندان را افزایش می‌دهد. همچنین کاهش نسبت آب به مواد سیمانی در حین یخبندان، میزان تخریب ظاهری (کاهش طـول و کاهش وزن) و میزان تخریب درونی (جذب آب) بـتن را در برابر سیکلهای ذوب و انجماد کاهش می‌دهد.

۳- همواره با به کارگیری درشت دانه‌های با مقاومـت بـالاتر و جذب آب کمتر، می‌توان بـه بـتن بـا دوام بیـشتر در برابـر یخبندان دست یافت.

٤- استفاده از میکروسیلیس جایگزین سیمان، همواره مقاومـت فشاری بتن را در برابر یخبندان افزایش می‌دهـد. همچنـین میکروسیلیس جایگزینی، میزان کـاهش طـول، افـت وزن و میزان جذب آب بتن با مقاومـت بـالا را در برابـر یخبنـدان کاهش می‌دهد.

۵- به منظور پیش‌بینـی مقاومـت فـشاری، میـزان جـذب آب، میزان کاهش طول و میـزان کـاهش وزن بـتن بـا مقاومـت بالای ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی در محدودهٔ ۰/۲۵ تا ۰/٤ و میکروسیلیس جایگزینی تا ۱۵٪ وزنی مـواد سیمانی و درشت دانه‌های با مقاومت فشاری ۱۱۰ تـا ۳۲۸ مگاپاسکال، هنگامی کـه بـتن فـوق در معـرض سـیکلهای متناوب یخزدن و آب شدن قرار می‌گیرد، می‌توان به ترتیب از معادلات (۱)، (۲)، (۳) و (٤) استفاده نمود.

واژه نامه

1. qurtzite
2. melamine formaldeid sulphonates
3. compressive strength
4. length change
5. weight change
6. absorption
7. multiple regression

مراجع

1. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, Pitman, London, 1982.
۲. نیلی، م.، و کامادا، ا.، "ارزیابی سریع دوام بتن‌های با مقاومت زیاد در مقابل یخزدن و آب شدن بـا اسـتفاده از روش تعیـین مقاومت الکتریکی،" *مجموعه مقالات سـومین کنفـرانس بـین المللی بتن*، شماره ۸۱۰، تهران، اردیبهشت ۱۳۷۹.
3. Zia, P., Ahmad, S., and Leming, M., "*High Performance Concrete*," USA, 1994.
4. Cohen, M. D., Zhou, Y., and William, L. D., "Non-Air-Entrained High-Strength Concrete, Is It Frost Resistant?," *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 2, pp.406-414, July-August, 1992.
5. 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*, Vol. 90, No. 2, , pp.143-151, March-April 1993.
6. Marzouk, H., and Jiang, D., "Effects of Freezing and Thawing on The Tension Properties of High-Strength Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No. 6, pp. 557-586, November-December, 1994.
7. Bowser, J. D., Krause, G., and Tadros, K., "Freeze-Thaw Durability of High-Performance Concrete Masonary Units," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 4, pp.387-415, July-August, 1996.
8. Malhotra, V. M., "Role of Silica Fume in Enhancing the Durability of Concrete-A Review," *International Conference on Engineering Material*, Vol. 1, pp. 677-689, Ottawa, Canada, June 8-11 1997.
9. American Society for Testing and Materials, "Standard Specification for Portland Cement," ASTM C150-97, *ASTM Standard for Concrete and Mineral Aggregate*, Vol. 04.02, Standard Designation, C150-97, November 1997.
10. 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*, Vol. 04. 02, Standard Designation, C666-92, November 1992.
11. Neville, A. M., and Brooks, J. J., *Concrete Technology*, Longman Scientific & Technical, London, 1990.
12. Microsoft Excel 2000, Manual, 2000.