



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Investigating the Shear Strength of New and Old Concrete Joints Under the Effect of Freezing and Thawing Cycles

Meysam Sadighi^a, Mohammad Ali Lotfollahi-Yaghin^{b,*}, Mohammad Naghavi^c

^a Ph.D. student, Faculty of Civil Engineering, Urmia University, Iran

^b professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

^c PhD, Faculty of Civil Engineering, Urmia University, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 05 July 2022

Revised: 03 November 2023

Accepted: 14 November 2023

Keywords:

Shear strength, freezing and thawing cycle, new and old concrete, adhesion.

ABSTRACT

In this article, in order to evaluate the shear strength at the junction of old and new concrete under successive cycles of freezing and thawing, for new concrete from three water-to-cement ratios of 0.4, 0.45 and 0.5 and bubble-making materials with values of 0, 0.1, 0.2, 0.3 and 0.4 percent by weight of cement used, as well as three grades of cement 300, 350 and 400 kg/m³ have been used and 300 consecutive cycles of thawing and freezing were applied after 3, 7 and 28 days of processing. The periods of thawing and freezing include lowering the temperature of the samples from 4°C to -18°C and raising it from -18°C to 4°C, which is done alternately and in a period of 4 hours for each thawing-freezing cycle. The samples were frozen for 3 hours and placed in water for 1 hour for the thawing process. The results of this research show that for the condition with and without the thawing and freezing cycle, the shear stress increases and decreases with the increase in the weight percentage of the bubble-making material, so that the amount of shear strength after applying the temperature cycle for the ratio of water to cement and different grades of cement, in the concrete sample with a processing time of 28 days and the bubble rate of 0 and 0.4 decreases on average by 93% and 18%, respectively, and the highest and lowest percentage of reduction in shear strength in different amounts of bubble-making material occurs in water-cement ratio of 0.5 and 0.45, respectively.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.27710.2301>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: lotfollahi@tabrizu.ac.ir

How to cite this article:

Sadighi, M., Lotfollahi-Yaghin, M. A., & Naghavi, M. (2024). Investigating the shear strength of new and old concrete joints under the effect of freezing and thawing cycles. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(77), 95-106. doi: 10.22075/jme.2023.27710.2301

بررسی مقاومت برشی اتصال بتن جدید و قدیم تحت اثر چرخه‌های یخبندان و ذوب

میثم صدیقی^۱، محمد علی لطف الهی یقین^{۲*}، محمد نقوی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴	در این مقاله جهت ارزیابی مقاومت برشی در محل اتصال بتن قدیم و جدید تحت چرخه‌های متوالی انجماد و ذوب، برای بتن جدید از سه نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ و مواد حباب‌ساز با مقادیر ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد وزنی سیمان مصرفی و همچنین سه عیار سیمان ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد. برای بررسی اثر چرخه‌های یخبندان و ذوب، در این تحقیق از ۳۰۰ چرخه متوالی ذوب و انجماد پس از ۷، ۳ و ۲۸ روز عمل‌آوری استفاده گردید. دوره‌های ذوب و انجماد شامل پائین آوردن دمای نمونه‌ها از ۴ به ۱۸- درجه سانتیگراد و بالا بردن آن از ۱۸- به ۴ درجه سانتیگراد بود که این امر به طور متناوب و در مدت زمان ۴ ساعت برای هر چرخه ذوب و انجماد صورت گرفت. نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت به حالت انجماد و ۱ ساعت در داخل آب جهت طی فرآیند ذوب قرار داده شد. نتایج نشان می‌دهد که برای حالت با و بدون چرخه ذوب و انجماد، تنش برشی با افزایش درصد وزنی مواد حباب‌ساز به ترتیب روند افزایشی و کاهش‌ی دارد. میزان مقاومت برشی پس از اعمال چرخه دمایی برای نسبت آب به سیمان و عبارهای مختلف سیمان، در نمونه بتن با مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه و حباب مصرفی صفر و ۰/۴ به ترتیب به طور متوسط ۹۳ و ۱۸ درصد کاهش یافت. بیشترین و کمترین درصد کاهش مقاومت برشی در هر درصد وزنی مواد حباب‌ساز، به ترتیب مربوط به نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ می‌باشد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۲	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳	
واژگان کلیدی: مقاومت برشی، چرخه انجماد و ذوب، بتن جدید و قدیم، چسبندگی.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.27710.2301>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

سو و نامطلوب گذاشته و رفته رفته بتن را لایه لایه می‌کند. بنابراین بتن‌هایی که در معرض مواد یخ‌زدا (نمک‌ها) قرار می‌گیرند، معمولاً سطح‌شان سریع‌تر فرسایش می‌یابد، بخصوص که این بتن‌ها اکثراً استفاده ترافیکی نیز دارند و طبیعتاً می‌باید در مقابل سایش هم مقاوم باشند. تجربه نشان داده بتنی که هوادار باشد مقاومتش در مقابل تورق و لایه لایه شدن به مراتب بیشتر خواهد بود. در زمان ترمیم و یا مقاوم‌سازی بتن قدیم با استفاده از بتن تازه، در لایه‌های

تخریب بتن اکثراً در اثر عملکرد مواد شیمیایی یخ‌زدا در بتن ایجاد می‌شود. گاهی در زمستان و در مواقع یخبندان جهت آب شدن یخ و برف، روی سطح جاده‌ها نمک می‌ریزند. خاصیت نمک این است که می‌تواند یخ‌ها را سریع آب کرده و سازه را سریعاً مورد استفاده قرار دهد. از این تکنیک در باندهای فرودگاه زیاد استفاده می‌شود. چنانچه کف جاده یا باند فرودگاه بتنی باشد، نمک روی بتن تاثیر

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: lotfollahi@tabrizu.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

۲. استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۳. دکتری مهندسی عمران-سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

استناد به این مقاله:

باند اتصال می‌شود. نشوادیان [۷] در سال ۲۰۱۰ طی یک تحقیقی با تمرکز بر روی پیوند بین لایه و زیرلایه به بررسی میزان استحکام پیوند بین مواد تعمیر و بستر در سطح رابط پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد عوامل زیادی از جمله زبری سطح، وجود ترک‌های خرد، تراکم، عمل‌آوری و غیره بر استحکام باند تأثیر می‌گذارد و با توجه به روش‌های بارگذاری، استحکام باند تعیین می‌شود. وان [۸] در سال ۲۰۱۱ طی تحقیقی اتصال برشی بین بتن‌های قدیم و جدید را مورد بررسی قرار داد و نتایج نشان داد که دود سیلیس مقاومت فشاری بتن جدید و استحکام باند برشی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد و بتن جدید با نسبت وزنی ۰/۴۵ منجر به مقاومت فشاری بالاتر و استحکام باند برشی کمتر می‌شود. تایه و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۳ با بررسی استحکام باند اتصال بتن با کارایی فوق‌العاده بالا (UHPC)^۲ و بتن معمولی^۳ (NC) نشان دادند که بتن با کارایی فوق‌العاده بالا اتصال عالی با سطح بستر بتن معمولی دارد و به علت این‌که اکثر شکستگی‌ها در آزمایشات در بستر بتن معمولی صورت می‌پذیرد نتیجه‌گیری می‌شود که حتی استحکام باند از قدرت بستر بتن معمولی هم بیشتر است. روزن [۱۰] در سال ۲۰۱۶ طی یک تحقیقی روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری مقاومت برشی در سطح واسط بین یک بستر بتنی و یک پوشش بتنی را مورد بررسی قرار داد. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که نتایج به روش تستی که برای ارزیابی مقاومت برشی استفاده می‌شود بستگی دارد و اهمیت ترمیم سطح یک بستر در استحکام برشی برای روکش پیوندی را نشان می‌دهد. وندهیان و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۷ طی یک مطالعه تجربی به بررسی استحکام پیوند بین لایه‌های بتنی قدیمی و جدید، با استفاده ماده پیوند دهنده بر پایه اپوکسی پرداختند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که استفاده از یک عامل پیوند دهنده مبتنی بر اپوکسی منجر به بهبود استحکام باند است. کروس [۱۲] در سال ۲۰۱۹ تأثیر تفاوت مدول‌های الاستیسیته بین دو بتن را بررسی نمود و نشان داد که تفاوت زیاد مدول‌های الاستیسیته، ممکن است مقاومت برشی رابط را کاهش دهد. شارما و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۹ طی یک تحقیق تجربی متشکل از ۱۰ نمونه آزمایشگاهی به بررسی رفتار مقاومت برشی در سطح رابط NC-UHPC پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش عمق

تعمیری بتن حتی با وجود مقاومت کافی در هر دو لایه بتن قدیم و جدید، سطح اتصال هنوز هم در خطر خرابی است و می‌توان آن را حساس‌ترین بخش این سیستم در نظر گرفت. دو لایه مدول‌های الاستیسیته‌ی متفاوتی دارند پس حتی با وجود یکسان بودن تنش وارده، کرنش‌های متفاوتی خواهند کرد. سطح اتصال باید بتواند این تفاوت را تحمل کند. این مسئله شامل تفاوت کرنش‌های مربوط به دما نیز می‌شود. از طرف دیگر در صورت اضافه کردن بتن تازه، این بتن جمع‌شدگی (انقباض) نیز دارد که یکی دیگر از نقاط ضعف سطح اتصال است. مصالح تشکیل‌دهنده بتن بسیار متنوع‌اند و تخمین مقاومت آن و ایجاد مدلی که قادر باشد رفتار بتن را بیان کند، مشکل است [۱]. اجزای اصلی بتن، خمیر سیمان هیدراته شده، سنگدانه، آب و هوا است. خمیر سیمان هیدراته شده ماده‌ای پیچیده و متشکل از چندین فاز است. سنگدانه‌ها نیز مصالحی مرکب و متخلخل و بسیار متفاوت با خمیر سیمان احاطه‌کننده آن است. ارتباط بین خمیر سیمان و سنگدانه نیز مسئله‌ای پیچیده است [۲]. صباغ و همکاران [۳] در سال ۱۳۹۸ با تهیه نمونه‌هایی بتنی با طرح اختلاط متفاوت ضمن بررسی تأثیر نسبت‌های اختلاط بر مقاومت بتن، با در نظر گرفتن نسبت آب به سیمان و نسبت سنگدانه ریز به درشت، رابطه‌ای جامع برای تخمین مقاومت بتن ارائه دادند. در اغلب موارد فرایند انجماد و ذوب پدیده‌ای طبیعی به شمار می‌آید و جلوگیری از آن خارج از اختیار بشر است. از این رو تنها راه جلوگیری از تخریب بتن، کاهش جذب آب توسط بتن و عوارض احتمالی ناشی از جذب آب زیاد و اشباع شدن آن خواهد بود [۴]. کرسلی و وینرایت [۵] در سال ۲۰۰۲ تأثیر تخلخل را بر مقاومت بتن حباب‌دار مورد بررسی قرار دادند و نتایج این تحقیق نشان داد که تخلخل بتن به مقدار زیادی به چگالی خشک آن وابسته است و مقاومت فشاری بتن تابعی از تخلخل و سن بتن است و با افزایش تخلخل، چگالی خشک و مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. شین و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۰ طی یک تحقیق، به بررسی رابط اتصال بین سطوح بتنی جدید و قدیم پرداختند. نتایج آزمایش‌های برشی نشان می‌دهد که دود سیلیس در بتن جدید نه تنها مقاومت فشاری بتن جدید بلکه مقاومت باند برشی رابط را نیز افزایش می‌دهد. همچنین برای همه بتن‌ها مشخص گردید که شرایط سطح خشک اشباع شده منجر به استحکام

^۳ Normal Concrete^۲ Ultra High-Performance Concrete

زبری در ناحیه تقویت کننده، تأثیر مثبتی در ظرفیت برشی رابط دارد.

با توجه به مطالعات انجام شده و اهمیت اتصال بتن قدیم و جدید، در این مقاله تأثیر چرخه‌های یخبندان و ذوب بر مقاومت برشی باند اتصال با توجه به تغییر پارامترهایی همچون میزان مواد حباب‌ساز، نسبت آب به سیمان، عیار سیمان مصرفی و مدت زمان عمل‌آوری بتن مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق برای بررسی اثر چرخه‌های یخبندان و ذوب‌شدگی بر چسبندگی بین دو بتن جدید و قدیم آزمایشاتی در مجتمع آزمایشگاهی سهند تبریز انجام شده است. برای این منظور از نمونه ماسه با مدول نرمی $3/05$ با بزرگترین اندازه سنگدانه 25 میلی‌متر و جرم حجمی 1438 کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده است. جهت تعیین طرح اختلاط، با توجه به معلوم بودن عیار سیمان و نسبت آب به سیمان، مقدار آب هر اختلاط محاسبه می‌گردد. جهت تعیین طرح اختلاط بتن از روش طرح اختلاط آیین نامه ACI [۱۴] استفاده گردید.

۲-۱- پارامترهای مورد بررسی و نحوه ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

در این مطالعه برای بتن قدیمی از بتن با همان دانه بندی بتن جدید با عمر حداقل 90 روزه با عیار 350 و نسبت آب به سیمان $0/4$ استفاده شد. در اتصال ایجاد شده بین بتن قدیم و جدید از هیچ گونه عامل دیگری نظیر چسپ، الیاف یا عناصر رابط مانند میلگرد و غیره استفاده نگردیده است. بتن جسمی است که آب را به خود جذب می‌کند و در خود نگه می‌دارد. جذب آب از عوامل نامطلوب بوده و برای بتن مضر است، زیرا احتمال یخ زدگی و فرسایش را افزایش می‌دهد. تجربه نشان داده است که بتنی که هوادار باشد درصد جذب آبش به مراتب کمتر از بتن بدون هوا می‌باشد لذا در این تحقیق مقاومت برشی محل اتصال تحت اثر تغییر نسبت آب به سیمان نمونه‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین دمای صفر درجه سانتیگراد دمایی است که آب خالص در آن دما یخ می‌زند، درحالی‌که آب موجود در بتن که محلولی از نمک‌های گوناگون است در دمایی پایین‌تر از صفر درجه منجمد خواهد شد. از دیگر عوامل تأثیرگذار در دمای انجماد آب، اندازه حفره‌های آن است که با آب پر شده است. هر چه اندازه حفره کوچکتر باشد دمای

انجماد پایین‌تر خواهد بود عاملی که باعث می‌شود در دوره‌های انجماد و ذوب، تخریب بتن را به همراه داشته باشد. هنگامی که دمای آب به صفر درجه رسیده و یخ می‌زند حجم آب 9 درصد افزایش می‌یابد. با این افزایش حجم، آبی که هنوز در حفره به صورت سیال باقی مانده است در معرض فشار هیدرولیکی قرار می‌گیرد که چنانچه آب موجود در حفره راهی برای تخلیه این فشار هیدرولیکی نداشته باشد، باعث ایجاد تنش‌های کششی در بتن شده و تخریب بتن را به همراه خواهد داشت. در هر دوره با فشاری که به هر کدام از حفرات وارد می‌شود باعث انبساط حفره شده و باعث می‌شود که حفره در دوره‌های بعدی و در هنگام جذب آب مقداری بیشتری آب را در خود جای داده و افزایش حجم و فشار بیشتری را به بتن تحمیل کند. بنابراین تأثیر مواد حباب ساز روی مقاومت برشی محل اتصال تحت اثر چرخه انجماد و ذوب یکی از عوامل بسیار مهمی است که باید مورد بررسی قرار گیرد.

با توجه به مطالب بیان شده، متغیرهای مورد نظر در این تحقیق که در دو آزمایش تعیین مقاومت برشی و تعیین مقاومت کششی سطح اتصال از آن برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است ترکیبی از شرایط ذیل می‌باشد:

- عیار سیمان مصرفی در سه حالت 300 ، 350 و 400 کیلوگرم بر مترمکعب

- استفاده از مواد حباب ساز در 5 سطح 0 ، $0/1$ ، $0/2$ ، $0/3$ و $0/4$ درصد وزنی سیمان مصرفی

- استفاده از سه نسبت آب به سیمان (W/C) برابر $0/4$ ، $0/45$ و $0/5$

- شروع 300 چرخه ذوب و انجماد در 3 حالت (پس از 3 ، 7 و 28 روز عمل‌آوری بتن جدید)

در تمام حالت، آزمایشات فوق بر روی ترکیبات مورد اشاره به جهت مقایسه یک بار هم بدون اعمال چرخه‌های ذوب و انجماد صورت گرفته است. یعنی تعداد کل حالات آزمایش 540 مورد می‌باشد.

- در رابطه با از قبل خیس کردن سطح بتن قدیم نظرهای مختلفی برای فراهم آوردن بهترین شرایط وجود دارد. کمیته‌ی AASHTO-AGC-ARTBA به جز در روزهای خشک و گرم تابستان یک سطح خشک را توصیه می‌کند [۱۵]. درحالی‌که مؤسسه استاندارد کانادا توصیه می‌کند 24 ساعت قبل از ریختن بتن جدید سطح خیس شود. مؤسسه‌ی ملی راه سوئیس تو صیه می‌کند که بتن قدیمی

مصالح ضعیف دارد به طوری که هر دو استاندارد ASTM C233 و ASTM C494 روش الف را تجویز می‌کنند لذا در این تحقیق از همین روش استفاده گردید. دوره‌های ذوب و انجماد برای هردو روش شامل پائین آوردن دمای نمونه‌ها از ۴ درجه سانتیگراد به ۱۸- درجه سانتیگراد و بالا بردن آن از ۱۸- درجه سانتیگراد به ۴ درجه سانتیگراد می‌باشد که این امر به طور متناوب و در مدت زمانی که کمتر از ۲ ساعت و بیشتر از ۵ ساعت نباشد انجام می‌پذیرد. در روش الف زمان لازم برای افزایش دمای نمونه‌ها نباید از ۲۵٪ زمان لازم برای سرد شدن نمونه‌ها کمتر باشد. هیچگاه دمای نمونه‌ها نباید کمتر از ۱۹- درجه سانتیگراد و بیشتر از ۶ درجه سانتیگراد شود. شروع آزمایش یخ و انجماد با قرار دادن نمونه‌ها در آب گرم در ابتدای چرخه ذوب می‌باشد. آزمایش روی نمونه‌ها تا آنجا ادامه دارد که نمونه‌ها در معرض حداقل ۳۰۰ چرخه ذوب و انجماد قرار گیرند. هر چرخه ذوب-انجماد به مدت ۴ ساعت در نظر گرفته شد که نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت به حالت انجماد و ۱ ساعت در داخل آب جهت طی فرآیند ذوب قرار داده شد. در شکل (۱) مراحل ساخت نحوه قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه اعمال چرخه ذوب و انجماد نشان داده شده است.



شکل ۱- مراحل ساخت و نحوه قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه اعمال چرخه ذوب و انجماد

سانتی‌متر) استفاده شده است به گونه‌ای که طرفین قالب را با قراردادن مکعب بتنی قدیمی (پس از عمل‌آوری) و وسط قالب را از بتن جدید پر کرده و عمل‌آوری می‌کنیم. در شکل (۲) نمایی از نحوه اتصال بتن‌های جدید و قدیم و مراحل انجام آزمایش مقاومت برشی نمایش داده شده است.

۲-۳- نحوه انجام آزمایشات

جهت ارزیابی استحکام باند اتصال بتن قدیم و جدید از آزمایش مقاومت برشی استفاده شده است. در این آزمایش برای تهیه نمونه‌ها از یک قالب به ابعاد داخلی ۱۵×۱۵×۴۵ سانتی‌متر (طول ۴۵ سانتی‌متر، عرض و ارتفاع ۱۵

را برای ۴۸ ساعت خیس کرده اما در هنگام بتن‌ریزی سطح خشک داشته باشد که در اینجا به همین شکل اقدام گردید. ضمناً سایر شرایط محیطی اعم از دمای محیط، مدت زمان اختلاط در تمامی نمونه‌ها تقریباً یکسان می‌باشد. -سیمان مصرفی در تمامی نمونه‌ها از نوع سیمان صوفیان (پرتلند تیپ ۲) می‌باشد. -حباب ساز مصرفی از نوع s-2000 محصول شرکت سراپوش می‌باشد.

۲-۲- نحوه اعمال چرخه ذوب و انجماد

برای سنجش تاثیر چرخه‌های ذوب و یخبندان بر چسبندگی بین بتن‌های قدیم و جدید، نمونه‌ها را در دستگاه مخصوص این آزمایش (ساخت شرکت آزمون) با عملکرد مطابق با ASTM C666 قرار داده شد [۱۶]. استاندارد ASTM C666 برای بررسی چرخه‌های ذوب و انجماد بتن دو روش پیشنهاد داده است: الف- هردو فرایند یخ زدن و ذوب شدن نمونه‌ها در داخل آب انجام می‌شود. ب- فرایند یخ زدن در هوا و فرایند ذوب شدن در آب صورت می‌گیرد.

روش الف متداول‌تر روش است و عموماً به عنوان روشی شدیدتر در نظر گرفته می‌شود که قابلیت بیشتری در یافتن



شکل ۲- نحوه اتصال بتن‌های جدید و قدیم و مراحل انجام آزمایش مقاومت برشی

نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵، تحت شرایط آزمایش با چرخه ذوب و انجماد می‌باشد (N) برای حالت بدون چرخه ذوب و انجماد و A برای حالت با چرخه ذوب و انجماد). همچنین در شکل‌های این بخش، نمونه‌های بتنی با عیارهای سیمان مصرفی ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ترتیب با C300، C350 و C400 و دوره عمل‌آوری ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب با 3 day، 7 day و 28 day نمایش داده شده است.

مطابق شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) برای حالت با چرخه ذوب و انجماد، تنش برشی با افزایش درصد وزنی مواد حباب ساز روند افزایشی دارد ولی در آزمایشات بدون چرخه ذوب و انجماد، میزان تنش برشی با افزایش درصد وزنی مواد حباب ساز کاهش می‌یابد. در شرایط با چرخه ذوب و انجماد، برای بتن با درصد بالایی از مواد حباب ساز، هوای موجود در بتن باعث می‌شود هنگام افزایش فشارهیدرولیکی ناشی از یخبندان درحفرات، آب موجود در حفره راحت‌تر خود را به حفره‌های هوای اطراف رسانده و این فشار را کاهش دهد. به همین دلیل این نوع بتن دوام بیشتری در برابر سیکل‌های یخ و ذوب از خود نشان می‌دهد. در شرایط بدون چرخه ذوب و انجماد، با افزایش درصد وزنی مواد حباب‌ساز از صفر به ۰/۴، برای بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵، میزان تنش برشی برای دوره‌های عمل‌آوری و عیارهای مختلف سیمان به طور متوسط به ترتیب ۱۳، ۱۴ و ۱۳ درصد کاهش می‌یابد. ولی برای شرایط آزمایشگاهی با چرخه ذوب و انجماد، میزان تنش برشی با افزایش درصد وزنی مواد حباب ساز به طور چشمگیری افزایش می‌یابد به طوری که برای بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه و برای بتن با عیار ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، با افزایش درصد وزنی مواد حباب‌ساز از صفر به ۰/۴ میزان تنش برشی به ترتیب از مقدار بسیار ناچیز ۰/۳۲، ۰/۴۷ و صفر به ۲/۸۹، ۲/۹۹ و ۲/۷۲ مگاپاسکال می‌رسد.

در آزمایش مقاومت برشی، نمونه‌ها قبلاً در معرض چرخه‌های ذوب و یخبندان قرار گرفته و با ثابت نگه داشتن بتن قدیمی، نسبت به اعمال بار P روی بتن جدید اقدام شد. مقدار تنش برشی مطابق رابطه ۱ محاسبه می‌شود که در این رابطه، τ_a تنش برشی برحسب مگاپاسکال و a ابعاد مقطع برحسب میلی‌متر می‌باشد.

$$\tau_a = \frac{P}{2 \times a \times a} \quad (1)$$

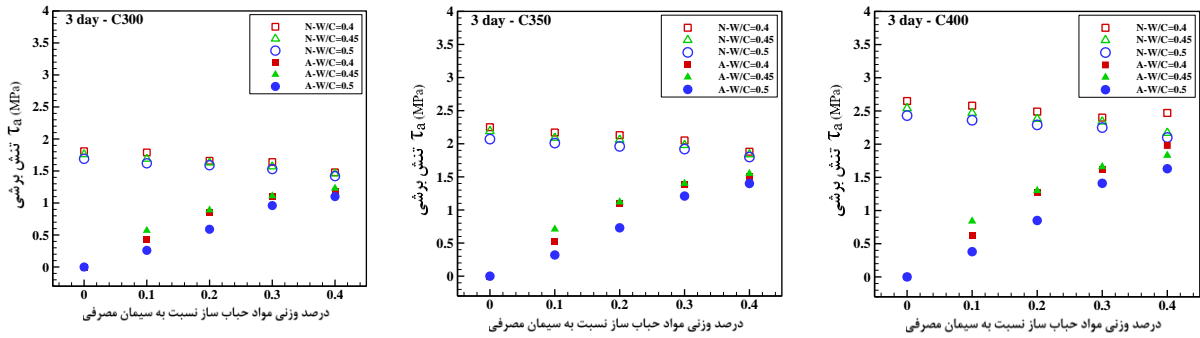
۳- نتایج و بحث

در این قسمت مقاومت برشی محل اتصال بتن جدید و قدیم تحت اثر تغییر پارامترهای مختلف (درصد وزنی مواد حباب ساز مصرفی، عیار سیمان، نسبت آب به سیمان و مدت زمان عمل‌آوری) در دو حالت با و بدون اعمال چرخه یخبندان و ذوب مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق برای اعمال چرخه انجماد و ذوب از ۳۰۰ چرخه استفاده شده است.

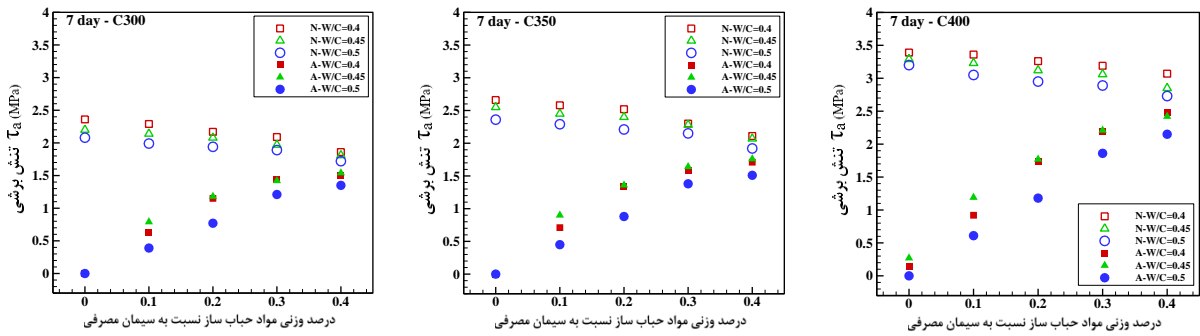
۳-۱- تاثیر توام نسبت آب به سیمان و درصد وزنی

مواد حباب‌ساز و بر روی مقاومت برشی

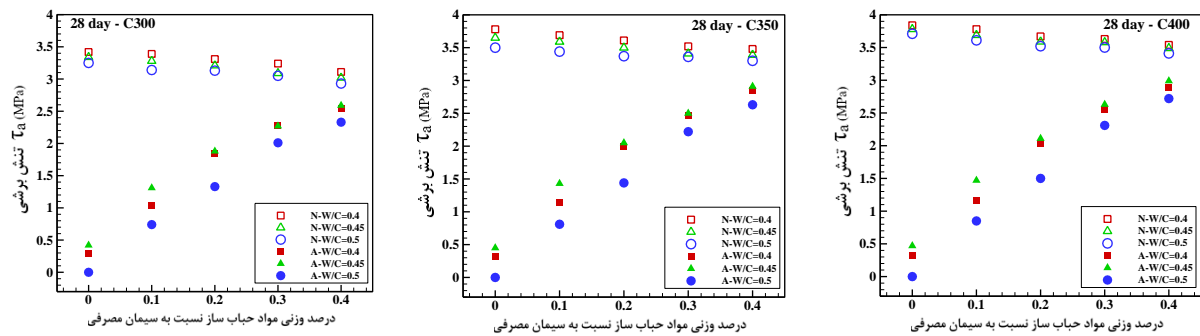
برای بررسی تاثیر توام درصد وزنی مواد حباب‌ساز و نسبت آب به سیمان بر روی مقاومت برشی و بررسی استحکام باند اتصال بتن قدیم و جدید از پنج سطح مواد حباب ساز، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵، برحسب درصد وزنی سیمان مصرفی و سه نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ در آزمایشات استفاده شد. در شکل (۳)، (۴) و (۵) میزان تغییرات مقاومت برشی نسبت به تغییر درصد وزنی مواد حباب ساز در سه دوره عمل‌آوری ۳، ۷ و ۲۸ روزه برای بتن با عیار سیمان مصرفی ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب نشان داده شده است. در این شکل‌ها $N-W/C=0.45$ ، $N-W/C=0.4$ و $N-W/C=0.5$ به ترتیب مربوط به نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ تحت شرایط آزمایش بدون چرخه ذوب و انجماد می‌باشد و $A-W/C=0.4$ ، $A-W/C=0.5$ و $W/C=0.45$ نیز به ترتیب مربوط به



شکل ۳- میزان تغییرات مقاومت برشی نسبت به تغییر درصد وزنی مواد حباب ساز در سه نسبت آب به سیمان برای عیارهای مختلف سیمان در دوره عمل‌آوری ۳ روزه

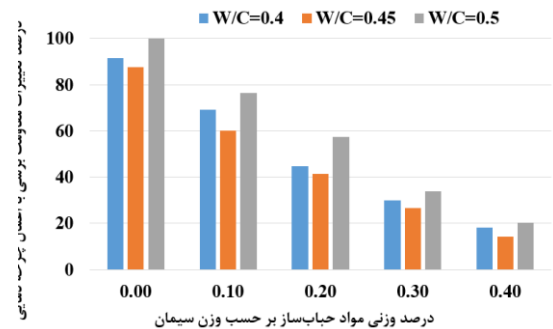


شکل ۴- میزان تغییرات مقاومت برشی نسبت به تغییر درصد وزنی مواد حباب ساز در سه نسبت آب به سیمان برای عیارهای مختلف سیمان در دوره عمل‌آوری ۷ روزه



شکل ۵- میزان تغییرات مقاومت برشی نسبت به تغییر درصد وزنی مواد حباب ساز در سه نسبت آب به سیمان برای عیارهای مختلف سیمان در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه

در شکل (۶)، درصد کاهش مقاومت برشی تحت اثر چرخه‌های انجماد و ذوب با توجه به تغییرات نسبت آب به سیمان و میزان مواد حباب ساز مصرفی در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه برای سه عیار سیمان مصرفی به طور متوسط نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود میزان مقاومت برشی پس از اعمال چرخه دمایی برای سه نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵، در نمونه بتن با حباب مصرفی صفر، به طور متوسط ۹۳ درصد کاهش می‌یابد و برای بتن با حباب مصرفی ۰/۴ به طور متوسط ۱۸



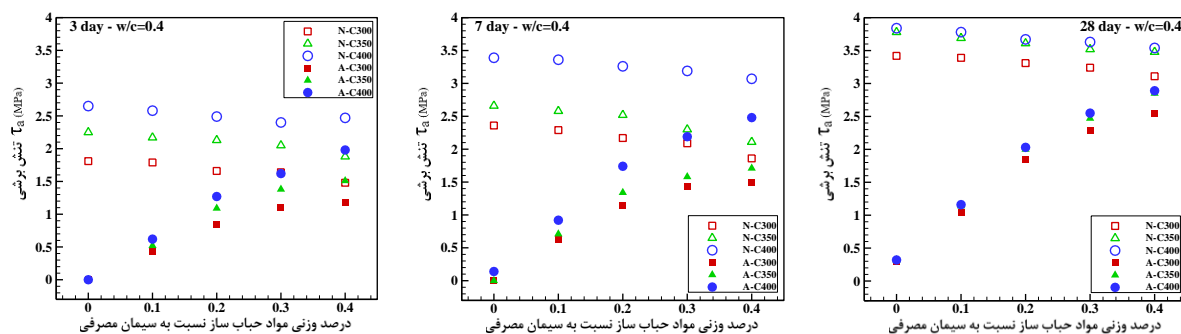
شکل ۶- درصد کاهش مقاومت برشی تحت اثر چرخه‌های دمایی برای نسبت آب به سیمان‌های مختلف

شکل‌های (۷)، (۸) و (۹)، برای حالت با چرخه ذوب و انجماد، تنش برشی با افزایش درصد وزنی مواد حباب ساز روند افزایشی دارد ولی در آزمایشات بدون چرخه ذوب و انجماد، میزان تنش برشی با افزایش درصد وزنی مواد حباب ساز کاهش می‌یابد به طوری که در شرایط بدون چرخه ذوب و انجماد، با افزایش درصد وزنی مواد حباب‌ساز از صفر به ۰/۴، برای بتن با عیار ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، میزان تنش برشی برای نسبت آب به سیمان‌ها و دوره‌های عمل‌آوری مختلف به طور متوسط به ترتیب، ۱۵، ۱۴ و ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. ولی برای شرایط آزمایشگاهی با چرخه ذوب و انجماد، میزان تنش برشی با افزایش درصد وزنی مواد حباب ساز به طور چشمگیری افزایش می‌یابد به طوری که برای بتن با عیار ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، با افزایش درصد وزنی مواد حباب‌ساز از صفر به ۰/۴، میزان تنش برشی به ترتیب ۵۱۷، ۵۴۷ و ۵۳۶ درصد افزایش می‌یابد (میزان تنش برشی از مقدار بسیار ناچیز ۰/۴۲، ۰/۴۵ و ۰/۴۷ به ۲/۵۹، ۲/۹۱ و ۲/۹۹ مگاپاسکال می‌رسد).

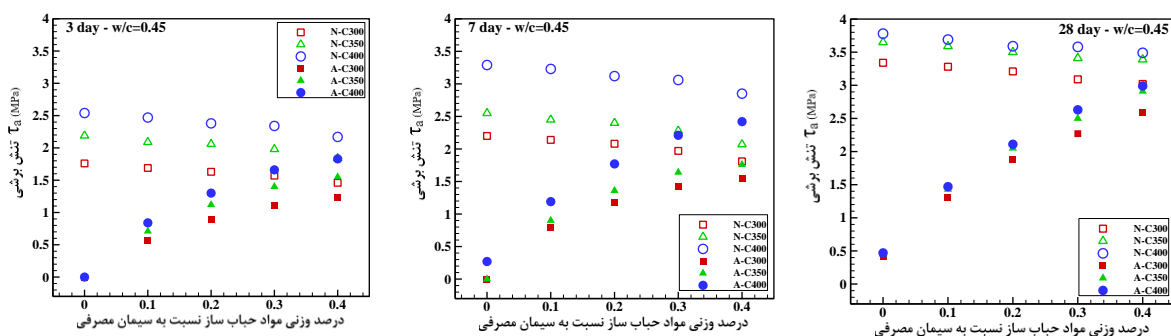
درصد کاهش می‌یابد. مطابق شکل (۶) بیشترین و کمترین درصد کاهش مقاومت برشی در هر درصد وزنی مواد حباب ساز، به ترتیب مربوط به نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ می‌باشد.

۳-۲- تاثیر توام عیارهای مختلف سیمان مصرفی و درصد وزنی مواد حباب‌ساز بر روی مقاومت برشی

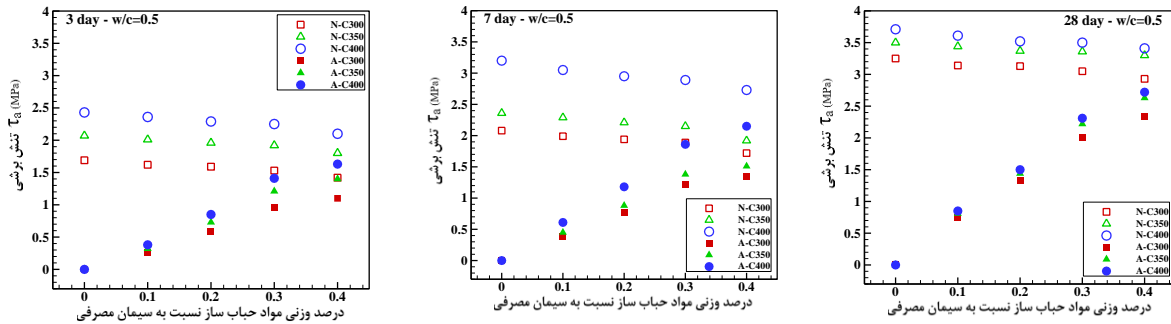
برای بررسی میزان تغییرات مقاومت برشی تحت اثر عیارهای مختلف سیمان مصرفی و درصد وزنی مواد حباب‌ساز، از بتن با عیار سیمان مصرفی ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده است. در شکل‌های ۷، ۸ و ۹، تاثیر توام عیارهای مختلف سیمان مصرفی و درصد وزنی مواد حباب‌ساز بر روی مقاومت برشی نشان داده شده است. در این شکل‌ها، N-C300، N-C350 و N-C400 به ترتیب مربوط به نمونه‌های بتنی با عیار سیمان ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تحت شرایط آزمایش بدون چرخه ذوب و انجماد می‌باشد و A-C300، A-C350 و A-C400 نیز به ترتیب مربوط به نمونه‌های بتنی با عیار سیمان ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تحت شرایط آزمایش با چرخه ذوب و انجماد می‌باشد. مطابق



شکل ۷- میزان تغییرات مقاومت برشی نسبت به تغییر درصد وزنی مواد حباب ساز در عیارهای مختلف سیمان برای سه دوره عمل‌آوری ۳، ۷ و ۲۸ روزه در نسبت آب به سیمان ۰/۴



شکل ۸- میزان تغییرات مقاومت برشی نسبت به تغییر درصد وزنی مواد حباب ساز در عیارهای مختلف سیمان برای سه دوره عمل‌آوری ۳، ۷ و ۲۸ روزه در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵



شکل ۹- میزان تغییرات مقاومت برشی نسبت به تغییر درصد وزنی مواد حباب ساز در عبارهای مختلف سیمان برای سه دوره عمل آوری ۳، ۷ و ۲۸ روزه در نسبت آب به سیمان ۰/۵

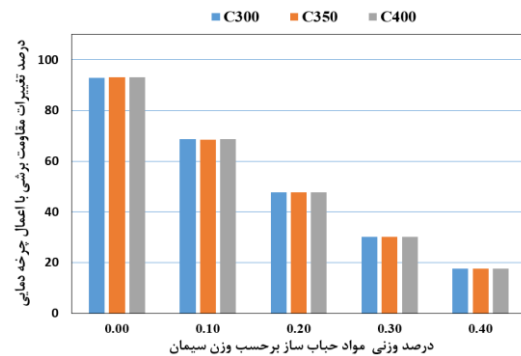
حباب مصرفی صفر، به طور متوسط ۹۳ درصد کاهش می‌یابد و برای بتن با حباب مصرفی ۰/۴ به طور متوسط ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۱۰، برای بتن با میزان مواد حباب ساز مختلف، تغییر عیار سیمان مصرفی، تغییر محسوسی در کاهش مقاومت برشی تحت اثر چرخه دمایی ایجاد نمی‌کند.

۳-۳- تاثیر توام مدت زمان عمل آوری و درصد وزنی مواد حباب‌ساز بر روی مقاومت برشی

در این قسمت از تحقیق اثر توام مدت زمان عمل آوری و درصد وزنی مواد حباب‌ساز بر روی مقاومت برشی مطابق شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود برای نمونه‌های بتن با میزان مواد حباب‌ساز مختلف، در هر نسبت آب به سیمان، با افزایش مدت زمان عمل آوری میزان مقاومت برشی برای با و بدون چرخه ذوب و انجماد به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. برای شرایط با چرخه ذوب و انجماد اثر مدت زمان عمل آوری روی افزایش مقاومت برشی، برای نمونه بتن با میزان مواد حباب ساز ۰/۴ بسیار بیشتر از بتن با میزان مواد حباب ساز صفر می‌باشد ولی برای شرایط بدون چرخه ذوب و انجماد، اثر مدت زمان عمل آوری روی افزایش مقاومت برشی، برای نمونه بتن با میزان مواد حباب ساز مختلف تقریباً یکسان است.

در شرایط با چرخه ذوب و انجماد، منظور از مقاومت در مقابل یخبندان، مقاومت بتن سخت شده است. یعنی اگر بتن سخت شده هوادار باشد، چنانچه آب به آن نفوذ کند و یخ بزند پایداری بهتری نسبت به بتنی که بدون هوا است از خود نشان می‌دهد. بدیهی است که هوادار بودن بتن تاثیری روی یخ زدن بتن تازه ندارد. در حقیقت عملکرد حباب‌های

همانطور که در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) مشاهده می‌شود در شرایط آزمایشگاهی با چرخه ذوب و انجماد، افزایش درصد وزنی مواد حباب‌ساز، بیشترین تاثیر را در دوره عمل آوری ۲۸ روزه روی تنش برشی دارد و با افزایش درصد وزنی مواد حباب‌ساز از صفر به ۰/۴، اختلاف مقدار تنش برشی در شرایط با و بدون چرخه ذوب و انجماد کم می‌شود. بیشترین کاهش مقاومت برشی باند اتصال پس اعمال چرخه دمایی در میزان حباب ساز مصرفی صفر می‌باشد، به طوری که برای نمونه ۲۸ روزه بتن، در نسبت آب به سیمان و عبارهای مختلف، میزان مقاومت برشی به طور متوسط ۹۳ درصد کاهش می‌یابد.

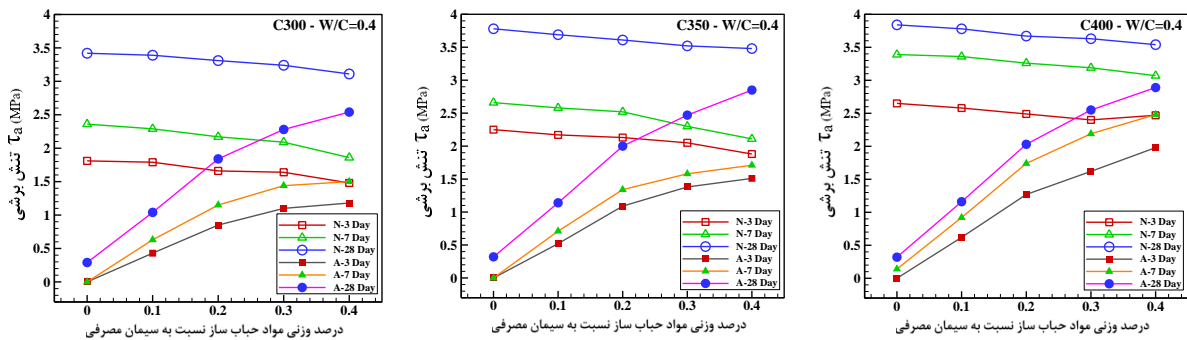


شکل ۱۰- درصد کاهش مقاومت برشی تحت اثر چرخه‌های دمایی برای عبارهای مختلف سیمان

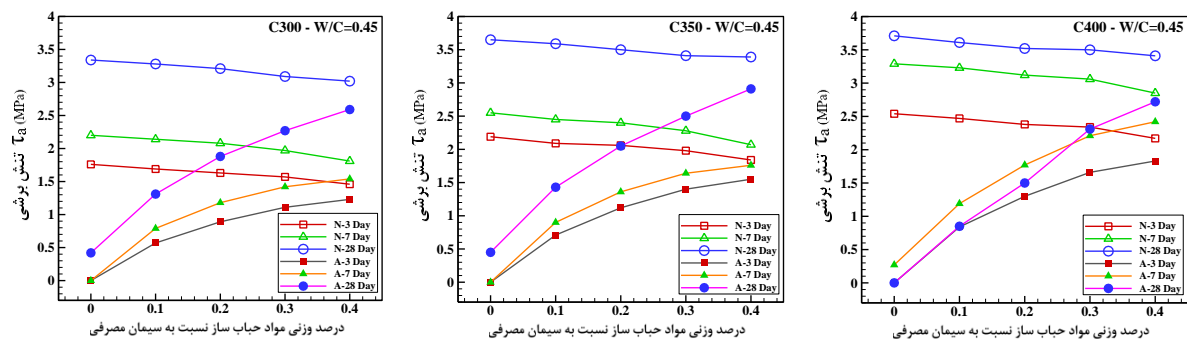
در شکل (۱۰)، درصد کاهش مقاومت برشی تحت اثر چرخه‌های انجماد و ذوب با توجه به تغییر عیار سیمان و میزان مواد حباب ساز مصرفی در دوره عمل آوری ۲۸ روزه به طور متوسط برای سه نسبت آب به سیمان نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود میزان مقاومت برشی پس از اعمال چرخه دمایی برای سه عیار ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نمونه بتن با

نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود میزان مقاومت برشی پس از اعمال چرخه دمایی برای سه دوره عمل‌آوری ۳، ۷ و ۲۸ روزه در نمونه بتن با حباب مصرفی صفر، به طور متوسط ۹۶ درصد کاهش می‌یابد و برای بتن با حباب مصرفی ۰/۴ به طور متوسط ۱۶ درصد کاهش می‌یابد. مطابق شکل (۱۴) بیشترین و کمترین درصد کاهش مقاومت برشی در بتن با هر درصد وزنی مواد حباب ساز به غیر از درصد وزنی صفر، به ترتیب مربوط به دوره عمل‌آوری ۲۸ و ۷ روزه می‌باشد.

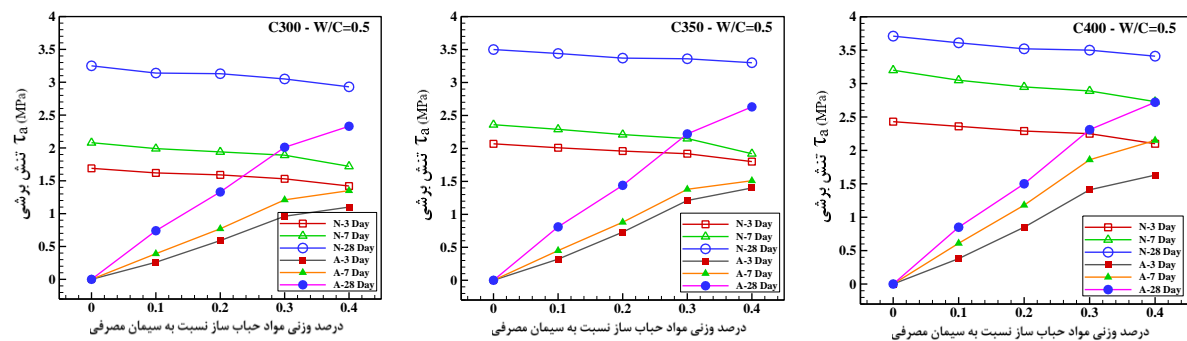
هوا به این نحو است که ضمن آن که نفوذ آب بتن را محدودتر می‌کنند، اگر چنانچه آب به مقدار کمی هم در داخل بتن نفوذ کرد و در اثر کاهش دما این آب یخ زد، این حفره‌های کوچک هوا افزایش حجم ناشی از یخ زدن را جبران کرده و مانع خرابی بتن می‌شوند. در شکل (۱۴)، درصد کاهش مقاومت برشی تحت اثر چرخه‌های انجماد و ذوب با توجه به تغییر مدت زمان عمل‌آوری و میزان مواد حباب ساز مصرفی در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، برای سه عیار سیمان مصرفی به طور متوسط



شکل ۱۱- میزان تغییرات مقاومت برشی با توجه به تغییر درصد وزنی مواد حباب ساز در دوره‌های عمل‌آوری متفاوت برای عیارهای مختلف سیمان در نسبت آب به سیمان ۰/۴



شکل ۱۲- میزان تغییرات مقاومت برشی با توجه به تغییر درصد وزنی مواد حباب ساز در دوره‌های عمل‌آوری متفاوت برای عیارهای مختلف سیمان در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵



شکل ۱۳- میزان تغییرات مقاومت برشی با توجه به تغییر درصد وزنی مواد حباب ساز در دوره‌های عمل‌آوری متفاوت برای عیارهای مختلف سیمان در نسبت آب به سیمان ۰/۵

- برای شرایط آزمایشگاهی با چرخه ذوب و انجماد، میزان تنش برشی با افزایش درصد وزنی مواد حباب ساز به طور چشمگیری افزایش می‌یابد به طوری که برای بتن با عیار ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه، با افزایش درصد وزنی مواد حباب‌ساز از صفر به ۰/۴ میزان تنش برشی به ترتیب از مقدار بسیار ناچیز ۰/۳۲، ۰/۴۷ و صفر به ۲/۸۹، ۲/۹۹ و ۲/۷۲ مگاپاسکال می‌رسد.

- تاثیر افزایش عیار سیمان از ۳۰۰ به ۴۰۰ در مقاومت باند اتصال بیش از تاثیر کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۵ به ۰/۴ می‌باشد.

- تاثیر استفاده از ۰/۴ درصد وزنی مواد حباب ساز در اتصال باند بیش از تاثیر افزایش عیار سیمان از ۳۰۰ به ۴۰۰ و همچنین بیش از کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۵ به ۰/۴ می‌باشد.

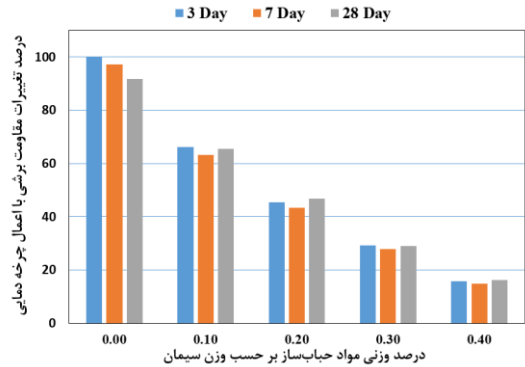
- در برخی نمونه‌های با میزان حباب هوا ساز صفر پس از اعمال ۳۰۰ چرخه ذوب و انجماد عملاً مقاومت برشی کسب نگرديد.

- میزان مقاومت برشی پس از اعمال چرخه دمایی برای سه دوره عمل‌آوری ۳، ۷ و ۲۸ روزه در نمونه بتن با حباب مصرفی صفر، به طور متوسط ۹۶ درصد کاهش می‌یابد و برای بتن با حباب مصرفی ۰/۴ به طور متوسط ۱۶ درصد کاهش می‌یابد.

- با استفاده از مواد حباب ساز تا ۰/۴ وزن سیمان مصرفی و اعمال چرخه دمایی، مقاومت اتصال در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۴۵ دارای اختلاف بسیار ناچیزی می‌باشند (مخصوصاً در نمونه‌های با شروع چرخه دمایی پس از ۲۸ روز عمل‌آوری).

- بیشترین مقاومت اتصال پس از اعمال چرخه‌های ذوب و انجماد در نمونه‌های پس از ۳ روز عمل‌آوری در نسبت آب به سیمان ۰/۴، عیار ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و استفاده از ۰/۴ درصد وزن سیمان مصرفی به عنوان حباب ساز می‌باشد.

- در نمونه‌های با ۲۸ روز عمل‌آوری، بیشترین مقاومت اتصال مربوط به نمونه‌های با عیار ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و استفاده از ۰/۴ درصد وزن سیمان مصرفی به عنوان حباب ساز می‌باشد.



شکل ۱۴- درصد کاهش مقاومت برشی تحت اثر چرخه‌های دمایی برای مدت زمان عمل‌آوری مختلف

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، تاثیر چرخه‌های یخبندان و ذوب بر مقاومت برشی بین بتن جدید و قدیم با توجه به تغییر درصد وزنی مواد حباب ساز توام با تغییر نسبت آب به سیمان، عیار سیمان مصرفی و مدت زمان عمل‌آوری بتن با استفاده از مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

- برای حالت با و بدون چرخه ذوب و انجماد، تنش برشی با افزایش درصد وزنی مواد حباب ساز به ترتیب روند افزایشی و کاهشی دارد.

- در شرایط بدون چرخه ذوب و انجماد، با افزایش درصد وزنی مواد حباب‌ساز از صفر به ۰/۴، برای بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵، میزان تنش برشی برای دوره‌های عمل‌آوری و عیارهای مختلف سیمان به طور متوسط به ترتیب، ۱۳، ۱۴ و ۱۳ درصد کاهش می‌یابد.

- مقدار متوسط مقاومت برشی برای سه نسبت آب به سیمان، در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه پس از اعمال چرخه دمایی، در نمونه بتن با حباب مصرفی صفر و ۰/۴، به طور متوسط ۹۳ و ۱۸ درصد کاهش می‌یابد و بیشترین و کمترین درصد کاهش مقاومت برشی در هر درصد وزنی مواد حباب‌ساز، به ترتیب مربوط به نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ می‌باشد.

- برای شرایط آزمایشگاهی بدون چرخه ذوب و انجماد، با افزایش درصد وزنی مواد حباب‌ساز از صفر به ۰/۴، برای بتن با عیار ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، میزان تنش برشی برای نسبت آب به سیمان‌ها و دوره‌های عمل‌آوری مختلف به طور متوسط به ترتیب، ۱۵، ۱۴ و ۱۱ درصد کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] kheyroddin, Ali, and Nazanin Kashiha. "Investigation of Structural Behavior of Post-Tensioned Slab-Column Connection Subjected to Punching Shear". *Modeling in Engineering* 8, no. 23 (2011): 37-59 (in Persian).
- [2] Lotfollahi-Yaghin, M.A, and Mojtaba Ziyaeioun. " Analytical Study of Concrete-Filled Double Skin Steel Tubular Columns Under Interaction of Bending Moment and Axial Load". *Modeling in Engineering* 10, no. 31 (2012): 15-23 (in Persian).
- [3] Sabagh Renani, Mehdi, M.T Kazemi, and Mansour Asgari. "Constitutive Model for Estimating Concrete Strength Using Ultrasonic Test Considering Mixing Ratios". *Modeling in Engineering* 17, no. 56 (2019): 367-374 (in Persian).
- [4] Anon. Guide to Concrete Repair, Technical Service Center. USBR, 2000a.
- [5] Kearsley, E. P, and P. J. Wainwright. "The effect of porosity on the strength of foamed concrete". *Cement Concrete Res* 32 (2002): 233-239.
- [6] Shin, H. C, and Z. Wan. "Interfacial properties between new and old concretes". In 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona, Italy (2010).
- [7] Neshvadian Bakhsh, Keivan. "Evaluation of Bond Strength between Overlay and Substrate in Concrete Repairs". *Architecture and the Built Environment*, KTH Royal Institute of Technology (2010).
- [8] Zhifu, Wan. "Interfacial shear bond strength between old and new concrete". Master's Thesis, Louisiana State University (2011).
- [9] Tayeh, Bassam, B. H. Abu Bakar, Megat Azmi Megat Johari, and Yen Lei Voo. "Evaluation of Bond Strength between Normal Concrete Substrate and Ultra High-Performance Fiber Concrete as a Repair Material". *Procedia Engineering* 54, no. 21 (2013): 554 – 563.
- [10] C.J. Rosen, "Shear Strength at the Interface of Bonded Concrete Overlays". Master's Theses (2016).
- [11] Vandhiyan, R, and M. Kathiravan. "Effect of Bonding Chemical on Bond Strength Between Old and New Concrete". *SSRG International Journal of Civil Engineering*, Structural Engineering Department of Civil Engineering, PSNA College of Engineering & Technology, Dindigul, Tamil Nadu, India (2017).
- [12] Croes, L. "Behavior of unreinforced concrete-to-concrete interfaces under shear loading". Master's Thesis, Eindhoven University (2019).
- [13] Sharma, S, S. Aaleti, and T. N. Dao. "An Experimental and Statistical Study of Normal Strength Concrete (NSC) to Ultra High-Performance Concrete (UHPC) Interface Shear Behavior". In *International Interactive Symposium on Ultra-High-Performance Concrete*, Iowa State University Digital Press (2019).
- [14] ACI Committee 201. "Guide to Durable Concrete". American Concrete Institute (2001).
- [15] AASHTO T259. "Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC (2002).
- [16] ASTM. "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing". ASTM C666, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia (2003).