Iranian Concrete Society

The Effect of Reducing Concrete Temperature by Ice on the Amount of Superplasticizer and the Properties of Fresh and Hardened Self-Compacting Concrete

Babak Ahmadi1*, *Farhad Avatefi Hoveyda[2], Amirhomayoun Sabeti Motlagh[2], MohammadJavad Mohammadi[2], Mohsen Farrokhi[2], Abolfazl Vosoughi[2], Babak Foroutanmehr[2]*
1- Assistant Professor, Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran
2- Fahab Beton ready-mixed concrete producer company, Tehran, Iran
b.ahmadi@bhrc.ac.ir

Research paper

Abstract
As the industrial production of Self-Compacting Concrete (SCC) in the form of ready-mixed concrete faces challenges in different weather conditions, it is necessary to consider mixing, transportation, and casting to achieve the desired workability, mechanical, and durability properties. As a result of improper compaction and placement of SCC, a decrease in workability can result in failure to achieve the desired strength and durability. It was found that replacing mixing water with ice with 0, 10, 30 and 60% reduced the temperature of fresh concrete by approximately 1, 3, and 12°C compared to the control mix design after 110 minutes from the start of mixing. The superplasticizer amount and concrete properties were examined. After reducing the temperature of fresh concrete and maintaining its fluidity, the amount of superplasticizer decreased by 62.4%, and the result of its decrease with an increase in the amount of ice, increased the final production cost by 5.4%. In general, reducing the temperature of fresh concrete improved the rheological properties of SCC. When compared to the control mix design, the use of ice did not significantly alter the compressive strength, water absorption, and electrical resistance, except for a 17% increase in water absorption due to replacing 60% of the ice.
Keywords*: Self-Compacting Concrete, Fresh concrete temperature, Ice, Superplasticizer, concrete properties.*

****Corresponding Author:*** *Babak Ahmadi*
Ahmadi, B., Avatefi Hoveyda, F., Sabetimotlagh, A., Mohammadi, M. J., Farrokhi, M., Vosoghi, A., Foroutanmehr, B. The Effect of Reducing Concrete Temperature by Ice on the Amount of Superplasticizer and the Properties of Fresh and Hardened Self-Compacting Concrete. Journal of Concrete Structures and Materials*, 2022; 7(2): 142-158.*
http://doi.org/10.30478/jcsm.2023.376184.1308
2538-5828/ *© 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society*
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

دریافت مقاله: ۱۹-۰۹-۱۴۰۱
پذیرش مقاله: ۰۱-۱۲-۱۴۰۱

انجمن علمی بتن ایران

تأثیر کاهش دمای بتن توسط یخ بر مقدار فوق روان‌کننده و خواص بتن تازه و سخت‌شده خودتراکم

بابک احمدی
استادیار مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران (نویسنده مسئول)
b.ahmadi@bhrc.ac.ir

فرهاد عواطفی‌هویدا
شرکت تولیدکننده بتن آماده فهاب بتن، تهران، ایران

امیرهمایون ثابتی‌مطلق
شرکت تولیدکننده بتن آماده فهاب بتن، تهران، ایران

محمدجواد محمدی
شرکت تولیدکننده بتن آماده فهاب بتن، تهران، ایران

محسن فرخی
شرکت تولیدکننده بتن آماده فهاب بتن، تهران، ایران

ابوالفضل وثوقی
شرکت تولیدکننده بتن آماده فهاب بتن، تهران، ایران

بابک فروتن‌مهر
شرکت تولیدکننده بتن آماده فهاب بتن، تهران، ایران

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

چکیده

با توجه به چالش‌های اجرا در شرایط آب‌وهوایی مختلف در تولید صنعتی بتن خودتراکم به‌صورت بتن آماده، لازم است شرایطی در ساخت، حمل و بتن‌ریزی در نظر گرفته شود تا خواص مطلوب کارایی، مکانیکی و دوام برآورده شود. افت روانی ناشی از مشکلات اجرایی می‌تواند با تراکم و جایگیری نامناسب بتن خودتراکم منجر به عدم دستیابی به مقاومت و دوام مطلوب شود. در این تحقیق، با جایگزینی‌های صفر، ۱۰، ۳۰ و ۶۰٪ از آب آزاد مخلوط با یخ، پس از گذشت ۱۱۰ دقیقه از شروع ساخت، تأثیر کاهش دمای بتن تازه به مقادیر تقریباً ۱، ۳ و ۱۲ درجه سلسیوس نسبت به طرح مخلوط شاهد بر مقدار فوق روان‌کننده و خواص بتن بررسی شد. کاهش دمای بتن تازه علاوه‌بر حفظ روانی بتن خودتراکم، باعث کاهش مقدار فوق روان‌کننده تا ۶۲/۴٪ و برآیند کاهش آن با افزایش مقدار یخ، باعث افزایش حداکثر ۵/۴٪ هزینه نهایی تولید گردید. به‌طورکلی، کاهش دمای بتن تازه باعث بهبود خواص رئولوژی بتن خودتراکم شد. در خواص بتن سخت‌شده، به‌جز افزایش تقریباً ۱۷٪ جذب آب در جایگزینی ۶۰٪ یخ، استفاده از یخ منجر به تغییر قابل توجه در نتایج مقاومت فشاری، جذب آب و مقاومت الکتریکی بتن خودتراکم نسبت به طرح مخلوط شاهد نشد.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، دمای بتن تازه،یخ، فوق روان‌کننده، خواص بتن

۱. مقدمه

بتن خودتراکم[1] (*SCC*)، بتنی با قابلیت‌های پرکردن[2]، عبور[3] و پایداری[4] است (۱ و ۲). این بتن در سال ۱۹۸۶ میلادی توسط اوکامورا[5] در ژاپن ابداع شد (۳)، سپس در دانشگاه توکیو، ازاوا و ماکوا[6] (۱۹۸۹) روی کارایی آن مطالعات جامعی انجام شد (۴). بتن خودتراکم به دلیل داشتن ویژگی‌های مناسب، برای استفاده در صنعت مزیت‌های مختلفی را ایجاد می‌کند. برخی از مزایای استفاده از بتن خودتراکم در صنعت شامل عدم نیاز به تراکم با استفاده از لرزاننده‌های داخلی و کاهش نیاز به کارگران بتن‌ریزی به‌ویژه برای تراکم، افزایش سرعت اجرا، سهولت در بتن‌ریزی، کارپذیری بهتر نسبت به بتن‌های معمولی، بهبود کیفیت سطح بتن و نیاز کمتر به پرداخت سطح، اجرای مقاطع با اشکال پیچیده و یا مقاطع با تراکم میلگرد زیاد، کاهش نیاز به جابه‌جایی لوله‌های پمپ، کاهش آلایندگی‌های صوتی و ایجاد امکان بتن‌ریزی در ساعات مختلفی از شبانه‌روز می‌باشد (۵). دستیابی به بتن خودتراکم نتیجه افزایش کاربرد افزودنی‌های شیمیایی مانند فوق روان‌کننده‌ها در بتن است. با استفاده از مقادیر مشخصی از این افزودنی‌ها می‌توان علاوه بر دستیابی به روانی زیاد، از جداشدگی سنگ‌دانه‌ها در بتن خودتراکم جلوگیری کرد (۶). درواقع، چالش بتن خودتراکم ایجاد این تعادل بین افزایش روانی و قابلیت عبور با عدم وقوع جداشدگی است. با بررسی خواص رئولوژی بتن خودتراکم (تنش تسلیم و لزجت) می‌توان با استفاده از مصالح معمول بتن، افزودنی‌های معدنی و شیمیایی با نسبت‌های خاص، به خواص موردنیاز بتن خودتراکم دست‌یافت.

برای تولید، حمل و تخلیه بتن خودتراکم در صنعت بتن آماده، لازم است تا شرایطی فراهم شود تا بتوان خواص کارایی، مکانیکی و دوام این بتن برآورده کرد (۷). در روند حمل و تحویل بتن آماده، تأخیر زمانی بابت ترافیک، مسافت زیاد، تأخیر در بتن‌ریزی، مخلوط‌کردن و عملیات نهایی غیر قابل اجتناب است. با طولانی شدن زمان حمل در شرایط آب و هوایی گرم، ممکن است بخشی از آب مخلوط در بتن تبخیر شود و سرعت گیرش افزایش یابد و متعاقباً باعث افت روانی بتن خودتراکم شود. افت روانی در بتن خودتراکم علاوه بر کاهش کارایی می‌تواند با تراکم و جایگیری نامناسب منجر به عدم دستیابی به مقاومت و دوام لازم شود (۸ و ۹). طبق نظر کوسترزانوفسکا- سیدلارز و گولاسفسکی[7] (۱۰) در این مدت‌زمان، خواص رئولوژی بتن خودتراکم تغییر می‌کند، به‌طوری‌که قطر جریان کاهش (تنش تسلیم افزایش می‌یابد) و لزجت افزایش می‌یابد. صالی[8] و همکاران (۱۱) اثر زمان و دما را روی خواص بتن تازه دو طرح مخلوط بتن خود تراکم بر اساس ترکیب سیمان با پودر سنگ‌آهک و سیمان با پوزولان طبیعی بررسی کردند. با انجام آزمایش T_{500} و *V-funnel* در مدت‌زمانی که دما بین ۳۴ تا ۴۰ درجه سلسیوس متغیر بود، حفظ سیالیت[9] (جریان) بررسی شد. مطابق آزمایش‌ها، مشاهده شد که خواص جریان به‌شدت تحت تأثیر اثر ترکیبی دما و زمان است، به‌طوری‌که جریان‌پذیری با گذشت زمان به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. مطابق نتایج، این بتن خودتراکم بعد از گذشت ۳۰ دقیقه ویژگی خود تراکم بودن خود را از دست داد. بعد از گذشت ۴۵ دقیقه به دلیل کاهش قطر روانی به کمتر از ۵۰۰ میلی‌متر، اندازه‌گیری T_{500} غیرممکن شد. زمان قیف V با اثر ترکیبی زمان مخلوط کردن و دما افزایش یافت. علاوه‌براین، زمان تخلیه در قیف V با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی بدون توجه به زمان

---

[1] *Self-Consolidating Concrete*
[2] *Filling ability*
[3] *Passing ability*
[4] *Stability*
[5] *Okamura*
[6] *Ozawa & Maekawa*
[7] *Kostrzanowska-Siedlarz and Gołaszewski*
[8] *Salhi*
[9] *Fluidity*

مخلـوط کـردن کـاهش یافـت. گولاسفسـکی و همکـاران (۱۲) بـا بررسـی چهـار روش بـرای طراحـی، مـلات‌هـای معـادل بـا فـرض پیـروی از سـیال بینگهـام[10] ارائـه کردنـد. ایـن مـدل‌هـا حساسـیت بـتن بـه دمـا، انتخـاب فـوق روان‌کننـده و تغییـرات نسبت آب به سیمان را نشان دادند.

یکی از راهکارهای جلـوگیری از افـت روانـی در بـتن خـودتراکم در مـدت زمـان حمـل و تخلیـه بـتن، کـاهش دمـای بـتن تـازه است که در این تحقیق با هـدف بررسـی جـایگزینی بخشـی از آب طـرح مخلـوط بـا یـخ، فعالیـت‌هـای آزمایشـگاهی انجـام شـد تا تأثیر استفاده از یخ و کاهش دمـای بـتن بـر مقـدار فـوق روان‌کننـده و هزینـه تمـام‌شـده مشـاهده شـود. همچنـین بـه‌منظـور کنتـرل مشخصـات مکـانیکی و دوام بـتن خـودتراکم، آزمـایش‌هـای مقاومـت فشـاری، جـذب آب و مقاومـت الکتریکـی انجـام شـد. بـه دلیـل شـرایط حمـل و تخلیـه در شـهرهای بـزرگ ماننـد تهـران، بـه‌منظـور شـبیه‌سـازی در برنامـه آزمایشـگاهی ایـن تحقیق، مدت‌زمان‌های حمل به مدت ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۱۰ دقیقه بعد از ساخت درنظرگرفته شد.

۲. برنامه آزمایشگاهی

۲. ۱. مشخصات مصالح

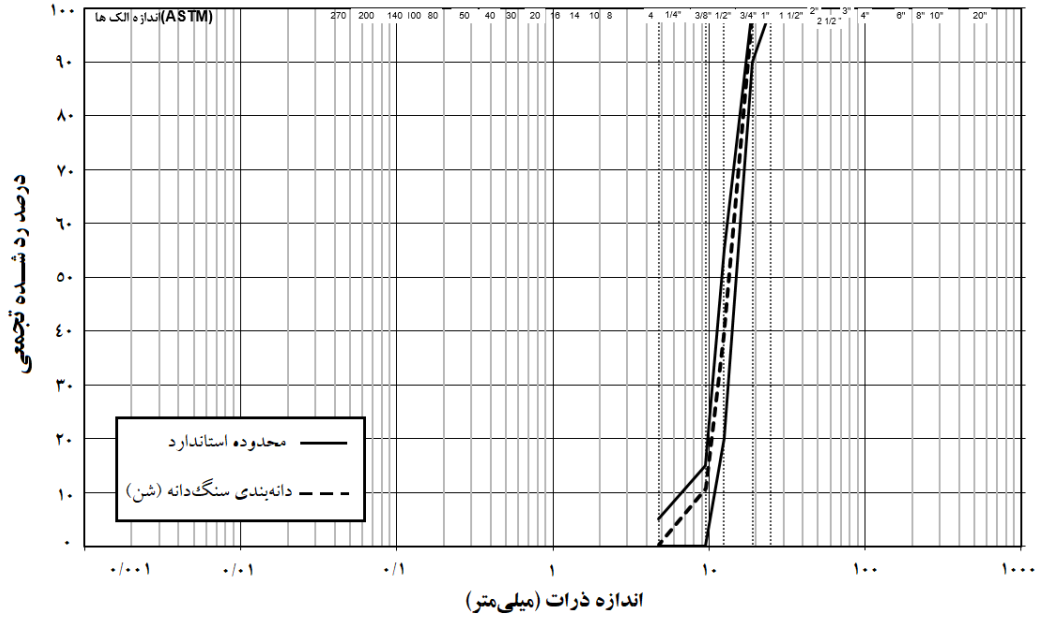
به‌منظور ساخت بتن خـودتراکم از سـیمان پرتلنـد تهـران نـوع دو اسـتفاده شـد کـه مشخصـات شـیمیایی، فیزیکـی و مکـانیکی آن در جدول ۱ ارائه و با محدوده‌های مجاز استاندارد ملی ۳۸۹ (۱۳) مقایسه شده‌است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی سیمان

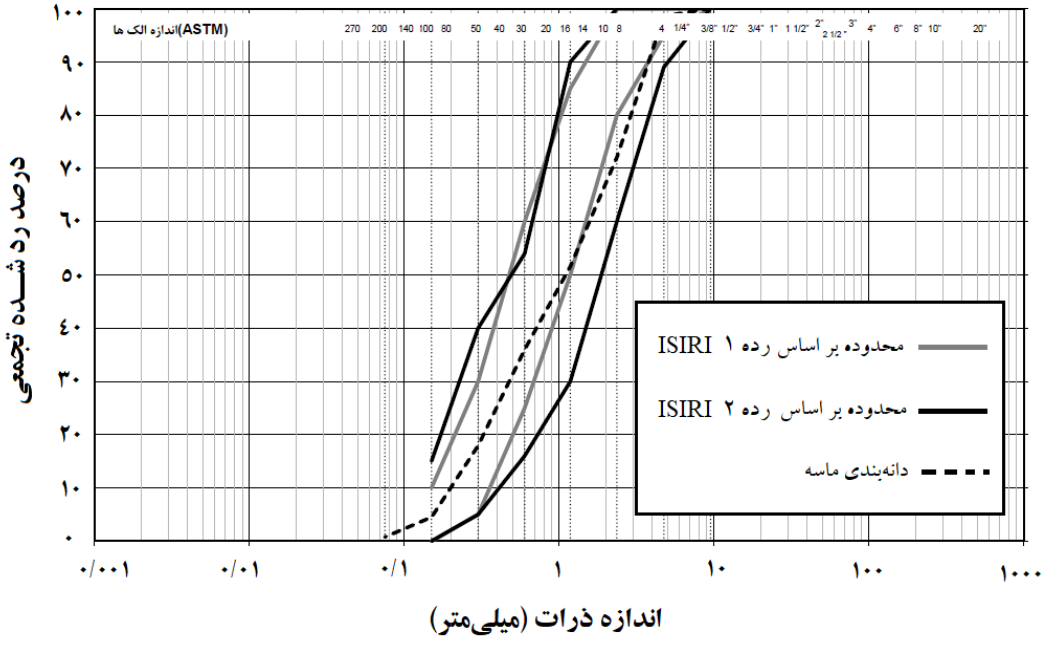
مشخصات	نـــــام ترکیب	علامت اختصاری	مقـــــدار	ISIRI 389
شیمیایی	دی‌اکسید سیلیسیوم	SiO_2	۲۰/۹	-
	اکسید آهن	Fe_2O_3	۳/۸	حداکثر ۶
	اکسید آلومینیوم	Al_2O_3	۴/۹	حداکثر ۶
	اکسید کلسیم	CaO	۶۴/۲	-
	تری اکسید سولفور	SO_3	۲/۴	حداکثر ۳
	اکسید منیزیم	MgO	۲/۶	حداکثر ۶
	اکسید سدیم	Na_2O	۰/۲۲	-
	اکسید پتاسیم	K_2O	۰/۴۵	-
	افت ناشی از سرخ شدن	L.O.I	۲/۴۸	حداکثر ۳
	سیلیکات‌تری‌کلسیم	C_3S	۵۸	-
	سیلیکات‌دی‌کلسیم	C_2S	۱۶	-
	آلومینات‌تری‌کلسیم	C_3A	۷	حداکثر ۸
	آلومینوفریت‌تتراکلسیم	C_4AF	۱۲	-
فیزیکی	**مشخصه**	**واحد**	**مقـــــدار**	**ISIRI 389**
	نرمی (بلین)	مترمربع بر کیلوگرم	۳۲۵	۲۶۰ تا ۳۶۰
	گیرش	دقیقه	۱۲۱	۴۵ تا ۳۷۵
مکانیکی	**مشخصه**	**واحد**	**مقـــــدار**	**ISIRI 389**
	مقاومت فشاری ۷ روزه	مگاپاسکال	۳۸/۱۵ ± ۷/۸۲	۲۰/۰
	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مگاپاسکال	۵۳/۲ ± ۱۲/۴۱	۳۲/۵ تا ۵۲/۵

[10] *Bingham fluids*

شـن مصـرفی در ایـن تحقیـق از نـوع رودخانـه‌ای بـا حـداکثر انـدازه ۱۲/۵ میلـی‌متـر اسـت. چگـالی شـن در حالـت اشـباع بـا سطح خشک برابـر بـا ۲۵۷۰ کیلـوگرم بـر مترمکعـب و جـذب آب آن ۱/۹ درصـد اسـت. ماسـه مصـرفی کـه از نـوع رودخانـه‌ای اسـت دارای چگـالی در حالـت اشـباع بـا سـطح خشـک ۲۵۵۰ کیلـوگرم بـر مترمکعـب و جـذب آب ۳/۱ درصـد اسـت. همچنین، مدول نرمی ماسه (FM) برابـر بـا ۳/۲ اسـت. منحنـی‌هـای دانـه‌بنـدی شـن و ماسـه اسـتفاده‌شـده در ایـن تحقیـق در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده‌شده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه (شن)



شکل ۲ - منحنی دانه‌بندی ماسه

برای دستیابی به روانی مناسب از فوق روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات‌اتر استفاده شد. این فوق روان‌کننده مایعی با رنگ قهوه‌ای روشن با pH حدود ۴/۵ است که چگالی آن در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، برابر با ۱۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. همچنین درصد جامد فوق روان‌کننده مصرفی ۴۳ درصد می‌باشد. یخ استفاده شده در این تحقیق به صورت خرد شده مورد مصرف قرار گرفت. در شکل ۳، نحوه افزودن یخ به مخلوط بتن در دیگ ایستگاه مخلوط‌کن مرکزی مشاهده می‌شود.

شکل ۳- نحوه افزودن یخ به مخلوط بتن در دیگ مخلوط‌کن

۲. ۲. طرح مخلوط

طرح مخلوط بتن خودتراکم طوری مشخص و اجرا می‌شود که به مشخصات از پیش تعیین‌شده برای بتن تازه و سخت‌شده برسد. همچنین، اجزا طوری باهم ترکیب می‌شوند که از جدایی سنگ‌دانه‌ها و آب انداختگی جلوگیری شود. ترتیب مخلوط بهتر است ابتدا مصالح با بیش از نیمی از آب طرح مخلوط وارد دیگ مخلوط‌کن شود، سپس در حین ساخت، ترکیب آب باقی‌مانده با فوق روان‌کننده به مخلوط بتن اضافه شود. لازم به ذکر است که در این تحقیق از یخ به‌جای بخشی از آب مخلوط استفاده می‌شود. همچنین، این نکته قابل‌توجه است که به‌منظور شبیه‌سازی اجرای بتن خودتراکم در صنعت، مقدار فوق روان‌کننده در مخلوط اولیه ثابت درنظرگرفته شد ولی به دلیل بررسی اثر افت روانی بتن خودتراکم در مدت‌زمان انتقال توسط کامیون حمل بتن[11]، پس از گذشت ۹۰ دقیقه، مجدداً از فوق روان-کننده[12] استفاده گردید تا بتن خودتراکم قبل از پمپ کردن، به جریان اسلامپ در حدود ۷۰۰ میلی‌متر برای تمامی طرح‌ها برسد.

در جدول ۲، طرح مخلوط‌های بتن خودتراکم مشاهده می‌شود. در این تحقیق، مقادیر جایگزینی بخشی از آب آزاد با یخ برابر با صفر، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ درصد است که طرح‌ها مرتبط با آن به‌ترتیب با نام‌های *IC-0*، *IC-10*، *IC-30* و *IC-60* معرفی‌شده‌اند.

---

[11] *Truck Mixer*
[12] *Redoase*

جدول ۲- مشخصات طرح مخلوط‌ها

مصالح مصرفی (kg/m^3)	IC-0	IC-10	IC-30	IC-60
سیمان	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰
شن*	۵۹۳	۵۹۳	۵۹۳	۵۹۳
ماسه*	۱۰۹۲	۱۰۹۲	۱۰۹۲	۱۰۹۲
آب آزاد	۱۸۴/۸	۱۶۶/۳	۱۲۹/۴	۷۳/۹
یخ	۰	۱۸/۵	۵۵/۴	۱۱۰/۹
فوق روان‌کننده	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۶۴
نسبت آب به سیمان	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲
درصد هوای فرضی	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵

* در حالت اشباع با سطح خشک

به‌منظور بررسی اقتصادی کاهش دما با استفاده از یخ و کاهش مقدار افزودن مجدد فوق روان‌کننده، مقادیر قیمت نسبی مصالح مورداستفاده نسبت به سیمان بر اساس قیمت‌های برآورد شده توسط انجمن بتن ایران در فروردین‌ماه سال ۱۴۰۱ در جدول ۳ نشان داده‌شده است.

جدول ۳- قیمت نسبی مصالح

مصالح	سیمان	سنگ‌دانه (شن)	ماسه	فوق روان‌کننده	آب	یخ
قیمت نسبی	۱	۰/۲۴	۰/۳۲	۶۶/۶۷	۰/۰۸	۱/۲

با توجه به بررسی کاهش دمای بتن تازه با استفاده از یخ، در جدول ۴، مشخصات دمای هر مصالح برای هر طرح مخلوط گزارش شده است.

جدول ۴- مشخصات دمای مصالح برای طرح مخلوط‌ها

دمای مصالح مصرفی (^oC)	IC-0	IC-10	IC-30	IC-60
سیمان	۳۱/۸	۳۲/۱	۳۲/۱	۲۹/۸
شن	۴۷/۳	۴۲/۳	۴۵/۵	۴۳/۶
ماسه	۳۲/۵	۳۳/۸	۳۲/۶	۳۰/۲
آب	۳۰/۱	۳۲/۲	۲۸/۵	۲۸/۸
فوق روان‌کننده	۳۰/۳	۳۱/۳	۳۰/۳	۳۱/۳

۲. ۳. آزمایش‌ها

ساخت آزمونه‌های بتن خودتراکم مطابق با استاندارد ملی ۲۲۶۹۳ (۱۴) انجام شد. همچنین، به‌منظور بررسی خواص بتن تازه، آزمایش‌های جریان اسلامپ مطابق مطابق با استاندارد ملی ۱۱۲۷۰ (۱۵)، درصد هوا و وزن مخصوص مطابق استاندارد ملی ۳۸۲۱ (۱۶) انجام شد. در این تحقیق به‌منظور بررسی حفظ روانی فوق روان‌کننده، آزمایش جریان اسلامپ با گذشت مدت‌زمان‌های مختلفی از ساخت شامل زمان‌های ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۱۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. منظور از گذشت مدت‌زمان بعد از ساخت، زمان سپری‌شده از اولین تماس سیمان با آب تا لحظه تخلیه بتن است. در صورت افت زیاد جریان اسلامپ در مدت‌زمان سپری‌شده از ساخت، اندازه‌گیری روانی بتن به روش آزمون اسلامپ مطابق استاندارد ملی به شماره ۲-۳۲۰۳ (۱۷) انجام شد.

خواص مکانیکی و دوام بتن خودتراکم با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب نیم‌ساعته و مقاومت الکتریکی سطحی ارزیابی گردید. برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری مطابق استاندارد ملی ۲-۱۶۰۸ (۱۸)، ۳ آزمونه مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری برای هر سن ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری در آب و آهک اشباع با دمای ۲۳ درجه سلسیوس، درنظرگرفته شد. با استفاده از سه آزمونه مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری، جذب آب نیم‌ساعته مطابق استاندارد ملی ۱۲۲-۱۶۰۸ (۱۹) اندازه-گیری شد. همچنین، مقاومت الکتریکی سطحی بتن‌های خودتراکم مطابق *AASHTO T358* (۲۰) روی دو آزمونه استوانه‌ای با قطر و ارتفاع به‌ترتیب ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر در سنین مختلف عمل‌آوری در آب و آهک اشباع انجام شد.

۳. نتایج و بحث

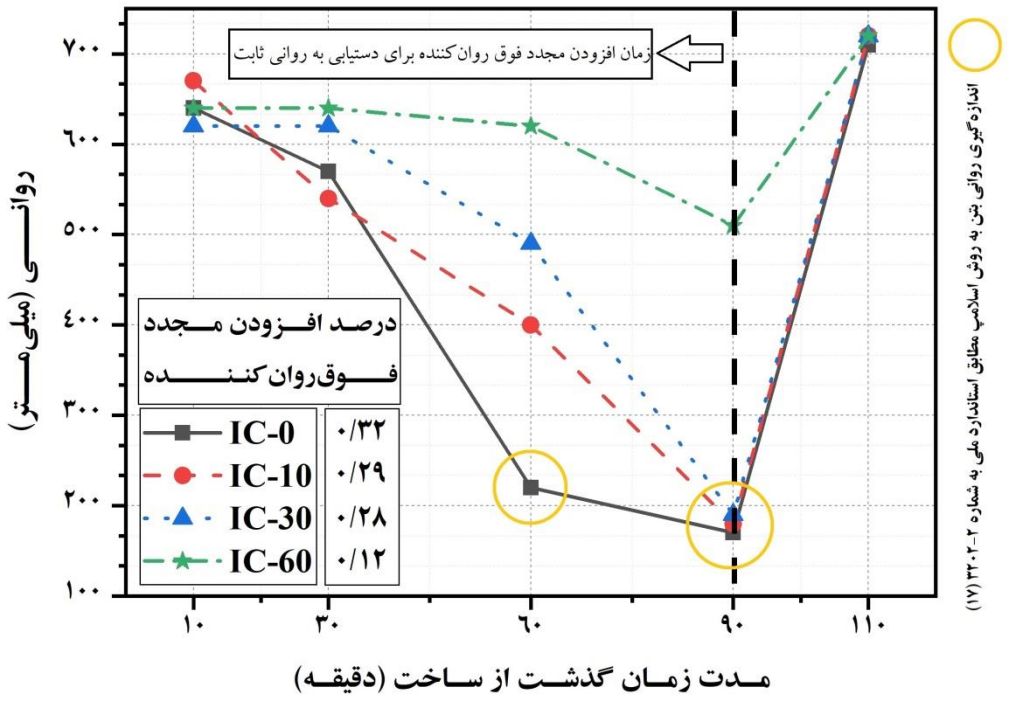
۳. ۱. خواص بتن تازه

به‌منظور بررسی خواص بتن تازه، دمای هوا و دمای بتن با گذشت مدت‌زمان از ساخت برای هر طرح مخلوط اندازه-گیری شد. در جدول ۵، مشخصات متوسط دمای هوای محیط و بتن تازه بتن‌های خودتراکم تا ۱۱۰ دقیقه پس از ساخت نشان داده‌شده است. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، جایگزینی ۱۰، ۳۰ و ۶۰ درصد آب مخلوط با یخ به‌ترتیب تقریباً متوسط دمای بتن تازه را ۰/۹، ۳/۳ و ۱۱/۶ درجه سلسیوس، کاهش داد. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه جایگزینی مقدار زیاد آب مخلوط با یخ در کاهش دمای بتن تازه است. همچنین، لازم به ذکر است که دمای بتن تازه مخلوط‌های *IC-0* و *IC-10* بیشتر از حداکثر مقدار مشخص شده در آیین‌نامه بتن ایران (۲۱) (۳۲ درجه سلسیوس) در زمان ریختن بتن است. همچنین، دمای مخلوط *IC-30* در حدود حداکثر دمای مجاز است و دمای مخلوط *IC-60* کمتر از آن است. این نتایج نشان می‌دهد که در بسیاری از روزهای سال که دمای محیط زیاد است (بیش از ۳۵ درجه سلسیوس) و به تبع آن دمای بتن نیز افزایش می‌یابد، برای کاهش دمای بتن تازه به کمتر از دمای مجاز آیین‌نامه بتن ایران، به حداقل ۵۰ کیلوگرم یخ در متر مکعب نیاز است. البته طبق ضوابط *ACI 301-20* (۲۲)، حداکثردمای مجاز بتن در زمان ریختن ۳۵ درجه سلسیوس است، درنتیجه می‌توان اذعان کرد که برآورده‌کردن ضابط آن در خصوص حداکثر دمای بتن تازه به مراتب راحت‌تر از آیین‌نامه بتن ایران است.

جدول ۵- متوسط دمای هوا و بتن طرح مخلوط‌ها

دما (°C)	IC-0	IC-10	IC-30	IC-60
هوای محیط	۳۷/۷ (±۰/۵)	۳۹/۳ (±۰/۴)	۴۰ (±۰/۹)	۳۴/۷ (±۰/۵)
بتـــن تازه	۳۵/۹ (±۱/۸)	۳۵ (±۱/۴)	۳۲/۶ (±۰/۳)	۲۴/۳ (±۱/۳)

روانی طرح مخلوط‌های بتن خودتراکم که مقدار افزودنی فوق روان‌کننده ثابتی در ابتدا دارند، با گذشت مدت‌زمان-هایی از ساخت و بعد از افزودن مجدد فوق روان‌کننده در زمان ۹۰ دقیقه در شکل ۴ نشان داده‌شده است. مطابق روند نتایج شکل ۴، با کاهش دمای بتن به‌وسیله جایگزینی بخشی از آب آزاد مخلوط با یخ، حفظ روانی بتن خودتراکم تا گذشت مدت‌زمان ۹۰ دقیقه از ساخت بهبود یافت. دلیل این موضوع کندتر شدن فرآیند هیدراتاسیون به‌دلیل کاهش دمای بتن تازه است. همچنین، با کاهش دمای بتن تازه به مقادیر ۱، ۳ و ۱۲ درجه سلسیوس (مقدار جایگزینی‌های ۱۰، ۳۰ و ۶۰ درصد آب آزاد مخلوط با یخ) برای دستیابی به روانی ثابت تقریباً ۷۰۰ میلی‌متر، به‌ترتیب ۹/۲، ۱۲/۸ و ۶۲/۴ درصد مقدار افزودن مجدد فوق روان‌کننده پس از ۹۰ دقیقه کاهش یافت.



شکل ۴- نمودار روانی بتن‌های خودتراکم در مدت‌زمان گذشت از ساخت

در شکل ۵، تصویر ظاهر روانی نهایی بتن خودتراکم مشاهده می‌شود. به‌طورکلی، کاهش دما با استفاده از یخ در بتن خودتراکم علاوه بر بهبود حفظ روانی باعث کاهش لزجت و درنهایت بهبود کارایی نسبت به طرح مخلوط پایه بتن خود تراکم شد. این موضوع نشان‌دهنده این است که کاهش دمای بتن با جایگزینی بخشی از آب مخلوط با یخ، خواص رئولوژی بتن تازه خود تراکم را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. همچنین مشخصات درصد هوا و چگالی بتن تازه در جدول ۶ گزارش‌شده است.

شکل ۵- تصویر ظاهر روانی بتن خودتراکم

جدول ۶- درصد هوا و چگالی بتن تازه طرح مخلوط‌ها

مشخصه	IC-0	IC-10	IC-30	IC-60
درصد هـــــوا	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۴
چگالی بتن تازه (kg/m3)	۲۳۵۱	۲۳۴۴	۲۳۴۴	۲۳۵۴

۳. ۲. آنالیز هزینه

در جـدول ۷، آنـالیز هزینـه بـتن خـودتراکم بـر اسـاس افـزایش یـا کـاهش تغییـرات نسـبی قیمـت ارائـه شـده اسـت. مطـابق ارزیابی اقتصـادی، هزینـه نسـبی نهـایی تولیـد بـتن خـودتراکم در ایـن تحقیـق، برآینـد کـاهش در مقـدار افـزودن مجـدد فـوق روان‌کننده با افـزایش اسـتفاده از یـخ بـه مقـادیر بـه‌ترتیـب ۱۰، ۳۰ و ۶۰ درصـد بـه‌جـای آب آزاد مخلـوط، باعـث افـزایش بـه‌ترتیب ۰/۹۹، ۴/۱۱ و ۵/۳۹ درصد در هزینه نهایی تولید بتن خود تراکم شد.

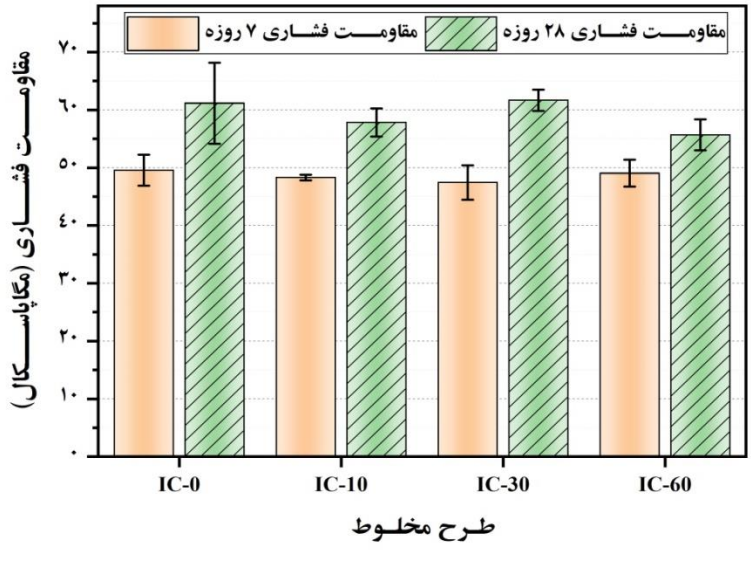
جدول ۷- آنالیز هزینه بتن خودتراکم با افزایش مقدار یخ و کاهش مقدار فوق روان‌کننده

آنالیز هزینه	IC-0	IC-10	IC-30	IC-60
تغییر قیمت نسبی به‌دلیل استفاده از یخ (٪)	صفر	+ ۱/۸۵	+ ۵/۵۳	+ ۱۱/۰۶
تغییر قیمت نسبی به‌دلیل استفاده مجدد از فوق روان‌کننده پس از ۹۰ دقیقه (٪)	صفر	- ۰/۸۶	- ۱/۴۲	- ۵/۶۷
تغییر قیمت نسبی نهایی	صفر	+ ۰/۹۹	+ ۴/۱۱	+ ۵/۳۹

ذکر این نکته ضـروری اسـت کـه تغییـر در قیمـت‌هـای نسـبی مصـالح (یـخ و فـوق روان‌کننـده) یـا نـوع و کیفیـت فـوق روان-کننده مصرفی، می‌تواند منجـر بـه تغییـر در هزینـه نهـایی و نتیجـه‌گیـری شـود. ایـن بررسـی‌هـا بـرای شـهر تهـران و کارخانـه فهاب بتن در تابستان ۱۴۰۱ انجام شده است و در زمان‌های مختلف می‌تواند آنالیز هزینه متفاوتی داشته باشد.

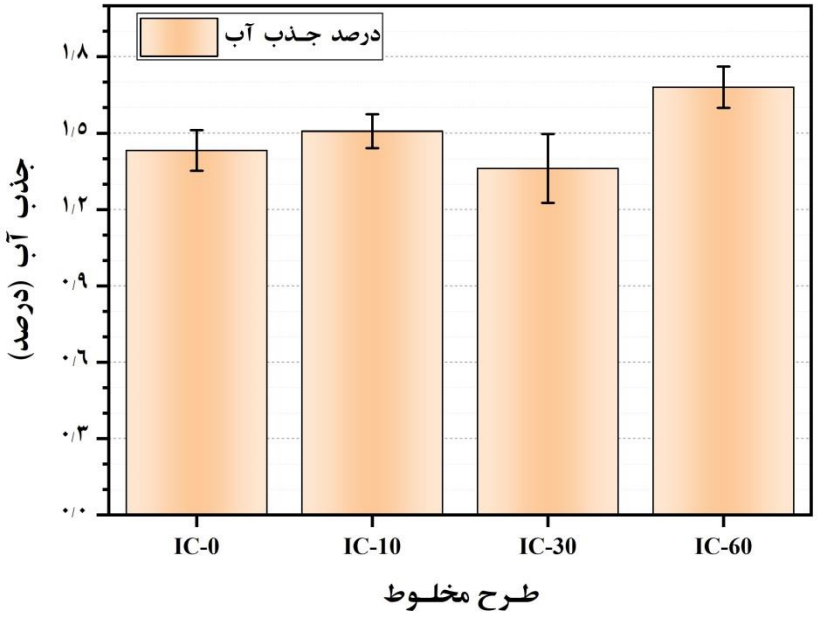
۳. ۳. خواص بتن سخت‌شده

در ایـن بخـش از تحقیـق، خـواص بـتن سـخت‌شـده خـودتراکم شـامل مقاومـت فشـاری، جـذب آب و مقاومـت الکتریکـی مقایسه می‌شود. در شکل ۶، نتـایج مقاومـت فشـاری نشـان داده‌شـده اسـت. مطـابق نتـایج بـه‌دسـت‌آمـده، دمـای بـتن تـازه در محـدوده تقریبـاً ۲۴ تـا ۳۶ درجـه سلسـیوس، تـأثیر قابـل‌تـوجهی در نتـایج مقاومـت فشـاری ۷ و ۲۸ روزه نـدارد و خـواص مکانیکی مطلوب بتن خودتراکم حفظ شده است.



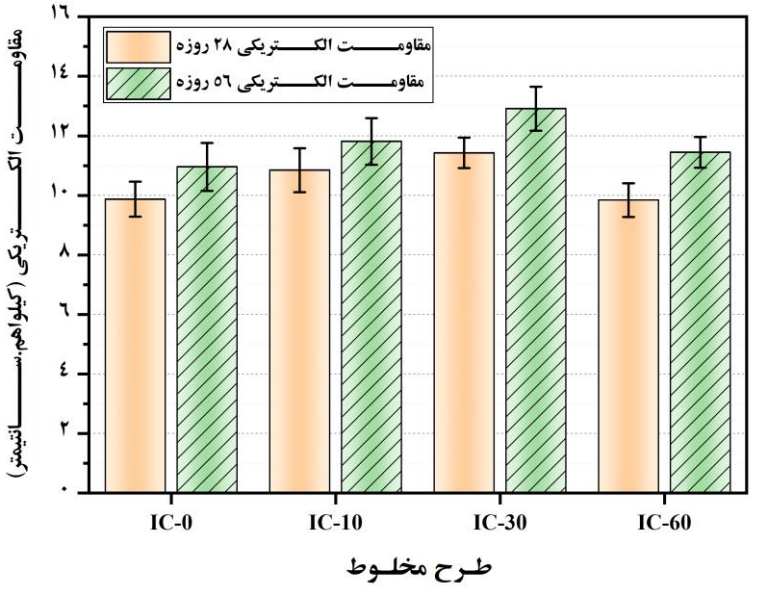
شکل ۶- نتایج مقاومت فشاری طرح مخلوط‌ها

در شکل ۷، نتایج جذب آب نیم‌ساعته طرح مخلوط‌ها نشان داده‌شده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، با کاهش دمای بتن تازه، تغییر قابل‌توجهی در مقدار جذب آب نسبت به طرح مخلوط پایه (*IC-0*) ایجاد نشده است. در جایگزینی زیاد ۶۰ درصد یخ به‌جای آب آزاد مخلوط (کاهش دمای ۱۲ درجه سلسیوس)، مقدار جذب آب بتن افزایش اندکی در حدود ۱۷/۳ درصد نسبت به طرح مخلوط پایه بتن خودتراکم داشت که با درنظرگرفتن خطاهای ساخت و آزمایش، تغییر قابل توجهی ایجاد نشده است.



شکل ۷- نتایج جذب آب نیم‌ساعته طرح مخلوط‌ها

نتایج مقاومت الکتریکی سطحی بتن‌های خودتراکم در سنین مختلف در شکل ۸ نشان داده‌شده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، کاهش دمای بتن تازه تأثیر بهبود دهنده‌ای در نتایج آزمون مقاومت الکتریکی نسبت به طرح شاهد ایجاد نکرده است و به‌طورکلی، نتایج در محدوده خطاهای ساخت و آزمایش قرار دارند.



شکل ۸- نتایج مقاومت الکتریکی طرح مخلوط‌ها

نتایج این بخش، به طور کلی نشان می‌دهد که مقاومت فشاری و پارامترهای دوام بتن در محدوده دمایی بتن تازه ۲۴ درجه سلسیوس تا ۳۶ درجه سلسیوس، تفاوت معناداری نمی‌کند. درنتیجه، به نظر می‌رسد که حداکثر دمای مجاز بتن تازه در هنگام ریختن، طبق آیین‌نامه بتن ایران (۳۲ درجه سلسیوس) (۲۱) سختگیرانه است و با توجه به گرمسیر بودن اغلب مناطق کشور ایران، تأمین آن با دشواری‌های زیادی همراه است. عملاً مشاهده می‌شود که در بسیاری از بتن‌ریزی‌های انجام شده در روزهای گرم، این ضابطه در پروژه‌های کشور رعایت نمی‌شود. همچنین به نظر می‌رسد که حداکثر دمای تعیین شده در *ACI 301-20* (۳۵ درجه سلیسوس) (۲۲)، باتوجه به شرایط ایران مناسب‌تر باشد.

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تولید بتن خودتراکم در صنعت نیاز به توجهات بسیاری درروند تولید، حمل‌ونقل و اجرا دارد که یکی از این موارد اهمیت دمای بتن تازه و تأثیر آن در مقدار فوق روان‌کننده است. در این تحقیق با درنظرگرفتن چهار طرح مخلوط با جایگزینی‌های مختلف، بخشی از آب آزاد مخلوط با یخ به‌منظور کاهش دمای بتن تازه، نتایج زیر در خواص مختلف آن حاصل شد:

- استفاده از ۶۰ درصد یخ به‌جای آب آزاد، دمای بتن تازه را با گذشت مدت‌زمان ۱۱۰ دقیقه از ساخت، تقریباً ۱۲ درجه سلسیوس کاهش داد و در محدوده دمای مجاز استاندارد قرار داد.

- کاهش دما تأثیر قابل‌توجهی در بهبود حفظ روانی تا ۹۰ دقیقه پس از ساخت بتن داشت. دلیل این موضوع کندتر شدن فرآیند هیدراتاسیون به‌دلیل کاهش دمای بتن تازه است.

- به‌دلیل بهبود حفظ روانی، کاهش دمای بتن تازه در مقادیر تقریباً ۱، ۳ و ۱۲ درجه سلسیوس باعث کاهش به‌ترتیب ۹/۲، ۱۲/۸ و ۶۲/۴ درصد در مقدار افزودن مجدد فوق روان‌کننده پس از ۹۰ دقیقه به‌منظور دستیابی به روانی نهایی تقریباً ۷۰۰ میلی‌متر گردید.

برآیند کاهش در مقدار افزودن مجدد فوق روان‌کننده با افزایش استفاده از یخ به مقادیر به‌ترتیب ۱۰، ۳۰ و ۶۰ درصد به‌جای آب آزاد مخلوط، باعث افزایش به‌ترتیب ۰/۹۹، ۴/۱۱ و ۵/۳۹ درصد در هزینه نهایی تولید بتن خود تراکم شد

- به‌طورکلی در موضوع خواص بتن سخت‌شده، به‌جز افزایش تقریباً ۱۷ درصدی جذب آب در کاهش دمای ۱۲ درجه سلسیوس، استفاده از یخ تأثیر قابل‌توجهی در مقاومت فشاری، جذب آب و مقاومت الکتریکی بتن خودتراکم ایجاد نکرد و خواص بتن خودتراکم حفظ شد.

- به طور کلی، نتایج مقاومت فشاری و پارامترهای دوام بتن در محدوده دمایی بتن تازه ۲۴ درجه سلسیوس تا ۳۶ درجه سلسیوس، تفاوت معناداری نداشت. درنتیجه، به نظر می‌رسد که حداکثر دمای مجاز بتن تازه در هنگام ریختن طبق آیین‌نامه بتن ایران (۳۲ درجه سلسیوس) سختگیرانه است و با توجه به گرمسیر بودن اغلب مناطق کشور ایران، تأمین آن با دشواری‌های زیادی همراه است. همچنین به نظر می‌رسد که حداکثر دمای تعیین شده در *ACI 301-20* (۳۵ درجه سلیسوس)، باتوجه به شرایط ایران مناسب‌تر باشد.

۵. تشکر

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس خود نسبت به حمایت‌های مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و شرکت تولیدکننده بتن آماده فهاب بتن اعلام می‌دارند.

[۱۸] استاندارد ملی ایران، شماره ۲-۱۶۰۸ (۱۳۹۳)، بتن سخت‌شده- قسمت۲- ساخت و عمل‌آوری آزمونه‌ها برای آزمون‌های مقاومت، کمیته ملی استاندارد مهندسی ساختمان و مصالح و فرآورده‌های ساختمانی.

[۱۹] استاندارد ملی ایران، شماره ۱۲۲-۱۶۰۸ (۱۳۹۶)، بتن سخت‌شده- قسمت ۱۲۲: تعیین جذب آب بتن - روش آزمون، کمیته ملی استاندارد مهندسی ساختمان و مصالح و فرآورده‌های ساختمانی.

[20] AASHTO, (2015), Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, AASHTO, USA.

[۲۱] سازمان برنامه و بودجه کشور، آیین نامه بتن ایران، (۱۴۰۰) "جلد دوم- مصالح و اجرا"، ضابطه شماره ۲-۱۲۰.

[22] ACI 301-20, (2020), Specifications for Concrete Construction, American Concrete Institute, USA.