تحقیقات بتن
سال شانزدهم، شمارهٔ سوم
پائیز ۱۴۰۲
ص ۱۰۴ – ۹۳
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵

بررسی تأثیر مواد افزودنی حباب‌زا بر روی نفوذپذیری و دوام بتن ساخته شده با سیمان پرتلند ۵۲۵-۱

اعظم کامل
دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه، گروه عمران، دانشگاه حکیم سبزواری.
مجتبی لزگی نظرگاه *
دانشیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری.
مرتضی طیبی‌نیا
مربی، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری.

چکیده

با توسعه فن‌آوری تولید سیمان در سال‌های اخیر، امکان تولید سیمان‌های با مقاومت فشاری بالاتر فراهم شده است، لذا بررسی خصوصیات دوام بتن‌های ساخته شده با این سیمان‌ها در سال‌های اخیر مورد توجه محققان بوده است. در این تحقیق تأثیر کاربرد مواد هواساز بر روی خصوصیات مقاومتی و نفوذپذیری بتن حاوی سیمان نوع ۱ رده ۵۲۵ بررسی شده است. تأثیر ۳ درصد وزنی مختلف ماده هواساز (نسبت به سیمان) بر روی دوام بتن بررسی شد. آزمایش‌های انجام شده شامل آزمایش تعیین کارآیی (اسلامپ)، تعیین جرم حجمی بتن تازه، تعیین دمای بتن تازه، تعیین درصد هوای محبوس در بتن با استفاده از روش هوای فشرده، تعیین مقاومت فشاری، تعیین مقاومت الکتریکی حجمی و آزمایش تعیین ضریب نفوذپذیری بتن بوده است. نتایج نشانگر آن است که میزان ماده افزودنی حباب‌زا در بتن دارای یک حد آستانه (۰/۰۵ درصد وزنی سیمان) می‌باشد بطوریکه استفاده از مقادیر ماده افزودنی حباب‌زا کمتر از این حد آستانه تأثیر بسیار کمی در ایجاد حباب هوا در بتن دارد. کاربرد ۰/۱ درصد وزنی سیمان ماده هواساز موجب افزایش حدود ۲۶ درصد کارآیی بتن می‌شود. کاربرد ماده هواساز باعث افزایش قابل توجه در کارآیی بتن تازه بدون ایجاد مشکلاتی نظیر جداشدگی و آب‌انداختگی شده است. به طور کلی هوازایی موجب افت جرم حجمی بتن، مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی و ضریب انتشار یون کلراید شده است. نتایج تحقیق همچنین نشان می‌دهد که ایجاد هر یک درصد هوای محبوس در بتن موجب کاهش ۵ درصدی مقاومت فشاری بتن می‌شود. افزایش درصد هوای محبوس در بتن از ۱/۹ درصد تا ۱۳/۴ درصد موجب افت ناچیزی در شاخص‌های نفوذپذیری بتن شامل ضریب انتشار یون کلر و مقاومت الکتریکی ویژه بتن می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: **مواد افزودنی حباب‌زا، مقاومت الکتریکی بتن، مقاومت فشاری، ضریب انتشار یون کلر، دوام، بتن پرمقاومت.**

* نویسنده مسئول: m.lezgy@hsu.ac.ir

۱- مقدمه

بتن پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی حال حاضر در جهان است. از دیرباز تاکنون، مشخصات مقاومتی سازه‌های بتنی بیشتر مورد توجه طراحان بوده است؛ لکن جهت افزایش عمر خدمت‌دهی این ماده مهم، بایستی به‌طور ویژه به مسأله دوام آن پرداخته شود. نفوذ یون‌های کلرید به داخل بتن و خوردگی آرماتورهای مدفون در آن، یکی از دلایل خراب شدن زودهنگام سازه‌های بتن آرمه می‌باشد که همواره باعث خسارت‌های فراوان شده است. کاهش هزینه‌های مربوط به تعمیر و بازسازی سازه‌های بتنی جهت رسیدن به اهداف توسعه پایدار، لزوم توجه به پارامترهای دوام را ضروری می‌کند. بنابراین بررسی میزان مقاومت بتن در برابر نفوذ یون‌های کلرید و ارزیابی دوام آن اهمیت بسیاری دارد. تاکنون تحقیقات مختلفی در این زمینه انجام شده است.

چیا[1] و همکاران [۱] نفوذپذیری آب و نفوذپذیری یون کلرید در بتن‌های مقاومت بالای ساخته شده با سنگ‌دانه سبک را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که بین مقاومت بتن در برابر نفوذ کلرید با مقاومت بتن در برابر نفوذپذیری آب ارتباطی معنی‌داری وجود ندارد. تگیر[2] و همکاران [۲] از طریق مطالعه تجربی، تأثیر بارگذاری فشاری تک محوری بر میزان نفوذ گاز و ضریب انتشار یون کلرید در بتن را بررسی نمودند. در این مرجع نویسندگان همچنین تلاش نمودند تا رابطه بین میزان نفوذ گاز و ضریب انتشار یون کلرید در بتن را بیابند. پیلوار و همکاران [۳] عملکرد چهار روش تسریع یافته ارزیابی بتن در مقابل نفوذ یونهای کلرید را بررسی نمودند. این روش‌ها شامل روش‌های RCPT، مهاجرت تسریع یافته الکتریکی، مقاومت الکتریکی سطحی و روش جدید ارائه شده در دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشند. باقری و همکاران [۴] اثرات نفوذ یون کلرید بر عمر مفید بتن‌های ساخته شده از دوده سیلیسس و خاکستر بادی را بررسی نمودند. این محققین دریافتند که ضریب انتشار یون کلرید در نمونه‌های بتنی با سن کم بسیار بالاتر از ضریب انتشار نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه است. لیانگ[3] و همکاران [۵] نفوذپذیری بتن‌های ساخته شده با سنگ‌دانه‌های بازیافتی کربناتی در برابر یون کلرید و اثرات آن بر خوردگی ایجاد شده در فولاد را بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که افزودن سنگ‌دانه‌های بازیافتی کربناته خطر خوردگی فولاد در بتن را کاهش می‌دهد. تیبتس[4] و همکاران [۶] ارتباط نفوذپذیری آب با مقاومت الکتریکی و همچنین میزان نفوذپذیری یون کلرید در بتن‌های حاوی مواد سیمانی مکمل مختلف را مطالعه نمودند. ترن[5] و همکاران [۷] رابطه بین نفوذپذیری و انتشار یون کلرید در بتن تحت تنش فشار را به دو روش تجربی و مدل‌سازی شبکه‌ای بررسی نمودند. این محققین سپس رابطه‌ای بین نفوذپذیری آب و ضریب انتشار یون کلرید برای طیف وسیعی از تنش فشاری ارائه نمودند. رازا[6] و همکاران [۸] خواص مکانیکی، رفتار خمشی و نفوذپذیری بتن‌های تقویت شده با الیاف فولادی دارای کارایی بالا که حاوی خاکستر پوسته برنج و میکرو سیلیس می‌باشند را بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن ۷/۵٪ و ۱۲/۵٪ خاکستر پوسته برنج اثر مفیدی بر بهبود مقاومت بتن تقویت شده با الیاف فولادی با کارایی بالا در برابر نفوذ یون‌های کلرید و آب دارد. زو[7] و همکاران [۹] تأثیر سنگ‌دانه‌های سرامیکی بازیافتی بر گرمای هیدراتاسیون و نفوذپذیری بتن‌های با کارایی بالا را مطالعه نمودند. این محققین دریافتند که سنگ‌دانه‌های سرامیکی بازیافتی می‌توانند دما را در طول واکنش گرمازا کاهش دهند و فرآیند هیدراتاسیون سیمان را طولانی کنند، در حالی که نفوذپذیری بتن را افزایش می‌دهند. اثرات هم‌افزایی خاکستر بادی و خاکستر آتشفشانی بر رفتار فشاری و دوام بتن ساخته شده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی به‌طور جامع توسط چن[8] و همکاران [۱۰] مورد بررسی قرار گرفت. این محققین دریافتند که نسبت بهینه ادغام هم‌زمان خاکستر بادی و خاکستر آتشفشانی بعنوان جایگزین سیمان برای بهبود مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن و نیز افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ کلرید به ترتیب ۱۰٪ و ۲۰٪ می‌باشد. چن و همکاران همچنین دریافتند که برای افزایش مقاومت بتن ساخته شده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی در برابر یخبندان، نسبت بهینه ادغام هم‌زمان خاکستر بادی و خاکستر آتشفشانی به ترتیب ۱۵٪ و ۱۵٪ می‌باشد. در سال‌های اخیر تکنولوژی ساخت و تولید سیمان توسعه زیادی یافته، بطوریکه امکان تولید سیمان‌های با مقاومت فشاری بالاتر

[1] Chia
[2] Tegguer
[3] Liang
[4] Tibbetts
[5] Tran
[6] Raza
[7] Xu
[8] Chen

فراهم شده است. به همین دلیل بررسی خصوصیات دوام بتن‌های ساخته شده با سیمان‌های پرمقاومت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحقیق حاضر باتوجه به مقاومت فشاری بالای سیمان ۵۲۵-۱، نفوذپذیری و دوام بتن ساخته شده با سیمان مذکور را مورد مطالعه قرار داده است. از طرف دیگر، یکی از انواع خرابی‌های متداول بتن ناشی از قرارگرفتن در معرض چرخه‌های یخ زدن و ذوب شدن می‌باشد. هوازایی روش مؤثری برای کاهش آسیب-دیدگی بتن در اثر چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب شدن می‌باشد.

با توجه به اینکه مصرف ماده هواساز ممکن است بر مقاومت بتن در برابر نفوذ کلرید تأثیرگذار باشد، لذا در تحقیق حاضر تأثیر کاربرد ماده هواساز بر روی عملکرد بتن نیز بررسی شده است. در واقع در این تحقیق در نظر است که با کاربرد ماده هوازا در بتن، حباب‌های هوا ایجاد شده و تأثیر آن بر روی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن ساخته شده با سیمان رده ۱-۵۲۵ بررسی گردد. بررسی-های نویسندگان این مقاله حاکی از آن است که تاکنون تحقیق مشابهی در این زمینه انجام نشده است. اهداف مشخص این پژوهش شامل بررسی رابطه بین مقدار ماده حباب زا با میزان هوای ایجاد شده در بتن، تأثیر هوازایی بر خصوصیات مکانیکی با در نظر گرفتن شاخص مقاومت فشاری و میزان تأثیر هوازایی بر دوام بتن با در نظر گرفتن ضریب انتشار نفوذ یون کلر به روش تسریع شده می‌باشند. جهت نیل به اهداف تحقیق، ابتدا مخلوط‌های کنترل و مخلوط‌های دارای درصدهای مختلف ماده هواساز تهیه شده و سپس نمونه‌های لازم جهت انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری و تعیین ضریب انتشار یون کلر به روش تسریع شده ساخته شده‌اند. در ساخت مخلوط‌های بتن و نمونه‌ها از بتن حاوی ۴۰۰ کیلوگرم سیمان در متر مکعب استفاده شده است. برای بررسی تأثیر ماده هواساز بر روی خواص بتن، افزودن نسبت‌های ۰/۰۵ درصد تا ۰/۱۵ درصد وزن سیمان ماده هواساز در نظر گرفته شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

۲-۱-۱- سیمان

در این تحقیق سیمان پرتلند نوع ۵۲۵-۱ کارخانه‌ی سیمان بجنورد که ویژگی‌های آن منطبق بر استاندارد ملی ایران ۳۸۹ [۱۱] و استاندارد ASTM C-150 [۱۲] می‌باشد؛ استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان در جدول ۱ ارائه و با الزامات استاندارد مقایسه شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان ۵۲۵-۱ بجنورد

ویژگی فیزیکی یا مکانیکی	نتیجه آزمایش	الزامات استاندارد ملی ایران ۳۸۹
غلظت نرمال خمیر	۰/۲۵	-
زمان‌گیرش اولیه سیمان (دقیقه)	۱۴۵	۴۵<
زمان‌گیرش نهایی سیمان (دقیقه)	۱۸۰	۳۶۰>
جرم حجمی سیمان (kg/m^3)	۳۱۶۰	-
نرمی ذرات سیمان (cm^2/gr)	۳۶۰۰	۲۸۰۰<
مقامت فشاری ۷ و ۲۸ روزه ملات ماسه سیمان استاندارد (MPa)	۲ روزه: ۲۶/۴	۲ روزه: > ۲۰/۰
	۷ روزه: ۴۱/۴	-
	۲۸روزه: ۵۳/۵	۲۸روزه: > ۵۲/۵

۲-۱-۲- مصالح سنگی

سنگ‌دانه‌های به کار رفته در این تحقیق اعم از شن و ماسه از معادن شهرستان شهریار واقع در جنوب غربی تهران تهیه شده است. قابل ذکر است که شن و ماسه تهیه شده به‌صورت نیمه شکسته می‌باشند. به منظور تعیین کیفیت و مشخصات ماسه و شن، آزمایش‌های دانه‌بندی، تعیین درصد جذب آب، مقدار ریزدانه کوچک‌تر از الک دویست و چگالی در حالت اشباع با سطح خشک مطابق با استانداردهای مربوطه انجام شده است.

آزمایش دانه‌بندی مطابق استاندارد ملی ایران شماره۴۹۷۷ [۱۳] انجام شد. در نتیجه‌ی مقایسه‌ی انجام شده با الزامات اجباری دانه‌بندی استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۲ [۱۴]، شن مورد استفاده در رده‌ی ۶۷ با حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۱۹ میلی‌متر قرار گرفت. ماسه مورد استفاده نیز مطابق رده ۲ دانه‌بندی ماسه طبق استاندارد ملی ایران می‌باشد. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی ماسه در جدول ۲ ارائه شده است.

آزمایش تعیین درصد جذب آب شن مورد استفاده، براساس استاندارد ملی ایران به شماره۴۹۸۲ [۱۵] انجام شد. آزمایش تعیین میزان ریزدانه کوچک‌تر از الک شماره دویست (۷۵ میکرومتر) طبق استاندارد ملی ایران شماره ۴۴۶ [۱۶] انجام شد. در آزمایش تعیین چگالی شن در حالت اشباع با سطح خشک، الزامات استاندارد ملی ایران شماره ۴۹۸۲ [۱۵] رعایت گردید. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی شن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات ماسه مورد استفاده در ساخت بتن

مشخصه ماسه	مقدار اندازه‌گیری شده از آزمایشات
مدول نرمی	۳/۴۴
درصد جذب آب ماسه	۳/۹۲
میزان ریزدانه کوچک تراز الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرومتر)	٪۲
چگالی ماسه در حالت اشباع با سطح خشک (SSD)	۲۴۹۰ (kg/m^3)
شکل ماسه	نیمه شکسته

جدول ۳- مشخصات شن مورد استفاده در ساخت بتن

مشخصات شن	مقدار اندازه‌گیری شده از آزمایشات
درصد جذب آب	۲/۲۶
میزان ریزدانه کوچک تراز الک شماره دویست (درصد)	۰/۸۰
چگالی شن در حالت اشباع با سطح خشک (SSD)	۲۵۵۰ (kg/m^3)
شکل ماسه	نیمه شکسته
حداکثر اندازه‌ی سنگ‌دانه	۱۹mm

۲-۱-۳- آب، فوق روانساز و ماده هواساز

برای کلیه‌ی ساخت‌های بتن از آب شرب شهر تهران استفاده شد. در این تحقیق از فوق روانساز فرکوپلاست P10-3R، محصول شرکت شیمی ساختمان، استفاده گردید. ماده هواساز با کد تجاری P.N-Air HP5 از شرکت یکتا ماندگار تهیه گردید.

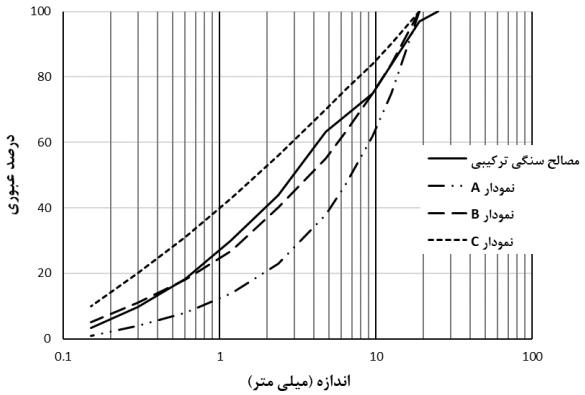
۲-۲- طرح و ساخت مخلوط‌های بتن

در این قسمت طرح و ساخت مخلوط‌های مورد نظر در برنامه آزمایشگاهی به صورت مختصر ارائه گردیده است. نسبت آب به مواد سیمانی همه مخلوط‌ها برابر با ۰/۴ و مقدار مواد سیمانی برابر ۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب در نظر گرفته شده است. مقدار فوق روانساز مورد استفاده در طرح کنترل برای دست‌یابی به کارآیی برابر با رده S4 استاندارد ایران (اسلامپ بتن ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلیمتر) می‌باشد. با توجه به اینکه افزودن ماده هواساز موجب افزایش روانی بتن می‌شود، در سایر مخلوط‌ها مقدار ماده فوق روانساز ثابت بوده است تا بدین ترتیب اثر ماده هواساز بر روی کارآیی بتن مورد بررسی قرار گیرد. دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی که از تلفیق شن و ماسه به ترتیب در نسبت‌های ۰/۳۵ و ۰/۶۵ حاصل گردیده است، در شکل ۱ نشان داده شده است. طرح مخلوط‌های مختلف براساس وضعیت اشباع با سطح خشک در جدول ۴ ارائه شده است. کدگذاری مخلوط‌ها بدین صورت می‌باشد که مخلوط کنترل با نام Ref و مخلوط‌های حاوی ماده هواساز با کمک حرف A و عددی بعد از

آن که بیانگر درصد وزنی ماده هواساز مورد استفاده در طرح نسبت به سیمان می‌باشد، بیان شده‌اند. به طور مثال مخلوط A0.05 نشانگر مخلوط با ماده هواساز با ۰/۰۵ درصد وزنی سیمان می‌باشد.

جهت ساخت بتن و عمل‌آوری آزمونه‌های بتنی از استاندارد ملی ایران ۵۸۱ [۱۷] استفاده شده است. برای اطمینان از دستیابی به نسبت آب به مواد سیمانی مشخص شده (نسبت آب به سیمان ۰/۴)، تفاوت آب موجود در مصالح سنگی با وضعیت اشباع با سطح خشک آن‌ها در هنگام ساخت مخلوط‌ها در نظر گرفته شد.

لازم به ذکر است که قبل از ساخت مخلوط اصلی، مخلوط مشابه با حجم کم در مخلوط‌کن ساخته شد. برای هر مخلوط پس از اتمام عملیات مخلوط کردن، کارآیی بتن به روش اسلامپ، جرم حجمی بتن تازه، تعیین درصد هوای بتن تازه و همچنین دمای بتن تازه اندازه‌گیری گردید. سپس برای تهیه آزمونه‌های مختلف مورد نظر بتن با روش استاندارد درون قالب‌ها ریخته و روی میز لرزان متراکم شد. پس از عمل‌آوری اولیه به مدت ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج و تحت عمل‌آوری مرطوب در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد تا زمان آزمایش قرار گرفتند.



شکل ۱- دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی به کار رفته در ساخت مخلوط‌های بتن

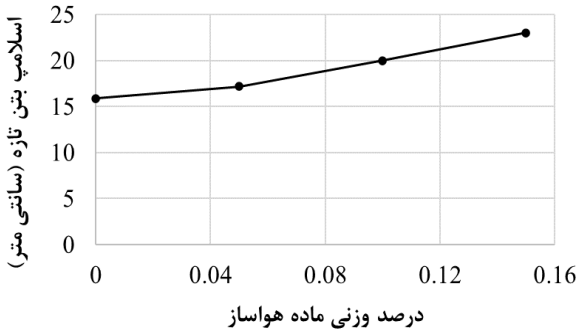
جدول ۴- مقادیر اجزای مخلوط‌های بتنی ساخته شده

ردیف	کد مخلوط	w/b	سیمان (Kg/m^3)	شن (SSD) (Kg/m^3)	ماسه (SSD) (Kg/m^3)	فوق روانساز (درصد وزنی سیمان)	ماده هواساز (درصد وزنی سیمان)	دما (درجه سانتیگراد)
۱	Ref	۰/۴۰	۴۰۰	۶۲۰	۱۱۵۲	۰/۱۱	----	۲۳/۱
۲	A0.05	۰/۴۰	۴۰۰	۶۲۰	۱۱۵۱	۰/۱۱	۰/۰۵	۲۳/۰
۳	A0.10	۰/۴۰	۴۰۰	۶۱۲	۱۱۳۷	۰/۱۱	۰/۱۰	۲۳/۱
۴	A0.15	۰/۴۰	۴۰۰	۶۱۰	۱۱۳۲	۰/۱۱	۰/۱۵	۲۳/۱

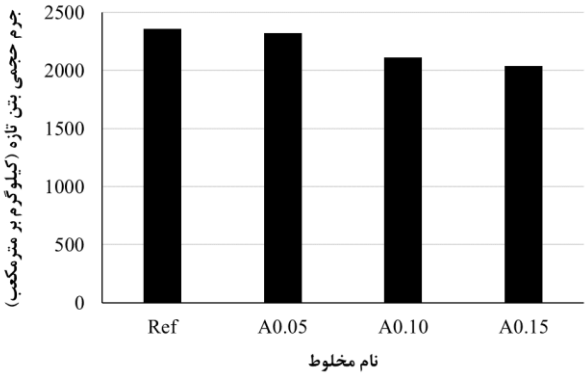
۳- نتایج آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل

۳-۱- روانی (اسلامپ) و جرم حجمی بتن تازه

روانی بتن تازه هر طرح مخلوط بلافاصله بعد از اتمام عملیات مخلوط کردن طبق استاندارد ملی ایران ۲-۳۲۰۳ [۱۸] اندازه‌گیری شد. آزمایش اندازه‌گیری جرم حجمی بتن تازه طبق استاندارد ملی ایران ۶-۳۲۰۳ [۱۹] انجام شد. نتایج آزمایش اسلامپ و جرم حجمی مخلوط‌های تازه ساخته شده، در شکل-های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند. در شکل ۲ رابطه بین مقدار ماده هواساز مصرفی و کارآیی بتن تازه نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳، جرم حجمی بتن تازه نمونه‌های مورد بررسی ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزودن ماده هواساز در بتن به میزان ۰/۰۵ درصد وزنی سیمان، جرم حجمی بتن تازه ۱/۶ درصد کاهش و کارآیی آن در حدود ۸/۲ درصد افزایش نسبت به مخلوط شاهد داشته است. با کاربرد ۰/۱ درصد وزنی سیمان ماده هواساز در بتن، جرم حجمی به میزان چشم‌گیری (در حدود ۱۱ درصد) کاهش و کارآیی آن در حدود ۲۵ درصد نسبت به بتن شاهد افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار مصرف ماده هواساز به مقدار ۰/۱۵ درصد وزنی سیمان، جرم حجمی بتن در حدود ۱۴ درصد کاهش و کارآیی آن در حدود ۴۵ درصد افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است با وجود افزایش قابل توجه کارآیی مخلوط‌ها، با افزایش مقدار هواساز جداشدگی و آب‌انداختگی در مخلوط مشاهده نشده است.



شکل ۲- رابطه بین مقدار ماده حباب‌زای مصرفی و کارآیی بتن تازه



شکل ۳- جرم حجمی مخلوط‌های مورد بررسی

۳-۲- درصد هوای بتن تازه

آزمایش اندازه‌گیری درصد هوای ناخواسته بتن با استفاده از روش فشار هوا طبق استاندارد ملی ایران ۳۵۲۰ [۲۰] انجام شد. نتایج آزمایش تعیین درصد هوای محبوس بتن در مخلوط‌های مورد بررسی در جدول ۵ ارائه شده است. در آزمایش تعیین درصد هوای محبوس در بتن، مخلوط کنترل (که دارای ماده فوق روانساز می‌باشد) دارای ۱/۷ درصد هوای ناخواسته بود. با افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی سیمان ماده حباب زا، درصد هوای محبوس در بتن به ۳/۶ درصد افزایش پیدا کرده است. در شکل ۴ رابطه بین درصد ماده حباب‌زا و درصد هوای محبوس اندازه‌گیری شده با روش هوای فشرده نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، رابطه خطی میان مقدار ماده هوازا و درصد هوای ایجاد شده وجود ندارد. مقادیر کمتر از ۰/۰۵ درصد وزنی سیمان ماده هوازا تأثیر کمی در افزایش میزان هوای محبوس بتن داشته است. اما افزایش مقدار مصرف به ۰/۱ موجب ایجاد حدود ۱۰ درصد هوای محبوس در بتن شده است. همچنین افزایش مقدار مصرف ماده حباب‌ساز به ۰/۱۵ درصد وزنی سیمان، موجب ایجاد حدود ۱۳ درصد هوای محبوس در بتن شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که در مقادیر کاربرد کمتر از ۰/۰۵ این نوع ماده هواساز در بتن درصد هوای بسیار ناچیزی در بتن ایجاد می‌شود. بنابراین مقادیر مصرف مناسب این ماده هواساز با سیمان نوع ۱ رده ۵۲۵ برای کاربرد در روسازی‌های بتنی و عرشه پل‌ها که در معرض چرخه‌های یخ زدن و آب شدن قرار دارند، بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ درصد وزنی سیمان توصیه می‌گردد. لازم به ذکر است که طبق آیین نامه بتن ایران آبا [۲۱]، مقدار هوازایی مناسب برای افزایش دوام بتن با حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۱۹ میلی متر در برابر چرخه های یخ زدن و آب شدن در حدود ۶ درصد می‌باشد.

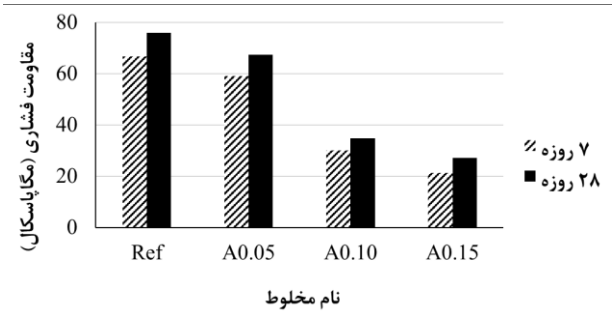
شکل ۴- رابطه بین مقدار ماده حباب‌زای مصرفی و درصد هوای ایجاد شده در بتن

جدول ۵- درصد هوای اندازه‌گیری شده با روش هوای فشرده

کد مخلوط	درصد هوای ناخواسته	درصد هوازایی نسبت به مخلوط کنترل	درصد هوازایی محاسباتی براساس جرم حجمی بتن تازه
Ref	۱/۷	--	--
A0.05	۳/۶	۱/۹	۱/۷
A0.10	۱۲/۰	۱۰/۳	۱۱/۰
A0.15	۱۶/۹	۱۳/۴	۱۳/۶

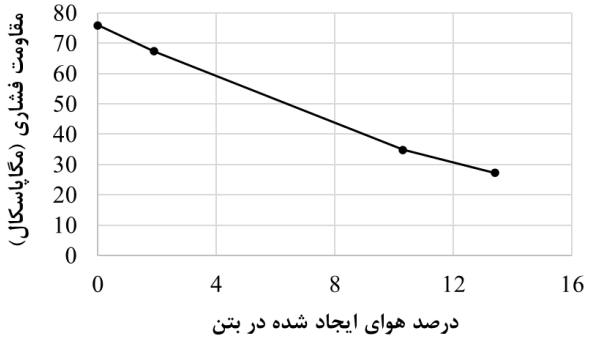
۳-۳- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز طبق استاندارد BS EN 12390 part 3 [۲۲] انجام شده است. برای آزمایش مقاومت نمونه‌های مکعبی ۱۰ cm × ۱۰ × ۱۰ مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۵، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه مخلوط‌های مورد بررسی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط شاهد در حدود ۷۶ مگاپاسکال می‌باشد. لذا بتن شاهد طبق تعریف آیین‌نامه آبا [۲۱] در محدوده بتن مقاومت بالا قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که تعریف بتن مقاومت بالا طبق مبحث ۹ مقرارت ملی ساختمان [۲۳] با آیین نامه آبا [۲۱] متفاوت می‌باشد. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که نسبت مقاومت ۷ روزه به مقاومت ۲۸ روزه مخلوط کنترل در حدود ۰/۸۸ می‌باشد.



شکل ۵- مقایسه مقاومت فشاری سنین ۷ و ۲۸ روزه مخلوط‌های مورد بررسی

مشاهده می‌شود که استفاده از ماده هواساز موجب کاهش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز شده است. مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه مخلوط با ۱/۹ درصد هوای ایجاد شده به ترتیب برابر با ۵۹/۱ و ۶۷/۳ مگاپاسکال بوده است. مقاومت فشاری این مخلوط در مقایسه با مخلوط کنترل در حدود ۱۲ درصد کاهش داشته است. با افزایش میزان هوازایی در بتن، مقدار کاهش مقاومت فشاری بتن بیشتر شده است. تأثیر هوازایی بر میزان کاهش مقاومت ۷ و ۲۸ روزه تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد. لازم به ذکر است که هوازایی تأثیر خاصی بر روند کسب مقاومت بتن نداشته به طوری که نسبت مقاومت ۷ روزه به مقاومت ۲۸ روزه بتن‌های هوازایی شده، مشابه این نسبت در بتن‌های بدون ماده هوازا می‌باشد. در شکل ۶ رابطه بین درصد هوای ایجاد شده در بتن و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نشان داده شده است. در روش ملی طرح مخلوط بتن ایران [۲۱] برای در نظر گرفتن تأثیر مواد هواساز بر مقاومت فشاری به عنوان راهنمایی مشخص شده است که هر یک درصد هوای ایجاد شده در بتن موجب کاهش حدود ۳الی ۵ درصدی مقاومت فشاری بتن می‌شود. بررسی نتایج به‌دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد تقریباً هر یک درصد هوای ایجاد شده در بتن باعث کاهش ۵ درصدی مقاومت فشاری بتن شده است.



شکل ۶- رابطه بین مقاومت فشاری ۲۸ روزه و درصد هوای ایجاد شده در بتن

۳-٤- مقاومت الکتریکی ویژه

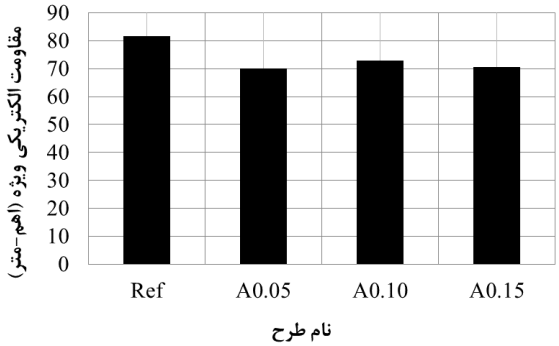
آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی در سنین ۷ و ۲۸ روز بر روی نمونه‌های مکعبی طبق روش ارائه شده در راهنمای انجام آزمایش-های دوام بتن ارائه شده در مرجع [۲۴] انجام شده است. آزمایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها با استفاده از دستگاهی که با جریان متناوب (AC) کار می‌کند، اندازه‌گیری شده است. قبل از انجام آزمایش، دو سطح موازی نمونه‌ها به وسیله خمیر سیمان اندود شده تا از اتصال کامل صفحات فلزی به دو سطح نمونه اطمینان حاصل شود. در شکل ۷ دستگاه مورد استفاده نشان داده شده است.

شکل ۷- دستگاه آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی

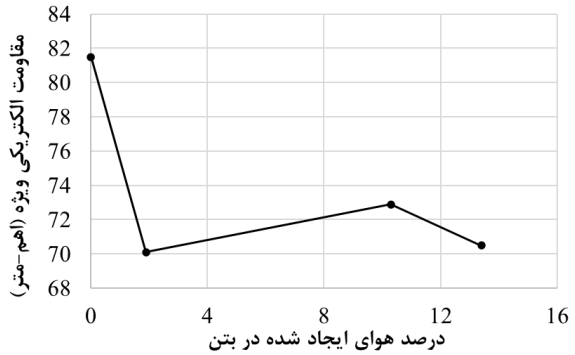
با توجه به تأثیر ابعاد نمونه‌ها در مقاومت الکتریکی، مقاومت الکتریکی ویژه با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\rho = A\left(R/L\right) \quad (۱)$$

که در این رابطه پارامتر ρ مربوط به مقاومت الکتریکی ویژه($K\Omega.cm$)، علامت R مربوط به مقاومت الکتریکی ($K\Omega$)، نماد A مربوط به سطح مقطعی که جریان از آن می‌گذرد (cm^2) و نماد L مربوط به طول نمونه در جهت جریان برحسب سانتیمتر می‌باشد. نتایج مقاومت الکتریکی ویژه مخلوط‌های مورد بررسی در سن ۲۸ روزه در شکل ۸ ارائه شده است. در این شکل، مقاومت الکتریکی ویژه مخلوط‌های مورد بررسی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقاومت الکتریکی ویژه مخلوط کنترل برابر با ۸۱/۵ اهم-متر بوده است. با ایجاد هوازایی در بتن مقاومت الکتریکی ویژه بتن کاهش داشته است. کاربرد ۰/۰۵ درصد وزنی سیمان ماده هواساز در بتن موجب کاهش حدود ۱۴ درصدی مقاومت الکتریکی ویژه شده است. با افزایش درصد کاربرد ماده هواساز در بتن، روند تغییرات مشخصی در مقاومت الکتریکی مشاهده نمی شود (شکل ۹). علت این است که مواد هواساز بیشتر حفراتی که در بتن ایجاد می‌کنند از نوع حفرات منفصل بوده و تأثیر آن‌ها بر مقاومت الکتریکی ناچیز می‌باشد. کاهش مشاهده شده مقاومت الکتریکی ویژه با کاربرد مواد هواساز به احتمال زیاد مربوط به بخشی از حفراتی است که به صورت ناخواسته دارای منافذ پیوسته با یکدیگر هستند. با کاربرد ماده هواساز بیشتر، احتمال این‌که حفرات پیوسته بیشتری تشکیل شود وجود دارد. لذا انتظار می‌رود در درصد های بالاتر (که در این تحقیق بررسی نشده است) کاهش مقاومت الکتریکی ویژه مشاهده شود. ولی در این محدوده مورد بررسی به‌دلیل آنکه احتمالاً تأثیر هوازایی انجام شده در مخلوط‌های مورد بررسی در ایجاد منافذ پیوسته مشابه یکدیگر بوده، لذا افزایش مقدار هوازایی تأثیر مشخصی بر مقاومت الکتریکی ویژه بتن نداشته است.



شکل ۸- مقایسه مقاومت الکتریکی ویژه مخلوط‌های مورد بررسی با یکدیگر



شکل ۹- رابطه بین مقاومت الکتریکی ویژه مخلوط‌های مورد بررسی با درصد هوای ایجاد شده در بتن

۳-۵-آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلر به بتن (RCMT)[1]

این آزمایش در سن ۲۸ روزه و بر اساس استاندارد NT Build 492 (NT Build، 1999) [۲۵] انجام شده است. نمونه‌های این آزمایش از برش نمونه‌های استوانه‌ای قالب‌گیری شده به دست آمده است. از هر استوانه از سطح ماله‌کشی نمونه ۲/۵ سانتیمتر پایینتر، یک نمونه برش خورده با ضخامت ۵ سانتی متر به دست آمده و مورد آزمایش قرار گرفته است. از هر استوانه می‌توان سه نمونه تهیه نمود. آزمونه‌های بریده شده درون محفظه که در آن خلأ با فشار ۱ تا ۵ کیلوپاسکال ایجاد شده قرار گرفت. بعد از ۳ ساعت قرار داشتن در این شرایط، در حالی که دستگاه مکش کار می‌کرد، شیر آب باز شده و دسیکاتور تا روی آزمونه‌ها با آب پر شد. سپس شیر آب بسته شده و پمپ خلأ به مدت یک ساعت دیگر روشن ماند. سپس خط شیر خلأ بسته شده و پمپ خلأ خاموش شد. شیر خلأ باز شده تا هوا به داخل دسیکاتور وارد شود. نمونه در این شرایط برای ۲±۱۸ ساعت باقی ماند. بالای هر آزمونه درون سلول در تماس با محلول سود (NaOH) با غلظت ۰/۳ نرمال و پایین هر آزمونه در تماس با محلول نمک (NaCl) با غلظت ۱۰ درصد قرار دارد. قطب مثبت به صفحه درون محلول سود و قطب منفی دستگاه به صفحه درون محلول نمک متصل می‌شود. سپس دستگاه بر روی ولتاژ ۳۰ ولت تنظیم شده و روشن می‌شود. سپس میزان جریان عبوری از هر نمونه اندازه‌گیری شده و طبق استاندارد با توجه به جریان عبوری از نمونه، ولتاژ دستگاه اصلاح شده و جریان عبوری از نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و ثبت

[1] Rapid Chloride Ion Migration Test

می‌گردد. پس از گذشت مدت ۲۴ ساعت، مجدداً جریان عبوری از نمونه‌های دستگاه ثبت و سپس دستگاه خاموش می‌شود. قابل ذکر است که دمای محیط و محلول‌های سود و نمک در ابتدا و انتهای آزمایش نیز ثبت می‌شود. سپس نمونه بتن از سلول بیرون آورده شده و شکافته می‌شود. بر روی سطح شکافته شده هر آزمونه، محلول ۰/۱ مول نیترات نقره اسپری می‌شود. ناحیه نفوذ یون کلراید به دلیل رسوب کلرید نقره سفید رنگ می‌شود (در حدود ۱۵ دقیقه). سپس در راستای قطر نمونه و در فاصله‌های ۱۰ میلیمتری، عمق نفوذ کلر با دقت نزدیک به یک میلی‌متر ثبت می‌شود. در شکل ۱۰، دستگاه آزمایش RCMT به نمایش گذاشته شده است. در نهایت ضریب انتشار یون کلر از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

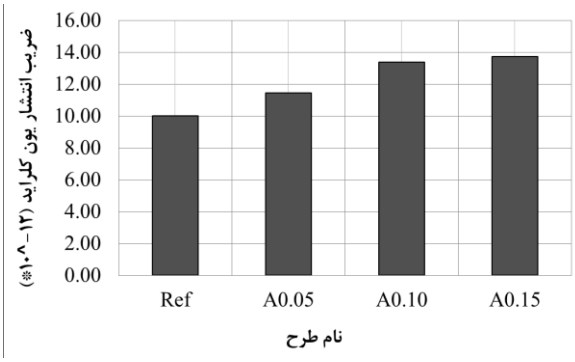
$$D_{nssm}=\frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t}\times\left(x_d-0.0238\sqrt{\frac{(273+T)L\,x_d}{u-2}}\right) \quad (۲)$$

در رابطه فوق D_{nssm} ضریب انتشار یون کلراید در شرایط ناپایدار برحسب 10^{-12} مترمربع بر ثانیه، U مقدار مطلق ولتاژ اعمال شده برحسب ولت، L ضخامت آزمونه برحسب میلی‌متر، T مقدار میانگین دماهای اولیه و نهایی محلول آب نمک برحسب درجه سلسیوس، x_d مقدار میانگین عمق‌های نفوذ برحسب میلی‌متر و t مدت آزمون برحسب ساعت می‌باشد. در این تحقیق میانگین نتیجه سه آزمونه به عنوان نتیجه ضریب انتشار یون کلراید هر طرح ارائه شده است.

شکل ۱۰- دستگاه آزمایش مهاجرت سریع کلرید (RCMT)

در شکل ۱۱ عمق نفوذ یون کلر در نمونه‌های بتنی پس از انجام آزمایش RCMT با رنگ سبز مشخص شده است. در شکل ۱۲ ضریب انتشار یون کلراید مخلوط‌های مورد بررسی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ضریب انتشار یون کلراید مخلوط‌های کنترل، A0.05، A0.10 و A0.15 به ترتیب برابر با $10/02 \times 10^{-12}$ مترمربع بر ثانیه، $11/46 \times 10^{-12}$ مترمربع بر ثانیه، $13/40 \times 10^{-12}$ مترمربع بر ثانیه و $13/72 \times 10^{-12}$ مترمربع بر ثانیه بوده است.

شکل ۱۱- ناحیه نفوذ یون کلراید در آزمایش RCMT



شکل ۱۲- مقایسه ضریب انتشار یون کلراید مخلوط‌های مورد بررسی (۲۸ روزه) با یکدیگر

با دقت در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که با ایجاد هوازایی در بتن، ضریب انتشار یون کلراید بتن افزایش داشته است. کاربرد ۰/۰۵ درصد وزنی سیمان ماده هواساز در بتن موجب افزایش حدود ۱۴ درصدی ضریب انتشار یون کلراید شده است. با افزایش درصد کاربرد ماده هواساز، ضریب انتشار افزایش بیشتری یافته است. اما نکته قابل توجه آن است که افزایش مقدار مصرف ماده هوازا از ۰/۱ درصد وزنی سیمان به ۰/۱۵ درصد وزنی تنها باعث افزایش

جزئی ضریب انتشار به میزان حدود ۲ درصد شده است. همان‌طور که در بخش ۳-۴ در مورد مقاومت الکتریکی بیان شد، علت آن ممکن است بدین دلیل باشد که ساختار منافذ بتن در دو مخلوط A0.10 و A0.15 تفاوت محسوسی از نظر پیوستگی منافذ با یکدیگر ندارند. بمنظور بررسی دقیق‌تر علت این پدیده لازم است تصاویر ریزساختاری[1] نمونه‌های بتنی تهیه و بررسی گردند که این موضوع خارج از حوزه تحقیق حاضر است. لازم به ذکر است که مقایسه نتایج ضرایب انتشار با مقاومت الکتریکی نشانگر آن است که تغییرات ضریب انتشار نسبت به درصد هوای ایجاد شده دارای روند روشن‌تری نسبت به مقاومت الکتریکی ویژه می‌باشد.

٤- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر استفاده از مواد حباب‌زا بر روی نفوذپذیری و دوام بتن‌های ساخته شده با سیمان ۵۲۵-۱ مورد مطالعه قرار گرفت. مخلوط‌های بتنی با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و مقادیر مختلف ماده هواساز شامل ۰، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ درصد وزنی سیمان تهیه گردید. آزمایش‌های مختلفی چون تعیین اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی و ضریب نفوذپذیری بر روی آن‌ها انجام گردید. براساس بررسی آزمایشگاهی انجام شده، نتیجه‌گیری‌های ذیل در خصوص تأثیر ماده هواساز بر روی خصوصیات بتن تازه و سخت شده به‌دست آمده است:

- کاربرد مقدار ماده هواساز کمتر از مقدار حد آستانه موجب هوازایی کمی در بتن می‌شود. با رسیدن به حد آستانه با تغییر مقدار بسیار کمی ماده هواساز مقدار هوای قابل توجهی در بتن ایجاد خواهد شد. برای هر نوع ماده هواساز باید این حد آستانه مشخص گردد. برای مخلوط‌های بتنی ساخته شده با سیمان ۵۲۵-۱، حد آستانه ماده هواساز استفاده شده در این تحقیق تقریباً برابر ۰/۰۵ درصد وزنی سیمان می‌باشد.
- با کاربرد مواد حباب‌زا در بتن کارآیی بتن افزایش می‌یابد. با توجه به ترکیبات تجاری متفاوت این مواد نمی‌توان رابطه خاصی برای آن پیشنهاد نمود. اما نکته قابل توجه آن است که امکان افزایش قابل توجه کارآیی بتن بدون ایجاد مشکلاتی مانند جداشدگی و آب‌انداختگی با این مواد وجود دارد.
- در صورت استفاده از مواد حباب‌زا، جرم حجمی بتن تازه و سخت‌شده کاهش می‌یابد. با توجه به میزان هوازایی ایجاد شده، مقدار کاهش جرم حجمی بتن متغییر می‌باشد.
- ایجاد هوازایی در بتن موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. برای مقادیر بالای درصد هوازایی، نرخ کاهش مقاومت افزایش می‌یابد. هر یک درصد هوای ایجاد شده توسط ماده حباب‌زای استفاده شده در این تحقیق، موجب کاهش حدود ۵ درصدی مقاومت فشاری بتن می‌گردد.
- مقاومت الکتریکی بتن با افزایش درصد هوای محبوس در بتن کاهش می‌یابد که نشانگر کاهش دوام بتن می‌باشد. اما افزایش درصد هوای محبوس در بتن در محدوده‌های مشخصی مانند آن‌چه که در این تحقیق استفاده شده به نظر می‌رسد تأثیر محسوسی بر روی مقاومت الکتریکی ویژه بتن نداشته باشد.
- به طور کلی ضریب انتشار یون کلرید در بتن با افزایش درصد هوای محبوس در بتن افزایش می‌یابد. با این وجود نرخ افزایش ضریب انتشار یون کلراید با افزایش درصد هوای محبوس در بتن در محدوده‌های مشخصی مانند آن‌چه که در این تحقیق به کار گرفته شده، کاهش می‌یابد؛ به طوری که در این محدوده، افزایش درصد هوای محبوس بتن تأثیر زیادی بر افزایش نفوذپذیری بتن در برابر یون‌های مخرب ندارد.

٥- مراجع

[1] KS. Chia, and MH. Zhang, "Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete", Cement and Concrete Research, vol. 2(4), pp. 639-645, 2002.

[2] AD. Tegguer, S. Bonnet, A. Khelidj, and V. Baroghel-Bouny, "Effect of uniaxial compressive loading on gas permeability and chloride diffusion coefficient of concrete and their relationship", Cement and Concrete Research, vpl. 52, pp. 131-139, 2013.

[۳] امیررضا پیلوار، علی اکبر رمضانیانپور، حسین رجایی، بررسی آزمایشگاهی روشهای تسریع یافته الکتریکی سنجش نفوذپذیری کلریدی بتن، تحقیقات بتن، سال نهم، شمارهٔ دوم، پائیز و زمستان ۹۵، صفحات ۵ – ۱۵.

[4] A. Bagheri, A. Ajam, and H. Zanganeh, "Effect of very early age exposure on chloride ingress and service life performance of binary and ternary

[1] SEM

concretes", Construction and Building Materials, vol. 289, pp. 123137, 2021.
[5] C. Liang, H. Ma, Y. Pan, Z. Ma, Z. Duan, and Z. He, "Chloride permeability and the caused steel corrosion in the concrete with carbonated recycled aggregate", Construction and Building Materials, vol. 218, pp. 506-518, 2019.
[6] CM. Tibbetts, JM. Paris, CC. Ferraro, KA. Riding, and G. Timothy, Townsend, "Relating water permeability to electrical resistivity and chloride penetrability of concrete containing different supplementary cementitious materials", Cement and Concrete Composites, vol. 107, pp. 103491, 2020.
[7] TT. Tran, DT. Pham, MN. Vu, VQ. Truong, XB. Ho, NL. Tran, T. Nguyen-Sy, and QD. To, "Relation between water permeability and chloride diffusivity of concrete under compressive stress: Experimental investigation and mesoscale lattice modelling", Construction and Building Materials, vol. 267, pp. 121164, 2021.
[8] SS. Raza, BA. M-Noman, M. Fahadd, and KM. Elhadi, "Mechanical properties, flexural behavior, and chloride permeability of high-performance steel fiber-reinforced concrete (SFRC) modified with rice husk ash and micro-silica", Construction and Building Materials, vol. 359, pp. 129520, 2022.
[9] F. Xu, X. Lin, and A. Zhou, "Effect of recycled ceramic aggregate on hydration heat and permeability of high performance concrete", Cement and Concrete Composites, vol. 137, pp. 104930, 2023.
[10] C. Chen, C. Lu, C. Lu, S. Wei, Z. Guo, Q. Zhou, and W. Wang, "Synergetic effect of fly ash and ground-granulated blast slag on improving the chloride permeability and freeze–thaw resistance of recycled aggregate concrete", Construction and Building Materials, vpl. 365, pp. 130015, 2023.
[۱۱] استاندارد ملی ایران ۳۸۹، سیمان-تعیین مقاومت فشاری و خمشی روش آزمون، ۱۳۷۵.
[12] ASTM C150, "Common Reference Type I Portland Cement for use in ASTM C989-12 Slag Activity Testing", 2017.
[۱۳] استاندارد ملی ایران شماره۴۹۷۷، سنگ‌دانه‌ها-دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های ریز و درشت-روش آزمون، ۱۳۹۳.
[۱۴] استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۲، سنگ‌دانه‌های بتن – ویژگی ها، ۱۳۹۹.
[۱۵] استاندارد ملی ایران به شماره۴۹۸۲، سنگ‌دانه- تعیین چگالی، چگالی نسبی (وزن مخصوص) و جذب آب سنگ‌دانه درشت- روش آزمون، ۱۳۹۶.
[۱۶] استاندارد ملی ایران شماره ۴۴۶، سنگ‌دانه‌ها- تعیین مواد ریزتر از الک ۷۵ میکرومتر (نمره ۲۰۰) در سنگ‌دانه‌های معدنی با شستشو - روش آزمون، ۱۴۰۰.
[۱۷] استاندارد ملی ایران ۵۸۱، بتن -ساخت و عمل‌آوری آزمونه-های بتن در آزمایشگاه-آیین کار، ۱۳۹۳.
[۱۸] استاندارد ملی ایران ۲-۳۲۰۳، بتن تازه-قسمت دوم-تعیین روانی به روش اسلامپ -روش آزمون، ۱۳۸۶.
[۱۹] استاندارد ملی ایران ۶-۳۲۰۳، بتن تازه - قسمت ۶: چگالی روش آزمون، ۱۳۹۷.
[۲۰] استاندارد ملی ایران ۳۵۲۰، بتن تازه- تعیین مقدار هوای بتن تازه مخلوط شده به روش فشاری- روش آزمون، ۱۳۹۷.
[۲۱] آیین‌نامه آبا، نشریه ۱۲۰-۲، مصالح و اجرا، سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۴۰۰.
[22] BS EN 12390 part 3 "Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens", British Standards Institution, London, UK, 2009.
[۲۳] مبحث ۹ مقرارت ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه، دفتر مقرارت ملی ساختمان، ویرایش پنجم، ۱۳۹۹.
[۲۴] باقری، م.، زنگانه، ح.، مقایسه عملکرد روش RCMT برای ارزیابی سریع مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر با روش‌های RCPT و مقاومت الکتریکی، مجله علمی- پژوهشی عمران مدرس، دوره دوازدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۱.
[25] NT Build 492 "Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments", NORDTEST, 1999.

Investigation of the effect of air-entraining admixture on the permeability and durability of concrete materials made of Portland cement type 1-525

Azam Kamel
Graduate M.Sc., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University.
Mojtaba Lezgy-Nazargah*
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University.
Morteza Tayebinia
Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University.

Abstract
Using air-entraining agent (AEA) is an effective method to reduce concrete damages due to freeze-thawing cycles. With the development of cement production technology in recent years, it is possible to produce cements with higher resulting compressive strength. Therefore, investigating the durability characteristics of the concrete made of these types of cement has been the focus of many researchers in recent years. In this research, the effect of the use of air-entraining admixture on the resistance and permeability of concrete materials made of Portland cement type 1-525 has been investigated. The effect of three different percentages of AEA was investigated on durability of concrete. The tests performed include the slump test, determination of volumetric mass of the fresh concrete, determining the temperature of fresh concrete, determination of the percentage of air content in concrete using the pressure method, the determination of compressive strength, the determination of volumetric electrical resistance, and determination of permeability coefficient. The results show that the amounts of used AEAs in concrete has a critical dosage (0.05% by weight of cement), so that the use of AEAs amounts less than this dosage has very little effect on creating enough air bubbles in the concrete. The use of a dosage of 0.1% AEA by weight of cement increased the workability of concrete about 26%. Moreover, the use of AEA has caused a significant increase in the workability of the fresh concrete without causing problems such as segregation and bleeding. In general, AEA led to a decrease in volumetric mass, compressive strength, electrical resistance and chloride ion diffusion coefficient of the concrete material. The results of this research also show that the replacement of 1% of concrete's volume by the air bubbles decreases the compressive strength of concrete about 5%. The increase of the air content of concrete from 1.9% to 13.4% leads to a slight drop in the permeability coefficients of concrete, including the diffusion coefficient of chlorine ions and specific electrical resistance of concrete.

Keywords: Air-entraining admixture, Electrical resistance of concrete, Compressive strength, Chloride ion diffusion coefficient, Durability, High-strength concrete.

* Corresponding Author: m.lezgy@hsu.ac.ir