Localization of Mixing Design and Production Method of Graphic Concrete

Saba Naeej*
M.A in Bionic Architecture, School of Architecture and Urbanism, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
s.naeej@mail.sbu.ac.ir

Zahra Alipur Balfroush
M.A in Bionic Architecture, School of Architecture and Urbanism, Shahid Beheshti University, Tehran, Ira

Alireza Rahmati
Adjunct Lecturer, School of Architecture and Urbanism, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Roham Afghani Khoraskani
Assistant Professor, School of Architecture and Urbanism, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract
Nowadays, it is a common idea to use decorative concrete panels as an alternative to natural stone. Graphic concrete is one of the different types of decorative concrete using the exposed-aggregate method. Considering that there has been no research for graphic concrete production in Iran so far, the aim of this research is to localize and simplify the method for the first time. For this purpose, concrete samples with 435 kg/m^3 and 500 kg /m^3 Portland cement and water to cement ratio of 0.40 and 0.45 have been produced using natural sand as aggregate. Also, superplasticizer with dosage of 0.35 % and air-entraining admixture with dosage of 0.02% have been used. Concrete specimens were tested in terms of visual criteria, compressive strengths and water absorption in 28 days in accordance with the requirements of Iran National Standard 12038. The results showed that samples with the water to cement ratio of 0.40, which were produced without using of superplasticizer and air-entraining admixture, due to low workability of the mixture, are not in good condition in terms of compressibility. Also low workability, in addition to disrupting the designs printed on the membrane, causes many holes on the concrete surface after leaving the mold, which is visually rejected. Despite the positive effects of air entraining admixture on workability, plastic viscosity and visual criteria, this type of admixture reduces the compressive strength by 30 to 35% and increases water absorption, which is not recommended. Finally, mixture design with 500 kg/m^3 cement, water to cement ratios of 0.40 and 0.45, which were produced using superplasticizer with 28-day compressive strength of 54.6 and 52.5 MPa and water absorption of 3.25% and 3.50% while meeting all requirements are suitable for production of graphic concrete decorative panels.

Keywords*: Graphic Concrete, Architectural Decorative Concrete, Localization, Compressive Strength, Water Absorption.*

---

* *Corresponding Author*

Naeej, S., Alipour Balfroush, Z., Rahmati, A., Afghani Khoraskani, R. Localization of Mixing Design and Production Method of Graphic Concrete. Journal of Concrete Structures and Materials*, 2021; 6(2):*
http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.327649.1252
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/).

بومی سازی طرح مخلوط و روش ساخت بتن گرافیکی

دریافت مقاله: ۱۲-۱۱-۱۴۰۰
پذیرش مقاله: ۲۴-۱۲-۱۴۰۰

سبا نائیج
کارشناسی ارشد فناوری معماری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
s.naeej@mail.sbu.ac.ir
(نویسنده مسئول)
زهرا علی پور بالفروش
کارشناسی ارشد فناوری معماری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

علیرضا رحمتی
استاد مدعو دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

رهام افغانی خراسکانی
استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده
امروزه کاربرد قطعات بتنی تزیینی به‌عنوان جایگزینی برای سنگ طبیعی در نازک‌کاری ساختمان، امری متداول است. بتن گرافیکی یکی از انواع بتن تزیینی از نوع سنگ‌دانه نمایان است. باتوجه به اینکه تا این زمان در مراجع داخلی هیچ پژوهشی در راستای تولید بتن گرافیکی در کشور وجود نداشته است، هدف این تحقیق بومی‌سازی و ساده‌سازی روش تولید قطعات پیش‌ساخته بتن گرافیکی برای اولین بار در ایران می‌باشد. در این تحقیق نمونه‌هایی با مقادیر ۴۳۵ و ۵۰۰ کیلوگرم برمترمکعب سیمان پرتلند نوع ۲ با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ با استفاده از ماسه طبیعی گردگوشه به عنوان سنگدانه و همچنین استفاده از افزودنی فوق روان‌کننده با مقدار مصرف ۰/۳۵ درصد و افزودنی هوازا با مقدار مصرف ۰/۰۲ درصد تولید شده‌است. نمونه‌های ساخته‌شده مطابق الزامات استاندارد ملی ۱۲۰۳۸ (سنگ بتنی معماری) مورد سنجش بصری و آزمون‌های مقاومت فشاری و جذب آب در ۲۸ روز قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نمونه‌ها با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ بدون استفاده از فوق‌روان‌کننده و هوازا به دلیل کارپذیری بسیار پایین مخلوط، تراکم‌پذیری و شکل پذیری در شرایط مناسبی قرار ندارد. همچنین کارپذیری پایین علاوه بر برهم ریختن طرح‌های چاپی، موجب ایجاد حفره های فراوان در سطح بتن پس از خروج از قالب شده که از لحاظ بصری مردود است. افزودنی هوازا نیز علی‌رغم تاثیرات مثبت بر کارپذیری، ویسکوزیته پلاستیک و معیارهای بصری موجب کاهش ۳۰ تا ۳۵ درصدی مقاومت فشاری و افزایش جذب آب شده که استفاده از آن توصیه نمی‌شود. در نهایت نمونه‌ها با مقدار سیمان ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ که با استفاده از فوق روان‌کننده تولید شدند، با اسلامپ ۸۰ و ۱۳۰ میلی‌متر و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۵۴/۶ و ۵۲/۵ مگاپاسکال و جذب آب ٪۳/۲۵ و ٪۳/۵۰ با برآورده کردن الزامات، برای ساخت قطعات تزیینی بتن گرافیک مناسب می‌باشند.

کلمات کلیدی: بتن گرافیکی، بتن تزیینی معماری، بومی‌سازی، مقاومت فشاری، جذب آب.

۱- مقدمه

در سال های اخیر، بتن به‌عنوان پرکاربردترین مصالح ساختمانی برای ساخت عناصر باربر و غیرباربر شناخته می‌شود. علاوه بر مقاومت و سایر خواص مکانیکی مطلوب، انعطاف‌پذیری بتن در پذیرش انواع شکل‌ها و بافت‌های سطحی با کمترین هزینه، آن را به یک گزینه قابل توجه در میان معماران و طراحان تبدیل کرده‌است. با روی کار آمدن روش‌های متنوع ساخت و پرداخت بتن برای تولید بتن‌های معماری و همچنین تلفیق سازه و زیبایی‌شناسی، مسیر جدیدی برای خلق بتن‌های تزیینی[1] مانند بتن رنگی، بتن نورگذر[2]، بتن اسفنجی[3] و بتن گرافیکی[4] هموار شد.

پرداخت سطوح بتن تزیینی با دو روش عمده یکپارچه[5] و اعمالی[6] انجام می‌شود. هر روش پرداختی که نتوان آن را از ماتریس بتن جدا کرد، مانند بتن رنگی، پرداخت یکپارچه تلقی می‌شود. تکنیک‌های پرداخت سطحی بتن مانند روش استامپ یا مهرزدن، رنگ‌های سخت‌کننده[7]، اندود کاری و رنگ آمیزی سطحی[8] و... که با اعمال بر روی سطح بتن، ظاهری متفاوت ایجاد می‌کند، به عنوان روش اعمالی شناخته می‌شوند. [1]

همچنین طبق دسته‌بندی راهنمای بتن تزیینی موسسه بتن آمریکا ACI 310R-19، از چهار تکنیک برای رنگی‌کردن بتن استفاده می‌شود که یکی از آن‌ها بتن با سنگ‌دانه‌ی نمایان است.[2] در سال ۱۹۴۰ شرکت*Mo-Sai* با همکاری چند تن از پیشگامان تولید بتن‌های معماری، به منظور ساخت بتن‌های تزیینی پیش‌ساخته با سنگدانه نمایان تاسیس شد. تحقیقات علمی موسای مشخص کرد که یکنواختی رنگ و کیفیت ظاهری با کنترل طرح مخلوط و دانه‌بندی سنگدانه حاصل می‌شود و با فرایند نمایان کردن سنگ‌دانه ارتباطی ندارد. [3] نمایان کردن سنگدانه های بتن و حذف لایه های سطحی از طریق روش های مختلفی از جمله دیرگیرکننده های سطحی، شست‌وشو با آب (با فشار یا بدون فشار)، سند بلاست کردن و سایر روش های متداول انجام می‌گیرد. دیرگیرکننده‌های سطحی که معمولا از کربوهیدرات ها تشکیل شده‌اند، بر روی سطح بتن پرداخت شده با ماله، اسپری می‌شوند. معمولا پس از گذشت ۲۴ ساعت از اعمال دیرگیرکننده سطح بتن شسته شده و با برداشت خمیر سیمان از روی بتن، سنگدانه ها نمایان می‌گردد. دیرگیرکننده‌ها به دو روش فرایند مثبت و منفی روی سطح بتن اعمال می‌شوند. در روش فرایند مثبت، افزودنی بعد از بتن ریزی در قالب و بر روی سطح بیرونی قطعه اعمال می‌شود که از متداول‌ترین روش‌ها برای نمایان کردن سنگدانه است. در فرایند منفی، قبل از ریختن بتن، یک لایه نازک از دیرگیرکننده بر کف قالب اعمال شده و پس از خشک‌شدن آن بتن‌ریزی انجام می‌شود. [2]

بتن گرافیکی یک تکنولوژی ساخت به منظور انتقال الگو و طرح مورد نظر بر روی سطوح بتنی پیش‌ساخته می‌باشد، که ترکیبی از روش‌های ذکر شده برای ساخت بتن تزیینی با سنگدانه نمایان است. (شکل ۱) این قطعات که به عنوان نمای خارجی و داخلی ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید دارای کیفیت ظاهری مناسب و همچنین خواص مکانیکی و دوام مطلوب داشته باشند. بنابراین نوع افزودنی های بکارگرفته شده در ساخت و طرح مخلوط آن اهمیت بسیاری دارد.

1-Decorative concrete
2-Light-transmitting concrete
3-Graphic Concrete
4-Aerated concrete
5- Integral
6- Applied
7- Color hardeners
8- Paints and stuccos

شکل۱ - نمای ظاهری قطعات بتن گرافیکی [4]

سامولی نامانکا[1] معمار و طراح داخلی در سال ۱۹۹۰ بتن را با رویکرد زیبایی‌شناسی مورد مطالعه قرار داد و موفق به خلق سطوح بتنی طرح‌دار موسوم به بتن گرافیکی شد. ایده اصلی این تکنولوژی، چاپ مواد دیرگیرکننده با استفاده از شابلون و یا چاپگرهای مکانیزه بر روی یک غشا خاص می‌باشد که با هدف تصویر کردن یک الگو روی سطح بتن نجام می‌شود. دیرگیرکننده سطحی مانع از سخت‌شدن لایه بتنی در تماس با آن می‌شود. بنابراین با باز کردن قالب پس از ۲۴ ساعت در لایه سطحی بتن، گیرش اتفاق نیافتاده و با فشار آب شسته شده و طرح مورد نظر با ضخامت ۱ میلی‌متر پدید می‌آید. [4]

مطابق بررسی‌های صورت گرفته، چند شرکت مشهور در حوزه بتن تزیینی به صورت گسترده در زمینه پژوهش و تولید بتن گرافیکی در دنیا فعال هستند، که هرکدام از تکنیک‌های خاص و بومی‌سازی شده برای چاپ و انتقال طرح استفاده می‌کنند. استفاده از چاپگرهای دیجیتال و سیستم چاپ سیلک اسکرین[2] مکانیزه از روش‌های متداول برای چاپ دیرگیرکننده روی غشا می‌باشد. غشای مورد استفاده برای چاپ باید انعطاف پذیری و چاپ پذیری مناسب داشته باشد و علاوه بر مقاومت کافی در برابر آب، با ترکیبات بتن واکنش ندهد. کاغذ سنگ، کاغذ پلیمری و رول‌های پی وی سی نرم از پرکاربردترین غشاهای مورد استفاده برای تولید بتن گرافیک می‌باشند.[4]

قطعات پیش‌ساخته بتن گرافیکی برای پوشش فضاهای داخلی و نماهای خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین کیفیت بصری آن مانند دقت انتقال طرح، صاف و تراز بودن سطح، همچنین میزان جذب آب، دوام و مقاومت فشاری این قطعات بسیار مهم است. استفاده از قالب‌های صاف و شاقول، مهار مناسب قالب‌ها، استفاده از دانه‌بندی پیوسته و استاندارد برای سنگدانه و همچنین بهره‌گیری از طرح مخلوط و افزودنی‌های مناسب برای تهیه مخلوطی کارپذیر از جمله نکات مهم اجرایی در ساخت بتن گرافیکی است. مطابق ASTMC1364 برای ساخت قطعات پیش‌ساخته بتنی مورد استفاده در کف و دیوار، حداقل مقاومت فشاری ۴۵ مگاپاسکال در ۲۸ روز و جذب آب حدکثر ۶ درصد وزنی مناسب است. [5] همچنین برای تامین کارپذیری مناسب، برای نسبت آب به سیمان محدوده ی ۰/۴۰ تا ۰/۴۵ مورد نظر می‌باشد. [2] علاوه بر سنجش خواص مکانیکی اولیه، قطعات تولید شده باید مورد بازرسی چشمی قرار گیرد. به طوری که سطوح نمایان آن‌ها باید دارای طرح یکنواخت بوده و هیچ‌گونه حفره بزرگ‌تر از ۰/۸ میلی‌متر روی آن وجود نداشته باشد. درصورت وجود حفره‌های کوچک‌تر، در هر ۲۵ میلی‌مترمربع کمتر از ۳ حفره وجود داشته باشد.[5]

1- Samuli Naamanka
2- Silk Screen Printing

۲- فعالیت های تجربی

برای دستیابی به اهداف پژوهش، فعالیت‌های آزمایشگاهی جهت بومی‌سازی روش ساخت بتن گرافیک در آزمایشگاه بتن انجمن صنفی تولیدکنندگان بتن آماده و قطعات بتنی ایران، صورت گرفته است که به شرح زیر می باشد.

۲-۱ مواد اولیه

۲-۱-۱ سیمان پرتلند: سیمان مورد استفاده در این پژوهش، سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان آبیک می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است.

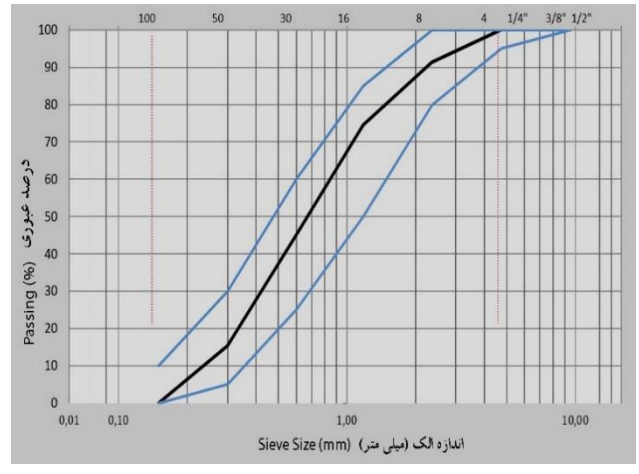
جدول۱ - مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۲

مشخصه	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	LOI	IR	C_3A	Blaine(cm^2/g)
مقدار (٪)	۲۰/۹	۴/۹۵	۳/۷۵	۶۲/۱۵	۳/۱	۲	۰/۸۱	۱/۹	۰/۳۵	۶/۴	۳۰۵۰

۲-۱-۲ سنگدانه

در این پژوهش، تولید بتن گرافیکی با هدف معماری و غیر سازه‌ای صورت گرفته است. از آن‌جایی که کیفیت و اندازه سنگدانه در روانی و کارپذیری بتن تاثیر بسیار زیادی دارد و همچنین برای کیفیت ظاهری قطعات بتن گرافیکی یک سطح صاف مدنظر است، تنها از ریزدانه (ماسه) عبوری از الک شماره ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر) به عنوان سنگدانه استفاده شده است. استفاده از ریزدانه‌ی گردگوشه به افزایش کارپذیری و همچنین کاهش حفره‌های سطحی و بهبود ظاهر قطعات کمک خواهد کرد. بدین منظور از ماسه طبیعی رودخانه‌ای با مدول نرمی ۲/۶۰ و چگالی نسبی ۲/۵۱ در حالت اشباع با سطح خشک *(SSD)* استفاده شده است. جدول و نمودار دانه‌بندی ماسه مصرفی مطابق با استاندارد ASTM C33 به ترتیب در جدول۲ و شکل ۲ آمده است.

شکل۲ - منحنی ریزدانه مصرفی



جدول۲ - جدول دانه بندی ریزدانه مصرفی

درصد عبوری	وزن مانده (g)	شماره الک	سایز الک(mm)
۱۰۰	۰	۴#	۴/۷۵
۹۱/۴	۸۶	۸#	۲/۳۶
۷۴/۸	۱۶۶	۱۶#	۱/۱۸
۴۸/۶	۲۶۲	۳۰#	۰/۶
۲۰/۵	۲۸۱	۵۰#	۰/۳
۸/۲	۱۵۳	۱۰۰#	۰/۱۵
۴	۴۲	۲۰۰#	۰/۰۷۵
۰	۴۰	زیر الکی	

۲-۱-۳ دیرگیرکننده

برخی از مشخصات فیزیکی دیرگیرکننده از جمله غلظت، برکیفیت چاپ الگو بر روی غشا تاثیرگذار است. پس از بررسی چند نوع دیرگیرکننده، در نهایت از محلول دیرگیرکننده *ARMA RT- MIX* تولید شده توسط شرکت شیمی سازه استفاده شده است. در این ماده مشکلات رایج دیرگیرکننده‌ها مانند ته‌نشین شدن مواد جامد و عدم چاپ پذیری به علت رقیق بودن، وجود ندارد.

جدول۳ - مشخصات فنی دیرگیرکننده ARMA RT-MIX

حالت فیزیکی	پایه شیمیایی	رنگ	وزن مخصوص (g/cm^3)	مقدار کلراید
مایع	گلوکونات سدیم	سفید	۱/۲۰ ± ۰/۰۲	کمتر از ۰/۱ درصد

۲-۱-۴ فوق روان کننده (SP)

کارپذیری و تراکم‌پذیری بتن نقش مهمی در ایجاد سطوح صاف و بدون حفره در ساخت قطعات بتن تزیینی دارد. با استفاده‌ی صحیح از فوق روان‌کننده‌ها می‌توان بدون افزایش بی‌رویه نسبت آب به سیمان و همچنین کسب مقاومت فشاری بالاتر و دوام بیشتر، به روانی و کارپذیری مناسب دست یافت. بدین منظور از فوق‌روان‌کننده *ARMA PX-MIX* تولیدشده توسط شرکت شیمی سازه با دوز مصرف ٪ ۰/۳۵ استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۴ آمده است.

جدول۴ - مشخصات فنی فوق روان کننده ARMA PX-MIX

حالت فیزیکی	پایه شیمیایی	رنگ	وزن مخصوص(g/cm^3)	PH
مایع	پلی کربوکسیلات اتر	زرد روشن	±۱۰/۱ ۰/۰۲	۶

۲-۱-۵ افزودنی هوازا (AE)

در برخی از نمونه‌ها تاثیر استفاده همزمان از فوق‌روان‌کننده و افزودنی هوازا بررسی شده است. افزودنی‌های هوازا به منظور بهبود کارپذیری، کاهش نفوذپذیری، کاهش جداشدگی و آب انداختن و همچنین افزایش مقاومت در چرخه یخ زدن و آب شدن، به بتن اضافه می‌شوند.[6] بدین منظور با میزان ٪ ۰/۰۲ وزن سیمان از هوازا استفاده شده است.

۲-۱-۶ کاغذ سنگ (معدنی)

کاغذ سنگ (کاغذ معدنی) با چگالی نسبی ۱/۰-۱/۶ دارای ترکیبات خنثی بوده که علاوه بر مقاومت کافی در مقابل آب و روغن، در هیچ‌صورت با ترکیبات بتن واکنش نمی‌دهد. این ماده به دلیل عدم وجود الیاف سلولوزی، دارای بافت همگن و یکنواخت می‌باشد بنابراین ضد آب بوده و در اثر تغییر دما و رطوبت، هیچ‌گونه تغییر ابعادی در آن رخ نمی‌دهد. [7] از کاغذ معدنی در صنایع چاپ، نشر و بسته‌بندی استفاده‌های زیادی می‌شود و می‌توان ضخامت‌های مختلفی از این محصول را به‌صورت صنعتی تولید کرده و به‌عنوان یک جایگزین برای کاغذ سلولوزی استفاده کرد.

۲-۲ روش کار

۲-۲-۱ طرح مخلوط و روش ساخت نمونه‌ها

با هدف بررسی طرح اختلاط و تاثیر افزودنی‌ها بر کیفیت ظاهری و خواص اولیه مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری و جذب آب بتن گرافیک، ۱۲ نمونه با طرح اختلاط متفاوت تهیه شد. بنابر توصیه راهنمای تولید بتن تزیینی *ACI* نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۴۵ و مطابق با مقاومت هدف، مقدار سیمان ۴۳۵ کیلوگرم برمترمکعب و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. از دو افزودنی فوق روان‌کننده و افزودنی هوازا با مقدار مصرف به ترتیب ۰/۳۵ درصد و ۰/۰۲ درصد وزنی سیمان استفاده شده است.

با مشخص بودن عیار سیمان، نسبت آب به سیمان و سایر مولفه‌های معین، وزن سنگدانه از رابطه حجم مطلق مطابق با راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن در هر نمونه تعیین شد.

عبارت ۱: رابطه حجم مطلق برای تعیین جرم سنگدانه[8] $$A_{SSD} = \rho_{ASSD}\left(\mathbf{1000} - \frac{c}{\rho c} - \frac{Wf}{\rho w} - \frac{D}{\rho D} - \boldsymbol{Va}\right)$$

A_{SSD} = جرم کل سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک برحسب کیلوگرم بر مترمکعب

c= جرم سیمان برحسب کیلوگرم بر مترمکعب

W_f= جرم آب آزاد برحسب کیلوگرم بر مترمکعب

D= جرم مواد افزودنی برحسب کیلوگرم بر مترمکعب

V_a= حجم هوای موجود در بتن (عمدی و ناخواسته) برحسب دسی‌متر مکعب

ρ_{ASSD} = وزن مخصوص متوسط سنگدانه اشباع با سطح خشک برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب

ρ_c = جرم مخصوص سیمان برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب

ρ_w = جرم مخصوص آب بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب

ρ_D = جرم مخصوص افزودنی بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب

جدول۵ : طرح های اختلاط آزمایش شده

طرح مخلوط	سیمان (kg/m^3)	نسبت آب به سیمان (w/c)	سنگدانه (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	SP (kg/m^3)	AE (kg/m^3)
M1	۴۳۵	۰/۴	۱۶۷۱	۱۷۴	۰	۰
M2	۴۳۵	۰/۴	۱۶۶۶	۱۷۴	۱/۶	۰
M3	۴۳۵	۰/۴	۱۵۹۱	۱۷۴	۱/۶	۰/۰۹
M4	۴۳۵	۰/۴۵	۱۶۱۵	۱۹۶	۰	۰
M5	۴۳۵	۰/۴۵	۱۶۱۱	۱۹۶	۱/۶	۰
M6	۴۳۵	۰/۴۵	۱۵۳۶	۱۹۶	۱/۶	۰/۰۹
M7	۵۰۰	۰/۴	۱۵۵۳	۲۰۰	۰	۰
M8	۵۰۰	۰/۴	۱۵۴۸	۲۰۰	۱/۸	۰
M9	۵۰۰	۰/۴	۱۴۸۸	۲۰۰	۱/۸	۰/۱
M10	۵۰۰	۰/۴۵	۱۴۹۰	۲۲۵	۰	۰
M11	۵۰۰	۰/۴۵	۱۴۸۵	۲۲۵	۱/۸	۰
M12	۵۰۰	۰/۴۵	۱۴۲۵	۲۲۵	۱/۸	۰/۱

پیش از اختلاط مواد، بهتر است سنگدانه در حالت اشباع با سطح خشک بوده و مواد مصرفی در دمای استاندارد آزمایشگاهی نگهداری شوند. پس از پایان اختلاط، آزمونه‌های بتنی مطابق استاندارد ملی ۲-۱۶۰۸ در قالب‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری و در تعداد لایه‌های مناسب و در هر لایه با تعداد ضربات مناسب با کوبه استاندارد متراکم شده و قالب‌گیری گردید. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و در آب عمل‌آوری می‌شوند.

علاوه بر ساخت آزمونه‌های مکعبی، برای بررسی تاثیر طرح مخلوط بر کیفیت ظاهری قطعات بتن گرافیکی، آزمونه‌هایی با ابعاد ۳۰cm×۳۰cm×۳cm ساخته شده است. در کف این قالب‌ها غشای چاپ‌شده حاوی دیرگیرکننده وجود داشته و مخلوط‌های ساخته شده درون قالب و بر روی غشا ریخته شدند. در این پژوهش به منظور تلاش برای بومی‌سازی روش ساخت بتن گرافیکی، از روش چاپ سیلک اسکرین دستی بر روی کاغذ سنگ با استفاده از شابلون با تکنیک فرآیند منفی و همچنین شستشو با فشار آب استفاده شده است. بهتر است محلول

غلیظ دیرگیرکننده با استفاده از کاردک (اسکوییچی) با زاویه ۷۰ درجه بصورت یکنواخت بر روی شابلون پخش شود تا مقدار دیرگیرکننده در همه جای الگو یکسان باشد. (شکل ۳) پس از چاپ به منظور خشک شدن، غشا در هوای آزاد و دور از نور مستقیم خورشید قرار داده شد.

شکل۳ - پخش دیرگیرکننده با استفاده از کاردک روی شابلون (راست)- الگوی چاپ شده بر غشا (چپ)

قبل از ریختن بتن، قالب باید به خوبی به روغن قالب آغشته شود. لایه اول مخلوط به آرامی بر روی غشا پخش شده و با ضربات چکش هوای محبوس زیر آن خارج شده است. ضربات باید به گونه‌ای باشد که موجب جابجایی شدید بتن بر روی غشا نشود. نمونه‌های بتنی پس از ۲۰ تا ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و پس از برداشتن غشا با فشار آب شسته شده اند.

شکل۴ - محل انجام آزمایش‌ها در انجمن صنفی تولیدکنندگان بتن آماده (راست)- عمل‌آوری در حوضچه (چپ)

۳-روش تحقیق

۳-۱ استانداردها و آزمون‌های انجام‌شده بر روی بتن تازه و بتن سخت‌شده

به منظور تعیین میزان هوای بتن تازه، به روش فشاری از استاندارد ملی ۱۵۹۰۴ و برای تعیین روانی بتن تازه به روش اسلامپ از روش آزمون مطابق استاندارد ملی ۲-۳۲۰۳ استفاده شده است.

برای ساخت و عمل‌آوری آزمونه‌های مقاومت فشاری مطابق استاندارد ملی ۲-۱۶۰۸ و به منظور تعیین مقاومت فشاری آزمونه‌ها مطابق استاندارد ملی ۳-۱۶۰۸ عمل شده است. همچنین برای تعیین میزان جذب آب در ۲۸ روز از روش آزمون مطابق استاندارد ملی ۱۴۷۳۳ استفاده شده است. در استانداردهای ملی ایران هیچ الزامات اختصاصی در رابطه با بتن‌های تزیینی وجود ندارد. اما از آنجایی که قطعات بتنی تولید شده در این پژوهش به عنوان بلوک‌های پیش‌ساخته دارای اسلامپ محسوب می‌شوند که پس از آماده‌سازی در نمای داخلی و خارجی ساختمان

بـه‌کار می‌رونـد، بنـابراین بررسـی کیفیـت، پـذیرش یـا عـدم پـذیرش نهـایی قطعـات، مطـابق بـا اسـتاندارد ملـی ۱۲۰۳۸ (سـنگ بتنـی معمـاری) معـادل اسـتاندارد ASTM C1364 بـر اسـاس شاخصـه‌های ظـاهری، مقاومـت فشـاری و جـذب آب انجام شده‌است. نتایج ذکرشده برای مقاومت فشاری و جذب آب، میانگین نتیجه دو آزمونه می‌باشد.

۴-بحث و بررسی نتایج آزمایش‌ها

نتـایج آزمون‌هـای انجـام شـده بـر روی نمونـه‌های بـتن تـازه و بـتن سخت‌شـده در جـدول ۶ آمـده اسـت کـه بـه تفکیـک بررسی می‌شود.

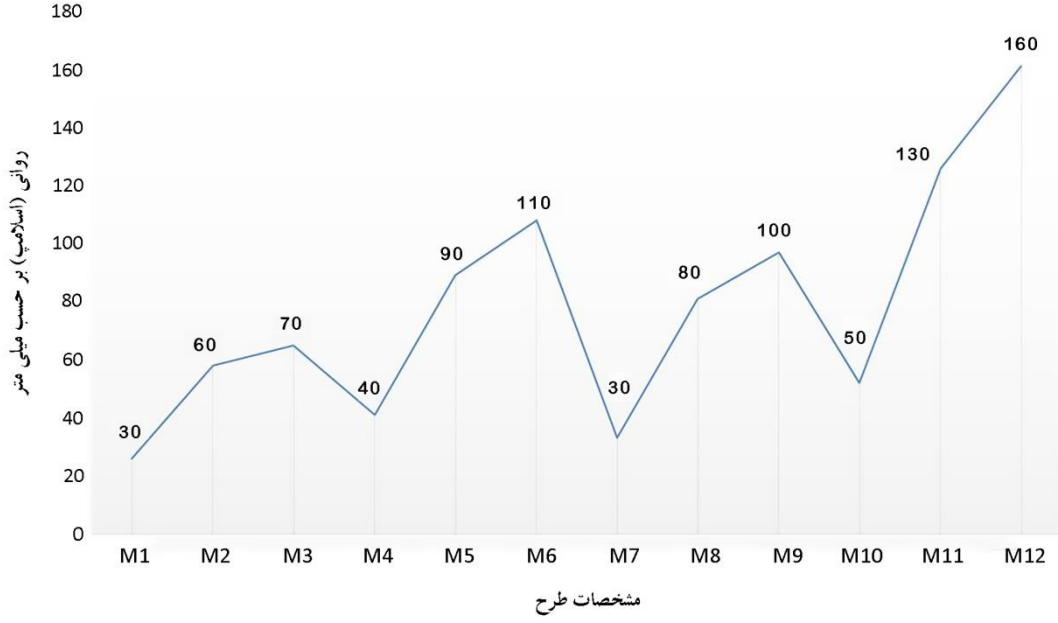
جدول۶ - نتایج آزمون‌های بتن تازه و بتن سخت‌شده

	طرح اختلاط	اسلامپ (mm)	میزان هوا موجود (%)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Mpa)	جذب آب ۲۸ روزه (%)
نسبت آب به سیمان ۰/۴۰	M1	۳۰	۲/۸	۴۳/۲	۴/۱
	M2	۶۰	۲/۹	۴۴/۱	۳/۹
	M3	۷۰	۵/۲	۳۴/۷	۶/۲
نسبت آب به سیمان ۰/۴۵	M4	۴۰	۲/۸	۴۱/۱	۴/۳
	M5	۹۰	۳/۱	۴۱/۵	۴/۲
	M6	۱۱۰	۵/۳	۳۱/۶	۶/۷
نسبت آب به سیمان ۰/۴۰	M7	۳۰	۳/۱	۵۳/۷	۳/۶
	M8	۸۰	۳/۲	۵۴/۶	۳/۲
	M9	۱۰۰	۶/۴	۳۷/۸	۵/۸
نسبت آب به سیمان ۰/۴۵	M10	۵۰	۳/۸	۵۱/۹	۳/۸
	M11	۱۳	۳/۹	۵۲/۵	۳/۵
	M12	۱۶	۶/۶	۳۷/۱	۵/۹

۴-۱ آزمون‌های بتن تازه

۴-۱-۱ روانی بتن (اسلامپ) و میزان هوای بتن تازه

به منظور سـنجش تـاثیر کارپـذیری بـر کیفیـت ظـاهری قطعـات از آزمون‌هـای اسـلامپ مطـابق بـا اسـتاندارد ملـی ۲-۳۲۰۳ و میـزان هـوای بـتن تـازه مطـابق اسـتاندارد ملـی ۱۵۹۰۴ اسـتفاده شده‌اسـت کـه نتـایج آن در جـدول ۶ آمـده اسـت. کارپـذیری نمونـه‌ها بـا دو نسـبت آب بـه سـیمان ۰/۴ و ۰/۴۵ بـدون اسـتفاده از فـوق روان‌کننـده بسـیار پـایین بـوده و بـرای سـاخت قطعـات بـتن تزیینـی مناسـب نیسـت. نتـایج نشـان داد اسـتفاده هـم زمـان از فـوق روان‌کننـده و حبـاب‌زا موجـب بهبود ۲/۴ تا ۲/۹ برابـری اسـلامپ نمونـه‌ها شده‌اسـت. همچنـین هـوازا بـا ایجـاد حباب‌هـای عمـدی بسـیار ریـز و یکنواخـت، تراکم‌پـذیری و شـکل‌پذیری بـتن در قالـب را تسـهیل می‌کنـد.[9] همـانطور کـه در شـکل ۵ آمـده اسـت، بـا افـزایش عیـار سـیمان از ۴۳۵ کیلـوگرم بـر مترمکعـب بـه ۵۰۰ کیلـوگرم بـر مترمکعـب و افـزایش نسـبت آب بـه سـیمان بـه دلیـل بیشـتر شدن حجم خمیـر شـیب نمـودار تنـدتر شـده و اثـر فوق‌روان‌کننـده و حبـاب‌زا تشـدید می‌یابـد. همچنـین بـا افـزایش حجـم خمیر در مخلوط، حباب‌زایی تسهیل می‌شود و درصد هوا افزایش می‌یابد.[10]

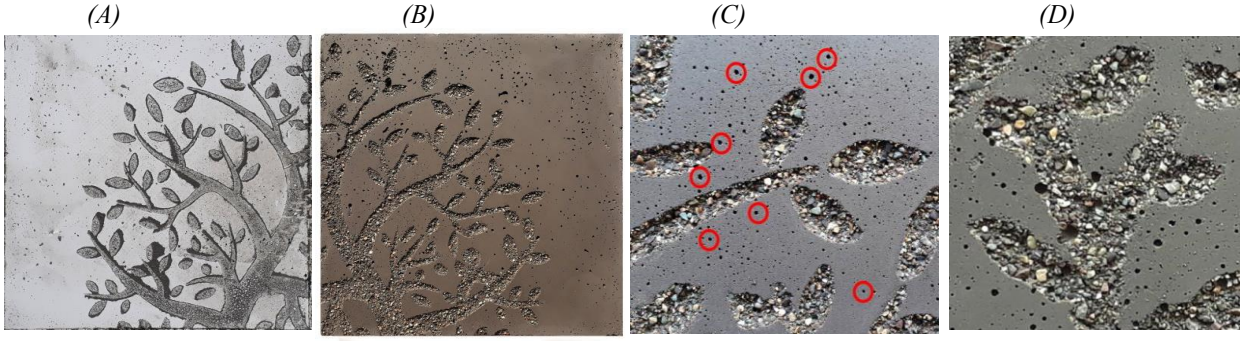


شکل۵ - نتایج آزمون روانی بتن به روش اسلامپ

۴-۲ آزمون‌های بتن سخت شده

۴-۲-۱ بررسی ظاهری قطعات

نمونه‌های M1، M4، M7 و M10 که بدون استفاده از فوق‌روان‌کننده تولید شدند، با اسلامپ کمتر از ۶ میلی‌متر فاقد کارپذیری کافی بوده و برای ساخت قطعات بتن گرافیکی مناسب نیستند. به‌علت مناسب نبودن دانه‌بندی و عدم استفاده از فوق‌روان‌کننده در برخی از نمونه‌ها، مخلوط کارپذیری بسیار کمی داشته‌است. این مسئله موجب به هم ریختگی طرح چاپ شده روی غشا در برخی از نقاط و پخش نامناسب دیرگیرکننده شده‌است. درصورت کارپذیر نبودن مخلوط، به دلیل تراکم پذیری نامناسب، در سطح قطعات حفره‌های زیادی پدید آمده که بر اساس الزامات استاندارد ملی ۱۲۰۳۸ موجب مردود شدن ظاهری قطعات شده است. (شکل ۶)



شکل۶ - (A): غشای جدا شده از قطعه بتنی پس از خشک شدن (B) :قطعه تولیدی مردود شده به دلیل حفره های زیاد (C) و (D) : بزرگ نمایی حفره‌های ایجاد شده روی سطح قطعه مردود

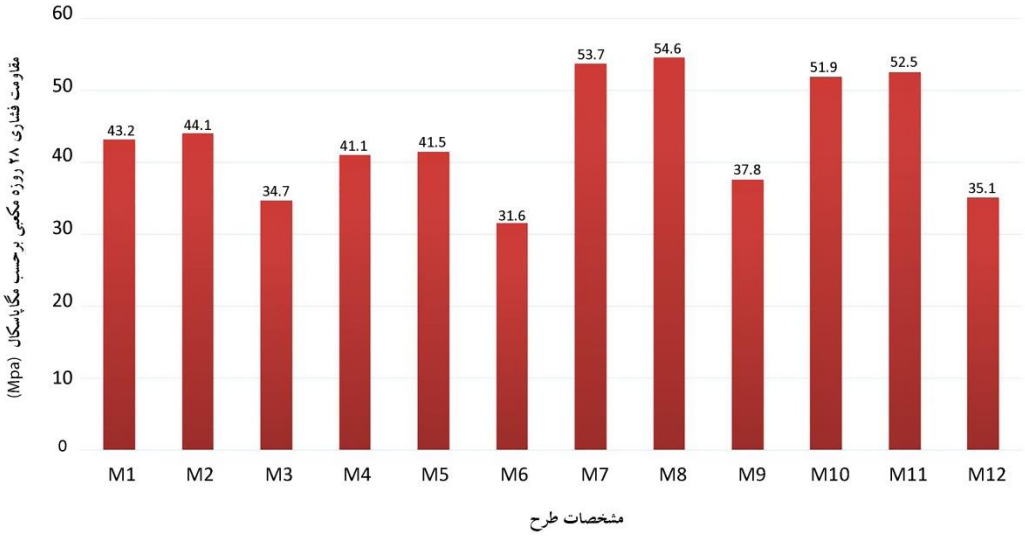
با افزودن فوق روان‌کننده و افزایش مقدار سیمان به دلیل بهبود کارپذیری و اصلاح گرانروی مخلوط بتن، پخش و تراکم آن در قالب با سهولت بیشتری انجام شد. همچنین با استناد به نتایج آزمون اسلامپ، تاثیر افزودنی حباب‌زا که باهدف افزایش دوام قطعات نما در برابر چرخه یخ زدن و آب شدن به ترکیب اضافه شده بود، بر روی میزان روانی، گرانروی و شکل پذیری مثبت ارزیابی شد. نمونه‌های M5، M6، M8، M9، M11 و M12 که به دلیل افزایش حجم خمیر و وجود افزودنی‌ها دارای کارپذیری مناسب بودند، پس از خروج از قالب و عمل‌آوری در حوضچه آب دارای سطح صاف و بدون حفره بوده و از لحاظ بصری قابل قبول هستند. (شکل ۷) طرح مخلوط نیمی دیگر از نمونه‌ها که در همان ابتدای کار به دلایل بصری مردود شده اند، برای بتن گرافیکی غیرمناسب تشخیص داده شده است.

شکل۷ - قطعات گرافیک بتن مورد قبول از لحاظ بصری

۲-۲-۴ مقاومت فشاری

آزمونه‌های مکعبی ساخته‌شده پس از عمل‌آوری برای سنجش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۶ و شکل ۸ قابل مشاهده است. نتایج حاکی از آن است که با ثابت ماندن مقدار نسبت آب به سیمان و افزودن فوق روان‌کننده در نمونه‌های با کارپذیری کمتر، مقاومت فشاری به میزان کمی افزایش یافته که به دلیل بهبود ریزساختار بتن می‌باشد.[10] با بیشتر شدن نسبت آب به سیمان از ۰/۴۰ به ۰/۴۵ مقاومت فشاری نمونه‌ها حدودا ٪۵ کاهش یافت.در آزمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ تاثیر مثبت فوق روان‌کننده بر روی مقاومت فشاری کمتر بوده است. مقاومت فشاری نمونه‌ها با مقدار سیمان ۴۳۵ کیلوگرم برمترمکعب کمتر از ۴۵ مگاپاسکال بوده و الزامات استاندارد ملی ۱۲۰۳۸ را برآورده نمی‌سازد. با افزایش مقدار سیمان از ۴۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب به ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب مقاومت فشاری به محدوده قابل قبول رسیده است. نمونه‌های M8 و M11 با مقدار سیمان ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ که حاوی فوق روان‌کننده بودند، علاوه بر روانی و کارایی مناسب دارای مقاومت فشاری مناسب نیز بودند و برای ساخت قطعات بتن معماری قابل قبول می‌باشند.

استفاده از افزودنی حباب‌زا برخلاف تاثیر مثبت بر روی روانی، شکل پذیری ظاهری و دوام بتن، تاثیر منفی زیادی بر روی مقاومت فشاری نمونه‌ها داشته است. به طوری که با افزودن هر ۱ درصد حباب هوای عمدی به بتن، مقاومت فشاری حدود ۳/۵ تا ۳/۸ مگاپاسکال کاهش یافته و مقاومت به محدوده غیرقابل قبول رسیده‌است. همچنین با افزایش مقدار خمیر سیمان و تسهیل حباب‌زایی، مقاومت فشاری در نمونه های M9 و M12 کاهش شدیدتری را نشان می‌دهد و موجب کاهش ۳۰ تا ۳۵ درصدی مقاومت فشاری شده است که مطابق الزامات غیرقابل قبول می‌باشد.



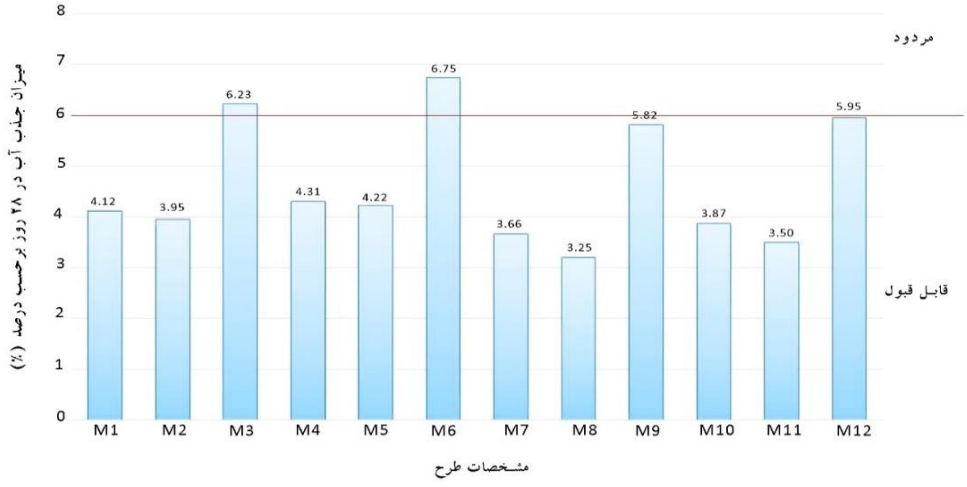
شکل۸ - نتایج آزمون مقاومت فشاری در ۲۸ روز برحسب مگاپاسکال

شکل۹ - توزین آزمونه‌ها و قرارگیری زیر جک مقاومت فشاری (راست) - گسیختگی از چهار جهت آزمونه (چپ)

۳-۲-۴ جذب آب:

نتایج آزمون جذب آب سنگ بتنی معماری که مطابق استاندارد ملی ۱۴۷۳۳ انجام شده‌است، در نمودار شکل ۱۰ آمده است. جذب آب و مقاومت فشاری دو معیار متفاوتی هستند که ارتباط مستقیم اثبات شده‌ای باهم ندارند. اما با مقایسه نتایج دو نمودار شکل ۸ و ۱۰ می‌توان دریافت که آزمونه‌های پرمقاومت‌تر به علت ساختار متراکم‌تر و تخلخل کمتر، جذب آب کمتری نیز دارند. در آزمونه‌هایی که افزودنی فوق روان‌کننده موجب بهبود کارپذیری و تراکم‌پذیری شده‌است، جذب آب اندکی بهبود یافته است. اما افزودنی حباب‌زا در نمونه‌های هوازایی شده موجب افزایش قابل توجه جذب آب شده است. از آنجایی که اگر حباب‌های تولیدشده در بتن، ریز و یکنواخت باشد موجب کاهش جذب آب می‌گردد، می‌توان نتیجه گرفت ماده حباب‌زای مورد استفاده نامناسب بوده است. در مجموع تمامی نمونه‌ها به جز M3 و M6 دارای جذب آب زیر ٪۶ بوده و مطابق با استاندارد ۱۲۰۳۸ قابل قبول می‌باشند. همچنین کمترین جذب آب با مقدار ٪۳/۲۵ مربوط به طرح اختلاط M8 با مقدار سیمان ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ با فوق‌روان‌کننده و بدون استفاده از هوازا می‌باشد.

با افزایش مقدار سیمان با اینکه افزایش حجم خمیر موجب تسهیل حباب‌زایی در آزمونه‌ها شده بود، اما درصد جذب آب در نمونه‌های هوازایی شده M9 و M12 پایین‌تر از ۶ درصد بوده است که برای قطعات بتن تزیینی مناسب است. در حالی که نمونه‌های هوازایی شده M3 و M6 با مقدار سیمان ۴۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب نتایج غیرقابل قبول داشتند.



شکل۱۰- نتایج آزمون جذب آب در ۲۸ روز بر حسب درصد

۵-نتیجه‌گیری

۱-روانی بتن و کارپذیری آن در کیفیت ظاهری قطعات بسیار تاثیرگذار بوده و نمونه های با اسلامپ کمتر از ۶۰ میلی‌متر برای ساخت بتن گرافیکی توصیه نمی‌شود. در نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۴۵ بدون استفاده از فوق روان‌کننده، کارپذیری پایین موجب به هم ریختن طرح چاپی روی غشا شده و بتن سخت شده پس از خروج از قالب حفره های سطحی غیرقابل قبول دارد.

۲- استفاده از افزودنی فوق روان‌کننده با حفظ مقاومت فشاری، موجب بهبود تراکم پذیری و شکل پذیری نمونه‌ها شده است.

۳- عملکرد افزودنی هوازا در کارپذیری، شکل‌پذیری و معیارهای بصری قطعات، مثبت ارزیابی شده است و نمونه‌های هوازایی‌شده پس از خروج از قالب سطح صاف و بدون حفره داشتند. به دلیل کاهش ۳۰ تا ۳۵ درصدی مقاومت فشاری در آزمونه‌ها با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵، استفاده از آن در محل‌هایی که مقاومت فشاری اهمیت دارد توصیه نمی‌شود. هرچند درصورت استفاده از افزودنی حباب‌زا، با کاهش نسبت آب به سیمان می‌توان به محدوده‌ی مقاومت فشاری مطلوب دست یافت.

۴- نمونه‌های با مقدار سیمان ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ با استفاده از فوق روان‌کننده و بدون استفاده از افزودنی هوازا از لحاظ روانی (اسلامپ)، مقاومت فشاری، جذب آب و الزامات ظاهری عملکرد مناسبی داشته و برای ساخت قطعات بتن گرافیک مطابق استاندارد ملی ایران قابل قبول می‌باشد.

۵- برای ساخت بتن گرافیک استفاده از چاپگرهای دیجیتالی و مکانیزه توصیه می‌شود، زیرا موجب افزایش دقت چاپ طرح و پخش یکنواخت دیرگیرکننده روی غشا و در نتیجه ضخامت یکسان اجرای طرح روی قطعات می‌شود.

۶-سپاسگزاری

تمامی فعالیت‌های آزمایشگاهی در محل آزمایشگاه انجمن صنفی تولیدکنندگان بتن آماده انجام شده‌است. از همکاری متخصصین در آن مرکز، کمال تشکر و سپاسگزاری داریم.

مراجع

[1] Wiesner-Chianese, Julianne (2015). Modern in the Mountains: An Analysis of the Structural and Decorative Concrete at Jackson Lake Lodge in Grand Teton National Park, WY*, Masters Thesis, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA.*

[2]ACI Committee 310 (2013). Guide to Decorative Concrete. Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute.

[3] Freedman, Sidney (2004), History of Exposed Aggregate (Mo-Sai) Architectural Precast Concrete, PCI JOURNAL 49, URL: www.pci.org/PCI/Publications/PCI_Journal/Issues/2004/May-June.aspx

[4]Graphic Concrete Ltd (2020), Design Instructions, URL: https://www.graphicconcrete.com/ graphicconcrete/ library/pdf/GCDesignInstructions2020_EN_V1_Small.pdf

[5] ASTM C1364-*19 (2019), Standard Specification for Architectural Cast Stone, ASTM International, West Conshohocken, PA.*

[6] Salem,G. NEHME. (2017), Effect of air entraining admixture on the properties of self-compacting

concrete incorporating supplementary cementitious materials, Pollack Periodica, Vol. 12, No. 3, pp. 85–98.

[7] Cancy Chu ,Petronella Nel (2019), Characterisation and deterioration of mineral papers, AICCM Bulletin, pp. 37-49.

[8] Iran Building and Housing Research Center (2010), National Guide to Concrete Mixing Design Method, Tehran.(in Persian)

[9] Hieu Duy Nguyen et al.(2020) , Effects of air entraining admixture on the properties of lightweight aggregate concrete, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 869.

[10] Kalhori, Moosa et al. (2021), Innovative air entraining and air content measurement methods for roller compacted concrete in pavement applications, Construction and Building Materials, Volume 279.