

## بررسی نوع و میزان افزودنی فوق‌روان‌کننده بهینه در تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت) در پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد

سید محمد سجادی عطار<sup>۱</sup>، مصطفی خوش‌طبخ<sup>۲\*</sup>، محمود تقدیسی<sup>۳</sup> و امیرحسین مددی<sup>۴</sup>

- ۱- عضو هیئت علمی دانشکده فنی شهید منتظری مشهد- کارشناسی ارشد سازه، گروه تخصصی قائم (عج)
- ۲- کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، مؤسسه مهندسی رهاب، گروه تخصصی قائم (عج)
- ۳- کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی، مؤسسه مهندسی رهاب، گروه تخصصی قائم (عج)
- ۴- کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه حکیم سبزواری

\* Khoshtabkh@iran.ir

E: کد موضوع مقاله:

### چکیده

افزودنی فوق‌روان‌کننده در مخلوط بتن معمولاً کارایی اولیه را تضمین می‌نماید. با این وجود، کارایی وابسته به زمان مخلوط، اصولاً بر پایه ساختار شیمیایی و نوع فوق‌روان‌کننده و سازگاری آن با اجزای دیگر از جمله سیمان می‌باشد. فوق‌روان‌کننده‌های بر پایه پلی‌کربوکسیلات دارای ساختار شیمیایی با قابلیت اصلاح و بهبود عملکرد هستند. این پژوهش، به بررسی انواع فوق‌روان‌کننده‌های پلی‌کربوکسیلاتی موجود در ایران جهت دستیابی به نوع و میزان بهینه این افزودنی برای استفاده در تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت) پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد پرداخته است. بدین منظور، ۱۹ طرح اختلاط شامل انواع فوق‌روان‌کننده گوناگون حاصله از ۱۱ شرکت مختلف، تهیه شده و نسبت مصرف مناسب هر یک جهت دستیابی به اسلامپ اولیه (۰ دقیقه) و نهایی (۱۵ دقیقه) موردنظر به دست آمده است. آزمون‌های مکعبی نیز از هر طرح اختلاط ساخته شده و در سنین ۶ ساعته، ۷ و ۲۸ روزه تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته است.

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از میزان بهینه هر نوع فوق‌روان‌کننده منجر به حصول حداقل مقاومت‌های فشاری موردنظر در تمامی ۱۹ طرح نهایی شده است. علاوه بر این، مخلوط بتن‌هایی که بدون جداشدگی و آب‌انداختگی بوده و از تراکم‌پذیری و حالت خمیری مناسبی برخوردار بودند، اسلامپ مناسبی را به همراه داشته‌اند، درحالی که کاهش هر یک از این ویژگی‌ها حالت نامناسبی به اسلامپ داده و آن را به سمت برشی و ریزشی شدن پیش برده است. در نهایت، طرحی با میزان فوق‌روان‌کننده ۰/۵۴ درصد و کمترین قیمت حاصله، به‌عنوان طرح بهینه نهایی انتخاب گردید.

کلمات کلیدی: فوق‌روان‌کننده، بهینه‌سازی، قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت)، پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد.

## Investigation of the Optimal Type and Amount of Super-Plasticizer Admixture in Precast Concrete (Segment) Construction in Line 3 of Mashhad Urban Railway Project

S. M. Sajjadi-Attar<sup>1</sup>, M. Khoshtabkh<sup>2\*</sup>, M. Taghdisi<sup>3</sup>, A. Madadi<sup>4</sup>

- 1- Faculty Member of Montazeri Technical College of Mashhad- M.Sc. of Structural Engineering, Qaem Specialized Group
- 2- M.Sc. of Construction Engineering and Management, Rahab Engineering Institute, Qaem Specialized Group
- 3- M.Sc. of Marine Structures, Rahab Engineering Institute, Qaem Specialized Group
- 4- M.Sc. of Structural Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

\* Khoshtabkh@iran.ir

Subject Code: E

---

### Abstract

---

Super-plasticizer (SP) admixture in concrete mixture usually guarantees the initial workability. However, the time dependent workability of mixtures principally depends on the chemical structure and type of SP and its compatibility with cement. Polycarboxylate-based superplasticizers (PC-based SPs) have chemical structures, which have the potential to be modified to improve their performances. This study investigates the different available PC-based SPs in order to achieve the optimal type and amount of SP in production of precast concrete tunnel segments required for the line 3 of Mashhad urban railway project. To this aim, 19 mixture designs incorporating various SPs obtained from 11 companies were constructed and the appropriate dosage of each SP to obtain the desired initial (0 min) and final (15 min) slump values was achieved. Cubic specimens were also constructed and subjected to the compressive test at the ages of 6 hours, 7 and 28 days.

The results indicate that the use of the optimal amount of each type of SP leads to obtain the minimum allowable compressive strength at all 19 mixture designs. Moreover, the mixtures with an appropriate appearance were accompanied by an appropriate slump value; while, reducing the appearance characteristics of each mixture resulted in an improper slump condition. Finally, the mixture design with 0.54% SP admixture and the least cost was selected as the optimal mixture design.

---

**Keywords:** Super-plasticizer (SP), optimization, precast concrete segments, line 3 of Mashhad urban railway project.

---

## ۱. مقدمه

بتن مورد استفاده در ساخت ایستگاه‌های قطار شهری (مترو) و همچنین قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت) از جمله مهم‌ترین موارد کاربرد بتن در صنعت امروز کشور و پروژه‌های وابسته به آن می‌باشد که مقاومت، دوام و طول عمر آن‌ها در سازه‌های مورد استفاده از ویژگی‌هایی است که توجهات بسیاری را به خود جلب کرده است. با وجود اینکه در سال‌های اخیر مطالعاتی در این زمینه صورت پذیرفته است، اما با توجه به سند چشم‌انداز بتن کشور، نیاز به یافتن راه‌حلی مناسب جهت تولید بتن و قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت) با نسبت مقاومت به هزینه بهینه، کارایی و طول عمر مناسب، جهت کاربرد در ساخت مسیرها و ایستگاه‌های قطار شهری (مترو) همچنان احساس می‌شود.

با توجه به گسترش خطوط حمل‌ونقل قطار شهری (مترو) در کشور و از طرفی بر طبق اهداف سند چشم‌انداز ۱۴۰۴، دستیابی هر چه سریع‌تر و اقتصادی‌تر به بتن و محصولات بتنی دارای مقاومت بالا از ضروریات این صنعت جهت بکارگیری در توسعه و ساخت مسیرها و ایستگاه‌های قطار شهری (مترو) می‌باشد. از سویی دیگر، ارزیابی اقتصادی پروژه‌ها به منظور کاهش هزینه تمام‌شده این محصولات و یا به بیان بهتر، تلاش در جهت دستیابی به سیستم بهینه همواره از موضوعاتی است که مورد توجه همگان به‌ویژه مدیران و مسئولان پروژه‌ها بوده و در تصمیمات کلان آن‌ها نقش بسزایی ایفا می‌نماید.

بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در طرح مخلوط بتن جهت تولید بتن و قطعات بتنی پیش‌ساخته تونل (سگمنت) دارای مقاومت و دوام بالا با کارایی مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است به‌طوری‌که می‌تواند در توسعه پایدار و کاهش هزینه‌های ساخت سازه‌های بتنی (به‌طور خاص در ساخت مسیرها و ایستگاه‌های قطار شهری) بسیار مؤثر واقع شود.

## ۲. پیشینه تحقیق

امروزه با توجه به نیاز به گسترش شبکه‌های قطار شهری (مترو) و راه‌های ارتباطی در شهرهای پرجمعیت و بزرگ، همچنین محدودیت‌های نواحی شهری، استفاده از روش‌های مکانیزه تونل‌سازی در نواحی شهری امری مهم و اجتناب‌ناپذیر تلقی می‌گردد [۱، ۲]. استفاده از روش‌های مکانیزه حفاری تونل مستلزم انتخاب تجهیزات مناسب با در نظر گرفتن شرایط پروژه، ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی طول مسیر، تجربه و دانش فنی موجود و الزامات پروژه به‌خصوص زمان‌بندی پروژه است. برای انتخاب تجهیزات و ماشین‌های مناسب باید توانایی‌های ماشین‌های حفاری در زمین‌های متفاوت، دامنه کاربرد و محدودیت‌های خاص هر یک با توجه به شرایط مسیر تونل را در نظر گرفت [۳].

قربانی و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۲ به بررسی سازه‌ای و ژئوتکنیکی شرایط ساخت تونل‌های درون‌شهری پرداختند که نتایج آن‌ها بر اهمیت استفاده از ابزارهای مناسب جهت طراحی، اجرا و کنترل این تونل‌ها و دستیابی به طرحی بهینه در این امور دلالت دارد. کوکوک و همکاران [۵] در مطالعه خود به بررسی شرایط مورد نیاز جهت جلوگیری از اثر آب زیرزمینی در تونل‌ها پرداختند. اهمیت بار ترافیکی بر عملکرد این تونل‌ها نیز توسط ووتر [۶] مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین صادقیانی و دادی‌زاده [۷] پژوهش موردی خود برای یکی از ایستگاه‌های متروی تبریز، به اهمیت انتخاب روش ساخت و مراحل انجام در پایداری ایستگاه در هنگام ساخت و بهره‌برداری پی‌بردند.

استفاده از قطعات پیش‌ساخته در سازه‌های بتنی به‌عنوان یکی از روش‌های صنعتی‌سازی ساختمان، خواسته‌های جدید مهندسی را با کمترین زمان به دلیل پیش‌ساخته بودن فراهم می‌کند [۸، ۹]. چن و همکاران [۱۰] تأکید نمودند پیش‌ساخته سازی می‌تواند

مزایای قابل توجهی از جمله کاهش هزینه‌های کلی، کاهش زمان ساخت و ساز، بهبود کیفیت، افزایش ایمنی در سایت و کاهش تولید ضایعات را به همراه داشته باشد. طی دهه‌های اخیر پیش‌ساخته سازی به‌طور فزاینده در ساختمان‌های مسکونی مورد استفاده قرار گرفته است و به این ترتیب، بارهای زیست‌محیطی در کارگاه کاهش یافته و بهره‌وری و ایمنی در سایت را افزایش داده است [۱۱]. از این رو، ساخت قطعات پیش‌ساخته بتنی تونل (سگمنت) نیز مورد بررسی‌های فراوانی قرار گرفته است. موسیچینو و همکاران [۱۲] به بررسی تأثیر الیاف در عملکرد این سازه‌ها پرداختند که نتایج آن‌ها حاکی از بهبود خواص قطعات پیش‌ساخته تونل (سگمنت) می‌باشد. در سال ۲۰۱۷ نیز، کاراتلی و همکاران [۱۳] بهینه‌سازی قطعات بتنی پیش‌ساخته تونل (سگمنت) حاوی الیاف را مورد بررسی قرار دادند و در نهایت بهترین نتیجه جهت دستیابی به توسعه عملکرد سازه‌ای این قطعات را پیشنهاد دادند. امروزه استفاده از بتن‌های با مقاومت زیاد در نقاط متفاوت جهان به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. برای بالا بردن خواص مهندسی این بتن‌ها استفاده از مواد افزودنی متفاوت رایج گشته است [۱۴-۱۸]. فوق‌روان‌کننده در حال حاضر به‌عنوان یکی از **متداول‌ترین** مواد افزودنی بتن شناخته می‌شود و اضافه کردن آن به مخلوط موجب افزایش کارایی می‌گردد [۱۹]. زمانی که بتن تازه باید برای مدتی طولانی حمل شود، به‌ویژه در هوای **گرم**، اسلامپ اولیه آن بهتر است تا حد ممکن بالا در نظر گرفته شود تا از تغییرات بعدی پارامترهای طرح مخلوط از جمله آب موجود جلوگیری شود. استفاده از فوق‌روان‌کننده‌های پلی‌کربوکسیلاتی این امکان را فراهم می‌آورد که مخلوط بتن با گذشت زمان کارایی مدنظر را به همراه داشته باشد. به‌طور کلی، افت اسلامپ در بتن حاوی فوق‌روان‌کننده بیشتر از بتن معمولی می‌باشد. هر چه میزان آب به سیمان کمتر باشد، افت اسلامپ نسبت به یک اسلامپ اولیه یکسان، بیشتر خواهد بود. زمانی که از بتن **خودتراکم** به‌عنوان بتن آماده استفاده می‌شود، این امر حائز اهمیت است که در زمان بتن‌ریزی خواص مخلوط بتن نسبت به زمان ساخت آن تغییری نکرده باشد [۲۰]. با توجه به استفاده از بتن **خودتراکم** در المان‌های پیش‌ساخته، این امر نشان می‌دهد که تغییرات کارایی با زمان بایستی در نظر گرفته شوند که این امر، نیاز به درک کافی از واکنش‌ها و اندرکنش‌های مابین مصالح پودری، میزان آب مخلوط و به‌ویژه نحوه عملکرد فوق‌روان‌کننده در مخلوط دارد.

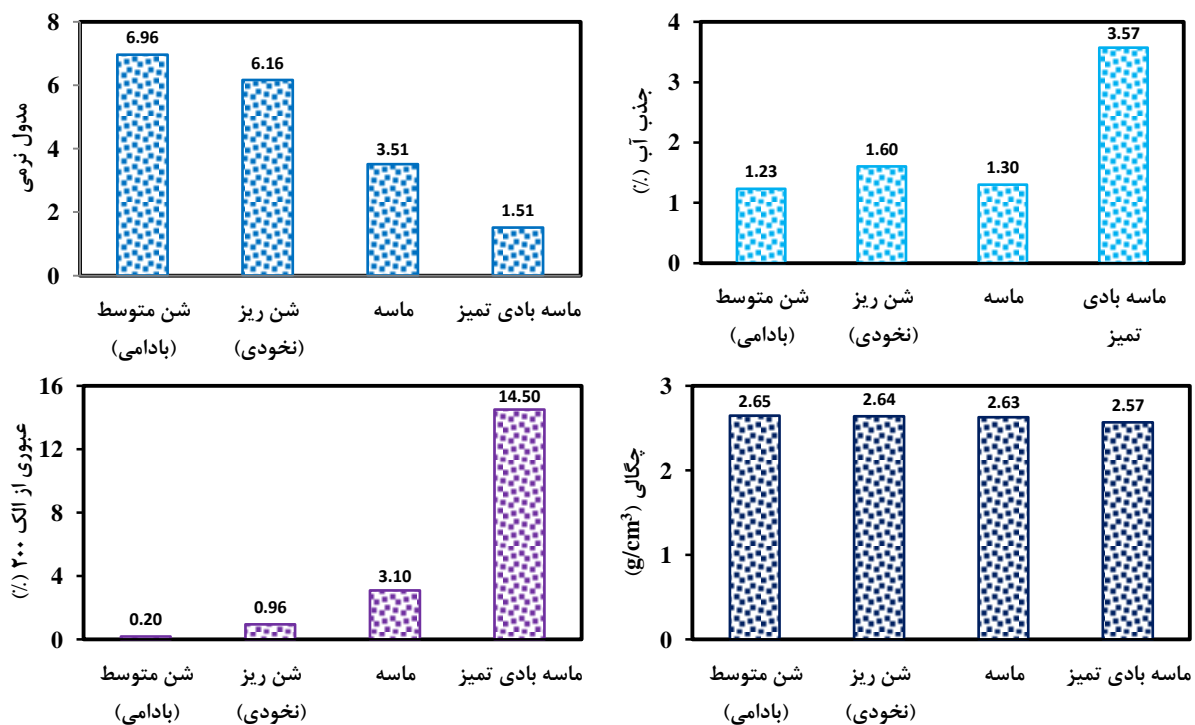
با توجه به مسائل یادشده، هدف از این پژوهش، بررسی نوع و میزان بهینه افزودنی فوق‌روان‌کننده جهت استفاده در تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت) پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد می‌باشد. بدین منظور، انواع مختلف فوق‌روان‌کننده از شرکت‌های مختلف تهیه شده و در ساخت ۱۹ طرح اختلاط گوناگون به کار گرفته شده است. آزمایش اسلامپ در دقایق ۰ و ۱۵ دقیقه پس از ساخت بر روی تمامی مخلوط‌ها صورت گرفته است. همچنین، آزمون‌های مکعبی از هر مخلوط تهیه شده و در سنین ۶ ساعته، ۷ و ۲۸ روزه تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته است. نتایج **آزمایش‌ها** به همراه وضعیت ظاهری بتن‌های تولیدشده مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت طرح اختلاط بهینه به دست آمده است.

### ۳. برنامه آزمایشگاهی

#### ۳.۱. مصالح مصرفی و طرح اختلاط

مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی شامل سیمان، شن متوسط (بادامی)، شن ریز (نخودی)، ماسه، ماسه‌بادی تمیز، آب و افزودنی فوق‌روان‌کننده می‌باشد. سیمان مصرفی تیپ ۲ با حداقل مقاومت  $425 \text{ kg/cm}^2$  از کارخانه سیمان مشهد تهیه شده است. مصالح سنگی مصرفی از معادن شن و ماسه جاده کلات تهیه شده است. شکل ۱ درصد جذب آب، مدول نرمی (FM)،

چگالی و درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ را برای مصالح سنگی مصرفی نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که ماسه‌بادی تمیز دارای بیشترین میزان جذب آب (۳/۵۷٪) در بین مصالح سنگی مورد استفاده می‌باشند. چگالی تمامی مصالح سنگی تقریباً برابر و در بازه  $2/65-2/57 \text{ g/cm}^3$  می‌باشد. درصد عبوری از الک ۲۰۰ نیز با کاهش اندازه ذرات افزایش یافته است؛ به طوری که ماسه‌بادی تمیز با ۱۴/۵٪ بالاترین درصد عبور را به همراه دارد. کنترل‌های آیین‌نامه‌ای نیز برای مقادیر عبوری از الک ۲۰۰ هر یک از مصالح سنگی صورت پذیرفته است و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که مقادیر عبوری از الک ۲۰۰ شن متوسط (بادامی)، شن ریز (نخودی) و ماسه، کمتر از حد مجاز تعیین شده توسط آیین‌نامه برای هر یک می‌باشد. از طرف دیگر، این مقدار برای ماسه بادی تمیز بیشتر از حد مجاز حاصل شده است. با این وجود، کمتر بودن مقدار مجموع وزنی مصالح سنگی عبوری از الک ۲۰۰ ( $40/67 \text{ kg/m}^3$ ) از مقدار مجاز ( $60/51 \text{ kg/m}^3$ ) نشان می‌دهد که تمامی الزامات آیین‌نامه‌ای در تعیین مقادیر نهایی مصالح سنگی رعایت شده است.



شکل ۱- مشخصات مصالح سنگی مصرفی

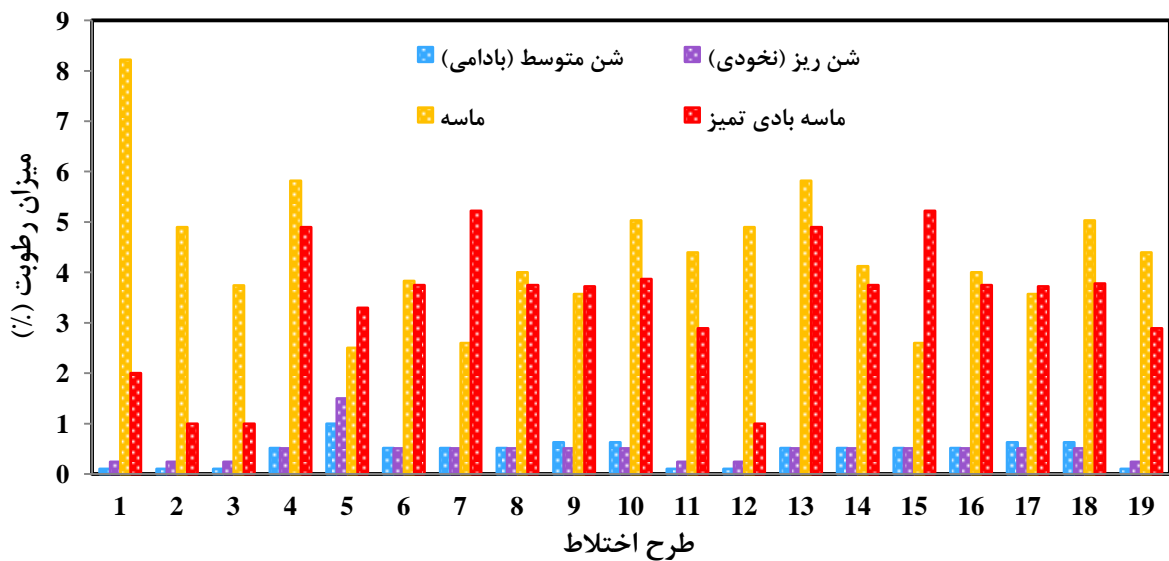
جدول ۱- کنترل مقدار مصالح سنگی عبوری از الک ۲۰۰

کنترل مقدار مواد عبوری از الک ۲۰۰		درصد عبوری از الک ۲۰۰	مدول نرمی (FM)	مصالح
موجود ( $\text{kg/m}^3$ )	مجاز ( $\text{kg/m}^3$ )			
۰/۹۹	۴/۹۵	۰/۲	۶/۹۶	شن متوسط (بادامی)
۳/۴۷	۳/۶۱	۰/۶۹	۶/۱۶	شن ریز (نخودی)
۲۹/۲۸	۴۷/۲۳	۳/۱	۳/۵۱	ماسه
۱۳/۷	۴/۷۲	۱۴/۵	۱/۵۱	ماسه بادی تمیز
۴۷/۴۴	۶۰/۵۱	-	۴/۸۱	ترکیب سنگدانه‌ها

جدول ۲ طرح‌های اختلاط مورد استفاده در ساخت نمونه‌های سگمنت را ارائه می‌نماید. با توجه به اینکه میزان رطوبت مصالح سنگی مورد استفاده در هر طرح متفاوت بوده، نتایج درصد رطوبت طرح‌های گوناگون در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- جزئیات طرح‌های اختلاط

سیمان	نسبت آب به سیمان	ماسه بادی تمیز	ماسه	شن ریز (نخودی)	شن متوسط	طرح اختلاط
۴۲۶	۰/۳۲۳	۹۰	۹۹۹	۳۵۲	۴۸۵	۱
۴۲۵	۰/۳۲۵	۸۹	۹۶۷	۳۵۱	۴۸۴	۲
۴۲۶	۰/۳۲۱	۸۹	۹۵۹	۳۵۲	۴۸۵	۳
۴۲۶	۰/۳۲۳	۹۳	۹۷۷	۳۵۳	۴۸۷	۴
۴۲۶	۰/۳۲۱	۹۱	۹۴۷	۳۵۷	۴۸۹	۵
۴۲۶	۰/۳۲۰	۹۲	۹۶۰	۳۵۴	۴۸۷	۶
۴۲۶	۰/۳۲۱	۹۳	۹۴۸	۳۵۳	۴۸۷	۷
۴۲۶	۰/۳۲۳	۹۲	۹۶۰	۳۵۳	۴۸۷	۸
۴۲۶	۰/۳۲۱	۹۲	۹۵۷	۳۵۳	۴۸۸	۹
۴۲۵	۰/۳۲۳	۹۲	۹۶۹	۳۵۳	۴۸۷	۱۰
۴۲۶	۰/۳۲	۹۱	۹۶۵	۳۵۳	۴۸۵	۱۱
۴۲۵	۰/۳۲۷	۸۹	۹۶۶	۳۵۱	۴۸۳	۱۲
۴۲۶	۰/۳۲۳	۹۳	۹۷۷	۳۵۳	۴۸۷	۱۳
۴۲۵	۰/۳۲۵	۹۱	۹۶۰	۳۵۲	۴۸۶	۱۴
۴۲۶	۰/۳۲۱	۹۳	۹۴۸	۳۵۳	۴۸۷	۱۵
۴۲۶	۰/۳۲۳	۹۲	۹۶۰	۳۵۳	۴۸۷	۱۶
۴۲۶	۰/۳۲۳	۹۲	۹۵۶	۳۵۳	۴۸۷	۱۷
۴۲۶	۰/۳۲۳	۹۲	۹۷۰	۳۵۳	۴۸۷	۱۸
۴۲۶	۰/۳۲۲	۹۱	۹۶۴	۳۵۲	۴۸۵	۱۹



شکل ۲- درصد رطوبت مصالح سنگی مصرفی در طرح‌های مختلف

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نسبت آب به سیمان در تمامی طرح‌ها در حدود ۰/۳۲ در نظر گرفته شده و کارایی مورد نیاز برای نمونه‌های سگمنت با استفاده از افزودنی فوق‌روان‌کننده تأمین شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، هدف از این پژوهش، بررسی انواع افزودنی فوق‌روان‌کننده تهیه شده توسط شرکت‌های مختلف بوده است که به منظور دستیابی به نوع و میزان بهینه از میان آن‌ها صورت پذیرفته است. بدین منظور، انواع فوق‌روان‌کننده تهیه شده از شرکت‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفت که پس از انجام آزمایش‌های گوناگون و حذف تعدادی از طرح‌ها به دلیل عدم ارائه نتایج قابل اطمینان، تعداد ۱۹ نوع فوق‌روان‌کننده از ۱۱ شرکت مختلف مورد بررسی نهایی قرار گرفتند که اطلاعات مربوط به آن‌ها و همچنین میزان مصرف هر یک در جدول ۳ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که تمامی افزودنی‌ها بر پایه پلی‌کربوکسیلات بوده که نسبت مصرفی هر یک با همکاری و پیشنهاد متخصصین شرکت مربوطه مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که اشاره به نام شرکت‌ها و افزودنی آن‌ها ممکن است حقی از شرکتی ضایع نماید و یا خلاف قوانین تجاری باشد، در اینجا از حروف نمادین به جای نام اصلی آن‌ها استفاده شده است.

جدول ۳- نوع و میزان افزودنی مورد استفاده در طرح‌های مختلف

شماره طرح اختلاط	نام شرکت	نوع افزودنی	نام افزودنی	میزان افزودنی مناسب	
				نسبت به سیمان (%)	مقدار در ۱ مترمکعب بتن (kg/m <sup>3</sup> )
۱	A	پلی کربوکسیلات	A1	۰/۷۶	۳/۲۳
۲	B	پلی کربوکسیلات	B1	۱/۰۳	۴/۳۸
۳	C	پلی کربوکسیلات	C1	۰/۶۶	۲/۸۱
۴	D	پلی کربوکسیلات	D1	۰/۷۴	۳/۱۵
۵	E	پلی کربوکسیلات	E1	۰/۶۵	۲/۷۶
۶	F	پلی کربوکسیلات	F1	۰/۵۴	۲/۲۹
۷	G	پلی کربوکسیلات	G1	۰/۶۱	۲/۶۱
۸	H	پلی کربوکسیلات	H1	۰/۷۸	۳/۳۲
۹	I	پلی کربوکسیلات	I1	۰/۶۲	۲/۶۱
۱۰	J	پلی کربوکسیلات	J1	۰/۸۲	۳/۴۹
۱۱	K	پلی کربوکسیلات	K1	۰/۵۶	۲/۳۸
۱۲	C	پلی کربوکسیلات	C2	۱/۲۳	۵/۲۴
۱۳	D	پلی کربوکسیلات	D2	۰/۷۵	۳/۱۹
۱۴	F	پلی کربوکسیلات	F2	۱	۴/۲۵
۱۵	G	پلی کربوکسیلات	G2	۰/۶۱	۲/۵۹
۱۶	H	پلی کربوکسیلات	H2	۰/۷۹	۳/۳۶
۱۷	I	پلی کربوکسیلات	I2	۰/۷۹	۳/۳۶
۱۸	J	پلی کربوکسیلات	J2	۰/۸۲	۳/۴۹
۱۹	K	پلی کربوکسیلات	K2	۰/۶۶	۲/۸۱

### ۳.۴. ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها

مخلوط بتن مربوط به هر طرح، تهیه شده و اسلامپ آن‌ها در دقایق ۰ و ۱۵ دقیقه اندازه‌گیری شد. شکل ۳، نمونه‌هایی از نحوه انجام آزمایش اسلامپ را نمایش می‌دهد. علاوه بر این، تعداد حداقل ۹ نمونه مکعبی ۱۵ سانتی‌متری از هر طرح جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری ساخته شد. آزمون مقاومت فشاری در سنین ۶ ساعته، ۷ و ۲۸ روزه بر روی آن‌ها صورت پذیرفت و نتایج



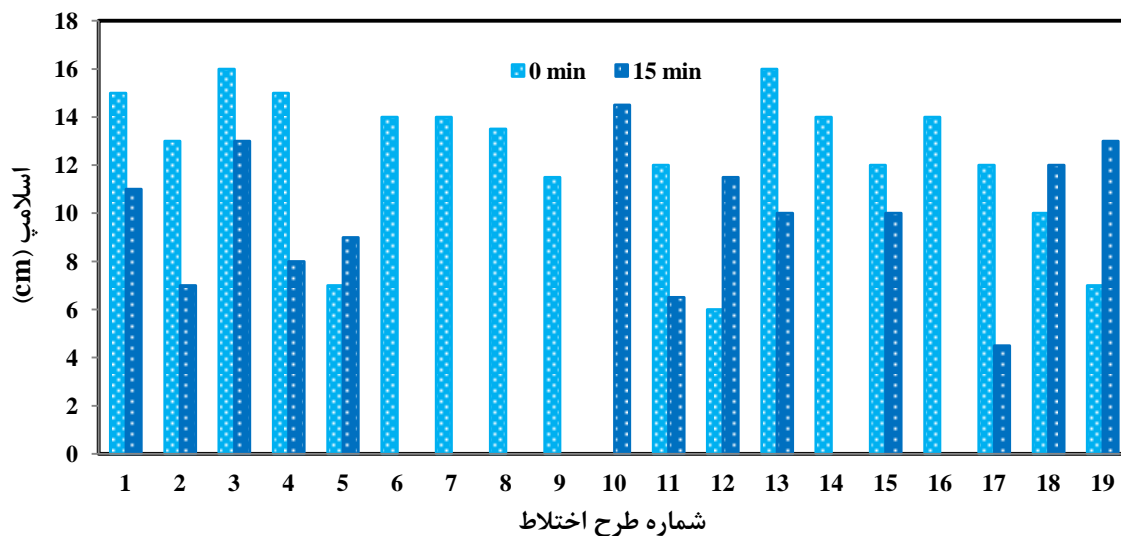
آن‌ها جهت بررسی‌های بعدی ثبت گردید. آزمون‌های ۶ ساعته تحت شرایط عمل‌آوری با بخار مطابق با شرایط عمل‌آوری نمونه‌های سگمنت قرار گرفتند و آزمون‌های ۷ و ۲۸ روزه در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری شدند.



شکل ۳- نحوه انجام آزمایش اسلامپ بر روی مخلوط بتن

#### ۴. نتایج و بحث

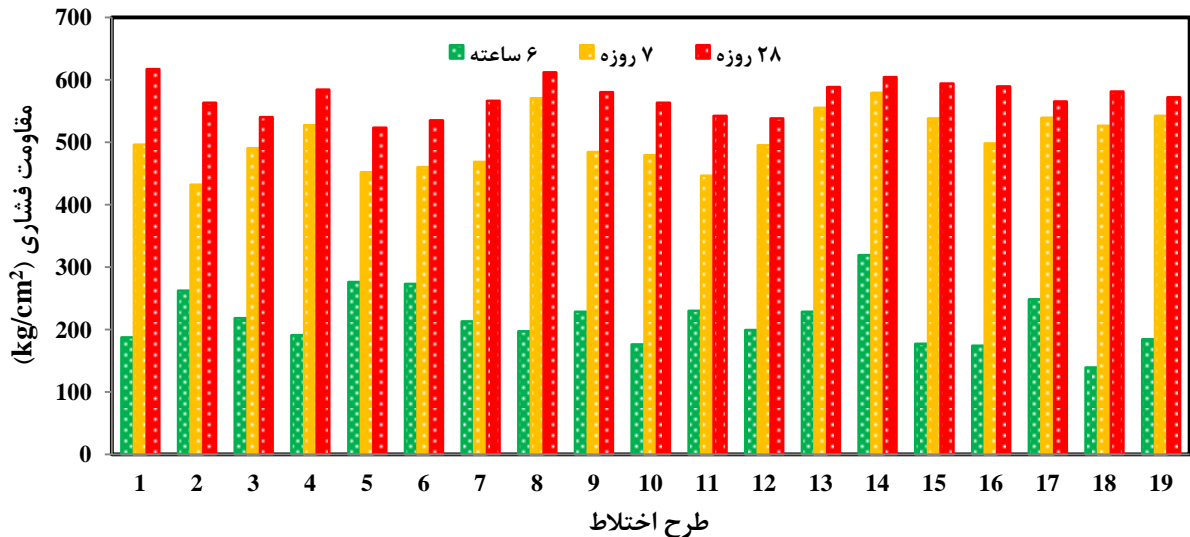
شکل ۴ نتایج آزمایش اسلامپ گرفته شده از مخلوط تمامی طرح‌ها را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که قسمت‌های خالی به دلیل عدم وجود نتایج صحیح در برخی از طرح‌ها می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اکثر طرح‌ها میزان اسلامپ اولیه (صفر دقیقه) بیشتر از میزان آن در اسلامپ پس از گذشت ۱۵ دقیقه می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که اثر فوق‌روان‌کننده مصرفی در میزان کارایی اولیه این مخلوط‌ها زیاد بوده و با گذر زمان به تدریج کاهش یافته است. از طرفی دیگر، در برخی طرح‌ها این روند برعکس بوده به طوری که اسلامپ پس از ۱۵ دقیقه میزان بیشتری نسبت به اسلامپ اولیه دارا می‌باشد. دلیل این امر افزودن تدریجی فوق‌روان‌کننده می‌باشد که بخشی از آن به منظور دستیابی به اسلامپ بالاتر، پس از ثبت اسلامپ اولیه به مخلوط اضافه شده است [۲۱، ۲۲].



شکل ۴- نتایج اسلامپ حاصله در زمان ۰ و ۱۵ دقیقه پس از ساخت هر مخلوط



شکل ۵ مقادیر مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی حاصل از طرح‌های مختلف را در سنین ۶ ساعته، ۷ و ۲۸ روزه نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقاومت مکعبی ۶ ساعته در بازه  $139-319 \text{ kg/cm}^2$  می‌باشد که تحت شرایط عمل‌آوری بخار حاصل شده است. درحالی‌که مقاومت ۷ و ۲۸ روزه تحت شرایط عمل‌آوری استاندارد بوده و به ترتیب در بازه  $432-579 \text{ kg/cm}^2$  و  $523-617 \text{ kg/cm}^2$  حاصل شده است.



شکل ۵- نتایج مقاومت فشاری ۶ ساعته، ۷ و ۲۸ روزه طرح‌های اختلاط مختلف

جدول ۴- وضعیت ظاهری و توضیحات مربوط به هر طرح اختلاط

شماره طرح اختلاط	وزن مخصوص واقعی ( $\text{kg/m}^3$ )	وزن مخصوص محاسباتی ( $\text{kg/m}^3$ )	اختلاف وزن مخصوص (%)	دمای بتن تازه (درجه سانتیگراد)
۱	۲۴۶۲	۲۴۳۸	۰/۹۸	-
۲	۲۴۵۵	۲۴۳۶	۰/۷۷	۲۵/۹
۳	۲۳۹۸	۲۴۳۹	-۱/۷۱	۲۶/۳
۴	۲۴۴۲	۲۴۳۸	۰/۱۶	۲۴/۷
۵	۲۴۵۱	۲۴۴۰	۰/۴۷	۲۶/۲
۶	۲۳۸۲	۲۴۴۰	-۲/۴۵	۲۵/۳
۷	۲۴۴۴	۲۴۳۹	۰/۱۹	۲۵
۸	۲۴۶۰	۲۴۳۸	۰/۹	۲۶/۲
۹	۲۴۴۷	۲۴۳۹	۰/۳۱	۲۶
۱۰	۲۴۶۳	۲۴۳۸	۱/۰۳	۲۴/۵
۱۱	۲۴۳۴	۲۴۴۰	-۰/۲۶	۲۶/۱
۱۲	۲۳۸۳	۲۴۳۵	-۲/۱۷	۲۵/۶
۱۳	۲۴۵۸	۲۴۳۸	۰/۸۲	۲۴/۶
۱۴	۲۴۸۰	۲۴۳۶	۱/۷۷	۲۵/۱
۱۵	۲۴۲۴	۲۴۳۹	-۰/۶۴	۲۵/۳
۱۶	۲۳۹۸	۲۴۳۸	-۱/۶۶	۲۶/۱
۱۷	۲۴۶۵	۲۴۳۸	۱/۰۹	۲۵/۳
۱۸	۲۴۶۳	۲۴۳۸	۱/۰۳	۲۴/۳
۱۹	۲۴۵۷	۲۴۳۹	۰/۷۴	۲۶/۳

جدول ۵- وضعیت ظاهری و توضیحات مربوط به هر طرح اختلاط

شماره	وضعیت ظاهری بتن			توضیحات
	وضعیت جداشدگی	آب انداختن	خمیری بودن	
۱	ندارد	ندارد	ضعیف	-
۲	کم	ندارد	متوسط	-
۳	ندارد	ندارد	خوب	-
۴	کم	ندارد	متوسط	بتن پیوستگی مناسب را نداشت و در اسلامپ حدود ۱۵ از هم پاشید.
۵	ندارد	ندارد	عالی	بتن با ظاهری بسیار خمیری و عالی بود.
۶	ندارد	ندارد	عالی	این طرح اختلاط دو دفعه ساخته شد. دفعه اول ۰/۵٪ فوق‌روان‌کننده به صورت یکجا به بتن اضافه شد و اسلامپ ۱۷ cm به دست آمد. در نتیجه، طرح مجدد تکرار شد. دفعه دوم میزان ۰/۵٪ فوق‌روان‌کننده به صورت تدریجی به مخلوط اضافه شد که اسلامپ ۱۴ cm حاصل شد. در نهایت بتنی با حالتی بسیار خمیری و با تراکم‌پذیری عالی به دست آمد.
۷	کم	ندارد	خوب	در این طرح، اسلامپ ۹ دقیقه برابر ۱۲ cm به دست آمد و در مرحله بعد، پس از اضافه کردن فوق‌روان‌کننده اسلامپ به عدد ۱۶ cm افزایش یافت.
۸	ندارد	ندارد	متوسط	-
۹	ندارد	ندارد	عالی	-
۱۰	ندارد	ندارد	خوب	-
۱۱	ندارد	ندارد	خوب	مخلوط بتن حاصله، بسیار خمیری می باشد. در ابتدا، پس از اضافه کردن افزودنی، بتن ساخته شده با کارایی خوب و همچنین اسلامپ ریزشی همراه بود. اما پس از گذشت حدود ۶ دقیقه از فرآیند مخلوط شدن، بتنی خمیری با اسلامپ مورد نیاز حاصل شد. در ادامه و پس از گذشت ۱۵ دقیقه، اسلامپ ۶/۵ cm حاصل شد.
۱۲	ندارد	ندارد	خوب	-
۱۳	کم	ندارد	متوسط	بتن پیوستگی مناسب را نداشت و با اسلامپی برشی همراه بود.
۱۴	کم	ندارد	متوسط	بتن حاصله زیر و خشن بود.
۱۵	ندارد	ندارد	خوب	این طرح دارای شرایط اولیه خوب است اما افت اسلامپ زیادی دارد. با اضافه کردن بخش اول فوق‌روان‌کننده، اسلامپ ۱۲/۵ cm به دست آمد و علیرغم اضافه کردن افزودنی مجدد، اسلامپ بتن افت کرده و به عدد ۱۰ cm رسید. در نهایت و پس از ۱۵ دقیقه، اسلامپ ۷/۵ cm حاصل شد.
۱۶	ندارد	ندارد	متوسط	-
۱۷	ندارد	ندارد	متوسط	-
۱۸	ندارد	ندارد	خوب	-
۱۹	ندارد	ندارد	خوب	به دلیل ازدیاد میزان فوق‌روان‌کننده اولیه مصرفی در دو طرح قبل، این طرح با نسبت کمتر افزودنی آغاز شد و اسلامپ اولیه ۷ cm حاصل شد. با اضافه کردن مرحله دوم فوق‌روان‌کننده، پس از ۱۰ دقیقه اسلامپ ۱۳ cm به دست آمد و بتنی با ظاهری بسیار خمیری با کارایی بالا ایجاد شد.

نتایج مربوط به وزن مخصوص واقعی و محاسباتی هر مخلوط و همچنین دمای بتن تازه در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد اختلاف کمی بین وزن مخصوص واقعی و محاسباتی هر مخلوط حاصل شده است که نشان‌دهنده صحیح بودن مقادیر پارامترهای مختلف طرح اختلاط می‌باشد.

در جدول ۵، وضعیت ظاهری هر طرح مخلوط و توضیحات مربوط به شرایط اسلامپ در مراحل افزودن فوق‌روان‌کننده را ارائه می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، چهار خاصیت مخلوط بتن حاصله شامل وضعیت جداسدگی، آب انداختن، خمیری بودن و تراکم‌پذیری جهت بررسی وضعیت ظاهری مورد توجه قرار گرفته است. بالطبع بهترین ظاهر مخلوط بتن مربوط به نمونه بدون جداسدگی و آب‌انداختگی و با تراکم‌پذیری و حالت خمیری عالی می‌باشد. از طرف دیگر، با ایجاد جداسدگی در بتن و کاهش تراکم‌پذیری و حالت خمیری آن، از قوام بتن کاهش یافته و اسلامپ آن نیز در جهت برشی و ریزشی شدن پیش می‌رود. با توجه به مطالب ارائه شده و نتایج آزمایش‌های اسلامپ و مقاومت فشاری و مقادیر حداقل در نظر گرفته شده برای این پارامترها در طراحی، و همچنین ویژگی‌های ظاهری مخلوط بتن‌های حاصله، می‌توان دریافت که طرح شماره ۶ با نسبت مصرفی ۰/۵۴ درصد می‌تواند به‌عنوان طرح بهینه انتخاب شود. این طرح که دارای کمترین میزان افزودنی فوق‌روان‌کننده نیز می‌باشد، کمترین قیمت تمام‌شده را نیز در بین طرح‌ها به همراه دارد. درعین حال، نتایج اسلامپ، مقاومت و وضعیت ظاهری مناسبی را ارائه داده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی نوع و میزان بهینه افزودنی فوق‌روان‌کننده جهت تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت) در پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد پرداخته شده است. در این راستا، افزودنی‌های گوناگون از شرکت‌های فعال در این زمینه تهیه گردیده و در ساخت مخلوط بتن استفاده شد. نتایج این پژوهش را می‌توان به‌صورت ذیل خلاصه نمود:

۱. برای دستیابی به اسلامپ مناسب (۱۴ cm) در این مطالعه، نسبت مصرفی افزودنی فوق‌روان‌کننده بر حسب نوع آن بین ۰/۵۴ تا ۱/۲۳ درصد (نسبت به وزن سیمان) مورد نیاز می‌باشد.
۲. استفاده از میزان بهینه هر نوع فوق‌روان‌کننده منجر به حصول حداقل مقاومت‌های ۶ ساعته، ۷ و ۲۸ روزه موردنظر در تمامی طرح‌های نهایی شده است.
۳. لازم است بتن بدون جداسدگی و آب‌انداختگی و با تراکم‌پذیری و حالت خمیری و اسلامپ مناسب انتخاب شود. کاهش هر یک از این ویژگی‌ها اسلامپ بتن را به سمت برشی یا ریزشی شدن پیش می‌برد.
۴. از میان تمامی طرح‌ها، طرح شماره ۶ با نسبت فوق‌روان‌کننده ۰/۵۴ درصد و کمترین قیمت حاصله، به‌عنوان طرح بهینه نهایی انتخاب شد.

## ۶. مراجع

- [1] J.B. O'Carroll, A Guide to Planning, Constructing, and Supervising Earth Pressure Balance TBM Tunneling, Parsons Brinckerhoff 2005.
- [2] V. Guglielmetti, P. Grasso, A. Mahtab, S. Xu, Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control, CRC Press 2008.
- [3] W. ITA, Mechanized Tunnelling: Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs), ITA-AITES, 2000.

- [4] M. Ghorbani, M. Sharifzadeh, S. Yasrobi, M. Daiyan, Geotechnical, structural and geodetic measurements for conventional tunnelling hazards in urban areas–The case of Niayesh road tunnel project, *Tunnelling and Underground Space Technology* 31 (2012) 1-8.
- [5] K. Kucuk, M. Genis, T. Onargan, C. Aksoy, A. Guney, R. Altındağ, Chemical injection to prevent building damage induced by ground water drainage from shallow tunnels, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46(7) (2009) 1136-1143.
- [6] W. Broere, Tunnel face stability & new CPT applications, TU Delft, Delft University of Technology, 2001.
- [7] M.H. Sadaghiani, S. Dadizadeh, Study on the effect of a new construction method for a large span metro underground station in Tabriz-Iran, *Tunnelling and Underground Space Technology* 25(1) (2010) 63-69.
- [8] R. Wong, J.J. Hao, C.M. Ho, Prefabricated building construction systems adopted in Hong Kong, Proc. of the International Association for Housing Science on World Congress of Housing: Process and Product, Montreal, Canada, 2003.
- [9] J. Gourley, G. Johnson, Developments in geopolymer precast concrete, *World Congress Geopolymer*, 2005, pp. 139-143.
- [10] Y. Chen, G.E. Okudan, D.R. Riley, Decision support for construction method selection in concrete buildings: Prefabrication adoption and optimization, *Automation in Construction* 19(6) (2010) 665-675.
- [11] H.H. Ali, S.F. Al Nsairat, Developing a green building assessment tool for developing countries–Case of Jordan, *Building and Environment* 44(5) (2009) 1053-1064.
- [12] M. Moccihino, P. Romualdi, P. Perruzza, A. Meda, Z. Rinaldi, Experimental tests on tunnel precast segmental lining with fiber reinforced concrete, *Proceedings of 36th World Tunnel Congress ITA-AITES*, 2010, pp. 1-8.
- [13] A. Caratelli, A. Meda, Z. Rinaldi, S. Spagnuolo, G. Maddaluno, Optimization of GFRP reinforcement in precast segments for metro tunnel lining, *Composite Structures* 181 (2017) 336-346.
- [14] P. Aitcin, H.-P. Concrete, E & FN Spon, New York (1998) 170-190.
- [15] M. Shannag, High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume, *Cement and concrete composites* 22(6) (2000) 399-406.
- [16] R. Yu, P. Spiesz, H. Brouwers, Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses, *Cement and Concrete Composites* 55 (2015) 383-394.
- [17] H. Eskandari, A. Madadi, Investigation of ferrocement channels using experimental and finite element analysis, *Engineering Science and Technology, an International Journal* 18(4) (2015) 769-775.
- [18] A. Madadi, H. Eskandari-Naddaf, M. Gharouni-Nik, Lightweight Ferrocement Matrix Compressive Behavior: Experiments Versus Finite Element Analysis, *Arabian Journal for Science and Engineering* 42(9) (2017) 4001-4013.
- [19] A. Madadi, H. Eskandari-Naddaf, R. Shadnia, L. Zhang, Characterization of ferrocement slab panels containing lightweight expanded clay aggregate using digital image correlation technique, *Construction and Building Materials* 180 (2018) 464-476.
- [20] B. Felekoğlu, H. Sarıkahya, Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials* 22(9) (2008) 1972-1980.
- [21] ح. اسکندری، ا. مددی، فناوری فرسیمان و کاربرد آن در توسعه شهرها، همایش ملی معماری، عمران و توسعه نوین شهری، کانون ملی انجمنهای صنفی مهندسان معمار ایران، ۱۳۹۳.
- [22] ح. اسکندری، کاربرد روش اجزای محدود در سازه های فرسیمانی سبک، ششمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، انجمن بتن ایران، ۱۳۹۳.