Journal of Structural and Construction Engineering, 9(6), 2022, pp. 148-161

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

# Evaluation of surface strength of self-compacting concrete under shrinkage and magnesium sulfate using "twist-off" method

**Mahmood Naderi[1*], Mohamadreza Nasiri[2], Ali Saberi Varzaneh[3]**

*1- Professor, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran*
*2- Master, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran*
*3- PhD, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran*

## ABSTRACT

*Concerning the importance of shrinkage in the concrete industry, much research is being performed on this subject. Since the self-compacting concrete has high consistency, many researchers believe that the shrinkage of self-compacting concrete should be more attended than the shrinkage of plain concrete. Sulfates are among the common reasons for concrete destruction in most areas of Iran especially in the southern areas, where the concrete is subjected to seawater (which includes sulfate compounds). Since the amount of drying is higher in the surface of a concrete piece than its depth and the durability of the concrete structure highly depends on the strength and permeability of its surface layer, this paper applied a "Twist-off" test (which shows proper sensitivity against the surface change of concrete) to investigate the effect of shrinkage and magnesium sulfate on the surface strength of self-compacting concretes. Then, the change in the length of samples was presented together with their weight drop. In the end, by using the "Twist-off" test, the effect of magnesium sulfate and the length change of samples on the surface strength was evaluated. The results represent that the plain concrete, compared to the self-compacting ones, shows more reduction in the surface strength due to the effect of drying shrinkage. The reduction in strength of plain concrete is 18.4% by shrinkage that is 1.34 times of the self-compacting concrete with 45% fly ash, 1.35 times of the self-compacting concrete with 35% fly ash, and 1.37 times of the self-compacting concrete with 25% fly ash. For the self-compacting samples curing in magnesium sulfate solution, the 3-day and 7-day surface strengths were reduced by the increase of fly ash percentage, while the 28-day surface strength was increased.*

**All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.**

## ARTICLE INFO

**Receive Date:** 16 April 2021
**Revise Date:** 16 November 2021
**Accept Date:** 18 November 2021

**Keywords:**
*Shrinkage*
*Self-Compacting Concrete*
*Twist-off*
*sulfate*
*Surface Strength*

**doi:** https://doi.org/10.22065/jsce.2021.281163.2422

*Corresponding author: Mahmood Naderi.
Email address: profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

# بررسی مقاومت سطحی بتن خود متراکم تحت تاثیر جمع شدگی و سولفات منیزیم با به کارگیری آزمون "پیچش"

**محمود نادری[۱*]، محمد رضا نصیری[۲]، علی صابری ورزنه[۳]**

*۱- استاد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران*

*۲- کارشناس ارشد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران*

*۳- دکتری، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران*

## چکیده

*با توجه به اهمیت جمع شدگی در صنعت بتن، تحقیقات زیادی در ارتباط با این موضوع انجام شده است. از آنجا که بتن خود متراکم از روانی بسیاری برخوردار است، بسیاری بر این عقیده هستند که جمع شدگی بتن خود متراکم باید بیش از جمع شدگی بتن معمولی مورد توجه قرار گیرد. همچنین سولفات‌ها از عوامل شایع مخرب بتن در اکثر مناطق ایران به خصوص در مناطق جنوبی کشور که بتن در معرض آب دریا (حاوی ترکیبات سولفاتی) قرار دارد، می‌باشند. از آنجا که مقدار خشک شدگی در سطح یک قطعه بتنی با شدت بیشتری نسبت به اعماق آن اتفاق می‌افتد و دوام سازه بتنی، بستگی شدیدی به مقاومت و نفوذپذیری لایه سطحی آن دارد، لذا در این مقاله از آزمون "پیچش" که در برابر تغییرات سطحی بتن، حساسیت خوبی از خود نشان می‌دهد، جهت بررسی تاثیر جمع شدگی و سولفات منیزیم بر مقاومت سطحی بتن‌های خود متراکم استفاده شده است. سپس تغییر طول نمونه‌ها به همراه افت وزنی آن‌ها ارائه گردید. در انتها نیز با به کارگیری آزمون "پیچش" تاثیر سولفات منیزیم و تغییر طول نمونه‌ها بر مقاومت سطحی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصله بیانگر این می‌باشد که در اثر جمع شدگی ناشی از خشک شدن، بتن معمولی در مقایسه با نمونه‌های خود متراکم، کاهش بیشتری در مقاومت سطحی از خود نشان می‌دهد. کاهش مقاومت بتن معمولی در اثر جمع شدگی در حدود ۱۸/۴ درصد شده است که این کاهش در مقایسه با نمونه بتن خود متراکم با ۴۵ درصد خاکستر بادی ۱/۳۴ برابر، در مقایسه با نمونه بتن خود متراکم با ۳۵ درصد خاکستر بادی ۱/۳۵ برابر و در مقایسه با نمونه بتن خود متراکم با ۲۵ درصد خاکستر بادی ۱/۳۷ برابر می‌باشد. همچنین برای نمونه‌های خود متراکم عمل‌آوری شده در محلول سولفات منیزیم، با افزایش درصد خاکستر بادی، مقاومت سطحی ۳ و ۷ روزه کاهش می‌یابد. اما مقاومت سطحی ۲۸ روزه افزایش می‌یابد.*

**کلمات کلیدی: جمع شدگی، بتن خود متراکم، آزمون "پیچش"، سولفات، مقاومت سطحی.**

| سابقه مقاله: | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| دریافت | بازنگری | پذیرش | انتشار آنلاین | چاپ | شناسه دیجیتال: |
| ۱۴۰۰/۰۱/۲۷ | ۱۴۰۰/۰۸/۲۵ | ۱۴۰۰/۰۸/۲۷ | ۱۴۰۰/۰۸/۲۷ | ۱۴۰۱/۰۶/۳۱ | doi: 10.22065/jsce.2021.281163.2422 |
| | | | | | https://doi.org/10.22065/jsce.2021.281163.2422 |

**[*]نویسنده مسئول:** محمود نادری

**پست الکترونیکی:** Profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

## ۱- مقدمه

بتن‌های خود متراکم (SCC) در مقایسه با بتن سنتی تحت مشکلات انقباضی بیشتری قرار می‌گیرند، زیرا از مقادیر بیشتری از مواد ریز و نسبت آب به سیمان کمتر برای دستیابی به عملکرد و مقاومت بالا تشکیل شده‌اند [۱-۲]. جمع شدگی، صرف نظر از منشا آن، ممکن است منجر به بسیاری از اثرات نامطلوب در مواد بتنی شود. به عنوان مثال، اگر تنش مربوط به جمع شدگی از مقاومت کششی بتن فراتر رود، میکرو ترک‌ها در اندازه‌ها و جهت‌های مختلف می‌توانند تشکیل شده و به ترک‌های سطحی بزرگ و یا عمیق‌تر تبدیل شوند که در نهایت باعث کاهش مقاومت بتن می‌گردد [۳-۴]. برای اندازه‌گیری و ارزیابی مقاومت انواع مصالح به خصوص بتن‌ها، روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از روش‌های درجای اندازه‌گیری مقاومت بتن، آزمون "پیچش" [۵] می‌باشد. در تحقیقات قبلی نیز از آزمون "پیچش" برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن‌های معمولی و الیافی [۶-۷]، ملات‌های معمولی و الیافی [۸-۹] و ملات‌های اصلاح شده با پلیمر [۱۰] استفاده گردیده است.

تاثیر سولفات‌ها روی بتن نیز یک فرایند پیچیده است و عوامل زیادی می‌توانند بر مقاومت بتن در برابر سولفات تأثیر بگذارند، مانند نوع سیمان، نوع کاتیون سولفات، و مدت زمان قرار گرفتن در معرض حمله سولفات‌ها. به طور کلی حمله سولفات‌ها باعث می‌شود که یون‌های سولفات با هیدروکسید کلسیم و آلومینات کلسیم هیدراته شده واکنش نشان داده و تبدیل به اترینگایت شده که باعث ترک خوردگی، انبساط و تخریب بتن می‌شود [۱۱-۱۳]. برخی از محققین در خصوص اثر خاکستر بادی روی مقاومت فشاری ملات‌ها و بتن‌ها در برابر حمله سولفات مطالعه نمودند و اشاره نمودند که با استفاده از مقدار کافی خاکستر بادی، می‌تواند به طور موثر مقاومت بتن در برابر حمله سولفات‌ها را بهبود ببخشد [۱۴-۱۵]. نی و همکاران [۱۶] در تحقیقی نتیجه گرفتند که مواد افزودنی مانند خاکستر بادی می‌تواند در بتن حاوی سیمان پرتلند استفاده شده و باعث بهبود دوام بتن در برابر حملات سولفات‌ها باشد. سولفات منیزیم از دیگر سولفات‌ها مضرتر می‌باشد زیرا فقط با آلومینات کلسیم هیدراته واکنش نمی‌دهد بلکه در عین حال باعث می‌شود که سیلیکات‌های کلسیم هیدراته کاملاً تجزیه شده و به یک توده ترک خورده تبدیل شوند [۱۷-۱۸]. به همین دلیل، در این تحقیق از سولفات منیزیم برای مطالعه تاثیر آن بر مقاومت سطحی بتن‌های خود متراکم استفاده شده است.

در تحقیقی دیگر روی مقاومت فشاری ملات‌های خود متراکم که حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی بودند مشاهده گردید که افزایش مقدار خاکستر بادی باعث کاهش مقاومت فشاری می‌گردد اما مقاومت ملات در برابر حمله سولفات منیزیم افزایش می‌یابد [۱۹]. در تحقیقی دیگر روی تاثیر سولفات منیزیم بر بتن خود متراکم مشاهده گردید که افزودن زئولیت در مقایسه با متاکائولین به ترتیب باعث افزایش ۱ و ۵ برابری مقاومت بتن در برابر حملات یون‌های کلرید و سولفات منیزیم می‌شود [۲۰]. در کل با بررسی تحقیقات انجام پذیرفته در گذشته مشاهده می‌گردد که آسیب ناشی از واکنش‌های اجزای بتن همراه با سولفات‌ها شامل لایه لایه شدن، پوسته پوسته شدن، ترک خوردگی بزرگ و احتمالاً از بین رفتن انسجام کلی می‌باشد. در بسیاری از کارهای تحقیقاتی، تخریب بتن در محیط سولفاته به عنوان دو پدیده طبقه بندی می‌شوند: حمله شیمیایی یا حمله فیزیکی سولفات‌ها. در برخی موارد نیز حمله سولفات‌ها به دو دسته آسیب-های خارجی و داخلی طبقه بندی می‌گردد [۲۱-۲۳].

در این تحقیق با استفاده از آزمون "پیچش"، تاثیر جمع شدگی حاصل از خشک شدگی و سولفات منیزیم بر مقاومت سطحی (تاثیرات خارجی) بتن‌های خود متراکم مورد بررسی قرار گرفته است. طرح‌های اختلاط بتن خود متراکم با جایگزین کردن ۲۵، ۳۵ و۴۵ درصد سیمان با پرکننده خاکستر بادی، و یک طرح اختلاط بتن معمولی به عنوان شاهد جهت بررسی تاثیر جمع شدگی و سولفات منیزیم بر مقاومت بتن خود متراکم مورد مطالعه قرار گرفتند.

## ۲- کارهای آزمایشگاهی

در این قسمت در خصوص کارهای آزمایشگاهی انجام پذیرفته از جمله مصالح استفاده شده در ساخت نمونه‌ها، آزمایشات انجام شده و طریقه آماده سازی نمونه‌ها پرداخته شده است.

## ۲-۱ مصالح مصرفی

دانه‌بندی مصالح، مطابق با استاندارد ASTM C 136-01 [۲۴] انجام گرفته و به منظور دستیابی به دانه‌بندی مورد نظر از ماسه و ماسه بادی تواما استفاده شده است. ماسه سه بار شور از شرکت بوئین دشت، بوئین زهرا و ماسه بادی از رودخانه‌های قزوین فراهم شده است. شن مورد استفاده در این تحقیقات از شرکت قسم تهیه گردیده است. پس از جدا نمودن سنگدانه‌های بزرگتر از ۲۰ میلیمتر توسط الک، وزن مخصوص سنگدانه‌ها نیز تعیین گردیدند. سیمان مصرفی در آزمایش‌ها، سیمان پرتلند تیپ ۲ تولید کارخانه سیمان آبیک می‌باشد. این سیمان ضد سولفات متوسط و گرمای هیدراسیون آن نیز متوسط می‌باشد. چگالی آن ۳۰۰۷/۵ $kg/m^3$ می‌باشد. خاکستر بادی مورد استفاده از نوع F بوده و از شرکت نامیکاران تهیه گردیده و چگالی آن ۲۳۰۰ $kg/m^3$ می‌باشد. مشخصات و ترکیبات شیمیائی سیمان و خاکستر بادی مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

**جدول ۱: ترکیبات خاکستر بادی و سیمان تیپ ۲ (درصد)**

| اجزا | خاکستر بادی | سیمان تیپ ۲ |
|---|---|---|
| $SiO_2$ | ٦١/٣٤ | ٢١/١ |
| $Al_2O_3$ | ٢٥/١١ | ٤/٣ |
| $Fe_2O_3$ | ٤/٤٢ | ٣/٢ |
| Sum of Oxides | ٩٠/٨٧ | ٢٨/٦ |
| CaO | ٤/٩٤ | ٦٣/٩ |
| MgO | ١/٠٩ | ٢/٠ |
| $Na_2O$ | ٠/٥٩ | ٠/٢ |
| $K_2O$ | ١/٠١ | ٠/٥ |
| $SO_3$ | ٠/٠٨ | ٣/٠ |
| Moisture | ٠/٠٣ | - |
| Loss on ignition | ٠/٣٤ | ١/٢ |
| Alkali as $Na_2O$ | ٠/٣٨ | ٠/٥٥ |

فوق روان کننده مصرف شده در این تحقیقات، از نوع Viscocrete 1 بی رنگ با جرم حجمی ۱/۰۶ kg/lit بوده و از شرکت نامیکاران تهیه شده است.

## ۲-۲ آماده سازی نمونه‌ها

در جدول ۲ طرح اختلاط نمونه‌ها قابل مشاهده می‌باشد که شامل سه طرح بتن خود متراکم و یک طرح بتن معمولی است. برای انجام آزمون پیچش، نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری ساخته شد. یک سری از نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت در آب شرب و یک سری دیگر از نمونه‌ها در محلول ۱۸ گرم بر لیتر سولفات منیزیم قرار داده شدند. آزمون‌ها در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز انجام پذیرفت.

جدول۲ : طرح‌اختلاط بتن خود متراکم (کیلوگرم بر متر مکعب)

| طرح اختلاط | آب | سیمان | شن | ماسه | خاکستر بادی | فوق روان کننده |
|---|---|---|---|---|---|---|
| بتن خود متراکم با ۲۵ درصد خاکستر بادی | ۱۸۸ | ۴۰۰ | ۶۳۰ | ۸۵۰ | ۱۳۰ | ۵/۶ |
| بتن خود متراکم با ۳۵ درصد خاکستر بادی | ۱۸۵ | ۳۴۵ | ۶۳۰ | ۸۵۰ | ۱۸۵ | ۵ |
| بتن خود متراکم با ۴۵ درصد خاکستر بادی | ۱۹۰ | ۲۹۲ | ۶۳۰ | ۸۵۰ | ۲۳۸ | ۴/۲۵ |
| بتن معمولی | ۱۹۲ | ۴۲۶ | ۱۱۰۰ | ۷۰۰ | - | - |

## ۲-۳ شرح آزمایش‌ها

در این قسمت توضیحاتی در خصوص آزمایشات انجام پذیرفته در این تحقیق بیان می‌گردد. آزمایشات به کار رفته عبارتند از آزمایش اندازه‌گیری جمع شدگی، آزمون "پیچش" و آزمایشات انجام شده روی بتن تاره.

### ۲-۳-۱ آزمایش‌های بتن تازه

در شکل ۱، آزمایش جریان اسلامپ و زمان جریان اسلامپ تا ۵۰ سانتی‌متر نشان داده شده است که مطابق با استاندارد EFNARC [۲۵] انجام پذیرفته است. در این آزمون، مخروط اسلامپ را به صورت قائم به بالا کشیده تا بتن جریان پیدا نماید. سپس زمان رسیدن بتن به دایره‌ای به قطر ۵۰ سانتی متر اندازه‌گیری می‌شود. این زمان، زمان جریان اسلامپ تا ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. پس از توقف بتن، قطر بتن پخش شده در دو جهت عمود بر هم اندازه‌گیری می‌شود و میانگین دو قطر اندازه‌گیری شده محاسبه می‌گردد. قطر بدست آمده برابر با میزان جریان اسلامپ خواهد بود.

الف) جریان اسلامپ

ب) اندازه‌گیری قطر انتهایی بتن

شکل ۱: آزمایش اسلامپ

در شکل ۲-الف آزمایش قیف V شکل نشان داده شده است. در شکل ۲-ب دستگاه جعبه L شکل قابل مشاهده است. در آزمایش قیف V شکل، بتن را بدون ویبره و یا ضربه به داخل قیف ریخته سپس دریچه را باز نموده و زمان تخلیه کامل بتن اندازه‌گیری می‌شود. برای انجام آزمایش "افزایش زمان جریان قیف V شکل"، قیف را پر نموده و بعد از ۵ دقیقه دریچه را باز می‌نمایند. اختلاف زمانی بین دو حالت بیان شده (حالتی که دریچه بعد از ۵ دقیقه باز می‌شود با حالتی که دریچه همان ابتدا باز می‌شود) به عنوان نتیجه افزایش زمان جریان قیف V شکل می‌باشد. در آزمون جعبه L شکل ابتدا داخل قالب را با بتن پر نموده سپس دریچه را باز کرده و زمان‌های T20 و T40 (که به ترتیب عبارتند از طول عبور بتن از طول های ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر) را یادداشت می‌نمایند. وقتی بتن از حرکت ایستاد، نسبت ارتفاع-های بتن در ابتدا و انتهای قالب افقی را نیز به دست می‌آورند.

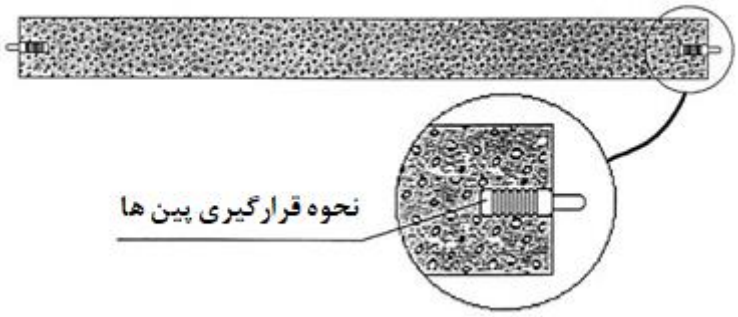
الف) آزمایش قیف V شکل

ب) آزمایش جعبه L شکل

**شکل ۲: آزمایش قیف V و جعبه L شکل**

### ۲-۳-۲ اندازه‌گیری جمع‌شدگی

کلرید کلسیم مورد نیاز به صورت ذرات ریز جامد در بسته یک کیلویی تهیه شد. و به منظور ایجاد و حفظ رطوبت نسبی ۱۷٪ در اون در حین خشک شدن نمونه‌ها طبق توصیه استاندارد ASTM C 426-70 [۲۶] استفاده گردید. محلول کلرید کلسیم باید هر ۲۴ ساعت ۱ بار یا بیشتر تکان داده شود تا از تشکیل لایه بر روی محلول جلوگیری شود. قالب‌های مورد استفاده در این آزمایش شش عدد قالب چوبی به ابعاد ۵×۱۰×۳۰ سانتی‌متر می‌باشند. که به منظور اندازه‌گیری دقیق تر تغییرات طول توسط کمپراتور (شکل ۳-الف)، گل‌میخ‌هایی در ابتدا و انتهای قالب قرار می‌گیرد (شکل ۳-ب).




الف) کمپراتور ب) پین‌ها در انتهای نمونه

**شکل ۳: اندازه‌گیری تغییرات طول نمونه‌ها**

### ۲-۳-۳ آزمون "پیچش"

برای اندازه‌گیری مقاومت سطحی نمونه‌ها از آزمون پیچش استفاده گردیده است. در این آزمون، یک استوانه فلزی به قطر ۵۰ میلی‌متر با استفاده از چسب رزین اپوکسی، روی سطح محل انجام آزمون چسبانده می‌شود. سپس همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، با بکارگیری یک پیچش‌سنج دستی معمولی، به استوانه فلزی لنگر پیچشی وارد می‌گردد تا جسم مورد آزمایش دچار شکست شود. آسیب وارده از آزمون "پیچش" بسیار سطحی و جزئی بوده و با ایجاد شکست در خود جسم مورد آزمایش، مقاومت آن را به طور مستقیم تعیین می‌نماید.

**شکل ۴: آزمون "پیچش"**

## ۳- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

### ۳-۱ تحلیل آزمایش‌های بتن تازه

نتایج مربوط به انجام آزمایش‌های جریان اسلامپ، زمان جریان اسلامپ، قیف V شکل، افزایش زمان قیف V شکل (۵ دقیقه) وقالب L شکل، برای نمونه‌های ساخته شده (بتن خود متراکم با ۲۵ درصد خاکستر بادی، بتن خود متراکم با ۳۵ درصد خاکستر بادی و بتن خود متراکم با ۴۵ درصد خاکستر بادی) در جدول ۳ ارائه شده است که می‌تواند با معیارهای قابل قبول مندرج در سطح آخر جدول مقایسه شود.

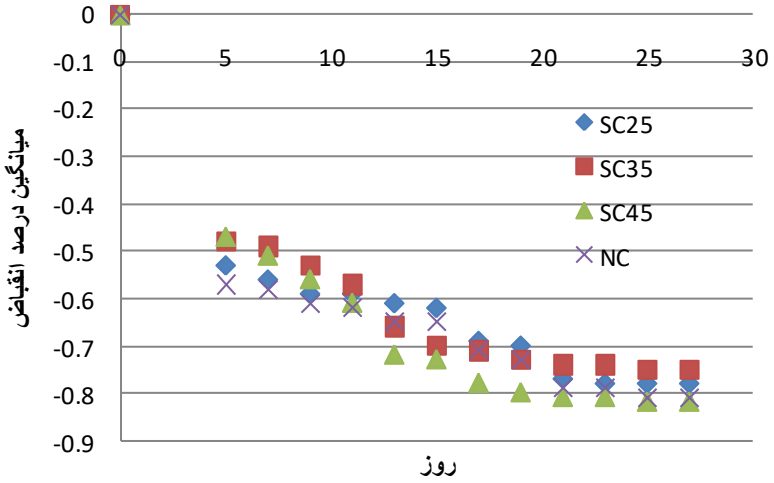
جدول۳ : نتایج آزمایش بتن تازه

| نمونه | جریان اسلامپ (mm) | زمان جریان اسلامپ (s) | قیف V شکل (s) | افزایش زمان قیف V شکل (s) | جعبه L شکل ( h2/h1) |
|---|---|---|---|---|---|
| SCC25 | ۷۲۵ | ۳/۱۰ | ۸/۹۳ | +۱/۲۱ | ۰/۸۲ |
| SCC35 | ۷۱۰ | ۳/۲۵ | ۸/۶۴ | +۰/۹۵ | ۰/۹۱ |
| SCC45 | ۷۱۵ | ۳/۳۰ | ۸/۶۱ | +۰/۹۵ | ۰/۸۶ |
| مقادیر مجاز | ۸۰۰-۶۵۰ | ۵-۲ | ۱۲-۶ | ۳-۰ | ۱-۰/۸ |

هر چه مقدار جریان اسلامپ بیشتر باشد، قابلیت بتن برای پر کردن قالب تحت وزن خود بیشتر می‌باشد. مطابق جدول ۳ مشاهده می‌شود که مقدار جریان اسلامپ برای نمونه‌های این تحقیق در محدوده مقادیر مجاز قرار دارند. دومین نشانه جریان، زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. زمان کمتر نشان دهنده قابلیت جریان بهتر است. طبق استاندارد، زمان بین ۲ تا ۵ ثانیه مناسب است. مقادیر ارائه شده در جدول ۳ در این خصوص نیز در رنج استاندارد قرار دارند. این آزمایش یکی از آسان ترین شیوه‌ها برای سنجش مقاومت در برابر جداشدگی بتن خود متراکم است. آزمایش قیف V شکل نیز برای اندازه‌گیری میزان سهولت جریان بتن خود متراکم می‌باشد. زمان جریان کمتر نشان دهنده قابلیت جریان بیشتر است. برای بتن خود متراکم مدت جریان ۶ تا ۱۲ ثانیه مناسب می‌باشد. بعد از گذشت ۵ دقیقه، جداشدگی تاثیر خود را بیشتر نشان می‌دهد و در نتیجه زمان جریان افزایش می‌یابد که این افزایش زمان نباید بیشتر از ۳ ثانیه باشد. در جدول ۳ نیز مشاهده می‌شود که مقادیر مربوطه به این دو آزمایش در محدوده استاندارد واقع شده‌اند. در آزمون جعبه L شکل نیز توانایی جاری شدن بتن تحت شرایط تسلیح در یک جهت مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. حداقل مقدار نسبت ارتفاع‌ها طبق استاندارد اروپا برابر ۰/۸ است که در جدول ۳ نیز نتایج آزمون جعبه L شکل در محدوده استاندارد قرار دارد.

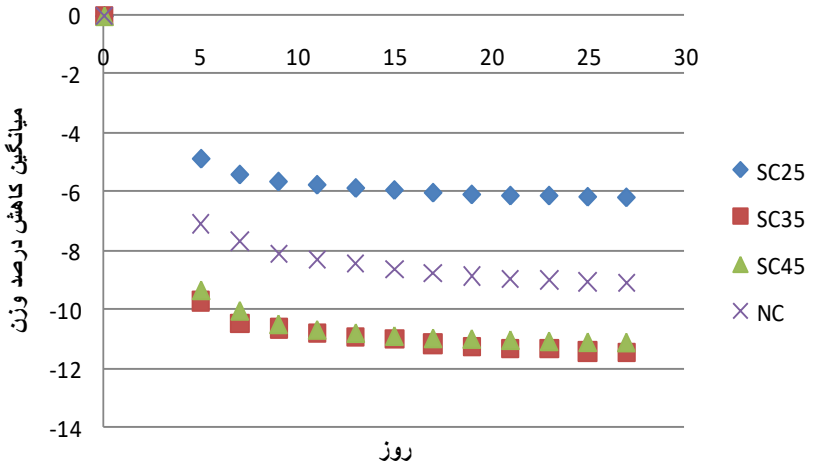
## ۳-۲ تحلیل آزمایش جمع شدگی

میانگین درصد انقباض نمونه‌ها در شکل ۵ قابل مشاهده است. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود پس از ۲۸ روز، در نمونه بتن معمولی، با حدود ۰/۸۱ درصد جمع‌شدگی، میزان انقباض ۱،۰۸ برابر میزان انقباض بتن خود متراکم با ۳۵ درصد خاکستر بادی و جمع شدگی ۰،۷۵ درصد و ۱،۰۴ برابر نمونه بتن خود متراکم با ۲۵ درصد خاکستر بادی و ۰/۷۸ درصد جمع شدگی می‌باشد. نمونه بتن خود متراکم با ۴۵ درصد خاکستر بادی و ۰/۸۲ درصد جمع شدگی تغییر معناداری را نشان نمی‌دهد. با توجه به اینکه مقدار سیمان دارای رابطه مستقیم با جمع شدگی می‌باشد و با افزایش مقدار سیمان، جمع شدگی بتن نیز افزایش پیدا می‌نماید لذا با جایگزین نمودن سیمان توسط خاکستر بادی سبب کاهش مقدار جمع شدگی شده است.




**شکل۵ : میانگین درصد انقباض نمونه‌ها**

میانگین درصد کاهش وزن نمونه‌ها در شکل ۶ قابل مشاهده است. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود پس از گذشت ۲۸ روز، نمونه بتن معمولی، کاهش وزن نسبتاً کمی از خود نشان می‌دهد. به طوری که این مقدار در حدود ۹/۰۸ درصد بوده و در مقایسه با نمونه بتن خود متراکم با ۲۵ درصد خاکستر بادی (۶/۱۹ درصد) حدود ۱/۴۷ برابر، در مقایسه با نمونه بتن خود متراکم با ۳۵ درصد خاکستر بادی (۱۱/۴۷ درصد) حدود ۰/۷۹ برابر و در مقایسه با نمونه بتن خود متراکم با ۴۵ درصد خاکستر بادی (۱۱/۱۳ درصد) در حدود ۰/۸۲ برابر می‌باشد.




**شکل۶ : میانگین درصد کاهش وزن نمونه‌ها**

## ۳-۳ تحلیل آزمایش مقاومت سطحی

نتایج انجام آزمون درجای "پیچش" برروی نمونه‌های بتن معمولی و بتن خود متراکم در شرایط عمل‌آوری در آب و محلول سولفات منیزیم در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه در این قسمت نشان داده شده است.

### ۳-۳-۱ تاثیر خاکستر بادی بر مقاومت سطحی نمونه‌ها

در جدول ۴ نتایج آزمایش مقاومت سطحی روی نمونه‌های بتن خود متراکم حاوی درصدهای مختلف خاکستر بادی ارائه شده است.

**جدول۴ : مقایسه نتایج مقاومت سطحی نمونه‌های بتن خودمتراکم با درصدهای مختلف خاکستر بادی (کیلوگرم – متر)**

| شماره نمونه | مقاومت سطحی | | درصد کاهش مقاومت |
|---|---|---|---|
| | عمل‌آوری در آب | شرایط جمع شدگی | |
| بتن خود متراکم با ۲۵ درصد خاکستر بادی | ۱۳/۲۳ | ۱۱/۴۷ | ۱۳/۴ |
| بتن خود متراکم با ۳۵ درصد خاکستر بادی | ۱۳/۷۷ | ۱۱/۸۹ | ۱۳/۶ |
| بتن خود متراکم با ۴۵ درصد خاکستر بادی | ۱۳/۶۷ | ۱۱/۷۸ | ۱۳/۸ |
| بتن معمولی | ۱۳/۴۷ | ۱۰/۹۹ | ۸/۴ |

با توجه به جدول ۴ دیده می‌شود بتن معمولی در مقایسه با نمونه‌های خود متراکم، کاهش بیشتری در مقاومت از خود نشان می‌دهد. به طوری که بعد از ۲۸ روز خشک شدن، مقاومت نمونه بتن معمولی در حدود ۱۰/۹۹ کیلوگرم- متر است که در مقایسه با مقاومت نمونه مشابه عمل‌آوری شده در آب (۱۳/۴۷ کیلوگرم- متر) ۱۸/۴ درصد کاهش نشان می‌دهد. این درصد کاهش برای نمونه بتن خود متراکم با ۴۵ درصد خاکستر بادی برابر ۱۳/۸، برای نمونه بتن خود متراکم با ۳۵ درصد خاکستر بادی برابر ۱۳/۶ و برای نمونه بتن خود متراکم با ۲۵ درصد خاکستر بادی برابر ۱۳/۴ می‌باشد. نسبت کاهش مقاومت نمونه بتن معمولی در مقایسه با نمونه بتن خود متراکم با ۴۵ درصد خاکستر بادی، ۱/۳۴ برابر، در مقایسه با نمونه بتن خود متراکم با ۳۵ درصد خاکستر بادی، ۱/۳۵ برابر، در مقایسه با نمونه بتن خود متراکم با ۲۵ درصد خاکستر بادی، ۱/۳۷ برابر است.

سطح بتن، اولین قسمتی می‌باشد که در تماس با عوامل مختلف می‌باشد که یکی از این عوامل، جمع شدگی می‌باشد. جمع شدگی که بر اثر خروج رطوبت از داخل بتن رخ داده و باعث ایجاد ترک خوردگی در بتن می‌شود دارای تاثیر فراوانی در مقاومت سطحی می‌باشد. از جدول ۴ مشاهده می‌شود که نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب به دلیل عدم وجود جمع شدگی و عدم ترک خوردگی دارای مقاومت سطحی بیشتری نسبت به بتن‌های دارای جمع شدگی می‌باشند.

### ۳-۳-۲ تاثیر عمل آوری در محلول سولفات منیزیم بر مقاومت سطحی نمونه ها

در جدول ۵، نتایج مربوط به مقاومت سطحی بتن‌های خود متراکم تحت شرایط عمل‌آوری در آب و سولفات منیزیم نشان داده شده است.

**جدول۵ : مقایسه نتایج مقاومت سطحی نمونه‌ها تحت شرایط عمل‌آوری در آب و سولفات منیزیم (کیلوگرم - متر)**

| نمونه | آب | | | سولفات منیزیم | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ۳ روز | ۷ روز | ۲۸ روز | ۳ روز | ۷ روز | ۲۸ روز |
| بتن معمولی | ۶/۸۰ | ۷/۶۷ | ۱۲/۳۷ | ۶/۳۳ | ۶/۹۳ | ۱۱/۴۷ |
| SCC25 | ۶/۳۷ | ۸/۳۰ | ۱۱/۳۷ | ۷/۱۷ | ۸/۹۷ | ۱۲/۹۷ |
| SCC35 | ۵/۸۳ | ۶/۲۷ | ۱۲/۹۷ | ۵/۸۷ | ۶/۸۳ | ۱۴/۲۳ |
| SCC45 | ۴/۸۳ | ۶/۳۷ | ۱۲/۷۷ | ۴/۸۰ | ۶/۳۷ | ۱۴/۳۳ |

از جدول ۵ مشاهده می‌شود که مقاومت سطحی بتن قرار گرفته در معرض سولفات منیزیم در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز به ترتیب برابر ۶/۳۳، ۶/۹۳ و ۱۱/۴۷ کیلوگرم - متر بدست آمده است که در مقایسه با بتن معمولی مشاهده می‌شود که سولفات منیزیم باعث کاهش مقاومت سطحی بتن معمولی در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه به اندازه ۷/۱، ۹/۷ و ۷/۳ درصد گردیده است. مقاومت سطحی بتن خود متراکم حاوی ۲۵ درصد خاکستر بادی قرار گرفته در معرض سولفات منیزیم در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز به ترتیب برابر ۷/۱۷، ۸/۹۷ و ۱۲/۹۷ کیلوگرم - متر بدست آمده است که در مقایسه با بتن معمولی مشاهده می‌شود که مقدار مقاومت سطحی بتن‌های خود متراکم حاوی ۲۵ درصد خاکستر بادی که در معرض حمله سولفات منیزیم قرار دارد به ترتیب در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه به مقدار ۱۲/۵، ۸/۱ و ۱۴/۱ درصد بیشتر از مقاومت سطحی نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب می‌باشد. مقاومت سطحی بتن خود متراکم حاوی ۳۵ درصد خاکستر بادی در معرض سولفات منیزیم در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز به ترتیب برابر ۵/۸۷، ۶/۳۷ و ۱۴/۲۳ کیلوگرم - متر بدست آمده است که در مقایسه با بتن معمولی مشاهده می‌گردد که مقدار مقاومت سطحی بتن‌های خود متراکم حاوی ۳۵ درصد خاکستر بادی که در معرض حمله سولفات منیزیم قرار دارد به ترتیب در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه به مقدار ۰/۶، ۱/۶ و ۹/۷ درصد بیشتر از مقاومت سطحی نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب می‌باشد. مقاومت سطحی بتن خود متراکم حاوی ۴۵ درصد خاکستر بادی در معرض سولفات منیزیم در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب برابر ۴/۸۰، ۶/۳۷ و ۱۴/۳۳ کیلوگرم - متر بدست آمده است. مشاهده می‌گردد که بر خلاف بتن‌های خود متراکم با ۲۵ و ۳۵ درصد خاکستر بادی، مقدار مقاومت سطحی بتن‌های خود متراکم حاوی ۴۵ درصد خاکستر بادی که در معرض حمله سولفات منیزیم قرار دارد در سن ۳ روزه دچار کاهش ۱ درصدی و در سن ۷ روزه نیز تاثیری نداشته است.

دلیل کاهش مقاومت سطحی بتن که در معرض سولفات منیزیم قرار گرفته است این می‌باشد که سولفات‌ها باعث می‌شوند که یون‌های سولفات با هیدروکسید کلسیم و آلومینات کلسیم هیدراته شده واکنش نشان داده و تبدیل به اترینگایت شده که باعث انبساط، ترک خوردگی، خرابی و تخریب بتن می‌گردد. همچنین از مقایسه نتایج مشاهده می‌گردد که مقاومت سطحی بتن‌های خود متراکم حاوی خاکستر بادی در مقایسه با بتن‌های معمولی در برابر حملات سولفات منیزیم بیشتر می‌باشد. مقدار تاثیر حمله سولفات‌ها علاوه بر غلظت محلول، به نفوذپذیری بتن بستگی دارد. اگر بتن خیلی نفوذپذیر باشد، آب به راحتی به داخل آن نفوذ کرده و $Ca(OH)_2$ شسته خواهد شد. بتن خود متراکم نسبت به بتن معمولی نفوذپذیری کمتری دارد. بنابراین محلول به راحتی نمی‌تواند به آن نفوذ کند و با $C_3A$ سیمان واکنش تخریبی داشته باشد. ضمن اینکه با جایگزین کردن درصدی از سیمان با خاکستر بادی، یا به عبارتی کاهش درصد سیمان موجود، یکی از عوامل اصلی واکنش حذف می‌شود. نتیجتاً بتن خود متراکم دارای مقاومت بیشتری نسبت به بتن معمولی می‌باشد.

در جدول ۶ روند کسب مقاومت نمونه‌ها در فواصل زمانی مشخص نشان داده شده است.

جدول۶ : روند کسب مقاومت نمونه‌ها در فواصل زمانی مشخص (کیلوگرم - متر)

| نمونه | آب | | سولفات منیزیم | |
|---|---|---|---|---|
| | ۳ تا ۷ روز | ۷ تا ۲۸ روز | ۳ تا ۷ روز | ۷ تا ۲۸ روز |
| SCC25 | ۱/۹۳ | ۳/۰۷ | ۱/۸۰ | ۴/۰۰ |
| SCC35 | ۰/۴۳ | ۶/۷۰ | ۰/۹۷ | ۷/۴۰ |
| SCC45 | ۱/۵۳ | ۶/۴۰ | ۱/۵۷ | ۷/۹۷ |
| بتن معمولی | ۰/۸۷ | ۴/۷۰ | ۰/۶۰ | ۴/۵۳ |

در مورد نمونه‌های بتن خود متراکم، در فاصله زمانی ۳ تا ۷ روز، به غیر از نمونه بتن خود متراکم با ۲۵ درصد خاکستر بادی، روند کسب مقاومت نمونه‌های قرار گرفته در محلول سولفات منیزیم بیشتر بوده است. و در فاصله زمانی ۷ تا ۲۸ روز، روند کسب مقاومت تمام نمونه‌های خود متراکم عمل‌آوری شده در محلول سولفات منیزیم بیشتر از نمونه‌های قرار گرفته در آب معمولی است. ولی در مورد بتن معمولی از ۳ تا ۲۸ روز، روند کسب مقاومت نمونه‌های قرار گرفته در محلول سولفات منیزیم کمتر است. همچنین دیده می‌شود با افزایش درصد خاکستر بادی برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در محلول سولفات منیزیم، مقاومت ۳ و ۷ روزه کاهش می‌یابد. به طوری که پس از ۳ روز، مقاومت بتن خود متراکم با ۲۵ درصد خاکستر بادی برابر با ۷/۱۷ کیلوگرم-متر، مقاومت بتن خود متراکم با ۳۵ درصد خاکستر بادی برابر ۵/۸۷ کیلوگرم-متر و در بتن خود متراکم با ۴۵ درصد خاکستر بادی این مقدار برابر ۴/۸۰ کیلوگرم-متر می‌باشد. در مورد مقاومت ۷ روزه برای بتن خود متراکم با ۲۵ درصد خاکستر بادی این مقدار برابر با ۸/۹۷ و برای بتن خود متراکم با ۳۵ درصد خاکستر بادی برابر ۶/۸۳ و برای بتن خود متراکم با ۴۵ درصد خاکستر بادی برابر ۶/۳۷ کیلوگرم-متر می‌باشد. اما در مورد مقاومت ۲۸ روزه روند کسب مقاومت، افزایشی است. یعنی مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های خود متراکم عمل‌آوری شده در آب سولفاته با افزایش درصد خاکستر بادی افزایش می‌یابد. بطوری که مقاومت ۲۸ روزه برای نمونه بتن خود متراکم با ۲۵ درصد خاکستر بادی برابر با ۱۲/۹۷ و برای بتن خود متراکم با ۳۵ درصد خاکستر بادی برابر با ۱۴/۲۳ و برای بتن خود متراکم با ۴۵ درصد خاکستر بادی برابر با ۱۴/۳۳ کیلوگرم-متر می‌باشد.

در مورد نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب معمولی با افزایش درصد خاکستر بادی همچنان روند کاهشی در مقاومت ۳ روزه دیده می‌شود. اما در مورد مقاومت ۷ و ۲۸ روزه افزایش درصد خاکستر بادی بر روی مقاومت نمونه‌های خود متراکم عمل‌آوری شده در آب معمولی تاثیر چندانی نداشته است، چنانچه دیده می‌شود، مقاومت ۲۸ روزه بتن خود متراکم با ۲۵ درصد خاکستر بادی برابر با ۱۱/۳۷ و برای بتن خود متراکم با ۳۵ درصد خاکستر بادی برابر با ۱۲/۹۷ و برای بتن خود متراکم با ۴۵ درصد خاکستر بادی برابر با ۱۲/۷۷ کیلوگرم-متر می‌باشد. بنابراین، به نظر می‌رسد محلول سولفات منیزیم، نه تنها تاثیر منفی بر روی مقاومت بتن خود متراکم حاوی خاکستر بادی ندارد بلکه شرایط عمل‌آوری بهتری را برای این نمونه‌ها فراهم می‌کند.

مقدار تاثیر حمله سولفات‌ها علاوه بر غلظت محلول، به نفوذپذیری بتن بستگی دارد. اگر بتن خیلی نفوذپذیر باشد، آب به راحتی به داخل آن نفوذ کرده و $Ca(OH)_2$ شسته خواهد شد. بتن خود متراکم نسبت به بتن معمولی نفوذپذیری کمتری دارد. بنابراین محلول به راحتی نمی‌تواند به آن نفوذ کند و با $C_3A$ سیمان واکنش تخریبی داشته باشد. ضمن اینکه با جایگزین کردن درصدی از سیمان با خاکستر بادی، یا به عبارتی کاهش درصد سیمان موجود، یکی از عوامل اصلی واکنش حذف می‌شود. نتیجتاً محلول سولفات منیزیم تاثیر منفی کمتری روی مقاومت خواهد داشت.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از آزمون "پیچش"، تاثیر جمع شدگی حاصل از خشک شدگی و سولفات منیزیم بر مقاومت سطحی (تاثیرات خارجی) بتن‌های خود متراکم مورد بررسی قرار گرفته است. طرح‌های اختلاط بتن خود متراکم با جایگزین کردن ۲۵، ۳۵ و۴۵ درصد سیمان با پرکننده خاکستر بادی، و یک طرح اختلاط بتن معمولی به عنوان شاهد جهت بررسی تاثیر جمع شدگی و سولفات منیزیم بر مقاومت بتن خود متراکم مورد مطالعه قرار گرفتند.

- در اثر جمع شدگی ناشی از خشک شدن، بتن معمولی در مقایسه با نمونه‌های خود متراکم، کاهش بیشتری در مقاومت سطحی از خود نشان می‌دهد. بنابراین بتن خود متراکم در اثر قرار گرفتن در معرض شرایط جمع شدگی ناشی از خشک شدن، آسیب کمتری نسبت به بتن معمولی می‌بینند.

- بعد از ۲۸ روز خشک شدن، کاهش مقاومت سطحی نمونه بتن معمولی در اثر جمع شدگی در حدود ۱۸/۴ درصد شده است که این کاهش در مقایسه با نمونه بتن خود متراکم با ۴۵ درصد خاکستر بادی (دارای ۱۳/۸ درصد کاهش در مقاومت سطحی) ۱/۳۴ برابر، در مقایسه با نمونه بتن خود متراکم با ۳۵ درصد خاکستر بادی (دارای ۱۳/۶ درصد کاهش در مقاومت سطحی) ۱/۳۵ برابر و در مقایسه با نمونه بتن خود متراکم با ۲۵ درصد خاکستر بادی (دارای ۱۳/۴ درصد کاهش در مقاومت سطحی) ۱/۳۷ برابر می‌باشد.

- افزایش پرکننده، بیشتر از یک مقدار بهینه، تاثیر چشم‌گیری در کاهش جمع شدگی ندارد.

- روند کسب مقاومت سطحی تقریباً تمام نمونه‌های خود متراکم عمل‌آوری شده در محلول سولفات منیزیم بیشتر از نمونه‌های قرار گرفته در آب معمولی است. ولی در مورد بتن معمولی، روند کسب مقاومت سطحی تمام نمونه‌های قرار گرفته در محلول سولفات منیزیم کمتر است.

- با استفاده از خاکستر بادی در داخل بتن، مشاهده شد که در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز، مقدار مقاومت سطحی بتن‌های قرار گرفته در محلول سولفات منیزیم بیشتر از مقاومت سطحی بتن‌های قرار گرفته در داخل آب می‌باشد.

- برای نمونه‌های خود متراکم عمل‌آوری شده در محلول سولفات منیزیم، با افزایش درصد خاکستر بادی، مقاومت سطحی ۳ و ۷ روزه کاهش می‌یابد. اما مقاومت سطحی ۲۸ روزه افزایش می‌یابد.

## مراجع

[1] C.I. Goodier, Development of self-compacting concrete, P. I. Civil Eng. Str. B 156 (4) (2003) 405–414.
[2] A. Leemann, P. Lura, R. Loser, Shrinkage and creep of SCC–The influence of paste volume and binder composition, Constr. Build. Mater. 25 (5) (2011) 2283–2289.
[3] Y. Dang, J. Qian, Y. Qu, L. Zhang, Z. Wang, D. Qiao, X. Jia, Curing cement concrete by using shrinkage reducing admixture and curing compound, Constr. Build. Mater. 48 (2013) 992–997.
[4] M.J. Oliveira, A.B. Ribeiro, F.G. Branco, Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to control autogenous shrinkage in selfcompacting concrete, Constr. Build. Mater. 52 (2014) 267–275.
[5] M. Naderi. “New Twist-Off Method for the Evaluation of In-Situ Strength of Concrete”, Journal of Testing and Evaluation/Citation, 35(6). (2005).
[6] A. Saberi Varzaneh, and M. Naderi. Determination of Compressive and Flexural Strengths of In-situ Pozzolanic Concrete Containing Polypropylene and Glass Fibers Using "Twist-off" Method. Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J). Vol.20, No.5, Oct. (2020).
[7] M. Naderi, A. Smaili, and A. Saberi Varzaneh. Assessment of the application "twist-off" method for determining the in situ compressive and flexural strengths in the fiber concrete. Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE) Accepted paper. (2021).

[8] A. Saberi Varzaneh. and M. Naderi. Determination of Shrinkage, Tensile and Compressive Strength of Repair Mortars and Their Adhesion on the Concrete Substrate Using "Twist-off" and "Pull-off" Methods. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. Published online (2020).
[9] A. Saberi Varzaneh, and M. Naderi. Investigation of In-situ compressive strength of Fiber-Reinforced Mortar and the Effect of Fibers on the Adhesion of Mortar/Steel. Advanced design and manufacturing technology. Accepted (2021).
[10] A. Saberi Varzaneh, and M. Naderi. NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF SEMI-DESTRUCTIVE TESTS TO EVALUATE THE COMPRESSIVE AND FLEXURAL STRENGTH OF POLYMER-MODIFIED MORTARS AND THEIR ADHESION TO THE CONCRETE SUBSTRATE. Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials, 50(4), (2020) 537 – 544.
[11] F.M. Kilinckale. The effect of MgSO4 and HCl solutions on the strength and durability of pozzolan cement mortars, Cem. Concr. Res. 27 (12) (1997) 1911–1918.
[12] J. Zelic, I. Radovanovic, D. Jozic, The effect of silica fume additions on the durability of Portland cement mortars exposed to magnesium sulfate attack, Mater. Technol. 41 (2) (2007) 91–94.
[13] G.G. Liu, J. Ming, X.W. Zhang, A.B. Ma, Study on the durability of concrete with mineral admixtures to sulfate attack by wet-dry cycle method, Adv. Mater. Res. 295–297 (2011) 165–169.
[14] N. Ghafoori, M. Najimi, H. Diawara, M.S. slam, Effects of class F fly ash on sulfate resistance of Type V Portland cement concretes under ontinuous and interrupted sulfate exposures, Constr. Build. Mater. 78 (2015) 85–91.
[15] G.G. Liu, J. Ming, X.W. Zhang, A.B. Ma, Study on the durability of concrete with mineral admixtures to sulfate attack by wet-dry cycle method, Adv. Mater. Res. 295–297 (2011) 165–169.
[16] Q. Nie, C. Zhou, X. Shu, Q. He, B. Huang, Chemical, mechanical, and durability properties of concrete with local mineral admixtures under sulfate environment in Northwest China, Materials 7 (5) (2014) 3772–3785.
[17] P.K. Acharya, S.K. Patro, Acid resistance, sulphate resistance and strength properties of concrete containing ferrochrome ash (FA) and lime, Constr. Build. Mater. 120 (2016) 241–250.
[18] L. Jiang, D. Niu, Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles, Constr. Build. Mater. 117 (2016) 88–98.
[19] A. Benli, M. Karatas, E. Gurses. Effect of sea water and MgSO4 solution on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with fly ash/silica fume. Construction and Building Materials 146 (2017) 464–474.
[20] K. Samimi, A. Shirzadi Javid. Magnesium Sulfate (MgSO4) Attack and Chloride Isothermal Effects on the Self-consolidating Concrete Containing Metakaolin and Zeolite. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. (2020). https://doi.org/10.1007/s40996-020-00398-6.
[21] M. Maes, F. Mittermayr, N De Belie. The influence of sodium and magnesium sulfate on the penetration of chlorides in mortar. Mater Struct 50(2) (2017) 153.
[22] A. Neville. The confused world of sulfate attack on concrete. Cem Concr Res 34(8) (2004) 1275–1296.
[23] M. Santhanam. Studies on sulfate attack – mechanisms, test methods and modeling. PhD Dissertation Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA. (2001).
[24] ASTM C136-01, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates", American Society for Testing and Materials, (2001).
[25] EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. ISBN 0 9539733 4 4. (2002).
[26] ASTM C 426-70, Drying Shrinkage of Concrete Masonry Units, Section 4, Volume 04.05, ASTM Committee C-15 (2007).