Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 641-644
DOI: 10.22060/ceej.2020.17542.6600

The Effect of Shrinkage Reducing Admixture on the Behavior of Concrete used in Concrete Pavements

M. Gholami[1], F. Moghadas Nejad[1*] , A. A. Ramezanianpour[1], A. M. Ramezanianpour[2]

[1] Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
[2] Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT: Concrete pavements are widely used by pavement engineers due to their advantages over flexible pavements such as long lifetime, good performance and durability, etc. However, concrete pavements represent some drawbacks such as shrinkage that increases the tensile stress in concrete, which may lead to cracking, warping, etc. Drying shrinkage is the most important type of shrinkage in concrete pavements. To prevent or reduce the amount of cracking, shrinkage reducing admixture (SRA) can be used. This admixture controls shrinkage by reducing water surface tensile in capillary tubes. In this study, the effect of shrinkage reducing admixture on the behavior of concrete used in concrete pavements was investigated. Slump, compressive strength, third-point flexural strength, electrical resistance, skid resistance, free shrinkage, and restrained shrinkage by ring test were performed. Two water-cement ratios of 0.35 & 0.4 were used for mix design and the percentage of shrinkage reducing admixture used in mixtures was 2% by weight of cement. The results showed that the use of SRA had a negligible effect on workability. Also, the use of SRA caused about a 10% reduction in compressive and flexural strength and electrical resistance. Furthermore, a reduction of 10% and 20% was observed in free and restrained shrinkages, respectively, followed by a 40% reduction in crack width and more than one-week delay in the occurrence of the first crack. Finally, no certain relationship was observed between the usage of SRA and variations of the skid resistance of concrete pavements.

Review History:
Received: Dec. 19, 2019
Revised: Feb. 25, 2020
Accepted: Feb. 27, 2020
Available Online: Apr. 03, 2020

Keywords:
Concrete pavement
Drying shrinkage
Tensile stress
Shrinkage cracks
Shrinkage reducing admixture

1. INTRODUCTION

Because of higher lifetime, performance, and durability, concrete pavements are widely used over asphalt concrete on transportation infrastructure [1]. However, concrete pavements show some terrible properties like Shrinkage – Volumetric loss of concrete due to water evaporation[2] – and warping that occurs because of drying shrinkage [3] in some cases. Also, these pavements have large surfaces, so when they are exposed to environmental conditions, shrinkage cracks have happened that are more critical than other design parameters [4].

Shrinkage reducing admixture is a material that is used in concrete to decrease shrinkage cracks without any volumetric change of concrete (expansion) [5]. It controls shrinkage by reducing capillary tension [6].

Kim & Lee [7] used several contents of SRA[1](1 to 5 percent) in latex modified concrete and observed that the use of SRA had no significant effect on fresh properties of concrete, but it increased the compressive and flexural strengths. Chen *et al.* [8] found using SRA affords a delay in cement hydration and initial setting time. Deboodt *et al.* [9] Showed that the use of SRA causes a reduction in compressive and flexural strengths and modulus of elasticity. Also, they mentioned that SRA helps concrete against shrinkage and its cracks. Hatami *et al.* [10] investigated the effect of SRA on the durability properties of HPC[2]. They realized that the use of SRA increases slump improves durability properties of concrete and decreases free and restrained shrinkage. In addition, using SRA results in a reduction in mechanical properties. Qiao *et al.* [11] focused on the effect of different dosages of SRA on ions migration in concrete containing 400kg cement and w/c=0.4 and reported that it had a good effect on ions migration for relative humidity between 40 & 80 percent.

Increasing the length of concrete slabs and rate of implementation of them was concluded if shrinkage controls in concrete pavements. Different effects of SRAs that produce in the different companies on mechanical and durability properties was a challenge to use them in concrete pavements to control shrinkage. In this study, the effect of shrinkage reducing admixture on the behavior of concrete used in concrete pavements was investigated.

1 Shrinkage reducing admixture
*Corresponding author's email: moghadas@aut.ac.ir

High performance concrete 2

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Table 1. Chemical properties of SRA & superplasticizer

name	density (gr/cm^3)	nature	% active material
SRA	0.96	Polypropylene glycol, non-ionic	90%
superplasticizer	1.05	Polycarboxylate, non-ionic	35%

2. MATERIALS AND METHODS

Type II Portland cement produced by the Tehran cement factory was used in this study with a density of 3130 kg/m^3.

Furthermore, 3 types of aggregates were used in this study: gravel 9.5-19 mm, gravel 6-12 mm, and sand 0-6 mm. the proportion of each type were 20%, 25%, and 55% of the total weight of aggregate, respectively. In addition, the chemical properties of Shrinkage reducing admixture and superplasticizer are shown in Table 1.

The mix composition was expanded based on a national method for concrete mix design [12] with two *w/c* of 0.35 & 0.4, and the amount of cement and SRA were 400 kg/m^3 and 2% by weight of cement, respectively. Table 2 shows four concrete mix compositions examined in this study.

Also, slump, compressive strength, flexural strength with center-point loading, electrical resistance, skid resistance, free shrinkage, and restrained shrinkage were performed as an experimental program.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The results of fresh properties of concrete are also represented in Table 2. It shows that using SRA has no important effect on the behavior of concrete at early ages.

Table 2. Concrete mix Composition (per cubic meter)

Name	OPC 0.35	SRA 0.35	OPC 0.4	SRA 0.4
w/c	0.35	0.35	0.4	0.4
Cement (kg)	400	400	400	400
Gravel 9.5-19 (kg)	375.6	375.6	365.3	365.3
Gravel 6-12 (kg)	469.5	469.5	456.6	456.6
Sand 0-6 (kg)	1032.8	1032.8	1004.6	1004.6
Water (kg)	140	140	160	160
Superplasticizer (kg)	2	2	1.6	1.6
SRA (kg)	0	8	0	8
Density (kg/m^3)	2372	2363	2344	2334
Slump (mm)	68	72	65	70

Also, *w/c* has a minor effect on the workability of concrete.

Results of compressive and flexural strengths are shown in Fig. 1. Water cement ratio has an inverse relationship with mechanical properties. It might be because of reducing matrix and non-reacting water and increasing aggregate.

Also, SRA caused a reduction in compressive and flexural strengths. Delay in cement hydration was concluded by using SRA and decreasing the mechanical properties [8, 9].

Fig. 2 represents the results of electrical and skid resistance. It is observed that electrical resistance decreases when SRA is used in concrete. That's because of delaying in cement hydration [8, 9] and the increasing dosage of ions in concrete [13]. Also, there is no certain relationship between skid resistance and SRA usage.

Fig. 3 shows the effect of SRA on the behavior of free and restrained shrinkage (restrained shrinkage was tested on concrete with *w/c*=0.35). SRA can mainly reduce free shrinkage (length change) of concrete and the ring's strain of

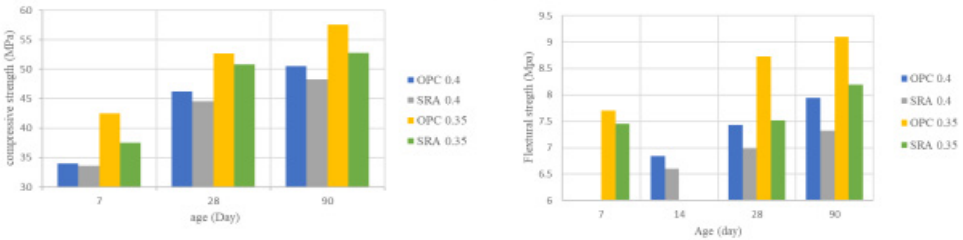


Fig. 1. Compressive (left) and Flexural (Right) Strength

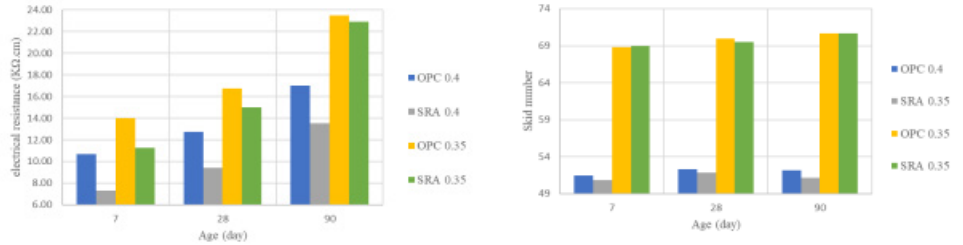


Fig. 2. Electrical (left) and skid (Right) resistance

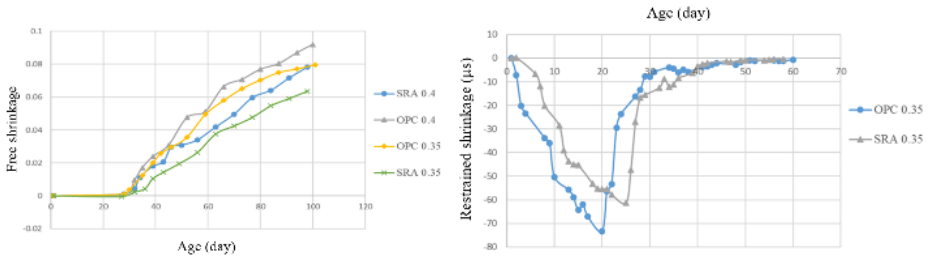


Fig. 3. Free (left) and restrained (Right) shrinkage

restrained shrinkage. Furthermore, this admixture increases the age of the first crack in the concrete and decreases the crack width and number of cracks. It may happen because SRA reduces the capillary tension of water, rate of evaporation, surface tension, and initial concrete temperature [6, 14].

4. CONCLUSION

This research tried to find the effect of SRA on the mechanical and durability behavior of concrete used in pavements. From the observed results, the following remarks can be made:

Ø The use of SRA had a negligible effect on the fresh properties of concrete (Slump & density).

Ø This admixture had a negative effect on compressive and flexural strengths of concrete and reduced these mechanical properties up to 10 & 15%, respectively. It might be due to a delay in cement hydration.

Ø The electrical resistance of concrete decreased about 20 % when SRA was used in concrete. It might be caused by increasing the ion dosage of concrete and delaying cement hydration.

Ø There was no certain effect between SRA usage and variation of skid resistance.

Ø Free and restrained shrinkage reduced about 12 & 20 percent, respectively, by using SRA. In addition, the age of the first crack appeared 8 days later, and crack width decreased more than 40% which shows SRA had a desirable effect on controlling shrinkage and its cracks.

REFERENCES

[1] R.A. Embacher, M.B. Snyder, Life-cycle cost comparison of asphalt and concrete pavements on low-volume roads; case study comparisons, Transportation research record, 1749(1) (2001) 28-37.

[2] D. Mostofinejad, Reinforced Concrete Structure, Arkan-e Danesh publication, Volume 1 (2017).

[3] J.M. Ruiz, R.O. Rasmussen, G.K. Chang, J.C. Dick, P.K. Nelson, Computer-based guidelines for concrete pavements, volume II: design and construction guidelines and HIPERPAVE II user's manual, Federal Highway Administration, FHWA–HRT–04–122 (2005).

[4] J. Zhang, V.C. Li, Influences of fibers on drying shrinkage of fiber-reinforced cementitious composite, Journal of engineering mechanics, 127(1) (2001) 37-44.

[5] Committee of concrete chemical additives, Iran concrete Institute, the application of chemical additives in concrete, Yazda publication, (2014).

[6] P.K. Mehta, P.J. Monteiro, Concrete microstructure, properties and materials, third ed., McGraw-hill, 2017.

[7] B.J. Lee, Y.Y. Kim, Durability of latex modified concrete mixed with a shrinkage reducing agent for bridge deck pavement, International Journal of Concrete Structures and Materials, 12(1) (2018) 23.

[8] S. Chen, H. Zhao, Y. Chen, D. Huang, Y. Chen, X. Chen, Experimental study on interior relative humidity development in early-age concrete mixed with shrinkage-reducing and expansive admixtures, Construction and Building Materials, 232 (2020) 117204.

[9] T. Deboodt, T. Fu, J.H. Ideker, Evaluation of FLWA and SRAs on autogenous deformation and long-term drying shrinkage of high performance concrete, Construction and Building Materials, 119 (2016) 53-60.

[10] B. Hatami, A.M. Ramezanianpour, A.S. Daryan, Investigation on the Effect of Shrinkage Reducing Admixtures on Shrinkage and Durability of High-Performance Concrete, Journal of Testing and Evaluation, 46(1) (2017) 141-150.

[11] C. Qiao, W. Ni, J. Weiss, Transport due to diffusion, drying, and wicking in concrete containing a shrinkage-reducing admixture, Journal of Materials in Civil Engineering, 29(9) (2017) 04017146.

[12] Building and housing research center, The national Method for concrete mix design, BHRC Publication, No. S-479 (2008).

[13] W. Zuo, P. Feng, P. Zhong, Q. Tian, J. Liu, W. She, Effects of a novel polymer-type shrinkage-reducing admixture on early age microstructure evolution and transport properties of cement pastes, Cement and Concrete Composites, 95 (2019) 33-41.

[14] [14] M.J. Rosen, J.T. Kunjappu, Surfactants, and Interfacial Phenomena, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, (2012).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Gholami, F. Moghadas Nejad, A.A. Ramezanianpour, A.M. Ramezanianpour, The Effect of Shrinkage Reducing Admixture on the Behavior of Concrete used in Concrete Pavements, Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 641-644.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17542.6600

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۷، سال ۱۴۰۰، صفحات ۲۹۲۱ تا ۲۹۳۶
DOI: 10.22060/ceej.2020.17542.6600

بررسی اثر افزودنی کاهنده جمع‌شدگی در بتن مورد استفاده در روسازی‌های بتنی

مسعود غلامی[۱]، فریدون مقدس‌نژاد[۱*] ، علی‌اکبر رمضانیان‌پور[۱]، امیرمحمد رمضانیان‌پور[۲]

[۱] دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
[۲] دانشکده مهندسی عمران ، دانشگاه تهران، تهران، ایران

خلاصه: کاهش منابع نفتی و طول عمر نه چندان بالای روسازی‌های آسفالتی، استفاده از روسازی بتنی را در جهان، مورد توجه قرار داده است. یکی از مشکلات اصلی روسازی‌های بتنی، پدیده جمع‌شدگی (مخصوصاً ناشی از خشک شدن) است که در اثر از دست رفتن آب موجود در ساختار بتن ایجاد و سبب ایجاد تنش کششی در سطح المان‌های آن می‌گردد که اگر تنش ایجاد شده از مقاومت کششی بتن بیشتر باشد، ترک‌هایی در سطح بتن پدیدار می‌شود. افزودنی کاهنده جمع‌شدگی از جمله موادی است که به واسطه کاهش کشش سطحی و فشار جداکننده، سبب کاهش تنش کششی ایجاد شده در بتن می‌شود. هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر افزودنی کاهنده جمع‌شدگی بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن مورد استفاده در روسازی‌های بتنی می‌باشد. آزمایش‌های اسلامپ، مقاومت فشاری، خمشی، الکتریکی، اصطکاک سطحی، جمع‌شدگی‌های آزاد و مقید بر روی بتن شاهد و بتن حاوی ماده کاهنده جمع‌شدگی (۲ درصد وزن سیمان) در دو نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴ انجام شد. نتایج نشان‌دهنده آن است که استفاده از ماده کاهنده جمع‌شدگی تأثیر چندانی بر کارایی بتن نگذاشته است. کاربرد این ماده در بتن سبب کاهش حدود ۱۰ درصدی مقاومت فشاری، خمشی و الکتریکی می‌شود. به علاوه این ماده میزان جمع‌شدگی آزاد، مقید و عرض ترک‌های ایجاد شده را به ترتیب حدود ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد کاهش می‌دهد و سن ترک‌خوردگی را حدود ۷ روز به تأخیر می‌اندازد. با این حال تأثیر این افزودنی بر روی اصطکاک سطحی واضح و مشخص نمی‌باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۲۸
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۰۶
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۰۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

کلمات کلیدی:
روسازی بتنی
جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن
تنش‌های کششی
ترک در بتن
افزودنی کاهنده جمع‌شدگی

۱- مقدمه

روسازی‌های جدید غالباً به گونه‌ای طراحی می‌شوند که طول عمر بالایی (بیش از ۴۰ سال) داشته باشد. روسازی بتنی به دلیل طول عمر بالا و نیاز به انجام عملیات تعمیر و نگهداری کمتر شرایط مطلوب‌تری نسبت به روسازی‌های آسفالتی فراهم می‌کند [۱]، با این حال هزینه اولیه روسازی‌های بتنی (مخصوصاً از نوع مسلح) از روسازی‌های آسفالتی بالاتر بوده که غالبا دلیل این افزایش هزینه ساخت حضور فولاد، مش و یا داول‌های موجود در محل درزها است [۲]. یکی از مشکلات غالب روسازی‌ها که باعث کاهش ابعاد دال و استفاده از مسلح‌کننده‌ها می‌شود، پدیده جمع‌شدگی بتن می‌باشد. جمع‌شدگی پدیده ایست که در اثر از دست رفتن آب اضافی در ساختار خمیر سیمان ایجاد می‌شود و باعث کاهش حجم در بتن می‌گردد و به چهار نوع جمع‌شدگی پلاستیک، خود به خودی، خشک‌شدگی و یا کربناسیون تقسیم می‌شود [۳]. عوامل متعددی در جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن دخیل هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به کشش مویینه، کاهش فشار جداکننده و تغییرات انرژی آزاد اشاره کرد. وجود خصوصیاتی در خمیر سیمان هیدراته شده همانند تخلخل زیاد، نیروی پیوند واندروالسی قوی در ژل CSH، شبکه حفرات مویینه کوچک و سطح ویژه زیاد ژل CSH، باعث ایجاد عوامل مربوط به جمع‌شدگی می‌گردد [۴]. به دلیل سطح بزرگ اغلب روسازی‌ها و قرارگیری در معرض شرایط محیطی، روسازی‌ها غالباً پیش از بارگذاری در معرض جمع‌شدگی و ترک‌های ناشی از آن قرار می‌گیرند که این عامل بحرانی‌تر از سایر عوامل سازه‌ای در طراحی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moghadas@aut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

می‌باشد [۵] و می‌تواند به صورت قابل توجهی بر عملکرد و طول عمر این روسازی‌ها تأثیر بگذارد [۶].

تابیدگی نیز یکی دیگر از مشکلات جدی روسازی‌های بتنی می‌باشد که یکی از دلایل اصلی وقوع این پدیده تغییرات و اختلاف دما در سطح زیرین و رویی روسازی می‌باشد [۷]. جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن یکی دیگر از علل وقوع این پدیده می‌باشد و به صورت شایعی موجب گسیختگی دال‌های بتنی می‌گردد. به علاوه این پدیده ممکن است بر شرایط تکیه‌گاهی روسازی تأثیر گذارد [۸]. در پژوهشی که به منظور پیش‌بینی تابیدگی دال‌های بتنی صورت گرفت، مشاهده شد پدیده تابیدگی موجب ایجاد ناحیه‌ای با تنش بالا در اطراف سطوح خشک شده و ممکن است سبب ترک‌خوردگی در هنگام عبور چرخ خودرو از این نواحی شود [۹]. در مطالعه‌ای با هدف ایجاد مدلی مکانیستی-تجربی برای تعیین عملکرد بلند مدت روسازی‌های مسلح درزدار، مشاهده شد ترک‌های عرضی از مشکلات اصلی بتن می‌باشد. همچنین ترکیب تنش‌های ناشی از جمع‌شدگی، پیچ‌خوردگی و تابیدگی بتن در اثر شرایط محیطی و همچنین بار ترافیک باعث ایجاد تنش‌های بزرگی می‌شود که سبب وقوع این‌گونه ترک‌ها می‌گردد و عملکرد روسازی‌های بتنی درزدار را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۰].

یکی از راه‌های کاهش احتمال ایجاد ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی استفاده از ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی[1] (SRA) است. مکانیزم این مواد به گونه‌ای است که جمع‌شدگی را بدون انبساط تغییر می‌دهند [۴]. افزودنی کاهنده جمع‌شدگی شامل ترکیبی از مواد آلی می‌باشد که باعث کاهش کشش سطحی در منافذ محلول می‌شود. در واقع کاهش میزان کشش به دلیل کاهش نیروی مویرگی در مایع بین حفره‌ای فرض می‌شود که موجب کاهش میزان جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن می‌گردد. این ماده مدت زیادی به صورت مایع باقی مانده و سطح ویژه خمیرسیمان هیدراته شده را افزایش می‌دهد [۱۱]. ماده فعال به ماده‌ای گفته می‌شود که زمانی که با غلظت کم در یک سیستم وجود داشته باشد، بر روی سطح ماده جذب شده و انرژی سطح آزاد ماده و کشش سطحی آن را تغییر می‌دهد [۱۲]. ماده کاهنده جمع‌شدگی از مواد فعال تشکیل شده و بنابراین عملکرد مشابهی بر کشش سطحی دارد، لذا پژوهشگران مختلفی تأثیر این ماده بر بتن را بررسی کردند.

Maia و همکاران [۱۳] به بررسی اثر دو افزودنی کاهنده جمع‌شدگی ساخته شده توسط شرکت‌های مختلف بر خواص بتن خود متراکم توانمند و معمولی که به ترتیب دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۳۵ و ۰/۳۲ و عیار سیمان ۴۱۵/۹ و ۴۰۰ کیلوگرم بودند، پرداختند. مشاهده شد، در بتن معمولی، با افزایش درصد SRA، اسلامپ و مقاومت در برابر جداشدگی افزایش یافت، در حالی که در بتن توانمند، میزان اسلامپ و مقاومت جداشدگی وابسته به نوع SRA مصرفی بود. همچنین این ماده سبب تأخیر در فرآیند هیدراسیون و کاهش دمای حداکثر گردید. همچنین جنس SRA بر مشخصات مکانیکی بتن مؤثر بوده و از افزودنی یک سازنده به سازنده دیگر تأثیر آن متفاوت است. با این حال مشخصات دوامی بتن حاوی هر دو نوع افزودنی نسبت به بتن شاهد بهبود یافته است. Mora-Ruacho و همکاران [۱۴] SRAهایی با پایه پلی پروپیلن گلایکول اتر با درصد مواد فعال متفاوت (۹۶ و ۷۶ درصد) را در بتن معمولی و توانمند با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۳۵ و عیار سیمان ۳۲۵ و ۵۲۸ کیلوگرم مورد بررسی قرار دادند و دریافتند بتن توانمند حاوی این افزودنی، اسلامپ پایین‌تری از بتن شاهد را از خود نشان داد، در حالی که اسلامپ بتن معمولی چندان تحت تأثیر این ماده قرار نگرفت. آن‌ها همچنین کاهش جمع‌شدگی پلاستیک را گزارش کردند و علت آن را کاهش کشش سطحی حفرات، نرخ تبخیر، فعل و انفعالات و ایجاد تأخیر در وقوع فشار حفره‌ای حداکثر دانستند. Lee و Kim [۱۵] پژوهشی بر روی بتن لاتکس انجام دادند و از ۱ تا ۵ درصد SRA در این بتن استفاده کردند. آنها مشاهده کردند ماده کاهنده جمع‌شدگی تأثیر قابل توجهی بر خواص بتن تازه همچون اسلامپ و درصد هوای موجود ندارد، با این حال، افزودن این ماده، مقاومت فشاری و خمشی بتن را افزایش می‌دهد. Deboodt و همکاران [۱۶] تأثیر افزودنی کاهنده جمع‌شدگی را بر جمع‌شدگی خود به خودی و ناشی از خشک شدن در بتن توانمند حاوی سنگدانه سبک بررسی کردند. در نتیجه آزمایش‌ها مقاومت خمشی، فشاری و مدول الاستیسیته بتن در حضور این افزودنی، کاهش یافت. به علاوه آن‌ها مشاهده کردند نرخ خشک‌شدگی بتن در سنین اولیه با استفاده از ماده SRA کاهش یافت و در نتیجه جمع‌شدگی خود به خودی به کمک این ماده به طرز چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. Wehbe و

1 Shrinkage reducing admixture

همکاران [۱۷] در آزمایشات خود بر روی ملات‌های سیمانی حاوی SRA، کاهش مقاومت الکتریکی به علت تأخیر در فرآیند هیدراسیون و عملکرد مطلوب این ماده بر جمع‌شدگی خود به خودی را به علت کاهش کشش سطحی و فشار جداکننده در لوله‌های مویین موجود در بتن گزارش کردند. Zou و همکاران [۱۸] تأثیر ماده SRA بر مقاومت الکتریکی را به دو قسمت تقسیم کردند. در سنین اولیه به دلیل غلظت بیشتر یون‌های رسانا در بتن حاوی SRA، مقدار مقاومت الکتریکی کمتر از نمونه شاهد است؛ اما پس از سخت شدن، مقاومت الکتریکی بتن حاوی SRA نسبت به بتن شاهد بهبود می‌یابد. Qiao و همکاران [۱۹] بتن‌هایی با نسبت آب به سیمان ۰/۴، عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم و مقدار ۰/۲، ۲ و ۴ درصد وزن سیمان ماده SRA را به منظور بررسی مهاجرت یون‌ها مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که استفاده از این ماده موجب کاهش سرعت تبخیر آب بتن می‌شود. همچنین مقدار و درجه نفوذ یون کلراید در هنگام حضور این ماده در بتن کاهش پیدا می‌کند. همچنین در بحث جمع‌شدگی برای رطوبت‌های نسبی کمتر از ۴۰ درصد و بیشتر از ۸۰ درصد به دلیل تعادل رطوبت در منافذ بتن، این ماده تأثیر قابل توجهی نداشته و عملکرد بهینه خود را نمی‌تواند ایفا کند. حاتمی و همکاران [۲۰] به بررسی اثر ماده SRA بر مشخصات دوامی بتن توانمند با نسبت آب به سیمان ۰/۳۷ و ۰/۳۱ و عیار سیمان ۴۲۵ و ۵۵۰ کیلوگرم پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند، استفاده از این ماده سبب بهبود مشخصات دوامی می‌شود. همچنین این ماده سبب کاهش انواع جمع‌شدگی و افزایش زمان ترک‌خوردگی می‌گردد و تأثیر آن در نسبت آب به سیمان کمتر و مقدار مواد سیمانی بیشتر بر بتن بیشتر است. جمالی و همکاران [۲۱] اثر زمان عمل‌آوری را بر جمع‌شدگی مقید در حضور یا عدم حضور ماده SRA بررسی کردند و دریافتند در بتن شاهد با افزایش زمان عمل‌آوری پتانسیل ترک‌خوردگی و عرض ترک‌های جمع‌شدگی نیز افزایش می‌یابد؛ درحالی که در بتن حاوی SRA، با افزایش زمان عمل‌آوری، پتانسیل جمع‌شدگی کاهش یافته و عرض ترک‌های ایجادی، تغییر آنچنانی نمی‌کند. Chen و همکاران [۲۲] پژوهشی را با هدف بررسی اثر ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی بر رطوبت نسبی درونی بتن انجام دادند و مشاهده کردند استفاده از این ماده سبب تأخیر در فرآیند هیدراسیون و گیرش اولیه بتن می‌گردد و به علاوه سبب افزایش رطوبت نسبی بتن تا سن ۲۸ روز می‌شود.

همان‌طور که در ادبیات موضوع مشاهده گردید، جمع‌شدگی خصوصاً جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن از جمله مسائل جدی و قابل توجه در روسازی‌های بتنی است که به منظور کنترل آن می‌توان از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی استفاده کرد. از طرفی مطابق مطالعات صورت گرفته، استفاده از ماده SRA تولیدی توسط شرکت‌های مختلف، بر مشخصات مکانیکی و دوامی بتن تأثیرات متفاوتی گذاشته است که نشان‌دهنده نیاز به بررسی این ماده پیش از استفاده در بتن می‌باشد. از طرفی، مطالعه آنچنانی بر روی این ماده در بتن و روسازی بتنی در کشور با هدف حذف و یا افزایش فواصل درزهای طولی و عرضی صورت نپذیرفته است. عدم استفاده از افزودنی‌های جمع‌شدگی تولید داخل با توجه به برقراری شرایط تحریم و عدم امکان واردات و یا هزینه بالای واردات افزودنی‌های مورد نیاز در صنعت بتن و عدم بررسی تأثیر این ماده بر اصطکاک سطحی از دیگر دلایلی است که سبب شد در این پژوهش تأثیر این ماده بر بتن مورد استفاده در روسازی‌های بتنی ارزیابی شود. در صورت قابل قبول بودن عملکرد این ماده در بتن و عدم ایجاد ضعف جدی در عملکرد بتن حاوی این افزودنی، می‌توان از آن در صنعت روسازی به منظور افزایش دوام رویه‌های بتنی، کاهش خرابی‌های ناشی از وجود درز در این رویه‌ها (به دلیل حذف درزها و یا افزایش فاصله بین آن‌ها) و افزایش سرعت اجرای رویه‌های بتنی بهره برد.

۲- برنامه آزمایش‌ها

۲-۱- مشخصات مصالح

سیمان مورد استفاده در این پژوهش، سیمان پرتلند تیپ دو شرکت سیمان تهران می‌باشد که دارای جرم حجمی $۳۱۳۰\ kg/m^3$ می‌باشد. نتایج مربوط به آنالیز شیمیایی در جدول ۱ نشان داده شده است.

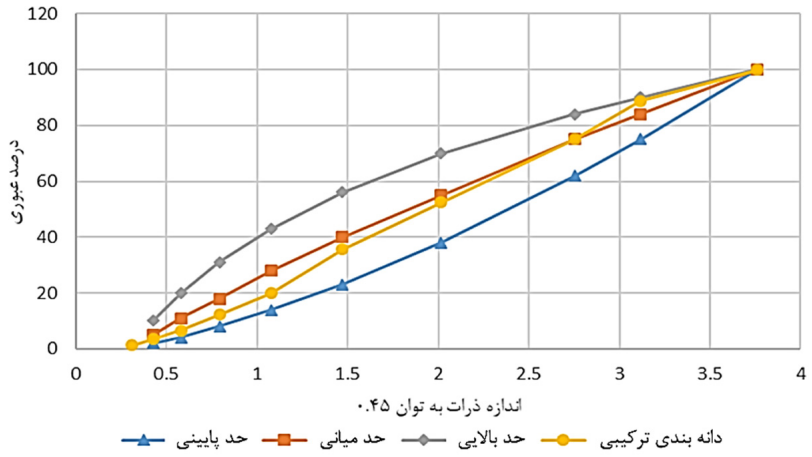
سنگدانه‌های مصرفی در این پژوهش شامل ماسه شکسته با اندازه ۶-۰ میلی‌متر است. همچنین شن استفاده شده از دو نوع شن با ابعاد ۱۲-۶ میلی‌متر و ۱۹-۹/۵ میلی‌متر و از نوع شکسته هستند. دانه‌بندی ترکیبی شامل ۵۵ درصد ماسه، ۲۵ درصد شن ۱۲-۶ و ۲۰ درصد شن ۱۹-۹/۵ می‌باشد. شکل ۱ دانه‌بندی ترکیبی مصالح سنگی با درصدهای ذکر شده را نشان می‌دهد.

آب مصرفی در این پژوهش، آب شرب شهر تهران می‌باشد. به

جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی سیمان

Table 1. Results of Chemical Analysis of Cement

اکسید	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
سیمان (٪)	۲۱/۸۴	۴/۵۶	۳/۵۲	۶۳/۰۱	۳/۶	۱/۷۵	۰/۱۸	۰/۵۳
الزامات استاندارد ۳۸۹	> ۲۰	< ۶	< ۶	-	< ۵	< ۳	-	-
انطباق با استاندارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد



شکل ۱. دانه‌بندی ترکیبی مصالح سنگی مورد استفاده در طرح‌های بتنی

Fig. 1. Grading of aggregates in this research

جدول ۲. مشخصات فوق‌روان‌کننده مصرفی

Table 2. The Properties of Super-plasticizer

نام	پایه	چگالی (gr/cm^3)	درصد مواد فعال
فوق‌روان‌کننده	پلی کربوکسیلات غیریونی	۱/۰۵	٪۳۵

منظور دست‌یابی به اسلامپ مورد نظر، از فوق‌روان‌کننده با مشخصات جدول ۲ استفاده شده است. لازم به ذکر است مقدار اسلامپ مورد نظر در طرح محدوده ۸۰-۶۰ میلی‌متری می‌باشد.

ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی مورد استفاده، ساخت یکی از شرکت‌های داخلی بوده و به میزان ۲ درصد وزن سیمان در بتن مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات افزودنی کاهنده جمع‌شدگی استفاده شده در جدول ۳ آورده شده است:

۲-۲- مشخصات طرح اختلاط نمونه‌ها

مخلوط‌های بتنی براساس طرح مخلوط ملی [۲۳] در دو نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴ ساخته شدند که عیار سیمان در هر دو نسبت ثابت و برابر با ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی به میزان ۲ درصد وزن سیمان مورد استفاده قرار گرفت. علت انتخاب این میزان، بررسی مطالعات پیشین و گزارشات آن‌ها از عملکرد این افزودنی در درصدهای مختلف و پیشنهاد تولید کننده مربوطه بوده است. درصد فوق‌روان‌کننده مصرفی از طریق تکرار آزمایش اسلامپ به منظور قرار گرفتن اسلامپ در محدوده ۸۰-۶۰ میلی‌متر در کلیه طرح‌ها تعیین گردید. علت انتخاب محدوده اسلامپ ذکر شده آن است که در روسازی‌های بتنی اغلب بتن با اسلامپ پایین مورد استفاده قرار

جدول ۳. مشخصات افزودنی کاهنده جمع‌شدگی مورد استفاده در این پژوهش

Table 3. The Properties of Shrinkage-Reducing-Admixture used in this study

نام	پایه	چگالی (gr/cm^3)	درصد مواد فعال
افزودنی کاهنده جمع‌شدگی	پلی پروپیلن گلیکول غیر یونی	۰/۹۶	٪۹۰

جدول ۴. اجزاء مختلف به همراه مقادیر آن‌ها در ساخت طرح‌های مورد مطالعه

Table 4. The Reference Mix Compositions used per cubic meter

ردیف	نام طرح	W/C	سیمان (kg)	شن ۹/۵-۱۹ (kg)	شن ۶-۱۲ (kg)	ماسه (kg)	آب (kg)	فوق‌روان‌کننده (kg)	افزودنی کاهنده جمع‌شدگی (kg)	اسلامپ (mm)
۱	OPC 0.35	۰/۳۵	۴۰۰	۳۷۵/۶	۴۶۹/۵	۱۰۳۲/۸	۱۴۰	۲	۰	۶۸
۲	SRA 0.35	۰/۳۵	۴۰۰	۳۷۵/۶	۴۶۹/۵	۱۰۳۲/۸	۱۴۰	۲	۸	۷۲
۳	OPC 0.4	۰/۴	۴۰۰	۳۶۵/۳	۴۵۶/۶	۱۰۰۴/۶	۱۶۰	۱/۶	۰	۶۵
۴	SRA 0.4	۰/۴	۴۰۰	۳۶۵/۳	۴۵۶/۶	۱۰۰۴/۶	۱۶۰	۱/۶	۸	۷۰

می‌گیرد (محدوده S1 و S2). بنابراین ۴ طرح بتنی در این پژوهش در نظر گرفته شده و مقادیر اجزای مختلف این طرح‌ها در جدول ۴ ارائه شده است که تمامی اعداد در آن بر حسب کیلوگرم در هر متر مکعب بتن ارائه گردیده است. لازم به ذکر است که مقادیر مربوط وزن سنگدانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک[1] (SSD) گزارش شده است، همچنین اسامی مربوط به طرح‌ها از دو قسمت تشکیل شده است، قسمت اول شامل ماده مورد استفاده در آن‌ها است به این صورت که طرح‌های شاهد و افزودنی کاهنده جمع‌شدگی به ترتیب با عناوین OPC و SRA نام گذاری شده‌اند. قسمت دوم نیز بیانگر نسبت آب به سیمان طرح‌های ذکر شده است.

۲-۳- آزمایش‌های انجام گرفته

کلیه آزمایش‌ها برای سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مورد بررسی قرار گرفته‌اند و آزمایش‌های جمع‌شدگی نیز تا سن ۱۰۰ روزه نمونه‌ها ارزیابی شدند.

۲-۳-۱- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری براساس استاندارد ملی به شماره ۳۲۰۶ [۲۴] صورت پذیرفت. ابعاد نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش ۱۰۰*۱۰۰*۱۰۰ میلی‌متر مکعب می‌باشد و نمونه‌ها هنگام قالب‌گیری در دو لایه و هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم می‌شود. تعداد نمونه‌های ساخته شده همچنین باید برای انجام آزمایش سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ کفایت کند (هر طرح ۹ نمونه بتنی مکعبی). نمونه‌ها تا رسیدن به سن آزمایش، در محلول آب اهک اشباع نگهداری شدند.

۲-۳-۲- مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای مطابق با آیین‌نامه ASTM C293 [۲۵] به کمک نمونه‌هایی با ابعاد ۷۵*۷۵*۲۸۵ میلی‌متر مکعب (طول مؤثر نمونه‌های ساخته شده برای قرارگیری در دستگاه

1 Saturated Surface Dry

مقاومت خمشی ۲۲۵ میلی‌متر می‌باشد) انجام می‌گیرد. هر نمونه در دو لایه قالب‌گیری و هر لایه با تعداد ۲۵ ضربه و یا به کمک میز لرزان متراکم گردید. همچنین نرخ بارگذاری برابر با ۱/۲ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد.

۲-۳-۳- مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی براساس استاندارد FM 5-578 [۲۶] صورت پذیرفته است. نحوه اندازه‌گیری به این صورت است که هر نمونه از هر چهار وجه و هر وجه حداقل دوبار به دستگاه متصل شده و مقاومت الکتریکی ویژه اندازه‌گیری می‌شود و در نهایت مقاومت الکتریکی هر نمونه برابر است با میانگین قرائت‌های صورت پذیرفته که در انتهای آزمایش گزارش می‌شود. این استاندارد، مقاومت الکتریکی را به صورت غیر مخرب اندازه‌گیری می‌کند و مهم‌ترین حسن آن در کنار غیر مخرب بودن آزمایش، سرعت مناسب آن است. همچنین پس از تعیین مقاومت الکتریکی ویژه، به کمک جدول زیر می‌توان در مورد میزان نفوذ یون کلراید که از جمله موارد پراهمیت از منظر دوام بتن می‌باشد، اظهارنظر کرد.

۲-۳-۴- اصطکاک سطحی

آزمایش اصطکاک سطحی بر اساس BS_EN 13036-4 [۲۷] به کمک پاندول انگلیسی انجام می‌شود. طول نمونه باید به اندازه‌ای باشد که پاندول بتواند ۱۵/۳ سانتی‌متر از سطح نمونه را جاروب کند. کالیبره کردن دستگاه از ضروریات این آزمایش می‌باشد که در دو مرحله انجام می‌شود. بدین صورت که بدون حضور نمونه، عقربه پس از رها شدن باید روی عدد صفر قرار گیرد و همچنین در صورت حضور مصالح استاندارد که دارای میزان اصطکاک مشخصی است، میزان اصطکاک تعیین شده توسط دستگاه باید صحیح باشد.

۲-۳-۵- جمع‌شدگی آزاد

بررسی جمع‌شدگی آزاد بتن براساس استاندارد ASTM C157 [۲۸] انجام می‌شود. اگر اندازه بزرگترین دانه کمتر از ۲۵ میلی‌متر باشد، می‌توان از نمونه‌ای با ابعاد ۷۵*۷۵*۲۸۵ میلی‌متر مکعب استفاده کرد. بتن مورد نیاز نمونه‌ها در دو لایه تقریباً مساوی درون قالب ریخته می‌شود. نمونه‌ها پس از خارج شدن از قالب، در آب آهک اشباع شده در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۳۰ دقیقه نگهداری می‌شود و پس از آن طول اولیه نمونه به کمک دستگاه مربوطه اندازه‌گیری می‌شود. بعد از قرائت طول اولیه مجدداً نمونه را درون آب آهک اشباع قرار داده تا زمانی که سن نمونه به ۲۸ روز از زمان ساخت برسد. قرائت نمونه مجدد انجام می‌شود و پس از آن، نمونه‌ها به محفظه با رطوبت نسبی ۵۰ درصد و دمای ۲۳ درجه منتقل شده و تغییرات به صورت هفتگی یادداشت می‌شود.

۲-۳-۶- جمع‌شدگی مقید

آزمایش جمع‌شدگی مقید استاندارد ASTM C1581 [۲۹] مورد استفاده قرار گرفته است. قالب نمونه از دو حلقه فولادی داخلی و بیرونی تشکیل شده است که حلقه فلزی داخلی دارای قطر خارجی ۳۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۳ میلی‌متر می‌باشد. همچنین حلقه خارجی دارای قطر داخلی به اندازه ۴۰۵ میلی‌متر بوده و بر روی پایه‌ای که باید از جنس مصالح غیرقابل جذب باشد، قرار می‌گیرند. بتن در دو لایه تقریباً برابر در قالب ریخته می‌شود و به هر لایه توسط

جدول ۵. برآورد میزان نفوذ یون کلراید براساس نتایج ۲۸ روزه آزمایش مقاومت الکتریکی [۲۶]

Table 5. Predicting Ions Penetration based on 28th Electrical Resistance's Results

ردیف	مقدار مقاومت الکتریکی سن ۲۸ روز (kΩ.cm)	میزان نفوذ یون کلراید
۱	<۱۲	زیاد
۲	۱۲-۲۱	متوسط
۳	۲۱-۳۷	کم
۴	۳۷-۲۵۴	خیلی کم
۵	>۲۵۴	ناچیز

شکل ۲. قالب‌های ساخته شده آزمایش جمع‌شدگی مقید پیش از آزمایش (سمت راست) و در حین برداشت داده در طول آزمایش (سمت چپ)

Fig. 2. Specimen mold before test (Right) and molded concrete specimen under Data Acquisition (Left)

جدول ۶. نتایج آزمایش اسلامپ و جرم حجمی بتن

Table 6. Fresh Properties of Mix Compositions (Slump & Density)

ردیف	نام طرح	اسلامپ (mm)	جرم حجمی (kg/m^3)
۱	OPC 0.35	۶۸	۲۳۷۲
۲	SRA 0.35	۷۲	۲۳۶۳
۳	OPC 0.4	۶۵	۲۳۴۴
۴	SRA 0.4	۷۰	۲۳۳۴

میله‌ای با قطر ۱۰ میلی‌متر به تعداد ۷۵ ضربه وارد می‌شود. جزئیات مربوط به انجام آزمایش در استاندارد ذکر شده آورده شده است. قابل ذکر است قالب‌های مربوط به آزمایش جمع‌شدگی مقید در این پژوهش مطابق با استاندارد ساخته شد و عملاً به بخشی از فرآیند پژوهش تبدیل گردید. شکل ۲ قالب‌های ساخته شده در این پژوهش را پیش از آزمایش و در حین آن نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

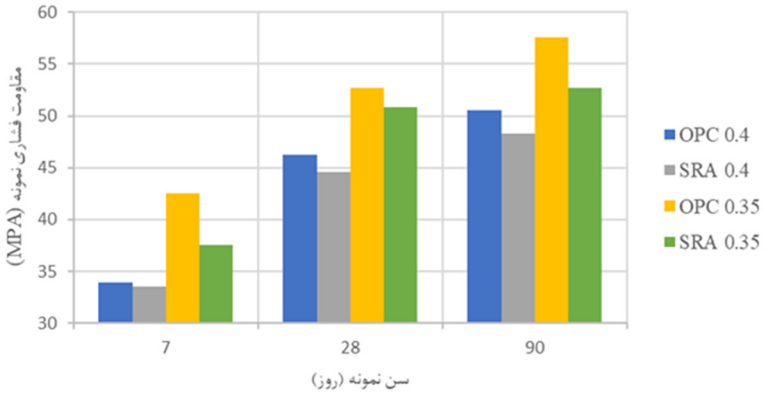
۳-۱- اسلامپ و جرم حجمی بتن تازه

نتایج مربوط به آزمایش اسلامپ و تعیین جرم حجمی بتن تازه در جدول ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییر نسبت آب به سیمان از ۰/۴ به ۰/۳۵، مقدار جرم حجمی بتن افزایش می‌یابد. علت این امر می‌تواند به دلیل افزایش حجم سنگدانه در بتن‌های با نسبت آب به سیمان پایین‌تر باشد. به علاوه با کاهش نسبت آب به سیمان با توجه به ثابت بودن سیمان، میزان آب مصرفی کاهش یافته و بنابراین میزان آب آزاد بتن کاهش می‌یابد که می‌تواند دلیلی دیگر بر این اتفاق باشد. همچنین با کاهش نسبت آب به سیمان، میزان آب مصرفی کاهش می‌یابد و با توجه به مصرف بخش عمده‌ای از آب در فرآیند هیدراسیون سیمان، مقدار اسلامپ کاهش پیدا می‌کند و بنابراین برای رسیدن به اسلامپ مورد نظر باید از مقدار بیشتری فوق‌روان‌کننده استفاده کرد که این اتفاق در طرح اختلاط‌ها قابل مشاهده است.

استفاده از ماده کاهنده جمع‌شدگی موجب تغییرات جزئی در اسلامپ و جرم حجمی بتن شده است و بنابراین این ماده تأثیر آن چنانی بر روانی و کارایی بتن تازه ندارد.

۳-۲- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شده است.



شکل ۳. مقایسه مقاومت فشاری طرح‌های مختلف با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵

Fig. 3. Results of Compressive Strength

نتایج مربوط به میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایش شده در نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵ در شکل ۳ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که انحراف معیار نتایج مقاومت فشاری در کلیه سنین کمتر از ۲ مگاپاسکال می‌باشد

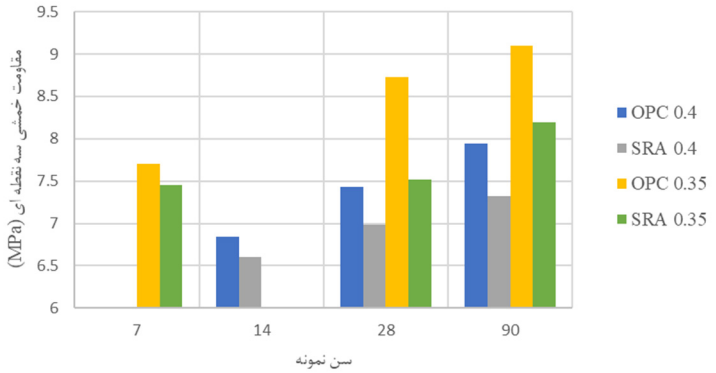
همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت آب به سیمان و ثابت بودن میزان سیمان مصرفی، مقاومت فشاری به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند؛ بطوری‌که در نمونه شاهد مقاومت فشاری ۲۸ روزه با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، چیزی حدود ۱۵ درصد بیشتر از مقاومت فشاری ۲۸ روزه همان نمونه با نسبت آب به سیمان ۰/۴ می‌باشد. در نسبت آب به سیمان پایین‌تر، حجم ناحیه انتقالی و میزان آب آزاد بتن کاهش می‌یابد و حجم سنگدانه‌ها که دارای مدول بیشتری هستند، افزایش می‌یابند. به عبارتی در نسبت آب به سیمان پایین‌تر با توجه به ثابت ماندن حجم سیمان، مقدار آب مصرفی کاهش می‌یابد و در نتیجه آن حجم عمده آب استفاده شده صرف تکمیل فرآیندهای هیدراسیون سیمان شده و از این طریق میزان آب آزاد افزایش می‌یابد و با کم شدن مقدار آب مصرفی، ناحیه انتقالی و ماتریس کاهش می‌یابد.

در نسبت آب به سیمان ۰/۴، ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی موجب کاهش جزئی مقاومت فشاری در سنین مختلف می‌شود. به نحوی که حداکثر کاهش مقاومت فشاری بتن چیزی در حدود ۵ درصد می‌باشد. علت این امر می‌تواند به دلیل تأخیر در فرآیند هیدراسیون باشد. ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی غالباً موجب کاهش قلیایی بودن آب موجود در منافذ شده و فرآیند هیدراسیون را به تأخیر می‌اندازد. با تأخیر در فرآیند هیدراسیون، بتن در مدت زمان بیشتری به مقاومت مورد نظر می‌رسد و تأخیر در فرآیند هیدراسیون به تأخیر در رسیدن به مقاومت فشاری منجر می‌شود. این امر موجب کاهش مقاومت فشاری بتن به وسیله این ماده شده است [۱۶, ۱۷, ۳۰]. در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ نیز استفاده از این ماده به علت ایجاد تأخیر در فرآیند هیدراسیون، تأثیر مشابهی داشته است. لازم به ذکر است در این نسبت آب به سیمان، ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی موجب کاهش بیشتری در میزان مقاومت فشاری بتن شده؛ بطوری‌که حدود ۹ درصد مقاومت فشاری بتن هنگام استفاده از این ماده در طرح اختلاط کاهش یافته است.

۳-۳- مقاومت خمشی سه نقطه ای

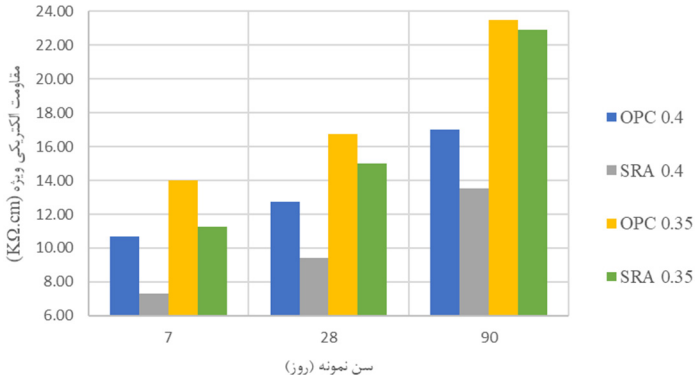
نتایج مرتبط با میانگین مقاومت خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌های آزمایش شده مطابق شکل ۴ می‌باشد. توجه شود که سنین اندازه‌گیری مقاومت خمشی مشابه مقاومت فشاری و سایر آزمایش‌ها، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بود، اما در سن ۷ روزه نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴ به دلیل خراب شدن دستگاه خمشی به ناچار سن اندازه‌گیری این مقاومت از ۷ به ۱۴ تغییر کرد. انحراف معیار نتایج مقاومت خمشی در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ در سنین مختلف کمتر از ۰/۵ مگاپاسکال بدست آمد، درحالی‌که انحراف معیار نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴ در برخی سنین به ۰/۷ مگاپاسکال نیز می‌رسد.

مشابه با مقاومت فشاری، نسبت آب به سیمان از مهم‌ترین پارامترهای مقاومتی بتن محسوب می‌شود، بطوری‌که با افزایش نسبت آب به سیمان میزان مقاومت خمشی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این پژوهش نیز استفاده از نسبت آب به سیمان



شکل ۴. مقایسه مقاومت خمشی طرح‌های مختلف با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵

Fig. 4. Results of Center-Point Flexural Strength



شکل ۵. مقایسه مقاومت الکتریکی طرح‌های مختلف با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵

Fig. 5. Results of Electrical Resistance

۰/۳۵ موجب بهبود مقاومت خمشی بتن شاهد تا میزان حدود ۱۱ درصد در سن ۲۸ روز شده است. علت این امر، می‌تواند به دلیل کاهش حجم ناحیه انتقالی، کاهش میزان آب آزاد بتن و مشارکت اکثر آب مصرفی در فرآیند هیدراسیون، افزایش حجم سنگدانه‌ها که دارای مدول بیشتری هستند و غیره، در نسبت‌های آب به سیمان کمتر باشد.

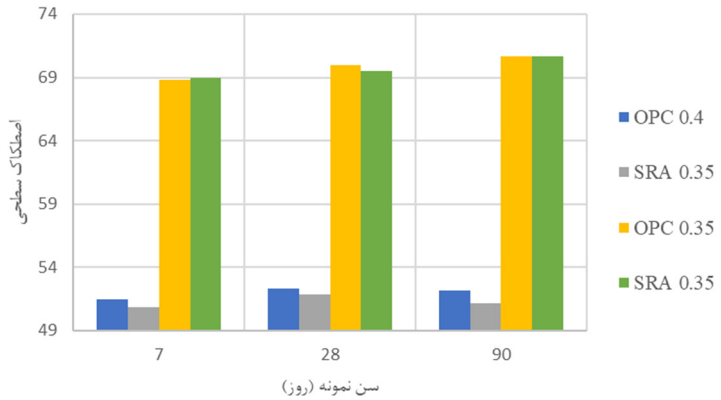
همچنین مشابه با مقاومت فشاری، با استفاده از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی، کاهش مقاومت خمشی گزارش شد. همان‌طور که پیشتر نیز اشاره گردید، افزودنی کاهنده جمع‌شدگی موجب تأخیر در فرآیند هیدراسیون شده که به صورت مستقیم بر مقاومت خمشی اثر گذاشته و موجب کاهش بزرگی آن می‌شود [۱۶, ۱۷, ۳۰].

۳-۴- مقاومت الکتریکی

میانگین نتایج مربوط به مقاومت الکتریکی نمونه‌های ساخته شده به تفکیک نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵ با انحراف معیار کمتر از ۱ کیلواُهم-سانتی متر در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که با کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت الکتریکی بهبود می‌یابد. علت این امر می‌تواند در کاهش میزان آب آزاد بتن (که در واکنش هیدراسیون سیمان موجود در بتن شرکت نمی‌کند و به بیانی دیگر اضافی است) و کاهش بخش خمیری آن باشد.

همچنین استفاده از ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی موجب کاهش مقاومت الکتریکی بتن شده است. تأخیر در فرآیند هیدراسیون از دلایل اصلی این اتفاق می‌باشد که پیشتر به آن اشاره شد [۱۷]. از دیگر دلایل وقوع این پدیده می‌تواند افزایش حضور یون‌ها با افزودن این ماده باشد که سبب افزایش رسانایی بتن شده و مقاومت الکتریکی را از این طریق کاهش می‌دهد [۱۸]. با این حال با افزایش سن نمونه‌ها این اختلاف کاهش می‌یابد.

توجه شود که مقاومت الکتریکی به خودیِ خود در روسازی‌های



شکل ۶. مقایسه آزمایش پاندول انگلیسی طرح‌های مختلف با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵

Fig. 6. Results of Skid Resistance

بتنی از اهمیت کمتری نسبت به آزمایش‌های مکانیکی برخوردار است. اما از آنجایی که یکی از شاخص‌های نشان‌دهنده مباحث دوامی بتن می‌باشد، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. همچنین مقاومت الکتریکی با استاندارد بررسی شده، امکان برآورد از میزان نفوذ یون کلراید که از منظر دوامی حائز اهمیت است را فراهم می‌سازد. به همین دلیل این آزمایش در این مطالعات مورد توجه قرار گرفت.

۳-۵- اصطکاک سطحی

نتایج مربوط به تعیین زبری سطح رویی (ماله کشیده شده) به کمک دستگاه پاندول انگلیسی اندازه‌گیری شده و به صورت مقدار آزمایش پاندول[1] (PTV) ارائه گردیده است که هرچه این عدد بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده لغزش کمتر و مطلوبیت بیشتر روسازی از منظر اصطکاک سطحی است. شکل ۶ نتایج مربوط به میانگین این داده‌های این آزمایش را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج بدست آمده در دو نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵، مشاهده می‌شود که در هر دو طرح با کاهش نسبت آب به سیمان، مقدار PTV افزایش می‌یابد که به معنای بهبود مقاومت اصطکاکی و افزایش ضریب اصطکاک سطحی بتن است. علت این امر می‌تواند به دلیل کاهش حجم خمیر بتن و افزایش سنگدانه‌ها باشد. در این حالت حجم ماتریس موجود، کاهش می‌یابد و ماتریس نمی‌تواند به طور کامل اطراف سنگ‌دانه‌ها را بپوشاند و نتیجه این امر افزایش زبری سطح اجرا شده‌ی بتن و افزایش میزان اصطکاک سطحی آن است.

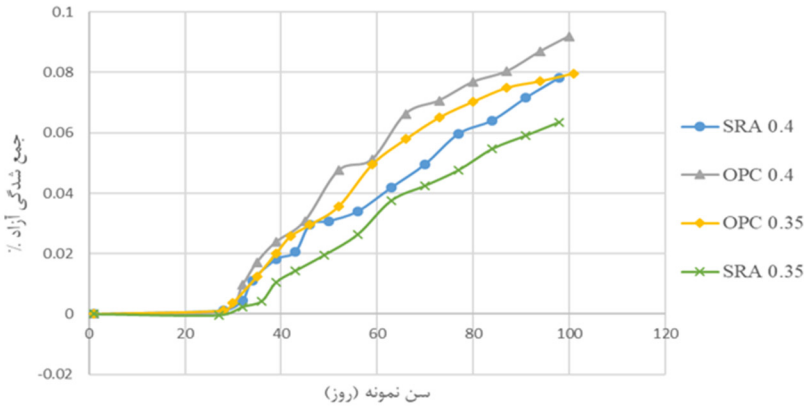
با توجه به شکل ۶ نمی‌توان ارتباط مشخصی بین استفاده از ماده SRA و اصطکاک سطحی استخراج نمود. زیرا از طرفی این ماده در برخی مواقع موجب بهبود و در برخی مواقع موجب ضعف در اصطکاک سطحی شده است و از طرفی دیگر تأثیر آن در سنین مختلف متفاوت است.

اصطکاک روسازی تا حد قابل توجهی به اجرای آن توسط ماشین آلات راهسازی و سطح اجرا شده بستگی دارد. از دیگر عوامل مؤثر بر اصطکاک سطح روسازی، نوع و میزان سنگدانه‌ها و میزان زبری آنان است. نسبت آب به سیمان و حجم خمیر سیمان بر این پارامتر تأثیر می‌گذارد.

۳-۶- جمع‌شدگی آزاد

جمع‌شدگی آزاد نیز در دو نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵ اندازه‌گیری شده و میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده در شکل ۷ قابل مشاهده است. با بررسی این شکل می‌توان دریافت که استفاده از ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی موجب کاهش جمع‌شدگی آزاد ناشی از خشک شدن می‌گردد. همان‌طور که پیشتر اشاره گردید، ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی با حضور در لوله‌های مویین، میزان تنش کششی وارد شده به دیواره‌های این لوله‌ها را کاهش داده و از این طریق سبب کاهش جمع‌شدگی در بتن می‌گردد. همچنین کاهش کشش سطحی آب، تأخیر در وقوع بیشینه فشار درون حفره‌ای و کاهش فعل و انفعالات از دیگر اتفاقاتی است که در حضور ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی در بتن به وقوع می‌پیوندد [۱۱, ۱۲, ۱۴, ۱۷, ۳۱].

1 Pendulum test value



شکل ۷. مقایسه جمع‌شدگی آزاد طرح‌های مختلف با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵

Fig. 7. Results of Free Shrinkage (Length change test)

این ماده موجب کاهش جمع‌شدگی آزاد در حدود ۱۰ درصد در نسبت آب به سیمان ۰/۴ شده است. همچنین در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، استفاده از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی سبب کاهش جمع‌شدگی آزاد تا حدود ۵۰ درصد در سنین اولیه و حدود ۱۵ درصد در سنین بالاتر (۹۰ روز) شده است.

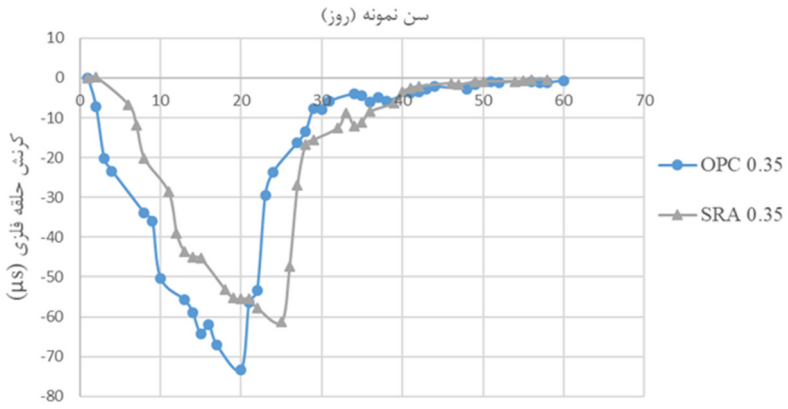
همچنین با مقایسه نتایج مربوط به دو نسبت آب به سیمان که در شکل ۷ نمایش داده شده است، مشاهده می‌شود با استفاده از بتن‌های با نسبت آب به سیمان بالاتر، میزان جمع‌شدگی افزایش می‌یابد. علت افزایش جمع‌شدگی با افزایش نسبت آب به سیمان آن است که با افزایش این پارامتر، میزان تخلخل بتن افزایش می‌یابد و بنابراین فرآیند جمع‌شدگی با شدت بیشتری صورت می‌پذیرد. همچنین کاهش حجم خمیر سیمان و افزایش حجم سنگدانه‌ها می‌توانند از علل دیگر وقوع این پدیده باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی در نسبت آب به سیمان ۰/۴، توانسته است اثر افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۵ به ۰/۴ را جبران نماید.

موارد فوق نشان می‌دهد که علاوه بر کاهش نسبت آب به سیمان (به دلیل کاهش حجم خمیر و کاهش تخلخل) که موجب کاهش میزان جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن می‌شود، استفاده از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی نیز مفید بوده و در برخی مواقع حتی تأثیر مطلوب‌تری نسبت به کاهش نسبت آب به سیمان بر روی جمع‌شدگی آزاد ناشی از خشک شدن از خود نمایش می‌دهند.

۳-۷- جمع‌شدگی مقید

آزمایش جمع‌شدگی مقید به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی (کمبود تعداد قالب‌های جمع‌شدگی به دلیل ساخت و راه‌اندازی خاص و تجهیزات مورد نیاز)، فقط بر روی نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ انجام گردید. شکل ۸ نتایج مربوط به آزمایش جمع‌شدگی مقید را برای طرح‌های شاهد و حاوی SRA نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که بتن شاهد در سن ۲۰ روزه ترک خورده است که با مشاهده چشمی نیز این نتیجه مورد تأیید بود. همچنین حداکثر کرنش حلقه فلزی حدود μs۷۵ بوده که در سنین گفته شده به وقوع پیوسته است. در این سن با ترک‌خوردگی کامل بتن، کرنش به صورت ناگهانی کاهش می‌یابد و در ادامه به صورت محدود نوسان می‌کند. علت این امر آن است که با ترک خوردن بتن، به ناگاه تنش ناشی از پدیده جمع‌شدگی روی حلقه فلزی برداشته می‌شود و در ادامه جمع‌شدگی موجب افزایش عرض ترک و دور شدن دیواره‌های آن می‌شود.

همچنین استفاده از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی سبب شده سن بروز اولین ترک در بتن، تا سن ۲۷ روز افزایش پیدا کند. ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی باعث ایجاد تأخیر در رسیدن تنش‌های کششی داخلی بتن به حداکثر تنش مجاز کششی می‌شود و از این طریق زمان به ایجاد اولین ترک به تأخیر می‌افتد. همچنین مقدار تنش اعمال شده به حلقه فلزی بتن حاوی این ماده همچون بتن شاهد پس از ترک‌خوردگی، به سرعت کاهش می‌یابد و در محدوده جزئی



شکل ۸. کرنش حلقه فلزی طرح‌های بتنی در آزمایش جمع‌شدگی مقید

Fig. 8. Results of Restrained Shrinkage (strain induced in steel ring)

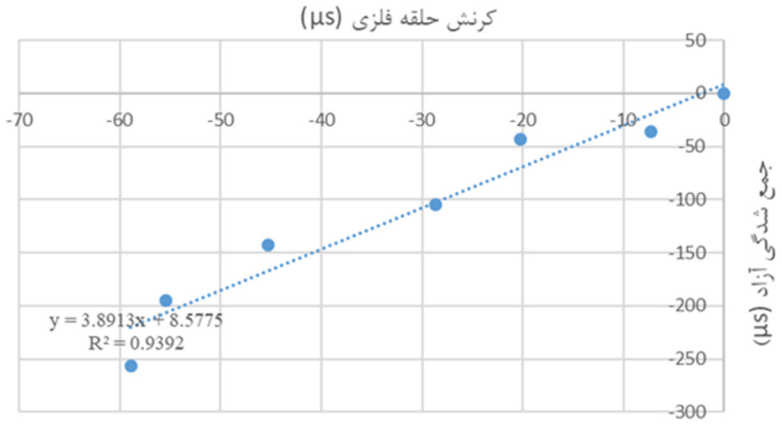
شکل ۹. نمونه‌ای از تصاویر تهیه شده به منظور تعیین عرض ترک (بتن شاهد در سن ۶۰ روز)

Fig. 9. Image of OPC Concrete in order to evaluate Crack width

جای می‌گیرد که علت آن مشابه مطالب ارائه شده در قسمت بتن شاهد است.

یکی دیگر از مطالبی که در شکل ۸ خود را نمایش می‌دهد، عملکرد مطلوب افزودنی کاهنده جمع‌شدگی در بتن از منظر جمع‌شدگی مقید می‌باشد. این ماده نه تنها موجب کاهش بزرگی جمع‌شدگی به وقوع پیوسته شده، بلکه سن ترک‌خوردگی را افزایش داده است. ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی سبب کاهش تنش‌های کششی در لوله‌های مویین می‌گردد، به علاوه از طریق کاهش نرخ تبخیر، فشار جداکننده و کشش سطحی آب به کاهش تنش کششی دامن می‌زند [۱۱, ۱۲, ۱۴, ۱۷, ۳۱]. با توجه به دلایل ارائه شده، بزرگی تنش‌های اعمالی ناشی از جمع‌شدگی به حلقه فلزی در بتن حاوی این ماده کاهش می‌یابد که نتیجه آن از طریق کاهش کرنش حلقه فلزی نمود پیدا می‌کند. همان‌طور که پیشتر اشاره گردید، به دلیل کاهش نرخ رشد تنش کششی ناشی از پدیده جمع‌شدگی، سن وقوع اولین ترک در بتن به تعویق می‌اُفتد. کاهش دمای اولیه بتن در حضور افزودنی کاهنده جمع‌شدگی می‌تواند از دیگر دلایل این تأخیر باشد [۳۲]. به علاوه این عامل موجب کاهش نرخ جمع‌شدگی در سنین اولیه بتن می‌شود که با شکل ۸ مطابقت دارد.

همچنین با انتقال تصاویر تهیه شده به نرم‌افزار Autocad و مقیاس کردن آن‌ها عرض ترک‌ها با دقت قابل قبولی (صدم میلی‌متر) تعیین گردید (شکل ۹). بر همین اساس، نمونه شاهد در سن ۶۰ روز دارای ترکی به عرض ۰/۷۸ میلی‌متر بود، در حالی که عرض ترک در نمونه‌های بتن حاوی افزودنی کاهنده جمع‌شدگی ۰/۴۵ میلی‌متر برآورد شد که حاکی از تأثیر مطلوب این ماده بر کنترل ترک‌های



شکل ۱۰. ارتباط بین جمع‌شدگی‌های مقید و آزاد

Fig. 10. Relationship between Free & Restrained Shrinkage

ناشی از جمع‌شدگی بتن است. کاهش تنش‌های کششی در لوله‌های مویین در کنار کاهش نرخ تبخیر، فشار جداکننده و کشش سطحی آب که به کاهش تنش کششی دامن می‌زنند، می‌توانند از علل کاهش عرض ترک‌ها باشند [۱۱, ۱۲, ۱۴, ۱۷, ۳۱].

با توجه به داده‌های جمع‌شدگی آزاد و مقید اندازه‌گیری شده در پژوهش و محدودیت‌های موجود در انجام آزمایش جمع‌شدگی مقید (از منظر نیاز به قالب‌های مخصوص)، به منظور تعیین تقریبی جمع‌شدگی مقید براساس داده‌های موجود، نمودار برازش یافته‌ای مطابق با شکل ۱۰ تهیه شده که به کمک آن مقادیر جمع‌شدگی مقید را می‌توان با داشتن مقادیر جمع‌شدگی آزاد به طور تقریبی برآورد کرد. لازم به ذکر است که دو طرح شاهد و حاوی افزودنی کاهنده جمع‌شدگی در این نمودار ادغام شده و بنابراین استفاده از این نمودار به حضور یا عدم حضور SRA وابسته نیست. همچنین کرنش حلقه فلزی، پس از ترک‌خوردگی بتن به کمک این نمودار قابل تخمین نمی‌باشد.

به منظور تعیین $R^2\text{-}Adjusted$ از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$R^2 - Adjusted = 1 - \left[\left(1 - R^2\right) \times \left(N - 1\right)\right] / \left(N - P - 1\right) = 0.929 \quad (۱)$$

که در آن N تعداد مشاهدات و P تعداد متغیرها می‌باشد. با توجه به میزان R^2 و $R^2\text{-}Adjusted$ می‌توان نتیجه گرفت که پیش‌بینی‌های حاصل از این نمودار در حد قابل قبول می‌باشد که علت آن، هم‌جنس بودن آن‌ها و عملکرد مشابه بتن در هر دو آزمایش می‌باشد.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر افزودنی کاهنده جمع‌شدگی بر روی بتن‌های مورد استفاده در روسازی‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از این مواد موجب تغییراتی در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن تا سن ۹۰ روز (مورد بررسی در این پژوهش) گردید که نتایج ذیل بر روی این خواص قابل ارائه می‌باشد.

- استفاده از افزودنی کاهنده جمع‌شدگی تأثیر آن‌چنانی بر میزان اسلامپ و خصوصیات سنین اولیه مخلوط بتنی بررسی شده ندارد.
- مقاومت فشاری و خمشی بتن حاوی ماده SRA در هر دو نسبت آب به سیمان، نسبت به نمونه شاهد کمتر است که این کاهش به ترتیب برای مقاومت فشاری و خمشی به صورت تقریبی ۱۰ و ۱۵ درصد می‌باشد. علت اُفت در مقاومت فشاری می‌تواند تأخیر در فرآیند هیدراسیون بتن در حضور این ماده باشد.
- مقاومت الکتریکی بتن حاوی ماده SRA کاهش یافته است که دلیل آن می‌تواند تأخیر در فرآیند هیدراسیون و افزایش میزان یون‌های موجود در بتن باشد. میزان کاهش مقاومت در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴ به ترتیب حدود ۱۵ و ۲۵ درصد می‌باشد.
- همچنین تأثیر استفاده از ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی بر ضریب اصطکاک سطحی، متغیر بوده و نمی‌توان بر اساس نتایج این پژوهش به اجماع مشخصی رسید.
- ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی به صورت مؤثری موجب کاهش میزان جمع‌شدگی آزاد در بتن گردیده است (حدود ۱۲

درصد). علت وقوع این پدیده، کاهش کشش سطحی آب درون لوله‌های مویین توسط ماده SRA می‌باشد.

- افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۵ به ۰/۴ موجب افزایش مقدار جمع‌شدگی آزاد در بتن شده است که علت آن افزایش میزان آب و تخلخل بتن می‌باشد. استفاده از ماده SRA به میزان ذکر شده در این پژوهش توانست اثر افزایش نسبت آب به سیمان را در افزایش جمع‌شدگی آزاد به صورت قابل قبولی جبران نماید.

- افزودنی کاهنده جمع‌شدگی موجب کاهش حدود ۲۰ درصدی بزرگی کرنش‌های ثبت شده در حلقه فلزی گردیده است. همچنین استفاده از این ماده، زمان وقوع اولین ترک در بتن را نسبت به بتن شاهد به میزان ۸ روز به تأخیر انداخته است. از علل وقوع این پدیده می‌توان به کاهش نرخ تبخیر، کاهش دمای بتن در سنین اولیه، کاهش فعل و انفعالات و کشش سطحی لوله‌های مویین اشاره کرد.

- با بررسی تصاویر گرفته شده و انتقال آنها به نرم‌افزار Autocad به سادگی می‌توان دریافت که حضور ماده SRA موجب کاهش حدود ۴۲ درصدی عرض ترک در بتن شده است. کاهش کشش سطحی درون منافذ در حضور ماده SRA از جمله عوامل وقوع این پدیده‌اند.

با توجه به نتایج فوق مشاهده می‌گردد، ماده افزودنی کاهنده جمع‌شدگی استفاده شده در این پژوهش، تأثیر قابل قبولی در کاهش انواع جمع‌شدگی‌ها و عرض ترک دارد و بتن را از منظر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی را دچار مشکل جدی نمی‌کند، لذا استفاده از این مواد در روسازی می‌تواند منافع زیادی از جمله افزایش طول عمر و بهبود عملکرد بتن روسازی را تأمین نماید. همچنین نتایج این پژوهش در کنار مطالعات میدانی (خصوصاً در پروژه آزادراه تهران-شمال) می‌تواند در بهبود عملکرد روسازی‌های بتنی کشور با مصالح و افزودنی‌های داخلی بسیار مفید و مؤثر باشد.

پیشنهاد مطالعات آتی

۱- بررسی اثر ماده بررسی شده بر روی یک دال روسازی و در ابعاد واقعی و انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی (از جمله مقاومت فشاری، خمشی، کششی و مدول الاستیسیته) بر روی نمونه آزمایشگاهی و دال واقعی

۲- بررسی اثر و اندرکنش فوق‌روان‌کننده بر نتایج حاصل از حضور افزودنی کاهنده جمع‌شدگی در بتن

۳- بررسی نسبت‌های مختلف آب به سیمان متفاوت و درصدهای مختلف افزودنی کاهنده جمع‌شدگی و همچنین انجام آزمایش‌های ریزساختار (از قبیل SEM و XRD) به منظور تعیین عملکرد دقیق این ماده در بتن

مراجع

[1] R.A. Embacher, M.B. Snyder, Life-cycle cost comparison of asphalt and concrete pavements on low-volume roads; case study comparisons, Transportation research record, 1749(1) (2001) 28-37.

[2] UoS (University of Sheffield), Thin wire reinforcement for concrete, Br Patent Application, No 0130852.7 & 0511012.7 (2005).

[3] D. Mostofinejad, Reinforced Concrete Structure, Arkan-e Danesh publication, Volume 1 (2017) (in Persian).

[4] Committee of concrete chemical additives, iran concrete Institute, the application of chemical additives in concrete, yazda publication (2014) (in Persian).

[5] J. Zhang, V.C. Li, Influences of fibers on drying shrinkage of fiber-reinforced cementitious composite, Journal of engineering mechanics, 127(1) (2001) 37-44.

[6] S.H. Kwon, S.P. Shah, Prediction of early-age cracking of fiber-reinforced concrete due to restrained shrinkage, ACI Materials Journal, 105(4) (2008) 381.

[7] Y.H. Huang, Pavement Analysis and Design, second ed., Pearson Prentice Hall, 2004.

[8] .M. Ruiz, R.O. Rasmussen, G.K. Chang, J.C. Dick, P.K. Nelson, Computer-based guidelines for concrete pavements, volume II: design and construction guidelines and HIPERPAVE II user's manual, Federal Highway Administration, FHWA–HRT–04–122 (2005).

[9] C.J. Lee, D.A. Lange, Y.S. Liu, Prediction of moisture curling of concrete slab, Materials and structures, 44(4) (2011) 787-803.

[10] Y. Jane Jiang, S.D. Tayabji, Mechanistic evaluation of test data from long-term pavement performance jointed plain concrete pavement test sections, Transportation research record, 1629(1) (1998) 32-40.

Evaluation, 46(1) (2017) 141-150.

[21] A. Bagheri, A. Jamali, M. Pourmir, H. Zanganeh, The Influence of Curing Time on Restrained Shrinkage Cracking of Concrete with Shrinkage Reducing Admixture, Advances in Civil Engineering Materials, 8(1) (2019) 596-610.

[22] S. Chen, H. Zhao, Y. Chen, D. Huang, Y. Chen, X. Chen, Experimental study on interior relative humidity development in early-age concrete mixed with shrinkage-reducing and expansive admixtures, Construction and Building Materials, 232 (2020) 117204.

[23] Building and housing research center, The national Method for concrete mix design, BHRC Publication, No. S-479 (2008) (in Persian).

[24] ISIRI 3206, Concrete-Determination of compressive strength of test specimens, Institute of standards and Industrial research of Iran (1992) (in Persian).

[25] ASTM C293, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading), ASTM international, (2016).

[26] FM5-578, Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability, Florida Department of Transportation, (2004).

[27] BS-EN 13036-4, Road and airfield surface characteristics. Test methods. Method for measurement of slip/skid resistance of a surface: The pendulum test, Slovak: Povrchové vlastnosti vozoviek. Skúšobné metódy. Časť, 4, (2011).

[28] ASTM C157, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, ASTM international, (2014).

[29] ASTM C1581, Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage, ASTM international, (2016).

[30] J. Saliba, E. Rozière, F. Grondin, A. Loukili, Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage, Cement and Concrete Composites, 33(2) (2011) 209-217.

[31] P. Lura, B. Pease, G.B. Mazzotta, F. Rajabipour, J.

[11] P.K. Mehta, P.J. Monteiro, Concrete microstructure, properties and materials, third ed., McGraw-Hill, 2017.

[12] M.J. Rosen, J.T. Kunjappu, Surfactants and Interfacial Phenomena, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, (2012).

[13] L. Maia, H. Figueiras, S. Nunes, M. Azenha, J. Figueiras, Influence of shrinkage reducing admixtures on distinct SCC mix compositions, Construction and Building Materials, 35 (2012) 304-312.

[14] J. Mora-Ruacho, R. Gettu, A. Aguado, Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete, Cement and Concrete Research, 39(3) (2009) 141-146.

[15] .J. Lee, Y.Y. Kim, Durability of latex modified concrete mixed with a shrinkage reducing agent for bridge deck pavement, International Journal of Concrete Structures and Materials, 12(1) (2018) 23.

[16] T. Deboodt, T. Fu, J.H. Ideker, Evaluation of FLWA and SRAs on autogenous deformation and long-term drying shrinkage of high performance concrete, Construction and Building Materials, 119 (2016) 53-60.

[17] Y. Wehbe, A. Ghahremaninezhad, Combined effect of shrinkage reducing admixtures (SRA) and superabsorbent polymers (SAP) on the autogenous shrinkage, hydration and properties of cementitious materials, Construction and Building Materials, 138 (2017) 151-162.

[18] W. Zuo, P. Feng, P. Zhong, Q. Tian, J. Liu, W. She, Effects of a novel polymer-type shrinkage-reducing admixture on early age microstructure evolution and transport properties of cement pastes, Cement and Concrete Composites, 95 (2019) 33-41.

[19] C. Qiao, W. Ni, J. Weiss, Transport due to diffusion, drying, and wicking in concrete containing a shrinkage-reducing admixture, Journal of Materials in Civil Engineering, 29(9) (2017) 04017146.

[20] B. Hatami, A.M. Ramezanianpour, A.S. Daryan, Investigation on the Effect of Shrinkage Reducing Admixtures on Shrinkage and Durability of High-Performance Concrete, Journal of Testing and

Weiss, Influence of shrinkage-reducing admixtures on development of plastic shrinkage cracks, ACI materials journal, 104(2) (2007) 187.

[32] T.F. Yuan, S.K. Kim, K.T. Koh, Y.S. Yoon, Synergistic benefits of using expansive and shrinkage reducing admixture on high-performance concrete, Materials, 11(12) (2018) 2514.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Gholami, F. Moghadas Nejad, A.A. Ramezanianpour, A.M. Ramezanianpour, The Effect of Shrinkage Reducing Admixture on the Behavior of Concrete used in Concrete Pavements, Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 2921-2936.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17542.6600