Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 52(1) (2020) 59-62
DOI: 10.22060/ceej.2018.14591.5691

Evaluation of mixing time and mixing speed on the Rheological Properties of Self-Consolidating Concrete

P. Ghoddousi, A.A. Shirzadi Javid*, S. Aghajani
School of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: Due to the composition, the production of self-consolidating concrete (SCC) requires more mixing energy to uniform and homogenize the concrete components. This limits the rate of concrete production in comparison with the conventional concrete and therefore it is an important financial factor. So, mixing energy (mixing time and power) is one of the main factors in concrete production and before large production, the appropriate mixing time and speed should be determined for each mixture. In this study, according to objectives and considering that mixing time and mixing speed are two main factors in content of mixing energy and according to guidelines and regulations, two SCC mix designs (powder type and VMA type) were mixed in three mixing times (3, 8 and 11 minutes) and each of them in two mixing speeds (20 and 40 rpm) and their effect on rheological properties was evaluated. The results showed that in each series of mixtures by increasing the mixing time up to a certain level that is called stabilization time (the shortest mixing time) and in this study is 8 minutes, the workability of concrete increased and after that, by mixing up to 11 minutes it decreased by 6 percent. Static yield stress in the 8 minutes mixing also had a minimum amount and by mixing up to 11 minutes it increased by 42 percent. This increment reached 62 percent for dynamic yield stress, so the rheology tests also confirmed these results.

Review History:
Received: 6/11/2018
Revised: 7/17/2018
Accepted: 8/5/2018
Available Online: 8/15/2018

Keywords:
Mixing time
Mixing speed
Mixing energy
Self-consolidating concrete
Stabilization time

1. INTRODUCTION

The performance of concrete depends on its microstructure, like all materials. Its microstructure is determined by some parameters like the mixing method and mixer conditions used for concrete production. A sufficient degree of mixing and a required mixing time are important technical and economical aspects in the production of SCC [1-3].

To determine the best-suited mixing method for a special application process, the main considered factor is the quality of the produced concrete. This quality is provided by the performance of the concrete and by the homogeneity of the mixture after mixing. The efficiency parameters of a mixer are affected by the order in which the various constituents of the concrete are introduced into the mixer, the type of mixer, and the mixing energy (power and duration) used [4-9].

2. METHODOLOGY

In this study, according to the fact that mixing time and mixing speed are two main factors in content of mixing energy and according to guidelines and regulations, two SCC mixture types (powder type and VMA type) were designed and mixed in three mixing times (3, 8 and 11 minutes) and each of them in two mixing speeds (20 and 40 rpm) and their effects on rheological properties were evaluated.

*Corresponding author's email: shirzad@iust.ac.ir

3. RESULTS AND DISCUSSION

The results of workability tests are presented in Table 1. According to the results, the best-suited mixing situation happened when the mixing time was 8 minutes and the mixing speed was 40 rpm.

Rheological properties were separately studied by rheology tests. These results also followed the workability tests results.

The effects of the mixing time on the plastic viscosity are shown in Figure 1. According to Figure 1, it was found that in a set of mixtures with three mixing times, the maximum viscosity was related to the mixing time of 8 minutes. In this chart, taking into account the mixing time of 8 minutes, reducing the mixing time to 3 minutes, the plastic viscosity was decreased by 16% and with increasing the time of mixing up to 11 minutes, decreases by 10%. The results are in accord with the previous findings [10-13].

4. CONCLUSIONS

In this study, the effects of mixing time and mixing speed on workability and rheological properties were evaluated. And the results are as followed:

– In each type of mixtures, by increasing the mixing time over to a certain level which is called stabilization time (the shortest needed mixing time and in this study is 8 minutes), the workability of concrete mixtures increased and after that by mixing time of 11 minutes it decreased by 6 percent.

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. Workability tests results

Mixing speed (rpm)	Mixing time (min)	T_{50} (s)		J ring (mm)		J ring diameter		V funnel (s)		VSI	
		Powder type mix	VMA type mix	Powder type mix	VMA type mix	Powder type mix	VMA type mix	Powder type mix	VMA type mix	Powder type mix	VMA type mix
	3	3.47	5.00	8.75	10.00	610	625	11.49	12.10	1	0
20	8	3.00	3.03	7.50	6.25	660	660	11.05	11.37	0	1
	11	3.57	2.31	8.75	12.50	650	660	11.76	10.33	1	1
	3	2.00	2.35	5.00	7.50	670	670	9.53	10.77	0	0
40	8	2.00	2.00	3.00	5.00	710	700	9.10	10.14	0	0
	11	2.00	3.57	17.50	11.25	590	640	9.93	11.61	1	2

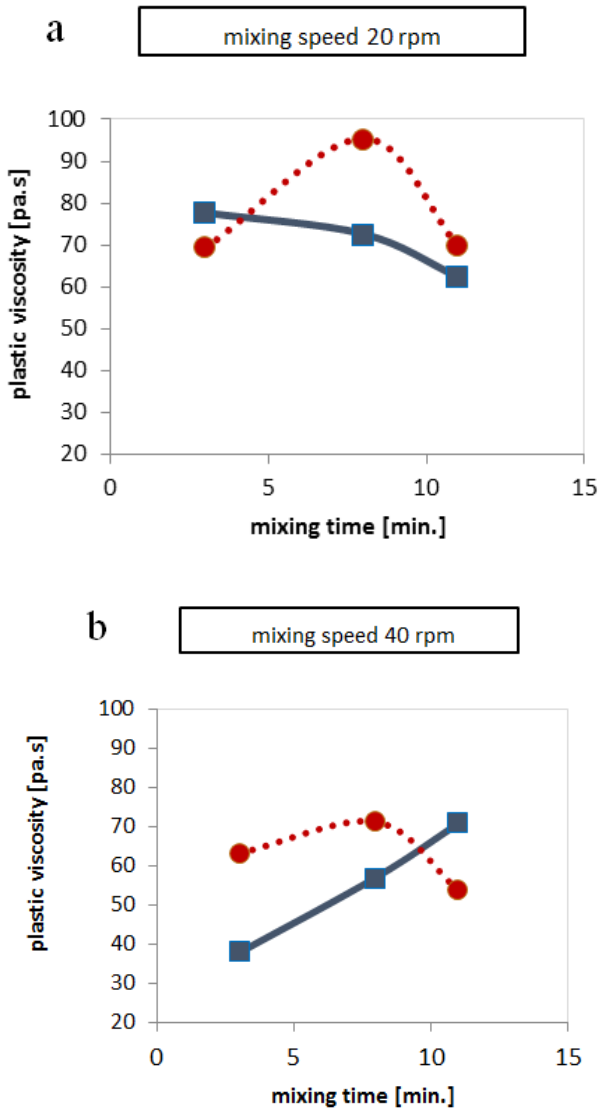


Fig. 1. The effect of mixing time on plastic viscosity (a): mixing speed is 20 rpm, (b): mixing speed is 40 rpm

- Static yield stress in the 8 minutes of mixing had the minimum amount and by mixing time of 11 minutes, it increased by 42 percent.

- This increment touched 62 percent for Dynamic yield stress, so the rheology tests also confirm workability test results.

- By increasing mixing speed from 20 rpm to 40 rpm, an average increase of 5% happened for slump flow and 8% for static yield stress.

REFERENCES

[1] Ferraris, C.F., Concrete mixing methods and concrete mixers: state of the art. Journal of research of the National Institute of Standards and Technology, 2001. 106(2): p. 391.

[2] Chopin, D., F. de Larrard, and B. Cazacliu, Why do HPC and SCC require a longer mixing time? Cement and Concrete Research, 2004. 34(12): p. 2237-2243.

[3] Chopin, D., et al., Monitoring of concrete homogenisation with the power consumption curve. Materials and Structures, 2007. 40(9): p. 897-907.

[5] Schiessl, P., O. Mazanec, and D. Lowke, SCC and UHPC—effect of mixing technology on fresh concrete properties. Advances in Construction Materials 2007, 2007: p. 513-522.

[6] De Larrard, F., Concrete mixture proportioning: a scientific approach. 1999: CRC Press.

[7] Lowke, D. and P. Schiessl. Effect of mixing energy on fresh properties of SCC. in Proceedings of the 4th international RILEM symposium on self-compacting concrete, Chicago, USA. 2005.

[8] Mazanec, O., D. Lowke, and P. Schießl, Mixing of high performance concrete: effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time. Materials and structures, 2010. 43(3): p. 357-365.

[9] Dils, J., G. De Schutter, and V. Boel, Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: a review. Materials and structures, 2012. 45(11): p. 1673-1683.

[10] Asghari, A.A., et al., Which parameters, other than the water content, influence the robustness of cement paste with SCC consistency? Construction and Building Materials,

2016. 124: p. 95-103.
[11] Rupnow, T.D., et al., Improving portland cement concrete mix consistency and production rate through two-stage mixing. 2007.
[12] Kostrzanowska-Siedlarz, A. and J. Gołaszewski, Rheological properties of High Performance Self-Compacting Concrete: Effects of composition and time. Construction and Building Materials, 2016. 115: p. 705-715.
[13] Nehdi, M. and S. Al-Martini, Coupled effects of high temperature, prolonged mixing time, and chemical admixtures on rheology of fresh concrete. Materials Journal, 2009. 106(3): p. 231-240.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

P. Ghoddousi , A.A. Shirzadi Javid, S. Aghajani, Evaluation of Mixing Time and Speed on the Rheological Properties of Self-Consolidating Concrete, Amirkabir J. Civil Eng., 52(1) (2020) 59-62.

DOI: 10.22060/ceej.2018.14591.5691

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۲ شماره ۱، سال ۱۳۹۹، صفحات ۲۴۳ تا ۲۵۶
DOI: 10.22060/ceej.2018.14591.5691

بررسی اثر زمان و سرعت مخلوط کردن بر خواص رئولوژی بتن خودتراکم

پرویز قدوسی، علی اکبر شیرزادی جاوید* ، صدف آقاجانی

دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

خلاصه: ترکیبات و ساختار مخلوط های بتن خودتراکم سبب می شود که تولید آن ها نسبت به مخلوط های بتن معمولی به انرژی بیشتری نیاز داشته باشد. این میزان انرژی بیشتر که صرف ایجاد یکنواختی و همگنی ترکیبات تشکیل دهنده این نوع مخلوط ها می گردد، سبب می شود که میزان تولید آن ها نسبت به مخلوط های معمولی با محدودیت روبرو باشد که به لحاظ زمانی و اقتصادی، فاکتور مهم و تأثیرگذاری است. هدف این پژوهش مطالعه و بررسی زمان و سرعت مخلوط کردن (انرژی مخلوط کردن) در مخلوط های بتن خودتراکم و تأثیر این دو شاخصه مهم بر خواص رئولوژی آن ها می باشد. به همین منظور چند نسبت مخلوط از بتن خودتراکم شامل نوع اول بتن خودتراکم پودری و نوع دوم بتن خودتراکم حاوی ماده اصلاح کننده روانگروی (VMA) ساخته شد. هر کدام از نسبت ها در سه زمان مخلوط کردن ۳، ۸ و ۱۱ دقیقه و هرکدام در دو سرعت مخلوط کردن ۲۰ و ۴۰ دور بر دقیقه مخلوط شدند. نتایج نشان داد که در هر دسته از مخلوط ها، با افزایش زمان مخلوط کردن تا حد مشخصی که زمان تثبیت نامیده می شود (کوتاه ترین زمان مخلوط کردن که در این تحقیق ۸ دقیقه است)، کارایی بتن افزایش یافته و با افزایش زمان مخلوط کردن تا ۱۱ دقیقه ۶ درصد کاهش می یابد. آزمایش های رئولوژی نیز این نتیجه را تأیید می کنند به طوری که کمترین مقدار تنش جاری استاتیک نیز در زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه به دست آمد و با افزایش زمان مخلوط کردن تا ۱۱ دقیقه، مقدار این پارامتر تا ۴۲ درصد افزایش یافت.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۲۱-۰۳-۱۳۹۷
بازنگری: ۲۶-۰۴-۱۳۹۷
پذیرش: ۱۴-۰۵-۱۳۹۷
ارائه آنلاین: ۲۴-۰۵-۱۳۹۷

کلمات کلیدی:
زمان مخلوط کردن
سرعت مخلوط کردن
انرژی مخلوط کردن
بتن خودتراکم
زمان تثبیت

۱- مقدمه

با تغییر روند مخلوط کردن حتی با یک ترکیب ساختاری یکسان، تا حدودی تغییرات در ریزساختار بتن به وجود می آید. روند مخلوط کردن می تواند با تغییر در زمان مخلوط کردن و سرعت مخلوط کردن تغییر کند. عملیات مخلوط کردن تا جایی ادامه می یابد که اجزای بتن، یک مخلوط همگن را بدست دهد. مخلوط های بتن خودتراکم به دلیل ترکیبات تشکیل دهنده ی آن ها به زمان بیشتری برای همگن و یکنواخت شدن نیاز دارند که میزان تولید آن را محدود می کند. بنابراین انرژی مخلوط کردن یا به عبارت دیگر زمان و سرعت مخلوط کردن در تولید بتن بسیار مهم است و پیش از ساخت بتن در ابعاد بزرگ باید ارزیابی شده و مقادیر بهینه آن ها برای هر مخلوط تعیین شود [۱].

فراریس[1] [۱] بیان کرد بهره وری مخلوط کن با یکنواختی بتن تولید شده، هم چنین با تعیین انرژی مصرف شده در تولید مقدار مشخصی از بتن با همگنی مورد نیاز مشخص می شود. همچنین عنوان نمود که انرژی مخلوط کردن نتیجه ی مصرف توان و مدت

1 Ferraris

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Shirzad@iust.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.

چرخه ی مخلوط کردن است و لزوماً معیاری از بهره وری مخلوط کن نیست ولی برای کنترل کردن کارایی حین مخلوط کردن و جلوگیری از تخلیه ی بتن برای اندازه گیری اسلامپ استفاده می شود. چوپین و همکاران [۲] عوامل مؤثر بر زمان مخلوط کردن را بررسی کردند، بدین منظور، تعریف یک زمان تثبیت از مصرف توانی که حین مخلوط کردن ثبت شده باشد، لازم بود. زمان تثبیت به عنوان زمان مورد نیاز برای رسیدن به حد مجانب منحنی انرژی تعریف می شود. طبق یک قانون کلی، بتن هنگامی که به زمان تثبیت رسیده باشد، تخلیه می شود [۳]. طبق تحقیق دی لارارد [۱] و همکاران [۴] مشخص شد که مشخصات بهینه بتن تازه به محض این که منحنی انرژی دیگر کاهش قابل توجهی ندارد، به دست می آید. بنابراین کوتاه ترین زمان مخلوط کردن ممکن، می تواند از زمان تثبیت محاسبه شود. شیسل[۲] و همکاران [۵] بیان کردند زمان مخلوط کردن طولانی بتن خودتراکم منجر به کاهش تولید و افزایش هزینه ها می شود. آن ها پیشرفت جریان اسلامپ در مقابل زمان مخلوط کردن را برای یک نمونه بتن خودتراکم رسم کردند. هم چنین، توان ورودی ثبت شده در دستگاه مخلوط کن هم نشان داده شد. با پیشرفت مقدار جریان اسلامپ و توان، به ترتیب سه مرحله در روند مخلوط کردن مشخص شد: اول بازه پراکندگی[۳]، دوم بازه مخلوط کردن بهینه[۴] و سوم بازه زیاد مخلوط کردن[۵].

بازه پراکندگی: دراین مرحله با اضافه شدن و پراکنده شدن آب، پیوندهای مایع بین ذرات شکل می گیرند و جریان پذیری مخلوط با افزایش توزیع مواد خام افزایش می یابد.

بازه مخلوط کردن بهینه: زمانی که نمودار به این سطح رسید، مواد خام تشکیل دهنده بتن به صورت یکنواخت پراکنده شده و فوق روان کننده به طور کامل پخش شده است و جریان پذیری هم به حداکثر مقدار خود می رسد.

بازه زیاد مخلوط کردن: برای بتن خودتراکم، انرژی مخلوط کردن بیشتر منجر به کاهش جریان پذیری می شود. به دلیل حرکت انتقالی و پراکنده، موقعیت بین ذرات تغییر می کند. بنابراین پیشرفت قابل توجه کیفیت مخلوط کردن غیرممکن است و در همین زمان، برخورد بیشتر بین ذرات و هم چنین بین ذرات و دستگاه مخلوط کن ادامه می یابد، بنابراین توده ذرات بیشتر از هم پاشیده می شوند.

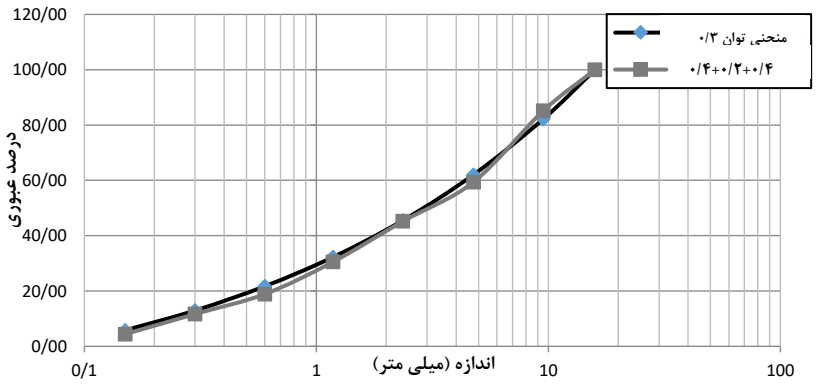
دی لارارد [۶] هم چنین عنوان نمود که زمان مخلوط کردن برای یک مخلوط مشخص با مقادیر واقعی و حداکثر حجم جامدات یا به عبارتی با طرح مخلوط بتن در ارتباط است. بر این اساس در عمل، زمان مخلوط کردن با افزایش حجم ریزدانه ها، افزایش مقدار آب کلی، افزایش غلظت نسبی جامدات و افزایش سرعت مخلوط کردن کاهش می یابد.

لوک[۶] و شیسل [۷] با پژوهش های خود نتیجه گرفتند با افزایش سرعت دستگاه مخلوط کن زمان مخلوط کردن کاهش می یابد. مزانک[۷] و همکاران [۸] و هم چنین دی لارارد و همکاران [۴] نیز اثر سرعت دستگاه را بر زمان مخلوط کردن مورد مطالعه قرار دادند و به نتایج مشابه دست یافتند. دیلز[۸] و همکاران[۹] نیز مطالب عنوان شده را تأیید کردند ولی بیان نمودند که سرعت بیش از حد می تواند منجر به زیاد مخلوط شدن شود. این موضوع برای بتن خودتراکم که به افزایش سرعت حساس است، مهم می باشد.

اصغری[۹] و همکاران [۱۰] نیز اثرات عوامل مختلف از جمله زمان و سرعت مخلوط کردن را بر قوام پذیری خمیر سیمان خودتراکم بررسی کردند. آن ها نتیجه گرفتند تغییر در زمان و سرعت مخلوط کردن یا به عبارتی انرژی مخلوط کردن تأثیر قابل توجهی بر مقدار ویسکوزیته و تنش تسلیم دارد. برای تغییرات اعمال شده در این مطالعه، مخلوط های نوع پودری نسبت به مخلوط های حاوی VMA قوام بیشتری را نشان دادند.

رپنو[۱۰] و همکاران [۱۱] نیز مطالعه خود را بر خمیر خودتراکم انجام دادند. نتایج آزمایش های رئولوژی در این مطالعه نشان داد به طور کلی انرژی مخلوط کردن بالا، خمیرهای با منحنی رئولوژی پایین را بدست می دهند. افزایش انرژی مخلوط کردن (سرعت مخلوط کردن بالا و زمان مخلوط کردن طولانی) ویسکوزیته پلاستیک، ناحیه تغلیظ پذیری و تنش تسلیم حداکثر حاصل از روند آزمایش رئولوژی را کاهش می دهد. وقتی انرژی مخلوط کردن به سطح مشخصی رسید، مخلوط به صورت یکنواخت مخلوط شده است

1 De Larard
2 Shiessel
3 dispersion
4 optimum
5 overmixing
6 Lowke
7 Mezanc
8 Dils
9 Asghari
10 Ropnow



شکل ۱. منحنی دانه بندی سنگدانه های مورد استفاده در این تحقیق

Fig. 1. Aggregate grading curves which is used in this study

و مخلوط کردن بیشتر لازم نیست. آن ها هم چنین نتیجه گرفتند مخلوط های حاوی مواد و ترکیبات مختلف، انرژی های مخلوط کردن متفاوتی برای رسیدن به یکنواختی بهینه نیاز دارند. رابطه ی (۱) برای محاسبه ی انرژی مخلوط کردن استفاده شد.

$$E/M = (K \times w^2 \times t)/V \qquad (۱)$$

که E = انرژی (KJ)، M = جرم (Kg)، ω = سرعت دایره ای (rpm)، t = زمان (دقیقه) ، V = حجم (m^3) و K = $N.m/Kg.m^{-3}/rpm$ است. 6.4×10^{-9}

کوسترزانوسکا[1] و همکاران [۱۲] بیان کردند در اثر گذشت زمان بعد از پایان مخلوط کردن خواص رئولوژیکی با گذشت زمان تغییر می کنند. جریان اسلامپ افزایش (افزایش تنش تسلیم) و زمان جریان اسلامپ افزایش می یابد (افزایش ویسکوزیته پلاستیک). نهدی[2] [۱۳] در خصوص ارتباط آزمایش های کارایی با پارامترهای رئولوژی نتیجه گرفت جریان اسلامپ با تنش تسلیم ارتباط معکوس و به حالت منحنی لگاریتمی دارد؛ درحالی که ارتباطی بین جریان اسلامپ و ویسکوزیته پلاستیک مشخص نشد. دی لارارد و همکاران [۴] هم چنین نتیجه گرفتند جریان اسلامپ و مقاومت فشاری بیشترین تأثیر را از تغییر زمان مخلوط کردن پذیرفتند.

کازاکلیو[3] [۱۴] با نتایج حاصل از پژوهش های خود نشان داد که به طور کلی روند مخلوط کردن می تواند به صورت مستقیم کارایی بتن را تغییر دهد. دن[4] [۱۵] نیز برای بررسی اثر مخلوط کردن ترکیبات و شرایط قبل و حین مخلوط کردن را ثابت نگاه داشت و نتیجه گرفت روند مخلوط کردن تأثیر قابل توجهی بر خواص بتن در حالت تازه دارد. زمان و سرعت مخلوط کردن بتن خود تراکم می تواند به طور کامل خواص بتن تازه و هم چنین نتیجه نهایی محصول را تغییر دهد. بنابراین نقش مهمی در روند ساخت بتن خودتراکم دارد. به دست آوردن زمان وسرعت مخلوط کردن بهینه برای بتن خودتراکم درحالی که خواص رئولوژیکی بتن در بهترین حالت خود باشند، از اهمیت زیادی برخوردار است.

با توجه به مطالب عنوان شده مشخص می گردد که انرژی مخلوط کردن شامل سرعت و زمان مخلوط کردن تأثیر قابل توجهی بر خواص مخلوط های بتن خودتراکم دارد و به نظر می رسد یافتن مقداری بهینه برای آن ها متناسب با خصوصیات ساختاری مخلوط بسیار حائز اهمیت می باشد. لذا در این پژوهش مقداری بهینه برای انرژی مخلوط کردن و تأثیر آن بر خواص رئولوژی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح

سیمان مصرفی در این تحقیق، سیمان پرتلند نوع ۲ با وزن مخصوص ۳۱۵۰ kg/m^3 می باشد که در همه مخلوط ها مورد استفاده قرار گرفت. همچنین پودر سنگ مورد استفاده در این پژوهش، از نوع آهکی با وزن مخصوص ۲۶۶۰ kg/m^3 می باشد که در نیمی از مخلوط ها مورد استفاده قرار گرفت. سنگدانه های مصرفی نیز از نوع شکسته و شامل شن، ماسه درشت و ماسه ریز می باشد که به ترتیب دارای حداکثر اندازه ۱۲/۵، ۸ و ۳ میلی متر می باشد. افزودنی های

1 Kostrzanowska
2 Nehdi
3 Cazacliu
4 Den

شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش شامل فوق روان کننده و ماده اصلاح کننده روانگروی (VMA) می باشد. فوق روان‌کننده مصرفی بر پایه ی پلی‌کربوکسیلات و با وزن مخصوص kg/m^3 ۱۱۰۰ بوده و همچنین ماده اصلاح کننده روانگروی نیز از جنس میکرو پال پلی ساکارید می باشد.

۲-۲- نسبت های مخلوط ها

در این تحقیق برای تعیین تخمین اولیه از نسبت‌های ترکیب مخلوط بتن خودتراکم، از روش توصیه نامه موسسه ی اروپایی [۱۶] استفاده شده و سپس بر اساس اهداف مورد نظر نسبت‌های مخلوط تصحیح شده است. درصد شن استفاده شده ۴۰٪، ماسه درشت ۴۰٪ و ماسه ی ریز ۲۰٪ بوده است. مشخصات این مخلوط ها در جدول ۱ درج گردیده است. قطر جام مخلوط کن ۶۵ سانتی متر است که برای تبدیل واحد سرعت چرخش جام مورد نیاز است. بدین ترتیب مخلوط‌های شماره۱ مخلوط بتن خودتراکم از نوع پودری(حاوی پودر سنگ آهک) و مخلوط های شماره ۲، حاوی ماده ی شیمیایی اصلاح کننده روانگروی هستند.

۲-۳- مراحل مخلوط کردن

با توجه به موضوع و هدف پژوهش، ضروری به نظر می رسید که دقت لازم در همه مراحل ساخت بتن‌ها به عمل آید. لذا سعی شد تا مراحل ساخت برای کلیه بتن‌ها تا جای ممکن بطور یکسان انجام شود. تمهیدات در نظر گرفته شده برای این امر، شامل ساخت بتن‌های هر سری در فواصل زمانی نسبتاً کوتاه، انتخاب مصالح از پیمانه‌های یکسان، دقت در محاسبه رطوبت مصالح سنگی و نیز طی کردن مراحل ساخت و انجام آزمایش‌های یکسان برای هر بتن است.

به طور کلی در این تحقیق، دو عامل به عنوان متغیر در فرآیند ساخت بتن خودتراکم در نظر گرفته شد، اول سرعت مخلوط کردن و دوم زمان مخلوط کردن. چگونگی لحاظ کردن این دو متغیر به شرح زیر است :

- سرعت مخلوط کردن: با توجه به دستگاه تنظیم کننده ی سرعت، سرعت مخلوط کردن در حالت های مختلف ۲۰ یا ۴۰ دور بر دقیقه انتخاب شده است. با توجه به قطر جام مخلوط کن که برابر ۶۵ سانتی متر است، سرعت ها به ترتیب m/s ۰/۷۳۳ و m/s ۱/۴۶۶۱ می باشند.
- زمان مخلوط کردن: زمان لازم برای مخلوط کردن، از توصیه های استاندارد ASTM-C192 [۱۷] برابر با ۸ دقیقه، از آیین نامه بتن ایران ۳ دقیقه و یک زمان طولانی تر ۱۱ دقیقه ای (به انتخاب پژوهش گر) انتخاب شده است.

برای بررسی اثر زمان و سرعت مخلوط کردن، هر یک از انواع پودری و حاوی VMA بتن خودتراکم با دو سرعت ۲۰ و ۴۰ دور بر دقیقه در سه زمان ۸، ۳ و ۱۱ دقیقه مخلوط شدند. بدین ترتیب ۱۲ مخلوط، از نظر خواص رئولوژی و مقاومت فشاری آن ها بررسی شدند.

برای ساخت بتن، ابتدا سنگ‌دانه‌های ریز و درشت به همراه یک

جدول ۱. مشخصات طرح مخلوط ها
Table 1. The mixture proportion of mixtures

ردیف	شناسه مخلوط	W/C	آب (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	پودر سنگ (kg/m^3)	سنگدانه (kg/m^3)	فوق روان کننده (درصد حجمی سیمان)	VMA (درصد حجمی سیمان)	حجم منافذ (درصد حجمی کل)	حجم خمیر (درصد حجمی کل)
۱	مخلوط پودری	۰/۴۲	۱۷۶/۴	۴۲۰	۷۰	۱۷۱۱/۶	۰/۹۵	۰	۲۲	۳۵/۶
۲	مخلوط حاوی VMA	۰/۴۲	۱۷۶/۴	۴۲۰	۰	۱۷۸۱/۵	۰/۶۹	۰/۴	۲۲	۳۳

سوم آب مخلوط در داخل مخلوط‌کن استوانه ای مذکور ریخته شد و مخلوط کن به مدت ۱ دقیقه آن ها را مخلوط نمود، برای جذب بهتر آب توسط سنگدانه‌ها، مجموعه ۱ دقیقه بدون حرکت و در حالت استراحت باقی ماند. در ادامه مواد سیمانی (و در صورت وجود، پودرسنگ آهک) به مخلوط اضافه شده و مابقی آب که حاوی فوق روان‌کننده (و در صورت وجود VMA) حل شده در آب است به آرامی به مخلوط اضافه گردید. پس از افزودن کل مقدار آب و فوق روان کننده، سه زمان مختلف برای مخلوط کردن بتن در نظر گرفته شد:

حالت اول: در حالت اول با زمان مخلوط کردن کل ۸ دقیقه، بتن به مدت ۳ دقیقه مخلوط شده و سپس به مدت ۳ دقیقه برای استراحت متوقف شده و در پایان ۲ دقیقه مخلوط کردن نهایی خاتمه بخش عملیات مخلوط کردن است.

حالت دوم: در حالت دوم با زمان مخلوط کردن کل ۳ دقیقه، بتن تنها به مدت ۳ دقیقه مخلوط شده و مرحله ی استراحت و مخلوط کردن نهایی حذف شده است.

حالت سوم: در حالت سوم نیز روند مخلوط کردن مانند حالت اول است با این تفاوت که زمان مخلوط کردن نهایی افزایش یافته و به ۵ دقیقه رسیده است. به عبارتی زمان در مرحله ۱ مخلوط کردن ثابت است و تغییرات در زمان مرحله ۲ و ۳ انجام می شود.

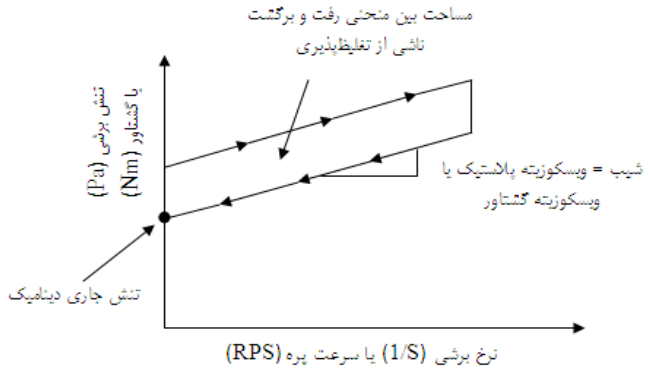
۲-۴- آزمایش ها

۲-۴-۱- آزمایش های خواص بتن تازه

در بخش کارایی، آزمایش‌های جریان اسلامپ و T_{50} برای بررسی قابلیت پرکنندگی برای بررسی قابلیت عبور آزمایش حلقه جی (اختلاف ارتفاع و پهن شدگی) برای بررسی قابلیت پرکنندگی و لزجت خمیری بتن آزمایش قیف V و برای بررسی مقاومت جداشدگی نیز آزمایش شاخص پایداری چشمی با استفاده از دستورالعمل [۱۸] انجام گرفت.

۲-۴-۲- آزمایش رئولوژی

در بخش رئولوژی نیز با استفاده از رئومتر، پارامترهای رئولوژی بتن خودتراکم ارزیابی و تعیین شد. در این تحقیق برای بررسی رفتار رئولوژی بتن‌های خودتراکم مختلف، دستگاه رئومتر دانشگاه علم و صنعت ایران مورد استفاده قرار گرفته است. این رئومتر که از نوع هم



شکل ۲. منحنی جریان رفت و برگشت و مساحت محصور، بعنوان معیاری از مقدار تیکسوتروپی بتن خودتراکم

Fig. 2. Flow curve showing SCC thixotropic behavior.

محور و بر اساس استاندارد ICAR [۱۹] طراحی شده است، قادر به انجام آزمون رشد تنش و اندازه‌گیری منحنی جریان می‌باشد که با استفاده از آن ها می توان به پارامترهای تنش جاری استاتیک، تنش جاری دینامیک، ویسکوزیته خمیری و تغلیظ پذیری دست یافت.

- ارزیابی صحت عملکرد و کالیبراسیون دستگاه ساخته شده:

پس از ساخت دستگاه، برای ارزیابی اعتبار نتایج بدست آمده از دستگاه رئومتر، روغن با ویسکوزیته مشخص توسط دستگاه آزمایش شده است. نتایج گشتاور پیچشی بدست آمده از دستگاه در سرعت‌های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد، مقدار پارامترهای ویسکوزیته گشتاور و گشتاور جاری به ترتیب برابر ۰/۱ و ۰/۰۱۲ می باشند. با قرار دادن این مقادیر در روابط (۲) و (۳) مقدار ویسکوزیته محاسباتی برابر pa.s ۲/۲۰۸بدست می‌آید.

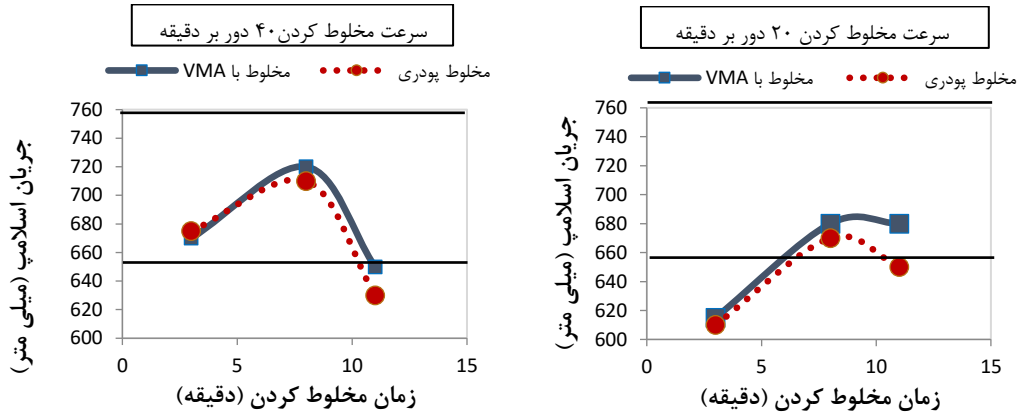
$$\tau_0 = \frac{\left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}\right)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) 4\pi H}(g) \qquad (۲)$$

$$\mu = \frac{\left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}\right)}{4\pi H}(h) \qquad (۳)$$

در این رابطه‌ها τ_0 و μ و T برابر تنش جاری و ویسکوزیته خمیری و گشتاور پیک ، R_1 و R_2 برابر شعاع پره و شعاع ظرف، H ارتفاع پره و g و h نیز ضرایبی هستند که از خط برازش یافته از نتایج

جدول ۲. نتایج آزمایشهای کارایی
Table 2. The results of workability tests

سرعت مخلوط کردن (دور بر دقیقه)	زمان مخلوط کردن (دقیقه)	T_{50} (s)		حلقه جی (میلی‌متر)		قطر حلقه جی (میلی‌متر)		آزمایش قیف V (s)		VSI	
		مخلوط پودری	مخلوط حاوی VMA	مخلوط پودری	مخلوط حاوی VMA	مخلوط پودری	مخلوط حاوی VMA	مخلوط پودری	مخلوط حاوی VMA	مخلوط پودری	مخلوط حاوی VMA
۲۰	۳	۳/۴۷	۵/۰۰	۸/۷۵	۱۰/۰۰	۶۱۰	۶۲۵	۱۱/۴۹	۱۲/۱۰	۱	۰
	۸	۳/۰۰	۳/۰۳	۷/۵۰	۶/۲۵	۶۶۰	۶۶۰	۱۱/۰۵	۱۱/۳۷	۰	۱
	۱۱	۳/۵۷	۲/۳۱	۸/۷۵	۱۲/۵۰	۶۵۰	۶۶۰	۱۱/۷۶	۱۰/۳۳	۱	۱
۴۰	۳	۲/۰۰	۲/۳۵	۵/۰۰	۷/۵۰	۶۷۰	۶۷۰	۹/۵۳	۱۰/۷۷	۰	۰
	۸	۲/۰۰	۲/۰۰	۳/۰۰	۵/۰۰	۷۱۰	۷۰۰	۹/۱۰	۱۰/۱۴	۰	۰
	۱۱	۲/۰۰	۳/۵۷	۱۷/۵	۱۱/۲۵	۵۹۰	۶۴۰	۹/۹۳	۱۱/۶۱	۱	۲



شکل ۳. اثر زمان مخلوط کردن بر جریان اسلامپ: الف) در سرعت مخلوط کردن ۲۰ دور بر دقیقه ب) در سرعت مخلوط کردن ۴۰ دور بر دقیقه
Fig. 3. Effects of mixing time on slump flow (a): mixing speed is 20 rpm, (b): mixing speed is 40 rpm

بدست آمده است.

۲-۴-۳- آزمایش مقاومت فشاری

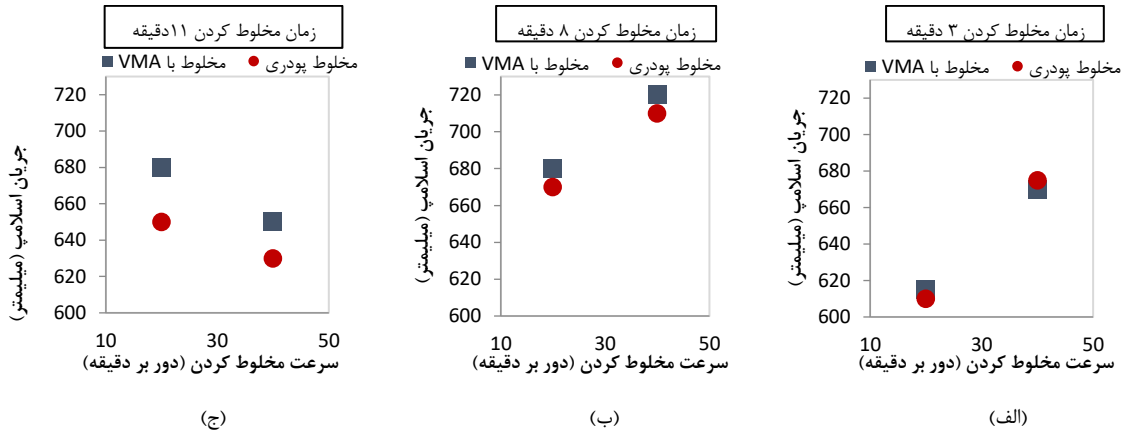
مقاومت فشاری بتن‌ها نیز بر اساس استاندارد با استفاده از ۳ نمونه مکعبی ۱۰۰ میلی متری انجام شد و در سنین ۷ و ۲۸ روز در جک فشاری قرار گرفته و مقاومت فشاری آن ها ثبت شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر زمان و سرعت مخلوط کردن بر خواص کارایی

به منظور بررسی خواص کارایی مخلوط های بتنی ساخته شده، آزمایش هایی که پیشتر عنوان شد انجام گرفت. نتایج آزمایش ها در خصوص جریان اسلامپ در شکل های ۳ تا ۵ و نتایج مربوط به آزمایش های T_{50} ، حلقه جی ، قیف V و شاخص پایداری چشمی در جدول ۲ ارائه شد.

اثر زمان مخلوط کردن بر جریان اسلامپ در شکل ۳ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، افزایش زمان مخلوط کردن تا یک مقدار مشخص سبب افزایش جریان اسلامپ و بعد از آن سبب کاهش مقدار جریان اسلامپ گردیده است. همچنین نتایج نشان داد که برای یک نسبت مخلوط با سرعت یکسان، بیشترین جریان اسلامپ مربوط به زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه است و جریان



شکل ۴. اثر سرعت مخلوط کردن بر جریان اسلامپ: الف) در زمان مخلوط کردن ۳ دقیقه، ب)در زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه و ج) در زمان مخلوط کردن ۱۱ دقیقه

Fig. 4. Effects of mixing speed on slump flow (a): mixing time is 3 minutes, (b): mixing time is 8 minutes, (c): mixing time is 11 minutes

اسلامپ با کاهش زمان مخلوط کردن تا ۳ دقیقه و افزایش آن تا ۱۱ دقیقه، با کاهش همراه بوده است.

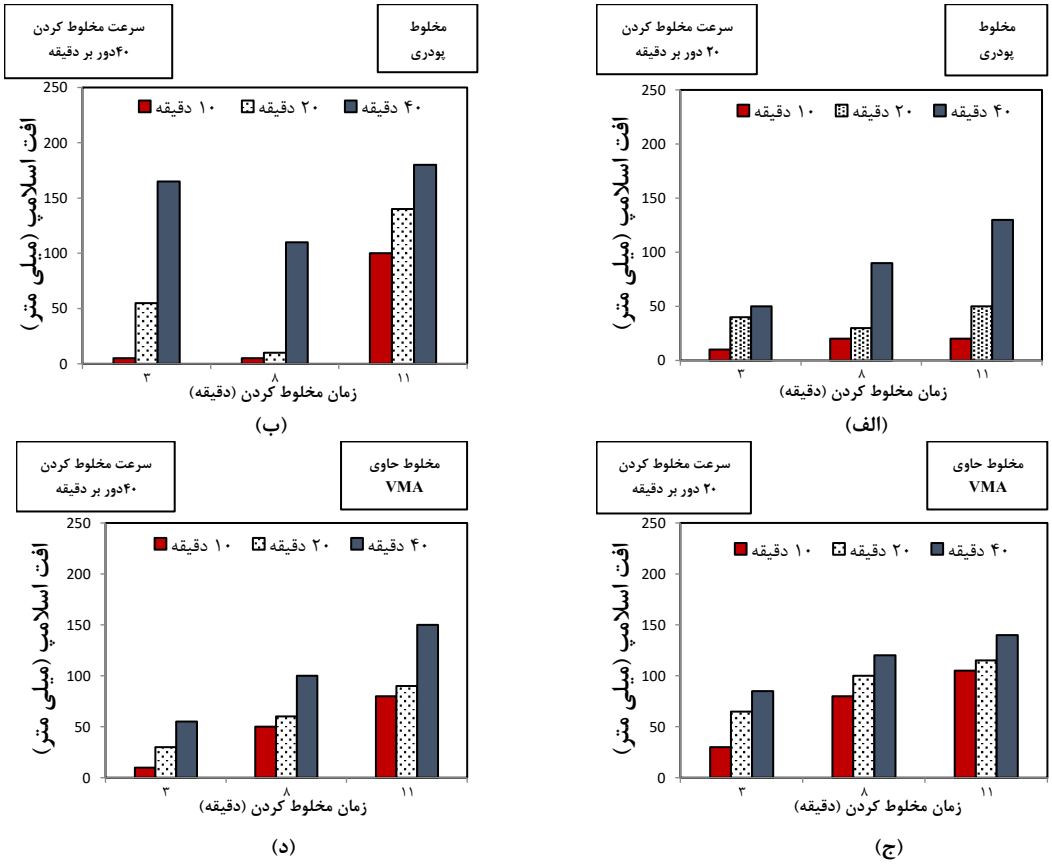
همچنین در شکل ۴ اثر سرعت مخلوط کردن نشان داده شده است ، ملاحظه می شود که با افزایش سرعت مخلوط کردن در هر دو نوع از بتن خودتراکم، جریان اسلامپ افزایش می یابد. لذا می توان این گونه گفت که زمان و سرعت مخلوط کردن اثر یکسانی بر جریان اسلامپ نمی گذارند. افزایش زمان تا مقداری مشخص سبب افزایش جریان اسلامپ شده و بعد از آن افزایش در زمان، اثر مطلوبی در این مشخصه کارایی ندارد. این در حالی است که افزایش سرعت مخلوط کردن پیوسته با افزایش جریان اسلامپ و بهبود کارایی همراه بوده است. لذا نتایج نشان داد که زمان و سرعت بهینه برای رسیدن به خواص کارایی مطلوب به ترتیب ۸ دقیقه و ۴۰ دور بر دقیقه است.

یکی دیگر از مهم ترین پارامتر های قابل اندازه گیری در خصوص کارایی بتن، میزان افت جریان اسلامپ می باشد که نتایج آن در شکل ۵ آمده است. با توجه به نتایج مشخص گردید روند افت جریان اسلامپ تا ۴۰ دقیقه بعد از اتمام زمان مخلوط شدن، برای مخلوط های پودری و حاوی ماده ویسکوزیته به طور مشابه افزایش می یابد و با افزایش زمان مخلوط کردن مقدار نهایی افت اسلامپ با افزایش روبرو شده است. همچنین مشخص شد که در مخلوط های پودری، افزایش سرعت مخلوط کردن سبب افزایش افت اسلامپ می شود ولی در مخلوط های حاوی VMA این گونه نیست.

از نتایج مندرج در جدول ۲ در خصوص آزمایش T_{50} مشاهده می گردد که زمان رسیدن قطر پهن شدگی به ۵۰ سانتی متر برای هر مجموعه از مخلوط ها (پودری و حاویVMA) در زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه کمترین مقدار بوده است .لذا به طور کلی با افزایش سرعت برای یک مخلوط با زمان مخلوط کردن ثابت، زمان T_{50} کاهش می یابد.

همچنین نتایج آزمایش حلقه جی (جدول ۲) نیز نشان داد که کمترین مقدار نتایج حلقه جی در هر مجموعه از مخلوط ها مربوط به زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه می باشد و با کاهش و افزایش زمان مخلوط کردن تا ۳ و ۱۱ دقیقه مقدار نتایج حلقه جی کاهش می یابد که این روند با روند تغییرات جریان اسلامپ همخوانی دارد. افزایش میزان حلقه جی را می توان به دو عامل افزایش میزان جداشدگی و روانی کم و یا لزجت بالای مخلوط نسبت داد، هرچند این مسأله برای قطعیت یافتن نیاز به پژوهش های بیشتر دارد.

با مشاهده نتایج آزمایش قیف V مشاهده می شود در زمان مخلوط کردن ۳ دقیقه به علت عدم پیوستگی مطلوب سنگدانه و ماتریس تشکیل دهنده (ملات) جداشدگی به صورت مشخص تری نمایان است. با افزایش زمان اختلاط تا ۸ دقیقه به نظر می رسد پیوستگی مطلوبی بین اجزای تشکیل دهنده پدیدار شده است لذا، میزان جداشدگی تا حد قابل ملاحظه ای کاهش یافت. با افزایش مخلوط کردن تا ۱۱ دقیقه به علت زیاد مخلوط شدن (پیشتر توضیح داده شد) پیوستگی مخلوط افت کرده که سبب بروز جداشدگی در مخلوط شده است. بنابراین بهترین حالت پیوستگی در زمان مخلوط



شکل ۵. اثر زمان مخلوط کردن در افت جریان اسلامپ الف) مخلوط پودری با سرعت مخلوط کردن ۲۰ دور بر دقیقه، ب) مخلوط پودری با سرعت مخلوط کردن ۴۰ دور بر دقیقه، ج) مخلوط حاوی VMA با سرعت مخلوط کردن ۲۰ دور بر دقیقه و د) مخلوط حاوی VMA با سرعت مخلوط کردن ۴۰ دور بر دقیقه

Fig. 5. Influences of mixing time on slump loss based on delay time of test after making the mixtures (a): Limestone powder type mixtures, mixing speed is 20 rpm, (b): Limestone powder type mixtures, mixing speed is 40 rpm (c): VMA type mixtures, mixing speed is 20 rpm, (d): VMA type mixtures, mixing speed is 40 rpm

کردن ۸ دقیقه به دست آمده است.

اما در خصوص کیفیت ظاهری بتن که توسط شاخص پایداری چشمی مشخص می شود و نتایج آن در جدول ۲ آمده است، ملاحظه می گردد که در اکثر مخلوط ها میزان جداشدگی بسیار ناچیز است و تنها در مخلوط های پودری با سرعت مخلوط کردن ۲۰ دور بر دقیقه در دو زمان ۳ و۱۱ دقیقه، و با سرعت ۴۰ دور بر دقیقه در زمان ۱۱ دقیقه و برای مخلوط های VMA در سرعت ۲۰ دور بر دقیقه در زمان ۸ و۱۱ دقیقه مقدار بسیار کم و در سرعت ۴۰ دور بر دقیقه در زمان ۱۱ دقیقه مقدار کمی جداشدگی مشاهده شده است.

لذا با توجه به نتایج کارایی می توان گفت که بهترین شرایط مخلوط بتن خودتراکم از نقطه نظر کارایی در حالتی شکل می گیرد که زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه و سرعت مخلوط کردن ۴۰ دور بر دقیقه باشد.

۳-۲- اثر زمان و سرعت مخلوط کردن بر خواص رئولوژی

۳-۲-۱- اثر زمان و سرعت مخلوط کردن بر تنش جاری استاتیکی

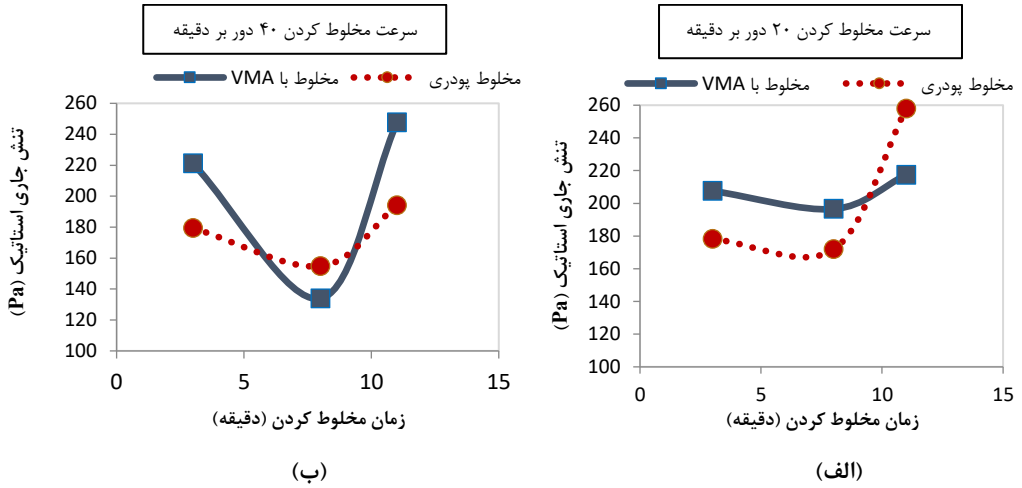
همان طور که پیشتر نیز اشاره شد پارامتر تنش جاری استاتیکی یکی از مهم ترین پارامترهای رئولوژی قابل اندازه گیری در مخلوط های بتن خودتراکم است. در شکل ۶ نتایج مربوط به اثر زمان بر این پارامتر مهم نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، کمترین مقدار تنش جاری استاتیک برای زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه می باشد. با مرجع در نظر گرفتن زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه، با کاهش زمان مخلوط کردن به ۳ دقیقه، تنش جاری استاتیک ۲۲درصد و با افزایش زمان مخلوط کردن تا ۱۱ دقیقه، تنش جاری استاتیک ۴۲ درصد افزایش می یابد. بنابراین مرحله زیاد مخلوط شدن حساسیت بیشتری نسبت به مرحله پراکندگی در مخلوط کردن داشته و همچنین مشخص می گردد یک محدوده بهینه

زمانی در مخلوط کردن وجود دارد که در آن تنش جاری استاتیک در بهینه ترین حالت ممکن قرار می گیرد. همچنین در شکل ۷ اثر سرعت مخلوط کردن بر تنش جاری استاتیک نمایش داده شده است. از نتایج بدست آمده مشخص چنین برمی آید که افزایش دو برابری سرعت مخلوط کردن، تنش جاری استاتیک را به طور میانگین ۸ درصد کاهش می دهد. نتایج پژوهش های اصغری و همکاران [۱۰] نیز به نوعی تأیید کننده نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر است.

با توجه به نتایج ارائه شده در خصوص اثر زمان و سرعت مخلوط کردن بر تنش جاری استاتیکی به عنوان یک پارامتر مهم رئولوژی مشخص می گردد که نتایج حاصل با نتایج پژوهش های [۱۰و۱۱] سازگاری دارد.

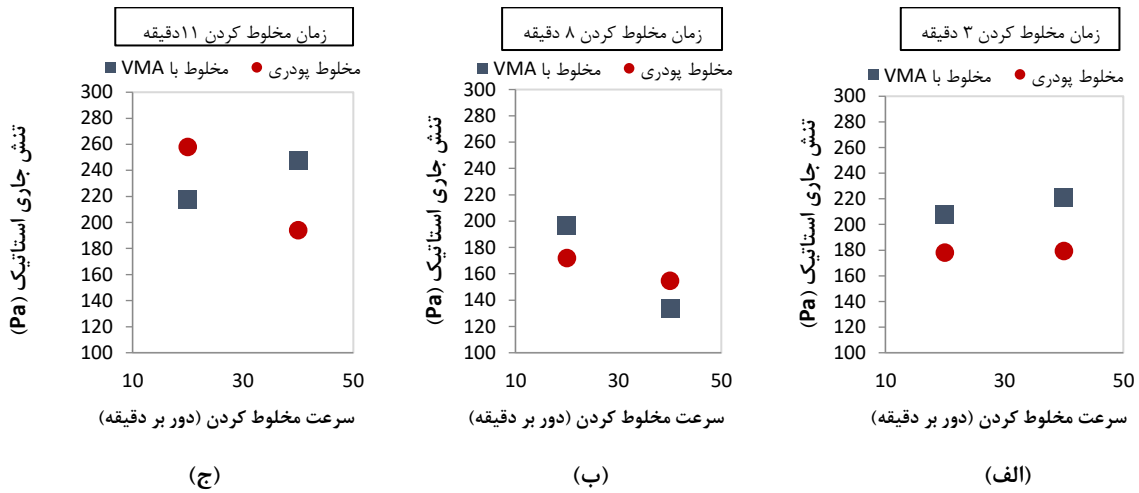
۳-۲-۲- اثر زمان و سرعت مخلوط کردن بر تنش جاری دینامیکی

در شکل ۸ نتایج مربوط به اثر زمان بر تنش جاری دینامیکی ارائه شده است. از نتایج مشاهده می شود که در هر سری از نمودارها کمترین مقدار تنش جاری دینامیک مربوط به زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه است. در این نمودار با مرجع در نظر گرفتن زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه، با کاهش زمان مخلوط کردن به ۳ دقیقه، تنش جاری دینامیک ۲۵ درصد و با افزایش زمان مخلوط کردن تا ۱۱ دقیقه، تنش جاری دینامیک ۶۴ درصد افزایش می یابد. بنابراین مرحله



شکل ۶. اثر زمان مخلوط کردن بر تنش جاری استاتیک: الف) در سرعت مخلوط کردن ۲۰ دور بر دقیقه، ب) در سرعت مخلوط کردن ۴۰ دور بر دقیقه

Fig. 6. The effects of mixing time on static yield stress (a): mixing speed is 20 rpm, (b): mixing speed is 40 rpm



شکل ۷. اثر سرعت مخلوط کردن بر تنش جاری استاتیک: الف) در زمان ۳ دقیقه، ب) در زمان ۸ دقیقه، ج) در زمان ۱۱ دقیقه

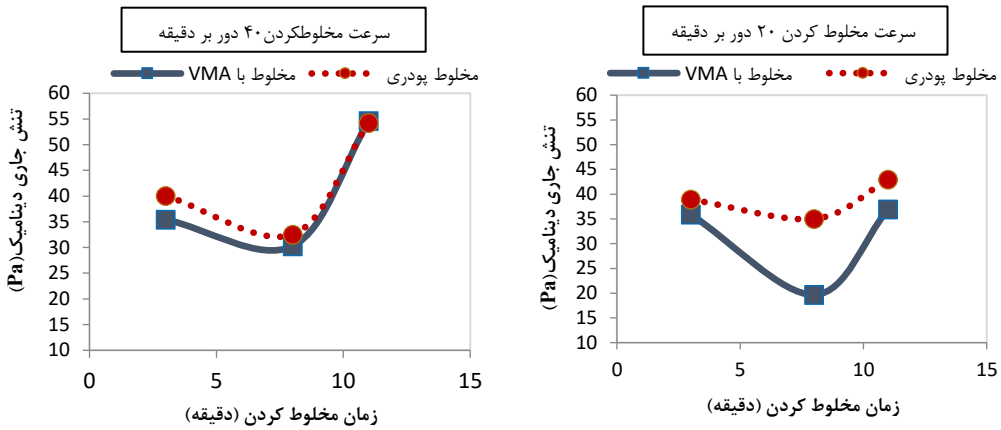
Fig. 7. The effects of mixing speed on static yield stress (a): mixing time is 3 minutes, (b): mixing time is 8 minutes, (c): mixing time is 11 minutes

زیاد مخلوط شدن حساسیت بیشتری نسبت به مرحله پراکندگی در مخلوط کردن دارد. نتایج بدست آمده از این پژوهش با نتایج پژوهش های [۵ و۷] همخوانی دارد.

در شکل ۹ نیز اثر سرعت مخلوط کردن بر تنش جاری دینامیکی نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که افزایش دو برابری سرعت مخلوط کردن، تنش جاری دینامیک را به طور میانگین در دو زمان مخلوط کردن ۳ و ۸ دقیقه، ۸ درصد افزایش می دهد. ولی این مقدار این پارامتر در زمان مخلوط کردن ۱۱ دقیقه تا ۳۷ درصد افزایش می یابد. که این امر حاکی از آن است افزایش سرعت در مرحله زیاد مخلوط کردن تأثیر مطلوبی ندارد. نتایج بدست آمده از پژوهش [۱۰] نیز با نتایج پژوهش حاضر سازگاری دارد.

۳-۲-۳- اثر زمان و سرعت مخلوط کردن بر ویسکوزیته پلاستیک

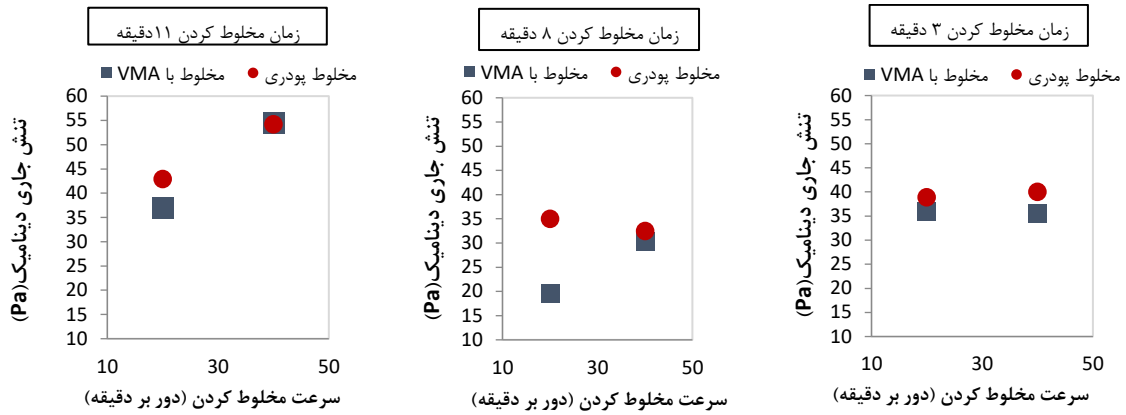
نتایج تأثیر زمان مخلوط کردن بر ویسکوزیته پلاستیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ویسکوزیته پلاستیک تغییرات تنش برشی با تغییرات نرخ برشی است و برای چسبندگی و حفظ انسجام مخلوط اهمیت دارد. با توجه به شکل ۱۰ مشخص گردید که در یک مجموعه از مخلوط ها با سه زمان، بیشترین ویسکوزیته مربوط به زمان مخلوط



(ب) (الف)

شکل ۸. اثر زمان مخلوط کردن بر تنش جاری دینامیک: الف) با سرعت مخلوط کردن ۲۰ دور بر دقیقه، ب) با سرعت مخلوط کردن ۴۰ دور بر دقیقه

Fig. 8. The effects of mixing time on dynamic yield stress (a): mixing speed is 20 rpm, (b): mixing speed is 40 rpm



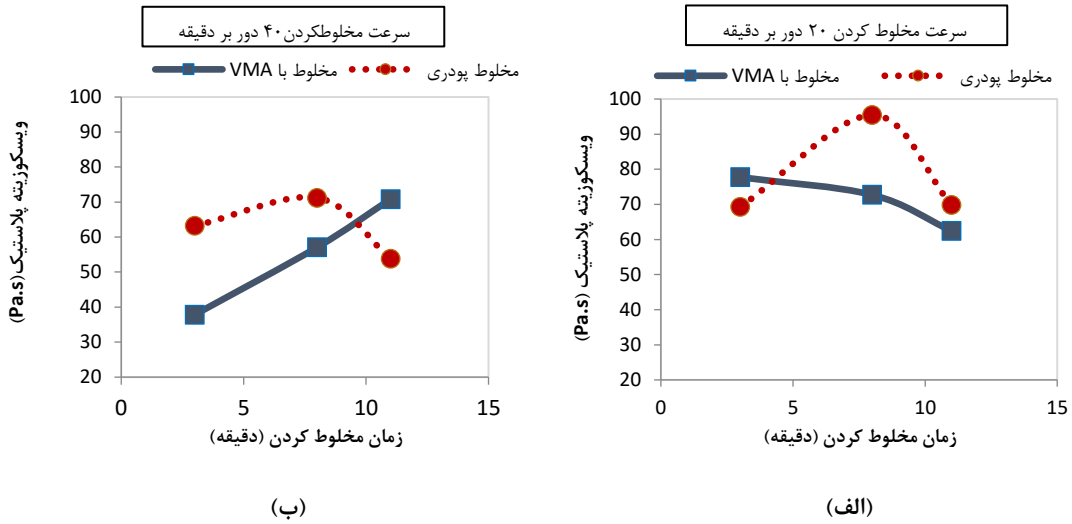
(ج) (ب) (الف)

شکل ۹. اثر سرعت مخلوط کردن بر تنش جاری دینامیک: الف) در زمان مخلوط کردن ۳ دقیقه ، ب) در زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه و ج) در زمان مخلوط کردن ۱۱ دقیقه

Fig. 9. The effects of mixing speed on dynamic yield stress (a): mixing time is 3 minutes, (b): mixing time is 8 minutes, (c): mixing time is 11 minutes

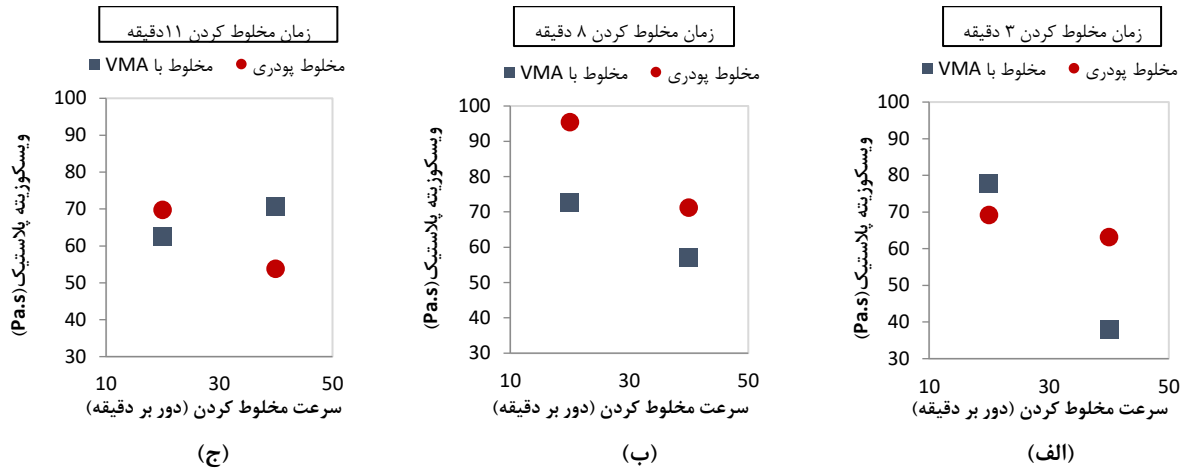
کردن ۸ دقیقه می باشد. در این نمودار با مرجع در نظر گرفتن زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه، با کاهش زمان مخلوط کردن به ۳ دقیقه، ویسکوزیته پلاستیک ۱۶ درصد و با افزایش زمان مخلوط کردن تا ۱۱ دقیقه، ویسکوزیته پلاستیک ۱۰ درصد کاهش می یابد. نتایج بدست آمده از این پژوهش با نتایج پژوهش [۱۰] همخوانی دارد که نشان می دهد اثر زمان بر ویسکوزیته پلاستیک به گونه ای است که افزایش زمان تا مقداری مشخص سبب فزونی یافتن ویسکوزیته پلاستیک می شود ولی بعد از آن افزایش زمان اثر مطلوبی بر این پارامتر رئولوژی ندارد.

نتایج اثر سرعت مخلوط کردن بر ویسکوزیته پلاستیک نیز در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. اصغری و همکاران [۱۰] بیان کردند افزایش سرعت مخلوط کردن مطلوبیت خواص رئولوژی را کاهش می دهد. گزارش [۱۱] نشان داد مقادیر ویسکوزیته در در کمترین زمان مخلوط کردن در سرعت مخلوط کردن زیاد نسبت به سرعت کم، کوچکتر است. در سرعت کم، کوتاه ترین زمان مخلوط کردن مقادیر حداکثر ویسکوزیته و در سرعت زیاد، بیشترین زمان مخلوط



شکل ۱۰. اثر زمان مخلوط کردن بر ویسکوزیته پلاستیک: الف) در سرعت مخلوط کردن ۲۰ دور بر دقیقه و ب) در سرعت مخلوط کردن ۴۰ دور بر دقیقه

Fig. 10. The effect of mixing time on plastic viscosity (a): mixing speed is 20 rpm, (b): mixing speed is 40 rpm



شکل ۱۱. اثر سرعت مخلوط کردن بر ویسکوزیته پلاستیک: الف) در زمان مخلوط کردن ۳ دقیقه، ب) در زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه و ج) در زمان مخلوط کردن ۱۱ دقیقه

Fig. 11. The effect of mixing speed on plastic viscosity (a): mixing time is 3 minutes, (b): mixing time is 8 minutes, (c): mixing time is 11 minutes

کردن مقادیر حداقل ویسکوزیته را برای هر مخلوط تولید می کند. این روندها در مورد نتایج ویسکوزیته بدست آمده با این تحقیق سازگار است.

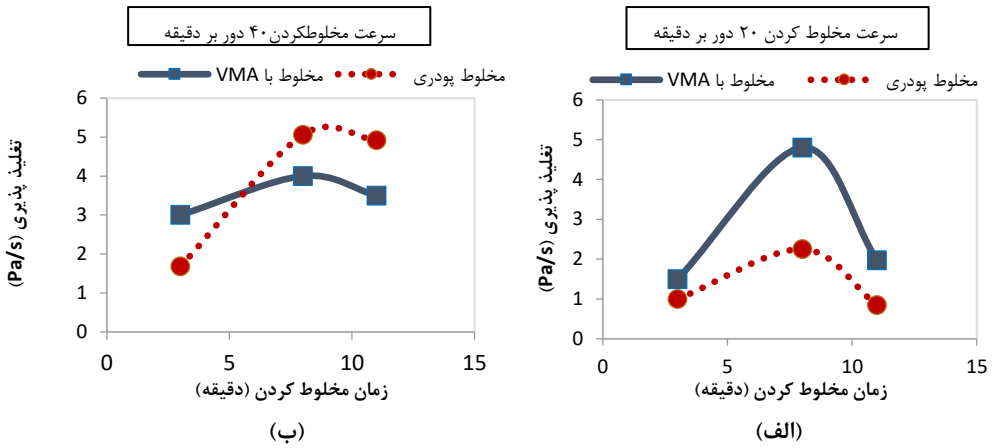
۳-۲-۴- اثر زمان و سرعت مخلوط کردن بر تغلیظ پذیری

تغلیظ پذیری بازگشت به حالت اولیه (از لحاظ روانگروی) تحت اثر اعمال برش، هنگامی که ویسکوزیته در یک مایع در اثر گذشت زمان کاهش یافته است، می باشد. تمایل بازگشت به روانی اولیه با اعمال انرژی پس از این که به یک ماده (مانند بتن خودتراکم) اجازه استراحت بدون بهم زدن داده شد، کاهش یابد.

با توجه به شکل ۱۲ در هرمجموعه ی زمانی از مخلوط ها مقدار تغلیظ پذیری به دست آمده، در زمان اختلاط ۸ دقیقه بیشتر است و در این حالت مخلوط تمایل بیشتری برای بازگشت به روانی اولیه را دارد. احتمال دارد ماده اصلاح کننده ویسکوزیته سبب افزایش تغلیظ پذیری شود [۲۰]. با مقایسه مخلوط های پودری و حاوی VMA این نتیجه تا حدودی تأیید می شود.

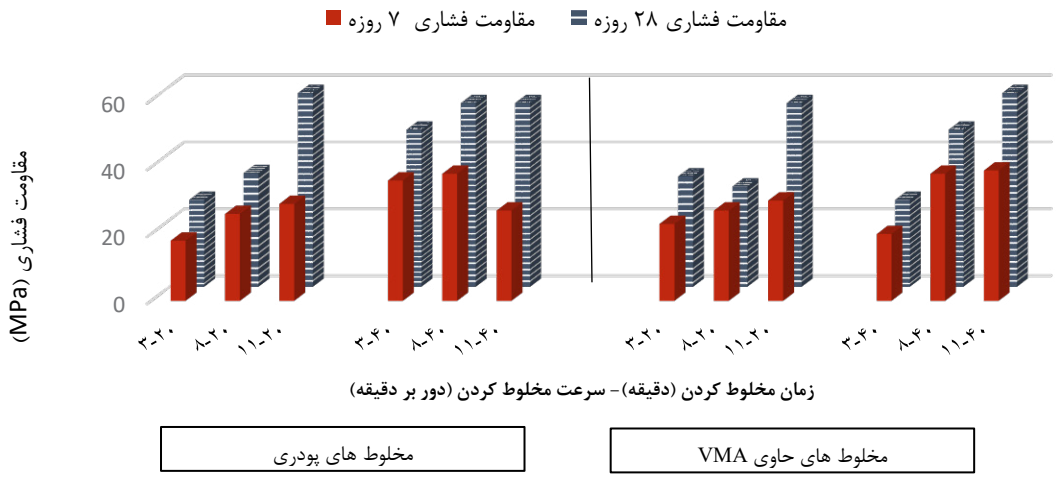
۳-۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۱۳ ارائه شده است که نشان می دهد هر یک از مخلوط های بتن خودتراکم تحت شرایط مخلوط کردن مختص به خود به چه مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز دست یافته است. نتایج نشان می دهد با افزایش زمان مخلوط



شکل ۱۲. مقادیر شاخص تغلیظپذیری برای مخلوطها: الف) در سرعت مخلوط کردن ۲۰ دور بر دقیقه و ب) در سرعت مخلوط کردن ۴۰ دور بر دقیقه

Fig. 12. The thixotropic properties of mixtures based on mixing time and mixing speed (a): mixing speed is 20 rpm, (b): mixing speed is 40 rpm



شکل ۱۳. نتایج مقاومت فشاری مخلوطهای بتن خودتراکم

Fig. 13. SCC mixtures compressive strength

کردن، مقاومت فشاری به طور کلی افزایش می یابد و بالاترین مقدار در مقاومت فشاری نمونه ها مربوط به زمان مخلوط کردن ۱۱ دقیقه است.

در پژوهش های [۲۱و۲۲] این مسأله مطرح شده است که با ساییدگی درشت دانه ها، تعداد ریزدانه ها در مخلوط افزایش می یابد. به علاوه، به دلیل پدید آمدن نواحی واکنشی جدید، ممکن است ساییده شدن محصولات اولیه هیدراتاسیون اتفاق افتد. این فرآیند، منجر به افزایش پیش رونده در سطح ذرات در مخلوط و به همان نسبت نیاز به آب و فوق روان کننده می شود که در نهایت منجر به کاهش جریان پذیری می شود. پژوهش ویسچرز [۲۲] نشان داد این سطوح با افزایش زمان مخلوط کردن افزایش می یابد و سیمان با زمان طولانی تر خرد می شود و چسبندگی سیمان بیشتر و بیشتر شده که منجر به افزایش در مقاومت بتن می شود. این نتایج با نتایج پژوهش حاضر سازگاری دارد.

۴- نتیجه گیری

❖ در هر سری از نمودار اثر زمان مخلوط کردن بر جریان اسلامپ یک نقطه ی بیشینه مشاهده می شود که حاکی از آن است که افزایش زمان مخلوط کردن تا یک نقطه ی مشخص (۸ دقیقه) جریان اسلامپ را بهبود می بخشد و پس از آن سبب کاهش (۶ درصدی) کارایی بتن می شود.

❖ طبق توصیه نامه ی موسسه ی اروپایی افنارک برای دسته بتن های SF2 مقدار جریان اسلامپ قابل قبول ۶۶۰ تا ۷۵۰ میلی متر می باشد که مخلوط های ساخته شده با زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه همگی در این محدوده قرار دارند.

❖ کمترین مقدار تنش جاری استاتیک برای زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه بود. با مرجع در نظر گرفتن زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه، با کاهش زمان مخلوط کردن به ۳ دقیقه، تنش جاری استاتیک ۲۲ درصد و با افزایش زمان مخلوط کردن تا ۱۱ دقیقه، تنش جاری استاتیک ۴۲ درصد افزایش می یابد. بنابراین مرحله زیاد مخلوط شدن حساسیت بیشتری نسبت به مرحله پراکندگی در مخلوط کردن دارد.

❖ کمترین مقدار تنش جاری دینامیک مربوط به زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه است. با مرجع در نظر گرفتن زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه، با کاهش زمان مخلوط کردن به ۳ دقیقه، تنش جاری دینامیک ۲۵ درصد و با افزایش زمان مخلوط کردن تا ۱۱ دقیقه، تنش جاری دینامیک ۶۴ درصد افزایش یافت.

❖ در یک مجموعه از مخلوط با سه زمان مخلوط کردن، بیشترین ویسکوزیته مربوط به زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه است. با مرجع در نظر گرفتن زمان مخلوط کردن ۸ دقیقه، کاهش زمان مخلوط کردن به ۳ دقیقه، ویسکوزیته پلاستیک را ۱۶ درصد و افزایش زمان مخلوط کردن تا ۱۱ دقیقه، ویسکوزیته پلاستیک را ۱۰ درصد کاهش داده است.

❖ افزایش دو برابری سرعت مخلوط کردن، جریان اسلامپ را به طور میانگین ۵ درصد افزایش و تنش جاری استاتیک را به طور میانگین ۸ درصد کاهش داده است.

❖ دو برابر شدن سرعت مخلوط کردن، تنش جاری استاتیک را به طور میانگین در دو زمان مخلوط کردن ۳ و ۸ دقیقه، ۸ درصد افزایش داده است، ولی این مقدار در زمان مخلوط کردن ۱۱ دقیقه تا ۳۷ درصد افزایش می یابد که این امر حاکی از آن است که افزایش سرعت در مرحله زیاد مخلوط کردن تأثیر نامطلوبی دارد.

مراجع

[1] C.F. Ferraris, Concrete mixing methods and concrete mixers: state of the art, Journal of research of the National Institute of Standards and Technology, 106(2) (2001) 391.

[2] D. Chopin, F. de Larrard, B. Cazacliu, Why do HPC and SCC require a longer mixing time?, Cement and Concrete Research, 34(12) (2004) 2237-2243.

[3] D. Chopin, B. Cazacliu, F. de Larrard, R.d. Schell, Monitoring of concrete homogenisation with the power consumption curve, Materials and Structures, 40(9) (2007) 897-907.

[4] F. de Larrard, B. Cazacliu, D. Chopin, E. Château, Production of SCC, in, 2003, pp. 17-20.

[5] P. Schießl, O. Mazanec, D. Lowke, SCC and UHPC—Effect of mixing technology on fresh concrete properties, in: Advances in construction materials 2007, Springer, 2007, pp. 513-522.

[6] F. De Larrard, Concrete mixture proportioning: a

scientific approach, CRC Press, 1999.

[7] D. Lowke, P. Schiessl, Effect of mixing energy on fresh properties of SCC, in, 2005.

[8] O. Mazanec, D. Lowke, P. Schießl, Mixing of high performance concrete: effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time, Materials and structures, 43(3) (2010) 357-365.

[9] J. Dils, G. De Schutter, V. Boel, Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: a review, Materials and structures, 45(11) (2012) 1673-1683.

[10] A.A. Asghari, A.M.L. Hernandez, D. Feys, G. De Schutter, Which parameters, other than the water content, influence the robustness of cement paste with SCC consistency?, Construction and Building Materials, 124 (2016) 95-103.

[11] T.D. Rupnow, V.R. Schaefer, K. Wang, B.L. Hermanson, Improving portland cement concrete mix consistency and production rate through two-stage mixing, in, 2007.

[12] A. Kostrzanowska-Siedlarz, J. Gołaszewski, Rheological properties of high performance self-compacting concrete: effects of composition and time, Construction and Building Materials, 115 (2016) 705-715.

[13] M. Nehdi, S. Al-Martini, Coupled effects of high temperature, prolonged mixing time, and chemical admixtures on rheology of fresh concrete, ACI materials Journal, 106(3) (2009) 231-240.

[14] B. Cazacliu, Mixing self compacting concrete: mixers, mixing methods, mixing time, in, 2013, pp. 57-64.

[15] F. Dehn, Influence of mixing technology on fresh concrete properties of HPFRCC, in, 2005, pp. 23-26.

[16] E.P. Koehler, D.W. Fowler, ICAR mixture proportioning procedure for self-consolidating concrete, in, 2007.

[17] ASTM, C., 192/C 192 M, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, 2002.

[18] S.-C. Concrete, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, BIBM, et al, 22 (2005).

[19] E.P. Koehler, D.W. Fowler, Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete, in, 2004.

[20] J.N. Constructional standards and regulations of Iran, Self-Consolidating Concrete Instructions and technical specifications, Research Center for Roads, Housing and Urban Development, 2015, (in Persian).

[21] K. Takada, J.C. Walraven, Influence of mixing efficiency on the properties of flowable cement pastes, in, 2001, pp. 545-554.

[22] G. Wischers, Einfluß langen Mischens oder Lagerns auf die Betoneigenschaften, Beton, 13 (1963) 1.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

P. Ghoddousi , A.A. Shirzadi Javid, S. Aghajani, Evaluation of Mixing Time and Speed on the Rheological Properties of Self-Consolidating Concrete, Amirkabir J. Civil Eng., 52(1) (2020) 243-256.

DOI: 10.22060/ceej.2018.14591.5691