



Investigating the effect of the amount of aggregates on the properties of self-compacting concrete

S. F. Sajedi^{1*}, A. R. Dadpour², R. Basiri³

¹ Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

² Concrete Research Center, Khatam Al-Anbia Behbahan University of Technology, Behbahan, Iran

³ Department of Statistics, Khatam Al-Anbia Behbahan University of Technology, Behbahan, Iran

ABSTRACT: Although about four decades have passed since the development of self-compacting concrete (SCC), its replacement with ordinary concrete, there are still problems in quality control and construction in large dimensions. These problems are partly due to the lack of complete understanding of the properties of SCC and partly due to the extreme sensitivity of the performance of this type of concrete to changes in the design parameters, climate, physical and chemical characteristics of the components of the mix design, the need for expert workers, the lack of design suitable and safe mixtures are contractors' reluctance and maintainability. In this research, To investigate the effect of the number of stone materials To achieve the optimal mixture design, the first step is to prove that concrete can be made with local materials of Behbahan, located in Khuzestan province, in the laboratory and then in a site. This stage was done by making 28 mixes in a trial and error manner on all concrete components to keep them stable, concrete tests in fresh and hardened conditions were carried out according to the standards of "Federation of European National Unions of Concrete Representatives" and "Japan". Finally, after reaching a reference mix design, new mixes were made by changing the amount of fine aggregates from 30% to 70% with a rate of 5% increase. Based on the results and statistical analysis, the optimal mix design is determined and introduced as a design with 65% fine aggregates compared to the total aggregates.

Review History:

Received: Dec. 27, 2022

Revised: May, 31, 2023

Accepted: Jun. 04, 2023

Available Online: Jun. 14, 2023

Keywords:

Self-compacting concrete (SCC)
concrete properties
grain size distribution (GSD)
stone materials
statistical analysis

1- Introduction

Self-compacting concrete (SCC), as one of the new generation concretes, is widely used due to its many advantages (no need for compaction and flow under its own weight, without spending energy and passing through the gaps between rebars). It is expanding in the world. One of the most important properties of SCC, which affects all its other properties, is determining the ratio of its construction components, which is known as the mixture design. The main difference between SCC design and normal concrete is the use of high amounts of powdery materials and strong superplasticizer in SCC. While in normal concrete in many cases, there is no need to use these materials. Also, in SCC, due to the high flow rate, the possibility of coarse aggregates being separated from the mortar is high, so its appropriate viscosity should be provided to reduce the risk of separation. Providing appropriate viscosity in SCC is achieved by using viscosity-modifying chemicals or powder fillers. So far, researchers have not reached a consensus method for SCC mix design [1].

This concrete can be produced and used in precast form or for pouring concrete on site. Among the advantages of SCC, which is a durable structural concrete, is the minimization of

necessary labor and the absence of noise caused by concrete compaction [2-3]. The ACI 237 [5] committee, while presenting the procedures for determining the components of SCC, has also given recommendations for controlling the obtained values, although this method has weaknesses such as not being systematic and that the grading of aggregates and its recommendations It is not specifically considered. In 1998, Okamura et al. investigated the rational method of mixing design for SCC mortar and came to the conclusion that the large volume of coarse aggregates can reduce the resistance to separation and block concrete [11].

Considering the sensitivity of SCC in environmental and workshop conditions and the need for quality stone materials, in this article it was tried to first design laboratory mixes and then design suitable mixes for implementation, in a simple workshop format with percentage changes. Aggregates should be provided for local materials. For this purpose, tests related to the properties of concrete in fresh and hardened states using the guide mix design from ICAR Institute and by trial and error method on all its components to reach the basic mix design in the framework of valid SCC regulations were carried out. 9 final mix designs were made in which only the percentage of aggregates was changed and the rest

*Corresponding author's email: sajedi@iauahvaz.ac.ir



Table 1. Details of the ICAR mixing design

amount (kg/m ³)	Concrete components
400	Cement
893	Sand
731	Gravel
200	Water
175	Stone powder
6	Super plasticizer
variable	Viscosity modifier admixture

**Fig. 1. Slump flow test, sample made based on ICAR mixture design****Table 2. The details of the research mixing design based on the change in the percentage of aggregates (water and SP are in lit and the rest of the components are in kg)**

F/T	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cement	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Water	156	156	156	156	156	156	156	156	156
Stone powder	175	175	175	175	175	175	175	175	175
Sand	470	549	627	706	784	862	941	1019	1098
Pea gravel	769	713	659	603	549	494	439	384	329
Almond gravel	329	306	282	259	235	212	188	165	141
super plasticizer (SP)	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Viscosity modifier Admixture (VMA)	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166

of the parameters were constant.

2- Research methodology

Materials used in the research include cement, limestone powder, aggregates, water, and polycarboxylate-based super-plasticizer with the brand name PC5000 (HR) in accordance with the European standard EN-934-2. The details of the ICAR mixing design on which the research was initiated are given in Table 1.

According to the mix design that was taken from ICAR, an attempt was made to make SCC using the existing materials whose rheological properties are within the framework of valid regulations; according to Figure 1, the desired result was not achieved, so by examining and testing all construction components, a basic SCC mix design was made. After conducting various tests, finally, the best reference SCC was made by trial and error and was used in the next steps.

From this mixture design, the ratio of its components is given in Table 2; it was made 9 times under the same conditions, and only the ratio of fine aggregates to total aggregates used (F/T) was changed in them. The results of different tests in fresh and hardened concretes were measured in order to evaluate different percentages of aggregates and determine their optimal amount.

Fresh concrete tests including slump flow, T50, V hopper, checking the passability of L box and J ring tests, and hardened concrete tests including compressive strength and split tensile strength were carried out in the research.

3- Results and discussion

According to the statistical information, the correlation between different tests on SCC is presented in Table 3.

For example, if the correlation between slump flow and J ring is 0.845, it can be said that the correlation between these two indicators is significant and inverse; That is, as the amount of slump flow increases, the value of J ring decreases, which according to the value of determination coefficient $R^2 = 0.714$, so 70% of the changes of J ring number can be estimated from the slump flow.

Based on the results of all the experiments, the mixed design with F/T = 0.65 has provided the best results. Prioritization of the design of research mixtures based on TOPSIS method is given in Table 4.

4- Conclusions

The key results of the research are as follows:

- The type and size of coarse and fine aggregates cause a change in the percentages of concrete materials used, especially super-plasticizer and viscosity-modifying admixtures.

- According to the standard deviation and average charts, in terms of rheological properties, compressive strength and tensile strength, the optimal mixture design based on the results and statistical analysis is F/T=65%.

- Due to the workshop design of the research mixtures, it is better to consider the maximum size of coarse aggregates as 12.5 mm.

Table 3. Correlation between different tests with change of percentage of aggregates

WSPG	SPT	CS at different ages			J ring	L box	V Funnel	T50	Slump flow	Type of test
		90-day	28-day	7-day						
0.117	-0.155	0.225	-0.019	-0.062	-0.845 ⁺	0.801 ⁺	-0.813 ⁺	-0.915 ⁺	1	Slump flow
-0.184	0.164	-0.275	-0.024	0.055	0.881 ⁺	-0.842 ⁺	0.887 ⁺	1	-0.915 ⁺	T50
0.033	0.139	-0.036	0.152	0.237	0.901 ⁺	-0.879 ⁺	1	0.887 ⁺	-0.813 ⁺	V Funnel
0.054	-0.063	0.33	0.075	0.057	-0.964 ⁺	1	-0.879 ⁺	-0.842 ⁺	0.801 ⁺	L box
-0.11	0.027	-0.269	-0.032	0.027	1	-0.964 ⁺	0.901 ⁺	0.881 ⁺	-0.845 ⁺	J ring
0.003	0.194	0.725 ⁺	0.699 ⁺	1	0.027	0.057	0.237	0.055	0.062	CS at 7-day
0.135	0.405 [*]	0.832 ⁺	1	0.699 ⁺	-0.032	0.075	0.152	-0.024	-0.019	CS at 28-day
0.208	0.384 [*]	1	0.832 ⁺	0.725 ⁺	-0.269	0.33	-0.036	-0.275	0.225	CS at 90-day
-0.079	1	0.384 [*]	0.405 [*]	0.194	0.027	-0.063	0.139	0.164	-0.155	SPT
1	-0.079	0.208	0.135	0.003	-0.11	0.054	0.033	-0.184	0.117	WSPG

CS= compressive strength; SPT= splite tensile strength; WSPG= wet specific gravity
^{*}: Significant difference at the 5% error level; ⁺: Significant difference at the 10% error level

Table 4. Prioritization of the design of research mixtures based on TOPSIS method

rank	slenderness ratio	F/T (%)
2	0.76	70
1	0.79	65
4	-0.68	60
5	0.63	55
3	0.69	50
6	0.55	45
7	0.41	40
8	0.28	35
9	0.07	30

- The use of both 3/4 and 3/8 inch sizes of gravel in the mix plan is mandatory so that it can create a lock and provide a proper connection; In addition, a certain percentage of each type of gravel should be used in the mixture design. The ratio of 70% fine gravel and 30% coarse gravel is the optimal option.

- One of the other characteristics of this type of concrete is the visual inspection that when the concrete is resting in the mixing pot, some of it should be turned over with a trowel in orders to check the quality of the concrete. If the results below and above the concrete in the pot are the same, the quality of the concrete is good, and if the above concrete is smooth and below it is similar to the hardened state, the concrete has settled and the mix design should be modified.

References

- [1] M. Taheri Amiri, Ashrafian, A, Baranjian, J, Asghari Tilki, F, Optimizing the design of self-compacting fibrous concrete mix containing polypropylene using meta-innovative algorithms of crow search and genetics, *Omran Modares*, 20(3) (2019) 1-12.
- [2] L. Sun, M. Koopialipoor, D. Jahed Armaghani, R. Tarinejad, M. Tahir, Applying a meta-heuristic algorithm to predict and optimize compressive strength of concrete samples, *Engineering with Computers*, 37 (2021) 1133-1145.
- [3] G. Sua-Iam, N. Makul, Utilization of limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete incorporating high volumes of untreated rice husk ash as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, 38 (2013) 455-464.
- [4] E. Sharifi, S.J. Sadjadi, M. Aliha, A. Moniri, Optimization of high-strength self-consolidating concrete mix design using an improved Taguchi optimization method, *Construction and Building Materials*, 236 (2020) 117547.
- [5] G. Pachideh, M. Gholhaki, A. Moshtagh, On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or Granulated Blast-Furnace Slag, *Journal of Building Engineering*, 24 (2019) 100757.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. F. Sajedi, A. R. Dadpour, R. Basiri, *Investigating the effect of the amount of aggregates on the properties of self-compacting concrete*, Amirkabir J. Civil Eng., 55(7) (2023) 303-306.

DOI: [10.22060/ceej.2023.22063.7893](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.22063.7893)





بررسی تاثیر میزان سنگدانه ها بر خواص بتن خودتراکم

سیدفتح اله ساجدی^{*}، علیرضا دادپور^۲، رضا بصیری^۳

۱- گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- آزمایشگاه عمران و مرکز تحقیقات بتن، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء، بهبهان، ایران

۳- گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء، بهبهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۶

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۳/۲۴

کلمات کلیدی:

بتن خودتراکم

خواص بتن

دانه بندی

مصالح سنگی

تحلیل آماری

خلاصه: با وجود گذشت حدود چهار دهه از توسعه بتن خودتراکم، جایگزینی آن با بتن معمولی (به دلیل وجود خطاهای عمدی و غیر عمدی در ساخت و اجراء) همچنان مشکلاتی در واریاسیون کیفیت و ساخت در ابعاد وسیع وجود دارد. این مشکلات بخشی به علت عدم شناخت کامل از خواص بتن خودتراکم و بخشی نیز به علت حساسیت شدید عملکرد این نوع بتن نسبت به تغییر پارامترهای طراحی، اقلیمی، مشخصات فیزیکی و شیمیایی اجزاء طرح مخلوط، نیاز به کارگران متخصص، عدم ارائه طرح مخلوطهای مناسب و مطمئن، عدم تمایل پیمانکاران و ابقاء پذیری است. در این پژوهش برای بررسی تاثیر میزان مصالح سنگی به منظور نیل به طرح مخلوطهای بهینه، اولین گام، اثبات قابل ساخت بودن بتن با مصالح بومی شهرستان بهبهان واقع در استان خوزستان در آزمایشگاه و سپس به صورت کارگاهی (بدون شستشوی مصالح سنگی) است. این مرحله با ساخت ۲۸ طرح مخلوط به شیوه آزمون و خطا بر تمام اجزاء بتن برای ثابت نگه داشتن آنها، با انجام آزمایشها در حالات تازه و سخت شده طبق استانداردهای مرتبط انجام شد. در نهایت با رسیدن به یک طرح مخلوط مرجع، طرح مخلوطهای جدید با تغییر میزان سنگدانه های ریز از ۳۰٪ تا ۷۰٪ با آهنگ افزایش ۵ درصدی ساخته شدند. براساس نتایج و تحلیل های آماری، طرح مخلوط بهینه به صورت طرح دارای ۶۵٪ سنگدانه ریز نسبت به کل سنگدانه ها تعیین و معرفی می شود.

۱- مقدمه
مناسب در بتن خودتراکم با استفاده از مواد شیمیایی اصلاح کننده لزجت^۱ و یا مواد پودری پرکننده حاصل می شود. براساس مطالب و تفاوت های ذکر شده در بالا، تاکنون محققان به یک روش مورد اجماع برای طرح مخلوط بتن خودتراکم نرسیده اند [۱].

توسعه بتن خودتراکم، یکی از مهم ترین پیشرفت ها در صنعت ساختمان در سال های اخیر می باشد. این نوع بتن، قابلیت جاری شدن داشته و حفرات بین میلگردها و گوشه قالبها را بدون نیاز به ویبره و تراکم پر می کند. این بتن به صورت پیش ساخته و یا برای بتن ریزی در محل، قابل تولید و استفاده می باشد. از جمله مزایای بتن خودتراکم که یک بتن سازه ای بادوام است، به حداقل رساندن نیروی کار لازم و عدم وجود صدا، ناشی از تراکم بتن است [۲-۳].

تاکنون چندین روش برای طرح مخلوط بتن خودتراکم مطرح شده است که هر کدام سعی کرده اند به نحوی مشکلات طرح مخلوط بتن خودتراکم را برطرف سازند. اولین توصیه های مربوط طرح مخلوط بتن خودتراکم در سال

از زمانی که بتن خودتراکم^۱ به عنوان یکی از بتن های نسل جدید معرفی شده است، کاربرد آن به دلیل مزایای فراوان (عدم نیاز به تراکم و جاری شدن تحت وزن خود، بدون صرف انرژی و عبور از فواصل بین میلگردها) به صورت گسترده ای در دنیا در حال گسترش است. به همین دلیل پژوهش های زیادی بر روی ویژگی های این بتن انجام گرفته است. یکی از مهم ترین خواص SCC که بر همه خواص دیگر آن اثرگذار است، تعیین نسبت اجزاء مقادیر تشکیل دهنده آن است که به طرح مخلوط موسوم است. تفاوت عمده طرح SCC با بتن معمولی، استفاده از مقادیر بالای مواد پودری و فوق روان کننده قوی در بتن خودتراکم است. در حالی که در بتن معمولی در بسیاری اوقات نیازی به استفاده از این مواد نیست. هم چنین در SCC به دلیل روانی بالا چون احتمال جداسدگی سنگدانه های درشت از ملات زیاد است، لذا باید لزجت مناسب آن تأمین شده باشد، تا خطر جداسدگی کاهش یابد. تأمین لزجت

1 (Self - Consolidating Concrete (SCC

^{*} نویسنده عهده دار مکاتبات: sajedi@iauhvaz.ac.ir

2 Viscosity Modifying Agent (VMA)

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.



درشت می‌تواند باعث کاهش مقاومت به جداسدگی شده و بلوکه‌شدگی بتن را همراه داشته باشد [۱۱]. گیگر و همکاران^۵ تأثیر میزان، شکل (نسبت شکل) و حداکثر چگالی سنگدانه‌های درشت را بر خواص رئولوژی بتن خودتراکم بررسی نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که نسبت شکل، زاویه‌دار بودن و بافت سطحی سنگدانه‌ها تأثیر بالایی بر لزجت و تنش جاری شدن دارد [۱۲].

نیک‌بین و همکاران تأثیر سنگدانه‌های درشت را بر خواص شکست بتن خود تراکم ارزیابی نمودند. آنها بر اساس نتایج یک سری آزمایش‌های خمش سه‌نقطه‌ای، با انتخاب در نسبت سنگدانه درشت به کل سنگدانه‌ها برابر با ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ بررسی را انجام دادند. در همه مخلوط‌ها، پارامترهای خروجی شکست بررسی شدند. نتایج کار آنها نشان داد که با کاهش حجم درشت‌دانه‌ها از ۶۰٪ به ۳۰٪ در بتن خود تراکم، ابعاد ترک‌ها به‌شدت تغییر کرده و رفتار نمونه به رفتار خطی بسیار نزدیک می‌شود. طول ناحیه شکل‌پذیر کاهش یافته و نمونه رفتار ترد شدیدتری از خود نشان می‌دهد [۱۳].

بیگی و همکاران خواص شکست بتن خود تراکم را با تغییر در حجم و اندازه درشت‌دانه‌ها بررسی کردند. آنها آزمایش‌های خود را بر تیرهای بتنی انجام دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با افزایش ابعاد، مقاومت شکست افزایش می‌یابد. در این تحقیق خواص بتن تازه نیز مد نظر قرار گرفته است [۱۴]. بر اساس پیشنهاد راهنمای اروپایی بتن خودتراکم، زمانی که یک بتن خودتراکم به‌طور مناسب طراحی شده است که به مقدار لازم قابلیت تحمل نوسانات روزانه در اجزاء سازنده خود را داشته و فشار بر بخش واریسی کیفیت و احتمال مشکلات در محل بتن ریزی را کاهش دهد [۱۵].

به‌منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی و کاهش عیار سیمان از پوزولان به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده می‌شود. استفاده از پوزولان مقاومت‌های فشاری و کششی بتن را بهبود می‌بخشد [۱۶]. بواپندالا و آرونچالام^۶ مطالعه‌ای در ارتباط با بهینه‌سازی مقادیر طرح مخلوط بتن با مقاومت بالا با رویکرد بهینه‌سازی مقاومت فشاری و کمینه کردن هزینه با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب انجام دادند و نتایج مقادیر بهینه شده در بازه ۲۰-۹۰ مگاپاسکال ارائه شده است [۱۷].

سان و همکاران^۷ تحقیقی برای معرفی مقادیر طرح مخلوط بهینه بتن

۱۹۹۵ توسط اوکامورا و همکاران [۴] با نام روش مستدل طرح مخلوط ارائه شده است. این روش به‌صورت گام‌به‌گام نیست، بلکه صرفاً چند راهنمایی ارائه شده است و مباحثی مانند اثر دانه‌بندی و مقاومت فشاری لازم و نسبت آب به سیمان و ترکیب خمیر در این راهنمایی‌ها مدنظر قرار نگرفته است.

کمیته ACI ۲۳۷^۱ [۵] نیز ضمن ارائه مراحل تعیین اجزاء بتن خودتراکم، توصیه‌هایی نیز برای کنترل مقادیر به دست آمده بیان نموده است که البته این روش دارای ضعف‌هایی همچون نظام مند نبودن است و دانه‌بندی سنگدانه‌ها و توصیه‌های آن به‌طور مشخص مدنظر قرار نگرفته است.

کمیته اروپایی [۶] که تا پیش از سال ۲۰۰۵ تنها از طرف موسسه فدراسیون اتحادیه‌های ملی اروپایی نماینده بتن^۲ [۷] توصیه‌هایی درباره طرح مخلوط بتن SCC مطرح کرده است، از سال ۲۰۰۵ با حضور چندین شرکت مطرح اروپایی توصیه‌نامه‌ای را با ویرایش راهنمای قبلی ارائه نموده است. در این راهنما نیز تنها به ارائه تعدادی توصیه بسنده شده است و به دانه‌بندی مصالح سنگی و نقش آنها در طرح مخلوط بتن خودتراکم و ارتباط طرح مخلوط با مقاومت و دوام به‌طور جدی نگریسته نشده است. توصیه‌نامه ژاپنی بتن خودتراکم^۳ [۸] نیز تنها توصیه‌های اندکی در زمینه طرح مخلوط این بتن را ارائه کرده است.

قاضی و همکاران [۹] تنها روش طرح مخلوط بتن خودتراکم بر پایه تعیین مقاومت فشاری را ارائه نموده‌اند. مرحله به مرحله بودن تعیین اجزاء بتن خودتراکم ویژگی مثبت آن است. اما در این روش نیز رابطه جدی و صحبتی که دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌ها را لحاظ کرده باشد به‌شکل جدی مطرح نشده است. قدوسی و صالحی [۱۰] در سال ۱۳۹۷ با بررسی ابقاءپذیری بتن‌های خودتراکم حاوی پودر سنگ آهک براساس پارامترهای رئولوژی دریافتند که افزایش حجم درشت‌دانه در بتن خودتراکم باعث افزایش محدود تنش جاری شدن و لزجت خمیری شده است؛ اما کاهش حجم خمیر باعث افزایش بیشتر این دو پارامتر شده است. این تغییرات در بتن‌هایی که حجم خمیر آنها کاهش می‌یابد، قابل توجه‌تر است؛ هم‌چنین بیشترین تأثیر فوق روان‌کننده‌ها روی تنش جاری شدن بتن خودتراکم بوده و تأثیر چندانی بر لزجت خمیری ندارد.

اوکامورا و همکاران^۴ در سال ۱۹۹۸ به بررسی روش منطقی طرح مخلوط برای ملات بتن خودتراکم به این نتیجه رسیدند که حجم زیاد سنگدانه‌های

- 1 American Concrete Institute (ACI)
- 2 European Federation of National Associations Representing for Concrete (EFNARC)
- 3 Japanese Society of Civil Engineers (JSCE)
- 4 Okamura et al.

5 Geiker et al.

6 Boindala & Arunachalam

7 Sun et al.

بتن در نظر گرفته شود تا به کارایی خوب به محل ساخت برسد، عمل آوری تحت دماهای بالاتر، به ویژه در ۲۴ ساعت اول می تواند مشکل آفرین باشد. نتایج تحقیقات نشان می دهند که نمونه های عمل آوری شده تحت دماهای بالا، مقاومت فشاری پایین تری را در مقایسه با نمونه های مشابه در دماهای پایین تر در سنین ۷ و ۲۸ روزه دارند. برای حل این مشکل، روش های اصلاحی توسط چند تحقیقات مثل استفاده از نسل جدید فوق روان کننده ها، خنک سازی و یا گرم کردن مواد اولیه بتن در معرض هوای شدید سرد و گرم ارائه شده است [۲۶-۲۷].

سبحان احمد و همکاران [۲۸] به مطالعه اثر الیاف شیشه پلی وینیل الکل^۱ بر خواص بتن خودتراکم در حالات تازه و سخت شده پرداختند. آزمایش ها نشان داد که پس از اضافه کردن الیاف، ویژگی های کارایی بتن خودتراکم الیافی (توانایی جریان، توانایی عبور و مقاومت در برابر جدایی) کمی کاهش می یابند. خواص بتن سخت شده بعد از افزودن الیاف بهبود یافته و این بهبود در ترکیبات SCC با الیاف شیشه بیشتر شده است و تاثیر بسیار کمی بر سرعت ضربه ماوراء صوت دارد. حداکثر مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی برای مقدار مصرف الیاف های شیشه و PVA، ۰/۲٪ ثبت شد. مقاومت های کششی و خمشی برای مخلوط SCC تقویت شده با الیاف شیشه و PVA تا مقدار ۰/۳٪ الیاف افزایش یافته است. بیشترین بهبود پس از افزودن الیاف، در مقاومت خمشی است و به دنبال آن مقاومت کششی و در نهایت نیز در مقاومت فشاری می باشد.

ایرهان گونئیسی و همکاران^۲ [۲۹] به بررسی خواص بتن خودتراکم تقویت شده با الیاف شیشه در حالت تازه، با استفاده از نانو سیلیس و خاکستر بادی پرداختند که در تحقیقات آنها از ۱۵ طرح مخلوط مختلف با مقادیر متفاوت از نانوسیلیس که جایگزین بخشی از سیمان شده و درصد های حجمی مختلف الیاف شیشه استفاده کردند. مقادیر جایگزینی نانوسیلیس به جای سیمان ۲٪ و ۴٪ بودند. میزان الیاف شیشه استفاده شده هم ۰/۳۵٪، ۰/۷٪، ۱٪ و ۱/۵٪ از حجم کل بتن ساخته شده، بودند. آزمایش های جریان اسلامپ، زمان رسیدن به قطر (T₅₀)، جعبه L و قیف V برای بررسی خواص بتن در حالت تازه انجام شدند. نتایج به دست آمده نشان دادند که با افزایش درصد حجم الیاف شیشه، قطر جریان اسلامپ کاهش پیدا می کند که با افزودن نانو سیلیس به الیاف شیشه این کاهش بیشتر می شود. همچنین این رویه باعث افزایش زمان برای قیف V و T₅₀ شده است و نسبت ارتفاع جعبه L با افزایش مقدار نانو سیلیس و الیاف شیشه کاهش پیدا کرده است.

حاوی میکروسیلیس و خاکستر بادی بر اساس وزن و مقاومت با استفاده از الگوریتم های فرا ابتکاری ارائه نموده و مدل های بررسی شده مقادیر منتخب را گزارش نمودند [۱۸].

با افزایش مقدار پودر سنگ، لزجت خمیری کاهش یافته است؛ این نتیجه نشان دهنده آن است که افزودنی اصلاح کننده لزجت اثر بهتری بر لزجت خمیری دارد، بنابراین مطابق با دستور کار EFNARC [۱۹] که اصلاح کننده لزجت را به عنوان نقش کلیدی در بتن خودتراکم معرفی می کند، تطابق دارد. اثر دما بر مخلوط با نسبت زیاد آب به پودر، متفاوت از مخلوط با نسبت کم آب به پودر هست و همچنین بسته به ترکیبات مخلوط مثل فوق روان کننده این اثر متفاوت است. در دمای پایین، یک مخلوط غنی از پودر، عملکرد خوبی را نشان می دهد، ولی در درجه حرارت بالا مستعد شکست هست. با توجه به سفت شدن سریعتر بتن خودتراکم نوع پودری، می توان بیان کرد که تغییرات مورفولوژی ذرات ناشی از واکنش هیدراتاسیون، سبب کاهش تحرک ذرات در میان یکدیگر می شود و متراکم تر شدن ذرات در ابتدا، اثر منفی در حفظ کارایی دارد. به طور کلی بتن خودتراکم نوع پودری به طور قابل توجهی زمان گیرش را تسریع می بخشد؛ این دلیل ممکن است به خاطر کاهش نسبت آب به پودر و همچنین استفاده از پرکننده سنگ آهک باشد که به گیرش، سرعت می بخشد؛ بنابراین برای حمل و نقل های کوتاه و پیشرفت سریع در محل ساخت و ساز، بتن خودتراکم غنی شده پودری را می توان بهترین انتخاب در نظر گرفت [۲۰-۲۱].

دمای محیط ایده آل برای بتن ریزی از ۲۰ تا ۲۳ درجه سانتی گراد تغییر می کند [۲۲]. افزایش دما به دلیل تبخیر سریع آب اختلاط و شتاب هیدراتاسیون سیمان سبب از دست دادن خواص جریان و سخت شدن بتن ریزی می شود. این مشکلات را می توان با استفاده از افزودنی شیمیایی، نوع سیمان، نسبت آب به پودر و تغییر در دیگر اجزای تشکیل دهنده بتن کاهش داد. از آنجا که دما، نقش مهمی در تعیین اجزای بتن خودتراکم مثل فوق روان کننده، مقدار سیمان، افزودنی اصلاح کننده لزجت و پودر سنگ و تخمین تغییراتی که ممکن است در رئولوژی اثرگذار باشد، دارد باید در نظر گرفته شود. تغییرات در تنش جاری شدن و لزجت خمیری مخلوط با درجه حرارت، نشان از روند مبهم وابسته به فوق روان کننده و اجزای بتن خودتراکم هست [۲۳-۲۴].

انجمن بتن آمریکا، در دستور کار بتن ریزی در هوای گرم اعلام نمود که دمای بتن ریزی در محل ساخت، نباید از ۲۷ درجه سانتی گراد تجاوز کند [۲۵]. اما این دما همیشه امکان پذیر نیست، به ویژه برای پروژه هایی با مقیاس بزرگتر که بتن ریزی شان پیوسته هست. حتی اگر پیشگیری های مناسبی برای

1 Polyvinyl alcohol (PVA)

2 Guneyisi et al.

۰.۳۳٪، ۴.۵٪ و ۱۰.۶٪ افزایش یافتند.

میرولد و همکاران [۴۲] در نسبت آب به سیمان یکسان و در صورت استفاده از پوزولان در مخلوط‌های بتن، بیان کردند که ضریب انتشارپذیری مخلوط‌های بتنی بدون پوزولان در ناحیه مغروق در آب دریا کاهش می‌یابد. با توجه به حساسیت بتن خودتراکم در شرایط محیطی و کارگاهی و نیاز به مصالح سنگی با کیفیت برای خودتراکم شدن، سبب عدم تمایل پیمانکاران، خصوصاً پیمانکاران پروژه‌های کوچک به ریسک، در این پروژه‌ها شده است؛ به‌همین دلیل در این مقاله سعی شده است تا ابتدا طرح مخلوط‌های آزمایشگاهی و سپس طرح مخلوط‌هایی مناسب اجراء، به صورت ساده و کارگاهی برای بتن خودتراکم با تغییر درصد سنگدانه‌ها برای مصالح بومی و ملی ارائه گردد. به همین منظور آزمایش‌های مربوط به خواص بتن در حالات تازه و سخت‌شده با استفاده از طرح مخلوط راهنما از موسسه آی‌کار^۱ و با روش سعی و خطا بر روی تمام اجزاء آن برای رسیدن به طرح مخلوط پایه در چارچوب آیین‌نامه‌های معتبر بتن خودتراکم انجام گرفت. بنابراین برای بررسی تاثیر درصدهای مختلف میزان سنگدانه‌های مصرفی بر خواص بتن خودتراکم در حالات تازه و سخت‌شده، ۹ طرح مخلوط نهایی ساخته شدند که فقط درصد سنگدانه در آنها تغییر داده شد و بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته شدند.

۲- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱- سیمان

با توجه به اینکه در بتن‌های خودتراکم، حجم خمیر سیمان نسبت به بتن‌های معمولی بیشتر است، انتخاب نوع سیمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع پنج تولید کارخانه سیمان بهبهان استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان طبق سایت کارخانه سیمان بهبهان در جدول ۱ داده شده‌اند.

۲-۲- پودر سنگ آهک

یکی از مواد لازم برای تأمین لزجت مناسب در بتن خودتراکم پودر سنگ آهک است. پرکننده‌هایی چون پودر سنگ آهک رد شده از الک ۱۲۰ به دلیل دارا بودن ذرات بسیار ریز، باعث پر کردن فضای خالی و حفره‌های موجود بین ذرات سیمان شده، لذا باعث کاهش تخلخل و افزایش درجه توپری بتن می‌گردند. این دسته از عناصر پرکننده به دلیل دارا بودن سطح

شریفی و همکاران [۳۳] نیز با کمک روش تاگوچی به بررسی طرح مخلوط بهینه بتن خودتراکم با مقاومت بالا پرداختند؛ آنها مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار را مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان به دست آوردند. همچنین اگنوجوکو و اواری [۳۴] با روش تاگوچی به تاثیر مصالح بر روی خواص بتن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین تاثیر بر روی مقاومت فشاری بتن مربوط به میزان سیمان و نسبت آب به سیمان بوده است، بعد از آن تاثیر میزان فوق روان‌کننده مهم بوده و در نهایت تاثیر میزان ریزدانه‌ها و درشت دانه‌ها بوده است.

سیواکومار و همکاران [۳۵] گزارش نمود که برای رسیدن به روانی بالا و انسجام کافی باید افزودنی فوق‌روان‌کننده و مقدار زیادی مواد پودری (فیلر) به همراه سیمان استفاده شود.

طاهری امیری و همکاران [۳۶] برای بهینه‌سازی مبتنی بر راهکارهای فرا ابتکاری، الگوریتم جستجوی کلاغ و الگوریتم ژنتیک را به‌عنوان راهکارهای پردازشی محاسباتی توسعه دادند. به همین این منظور، ۶۷ طرح مخلوط بتن خودتراکم الیافی شامل آب (۱۹۵-۱۳۷/۲)، سیمان (۵۲۰-۳۲۵/۵)، درشت‌دانه (۹۲۰-۷۲۲)، ریزدانه (۹۶۰-۸۰۴/۹)، نانوسیلیس (۴۹/۶-۰)، پودر سنگ آهک (۲۸۸/۹-۰)، فوق‌روان‌کننده (۱۰/۵۰-۱/۷۵) کیلوگرم بر متر مکعب و الیاف (۰-۰/۹ درصد حجمی بتن)، برای طراحی مخلوط بهینه استفاده شدند. در این مطالعه برای فرموله شدن مساله بهینه‌سازی، تابع هدف مقاومت فشاری بتن بر پایه روش رگرسیون چندگانه خطی توسعه داده شد.

مظلوم و همکاران [۳۷] با جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس در تمام طرح‌ها افزایش در مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی را گزارش نمودند. مقاومت فشاری، کششی و خمشی در سن ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نسبت به نمونه بدون میکروسیلیس حدود ۳۵٪، ۲۴٪ و ۲۵٪ افزایش داشتند. پاچیده و همکاران [۳۸] به‌منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی و کاهش عیار سیمان، از پوزولان به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده کردند. آنها بیان کردند که استفاده از پوزولان مقاومت‌های فشاری و کششی بتن را بهبود می‌بخشد.

مظلوم و صالحی [۳۹] گزارش نمودند که افزودن میکروسیلیس به بتن باعث تسریع هیدراتاسیون و افزایش مقاومت فشاری می‌شود.

پاچیده و همکاران [۴۰-۴۱] در تحقیقی تاثیر سرباره کوره آهن‌گدازی و میکروسیلیس را در دماهای مختلف بررسی کردند و ادعان داشتند که در دماهای تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی

جدول ۱. مشخصات شیمیایی و فیزیکی مواد متشکله سیمان و پودر سنگ آهک

Table 1. Chemical and physical properties of cement and limestone powder

پودر سنگ آهک	سیمان	مشخصات شیمیایی و فیزیکی
۲/۸۰	۲۲/۲۳	SiO ₂
۰/۳۵	۴/۸۹	Al ₂ O ₃
۰/۵	۵/۴۵	Fe ₂ O ₃
۱/۸۰	۲/۸۹	MgO
۵۱/۲۲	۶۰/۱۸	CaO
۱/۲۴	۳/۰۰	SO ₃
-	۰/۶۷	K ₂ O
۴۲/۰۶	۱/۱۱	افت حرارتی
۲/۸۰	۰/۷۴	باقی مانده نامحلول
۲۶۶۰	۳۰۵۰	وزن مخصوص دانه‌ای (kg/m ³)

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی

Table 2. Physical characteristics of aggregates used

درصد جذب آب	جرم حجمی دانه‌ای (g/m ³)	سنگدانه‌ها
۰/۸۵۶	۲/۶۲۴	شن
۳/۹	۲/۵۷	ماسه

آزمایش توصیفی با استفاده از اسیدکلریدریک ۰/۱ نرمال آزمایش شدند؛ به این صورت که وقتی یک قطره از اسید بر روی سنگدانه ریخته شود، اگر سنگدانه دارای آهک قابل توجهی باشد، باعث تجزیه سنگدانه آهکی و هم چنین قطره اسید با تولید حباب فوران از گازهای کربن دی‌اکسید مشاهده می‌گردد، که مقدار جوشش آن بستگی به منافذ و سطح مقطع سنگدانه دارد؛ حال اگر مجدد اسید در همان نقطه ریخته شود و تولید گاز و حباب نکند به دلیل وجود مقدار کم سنگ‌آهک می‌باشد. مشاهدات در این آزمایش نشان می‌دهد که درصد کمی از سنگدانه مصرفی از آهک بوده که مشخصات فیزیکی آن‌ها در جدول ۲ و شکل ۱ نشان داده شده است.

ویژه بسیار زیاد، اصطکاک بین دانه‌ای را افزایش داده و باعث افزایش لزجت بتن می‌گردند، لذا استفاده از فوق روان کننده‌ها به منظور افزایش روانی بتن در ساخت چنین بتن‌هایی اجتناب‌ناپذیر است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی پودر سنگ آهک در جدول ۱ ارائه شده است.

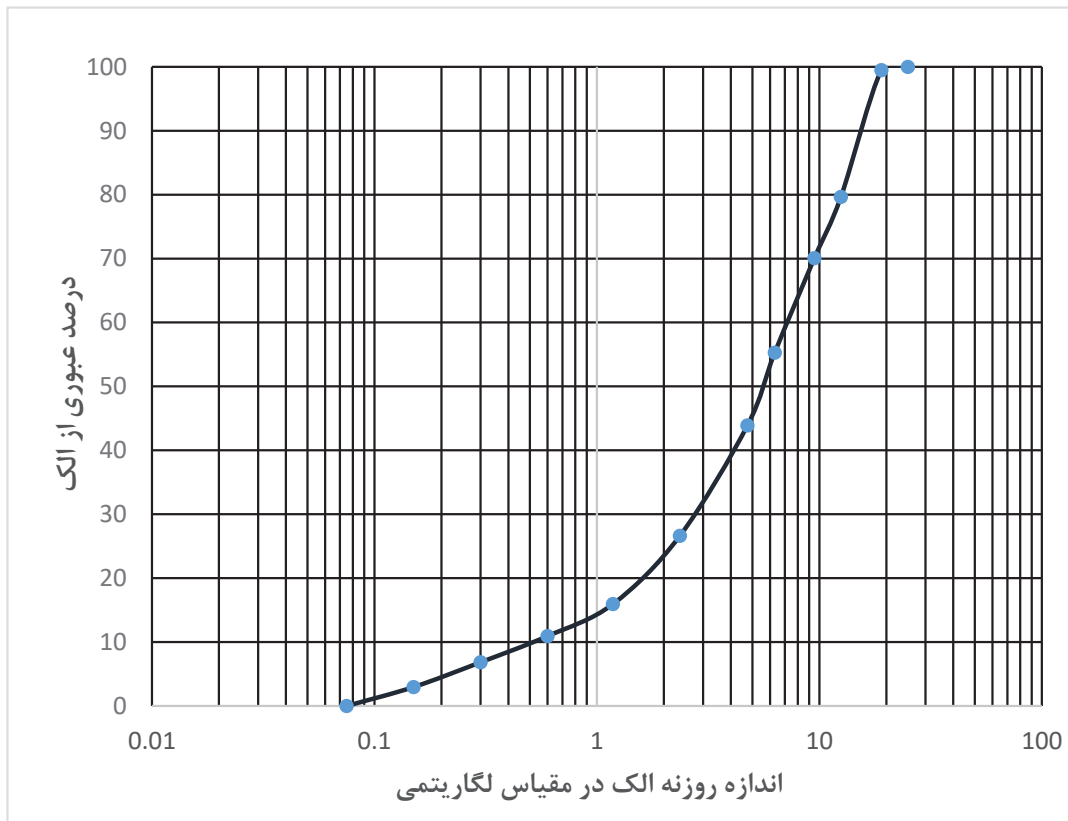
۲-۳- سنگدانه‌ها

سنگدانه‌های درشت از نوع شکسته و با حداکثر اندازه ۱۹/۵ میلی‌متر و سنگدانه‌های ریز مصرفی با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر با مدول نرمی برابر ۳/۵ از نوع طبیعی شسته و از معادن بهبهان تأمین شده است. شکل سنگدانه‌های استفاده شده تیز گوشه می‌باشد. هر سه نوع سنگدانه طبق



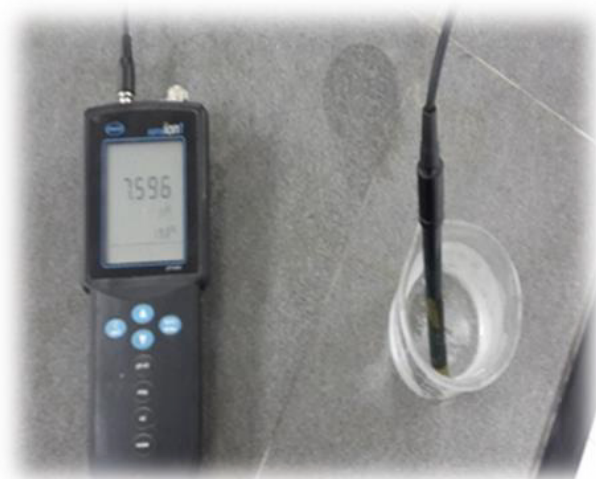
شکل ۱. الف: تأثیر اسید کلریدریک ۱/۰۱ نرمال بر روی سنگدانه‌های درشت (شن)

Fig. 1. a: The effect of 0.1 normal, hydrochloric acid on coarse aggregates (gravel)



شکل ۱. ب: منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مخلوط مصرفی

Fig. 1. b: Grain size distribution curve of aggregates used



شکل ۲. آزمایش تعیین pH و غلظت یون کلرید

Fig. 2. Experiment to determine pH and chloride ion concentration

جدول ۳. خواص فوق‌روان‌کننده و افزودنی اصلاح‌کننده لزجت

Table 3. properties of super-plasticizer and viscosity modifier additive

غلظت (%)	قلیائیت (pH)	لزجت (Pa.s)	وزن مخصوص (g/cm ³)	افزودنی شیمیایی
۲۰	-	-	۱/۱۰	فوق‌روان‌کننده
-	۱۲-۱۱	۵۵۰۰-۳۰۰۰	۱/۰۷	اصلاح‌کننده لزجت

گزینه در ساخت بتن، استفاده از فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات با نام تجاری (HR)PC۵۰۰۰ مطابق با استاندارد اروپایی EN-۹۳۴-۲ است. برای ساخت بتن خودتراکم از پودر اصلاح‌کننده لزجت که از خانواده میکروبال پلی‌ساکارید که پودری سفیدرنگ است، استفاده گردید. جدول ۳ مشخصات عامل لزجت و خواص فوق‌روان‌کننده و اشکال ۳-الف، ۳-ب، ۳-ج تاثیر فوق‌روان‌کننده و اصلاح‌کننده لزجت بر ملات را نشان می‌دهند.

۳- نسبت‌های مخلوط

برای تعیین تخمین اولیه از نسبت اجزای مخلوط بتن خودتراکم از طرح مخلوط شورای تحقیقات کشاورزی هندوستان^۱ استفاده گردید و سپس بر اساس اهداف منظور نسبت‌های مخلوط تصحیح شدند [۳۰]. جدول ۴ جزئیات طرح اختلاط ICAR را نشان می‌دهد.

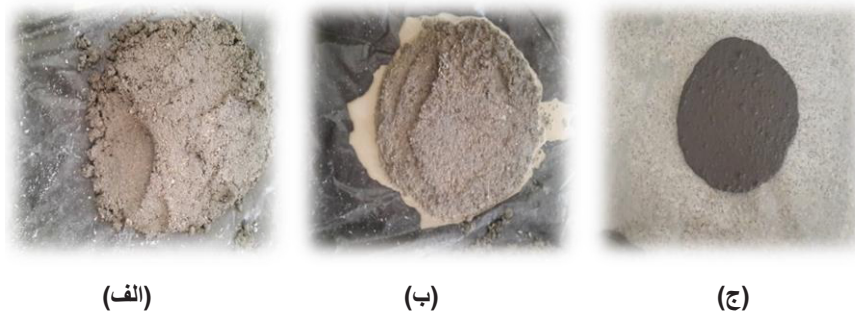
۲-۴ آب

آب مصرفی برای ساخت نمونه‌ها از نوع آشامیدنی شهر بهبهان با میزان pH به مقدار ۷/۵۹، دمای آزمایشگاه ۱۹/۸ درجه سانتی‌گراد و غلظت یون کلرید در محدوده (۲۸۰-۱۶۰) ppm در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲-۵ افزودنی‌های شیمیایی

به‌منظور رسیدن به کارایی لازم در مخلوط‌ها، با توجه به تأثیر مقدار آب اضافی بر روی بتن از جمله آب‌انداختگی، جاداشدگی و مقاومت، استفاده و انتخاب نوع روان‌کننده به منظور کاهش اثر منفی آب زیاد بر روی خواص بتن تازه خودتراکم بسیار اهمیت دارد. بیشترین تأثیر فوق‌روان‌کننده بر خواص رئولوژی بتن خودتراکم، روی تنش جاریشدن آن است و تأثیر چندانی بر لزجت خمیری ندارد [۱۰]. چند پارامتر اصلی در انتخاب نوع روان‌کننده شامل میزان کارایی لازم، درصد مصرفی، سازگاری با سیمان پرتلند و نوع روان‌کننده است که بعد از بررسی تأثیر و تغییر چند نوع روان‌کننده بهترین

1 Indian Council of Agricultural Research (ICAR)



شکل ۳. الف: ملات بدون افزودنی؛ ب: تأثیر فوق روان کننده بر ملات؛ ج: تأثیر افزودنی اصلاح کننده لزجت بر ملات حاوی فوق روان کننده

Fig. 3. a: Mortar without additives; b: Effect of super-plasticizer on mortar; c: The effect of viscosity modifier additive on mortar containing super-plasticizer

جدول ۴. جزئیات طرح اختلاط ICAR

Table 4. Details of the ICAR mixing design

مقدار (kg/m ³)	اجزای بتن
۴۰۰	سیمان
۸۹۳	ماسه
۷۳۱	شن
۲۰۰	آب
۱۷۵	پودر سنگ
۶	فوق روان کننده (۱/۵٪ جرم سیمان)
متغیر	افزودنی اصلاح کننده لزجت

۳-۱- سعی و خطا برای ساخت بتن خودتراکم

در اولین مرحله این تحقیق سعی شد با توجه به طرح مخلوطی که از ICAR گرفته شده بود، و با استفاده از مصالح موجود بتن خودتراکی ساخته شود که در چارچوب آیین نامه های معتبر باشد و حدود قابل قبول استاندارد را در آزمایش ها رعایت کند؛ همان طور که در شکل ۴ مشاهده می گردد، به نتیجه دلخواه نرسید، سپس با بررسی و آزمایش بر روی تمام اجزاء، شناخت مواد، خواص، میزان سازگاری آنها و تاثیر آنها بر یکدیگر شروع به ساخت طرح مخلوط بتن خودتراکم پایه گردید. بعد از آزمایش های مختلف بر تاثیر مواد مصرفی و میزان مصرف آنها، در نهایت بهترین بتن خودتراکم مرجع با سعی و خطا ساخته شد و برای مراحل بعدی استفاده گردید.

۳-۲- طرح اختلاطها بر اساس تغییر درصد سنگدانه ها

از این طرح مخلوط که نسبت اجزای آن در جدول ۵ داده شده است، در شرایط یکسان، ۹ بار ساخته شده و فقط نسبت سنگدانه های ریز به کل سنگدانه های مصرفی (F/T) در آنها تغییر می کند. نتایج آزمایش های مختلف بتن ها در حالات تازه و سخت شده به منظور ارزیابی درصدهای مختلف سنگدانه ها و یافتن مقدار بهینه آن اندازه گیری گردید.

۳-۳- مراحل و روش های اختلاط بتن های خودتراکم

با توجه به موضوع تحقیق، ضروری است که دقت لازم در همه مراحل ساخت بتن ها انجام شود. بنابراین سعی گردید تا مراحل ساخت برای تمام بتن ها تا جای ممکن به طور یکسان انجام شود. تمهیدات در نظر گرفته



شکل ۴. آزمایش جریان اسلامپ، نمونه ساخته شده براساس طرح مخلوط ICAR

Fig. 4. Slump flow test, sample built based on ICAR mixture design

جدول ۵. طرح اختلاطها بر اساس تغییر درصد سنگدانه‌ها

Table 5. Mixing design based on the change of percentage of aggregates

F/T (%)	۰/۷۰	۰/۶۵	۰/۶۰	۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۴۵	۰/۴۰	۰/۳۵	۰/۳۰
سیمان (kg)	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
آب (lit)	۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶
پودر سنگ (kg)	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵
ماسه (kg)	۱۰۹۸	۱۰۱۹	۹۴۱	۸۶۲	۷۸۴	۷۰۶	۶۲۷	۵۴۹	۴۷۰
شن نخودی (kg)	۳۲۹	۳۸۴	۴۳۹	۴۹۴	۵۴۹	۶۰۳	۶۵۹	۷۱۳	۷۶۹
شن بادامی (kg)	۱۴۱	۱۶۵	۱۸۸	۲۱۲	۲۳۵	۲۵۹	۲۸۲	۳۰۶	۳۲۹
روان کننده (lit)	۶/۴۰۰	۶/۴۰۰	۶/۴۰۰	۶/۴۰۰	۶/۴۰۰	۶/۴۰۰	۶/۴۰۰	۶/۴۰۰	۶/۴۰۰
VMA (g)	۱۶۶	۱۶۶	۱۶۶	۱۶۶	۱۶۶	۱۶۶	۱۶۶	۱۶۶	۱۶۶

برای ساخت بتن خودتراکم، ابتدا سیمان و پودر سنگ را درون دستگاه ریخته و اجازه داده شد به مدت ۳۰ ثانیه به خوبی مخلوط شوند، بعد ۳/۴ آب را با بخشی از فوق‌روان‌کننده به پودر اضافه کرده و به مدت ۱ دقیقه مخلوط شدند تا یک ژل یکنواختی به دست آید؛ بعد از این مدت تمام مصالح سنگی را درون همزن ریخته تا به مدت ۲ دقیقه مخلوط شوند. در طول این مدت بقیه فوق‌روان‌کننده و آب را به مخلوط اضافه کرده و در مرحله آخر در صورت نیاز پودر VMA را اضافه و عمل مخلوط کردن به مدت ۵ دقیقه ادامه پیدا کرد. در طول این مدت اختلاط، ۱ دقیقه برای مشاهده کیفیت ظاهری و میزان حباب هوا لحاظ گردید.

شده برای این موضوع، شامل یکسان بودن تکنسین‌های انجام آزمایش‌ها، ساخت بتن‌های هر سری در فواصل زمانی نسبتاً کوتاه، انتخاب مصالح از پیمان‌های یکسان، دقت در رطوبت مصالح سنگی و نیز طی کردن مراحل ساخت و انجام آزمایش‌های یکسان برای هر بتن می‌باشند. به این ترتیب قبل از شروع به ساخت بتن، ابتدا رطوبت سنگدانه‌های ریز و درشت تعیین شدند. براساس نتایج رطوبت سنگدانه‌ها، نسبت‌های اجزای مخلوط که در حالت اشباع با سطح خشک مشخص شده بودند، تصحیح گردیدند. در نهایت نسبت‌های اجزاء برای ساخت بتن با حجم ۰/۰۳ مترمکعب بر اساس طرح مخلوط تصحیح شده، محاسبه شدند و برای ساخت مخلوط بتن به‌طور دقیق توزین گردیدند.

۳-۴- تحلیل داده‌ها

به منظور تعیین درجه ارتباط بین آزمایش‌های مختلف و سنگدانه‌ها از تحلیل همبستگی پیرسون^۱ استفاده شد. نرمال بودن داده‌ها از طریق آزمون کلموگروف-اسمیرنوف^۲ بررسی شد. همگنی واریانس بین طرح مخلوط‌ها از طریق آزمون لون^۳ بررسی گردید. برای مقایسه کلی بین طرح مخلوط‌ها از تحلیل واریانس یکطرفه^۴ و برای مقایسه‌های جزئی‌تر از آزمون چند دامنه جدید دانکن^۵ استفاده شد. به منظور رتبه‌بندی طرح مخلوط‌ها، از الگوریتم تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس^۶ استفاده بهره‌گرفته شد. الگوریتم تاپسیس در ۸ مرحله به شرح زیر انجام شد:

اول، ساخت ماتریس تصمیم با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده و ماتریس داده بر اساس n شاخص و m گزینه؛ دوم، بدون مقیاس کردن ماتریس تصمیم؛ سوم، وزن دهی به ماتریس بدون مقیاس شده؛ چهارم؛ تبدیل ماتریس تصمیم مرحله دوم به ماتریس بدون مقیاس وزن دهی شده؛ پنجم؛ تعیین راه حل مطلوب مثبت با تعیین حداکثر ارزش و راه حل مطلوب منفی با تعیین حداقل ارزش؛ ششم؛ محاسبه فاصله مطلوب مثبت و منفی بر اساس فاصله اقلیدسی؛ هفتم؛ محاسبه نزدیکی نسبی به راه حل مطلوب؛ هشتم؛ رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس نزدیکی آنها به راه حل مطلوب [۳۱].

۴- روش انجام آزمایش‌ها

۴-۱- آزمایش‌های بتن تازه

برای بررسی کامل وضعیت بتن‌های خودتراکم در حالت تازه به صورت کارگاهی، ابتدا آزمایش‌های گوناگون برای تعیین هر یک از خواص اصلی بتن خودتراکم و رسیدن به یک طرح مخلوط مرجع در آزمایشگاه بعد از سعی و خطاهای مختلف انجام گرفت؛ بعد از آن برای بررسی قابلیت پرکنندگی، آزمایش‌های جریان اسلامپ، T_c ، قیف V ، بررسی قابلیت عبور آزمایش جعبه L و حلقه J انجام شدند. ساخت نمونه‌های اجرایی در فضای آزاد انجام گرفت؛ البته سرعت باد و دمای هوا از چالش‌های پیش رو بود؛ سعی گردید تا تمام آزمایش‌ها با شرایط یکسان انجام شوند تا خطای ممکن کمینه گردد. این روند کار در اشکال ۵-الف تا ۵-د مربوط به آزمایش‌های بررسی رئولوژی بتن خودتراکم نشان داده شده است.

۴-۱-۱- آزمایش جریان اسلامپ و T_{50}

این آزمایش از پرکاربردترین آزمایش‌های بتن خودتراکم بوده و روشی برای سنجش توانایی پرکنندگی این نوع بتن است. لازم به ذکر است که درحین انجام آزمایش هرگونه جداشدگی و آب‌انداختگی باید بررسی شود. شکل ۵-الف، وسیله آزمایش اسلامپ ساخته شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

۴-۱-۲- آزمایش قیف V

این آزمایش روشی برای سنجش توانایی پرکنندگی بتن خود تراکم است. در این آزمایش زمان از عوامل مهمی است که باید به دقت به آن توجه داشت. پخش‌شدگی در این آزمایش درجه وابستگی تا چسبناکی مخلوط بتن را نشان می‌دهد. شکل ۵-د، وسیله آزمایش قیف V ساخته شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

۴-۱-۳- آزمایش جعبه L

این آزمایش برای سنجش توانایی عبور بتن خودتراکم است. در این آزمایش جداشدگی یا عدم جداشدگی به‌وضوح دیده می‌شود. شکل ۵-ب، دستگاه آزمایش جعبه L ساخته شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

۴-۱-۴- آزمایش حلقه J

این آزمایش برای سنجش توانایی پرکنندگی و قابلیت عبور بتن خودتراکم است. همچنین با توجه به جریان پخش شدن، زمان T_{50} و درجه بلوکه شدن می‌توان مقاومت بتن خودتراکم در برابر جداشدگی را تعیین نمود. جریان پخش شدن این آزمایش نشان می‌دهد که توانایی پرکنندگی و عبور بتن از میان میلگردها (که نوعی شبیه‌سازی در مقاطع دارای میلگرد است) به چه میزان است. شکل ۵-ج، ابزار آزمایش حلقه J ساخته شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

۴-۲- آزمایش‌های بتن سخت شده

۴-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری

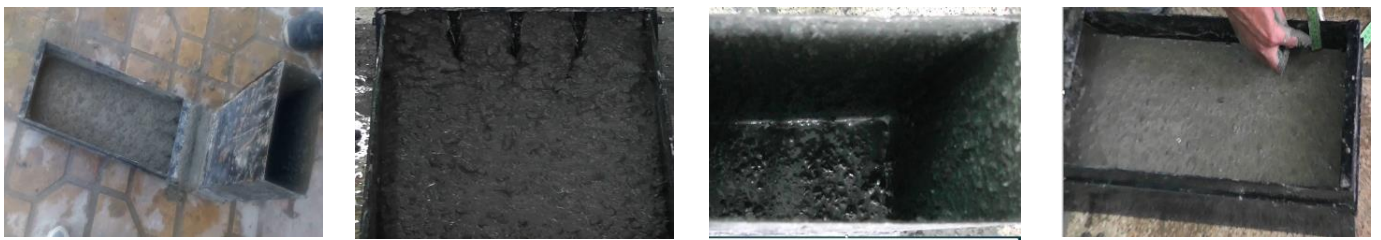
مقاومت فشاری بتن‌ها بر اساس استاندارد BS 1881: PART 116 [۳۲] با استفاده از ۶ نمونه مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری انجام شد. این نمونه‌گیری بدون اعمال هرگونه انرژی انجام شده و نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا زمان انجام آزمایش مطابق استاندارد مذکور تحت عمل‌آوری قرار گرفتند. اشکال ۷-الف و ۷-ب نحوه انجام آزمایش مقاومت فشاری و عمل‌آوری نمونه‌ها را نشان می‌دهند.

- 1 Pearson
- 2 Kolmogorov-Smirnov
- 3 Levene
- 4 One-way ANOVA
- 5 Duncan multiple range test
- 6 TOPSIS algorithm



(الف)

(a)



(ب)

(b)



(ج)

(c)



شکل ۵. الف- مراحل آزمایش جریان اسلامپ، ب- مراحل آزمایش جعبه L، مراحل آزمایش حلقه J، د- مراحل آزمایش قیف V

Fig. 5. a: Slump flow test steps, b: Test stages of V funnel, c: J ring test steps, d: Test steps of the L box



شکل ۶. - بررسی سرعت باد و دما برای ایجاد شرایط تقریباً یکسان ساخت بتن خودتراکم

Fig. 6: Checking the wind speed and temperature to create almost the same conditions for making SCC



(ب)

(الف)

شکل ۷. الف- آزمایش مقاومت فشاری، ب- عمل آوری نمونه‌ها

Fig. 7. a: Compressive strength test , b: Curing of specimens;

۵- نتایج

۵-۱- فاز یک

در این مرحله با سعی و خطا و ساخت ۲۸ طرح مخلوط بتن و تغییر در اجزاء مختلف مصالح مصرفی به خصوص درصد های شن ۳/۴ و ۳/۸ اینچ در مصالح درشت دانه و مقدار بهینه فوق روان کننده برای ساخت بتن خودتراکم و رسیدن به حدود قابل قبول، خواص بتن در حالات تازه و سخت شده بررسی شد. در تمام مراحل این تحقیق سعی شد تا بتوان تمام اجزاء اختلاط بتن خودتراکم بجز مصالح سنگی را جهت کاربردهای مختلف ثابت در نظر گرفت؛ در نهایت بتوان طرح مخلوط های اجرایی برای پروژه ها به دست آورد. نکته قابل توجه این تحقیق رسیدن به طرح اختلاطی است که تمام خواص بتن خودتراکم در حالات تازه و سخت شده را همزمان باهم دارد.

۴-۲-۲- آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن

این روش آزمایش با اعمال نیروی فشاری قطری بر نمونه استوانه ای استاندارد بتن با سرعت ۰/۱۱ تا ۰/۲۳ مگاپاسکال در ثانیه طبق استاندارد ASTM C۴۹۶ انجام می شود. مقاومت کششی از رابطه $\frac{2P}{\pi LD}$ محاسبه می شود. در این رابطه P بیشینه نیروی کششی قابل تحمل توسط نمونه بر حسب نیوتن، L و D نیز به ترتیب بیانگر طول و قطر نمونه استاندارد به ابعاد ۳۰۰ و ۱۵۰ میلی متر هستند. اشکال ۷- الف و ۷- ب نحوه انجام آزمایش کششی دو نیم شدن را نشان می دهند.



(ب)



(الف)

شکل ۸. الف - آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن توسط جک بتن شکن بر نمونه طرح مخلوط $F/T=60\%$ ، ب - نمونه شکسته شده در آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن توسط جک بتن شکن بر نمونه طرح مخلوط $F/T=60\%$

Fig. 8. Testing the split tensile strength of concrete breaker jack on the mix design specimen with $F/T=60\%$, b: The specimen broken in the split tensile strength test of concrete breaker jack on the mix design specimen with $F/T=60\%$

۷۰٪ در حرف انگلیسی e با هم مشترک، شبیه هم و کمترین مقدار T_{50} را دارند در نتیجه هر کدام از آن‌ها می‌تواند در این مرحله انتخاب و ملاک کار قرار بگیرند.

در شکل ۱۱، از نظر ظاهری و میانگین، کمترین میزان V_{funnel} در طرح مخلوط $F/T=70\%$ می‌باشد. از نظر آماری طرح مخلوط‌های ۶۵٪، ۷۰٪ در حرف انگلیسی f با هم مشترک، شبیه هم و کمترین مقدار V_{funnel} را دارند در نتیجه هر کدام از آن‌ها می‌تواند در این مرحله انتخاب و ملاک کار قرار بگیرند.

در شکل ۱۲، از نظر ظاهری و میانگین، بیشترین میزان L_{box} در طرح مخلوط $F/T=70\%$ می‌باشد. از نظر آماری طرح مخلوط‌های ۵۰٪، ۵۵٪، ۶۰٪، ۶۵٪، ۷۰٪ در حرف انگلیسی a با هم مشترک، شبیه هم و بیشترین میزان L_{box} را دارند در نتیجه هر کدام از آن‌ها می‌تواند در این مرحله انتخاب و ملاک کار قرار بگیرند.

در شکل ۱۳، از نظر ظاهری و میانگین، کمترین میزان J_{ring} در طرح مخلوط $F/T=70\%$ می‌باشد. از نظر آماری طرح مخلوط‌های ۴۵٪، ۵۰٪، ۵۵٪، ۶۰٪، ۶۵٪، ۷۰٪ در حرف انگلیسی c با هم مشترک، شبیه هم و کمترین میزان J_{ring} را دارند در نتیجه هر کدام از آن‌ها می‌تواند در این مرحله انتخاب و ملاک کار قرار بگیرند. در شکل ۱۴، از نظر ظاهری و میانگین، بیشترین میزان مقاومت فشاری ۷ روزه، در طرح مخلوط $F/T=40\%$ می‌باشد. از نظر آماری طرح مخلوط‌های ۳۵٪، ۴۰٪، ۴۵٪، ۵۰٪، ۵۵٪، ۶۰٪ در حرف انگلیسی a با هم مشترک، شبیه هم و بیشترین میزان مقاومت فشاری ۷ روزه را دارند در نتیجه هر کدام از آن‌ها می‌تواند در این مرحله انتخاب و ملاک کار قرار بگیرند.

۵-۲- فاز دو

در این فاز به بررسی خواص بتن خودتراکم در حالات تازه و سخت شده با تغییر در میزان درصدهای ۹ گانه مختلف سنگدانه‌های مصرفی پرداخته شد. در این گام ۹ سری بتن خودتراکم با درصدهای ۳۰٪، ۳۵٪، ۴۰٪، ۴۵٪، ۵۰٪، ۵۵٪، ۶۰٪، ۶۵٪ و ۷۰٪ مختلف سنگدانه ساخته و برای هر درصد سنگدانه سه بار ساخت بتن تکرار شد که در آنها تمام اجزاء بجز مصالح سنگی ثابت بودند.

۵-۳- تفسیر نتایج

برای مقایسه بین طرح مخلوط‌های ۹ گانه در آزمایش‌های بتن خودتراکم از تحلیل واریانس یک‌طرفه (جدول ۶) و آزمون چند دامنه جدید دانکن استفاده شد (اشکال ۹ تا ۱۸).

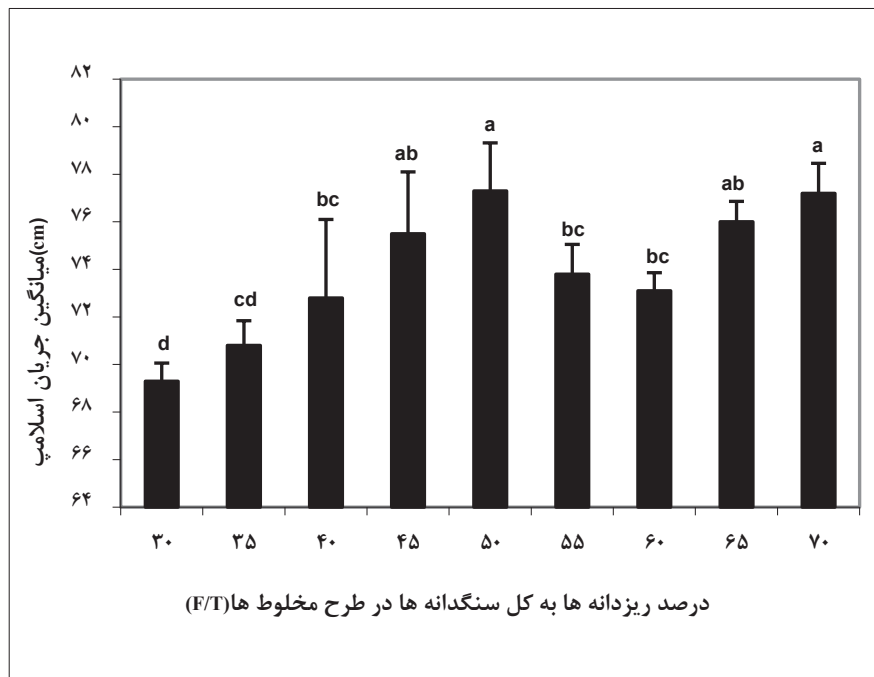
در شکل ۹، از نظر ظاهری و میانگین، بیشترین میزان جریان اسلامپ، در طرح مخلوط $F/T=50\%$ می‌باشد؛ ولی مطلق نیست؛ یعنی زمانی می‌توان آن را صد درصد بیشترین منظور کرد که، حرف انگلیسی بالای ستون ۵۰٪ (نشانهگر اختلاف معنی‌دار در سطح خطای ۵٪) با هیچ کدام از ستون‌های طرح‌مخلوط‌ها یکی نباشد. در شکل ۸ ابتدا ستون ۵۰٪ را ملاک کار قرار داده و بعد بقیه ستون‌ها را نسبت به آن مقایسه نموده و مشاهده می‌گردد که طرح مخلوط‌های ۴۵٪، ۵۰٪، ۶۵٪، ۷۰٪ در حرف انگلیسی a با هم مشترک و از نظر آماری شبیه هم و بیشترین میزان جریان اسلامپ را دارند در نتیجه هر کدام از آن‌ها می‌تواند در این مرحله انتخاب و ملاک کار قرار بگیرند.

در شکل ۱۰، از نظر ظاهری و میانگین، کمترین میزان T_{50} در طرح مخلوط $F/T=70\%$ می‌باشد. از نظر آماری طرح مخلوط‌های ۵۰٪، ۶۵٪،

جدول ۶. نتایج کلی تحلیل واریانس یک طرفه طرح مخلوطها برای آزمایشهای بتن در حالات تازه و سخت شده

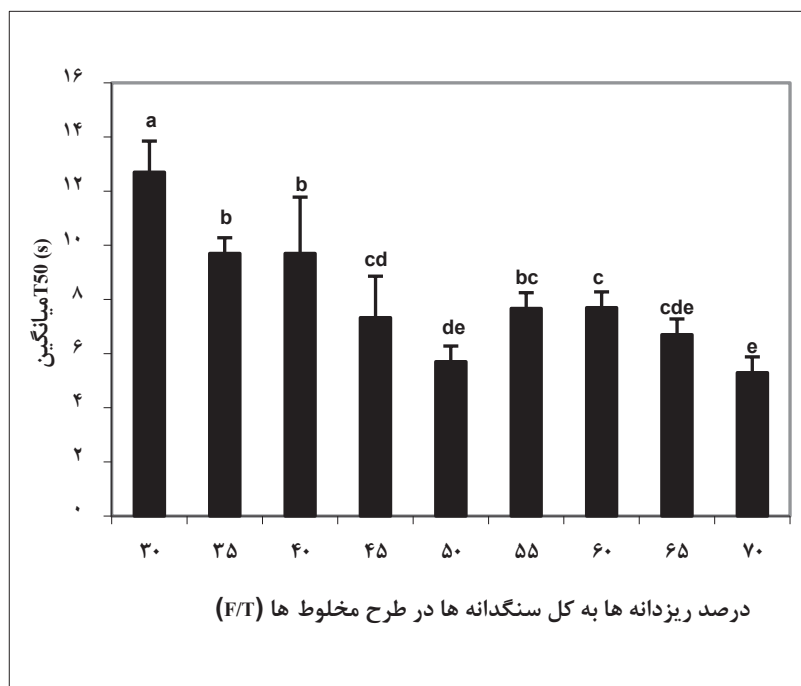
Table 6. General results of one-way variance analysis of mixture design for concrete tests in fresh and hardened states

نوع آزمایش	منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره F	مقدار P
Slumpe flow	بین طرح مخلوطها	۸	۱۸۳/۸	۲۳/۰	۷/۳	<۰/۰۰۱
	خطا	۱۸	۵۶/۷	۳/۱		
	کل	۲۶	۲۴۰/۵			
T50	بین طرح مخلوطها	۸	۱۲۶/۵	۱۵/۸	۱۴/۷	<۰/۰۰۱
	خطا	۱۸	۱۹/۳	۱/۰۷		
	کل	۲۶	۱۴۵/۸			
V funnel	بین طرح مخلوطها	۸	۱۷۰۱/۲	۲۱۲/۶۵	۲۵/۲۹	<۰/۰۰۱
	خطا	۱۸	۱۵۱/۳	۸/۴۱		
	کل	۲۶	۱۸۵۲/۵۲			
L box	بین طرح مخلوطها	۸	۱/۹۹	۰/۲۵	۳۷/۸	<۰/۰۰۱
	خطا	۱۸	۰/۱۲	۰/۰۰۷		
	کل	۲۶	۲/۱۱			
J ring	بین طرح مخلوطها	۸	۱۰/۰۵	۱/۲۶	۱۸/۴۴	<۰/۰۰۱
	خطا	۱۸	۱/۲۳	۰/۰۷		
	کل	۲۶	۱۱/۲۸			
fc 7	بین طرح مخلوطها	۸	۱۱۴/۴۱	۱۴/۳	۲/۰۷	>۰/۰۵
	خطا	۱۸	۱۲۴/۴۸	۶/۹۱		
	کل	۲۶	۲۳۸/۹			
fc 28	بین طرح مخلوطها	۸	۱۳۴/۴۵	۱۶/۸۱	۱/۲۱	>۰/۰۵
	خطا	۱۸	۲۵۰/۸۳	۱۳/۹۳		
	کل	۲۶	۳۸۵/۳			
fc 90	بین طرح مخلوطها	۸	۱۸۸/۳	۲۳/۵۴	۲/۴۹	>۰/۰۵
	خطا	۱۸	۱۷۰/۱	۹/۴۵		
	کل	۲۶	۳۵۸/۴۱			
fct 28	بین طرح مخلوطها	۸	۰/۷۳۱	۰/۰۹۱	۰/۲۲	>۰/۰۵
	خطا	۱۸	۷/۵۴	۰/۴۱۹		
	کل	۲۶	۸/۲۷			
Fresh specific gravity	بین طرح مخلوطها	۸	۱۰۸۵۵/۳۳	۲۰۰۶/۹۲	۲/۶۷	<۰/۰۵
	خطا	۱۸	۱۳۵۲۵/۳۳	۷۵۱/۴۱		
	کل	۲۶	۲۹۵۸۰/۶۷			



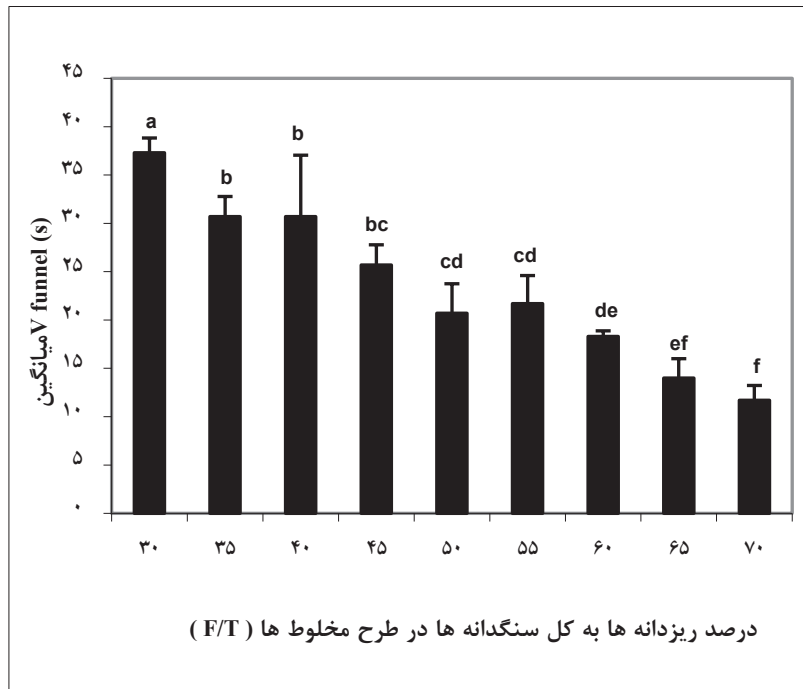
شکل ۹. نمودار ستونی (انحراف معیار + میانگین) طرح مخلوطها برای آزمایش جریان اسلامپ (حروف انگلیسی مختلف نشانگر اختلاف معنی دار در سطح خطای ۵٪ است)

Fig. 9. Bar graph (standard deviation + mean) of mixture design for slump flow test (Different English letters indicate significant difference at 5% error level)



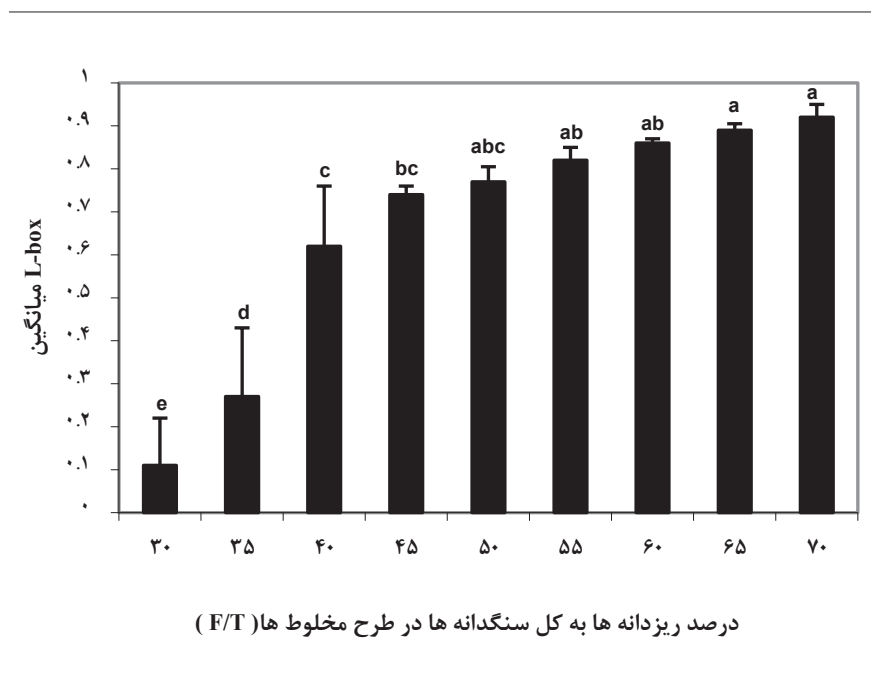
شکل ۱۰. نمودار ستونی (انحراف معیار + میانگین) طرح مخلوطها برای آزمایش T50 (حروف انگلیسی مختلف نشانگر اختلاف معنی دار در سطح خطای ۵٪ است)

Fig. 10. Bar graph (standard deviation + mean) of mixture design for T50 test (Different English letters indicate significant differences at the 5% error level)



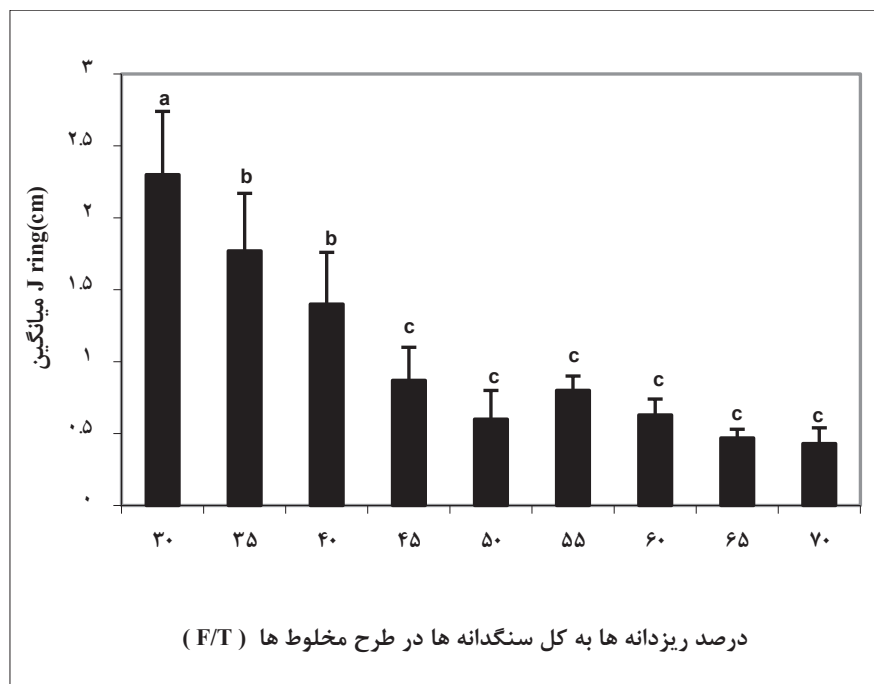
شکل ۱۱. نمودار ستونی (انحراف معیار + میانگین) طرح مخلوطها در آزمایش وی فانل (حروف انگلیسی مختلف نشانگر اختلاف معنی دار در سطح خطای ۵٪ است)

Fig. 11. Bar graph (standard deviation + mean) of mixture design for V funnel test (Different English letters indicate significant differences at the 5% error level)



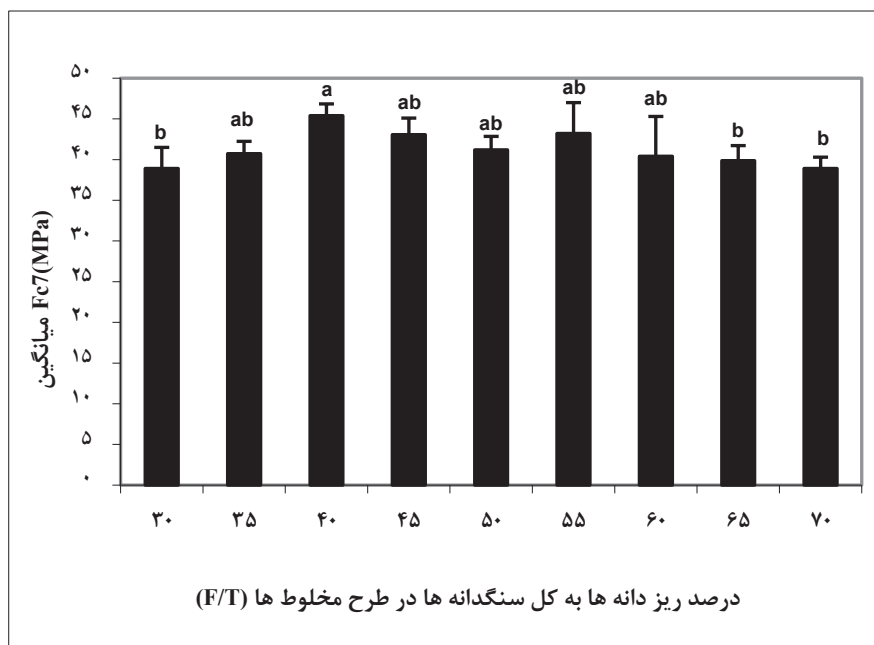
شکل ۱۲. نمودار ستونی (انحراف معیار + میانگین) طرح مخلوطها در آزمایش جعبه ال (حروف انگلیسی مختلف نشانگر اختلاف معنی دار در سطح خطای ۵٪ است)

Fig. 12. Bar graph (standard deviation + mean) of mixtures design for L box test (Different English letters indicate significant differences at the 5% error level)



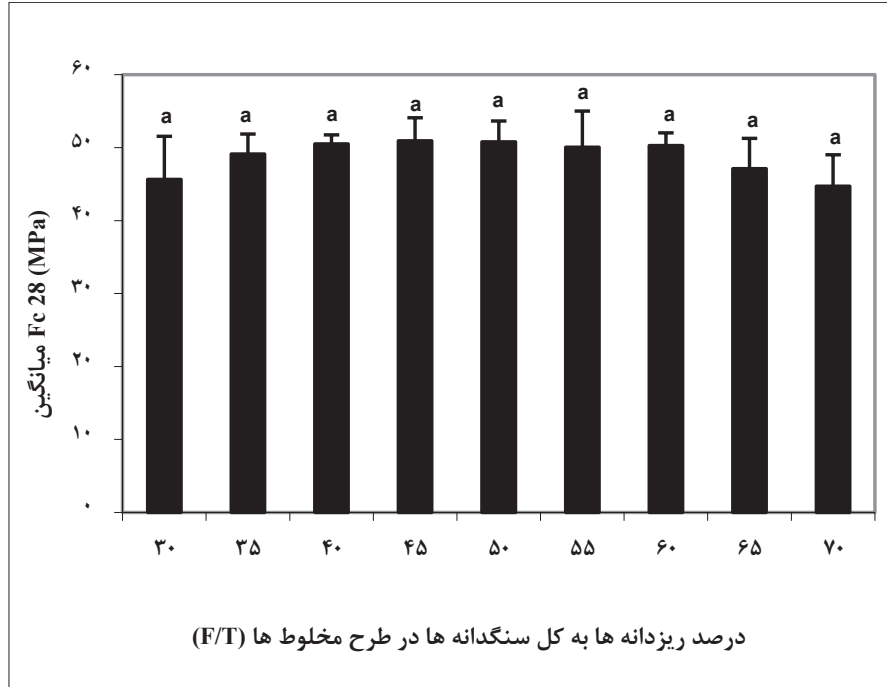
شکل ۱۳. نمودار ستونی (انحراف معیار + میانگین) طرح مخلوطها برای آزمایش J ring (حروف انگلیسی مختلف نشانگر اختلاف معنی دار در سطح خطای ۵٪ است)

Fig. 13. Bar graph (standard deviation + mean) of mixture design for J ring test (Different English letters indicate significant differences at the 5% error level)



شکل ۱۴. نمودار ستونی (انحراف معیار + میانگین) طرح مخلوطها برای آزمایش مقاومت فشاری ۷ روزه (حروف انگلیسی مختلف نشانگر اختلاف معنی دار در سطح خطای ۵٪ است)

Fig. 14. Bar graph (standard deviation + mean) of mixture design for compressive strength test at the age of 7 day (Different English letters indicate significant differences at the 5% error level)

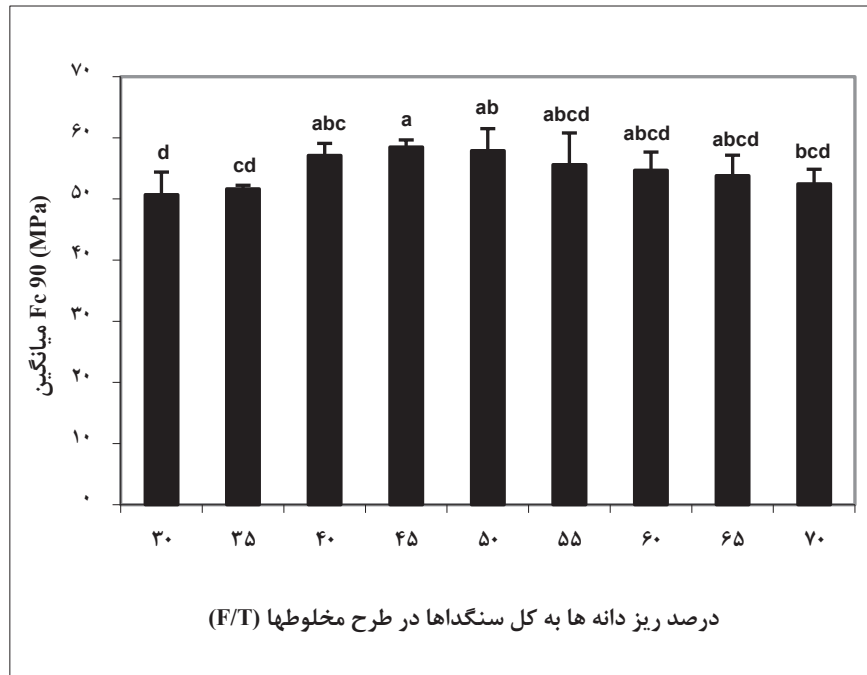


شکل ۱۵. نمودار ستونی (انحراف معیار + میانگین) طرح مخلوطها در آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه (حروف انگلیسی مختلف نشانگر اختلاف معنی دار در سطح خطای ۵٪ است)

Fig. 15: Bar graph (standard deviation + mean) of the design of the mixtures in the compressive strength test at the age of 28 days (Different English letters indicate significant differences at the 5% error level)

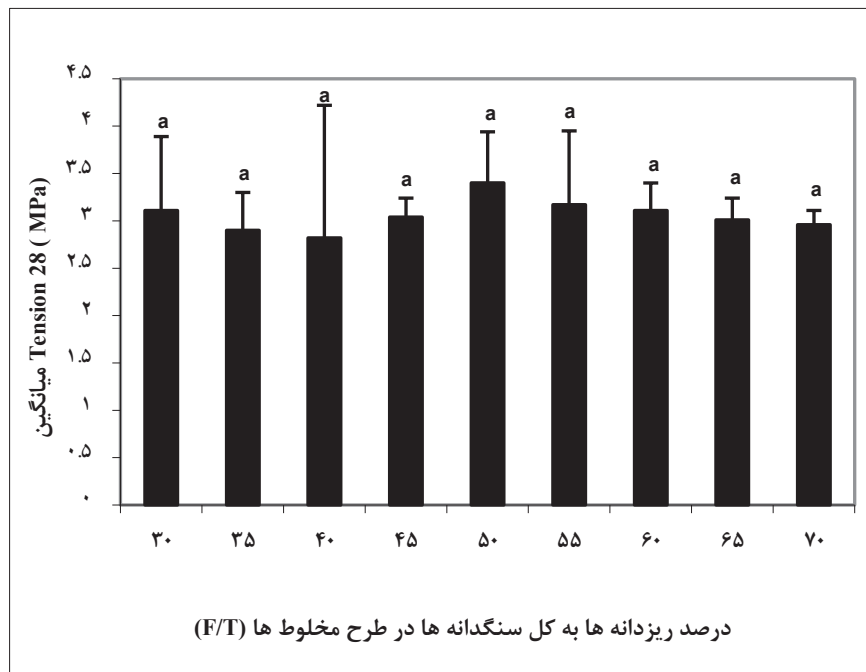
در شکل ۱۷، از نظر ظاهری و میانگین، بیشترین میزان مقاومت کششی دو نیم شدن ۲۸ روزه، در طرح مخلوط ۵۰٪ F/T می باشد. از نظر آماری تمامی طرح مخلوطها در حرف انگلیسی a با هم مشترک، شبیه هم و بیشترین میزان مقاومت کششی دو نیم شدن ۲۸ روزه را دارند در نتیجه هر کدام از آنها می تواند در این مرحله انتخاب و ملاک کار قرار بگیرند. در شکل ۱۸، از نظر ظاهری و میانگین، کمترین میزان چگالی بتن در حالت تر، در طرح مخلوط ۶۵٪ F/T می باشد. از نظر آماری طرح مخلوطهای ۳۰٪، ۴۰٪، ۴۵٪، ۵۰٪، ۵۵٪، ۶۰٪، ۶۵٪ و ۷۰٪ در حرف انگلیسی c با هم مشترک، شبیه هم و کمترین میزان چگالی بتن در حالت تر را دارند، در نتیجه هر کدام از آنها می توانند در این مرحله انتخاب و ملاک کار قرار بگیرند.

در شکل ۱۵، از نظر ظاهری و میانگین، بیشترین میزان مقاومت فشاری ۲۸ روزه، در طرح مخلوط ۴۵٪ F/T می باشد. از نظر آماری تمامی طرح مخلوطها در حرف انگلیسی a با هم مشترک، شبیه هم و بیشترین میزان مقاومت فشاری ۲۸ روزه را دارند در نتیجه هر کدام از آنها می تواند در این مرحله انتخاب و ملاک کار قرار بگیرند. در شکل ۱۶، از نظر ظاهری و میانگین، بیشترین میزان مقاومت فشاری ۹۰ روزه، در طرح مخلوط ۴۵٪ F/T می باشد. از نظر آماری طرح مخلوطهای ۴۰٪، ۴۵٪، ۵۰٪، ۵۵٪، ۶۰٪، ۶۵٪ در حرف انگلیسی a با هم مشترک، شبیه هم و بیشترین میزان مقاومت فشاری ۹۰ روزه را دارند در نتیجه هر کدام از آنها می توانند در این مرحله انتخاب و ملاک کار قرار بگیرند.



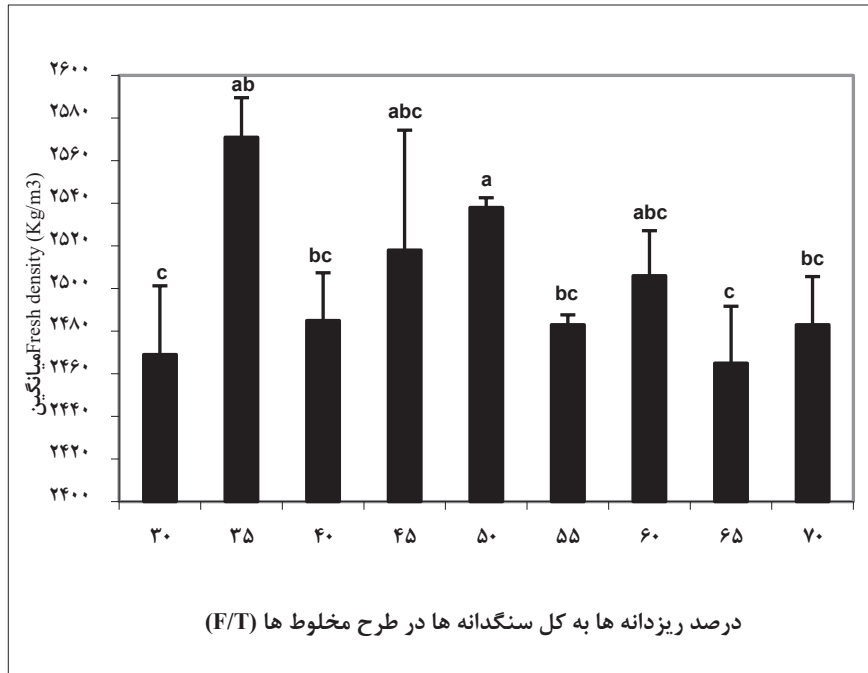
شکل ۱۶. نمودار ستونی (انحراف معیار + میانگین) طرح مخلوطها در آزمایش مقاومت فشاری ۹۰ روزه (حروف انگلیسی مختلف نشانگر اختلاف معنی دار در سطح خطای ۵٪ است)

Fig. 16. Bar graph (standard deviation + mean) of the design of the mixtures in the compressive strength test at the age of 90 days (Different English letters indicate a significant difference at the 5% error level)



شکل ۱۷. نمودار ستونی (انحراف معیار + میانگین) طرح مخلوطها برای آزمایش ۲۸ fct (حروف انگلیسی مختلف نشانگر اختلاف معنی دار در سطح خطای ۵٪ است)

Fig. 17. Bar graph (standard deviation + mean) of the design of mixtures for split tensile strength test at the age of 28 days (Different English letters indicate significant differences at the 5% error level)



شکل ۱۸. نمودار ستونی (انحراف معیار + میانگین) طرح مخلوطها برای چگالی بتن تازه (حروف انگلیسی مختلف نشانگر اختلاف معنی دار در سطح خطای ۵٪ است).

Fig. 18. Bar graph (standard deviation + mean) of mixture design for fresh concrete density (Different English letters indicate significant differences at the 5% error level)

سنجش لزجت در نظر گرفت، به طوری که با افزایش مدت زمان در آزمایش T50 لزجت افزایش و قابلیت روانی کاهش می یابد و برعکس.

در آزمایش قیف V در طرح مخلوطهای ۶۵ و ۷۰ درصد، مدت زمان تخلیه در قیف به ترتیب در ستونهای حداقل و حداکثر (۱۲ و ۱۶، و ۱۰ و ۱۳) ثانیه به دست آمده است، که کمترین میزان میانگین را دارا می باشند (جدول ۹). کم بودن مقادیر میانگین نشان دهنده کم بودن مدت زمان تخلیه بر حسب ثانیه در این آزمایش است. هرچند این آزمایش قابلیت جریان را اندازه گیری می نماید، اما نتیجه تحت تاثیر سایر خواص بتن نیز واقع می شود. به طور مثال، اگر سنگدانه های درشت زیادی در بتن موجود باشند، موجب می شوند تا به دلیل شکل قیف، به خوبی جریان نیابند و انسداد صورت گیرد؛ همچنین اگر لزجت خمیر و یا اصطکاک بین ذرات زیاد باشد، بتن سفت می شود و زمان جریان زیاد می گردد.

در آزمایش جعبه L، طرح مخلوطهای ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درصد به ترتیب دارای بیشترین مقدار میانگین ۰/۸۲، ۰/۸۶، ۰/۸۹ و ۰/۹۲ می باشند (جدول ۱۰). مقادیر بالای میانگین نشان دهنده قابلیت پرکنندگی و افزایش حجم خمیر سیمان است که سبب افزایش قابلیت عبور می شود؛ هم چنین مقادیر کمتر از ۰/۸۲ می تواند خطر پدیده انسداد ناشی از حضور میلگردها را افزایش دهد.

۵-۴- اطلاعات توصیفی آزمایش های مختلف در بتن خود متراکم

اطلاعات توصیفی آزمایش های مختلف بتن تازه و سخت شده با درصدهای مختلف سنگدانه در جداول ۷ تا ۱۴ آمده است.

در آزمایش جریان اسلامپ در طرح مخلوطهای ۳۰، ۶۰ و ۶۵ درصد به ترتیب حداقل و حداکثر قطر (۶۸/۵۰، ۷۲/۷۰ و ۷۴، و ۷۵/۵۰ و ۷۷) به دست آمده است؛ که دارای کمترین میزان ضریب تغییرات می باشد (جدول ۷). با توجه به نتایج ضریب تغییرات هرچه این مقادیر کمتر باشند، نشان دهنده نزدیک تر بودن دو قطر به دست آمده از آزمایش می باشد. شایان ذکر است که هر چه عدد جریان اسلامپ (SF) بزرگتر باشد، معرف قابلیت بیشتر پر کردن قالب و روان شدگی بتن، تحت وزن خود است.

در آزمایش T50 در طرح مخلوطهای ۵۰، ۶۵ و ۷۰ درصد، مدت زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتی متر به ترتیب حداقل و حداکثر قطر (۵ و ۶، ۶ و ۷، و ۵ و ۶) ثانیه به دست آمده است؛ که میانگین کمتری را نسبت به بقیه حالات نشان می دهد (جدول ۸). مقادیر کم میانگین حاصله نشان دهنده کم بودن مدت زمان طی شده بر حسب ثانیه در این آزمایش می باشد. با توجه به نزدیک بودن ضریب تغییرات طرح مخلوطهای ۳۰، ۶۰ و ۶۵ درصد، در آزمایش جریان اسلامپ در جدول ۷ می توان آزمایش T50 را معیاری برای

جدول ۷. اطلاعات توصیفی آزمایش جریان اسلامپ با تغییر درصد سنگدانه‌ها

Table 7. Descriptive information of slump flow test with change of percentage of aggregates

فاصله اطمینان ۹۵٪ برای میانگین		ضریب تغییرات	انحراف استاندارد	میانگین (سانتی‌متر)	حداکثر (سانتی‌متر)	حداقل (سانتی‌متر)	F/T (درصد)
کران پایین (سانتی‌متر)	کران بالا (سانتی‌متر)						
۶۷/۴۴	۷۱/۲۳	۰/۶۳	۰/۴۴	۶۹/۳۳	۷۰	۶۸/۵	۳۰
۶۸/۲۵	۷۳/۴۲	۰/۸۵	۰/۶	۷۰/۸۳	۷۲	۷۰	۳۵
۶۴/۵۶	۸۱/۱۰	۲/۶۴	۱/۹۲	۷۲/۸۳	۷۵	۶۹	۴۰
۶۸/۹۳	۸۲/۰۷	۲/۰۳	۱/۵۳	۷۵/۵	۷۷	۷۲	۴۵
۷۲/۳۱	۸۲/۳۵	۱/۵۱	۱/۱۷	۷۷/۳۳	۷۹/۵	۷۵/۵	۵۰
۷۱	۷۷	۰/۹۹	۰/۷۳	۷۳/۸۳	۷۵	۷۲/۵	۵۵
۷۱/۳	۷۵/۱	۰/۶	۰/۴۴	۷۳/۲	۷۴	۷۲/۵	۶۰
۷۴	۷۸/۱۵	۰/۶۶	۰/۵	۷۶	۷۷	۷۵/۵	۶۵
۷۴/۰۴	۸۰/۳	۰/۹۵	۰/۷۳	۷۷/۲	۷۸/۵	۷۶	۷۰

جدول ۸. اطلاعات توصیفی آزمایش T50 با تغییر درصد سنگدانه‌ها

Table 8. Descriptive information of T50 test with change of percentage of aggregates

فاصله اطمینان ۹۵٪ برای میانگین		ضریب تغییرات	انحراف استاندارد	میانگین (ثانیه)	حداکثر (ثانیه)	حداقل (ثانیه)	F/T (درصد)
کران پایین (ثانیه)	کران بالا (ثانیه)						
۹/۷۹	۱۵/۵۳	۵/۲۷	۰/۶۷	۱۲/۷	۱۴	۱۲	۳۰
۸/۲۳	۱۱/۱۰	۳/۴۱	۰/۳۳	۹/۶۷	۱۰	۹	۳۵
۴/۴۹	۱۴/۸۴	۱۲/۴۱	۱/۲	۹/۶۷	۱۲	۸	۴۰
۳/۵۴	۱۱/۱۳	۱۲/۰۵	۰/۸۸	۷/۳	۹	۶	۴۵
۴/۲۳	۷/۱۰	۵/۸۲	۰/۳۳	۵/۶۷	۶	۵	۵۰
۶/۲۳	۹/۱۰	۴/۳۰	۰/۳۳	۷/۶۷	۸	۷	۵۵
۶/۲۳	۹/۱۰	۴/۳۰	۰/۳۳	۷/۶۷	۸	۷	۶۰
۵/۲۳	۸/۱۰	۴/۹۵	۰/۳۳	۶/۶۷	۷	۶	۶۵
۳/۹	۶/۷۷	۶/۱۹	۰/۳۳	۵/۳۳	۶	۵	۷۰

جدول ۹. اطلاعات توصیفی آزمایش V funnel با تغییر درصد سنگدانه‌ها

Table 9. Descriptive information of V funnel test with change of percentage of aggregates

فاصله اطمینان ۹۵٪ برای میانگین		ضریب تغییرات	انحراف استاندارد	میانگین (ثانیه)	حداکثر (ثانیه)	حداقل (ثانیه)	F/T (درصد)
کران پایین (ثانیه)	کران بالا (ثانیه)						
۳۳/۵۴	۴۱/۱۳	۲/۳۶	۰/۸۸	۳۷/۳۳	۳۹	۳۶	۳۰
۲۵/۵۰	۳۵/۸۴	۳/۹۱	۱/۲۰	۳۰/۶۷	۳۳	۲۹	۳۵
۱۴/۸۹	۴۶/۴۴	۱۱/۹۷	۳/۶۷	۳۰/۶۷	۳۸	۲۷	۴۰
۲۰/۵۰	۳۰/۸۴	۴/۶۷	۱/۲۰	۲۵/۶۷	۲۸	۲۴	۴۵
۱۳/۱۰	۲۸/۲۶	۸/۵۱	۱/۷۶	۲۰/۶۷	۲۴	۱۸	۵۰
۱۴/۵۰	۲۸/۸۴	۷/۷۱	۱/۶۷	۲۱/۶۷	۲۵	۲۰	۵۵
۱۶/۹۰	۱۹/۸۰	۱/۸۰	۰/۳۳	۱۸/۳۳	۱۹	۱۸	۶۰
۹/۰۳	۱۸/۹۷	۸/۲۱	۱/۱۵	۱۴	۱۶	۱۲	۶۵
۷/۹۰	۱۵/۴۶	۷/۵۴	۰/۸۸	۱۱/۶۷	۱۳	۱۰	۷۰

جدول ۱۰. اطلاعات توصیفی آزمایش L box با تغییر درصد سنگدانه‌ها

Table 10. Descriptive information of L box test with change of percentage of aggregates

فاصله اطمینان ۹۵٪ برای میانگین		ضریب تغییرات	انحراف استاندارد	میانگین	حداکثر	حداقل	F/T (درصد)
کران پایین	کران بالا						
-۰/۲	۰/۳۸	۵۴/۵۴	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۲۳	۰/۰۴	۳۰
-۰/۱۲	۰/۶۶	۳۳/۳۳	۰/۰۹	۰/۲۷	۰/۴۵	۰/۱۶	۳۵
۰/۲۸	۰/۹۶	۱۲/۹۰	۰/۰۸	۰/۶۲	۰/۷۳	۰/۴۷	۴۰
۰/۶۸	۰/۸۰	۱/۳۵	۰/۰۱	۰/۷۴	۰/۷۵	۰/۷۱	۴۵
۰/۷	۰/۸۵	۲/۶۰	۰/۰۲	۰/۷۷	۰/۸۰	۰/۷۳	۵۰
۰/۷۵	۰/۸۹	۱/۲۲	۰/۰۱	۰/۸۲	۰/۸۴	۰/۷۹	۵۵
۰/۸۳	۰/۸۸	۱/۱۶	۰/۰۱	۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۸۵	۶۰
۰/۸۵	۰/۹۳	۱/۱۲	۰/۰۱	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۸۸	۶۵
۰/۸۵	۰/۹۹	۲/۱۷	۰/۰۲	۰/۹۲	۰/۹۵	۰/۹۰	۷۰

جدول ۱۱. اطلاعات توصیفی آزمایش J ring با تغییر درصد سنگدانه‌ها

Table 11. Descriptive information of J ring test by changing the percentage of aggregates

فاصله اطمینان ۹۵٪ برای میانگین		ضریب تغییرات	انحراف استاندارد	میانگین (سانتی‌متر)	حداکثر (سانتی‌متر)	حداقل (سانتی‌متر)	F/T (درصد)
کران پایین (سانتی‌متر)	کران بالا (سانتی‌متر)						
۱/۲۲	۳/۳۸	۱۰/۹۰	۰/۲۵	۲/۳	۲/۶	۱/۸	۳۰
۰/۷۶	۲/۸۰	۰/۱۳	۰/۲۳	۱/۷۷	۲	۱/۳	۳۵
۰/۵۰	۲/۳۰	۱۵	۰/۲۱	۱/۴	۱/۷	۱	۴۰
۰/۲۹	۱/۴۴	۱۴/۹۴	۰/۱۳	۰/۸۷	۱	۰/۶	۴۵
۰/۱۰	۱/۱۰	۱۸/۳۳	۰/۱۱	۰/۶	۰/۸	۰/۴	۵۰
۰/۵۵	۱/۰۵	۱۲/۵۰	۰/۱۰	۰/۸	۰/۹	۰/۷	۵۵
۰/۳۵	۰/۹۲	۱۱/۱۱	۰/۰۷	۰/۶۳	۰/۷	۰/۵	۶۰
۰/۱۵	۰/۸۰	۱۴/۸۹	۰/۰۷	۰/۴۷	۰/۵	۰/۴	۶۵
۰/۱۵	۰/۷۲	۱۶/۲۸	۰/۰۷	۰/۴۳	۰/۵	۰/۳	۷۰

میانگین مقاومت فشاری طرح‌های مخلوط ارائه شده‌اند، حاکی از دامنه مشترک بین این مقادیر دارد که بیانگر مشابه بودن میزان مقاومت فشاری بین طرح‌های مخلوط می‌باشد (جدول ۱۲).

کمترین و بیشترین مقادیر میانگین مقاومت کششی دونیم‌شدن به میزان ۲/۸۲ و ۳/۴۱ مگاپاسکال، به ترتیب برای طرح مخلوط‌های ۴۰ و ۵۰ درصد به دست آمدند. با توجه به وجود دامنه مشترک فواصل اطمینان در بین طرح‌های مخلوط ۵۰ تا ۶۵ درصد، می‌توان تشابه مقدار مقاومت کششی دو نیم شدن ۲۸ روزه را متوجه شد (جدول ۱۳).

در آزمایش حلقه J طرح مخلوط‌های ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درصد به ترتیب دارای بیشترین مقادیر میانگین ۰/۸۷، ۰/۰۶، ۰/۰۸، ۰/۶۳، ۰/۴۷ و ۰/۴۳ می‌باشند (جدول ۱۱). طبق نتایج هرچه این مقادیر کمتر باشند، نشان‌دهنده قابلیت روانی و عبور بیشتر می‌باشد. هم‌چنین مقادیر میانگین بیشتر از ۰/۸۷ می‌توانند ریسک قابلیت انسداد، بلوکه شدن و یا جدا شدگی را افزایش دهند. در نتیجه می‌توان گفت که میانگین کمتر، باعث قابلیت انسداد کمتر شده و تحت تاثیر ویژگی‌های روانی می‌باشد.

میانگین مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در تمام طرح مخلوط‌ها نزدیک به هم به دست آمد. نگاه به فواصل اطمینان که برای

جدول ۱۲. اطلاعات توصیفی آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه با تغییر درصد سنگدانه‌ها

Table 12. Descriptive information of the compressive strength test at the ages of 7, 28 and 90 days with changes in the percentage of aggregates

فاصله اطمینان ۹۵٪ برای میانگین		ضریب تغییرات	انحراف استاندارد	میانگین (مگا پاسکال)	حداکثر (مگا پاسکال)	حداقل (مگا پاسکال)	F/T (درصد)
کران بالا	کران پایین						
در سن ۷ روزه							
۳۲/۳۸	۴۵/۴۲	۳/۸۸	۱/۵۱	۳۸/۹۰	۴۱/۳۰	۳۶/۱۰	۳۰
۳۷/۰۹	۴۴/۳۹	۲/۱۰	۰/۸۵	۴۰/۷۴	۴۲/۴۰	۳۹/۶۰	۳۵
۴۱/۸۱	۴۸/۹۶	۱/۸۳	۰/۸۳	۴۵/۳۹	۴۶/۵۰	۴۳/۷۶	۴۰
۳۸/۰۲	۴۸/۱۱	۲/۷۲	۱/۱۷	۴۳/۰۷	۴۵/۴۰	۴۱/۷۰	۴۵
۳۷/۰۹	۴۵/۳۰	۲/۳۱	۰/۹۵	۴۱/۲۰	۴۳/۱۰	۴۰/۱۰	۵۰
۳۳/۷۶	۵۲/۶۳	۵/۱۰	۲/۱۹	۴۳/۲۰	۴۷/۳۰	۳۹/۸۰	۵۵
۲۸/۱۲	۵۲/۶۸	۷/۰۵	۲/۸۵	۴۰/۴۰	۴۳/۵۰	۳۴/۷۰	۶۰
۳۵/۲۷	۴۴/۴۶	۲/۷۰	۱/۰۷	۳۹/۸۷	۴۱/۷۰	۳۸	۶۵
۳۵/۳۹	۴۲/۴۰	۲/۱۰	۰/۸۱	۳۸/۹۰	۴۰/۴۰	۳۷/۶۰	۷۰
در سن ۲۸ روزه							
روزه							
۳۰/۹۷	۶۰/۳۳	۷/۴۷	۳/۴۱	۴۵/۶۵	۵۲/۱۵	۴۰/۶۰	۳۰
۴۲/۳۰	۵۵/۹۳	۳/۲۶	۱/۶۰	۴۹/۱۱	۵۱/۲۰	۴۶	۳۵
۴۷/۴۴	۵۳/۶۰	۱/۴۰	۰/۷۱	۵۰/۵۱	۵۱/۹۰	۴۹/۵۳	۴۰
۴۳/۱۰	۵۸/۷۷	۳/۵۷	۱/۸۲	۵۰/۹۳	۵۴/۵۰	۴۸/۵۰	۴۵
۴۳/۷۳	۵۷/۸۷	۳/۲۳	۱/۶۴	۵۰/۸۰	۵۳/۹۰	۴۸/۳۰	۵۰
۳۷/۸۰	۶۲/۳۴	۵/۷۰	۲/۸۵	۵۰/۱۰	۵۵/۶۰	۴۶/۱۰	۵۵
۴۵/۹۵	۵۴/۶۱	۲/۰۱	۱/۰۱	۵۰/۲۸	۵۲/۲۴	۴۸/۹۰	۶۰
۳۶/۷۹	۵۷/۴۳	۵/۱۰	۲/۴۰	۴۷/۱۱	۵۱/۸۳	۴۴	۶۵
۳۴	۵۵/۴۴	۵/۵۷	۲/۴۹	۴۴/۷۲	۴۹/۴۵	۴۱	۷۰
در سن ۹۰ روزه							
روزه							
۴۱/۵۳	۵۹/۸۰	۴/۱۸	۲/۱۲	۵۰/۶۷	۵۴/۷۰	۴۷/۵۰	۳۰
۵۰/۲۰	۵۳/۱۱	۰/۶۶	۰/۳۴	۵۱/۶۵	۵۲/۱۵	۵۱	۳۵
۵۲/۲۶	۶۲	۱/۹۸	۱/۱۳	۵۷/۱۳	۵۹/۲۰	۵۵/۳۰	۴۰
۵۵/۶۰	۶۱/۳۴	۱/۱۸	۰/۶۹	۵۸/۴۸	۵۹/۷۰	۵۷/۴۰	۴۵
۴۹/۰۳	۶۶/۸۴	۳/۵۷	۲/۰۷	۵۷/۹۳	۶۰/۲۰	۵۳/۸۰	۵۰
۴۲/۶۰	۶۸/۶۱	۵/۴۳	۳/۰۲	۵۵/۶۰	۶۱/۵۰	۵۱/۵۰	۵۵
۴۷/۳۶	۶۲/۱۱	۳/۱۲	۱/۷۱	۵۴/۷۳	۵۸	۵۲/۲۰	۶۰
۴۵/۴۶	۶۲/۱۴	۳/۶۰	۱/۹۴	۵۳/۸۰	۵۷/۶۷	۵۱/۶۴	۶۵
۴۶/۵۶	۵۸/۳۶	۲/۶۱	۱/۳۷	۵۲/۴۶	۵۵/۱۸	۵۰/۸۰	۷۰

جدول ۱۳. اطلاعات توصیفی آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن ۲۸ روزه با تغییر درصد سنگدانه‌ها

Table 13. Descriptive information of 28-day split tensile strength test with change of percentage of aggregates

فاصله اطمینان ۹۵٪ برای میانگین		ضریب تغییرات	انحراف استاندارد	میانگین (مگا پاسکال)	حداکثر (مگا پاسکال)	حداقل (مگا پاسکال)	F/T (درصد)
کران پایین (مگا پاسکال)	کران بالا (مگا پاسکال)						
۱/۱۸	۵/۰۴	۱۴/۴۷	۰/۴۵	۳/۱۱	۳/۹۵	۲/۴۲	۳۰
۱/۹۲	۳/۸۵	۷/۶۴	۰/۲۲	۲/۸۸	۳/۳۳	۲/۶۲	۳۵
-۰/۶۲	۶/۲۶	۲۸/۳۷	۰/۸۰	۲/۸۲	۴/۱۲	۱/۳۶	۴۰
۲/۶۰	۳/۴۸	۳/۲۹	۰/۱۰	۳/۰۴	۳/۲۴	۲/۹۰	۴۵
۲/۰۸	۴/۷۵	۹/۱۰	۰/۳۱	۳/۴۱	۳/۸۴	۲/۸۱	۵۰
۱/۲۳	۵/۱۱	۱۴/۱۹	۰/۴۵	۳/۱۷	۴/۰۷	۲/۷۰	۵۵
۲/۴۰	۳/۸۴	۵/۴۷	۰/۱۷	۳/۱۱	۳/۴۵	۲/۹۴	۶۰
۲/۴۳	۳/۵۹	۴/۳۲	۰/۱۳	۳/۰۱	۳/۲۶	۲/۸۰	۶۵
۲/۵۸	۳/۳۳	۳/۰۴	۰/۰۹	۲/۹۶	۳/۱۰	۲/۸۰	۷۰

جدول ۱۴. اطلاعات توصیفی آزمایش وزن مخصوص بتن تازه با تغییر درصد سنگدانه‌ها

Table 14. Descriptive information of testing the specific weight of fresh concrete by changing the percentage of aggregates

فاصله اطمینان ۹۵٪ برای میانگین		ضریب تغییرات	انحراف استاندارد	میانگین (کیلوگرم بر مترمکعب)	حداکثر (کیلوگرم بر مترمکعب)	حداقل (کیلوگرم بر مترمکعب)	F/T (درصد)
کران پایین (کیلوگرم بر مترمکعب)	کران بالا (کیلوگرم بر مترمکعب)						
۲۳۸۸/۵	۲۵۴۸/۸	۰/۷۵	۱۸/۶۲	۲۴۶۸/۷	۲۵۰۳	۲۴۳۹	۳۰
۲۴۷۹	۲۵۷۱	۰/۴۲	۱۰/۶۹	۲۵۲۵	۲۵۴۴	۲۵۰۷	۳۵
۲۴۲۹	۲۵۴۰/۲	۰/۵۲	۱۲/۹۱	۲۴۸۴/۷	۲۵۰۰	۲۴۵۹	۴۰
۲۳۷۸/۲	۲۶۵۷/۸	۱/۲۹	۳۲/۵۰	۲۵۱۸	۲۵۵۱	۲۴۵۳	۴۵
۲۵۲۶/۶	۲۵۴۹/۴	۰/۱۰	۲/۶۴	۲۵۳۸	۲۵۴۲	۲۵۳۳	۵۰
۲۴۷۱/۹	۲۴۹۴/۸	۰/۱۱	۲/۶۷	۲۴۸۳/۳	۲۴۸۶	۲۴۷۸	۵۵
۲۴۵۳/۲	۲۵۵۸/۱	۰/۴۹	۱۲/۲۰	۲۵۰۵/۷	۲۵۳۰	۲۴۹۲	۶۰
۲۳۹۸/۸	۲۵۳۱/۲	۰/۶۲	۱۵/۳۹	۲۴۶۵	۲۴۸۶	۲۴۳۵	۶۵
۲۴۲۶/۵	۲۵۳۸/۸	۰/۵۲	۱۳/۰۴	۲۴۸۲/۷	۲۵۰۴	۲۴۵۹	۷۰

به صورت معکوس است؛ یعنی هر چه میزان جریان اسلامپ بیشتر شود، عدد حلقه ج کاهش یافته که با توجه به مقدار ضریب تعیین $R^2 = 0.714$ بنابراین ۷۰٪ تغییرات عدد حلقه ج از روی جریان اسلامپ قابل تخمین است.

۵-۶ نتایج الگوریتم تاپسیس

با توجه به دسترسی به مقادیر کمی، وزن دهی بر اساس مقادیر موجود بین ۱ تا ۹ انجام و پس از طی مراحل لازم، اولویت بندی طرح مخلوط‌های بتن به صورت جدول ۱۶ و شکل ۱۹ انجام شد. مخلوط ۶۵٪ ماسه نسبت به کل سنگدانه‌ها بر اساس تمام آزمایش‌های انجام شده بهترین نتیجه را داده است.

کمترین و بیشترین میانگین وزن مخصوص بتن تازه به میزان ۲۴۶۵ و ۲۵۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب به ترتیب در طرح مخلوط‌های ۶۵ و ۵۰ درصد به دست آمدند. کمتر بودن مقادیر وزن مخصوص بتن باعث کمتر شدن بار مرده ساختمان و در نتیجه سبکی سازه می‌شود، که عملکرد بهتری را در برابر زلزله نشان می‌دهد (جدول ۱۴).

۵-۵ همبستگی میان آزمایش‌های مختلف در بتن خودتراکم

باتوجه به اطلاعات آماری همبستگی در جدول ۱۵ به طور کامل آمده است. به طور مثال اگر همبستگی میان جریان اسلامپ و حلقه ج به میزان ۰/۸۴۵ باشد، می‌توان گفت همبستگی بین این دو شاخص به طور معنی داری و

جدول ۱۵. همبستگی میان آزمایش‌های مختلف با تغییر درصد سنگدانه‌ها

Table 15. Correlation between different tests with the change of percentage of aggregates

نوع آزمایش	جریان اسلامپ	T50	قیف V	جمعه L	حلقه j	فشاری ۷ روزه	فشاری ۲۸ روزه	فشاری ۹۰ روزه	کششی دو نیم شدن	وزن مخصوص بتن تازه
جریان اسلامپ	۱	-۰/۹۱۵**	-۰/۸۱۳**	۰/۸۰۱**	-۰/۸۴۵**	-۰/۰۶۲	-۰/۰۱۹	۰/۲۲۵	-۰/۱۵۵	۰/۱۱۷
T50	-۰/۹۱۵**	۱	۰/۸۸۷**	-۰/۸۴۲**	۰/۸۸۱**	۰/۰۵۵	-۰/۰۲۴	-۰/۲۷۵	۰/۱۶۴	-۰/۱۸۴
قیف V	-۰/۸۱۳**	۰/۸۸۷**	۱	-۰/۸۷۹**	۰/۹۰۱**	۰/۲۳۷	۰/۱۵۲	-۰/۰۳۶	۰/۱۳۹	۰/۰۳۳
جمعه L	۰/۸۰۱**	-۰/۸۴۲**	-۰/۸۷۹**	۱	-۰/۹۶۴**	۰/۰۵۷	۰/۰۷۵	۰/۳۳	-۰/۰۶۳	۰/۰۵۴
حلقه j	-۰/۸۴۵**	۰/۸۸۱**	۰/۹۰۱**	-۰/۹۶۴**	۱	۰/۰۲۷	-۰/۰۳۲	-۰/۲۶۹	۰/۰۲۷	-۰/۱۱
فشاری ۷ روزه	۰/۰۶۲	۰/۰۵۵	۰/۲۳۷	۰/۰۵۷	۰/۰۲۷	۱	۰/۶۹۹**	۰/۷۲۵**	۰/۱۹۴	۰/۰۰۳
فشاری ۲۸ روزه	-۰/۰۱۹	-۰/۰۲۴	۰/۱۵۲	۰/۰۷۵	-۰/۰۳۲	۰/۶۹۹**	۱	۰/۸۳۲**	۰/۴۰۵*	۰/۱۳۵
فشاری ۹۰ روزه	۰/۲۲۵	-۰/۲۷۵	-۰/۰۳۶	۰/۳۳	-۰/۲۶۹	۰/۷۲۵**	۰/۸۳۲**	۱	۰/۳۸۴*	۰/۲۰۸
کششی دو نیم شدن	-۰/۱۵۵	۰/۱۶۴	۰/۱۳۹	-۰/۰۶۳	۰/۰۲۷	۰/۱۹۴	۰/۴۰۵*	۰/۳۸۴*	۱	-۰/۰۷۹
وزن مخصوص بتن تازه	۰/۱۱۷	-۰/۱۸۴	۰/۰۳۳	۰/۰۵۴	-۰/۱۱	۰/۰۰۳	۰/۱۳۵	۰/۲۰۸	-۰/۰۷۹	۱

*: تفاوت معنی‌دار در سطح خطای ۵٪؛ **: تفاوت معنی‌دار در سطح خطای ۱٪.

جدول ۱۶. اولویت‌بندی طرح مخلوط‌های بتن بر اساس روش تاپسیس

Table 16. Prioritizing the design of concrete mixtures based on TOPSIS method

رتبه	ضریب کشیدگی	نسبت سنگدانه‌های ریز به کل سنگدانه‌ها (F/T)
۱	۰/۷۹	۶۵
۲	۰/۷۶	۷۰
۳	۰/۶۹	۵۰
۴	-/۶۸	۶۰
۵	۰/۶۳	۵۵
۶	۰/۵۵	۴۵
۷	۰/۴۱	۴۰
۸	۰/۲۸	۳۵
۹	۰/۰۷	۳۰



شکل ۱۹. نمودار ضریب کشیدگی و بهترین درصد های اختلاط

Fig. 19. Chart of elongation factor and best mixing percentages

۶- نتایج

نوع، جنس و اندازه سنگدانه های شن و ماسه باعث تأثیر و تغییر در مقادیر درصد های مصالح مصرفی بتن به خصوص فوق روان کننده و پودر افزودنی اصلاح کننده لزجت می گردد.

باتوجه به نمودار های انحراف معیار و میانگین، از نظر خواص رئولوژی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی دونیم شدن به ترتیب بهترین رتبه ها به ۷۰٪، ۴۵٪ و ۵۰٪ نسبت ماسه به کل سنگدانه ها در طرح مخلوط ها می رسد. اما در نهایت بهترین طرح مخلوط براساس نتایج و تحلیل های آماری طرح با $F/T=۶۵\%$ می باشد.

با توجه به اطلاعات آماری، نتایج نشان دهنده قابل تخمین بودن درصد همبستگی میان آزمایش های مختلف با تغییر درصد سنگدانه ها می باشد، به طوری که از نتایج یک آزمایش می توان تا حد زیادی نتایج یک آزمایش دیگر را حدس زد، که این می تواند معیاری برای راستی آزمایی انجام آزمایش ها، کاهش خطا و هزینه ها، و مانع از دوباره کاری باشد.

افزایش درصد سنگدانه ها کارایی بتن را تا آنجایی که دیگر قابل قبول آیین نامه ها نیست، دچار مشکل می کند. هم چنین نتایج آزمایش های بتن در حالت سخت شده حاکی از آن است که هر چه درصد سنگدانه های درشت در بتن کمتر باشد، مقاومت کششی را بهبود می بخشد، اما بعد از میزان مشخصی مقاومت فشاری کاسته می شود.

مزیت بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی شامل خواص مکانیکی برتر در سنین اولیه و نهایی، کارایی بیشتر، کاهش به کارگیری نیروی انسانی، کاهش خطای کارگران در حین کار، کاهش مصرف بتن، کاهش مساحت مقاطع و بالا رفتن فضای مفید ساختمان، دقت کار بالاتر، سرعت اجرای بیشتر، سبز بودن و سازگاری با محیط زیست است. باتوجه به حساس بودن بتن خودتراکم به تغییرات محیطی، به خصوص وزش باد، نیاز به طرح مخلوط مناسبی می باشد؛ هم چنین با نگرش به شرایط فصلی (گرم و سرد) انتخاب نوع فوق روان کننده و جنسی که سازگار با این نوع بتن باشد، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. کارخانه های سنگ شکن به دلیل عدم تعویض به موقع سرندها (پارگی تورها) به منظور کاهش هزینه، اغلب مصالح سنگی خارج از رده استاندارد تولید می کنند که یکی از دلایل عدم رغبت تولیدکنندگان بتن و پیمانکاران می تواند همین موضوع به دلیل ریسک بالا در تولید این نوع بتن باشد. در این تحقیق بعد از ساخت بتن خودتراکم در محیط آزمایشگاه، ساخت آن به صورت کارگاهی و اجرای آسان توسط کارگران غیرمتخصص در فضای آزاد با چالش های موجود از قبیل عوامل جوی (باد، باران، گرمای هوا)، عدم شستشوی مصالح سنگی در رسیدن به طرح مخلوط های قابل قبول و اجرایی مد نظر قرار گرفت. نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر هستند:

- samples, *Engineering with Computers*, 37 (2021) 1133-1145.
- [3] G. Sua-Iam, N. Makul, Utilization of limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete incorporating high volumes of untreated rice husk ash as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, 38 (2013) 455-464.
- [4] V. Sivakumar, O. Kavitha, G.P. Arulraj, V. Srisanthi, An experimental study on combined effects of glass fiber and Metakaolin on the rheological, mechanical, and durability properties of self-compacting concrete, *Applied Clay Science*, 147 (2017) 123-127.
- [5] E. Sharifi, S.J. Sadjadi, M. Aliha, A. Moniri, Optimization of high-strength self-consolidating concrete mix design using an improved Taguchi optimization method, *Construction and Building Materials*, 236 (2020) 117547.
- [6] W. Schmidt, H. Brouwers, H.-C. Kühne, B. Meng, Effects of the characteristics of high range water reducing agents and the water to powder ratio on rheological and setting behavior of self-consolidating concrete, *Advances in civil engineering materials*, 3(2) (2014) 1-15.
- [7] P. Rougeau, J. Maillard, C. Mary-Dippe, Comparative study on properties of self-compacting and high performance concrete used in precast construction, in: *Self-compacting concrete* (Stockholm, 13-14 September 1999), 1999, pp. 251-261.
- [8] P. Qudousi, Shirzadi Javid, A., Effect of constraint on shrinkage and paste settlement of repair materials based on self-compacting concrete, *Omran Modares*, 10(4) (2019) 25-32.
- [9] P. Qudousi, Salehi, A., Investigating the maintainability of self-compacting concrete containing limestone powder based on rheological parameters, *Omran Modares*, 18(5) (2017) 155-163
- [10] J.-Y. Petit, K.H. Khayat, E. Wirquin, Coupled effect of time and temperature on variations of plastic viscosity of highly flowable mortar, *Cement and concrete research*, 39(3) (2009) 165-170.
- [11] G. Pachideh, M. Gholhaki, A. Moshtagh, On the post-heat performance of cement mortar containing silica

باتوجه به کارگاهی بودن طرح مخلوط‌های تحقیق، بهتر است بزرگترین بعد سنگدانه‌های درشت، ۱۲/۵ میلی‌متر منظور شود.

استفاده از هر دو اندازه شن ۳/۴ و ۳/۸ در طرح مخلوط الزامی است تا بتواند در هم قفل و بست ایجاد و پیوستگی مناسبی را تامین کند؛ به‌علاوه از هر نوع شن باید درصد خاصی در طرح مخلوط‌ها استفاده شود. نسبت ۷۰٪ شن ریز و ۳۰٪ شن درشت گزینه بهینه است.

در این پژوهش به دلیل مهم بودن روانی بالا همراه با مقاومت بالا از $w/c = 0.39$ استفاده گردید؛ در صورتی که روانی در طرح ارجحیت باشد و مشکل هزینه نیز نباشد، می‌توان از $w/c = 0.416$ یا میکروسیلیس یا هر دو استفاده کرد تا ریسک کار پایین بیاید. البته افزایش جزئی آب باعث کاهش تنش جاری شدن و کاهش جزئی آب سبب افزایش لزجت می‌گردد.

از شاخصه‌های دیگر این بتن بازید به صورت چشمی می‌باشد که وقتی بتن در دیگ مخلوط‌کن در حال استراحت است، مقداری از آن را باید به‌وسیله کاردک زیر و رو کرد تا بتوان کیفیت بتن را بررسی نمود. اگر نتایج زیر و روی بتن در دیگ مثل هم است، کیفیت بتن خوب است و اگر روی بتن روان و زیر آن شبیه به حالت سفت‌شده است، بتن ته گرفته است که باید طرح مخلوط اصلاح گردد. به جای استفاده از رئومتر و روابط بینگهام، می‌توان به صورت تجربی و چشمی، تنش جاری شدن استاتیکی بتن (حداقل تنش لازم برای شروع جریان) یا تنش جاری شدن دینامیکی (حداقل تنش لازم برای حفظ جریان) را در دیگ مخلوط‌کن بررسی کرد.

سپاسگزاری

این پژوهش در آزمایشگاه بتن گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان انجام شده است. نویسندگان از همکاری آقای دکتر امیر مسعود صالحی کمال سپاسگزاری را دارند.

منابع

- [1] M. Taheri Amiri, Ashrafiyan, A., Baranjian, J, Asghari Tilki, F, Optimizing the design of self-compacting fibrous concrete mix containing polypropylene using meta-innovative algorithms of crow search and genetics, *Omran Modares*, 20(3) (2019) 1-12.
- [2] L. Sun, M. Koopialipoor, D. Jahed Armaghani, R. Tarinejad, M. Tahir, Applying a meta-heuristic algorithm to predict and optimize compressive strength of concrete

- Self-Consolidating Concrete Mixtures in Simulated Marine Environment (Persian Gulf), *Journal of Concrete Structures and Materials*, 4(2) (2019) 143-158.
- [22] M. Mazloom, H. Salehi, The relationship between fracture toughness and compressive strength of self-compacting lightweight concrete, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2018, pp. 062007.
- [23] M. Mazloom, M. Akbari Jamkarani, F. Afzali, Investigating the mechanical properties of self-compacting lightweight concrete containing copper slag, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(9) (2021) 289-305.
- [24] E.P. Koehler, D.W. Fowler, *ICAR mixture proportioning procedure for self-consolidating concrete*, 2007.
- [25] G.F. Kheder, R.S. Al Jadiri, New method for proportioning self-consolidating concrete based on compressive strength requirements, *ACI Materials Journal*, 107(5) (2010) 490.
- [26] JSCE, *Recommendations for self-compacting concrete*, Concrete Engineering Series, Japanese Society of Civil Engineers, 1999.
- [27] E. Güneysi, Y.R. Atewi, M.F. Hasan, Fresh and rheological properties of glass fiber reinforced self-compacting concrete with nanosilica and fly ash blended, *Construction and Building Materials*, 211 (2019) 349-362.
- [28] M.R. Geiker, M. Brandl, L.N. Thrane, L.F. Nielsen, On the effect of coarse aggregate fraction and shape on the rheological properties of self-compacting concrete, *Cement, concrete and aggregates*, 24(1) (2002) 3-6.
- [29] M. El-Rayyes, Remedies to rapid setting in hot-weather concreting, in: *Admixtures for Concrete-Improvement of Properties: Proceedings of the International RILEM Symposium*, CRC Press, 1990, pp. 137.
- [30] H. Diawara, N. Ghafoori, Influence of Combined Hauling Time and Temperature on Flow Properties of Self-Consolidating Concrete: Retempering Remediation, *Journal of materials in civil engineering*, 24(1) (2012) 1-7.
- fume or Granulated Blast-Furnace Slag, *Journal of Building Engineering*, 24 (2019) 100757.
- [12] G. Pachideh, M. Gholhaki, H. Ketabdari, Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars, *Journal of Building Engineering*, 29 (2020) 101178.
- [13] G. Pachideh, M. Gholhaki, H. Ketabdari, Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars, *Journal of Building Engineering*, 29 (2020) 101178.
- [14] G. Pachideh, M. Gholhaki, Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag, *Journal of Structural Fire Engineering*, (2020).
- [15] M. Ouchi, M. Hibino, K. Ozawa, H. Okamura, A rational mix-design method for mortar in self-compacting concrete, *Structural Engineering & Construction: Tradition, Present and Future.*, 2 (1998) 1307-1312.
- [16] H. Okamura, K. Ozawa, *Mix design for Self-Compacting Concrete*, Concrete library of JSCE 25 (1995) 107-120, Search in.
- [17] D. Oghenechuko, O. Orie, Optimization of superplasticized concrete using Taguchi approach: A case study of hydroplast 200, *Nigerian Journal of Technology*, 37(3) (2018) 611-618.
- [18] I. Nikbin, M. Beygi, M. Kazemi, J.V. Amiri, E. Rahmani, S. Rabbanifar, M. Eslami, Effect of coarse aggregate volume on fracture behavior of self compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 52 (2014) 137-145.
- [19] A. Neville, J. Brooks, *Concrete technology (the second edition)*, Harlow: Longman Scientific & Technical, (2010).
- [20] J. Mohammadi, K. Bagheri, K. Zandi, N. Nadipoor, Spatial Analysis and Ranking of Towns of Khuzestan Province In Terms of Development of ICT Indicators Using TOPSIS and AHP Techniques, *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 5(2) (2015) 69-76.
- [21] S. Mirvalad, A.A. Shirzadi Javid, S. Manouchehric, Investigating Durability Properties of Binary and Ternary

- curing temperature improves the strength of concrete test cylinders, in: Journal Proceedings, 1977, pp. 612-615.
- [37] S. Ahmad, A. Umar, Rheological and mechanical properties of self-compacting concrete with glass and polyvinyl alcohol fibres, Journal of Building Engineering, 17 (2018) 65-74.
- [38] B. 1881, PART 116, Testing concrete, Method for determination of compressive strength of concrete cubes, in.
- [39] A.c. 237, self-consolidating concrete, American Concrete Institute, 2008.
- [40] ACI Committee 305.1-06, Specification for hot weather concreting, American Concrete Institute, Detroit, 2007.
- [41] Guidelines for Viscosity Modifying Admixtures for Concrete, EFNARC, EFCA, 2006.
- [42] Self-Compacting Concrete European Project Group, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC and ERMCO, 2005.
- [31] G. De Schutter, P. Bartos, P. Domone, J. Gibbs, S.-c. Concrete, Whittles Publishing, Caithness, Scotland, (2008).
- [32] S.-C. Concrete, The European guidelines for self-compacting concrete, BIBM, et al, 22 (2005) 563.
- [33] E. C, Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete, European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures, Farham, UK, 2001.
- [34] S.P. Boindala, V. Arunachalam, Concrete mix design optimization using a multi-objective cuckoo search algorithm, in: Soft Computing: Theories and Applications: Proceedings of SoCTA 2018, Springer, 2020, pp. 119-126.
- [35] M.H. Beygi, M.T. Kazemi, I.M. Nikbin, J.V. Amiri, S. Rabbanifar, E. Rahmani, The influence of coarse aggregate size and volume on the fracture behavior and brittleness of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, 66 (2014) 75-90.
- [36] B.D. Barnes, R. Orndorff, J.E. Roten, Low initial

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. F. Sajedi, A. R. Dadpour, R. Basiri, Investigating the effect of the amount of aggregates on the properties of self-compacting concrete, Amirkabir J. Civil Eng., 55(7) (2023) 1419-1448.

DOI: 10.22060/ceej.2023.22063.7893



