Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 943-946
DOI: 10.22060/ceej.2020.18311.6828

Investigation of foam volume on the penetration parameters of foamed concrete

A. R. Bagheri[1*] , M. M. Rastegar[2]

[1] Associate Professor, K. N. Toosi University of Technology
[2] Ph.D. Candidate, K. N. Toosi University of Technology

ABSTRACT: In this study performance of mixes with w/c ratio of 0.5 and foam contents of 20, 35 and 50%, with regards to absorption, capillary absorption and chloride ingress, were determined and compared to those of a base mix with the same proportions but without foam incorporation. A structural grade foam concrete with w/c ratio of 0.4 and foam content of 20% was also considered together with a conventional concrete of equal strength level. The results show that foam incorporation results in decreased absorption and capillary absorption and increased chloride diffusion. The discrepancy is due to the presentation of absorption results on a total concrete volume basis. By considering these results on paste volume basis, which is the penetrable phase, absorption results show the same trend as the chloride diffusion results. Incorporation of 20, 35 and 50 percent foam into the base mix resulted in increases of 12, 27 and 50 percent in paste absorption and 18, 55 and 155 percent in chloride diffusion values, respectively. Increased foam volume resulted in larger and more connected air voids. Although foamed porosity has a negative effect on penetration characteristics, the structural grade foam concrete with its lower w/c ratio achieved similar levels of performance as the base mix and performed better than the conventional concrete of equal strength level.

Review History:
Received: Apr. 23, 2020
Revised: Jun. 16, 2020
Accepted: Jul. 13, 2020
Available Online: Aug. 21, 2020

Keywords:
Foamed concrete
Water absorption
Capillary absorption
Porosity
Chloride diffusion coefficient

1. INTRODUCTION

Foamed concrete is based on the incorporation of preformed air voids (foam) into cement paste and mortar. This lightweight concrete was initially used, mainly as low-density fill material. However, intensive research has made possible production of structural and semi-structural foamed concretes [1-3]. Previous research has mainly been concentrated on physical and mechanical characteristics of the material and durability aspects of foamed concrete has received less research attention. Information with regards to chloride ingress and chloride-induced steel corrosion is particularly scarce [4, 5]. As structural applications of foamed concrete would inevitably require the incorporation of steel reinforcement, the durability of steel in foamed concrete against corrosion requires further investigation. The ingress of chlorides or carbonation of concrete can compromise the passive layer and active corrosion can start. Absorption is an important mechanism for the ingress of chlorides into concrete [6-8]. The effect of foam volume on the absorption properties of foamed concrete has been investigated by a number of researchers. The majority of researchers have reported that foam incorporation results in decreased absorption when the results are reported as % by volume basis [9-11].

Diffusion, which occurs due to ionic concentration gradients in the pore liquid of the cement paste phase, is also a major mechanism for the penetration of chlorides into concrete. Reported work on chloride diffusion of foamed concrete is very scarce.

Due to the scarcity of reported work on the penetration of chloride ions into foamed concrete and also the importance of water absorption and diffusion phenomenon as the main mechanisms for ingress of ions into concrete, an experimental study was undertaken for investigating these issues.

2. METHODOLOGY

Effect of foam porosity on absorption, capillary absorption and chloride ingress was studied experimentally by water absorption, capillary absorption and rapid chloride migration test (RCMT). Performance of mixes with w/c ratio of 0.5 and foam contents of 20, 35 and 50% was determined and compared to those of a base mix with the same proportions but without foam incorporation. A structural grade foam concrete with w/c ratio of 0.4 and foam content of 20% was also considered together with a conventional concrete of equal strength level. The codes adopted for the mixes comprised of a letter indicating the mix type (B for the base mix, F for the foamed mixes and C for the conventional concrete), followed by a number showing the w/c ratio of each mix. Therefore, the foamed concrete mix with 20% foam porosity and w/c ratio of 0.5 is represented with the code (F20-0.5).

*Corresponding author's email: bagheri@kntu.ac.ir

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.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The results of the water absorption test show that by incorporation of air voids in the form of foam porosity, concrete absorption is reduced. Absorption values show the volume of pores accessible by water which mainly includes the capillary and gel pores of cement paste. By adding foam to the base mix, the volume of cement paste is reduced and a lower volume of water is absorbed per unit volume of concrete. Reduced absorption due to foam incorporation has also been reported by previous researchers [9, 11]. The structural grade foam concrete with its lower w/c ratio and relatively low paste content has the lowest absorption among the mixes studied.

Foamed porosity does not appear to participate in capillary suction. According to She et al. [12], when water in capillary porosity of cement paste comes in contact with the air voids, a water film quickly forms around the pores preventing further water penetration because of the inner air pressure in the air voids. The structural foamed concrete F20-0.4 exhibits the lowest capillary absorption among the mixes studied. Although the paste volume of this mix is somewhat higher than that of the foamed mix with 50% foam content, i.e., F50-0.5 mix, its lower w/c ratio of 0.4 has resulted in both a reduced and more tortuous capillary porosity.

The results of the rapid chloride migration test show that incorporation of air voids has resulted in the increased chloride diffusion coefficient of the foamed mixes compared to the base mix at the same w/c ratio. This is in contrast to the results of the absorption test which show an improvement due to foam incorporation. The following explanation can account for the observed discrepancy. Chloride ingress into concrete mainly takes place through the capillary porosity of the paste fraction. In the absorption tests however, although it is the paste porosity which is responsible for the absorbed water, the results are expressed as the volume of absorbed water divided by the total volume of concrete. In foamed concrete, paste volume is reduced by increased foam incorporation and therefore absorbed water per concrete volume is reduced, although paste absorption characteristics remain the same. Therefore, the logical way to for expressing the results of water absorption tests, is to give the results in the form of absorbed water against the paste volume, i.e., paste absorption. The results show that paste absorption actually increases with the incorporation of foam porosity, which is now in agreement with the trend shown by the RCMT test results. The increased paste absorption due to foam incorporation is due to the fact that during the absorption test, some of the air voids are filled with water because of the small head of water present in the test. Therefore, although the paste quality in the base mix and the foamed mixes F20-0.5 and F50-0.5 are the same, the water which entered some of the air voids of the foamed mixes in the absorption test contribute to the absorption of the paste fraction, increasing it further compared to the base mix. In a similar manner, also in the RCMT test the water entering into some of the entrained air voids contribute to increased diffusion paths in the paste, resulting in deeper chloride penetration and a higher coefficient of diffusion. Incorporation of 20, 35 and 50 percent foam into the base mix resulted in increases of 12, 27 and 50 percent in paste absorption and 18, 55 and 155 percent in chloride diffusion values, respectively. Despite the adverse effect of foam incorporation on absorption and diffusion characteristics of concrete, it is interesting to note that the structural grade foamed concrete with moderate foam content of 20% and w/c ratio of 0.4 performed better than the base mix. This shows that by reducing the w/c ratio, it is possible to compensate for the negative effects of foam incorporation. The conventional concrete mix however due to its higher w/c ratio, had a higher diffusion coefficient compared to the base mix.

4. CONCLUSIONS

According to the results of the current study, foam incorporation results in reduced absorption when presented as % by volume of concrete. However, when they are expressed as % by volume of cement paste, which is the penetrable phase, an opposite effect is observed. The results of the rapid chloride migration test also show increased chloride diffusion coefficients with increasing foam contents. It was found that some of the foamed porosity is penetrated by water when foamed concrete is immersed in water which results in increased absorption and diffusion values.

Although foam porosity results in increased absorption and chloride diffusion parameters, structural grade foamed concrete, due to its lower w/c ratio and relatively low foam content of 20%, achieved similar levels of performance to the base mixture. The performance of the structural grade foam concrete with regards to absorption and diffusion was superior to that of the conventional mix with equal strength value.

REFERENCES

[1] Bagheri, A., and Samea, S. A., 2019. "Role of non-reactive powder in strength enhancement of foamed concrete". *Construction and Building Materials*, 203, Apr, pp. 134-145.

[2] Falliano, D., De Domenico, D., Ricciardi, G., and Gugliandolo, E., 2018. "Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density". *Construction and Building Materials*, 165, Mar, pp.735-749.

[3] Jones, M.R., and McCarthy, A., 2005. "Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material". *Magazine of concrete research*, 57(1), Feb, pp.21-31.

[4] Amran, Y. M., Farzadnia, N., and Ali, A. A., 2015. "Properties and applications of foamed concrete; a review". *Construction and Building Materials*, 101(1), Dec, pp. 990-1005.

[5] Ramamurthy, K., Nambiar, E.K., and Ranjani, G.I.S., 2009. "A classification of studies on properties of foam concrete". *Cement and concrete composites*, 31(6), Jul, pp.388-396.

[6] Martys, N.S., and Ferraris, C.F., 1997. "Capillary transport in mortars and concrete". *Cement and concrete*

research, 7(5), May, pp.747-760.

[7] Medeiros, M.H., and Helene, P., 2009. "Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption". *Construction and building materials*, 23(3), Mar, pp.1476-1484.

[8] Zhang, S.P., and Zong, L., 2014. "Evaluation of relationship between water absorption and durability of concrete materials". *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, Jan.

[9] Hilal, A.A., Thom, N.H., and Dawson, A.R., 2014. "Pore structure and permeation characteristics of foamed concrete". *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(12), Dec, pp.535-544.

[10] Kearsley, E.P., and Wainwright, P.J., 2001. "Porosity and permeability of foamed concrete". *Cement and concrete research*, 31(5), May, pp.805-812.

[11] Nambiar, E.K., and Ramamurthy, K., 2007. "Sorption characteristics of foam concrete". *Cement and concrete research*, 37(9), Sep, pp.1341-1347.

[12] She, W., Zhang, Y., Miao, C., Hong, J., and Mu, S., 2020. "Water transport in foam concrete: visualisation and numerical modelling". *Magazine of Concrete Research*, 72(14), Jul, pp.734-746.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. R. Bagheri , M. M. Rastegar, Investigation of foam volume on the penetration parameters of foamed concrete , Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 943-946.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18311.6828

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۱۰، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۲۹۱ تا ۴۳۰۴
DOI: 10.22060/ceej.2020.18311.6828

بررسی تأثیر حجم کف روی پارامتر های نفوذ بتن کفی

علیرضا باقری*، محمدمهدی رستگار

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

خلاصه: در این پژوهش، تأثیر تخلخل ناشی از کف روی پارامترهای نفوذ بتن‌های کفی شامل جذب آب و نفوذ یون کلرید، بررسی شده است. پارامترهای نفوذ مخلوط‌های بتن کفی با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و میزان کف ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد، تعیین و با مخلوط پایه فاقد کف در نسبت آب به سیمان برابر مقایسه شده است. همچنین پارامترهای نفوذ بتن کفی سازه‌ای با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و حجم کف ۲۰ درصد تعیین و با بتن معمولی با مقاومت برابر مقایسه شده است. نتایج، بیانگر آن است که با افزایش تخلخل کفی، جذب آب و ضریب جذب موئینه کاهش یافته ولیکن ضریب انتشار یون کلرید افزایش می‌یابد. تناقض مشاهده شده، ناشی از نحوه محاسبه نتایج در آزمایش‌های جذب است که به صورت حجم آب جذب شده به ازای حجم کل بتن می‌باشد. با محاسبه حجم آب به ازای حجم خمیر سیمان که فاز نفوذپذیر است، مشخص گردید که مقدار جذب آب با ادغام کف افزایش می‌یابد که مشابه با روند نتایج نفوذ یون کلرید است. افزودن ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد حجم کف به مخلوط پایه، باعث افزایش جذب آب فاز خمیر سیمان به ترتیب برابر ۱۲، ۲۷ و ۵۰ درصد و افزایش ضریب انتشار یون کلرید به ترتیب برابر ۱۸، ۵۵ و ۱۵۵ درصد گردید. بررسی ساختار منافذ کفی نشان داد که با افزایش حجم کف، قطر منافذ افزایش و بخشی از آن‌ها با هم ادغام می‌شوند. در عین حال، بتن کفی سازه‌ای، عملکردی مشابه مخلوط پایه داشت و همچنین نسبت به بتن معمولی با مقاومت برابر، نفوذپذیری کمتری از خود نشان داد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۴
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۲۷
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:
بتن کفی
جذب آب
جذب موئینه
تخلخل
ضریب انتشار یون کلرید

۱-مقدمه

بتن کفی، یکی از انواع بتن‌های سبک می‌باشد که از ترکیب حباب‌های ریز با خمیر سیمان و یا ملات ایجاد می‌گردد [۳-۱]. از مزیت های این بتن می‌توان به سبکی، هزینه کم، عایق بندی حرارتی و عدم نیاز آن به سنگدانه‌های سبک اشاره نمود [۵-۳]. در ابتدا از بتن کفی به عنوان عایق و مصالح پرکننده استفاده می‌شد ولی اکنون با پیشرفت تکنولوژی، ساخت بتن‌های کفی پایدار با مقاومت بالا، زمینه ساز بستری مناسب جهت تولید بتن‌های کفی با مقاومت سازه‌ای و نیمه سازه‌ای گردیده است [۸-۵]. عمده تحقیق های قبلی انجام شده در خصوص بتن‌های کفی در رابطه با خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها بوده و دوام این نوع بتن‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۹ و ۳ و ۲].

توسعه کاربرد بتن‌های کفی برای مقاصد سازه‌ای، مستلزم استفاده از آرماتور در این نوع بتن‌ها می‌باشد و لذا مباحث مرتبط با دوام در برابر خوردگی آرماتورها در بتن‌های کفی حائز اهمیت است. کربناته شدن بتن و کاهش قلیائیت آن از عوامل مهم از بین رفتن لایه انفعالی سطوح میلگردها و شروع خوردگی آن‌ها در بتن می‌باشد. عملکرد بتن کفی به لحاظ مقاومت در برابر کربناسیون

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: bagheri@kntu.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.

توسط جونز[1] و مکارتی[2] [۱۰ و ۸] مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی های این محققین نشانگر این است که ادغام حباب های کف باعث افزایش نرخ کربناته شدن بتن می گردد. همچنین بر اساس نتایج بررسی آزمایشگاهی لون[3] و همکاران [۱۱]، بتن های کفی با چگالی های ۱۸۰۰ و ۱۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب به ترتیب دارای نرخ کربناته شدن برابر ۴/۴ و ۱۶/۳ میلی متر بر مجذور سال بوده اند که نشانگر اثر منفی حباب های کفی بر کربناسیون است. نتایج گزارش شده توسط نامسون[4] و همکاران [۱۲] نیز نشانگر اثر منفی افزایش حجم کف بر دوام در برابر کربناسیون بوده است.

نفوذ یون کلرید در بتن، از دیگر دلایل اصلی خوردگی آرماتورها در بتن است. مکانیزم‌های اصلی نفوذ یون کلرید در بتن، شامل مکش موئینه، جذب آب و انتشار می‌باشند. با توجه به موضوع تحقیق حاضر، در ادامه، یافته‌های محققین قبلی در خصوص اثر مقدار تخلخل کفی روی این پارامترها ارائه می گردد.

جذب آب از مهم ترین مکانیزم‌های نفوذ عوامل مهاجم به داخل بتن محسوب می گردد [۱۵-۱۳]. تأثیر میزان تخلخل ناشی از کف در جذب آب بتن کفی توسط برخی از محققین بررسی گردیده است. مشخص شده است که جرم حجمی کمتر بتن کفی در مقایسه با بتن معمولی باعث می‌شود جذب آب آن به صورت درصد وزنی، اعداد بزرگتری را در مقایسه با بتن معمولی به ازای مقدار برابر آب جذب شده نشان دهد. لذا مقایسه نتایج به صورت درصد وزنی گمراه کننده است و تعیین جذب آب به صورت درصد حجمی، امکان مقایسه واقعی‌تری را با مقادیر مربوط به بتن معمولی فراهم می‌نماید [۱۸-۱۶]. کرسلی[5] و وینرایت[6] [۱۷] گزارش کرده اند که اثر حجم کف در جذب آب حجمی بتن کفی، اندک می‌باشد. کاکس[7] و واندیک[8] [۱۹] مقادیر جذب آب بتن های کفی را بالاتر از بتن های معمولی گزارش کرده اند. با توجه به اینکه حجم خمیر سیمان در بتن های معمولی بسیار بیشتر از بتن های کفی است و با توجه به اینکه جذب آب عمدتاً در این فاز رخ می دهد، این نتایج را نمی توان نشانگر اثر منفی کف بر جذب آب تلقی نمود. تحقیقاتی که توسط نامبیار[9] و رامامورتی[10] [۱۸] بر روی جذب آب بتن‌های کفی با حجم متفاوت کف صورت گرفته است، بیانگر قدری کاهش در جذب آب با افزایش حجم کف می‌باشد. بر اساس یافته‌های آن‌ها، جذب آب اساساً در حجم خمیر سیمان رخ می‌دهد و سهم تخلخل ناشی از کف در جذب آب ناچیز می‌باشد. همچنین این محققین گزارش کرده اند که با افزایش حجم کف، جذب موئینه بتن‌های کفی کاهش می‌یابد. هلال[11] و همکاران [۱۶] نیز اظهار داشته‌اند که با افزایش حجم کف، جذب آب کاهش می‌یابد. طبق نظر این محققین، تخلخل ناشی از کف عمدتاً از هم مجزا بوده، لذا نقش اندکی در جذب آب ایفا می‌نمایند. در عین حال پانسار[12] [۲۰] گزارش کرده است که مقادیر بالای حجم کف می تواند به علت ارتباط بین منافذ کفی، منجر به افزایش جذب آب گردد. تحقیقات اخیر که توسط شی[13] و همکاران [۲۱] پیرامون جذب موئینه در بتن‌های کفی صورت گرفته است، حاکی از کاهش جذب موئینه با افزایش حجم کف می‌باشد. بر اساس نظر این محققین، هنگامی که آب از طریق حفرات موئینه خمیر سیمان به جدار حفرات هوا می‌رسد، لایه‌ای از آب به سرعت سطح پیرامون حفره هوا را در برمی گیرد ولیکن به علت فشار داخلی موجود در حفره، از ورود آب به داخل آن جلوگیری می گردد.

پدیده انتشار، از مهم ترین مکانیزم‌های نفوذ یون کلرید به داخل بتن می‌باشد. بررسی‌های قبلی در خصوص انتشار یون کلرید در بتن کفی بسیار محدود می‌باشد و بر اساس بررسی مراجع، تنها یک تحقیق در این خصوص گزارش شده است. مطالعات آزمایشگاهی بریدی[14] و همکاران [۲۲] پیرامون انتشار یون کلرید بتن‌های کفی با سه دانسیته متفاوت، حاکی از آن است که تغییرات در مقدار کف، تفاوت محسوسی در انتشار یون کلرید ایجاد نمی‌نماید؛ همچنین آن‌ها اظهار داشته‌اند که انتشار یون کلرید در بتن کفی، به مراتب بیشتر از بتن معمولی با نسبت آب به سیمان برابر می‌باشد.

با توجه به محدود بودن بررسی‌های قبلی در خصوص نفوذ یون کلرید در بتن کفی و همچنین اهمیت جذب آب و پدیده انتشار به عنوان مکانیزم‌های اصلی ورود یون مذکور به داخل بتن، در تحقیق

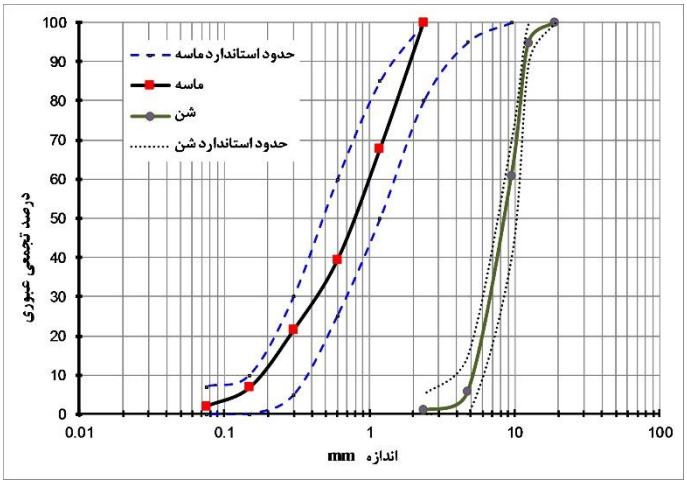
1 Jones
2 McCarthy
3 Loon
4 Namsone
5 Kearsley
6 Wainwright
7 Cox
8 Van Dijk

9 Nambiar
10 Ramamurthy
11 Hilal
12 Panesar
13 She
14 Brady

جدول ۱. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان

Table 1. Chemical and physical properties of cement

ترکیبات شیمیایی (٪)											
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
۲۱/۲	۴/۹	۳/۵	۶۳/۲	۳/۷	۰/۱۸	۰/۵۱	۲/۲	۵۳/۴	۲۰/۱	۶/۹	۱۰/۴
زمان گیرش اولیه و نهایی: ۱۴۰ و ۱۹۰ دقیقه											



شکل ۱. منحنی دانهبندی سنگدانههای مورد استفاده در ساخت مخلوطها

Fig. 1. Gradation curve of aggregates used in production of the mixes

حاضر، مطالعات آزمایشگاهی جهت دستیابی اطلاعات جدید در این زمینه صورت گرفته که جزئیات آن در بخش های بعدی ارائه شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد مصرفی

۲-۱-۱- سیمان

سیمان پرتلند تیپ ۱ مطابق با الزامات ASTM C۱۵۰ [۲۳] با مقاومت فشاری ۲۸ روزه مکعبی ملات استاندارد آن، ۴۰ مگاپاسکال و ترکیبات شیمیایی مطابق جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۱-۲- سنگدانهها

سنگدانه مورد استفاده جهت تولید بتن کفی، ماسه نیمه شکسته با حداکثر سایز ۲/۳۶ میلی متر بوده است که به ترتیب دارای جذب آب و دانسیته اشباع با سطح خشک ۲/۶۷ درصد و ۲۵۷۰ کیلوگرم در متر مکعب می‌باشد. برای ساخت بتن معمولی، علاوه بر ماسه ذکر شده، از سنگدانه نخودی شکسته با حداکثر سایز ۱۲/۵ میلی متر با جذب آب ۲/۵ درصد و دانسیته اشباع با سطح خشک ۲۵۵۰ کیلوگرم در متر مکعب استفاده شده است. منحنی دانه بندی سنگدانه های مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۱-۳- عصاره کف

عصاره کف پروتئینی، مطابق با الزامات ASTM C۷۹۶ [۲۴] با چگالی ۱/۱۹ و بر اساس توصیه سازنده، با نسبت ترکیب با آب ۱ به ۲۰ مورد استفاده قرار گرفته است.

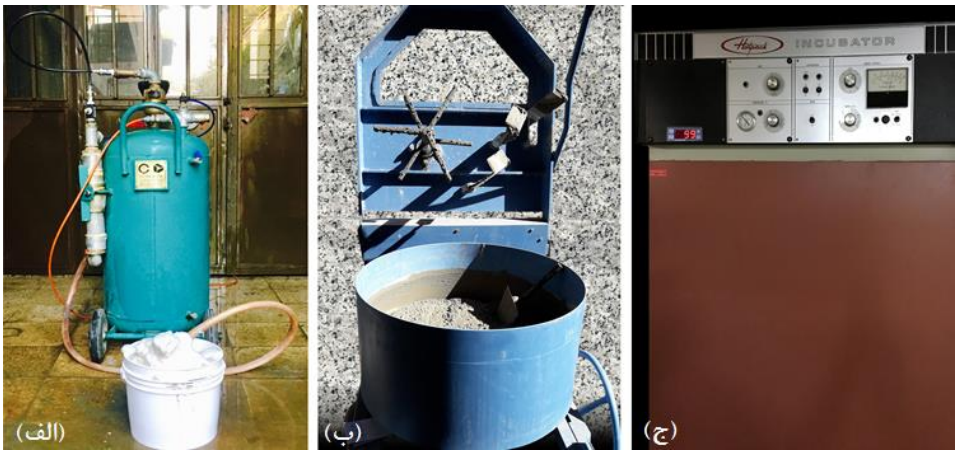
۲-۱-۴- آب مصرفی

جهت ساخت طرح مخلوطها، از آب شرب شهری استفاده گردیده است.

جدول ۲. مقادیر و نسبت‌های اجزاء مخلوط‌ها

Table 2. The amount and proportions of mixture ingredients

کد مخلوط	سیمان	آب	ماسه	شن	نسبت آب به سیمان	حجم خمیر سیمان	مقدار کف	نسبت سنگدانه به سیمان
	(کیلوگرم در مترمکعب)					مترمکعب	درصد	
B-0.5	۸۲۵	۴۱۳	۸۲۵	۰	۰/۵	۰/۶۸	۰	۱
F20-0.5	۶۶۰	۳۳۰	۶۶۰	۰	۰/۵	۰/۵۴	۲۰	۱
F35-0.5	۵۳۶	۲۶۸	۵۳۶	۰	۰/۵	۰/۴۴	۳۵	۱
F50-0.5	۴۱۳	۲۰۶	۴۱۳	۰	۰/۵	۰/۳۴	۵۰	۱
F20-0.4	۵۸۵	۲۳۴	۹۷۰	۰	۰/۴	۰/۴۲	۲۰	۱/۶۶
C-0.71	۳۵۰	۲۴۸/۵	۱۱۲۷	۵۱۰	۰/۷۱	۰/۳۶	۰	۴/۶۷

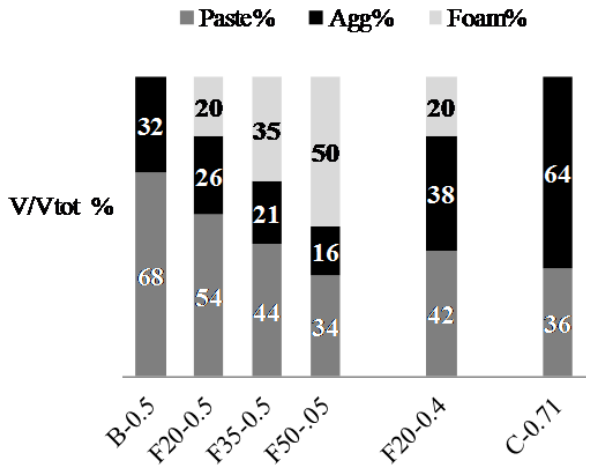


شکل ۲. تجهیزات مورد استفاده جهت ساخت و عملآوری بتن کفی (الف) دستگاه فوم ژنراتور (ب) مخلوطکن (ج) انکوباتور

Fig. 2. Equipment used for the production and curing of foamed concrete (a) Foam generator (b) Mixer (c) Incubator

۲-۲- مخلوط‌های مورد بررسی و نحوه ساخت و آماده سازی آزمونه ها

به منظور بررسی مستقیم اثر حجم کف بر خصوصیات جذب و نفوذ بتن کفی، ۴ طرح مخلوط با نسبت های یکسان اجزای فاز ملات اما با حجم‌های متفاوت کف، شامل ۰٪ (مخلوط پایه)، ۲۰٪، ۳۵٪ و ۵۰٪ در نظر گرفته شده است. نسبت آب به سیمان و نسبت سنگدانه به سیمان در این طرح مخلوط‌ها به ترتیب ۰/۵ و ۱ می‌باشد. بتن کفی سازه‌ای با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و حجم کف ۲۰٪ به منظور دستیابی به مقاومت سازه ای و بتن معمولی با مقاومت برابر با بتن کفی سازه‌ای جهت مقایسه ساخته شدند که مشخصات طرح مخلوط‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. کدهای اختصاص یافته برای مخلوط‌ها شامل یک حرف است که نوع مخلوط را نشان می دهد (B ملات پایه فاقد کف، F بتن کفی و C بتن معمولی). عددی که بلافاصله بعد از این حرف ذکر شده، نمایانگر درصد حجم کف و عدد بعد از خط تیره، نشان دهنده نسبت آب به سیمان می‌باشد، به عنوان مثال، کد F۳۵-۰.۵ معرف بتن کفی با حجم کف ۳۵ درصد و نسبت آب به سیمان ۰/۵ می‌باشد. با مشخص بودن نسبت آب به سیمان، نسبت سنگدانه به سیمان و حجم کف، مقادیر مصالح مصرفی با استفاده از روش حجم مطلق محاسبه گردیده است. برای ساخت بتن کفی، از



شکل ۳. درصد حجم خمیر سیمان، سنگدانه و کف در یک متر مکعب برای مخلوطهای مورد بررسی

Fig. 3. Percentage of volume of paste, aggregates and foam per cubic meter of the mixtures studied

شکل ۴. چگونگی قرارگیری آزمونه ها در آزمایش جذب آب مویینه

Fig. .4 The specimens during the capillary water absorption test

روش پیش کف‌زایی استفاده شده و کف مورد نیاز توسط دستگاه فوم ژنراتور در مقیاس آزمایشگاهی، مطابق شکل ۲-الف تهیه شده است. مخلوط پایه، از ترکیب سیمان، ماسه و آب در مخلوط کن تاوه‌ای (شکل ۲- ب) به مدت زمان ۵ دقیقه ایجاد گردیده است. برای تولید بتن کفی، حجم کف مورد نیاز به مخلوط پایه اضافه شده و مخلوط کردن تا رسیدن به یک مخلوط بتن کفی همگن ادامه می‌یابد. بتن معمولی نیز مطابق با روش ذکر شده، جهت تولید مخلوط پایه تهیه شده است. از هر مخلوط متناسب با هر آزمایش، آزمونه‌های لازم تهیه و به مدت ۴۸ ساعت در انکوباتور مطابق شکل ۲-ج با رطوبت حداقل ۹۵ درصد نگهداری و سپس از قالب خارج شده و متناسب با شرایط هر آزمایش تا سن مقرر نگهداری شده‌اند. درصدهای حجم سنگدانه، خمیر سیمان و کف در یک متر مکعب برای هر طرح مخلوط در شکل ۳ نشان داده شده است.

۲-۳- آزمایش های انجام شده

۲-۳-۱- تعیین دانسیته کف

دانسیته کف تولید شده، مطابق با استاندارد ASTM C ۷۹۶ [۲۴] اندازه گیری شده است.

۲-۳-۲- تعیین دانسیته بتن تازه

دانسیته بتن معمولی و بتن کفی مطابق با روش ذکر شده در استاندارد ASTM C ۷۹۶ [۲۴] اندازه گیری شده است.

۲-۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری

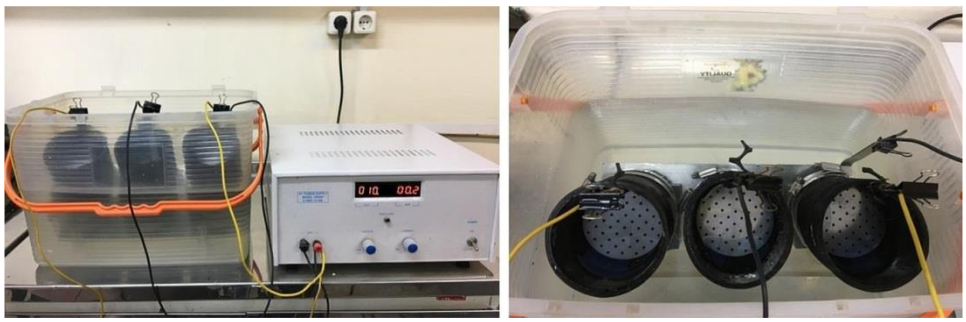
برای تعیین مقاومت فشاری هر مخلوط ساخته شده، از ۳ آزمونه مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری مطابق با استاندارد BS EN ۱۲۳۹۰-۳ [۲۵] استفاده شده است. این آزمونه‌ها پس از بیرون آوردن از قالب، جهت عمل‌آوری داخل انکوباتور با رطوبت حداقل ۹۵ درصد انتقال یافته و در سنین ۷، ۲۸ و۹۰ روزه از آن خارج گردیده و تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته‌اند.

۲-۳-۴- بررسی ساختار منافذ کفی توسط میکروسکوپ الکترونی

بررسی ساختار منافذ ناشی از ادغام کف در بتن‌های کفی توسط تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و با درصد کف ۲۰، ۳۵ و ۵۰ انجام گردید. در این آزمایش، شعاع الکترونی به سطح نمونه تابانده و الکترون های ثانویه برخاسته از سطح، توسط آشکارساز جمع‌آوری و پردازش شده و تبدیل به تصویر توپوگرافی سطح می گردد. پوشاندن لایه‌ای از طلا به ضخامت حدود ۳۰ نانومتر روی سطح نمونه باعث افزایش الکترون های ثانویه و افزایش وضوح تصویر توپوگرافی سطح می گردد.

۲-۳-۵- آزمایش جذب آب موئینه

جهت انجام این آزمایش، از ۳ آزمونه مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری



شکل ۵. نحوه انجام آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید (RCMT)

Fig .5 . The RCMT test setup

برای هر مخلوط استفاده گردید. آزمونه‌ها تا سن ۲۸ روز درون انکوباتور با رطوبت حداقل ۹۵ درصد قرار گرفته و سپس مطابق با دستورالعمل RILEM CPC۱۱.۲ [۲۶] آماده سازی شدند. نمونه‌ها به مدت ۱۴روز درون آون با دمای ۴۵ درجه سانتی گراد تا رسیدن به وزن ثابت قرار گرفته و بعد از خنک شدن در دمای آزمایشگاه، سطح تحتانی نمونه‌ها همان گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است در تماس با آب قرار می‌گیرد. سطح آب در طول زمان آزمایش در تراز ۱±۵ میلی متر از کف ثابت نگه داشته شده است. در این روش، i که میزان آب جذب شده در واحد سطح در زمان t می‌باشد، محاسبه می‌گردد و با ترسیم نقاط به دست آمده در دستگاه $i-\sqrt{t}$ و برازش یک خط مستقیم از این نقاط، ضریب جذب آب مویینه s (شیب خط برازش شده) و ثابت جذب آب مویینه c (عرض از مبدأ خط برازش شده) به دست می‌آید. رابطه عمومی خط برازش شده مطابق با رابطه (۱) می‌باشد.

$$i = C + S\sqrt{t} \qquad (۱)$$

که در آن:

i = میزان آب جذب شده در واحد سطح [gr/mm^2] برابر با عمق معادل نفوذ آب [mm]

C = ثابت جذب آب موئینه [mm]

S = ضریب جذب آب موئینه [mm/min$^{0.5}$]

t = زمان [min]

۲-۳-۶- اندازه گیری تخلخل کلی

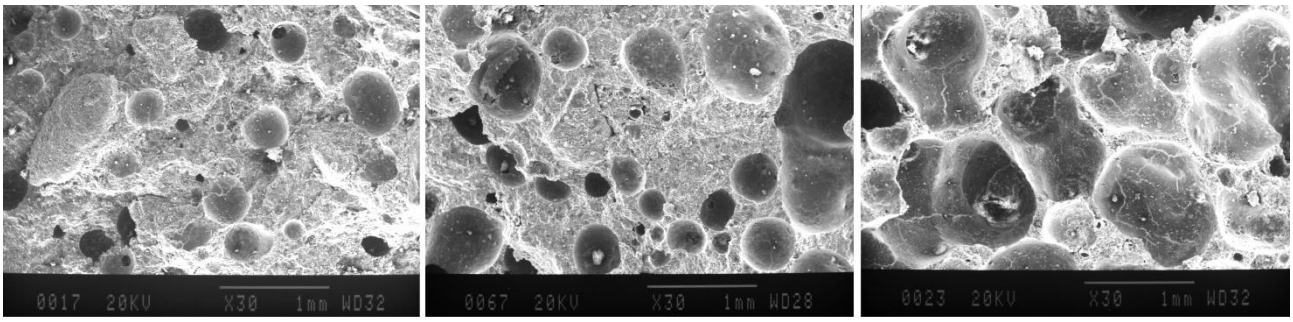
تخلخل کلی بتن کفی، شامل تخلخل موئینه و ژلی موجود در خمیر سیمان و تخلخل ناشی از کف می‌باشد که جهت تعیین آن از ۳ آزمونه مکعبی ۱۰۰ میلی متری برای هر مخلوط استفاده شده است. در این پژوهش، نمونه‌ها به روش اشباع در خلأ، مطابق روشی که هلال و همکاران [۱۶] و کرسلی و وینرایت [۲۷] شرح داده‌اند، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. پس از قرار گرفتن نمونه‌ها درون اتاقک مرطوب با رطوبت حداقل ۹۵ درصد تا سن ۲۸ روز، نمونه‌ها بیرون آورده شده و درون آون با دمای ۵±۱۰۰درجه سانتی گراد تا رسیدن به وزن ثابت (W_{dry}) قرار می‌گیرند؛ سپس نمونه‌ها درون دسیکاتور قرار گرفته و فشاری معادل با ۵۰۰ میلی متر جیوه به مدت ۳ ساعت بر روی آن‌ها اعمال می‌گردد؛ بعد از آن، آب به داخل دستگاه دسیکاتور هدایت شده تا روی سطح نمونه را بپوشاند. سپس برای بار دیگر، عمل خلأ به مدت ۳ ساعت بر روی نمونه‌ها اعمال می‌گردد و در نهایت نمونه‌ها به مدت ۱۰ ساعت درون آب با فشار نرمال باقی مانده و بعد از آن بیرون آمده و وزن اشباع با سطح خشک نمونه در هوا ($W_{s,a}$) و آب ($W_{s,w}$) مورد محاسبه قرار می‌گیرد و در پایان، تخلخل کلی نمونه(Q_{tot}) توسط رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$\text{جذب آب حجمی} = \frac{W_{s,a} - W_{dry}}{W_{s,a} - W_{s,w}} \times 100 \qquad (۲)$$

جذب آب، بیانگر میزان منافذ قابل دسترس توسط آب می‌باشد که عمدتاً شامل منافذ موئینه و ژلی است. جذب حجمی بتن به عنوان تخلخل ظاهری ($Ø_{app}$) اطلاق می‌گردد که حفرات هوای منفک، نقشی در تخلخل ظاهری ایفا نمی‌نمایند [۱۶].

۲-۳-۷- آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید

آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید (RCMT) در سن ۲۸ روز، مطابق با روش NT Build ۴۹۲ [۲۸] بر روی ۳ آزمونه استوانه‌ای با



F20-0.5 F35-0.5 F50-0.5

شکل ۶. تصاویر SEM مخلوط‌های بتن کفی با بزرگ‌نمایی ۳۰ برابر

Fig. 6 . SEM images of foamed concrete mixes with 30x magnification

جدول ۳. مقادیر دانسیته و مقاومت فشاری مخلوط‌ها

Table 3. Density and compressive strength of mixtures

کد مخلوط	دانسیته طراحی	دانسیته اندازه‌گیری شده	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)		
	(کیلوگرم در مترمکعب)		۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
B-0.5	۲۰۶۳	۲۰۸۱	۲۰/۴	۳۶/۹	۴۳/۳
F20-0.5	۱۶۶۰	۱۶۴۸	۸	۱۳/۱	۱۶/۸
F35-0.5	۱۳۵۹	۱۳۷۱	۳/۵	۶	۸/۱
F50-0.5	۱۰۵۸	۱۰۴۳	۲/۱	۳/۱	۳/۷
F20-0.4	۱۷۹۹	۱۷۸۵	۲۱/۲	۲۴/۶	۲۹/۷
C-0.71	۲۲۳۵	۲۲۱۵	۱۸/۵	۲۵/۲	۳۲/۹

قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر برای هر طرح مخلوط، صورت گرفته است. آزمونه‌ها به مدت ۲۱ روز درون انکوباتور با رطوبت نسبی حداقل ۹۵ درصد و سپس به مدت یک هفته (تا سن ۲۸ روز) درون حوضچه آب به صورت اشباع قرار گرفته، تا حفرات ژلی و موئینه آن‌ها به طور کافی اشباع شوند. در روش استاندارد، آماده‌سازی آزمونه‌های بتن معمولی به‌صورت اشباع در خلأ صورت می‌پذیرد تا از اشباع بودن منافذ در پدیده انتشار، اطمینان حاصل گردد؛ اما استفاده از این روش، برخلاف روش معمول غوطه‌وری، برای بتن‌های کفی، منجر به پر شدن حفرات ناشی از کف می‌گردد. پس از آماده‌سازی، آزمونه‌ها در قالب‌های لاستیکی مطابق شکل ۵ قرار گرفته و قسمت فوقانی و تحتانی آن‌ها به ترتیب در معرض محلول ۰/۳ مولار NaOH و ۱۰٪ NaCl قرار گرفته است و توسط الکترودهایی که در دو سر نمونه قرار داده می‌شود، اختلاف پتانسیلی متناسب با جریان عبوری اولیه اعمال و یون‌های کلرید به داخل نمونه رانده می‌شود. عمق نفوذ یون‌های کلرید با دو نیم کردن نمونه و پاشش محلول نیترات نقره به سطح شکسته شده به دست می‌آید. با استفاده از میانگین عمق نفوذ یون کلر در آزمونه‌ها، ضریب مهاجرت سریع یون کلرید (D_{RCMT}) طبق رابطه ارائه شده در استاندارد NT Build ۴۹۲ [۲۸] محاسبه می‌گردد.

۳-نتایج آزمایشگاهی و تفسیر آن‌ها

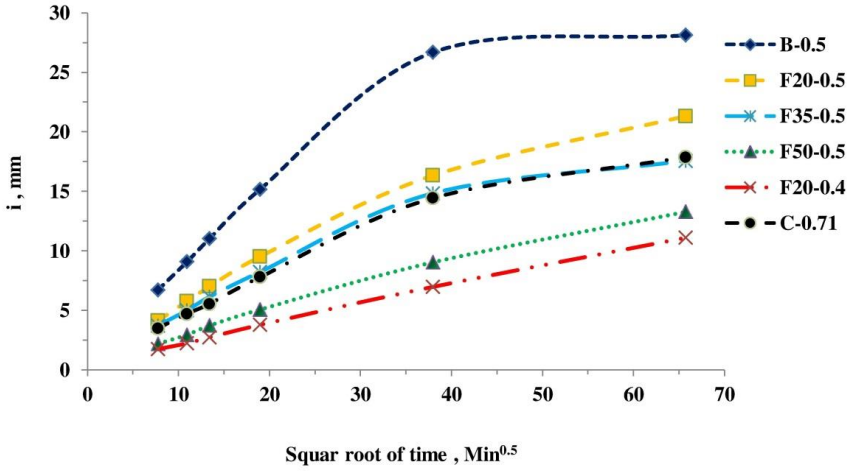
۳-۱- دانسیته بتن تازه

دانسیته اندازه‌گیری شده مخلوط‌ها، بلافاصله پس از ساخت در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر در محدوده ۵۰ کیلوگرم در متر

جدول ۴. نتایج جذب آب و ضریب انتشار یون کلرید

Table 4. Results of absorption and diffusion tests

کد طرح	ضریب جذب موئینه بتن	جذب آب بتن		تخلخل ظاهری $Ø_{app}$	تخلخل کلی $Ø_{tot}$	$Ø_{tot}$ - $Ø_{app}$	حفرات هوای پر شده با آب	ضریب جذب موئینه خمیر سیمان	جذب آب خمیر سیمان	ضریب انتشار یون کلرید $D_{RCMT(28)}$
	($mm/min^{0.5}$)	% by weight	% by volume	(%)	(%)	(%)	(%vol. of concrete)	($mm/min^{0.5}$)	(% volume)	(10^{-12} m^2/s)
B-0.5	۰/۷۶	۱۶/۱	۲۹/۴	۲۹/۴	۲۹/۵	۰/۱	-	۱/۱۱	۴۰	۲۲/۷
F20-0.5	۰/۴۸	۱۸/۴	۲۶	۲۶	۴۳/۴	۱۷/۴	۲/۶	۰/۸۹	۴۴/۸	۲۶/۸
F35-0.5	۰/۴	۲۱/۲	۲۳/۷	۲۳/۷	۵۴	۳۰/۳	۴/۷	۰/۹۱	۵۰/۷	۳۵/۲
F50-0.5	۰/۲۶	۲۳/۶	۲۱/۴	۲۱/۴	۶۴/۷	۴۳/۳	۶/۸	۰/۷۶	۶۰	۵۷/۹
F20-0.4	۰/۱۸	۱۱/۲	۱۳/۷	۱۳/۷	۳۱/۷	۱۸	۲	۰/۴۷	۲۶/۴	۱۵/۱
C-0.71	۰/۳۹	۱۰/۷	۲۱/۷	۲۱/۷	۲۲/۹	۱/۲	-	۱/۰۶	۴۸/۳	۳۵



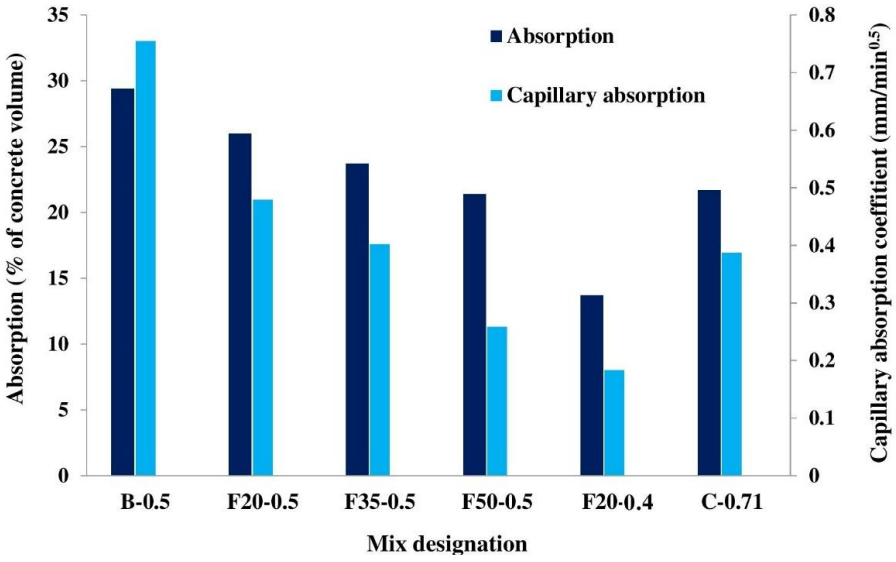
شکل ۷. نتایج آزمایش جذب موئینه (حجم آب جذب شده در واحد سطح مقطع نمونه بتنی در مجذور زمان)

Fig. 7. Result of the capillary absorption test (volume of water absorbed per unit cross section of concrete specimen plotted against square root of time)

مکعب نسبت به دانسیته طراحی بوده که نشانگر پایداری کافی کف در طی مراحل تولید بتن کفی می‌باشد [۳۰ و۲۹ و ۲۲].

۳-۲- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

مقادیر مقاومت فشاری مخلوطها در جدول ۳ ارائه شده است. همان گونه که از نتایج برمی‌آید، مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط پایه ۳۶/۹ مگاپاسکال است که افزایش حجم کف به آن، منجر به کاهش قابل توجهی در مقاومت نمونه‌ها گردیده است، به طوری که با اضافه کردن ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد حجم کف به ملات پایه، مقادیر مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن‌ها به ترتیب به ۱۳/۱، ۶/۰۴ و ۳/۱ مگاپاسکال تقلیل یافته است. بتن کفی سازه‌ای با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و حجم کف ۲۰ درصد، دارای مقاومت فشاری ۲۸ روزه



شکل ۸. نتایج آزمایش جذب آب و جذب موئینه طرح مخلوط‌ها

Fig. 8. Results of absorption and capillary absorption of various mixes

۲۴/۶ مگاپاسکال است که کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش نسبت سنگدانه به سیمان، منجر به افزایش ۸۸ درصدی مقاومت فشاری نسبت به بتن کفی با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و حجم کف مشابه شده است. در همین سن، مقاومت فشاری بتن معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۷۱، ۲۵/۲ مگاپاسکال می‌باشد. مشابه بودن مقاومت فشاری بتن معمولی با بتن کفی سازه‌ای، امکان مقایسه عملکرد آن‌ها بر اساس مقاومت یکسان را فراهم می‌نماید.

۳-۳- بررسی ریزساختار توسط میکروسکوپ الکترونی

شکل ۶، تصاویر حاصله از میکروسکوپ SEM با بزرگ‌نمایی ۳۰ برابر، از نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و با درصد های کف ۲۰، ۳۵ و ۵۰ را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش درصد کف، قطر حباب های هوا افزایش و فاصله بین آن‌ها کاهش یافته است. همچنین تعداد ریزترک‌ها در دیواره حفرات و میزان حباب‌های ادغام شده با یکدیگر افزایش یافته که می‌تواند باعث افزایش نفوذ پذیری گردد.

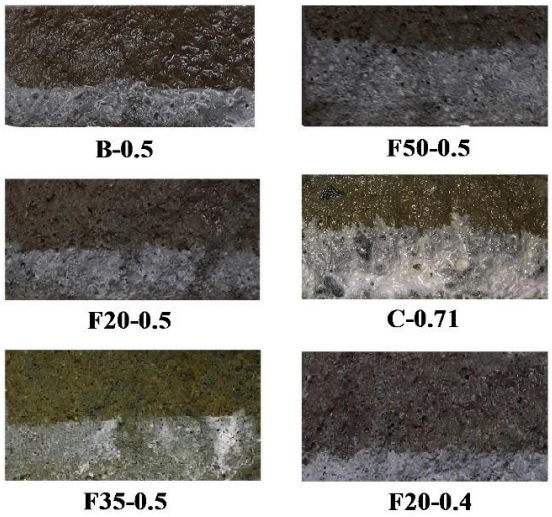
۳-۴- جذب آب موئینه

نتایج حاصل از آزمایش جذب موئینه که بیانگر حجم آب جذب شده در طول زمان به ازای واحد سطح مقطع نمونه که در تماس با آب می‌باشد، در شکل ۷ نشان داده شده است. ضریب جذب موئینگی که از شیب خط برازش شده در ناحیه خطی حاصل می‌شود، در جدول ۴ ارائه شده‌است. نتایج نشانگر این است که وجود حباب‌های هوای ناشی از کف، منجر به کاهش جذب موئینگی شده که مؤید یافته های محققین قبلی می‌باشد [۲۱ و ۱۸]. جذب موئینه، علاوه بر حجم کلی حفرات موئین، متأثر از سایز حفرات، میزان اتصال آن‌ها و میزان پر پیچ و خم بودن مسیر های عبور جریان می‌باشد. وجود حفرات کفی، منجر به کاهش حجم خمیر سیمان و به تبع، کاهش منافذ موئینه و افزایش پیچ و خم مسیرهای عبور جریان می‌گردد. همچنین مطرح شده است که حباب‌های کف به علت داشتن قطر بیشتر نسبت به حفرات موئینه، دارای مکش موئینه پائین‌تری هستند که با افزایش درصد کف، قطر حفرات هوا افزایش یافته و مکش آن‌ها کمتر می‌گردد که این امر منجر به کاهش بیشتر جذب آب موئینه می‌شود [۳۱].

همانطور که در شکل ۷ و جدول ۴ نشان داده شده است، بتن کفی سازه‌ای دارای کمترین مقدار ضریب جذب موئینگی می‌باشد. هر چند حجم خمیر سیمان در این مخلوط بیشتر از بتن کفی با ۵۰ درصد کف می‌باشد، ولی نسبت آب به سیمان کمتر این مخلوط، منجر به کاهش حجم منافذ موئینه و پر پیچ و خم شدن مسیرهای جریان گردیده است.

۳-۵- جذب آب و تخلخل

نتایج جذب آب وزنی و حجمی طرح مخلوط‌ها، در جدول ۴ نشان



شکل ۹. مقادیر نفوذ یون کلرید در پایان آزمایش مهاجرت تسریع شده یون کلرید

Fig. 9. Chloride profiles of split specimens after the RCMT test

داده شده‌است. تعیین جذب آب به صورت درصد حجمی، امکان مقایسه واقعی‌تری در ارزیابی عملکرد بتن فراهم می‌نماید، به ویژه هنگامی که بتن‌های با دانسیته متفاوت مورد ارزیابی قرار می‌گیرند [۱۸ و ۱۶]. میزان جذب آب، نمایانگر حفرات قابل دسترس توسط آب می‌باشد، که عمدتاً شامل حفرات ژلی و موئینه می‌باشد. جذب آب حجمی بتن، بیانگر تخلخل ظاهری بتن می‌باشد که در آن، حفرات هوای منفک، در میزان جذب آب مشارکت ندارند.

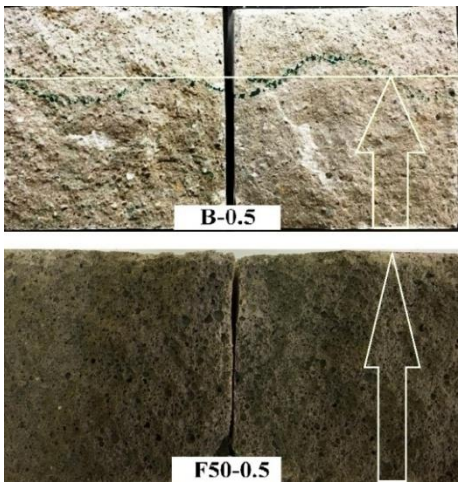
در شکل ۸ جذب آب حجمی مخلوط‌ها در مقابل ضریب جذب موئینگی نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که افزودن حفرات هوای ناشی از کف به ملات پایه، منجر به کاهش جذب آب حجمی بتن می‌گردد که روند مشابهی با نتایج جذب موئینه دارد. مقدار کاهش در جذب آب، با افزایش حجم کف در بتن کفی بیشتر شده و مخلوط حاوی ۵۰ درصد کف در مقایسه با مخلوط پایه و مخلوط‌های حاوی ۲۰ و ۳۵ درصد کف، عملکرد بهتری داشته‌است. دلیل عمده کاهش در جذب آب با افزایش مقدار کف مخلوط، کاهش حجم خمیر سیمان می‌باشد. بتن کفی سازه‌ای به علت پایین بودن نسبت آب به سیمان و میزان کم خمیر سیمان، کمترین مقدار جذب آب در بین مخلوط‌ها را داراست.

نتایج تخلخل کلی نمونه‌ها تحت آزمایش خلأ در جدول ۴ نشان داده شده است. تخلخل کلی بتن کفی، شامل تخلخل موجود در خمیر سیمان (ژلی و موئینه) و تخلخل ناشی از کف می‌باشد. تفاوت بین تخلخل کلی و ظاهری می بایست بیانگر میزان درصد هوای ناشی از کف باشد؛ اما همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، تفاوتی بین این عدد و درصد هوای هر طرح وجود دارد، که این تفاوت توسط محققین پیشین نیز مشاهده شده و بیانگر پر شدن درصدی از حفرات کفی توسط آب می‌باشد [۱۸ و ۱۶]. از آنجایی که فرآیند جذب آب توسط مستغرق شدن نمونه خشک در آب صورت می پذیرد، درصدی از حفرات هوا توسط هد آب موجود پر شده‌اند.

۳-۶- ضریب انتشار یون کلرید در آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید (RCMT)

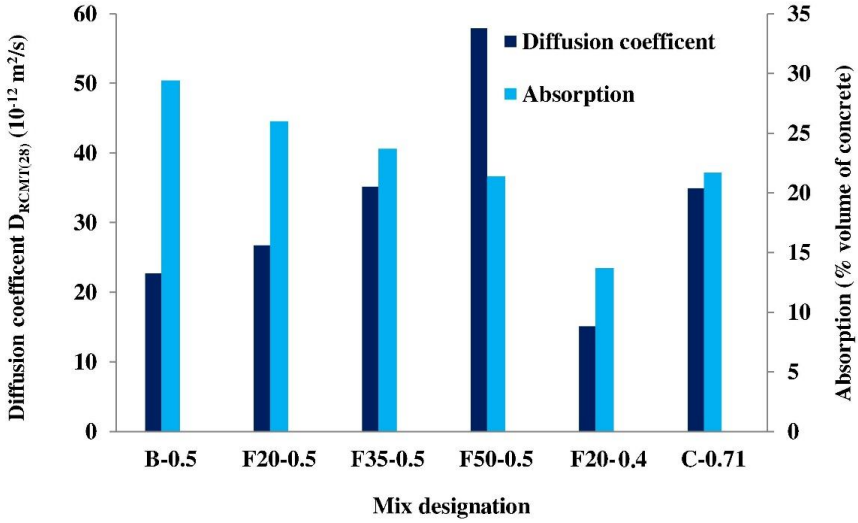
مقادیر نفوذ یون کلرید در آزمونه‌های مختلف در اثر پاشش نیترات نقره بر سطح شکسته شده آن‌ها و تغییر رنگ حاصله در شکل ۹ ارائه شده است. با استفاده از میانگین عمق نفوذ یون کلرید در آزمونه‌ها و بر اساس روش ذکر شده در NT Build ۴۹۲ [۲۸] ضرایب انتشار یون کلرید محاسبه گردید، که نتایج در جدول ۴ و شکل ۱۰ ارائه شده‌اند.

نتایج بیانگر این است که افزودن کف، منجر به افزایش ضریب انتشار یون کلرید در بتن کفی نسبت به مخلوط پایه با نسبت آب به سیمان برابر می‌شود و با افزایش مقدار کف، مقدار افزایش در ضریب انتشار بیشتر می‌گردد. شایان توجه است که این روند در تضاد با نتایج آزمایش های مکش موئینه و جذب آب می‌باشد. در شکل ۱۰ نتایج



شکل ۱۱. ارتفاع صعود موئینگی در پایان آزمایش

Fig. 11. The height of the capillary absorption at the end of the test



شکل ۱۰. مقایسه ضریب انتشار یون کلرید به دست آمده از آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید با درصد جذب آب حجمی مخلوط‌ها

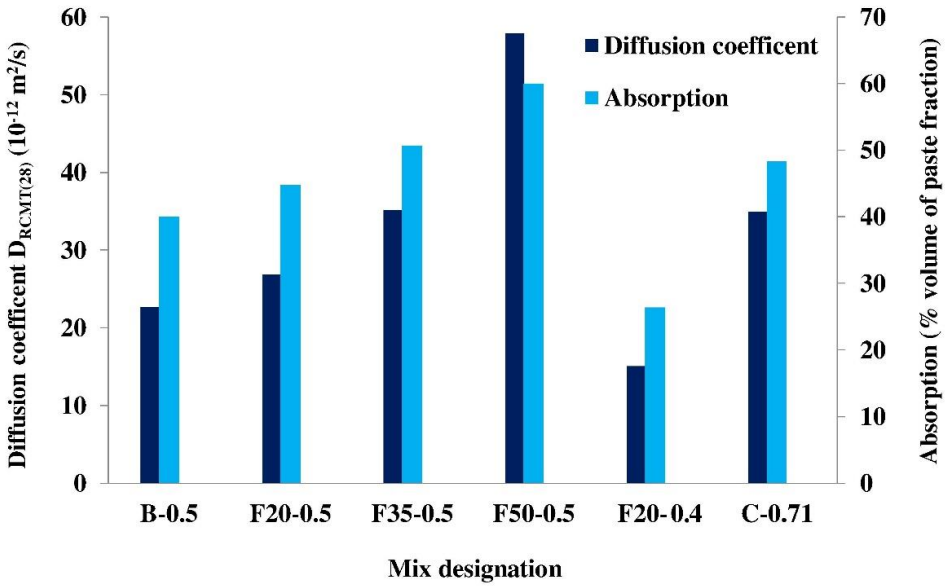
Fig. 10. Comparison of chloride diffusion coefficient derived from the RCMT test ($D_{RCMT(28)}$) with water absorption of concrete

آزمایش جذب آب حجمی برای مقایسه با نتایج ضریب انتشار ارائه شده است. اثر متضاد افزایش مقدار کف روی جذب آب و ضریب انتشار مخلوط‌ها در نسبت برابر آب به سیمان، مشهود است. در بخش ۳-۷ به این تضاد پرداخته می‌شود.

ضریب انتشار یون کلرید بتن کفی سازه‌ای به علت پائین بودن نسبت آب به سیمان و محدود بودن مقدار کف نسبت به دیگر مخلوط‌ها، پایین تر بوده است. بتن معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۷۱ به علت بالا بودن نسبت آب به سیمان و وجود منافذ موئینه متصل به یکدیگر، دارای ضریب انتشار بالاتری نسبت به مخلوط پایه است.

۳-۷- تفسیر اثر متضاد مقدار کف روی نتایج آزمایش‌های جذب موئینه و جذب حجمی با نتایج آزمایش ضریب انتشار یون کلرید

بر اساس نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در بخش‌های قبل، مشخص شد که تخلخل کفی باعث کاهش مکش موئینه و جذب آب می‌گردد؛ در صورتی که اثر آن روی ضریب انتشار منفی بوده و باعث افزایش آن



شکل ۱۲. مقایسه ضریب انتشار یون کلرید به دست آمده از آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید با جذب آب حجمی خمیر سیمان

Fig. 12. Comparison of chloride diffusion coefficient derived from the RCMT test ($D_{RCMT(28)}$) with water absorption of paste fraction

می‌شود. ورود یون کلر به بتن عمدتاً از طریق منافذ موئینه در خمیر سیمان صورت می‌گیرد. در آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید، عمقی از آزمونه که غلظت یون کلرید در منافذ خمیر سیمان به حد مشخصی رسیده باشد، تعیین می‌شود؛ لیکن در آزمایش مکش موئینه، نتیجه آزمایش به صورت مقدار آب جذب شده به ازای سطح مقطع آزمونه بتنی محاسبه می‌گردد. در مخلوط‌های بتن کفی، با توجه به کاهش حجم خمیر سیمان، مقدار آب مکیده شده به داخل آزمونه کاهش می‌یابد؛ در حالی که مقدار آب وارد شده در فاز خمیر سیمان، الزاماً کاهش نیافته است. بر این اساس، شی و همکاران [۲۱] مقایسه ارتفاع آب نفوذ کرده را روش مناسب‌تری برای مقایسه عملکرد جذب موئینه مخلوط‌های بتن کفی دانسته‌اند. در شکل ۱۱، ارتفاع آب ناشی از مکش موئین در مخلوط پایه و مخلوط حاوی ۵۰ درصد کف نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، ادغام کف در مخلوط باعث افزایش ارتفاع آب جذب شده است که با روند مشاهده شده برای ضریب انتشار مطابقت دارد.

در آزمایش جذب آب نیز، آب جذب شده عمدتاً وارد منافذ موئینه می‌گردد؛ اما نتایج آزمایش به صورت حجم آب جذب شده به ازای حجم کل بتن بیان می‌گردد. در بتن کفی با افزایش حجم کف، حجم خمیر سیمان کاهش می‌یابد و لذا حجم آب جذب شده به داخل آزمونه کاهش می‌یابد. از این‌رو روش منطقی برای ارزیابی نتایج آزمایش جذب آب، بیان نتایج، به صورت آب جذب شده نسبت به حجم خمیر سیمان می‌باشد.

در شکل۱۲ نتایج آزمایش جذب آب به صورت مقدار آب جذب شده نسبت به حجم خمیر سیمان ارائه شده و با نتایج آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش حجم کف، جذب آب نسبت به حجم خمیر سیمان افزایش می‌یابد که اکنون با روند نشان داده شده توسط آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید مطابقت دارد. شایان ذکر است که هر چند کیفیت خمیر سیمان در تمامی مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۵یکسان است ولی پر شدن درصدی از حفرات کفی با آب در حین استغراق، منجر به افزایش جذب آب حجمی نسبت به حجم خمیر سیمان می‌شود. همچنین طی آماده‌سازی آزمونه‌ها توسط استغراق برای آزمایش RCMT با افزایش حجم کف، درصد حفرات پر شده توسط آب افزایش یافته و در نتیجه، باعث افزایش ضریب انتشار یون کلرید می‌گردد.

۴-نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر تخلخل ناشی از کف روی خواص جذب آب،

جذب موئینه و نفوذ یون کلرید در بتن‌های کفی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله به شرح ذیل می‌باشد:

ایجاد تخلخل ناشی از ادغام کف در مخلوط پایه، با حفظ نسبت آب به سیمان، منجر به کاهش جذب آب حجمی و جذب موئینه بتن کفی حاصله می‌گردد و با افزایش حجم کف، مقدار بهبود در این پارامترها بیشتر می‌شود. اگر چه این روند، ممکن است عملکرد مناسب بتن کفی در برابر نفوذ عوامل مهاجم را القا نماید ولی نتایج آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید، روندی مغایر با روند نتایج جذب آب نشان می‌دهد. مغایرت مشاهده شده، ناشی از نحوه معمول محاسبه نتایج آزمایش‌های جذب آب و جذب موئینه می‌باشد که حجم آب جذب شده را نسبت به حجم کل آزمونه یا تمامی سطح مقطع در تماس با آب آزمونه می‌سنجند. با توجه به اینکه نفوذ آب و مواد مهاجم محلول در آن عمدتاً از طریق منافذ موئینه موجود در خمیر سیمان صورت می‌گیرد، با در نظر گرفتن نتایج آزمایش‌های جذب بر اساس حجم خمیر سیمان، روند نتایج این آزمایش‌ها تغییر کرده و مشابه با نتایج ضریب انتشار یون کلرید می‌گردد.

درصدی از حفرات کفی، به علت هد آب موجود در هنگام مستغرق شدن، توسط آب پر می‌شود که با افزایش حجم کف، درصد آن‌ها افزایش می‌یابد و منجر به افزایش مقادیر جذب و انتشار می‌گردد.

افزایش حجم کف، منجر به افزایش قطر حباب‌های هوا، کاهش فاصله موثر بین آن‌ها و ادغام بخشی از حباب‌های کفی با یکدیگر می‌شود.

علی‌رغم اثر منفی حباب‌های کفی روی خواص جذب آب و ضریب انتشار یون کلرید، نتایج نشانگر این است که بتن کفی سازه‌ای به علت نسبت آب به سیمان کمتر و محدود بودن حجم کف ادغامی، عملکردی در حد مخلوط پایه و حتی بهتر از آن داشته است، همچنین در مقایسه با بتن معمولی در مقاومت برابر، دارای عملکرد بهتری بوده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله قدردانی خود را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی بابت حمایت مالی جهت انجام پژوهش گزارش شده، ابراز می‌دارند.

مراجع

[1] R.C. Valore, Cellular concretes Part 2 physical properties, in: Journal Proceedings, 1954, pp. 817-836.

[2] K. Ramamurthy, E.K. Nambiar, G.I.S. Ranjani, A classification of studies on properties of foam concrete, Cement and concrete composites, 31(6) (2009) 388-396.

[3] Y.M. Amran, N. Farzadnia, A.A. Ali, Properties and applications of foamed concrete; a review, Construction and Building Materials, 101 (2015) 990-1005.

[4] A. Bagheri, S. Samea, Role of non-reactive powder in strength enhancement of foamed concrete, Construction and Building Materials, 203 (2019) 134-145.

[5] C. Bing, W. Zhen, L. Ning, Experimental research on properties of high-strength foamed concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 24(1) (2011) 113-118.

[6] A. Bagheri, S. Samea, Parameters Influencing the Stability of Foamed Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 30(6) (2018) 04018091.

[7] A.A. Hilal, N.H. Thom, A.R. Dawson, On entrained pore size distribution of foamed concrete, Construction and Building Materials, 75 (2015) 227-233.

[8] M. Jones, A. McCarthy, Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material, Magazine of concrete research, 57(1) (2005) 21-31.

[9] Y. Fu, X. Wang, L. Wang, Y. Li, Foam Concrete: A State-of-the-Art and State-of-the-Practice Review, Advances in Materials Science and Engineering, 2020 (2020).

[10] M. Jones, A. McCarthy, Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete, Fuel, 84(11) (2005) 1398-1409.

[11] L.Y. Loon, A.M.A. Zaidi, K.H. Boon, S. Sulaiman, S.H. Adnan, I. Rahman, Carbonation and Water Permeability of Foamed Concrete, International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology, 1(1) (2010) 33-46.

[12] E. Namsone, G. Šahmenko, A. Korjakins, Durability properties of high performance foamed concrete, Procedia Engineering, 172 (2017) 760-767.

[13] N.S. Martys, C.F. Ferraris, Capillary transport in mortars and concrete, Cement and concrete research, 27(5) (1997)

concrete, TRL Limited Crowthorne, UK, 2001.

[23] ASTM C150, Standard specification for Portland cement, Annual book of ASTM standards, 4 (2002).

[24] ASTM C796, Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam, Annual book of ASTM standards, 4 (2012).

[25] BS EN 12390-3, Standard, Testing hardened concrete, Compressive Strength of Test Specimens, (2009) 12390-12393.

[26] RILEM CPC-11.2, Absorption of Water by Concrete by Capillarity, RILEM Technical Recommendation for Testing and use of Construction Materials, (1994).

[27] E. Kearsley, P. Wainwright, The effect of porosity on the strength of foamed concrete, Cement and concrete research, 32(2) (2002) 233-239.

[28] NT Build 492, Nordtest method for chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Espoo, Finland, (1999).

[29] ASTM C869, Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete, Annual book of ASTM standards, 5 (2011).

[30] E. Kunhanandan Nambiar, K. Ramamurthy, Fresh state characteristics of foam concrete, Journal of materials in civil engineering, 20(2) (2008) 111-117.

[31] H. Wong, A. Pappas, R. Zimmerman, N. Buenfeld, Effect of entrained air voids on the microstructure and mass transport properties of concrete, Cement and Concrete Research, 41(10) (2011) 1067-1077.

747-760.

[14] M.H. Medeiros, P. Helene, Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption, Construction and building materials, 23(3) (2009) 1476-1484.

[15] S. Zhang, L. Zong, Evaluation of relationship between water absorption and durability of concrete materials, Advances in Materials Science and Engineering, 2014 (2014).

[16] A.A. Hilal, N.H. Thom, A.R. Dawson, Pore structure and permeation characteristics of foamed concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 12(12) (2014) 535-544.

[17] E. Kearsley, P. Wainwright, Porosity and permeability of foamed concrete, Cement and concrete research, 31(5) (2001) 805-812.

[18] E.K. Nambiar, K. Ramamurthy, Sorption characteristics of foam concrete, Cement and concrete research, 37(9) (2007) 1341-1347.

[19] L. Cox, S. Van Dijk, Foam concrete: a different kind of mix, Concrete, 36(2) (2002).

[20] D. Panesar, Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents, Construction and building materials, 44 (2013) 575-584.

[21] W. She, Y. Zhang, C. Miao, J. Hong, S. Mu, Water transport in foam concrete: visualisation and numerical modelling, Magazine of Concrete Research, (2019) 1-13.

[22] K. Brady, G. Watts, M.R. Jones, Specification for foamed

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. R. Bagheri , M. M. Rastegar, Investigation of foam volume on the penetration parameters of foamed concrete , Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 4291-4304.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18311.6828