



The Relationship between Roller Compacted Concrete Durability and Air Void Parameters using X-Ray Computed Tomography

A. Kazemi Alamooti, A. Modarres* , E. Ghanbari Parmehr

Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

ABSTRACT: This study aims to investigate the relationship between the durability parameters of roller-compacted concrete pavement (RCCP) exposed to freeze-thaw conditions and the characteristics of the air void obtained by X-ray computed tomography (CT). For this purpose, eight RCCP designs with four water to cement ratios of 0.35, 0.4, 0.45, and 0.5 were prepared using two compaction methods including a vibrating table and vibrating hammer. Properties such as air void content, mass changes, ultrasonic pulse velocity, and relative dynamic modulus were investigated. In addition, CT scan and image processing techniques were used to estimate the air void content in designed RCCPs. To identify the air void, the volumetric-based global thresholding algorithm method was used. The results showed that with the increase of the water to cement ratio, the percentage of air void increases until the optimal value is reached and then decreases. The difference between the results of durability indicators in the two compaction methods increased with the decrease of the water to cement ratio. RCCPs made with a water to cement ratio of 0.35 in the vibrating hammer method and water to cement ratios of 0.35 and 0.4 in the vibrating table method suffered the most damage after freeze-thaw cycles. The increase in capillary pores has a negative effect on the structure of roller-compacted concrete and the presence of fine pores has a positive effect on freeze-thaw durability. In both compaction methods, the optimal amount of water to cement ratio was 0.45 showing appropriate durability indicators.

Review History:

Received: Jul. 07, 2020

Revised: Aug. 09, 2020

Accepted: Aug. 30, 2020

Available Online: Sep. 10, 2020

Keywords:

Roller compacted concrete

Air void

Digital image processing

CT scan

Durability.

1- Introduction

Road pavements are structures that are constantly exposed to environmental factors. Therefore, it is very important to pay attention to the durability parameters for the long-term performance of these structures. Environmental factors directly affect the durability of road pavements. Various factors such as the effect of moisture, freeze-thaw (F - T), sulfates and salts, etc., which is one of the important factors, the effect of the use of salts in the discussion of winter storage. Therefore, studying its effects on concrete pavements is very important. So, the intensity and speed of damage in freezing conditions and the presence of chemicals are approximately 10 times of normal freezing [1-2]. A sufficient air void must be created to protect the concrete from damage caused by Antifreeze salt. Due to the inherent difference in the production and application of roller-compacted concrete pavement (RCCP) compared to conventional concretes, achieving a suitable air void matrix is a major challenge. While like other types of concrete, there is a significant relationship between the characteristics of the air void in RCCP and its behavioral and functional characteristics, especially in the discussion of durability. According to several studies, concrete with suitable air void properties has a successful performance in case of severe

freezing and thawing. A suitable air void system can help reduce the hydraulic pressures generated by F - T cycles [3].

There are several methods for determining the content of air voids in fresh and hardened concrete samples. Compression, volume, and weight methods can be used to determine the amount of fresh concrete void [4-6]. However, these three methods do not provide information on the size and distribution of empty space. Vacuum assessment methods in hardened concrete, microscopic detection method are used to measure dimensions, percentage of voids, etc. [7]. Other methods such as mercury intrusion porosimetry (MIP) and scanning electron microscopy (SEM) are also available to study the microstructural properties of hardened concrete [8-9]. These methods also face problems. For example, in the MIP method, the use of inks increases the size of small to large pores, and the SEM method provides only two - dimensional information [10]. The method that has received more attention in recent years to obtain the parameters of concrete air void and the distribution quality is the X-ray computed tomography (CT) method based on digital image processing techniques. The use of CT in civil engineering materials research has been increased in recent years [11-14].

In this paper, the CT method and image processing techniques are used to calculate the air void parameters

*Corresponding author's email: amirmodarres2003@yahoo.com



in RCCP, and based on this information, their durability parameters during F - T cycles in the presence of frost solution are investigated.

2- Methodology

In this study, RCCP samples were made by two methods of vibrating hammer compaction according to the standard method ASTM C1435 [15] and vibrating table according to the standard method ASTM C1176 [16] in 4 water to cement ratios of 0.35, 0.4, 0.45, and 0.5 were prepared. The CT scan method, using MATLAB software and an image processing technique called volumetric - based global thresholding algorithm, was used to determine the desired threshold value to determine the amount of RCCP air void, and then the results with the laboratory method [17] were compared.

In addition to the content, the number and equivalent diameter of the air void was determined as a parameter to evaluate the size of the air void using the CT scan method. F - T test according to the standard method ASTM C666 [18] and in the presence of NaCl water and salt solution with a concentration of 3% on RCCP samples and the relationship between empty space parameters and durability indicators such as ultrasonic pulse velocity (UPV). The mass changes (Wchange) and the relative dynamic modulus of elasticity (Pn) were investigated.

3- Results and Discussion

According to the research performed in this study, samples with a water to cement ratio of 0.45 and 0.35 have the lowest and highest content of empty air space, respectively. Also, the vibration hammer compaction method creates less space in RCCP samples due to the high amount of compression energy compared to the vibration table. The standard deviation of the results obtained from CT and laboratory is less than 0.5% which shows the high correlation between the results obtained from both methods.

Based on CT results, by reducing the content of air void and increasing the water to cement ratio to 0.45, fewer capillary pores are created in the RCCP structure. In addition, with decreasing water to cement ratio, the number of air voids decreased and with changing the compaction method from vibrating hammer to the vibrating table, the number of air voids increased. The dryness of RCCP samples due to the low water to cement ratio creates a larger air void. However, by increasing the ratio of water to cement after the optimal value of 0.45, the equivalent diameter increases.

The results of regression analysis between UPV, Pn, and Wchange with air void parameters showed that there was a good correlation between these indicators with the content and size of air void but due to the difference in the size of air void in the different RCCPs samples have low correlation with the number of air voids.

4- Conclusion

-Based on the obtained results, the volumetric-based global thresholding algorithm is a suitable method for examining RCCP air void parameters. Due to the uniform

intensity of X-rays in an image, the intensity of light received by the sensor indicates the degree of permeability or impermeability of the components of the sample. Therefore, by determining the global threshold value, air voids with the highest permeability can be distinguished from other components. Comparison of the results obtained by the CT method and laboratory air void shows that the CT method can estimate the air void of RCCP samples accurately.

-Based on CT results, the ratio of water to cement is an important parameter in the content of air voids obtained in RCCP.

-According to the obtained results, the selection of the optimal ratio of water to cement has beneficial effects on the parameters of air void and durability and in the amount of water to cement 0.45, due to the optimal content of air voids, reduction of capillary pores and small equivalently diameter, the UPV, Pn and Wchange indices are at their most appropriate values. Also, the vibrating hammer method resulted in higher durability compared to the vibrating table method due to its higher compaction strength.

-A high correlation between durability indices with air void parameters showed that by determining the content and size of air void in RCCP samples, the durability of these samples against F - T cycles can be predicted. However, the number of air voids is not a good measure of durability.

References

- [1] ACI Committee 201, Guide to Durable Concrete, Manual of concrete practice, American Concrete Institute, 2000.
- [2] J. Yuan, Z. Du, Y. Wu, F. Xiao, Freezing - thawing resistance evaluations of concrete pavements with deicing salts based on various surfaces and air void parameters, *Construction and Building Materials*, 204 (2019) 317-326.
- [3] J.A. Distlehorst, G.J. Kurgan, Development of precision statement for determining air void characteristics of fresh concrete with use of air void analyzer, *Transportation Research Record*, 2020(1) (2007) 45-49.
- [4] ASTM C231, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method, *Annual Book of ASTM Standards*, 2017.
- [5] ASTM C173, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method, *ASTM International, Annual Book of ASTM Standards*, 2016.
- [6] ASTM C138, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, 2017.
- [7] ASTM C 457, Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air - Void System in Hardened Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, 2016.
- [8] ASTM D4404, Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry, *Annual Book of ASTM Standards*, 2010.
- [9] ASTM C1723, Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy,

- Annual Book of ASTM Standards, 2016.
- [10] A. du Plessis, W.P. Boshoff, A review of X-ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials, *Construction and Building Materials*, 199 (2019) 637-651.
- [11] D. Farokhian, R. Azin, A. Ranjbar, Application of medical and dental CT - Scan technologies for determining porosity distribution of the Persian Gulf coastal zone and Zagros basin core samples, *Journal of African Earth Sciences*, 150 (2019) 96-106.
- [12] G. Sokhansefat, M. Moradian, M. Finnell, A. Behravan, M.T. Ley, C. Lucero, J. Weiss, Using X-ray computed tomography to investigate mortar subjected to freeze-thaw cycles, *Cement and Concrete Composites*, 108 (2020) 103520.
- [13] Y.S. Wang, J.G. Dai, X-ray computed tomography for pore-related characterization and simulation of cement mortar matrix, *NDT & E International*, 86 (2017) 28-35.
- [14] J. Yuan, Y. Wu, J. Zhang, Characterization of air voids and frost resistance of concrete based on industrial computerized tomographical technology, *Construction and Building Materials*, 168 (2018) 975-983.
- [15] ASTM C1435, Standard Practice for Molding Roller - Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer, Annual Book of ASTM Standards, 2013.
- [16] ASTM C1176, Standard Practice for Making Roller - Compacted Concrete in Cylinder Molds Using Vibrating Table, Annual Book of ASTM Standards, 2013.
- [17] ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2013.
- [18] ASTM C666, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, Annual Book of ASTM Standards, 2015.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Kazemi Alamooti, A. Modarres, E. Ghanbari Parmehr, *The Relationship between Roller Compacted Concrete Durability and Air Void Parameters using X-Ray Computed Tomography*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(11) (2022) 1085-1088.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18684.6926





ارتباط بین دوام بتن غلتکی و پارامترهای فضای خالی به کمک توموگرافی رایانه‌ای با اشعه ایکس

ابوالفضل کاظمی الموتی، امیر مدرس*، عبادت قنبری پر مهر

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۷
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۱۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۲۰

کلمات کلیدی:

بتن غلتکی
فضای خالی
پردازش تصویر رقومی
سی تی اسکن
دوام

خلاصه: هدف از تحقیق حاضر بررسی ارتباط بین پارامترهای دوام بتن غلتکی در شرایط ذوب و انجماد و خصوصیات فضای خالی به دست آمده از روش توموگرافی رایانه‌ای با اشعه ایکس می‌باشد. برای این منظور، هشت طرح نمونه با چهار نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ و روش‌های تراکمی میز لرزنده و چکش لرزنده ساخته شد. خصوصیات مانند درصد فضای خالی، تغییرات جرم، سرعت پالس اولتراسونیک و مدول الاستیسته ی دینامیکی نسبی بررسی شد. علاوه بر این از روش سی تی-اسکن و پردازش تصویر به منظور پیش‌بینی مقدار فضای خالی و مقایسه با روش آزمایشگاهی استفاده گردید. برای تشخیص فضای خالی از روش الگوریتم حد آستانه ی کلی مبتنی بر حجم بهره گیری شد. همچنین از نتایج سی تی اسکن به بررسی تعداد و اندازه ی فضای خالی و تأثیر این پارامترها بر دوام نمونه ها پرداخته شد. نتایج نشان دادند که با افزایش نسبت آب به سیمان درصد فضای خالی تا رسیدن به مقدار بهینه افزایش و بعد از آن کاهش می یابد. در تمامی نتایج در روش تراکمی چکش لرزنده، مقاومت یخندان - ذوب به مراتب بالاتر از میز لرزنده بود. به طوری که با کاهش نسبت آب به سیمان تفاوت بین نتایج شاخص های دوام در دو روش تراکمی بیشتر شد. نمونه های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ در روش چکش لرزنده و نسبت های آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵ در روش میز لرزنده بیشترین آسیب را متحمل شدند. زیاد بودن حفرات موئینه در ساختار بتن غلتکی تأثیر منفی و وجود حفرات ریز تأثیر مثبت روی دوام یخندان - ذوب دارد. در هر دو روش تراکمی مقدار آب به سیمان بهینه برابر با ۰/۴۵ بود. در این مقدار شاخص های دوام مناسب ترین مقدار را داشتند.

۱- مقدمه

برای محافظت از بتن در برابر صدمات ناشی از نمک یخ زدا، باید فضای خالی کافی در آن ایجاد شود. به دلیل تفاوت ذاتی در تولید و اجرای بتن غلتکی^۲ (RCCP) نسبت به بتن‌های معمولی، دست‌یابی به یک ماتریس فضای خالی مناسب، یک چالش اساسی به شمار می‌رود. در حالی که همانند انواع دیگر بتن‌ها، ارتباط معناداری بین خصوصیات فضای خالی در RCCP و ویژگی‌های رفتاری و عملکردی آن به ویژه در بحث دوام وجود دارد. به طور کلی انواع منافذ و فضای خالی در بتن سخت شده را می‌توان به منافذ سطحی سنگدانه‌ها، حفره‌های موئینه، حباب‌های هوای ایجاد شده در پروسه هوازایی، حفرات محبوس شده در روند تراکم و اختلاط و ترک‌های ریز ایجاد شده در پروسه عمل‌آوری دسته‌بندی نمود [۳].

براساس اغلب تحقیقات، بتنی که از ویژگی‌های فضای خالی مناسبی برخوردار است، عملکرد موفقی در معرض انجماد و ذوب شدید دارد. این

روسازی راه‌ها سازه‌هایی هستند که بطور مداوم در معرض عوامل محیطی قرار دارند. بنابراین، توجه به پارامترهای دوام برای عملکرد بلندمدت این سازه‌ها بسیار مهم است. عوامل محیطی به طور مستقیم بر دوام روسازی راه‌ها تأثیر می‌گذارد. عوامل مختلفی مانند تأثیر رطوبت، یخندان ذوب^۱ (F - T)، سولفات‌ها و نمک و غیره، که یکی از عوامل مهم، تأثیر استفاده از نمک‌ها در بحث نگهداری زمستانی است. نمک از جمله موادی است که از آن به عنوان ماده یخزدا در عملیات زمستانی برای جلوگیری از انجماد در سطوح جاده‌ها استفاده می‌شود. بنابراین مطالعه اثرات آن بر روسازی‌های بتنی بسیار حائز اهمیت است. بطوریکه شدت و سرعت خسارت در شرایط انجماد و در حضور مواد شیمیایی تقریباً ۱۰ برابر انجماد معمولی است [۱و۲].

1 Freeze - Thaw

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.modarres@nit.ac.ir

2 Roller Compacted Concrete Pavement

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



برای مواد مختلف انجام شده است. در یک تحقیق در حوزه ی زمین شناسی، محققین از روش CT برای تعیین تخلخل مواد سنگی استفاده کردند. آن ها از دو دستگاه CT مختلف برای تعیین تخلخل ۲۰ مغزه جمع‌آوری شده از مناطق ساحلی، شامل نمک، مارل، ماسه‌سنگ، کلسیت - کربنات و دولومیت - کربنات پرداخته و نتایج حاصل را با یک روش آزمایشگاهی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که رابطه ی مناسبی بین روش CT و روش آزمایشگاهی وجود دارد. طبق بررسی آنها روش CT برای بعضی از سنگ ها مانند ماسه سنگ و کلسیت - کربنات مناسب است و نتایج تخلخل حاصل از تجزیه و تحلیل آنها با روش آزمایشگاهی مطابقت دارد. اما برای ارزیابی تخلخل سنگهای دولومیت - کربنات، مارل و نمک به اندازه کافی مناسب نیست [۱۳]. در تحقیقی دیگر، پژوهشگران به بررسی خصوصیات مخلوط آسفالتی و همچنین جداسازی و شناسایی اجزای تشکیل‌دهنده ی آن و مقایسه با یک روش آزمایشگاهی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که بیشترین اختلاف فضای خالی بین نتایج CT و آزمایشگاهی ۵ درصد می باشد [۲۵]. همچنین در یک تحقیق آزمایشگاهی عدهای از محققین برای بررسی ساختار داخلی مخلوط های آسفالت سرد در محل^۴ (CIR) از این روش استفاده کردند. آنها در تحقیق خود، حجم، اندازه و تعداد فضای خالی در نمونه های CIR را با توجه به دانه بندی مختلف و روش های مختلف تراکم مورد بررسی قرار دادند. آن ها نتایج تحقیق خود را با یک روش آزمایشگاهی مقایسه کردند. مطابق نتایج، اختلاف دو روش در رسیدن به میزان فضای خالی حدود ۱ درصد بوده و در تمام نمونه ها نتایج CT از نتایج آزمایشگاهی کمتر بود [۲۶].

روش CT به عنوان روشی غیرمخرب برای بررسی ساختار داخلی بتن نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در یک مطالعه، از CT همراه با تکنیک های پردازش تصویر دیجیتال، برای ارزیابی میزان گرفتگی روسازی های بتنی مورد استفاده در پارکینگ ها استفاده شد. در این مطالعه برای تخمین ماهیت و میزان گرفتگی روسازی بتنی پارکینگ ها ناشی از ورود ذرات معدنی و آلی که در اثر فعالیت های پوشش گیاهی یا گرد و غبار وارد جاده ها می شوند، از تخلخل بدست آمده توسط تصاویر CT استفاده گردید. همچنین، آنها نتایج تخلخل بدست آمده را با یک روش آزمایشگاهی مقایسه کردند. بر اساس نتایج آنها در بعضی از نمونه ها نتایج CT از مقادیر آزمایشگاهی بالاتر و در برخی موارد پایین تر گزارش شد [۲۲]. در یک تحقیق تجربی، از روش CT برای بررسی پیشرفت خرابی بتن، تحت بارگذاری کششی در دو حالت استاتیکی و دینامیکی استفاده شد. در این تحقیق، محققین به تأثیر فضای

ویژگی ها شامل درصد فضای خالی، توزیع آن در حجم بتن و اندازه فضای خالی می باشند. یک سیستم فضای خالی مناسب میتواند به کاهش فشارهای هیدرولیکی که بر اثر چرخه های F - T ایجاد می شود، کمک کند [۴].

چندین روش برای تعیین درصد فضای خالی در نمونه های بتن تازه و سخت شده وجود دارد. روش های فشاری، حجمی و وزنی می توانند برای تعیین مقدار فضای خالی بتن تازه استفاده شوند [۷-۵]. با این حال، این سه روش اطلاعاتی در مورد اندازه و نحوه ی توزیع فضای خالی ارائه نمی دهند. از روش های ارزیابی فضای خالی در بتن سخت شده، روش تشخیص میکروسکوپی، برای اندازه گیری ابعاد، درصد فضای خالی و غیره استفاده می شود [۸]. روش های دیگری از قبیل تخلخل نفوذ جیوه^۱ (MIP) و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ (SEM) نیز برای بررسی خصوصیات ریزساختار بتن سخت شده موجود هستند [۹ و ۱۰]. این روش ها نیز با مشکلاتی مواجه هستند. به عنوان مثال در روش MIP، استفاده از جوهرافشان باعث افزایش اندازه ی منافذ کوچک به بزرگ شده و روش SEM تنها اطلاعات دوبعدی را ارائه می دهد [۱۱].

روشی که در طی چند سال اخیر برای بدست آوردن پارامترهای فضای خالی بتن و چگونگی توزیع آن بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، روش توموگرافی رایانه ای با اشعه ی ایکس^۳ (CT) بر اساس تکنیک های پردازش تصویر است. استفاده از CT در تحقیقات مواد مهندسی عمران در سال های اخیر افزایش یافته است. در طول زمان این تکنیک از یک ابزار تصویربرداری کیفی به یک تحلیل کمی تکامل یافته است. به عنوان مثال در یک بررسی عدهای از محققین توانستند تشخیص فضای خالی به روش CT را کشف کنند، اما آنها به اندازه گیری های کمی توجهی نکرده و فقط به مشاهدات کیفی بسنده کردند [۱۲]. پس از آن در مطالعات بسیاری از این تکنیک برای اندازه گیری های کمی در مواد مختلف از جمله، بررسی میزان تخلخل در حوزه های مختلف زمین شناسی [۱۳]، خصوصیات فیزیکی خاک و ماسه [۱۴ و ۱۵]، پارامترهای فضای خالی، توزیع فضای خالی و توزیع اندازه ی سنگدانه در بتن [۱۶-۱۸]، اندازه گیری فضای خالی و میزان آسیب در خمیر سیمان [۱۹ و ۲۰]، بررسی ویژگی ها و دانه بندی مخلوط در روسازی آسفالتی [۲۱]، تعیین میزان گرفتگی در نمونه های بتنی متخلخل [۲۲] و ارزیابی آسیب بتن طی چرخه های F - T [۲۳ و ۲۴] استفاده شده است.

مطالعات مختلفی برای مقایسه ی نتایج فضای خالی CT و آزمایشگاهی

- 1 Mercury Intrusion Porosimetry
- 2 Scanning Electron Microscopy
- 3 X - ray Computed Tomography

که ترک های جدید بعد از چرخه های $F - T$ در فصل مشترک ملات و سنگدانه ایجاد می گردد [۱۹]. همچنین در یک پژوهش آزمایشگاهی، به بررسی خصوصیات فضای خالی بتن بدون افزودنی و حاوی افزودنی حباب زا و مقاومت در برابر یخ زدگی پرداخته شد. مطابق نتایج، وجود افزودنی حباب زا تعداد فضای خالی را افزایش، قطر معادل فضای خالی را کاهش و دوام بتن در طی چرخه ی یخ زدگی را افزایش می دهد [۳۱].

بررسی نتایج ادبیات تحقیق در زمینه ی بتن روی تأثیر فضای خالی بر خصوصیات بتن های معمولی متمرکز شده اند. در حالی که ایجاد و توزیع فضای خالی در RCCP به دلیل ساختار خشک و بدون اسلایم آن مشکل است. در این مقاله، از CT و تکنیک های پردازش تصویر برای محاسبه پارامترهای فضای خالی در RCCP استفاده می شود و بر اساس این اطلاعات، پارامترهای دوام آنها طی چرخه های $F - T$ مورد پژوهش قرار می گیرد.

۲- متدولوژی و اهداف تحقیق

در این پژوهش، نمونه های RCCP با دو روش تراکم ساخته و از روش سی تی اسکن به منظور تعیین مقدار فضای خالی RCCP استفاده گردید و سپس نتایج با یک روش آزمایشگاهی مقایسه شد. همچنین به کمک روش سی تی اسکن علاوه بر مقدار، تعداد و اندازه ی فضای خالی تعیین شد. تست $F - T$ روی نمونه های RCCP انجام و ارتباط پارامترهای فضای خالی و شاخص های دوام بررسی شد. مهمترین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از:

۱- بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان در نحوه ی تراکم و ایجاد فضای خالی مناسب در RCCP.

۲- بررسی تأثیر روش تراکمی در ایجاد تراکم مناسب برای ساخت RCCP که بتواند دوام مشابهی که در اثر استفاده از افزودنی حباب زا در آن به وجود می آید، ایجاد کند.

۳- محاسبه پارامترهای فضای خالی به کمک روش CT و تکنیک های پردازش تصویر و مقایسه ی فضای خالی بدست آمده از این روش با روش آزمایشگاهی.

۴- بررسی تأثیر پارامترهای فضای خالی بر پارامترهای دوام $F - T$ نمونه های RCCP.

خالی در نحوه ی ایجاد خرابی در بتن پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که تشخیص فضای خالی در ساختار بتن، در تعیین میزان، محل و شکل خرابی تحت هر دو بارگذاری مؤثر است [۲۷].

بحث مهم دیگر در رابطه با نحوه ی توزیع فضای خالی در بتن می باشد. در یک پژوهش، از تصاویر بازسازی شده سه بعدی نمونه های سیمانی سخت شده، برای به دست آوردن توزیع اندازه فضای خالی بر اساس قطر دایره هایی که دارای حجم یکسان با فضای خالی مربوطه هستند، استفاده شد. محققین این مقدار را "قطر معادل" نامیدند [۱۶]. اندازه گیری های مشابه نیز توسط پژوهشگران دیگر انجام شده است [۲۸]. همچنین، از این روش برای تعیین توزیع فضای خالی بتن سبک در بخش خمیر سیمان با دو وضوح مختلف به کمک روش های پردازش تصویر استفاده کرده اند. آنها پس از جداسازی فضای خالی از سایر اجزای بتن در تصاویر دوبعدی، به بررسی توزیع اندازه ی فضای خالی در تصاویر سه بعدی پرداختند [۲۹]. در یک پژوهش، محققین بر روی تأثیر تعداد، اندازه و توزیع فضای خالی بر نفوذپذیری بتن متمرکز شدند. آن ها در پژوهش خود از هشت محدوده ی مختلف دانه بندی استفاده کردند. مطابق نتایج بدست آمده با افزایش اندازه ی سنگدانه، تعداد فضای خالی کمتر، اندازه ی فضای خالی بیشتر و در نهایت نفوذپذیری بتن افزایش می یابد [۳۰].

بحث مهم دیگر، تأثیر پارامترهای فضای خالی بر میزان آسیب دیدگی بتن طی چرخه های $F - T$ می باشد. در یک تحقیق، با استفاده از این روش ساختار داخلی بتن مشخص و تخلخل و توزیع منافذ پس از چرخه ی $F - T$ تجزیه و تحلیل شدند. همچنین، رابطه ی بین ساختار فضای خالی و چرخه های $F - T$ مطابق نظریه فرکتال توصیف گردید. مطابق نتایج آنها و براساس نظریه ی ارائه شده، ساختار فضای خالی با افزایش چرخه های $F - T$ تخریب بیشتری پیدا می کند. در تحقیق آن ها مشخص شد که با افزایش چرخه های $F - T$ ، تعداد فضای خالی افزایش، مساحت فضای خالی افزایش، میانگین قطر فضای خالی افزایش و دوام بتن کاهش می یابد [۲۴]. در یک بررسی، از پردازش تصاویر CT برای مطالعه ی منافذ ملات سیمانی پس از چرخه ی $F - T$ استفاده گردید. در این تحقیق، به بررسی نقش فضای خالی در ملات سیمان پرداخته شد. محققین از روش CT، به تصویر برداری سه بعدی از ملات سیمان، قبل و بعد از قرارگیری در چرخه های $F - T$ پرداخته و به این نتیجه رسیدند که تصویربرداری سه بعدی، امکان اندازه گیری های کمی پارامترهای فضای خالی و حجم شکل گیری ترک های جدید را فراهم می کند. همچنین، آن ها به این نتیجه رسیدند

جدول ۱. درصد‌های عبوری از الک برای دانه‌بندی طراحی در مقایسه با دانه‌بندی استاندارد PCA

Table 1. Designed aggregate gradation and PCA standard specifications

عبوری (%)		اندازه‌ی الک (میلی‌متر)
محدوده‌ی دانه‌بندی PCA	دانه‌بندی طراحی	
۱۰۰	۱۰۰	۲۵
۹۰-۱۰۰	۱۰۰	۱۹
۷۰-۹۰	۸۵	۱۲/۵
۶۰-۸۵	۷۰	۹/۵
۴۰-۶۰	۵۰	۴/۷۵
۲۰-۴۰	۳۰	۱/۱۸
۶-۱۸	۱۰	۰/۱۵
۲-۸	۵	۰/۰۷۵

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲

Table 2. Chemical characteristics of type II cement

ترکیبات (%)	
۰/۰۸	Na ₂ O
۱/۹۵	MgO
۳/۷۰	Al ₂ O ₃
۱۷/۰۴	SiO ₂
۰/۱۲	P ₂ O ₅
۴/۱۲	SO ₃
۰/۷۹	K ₂ O
۶۴/۹۰	CaO
۰/۲۷	TiO ₂
۳/۴۴	Fe ₂ O ₃
۲/۶۲	LOI
۰/۹۸	Other

استفاده شد [۳۳]. جدول ۲ ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۲ را ارائه می‌نماید. درصد مواد سیمانی برای مخلوط‌های RCCP معمولاً با در نظرگیری مقاومت و دوام لازم و به صورت درصد کل جرم مصالح خشک انتخاب می‌شود. مقدار مواد سیمانی برای نمونه‌های RCCP نسبت به جرم کل مصالح خشک بین ۱۲ تا ۱۶٪ پیشنهاد شده است [۳۲ و ۳۴]. در این پژوهش حد متوسط مقدار پیشنهادی سیمان برابر با ۱۴٪ جرم مصالح خشک در نظر گرفته شد.

۳- مواد و مصالح

۳-۱- سنگدانه

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق، مطابق با محدوده‌ی دانه‌بندی مؤسسه سیمان پرتلند^۱ (PCA) انتخاب شدند [۳۲]. محدوده‌ی دانه‌بندی PCA و دانه‌بندی انتخاب شده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

۳-۲- سیمان

سیمان پرتلند نوع ۲ مطابق با مشخصات استاندارد ASTM C۱۵۰

جدول ۳. نسبت های اختلاط نمونه های RCCP
Table 3. Mix proportions of RCCP samples

درشت دانه (kg/m ³)	ریزدانه (kg/m ³)	نسبت آب به سیمان	آب (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	نوع مخلوط RCCP
۱۰۵۱	۱۰۵۱	۰/۳۵	۱۰۳	۲۹۴	VH-0.35
۱۰۵۱	۱۰۵۱	۰/۴	۱۱۸	۲۹۴	VH-0.4
۱۰۵۱	۱۰۵۱	۰/۴۵	۱۳۳	۲۹۴	VH-0.45
۱۰۵۱	۱۰۵۱	۰/۵	۱۴۷	۲۹۴	VH-0.5
۱۰۵۱	۱۰۵۱	۰/۳۵	۱۰۳	۲۹۴	VT-0.35
۱۰۵۱	۱۰۵۱	۰/۴	۱۱۸	۲۹۴	VT-0.4
۱۰۵۱	۱۰۵۱	۰/۴۵	۱۳۳	۲۹۴	VT-0.45
۱۰۵۱	۱۰۵۱	۰/۵	۱۴۷	۲۹۴	VT-0.5

۴- روش اختلاط و تراکم نمونه ها

تعداد ۲۴ نمونه آزمایشگاهی شامل هشت نمونه مکعبی به ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی متر برای ارزیابی فضای خالی و ۱۶ نمونه منشوری به ابعاد $150 \times 150 \times 60$ میلی متر برای آزمایش $F - T$ ساخته شدند. در تحقیق حاضر، در یک شرایط یکسان برای تمام نمونه ها، آزمایش ها دو بار انجام و از میانگین نتایج استفاده شد. در ساخت این نمونه ها چهار نسبت آب به سیمان $0/35$ ، $0/4$ ، $0/45$ و $0/5$ در نظر گرفته شد. ترکیبات نمونه های مختلف RCCP در جدول ۳ ارائه شدند. در این جدول نام گذاری ترکیبات براساس نوع تراکم و نسبت آب به سیمان انجام شده است. برای آماده سازی نمونه ها از دو روش تراکم با چکش لرزنده و میز لرزنده استفاده شد. روش چکش لرزنده به دلیل نزدیک بودن به شرایط میدانی و روش میز لرزنده به دلیل استفاده ی متداول در تحقیقات آزمایشگاهی انتخاب گردید [۳۵]. در تراکم به روش میز لرزنده سربار به صورت استاتیکی روی نمونه قرار می گیرد، اما در روش تراکم با چکش لرزنده همانند غلطک ها در شرایط میدانی، سربار در نمونه ارتعاش دینامیکی ایجاد میکند [۳۶]. نمونه های متراکم شده با چکش لرزنده با حروف VH و میز لرزنده با حروف VT نشان داده شدند. همچنین نسبت آب به سیمان با یک عدد در جلوی این حروف قرار گرفته است.

تراکم با میز لرزنده طبق استاندارد ASTM C1176 و چکش لرزنده طبق استاندارد ASTM C1435 انجام شد [۳۷ و ۳۸]. در تراکم با میز لرزنده، پس از اختلاط مصالح در میکسر، بتن تازه در سه لایه درون قالب ریخته شد. تراکم اولیه در هر لایه از بتن با استفاده از میله ی ضرب های و با ۲۵ ضربه انجام شد. سپس نمونه ها برای تراکم نهایی روی میز لرزنده قرار گرفته و پس از قرارگیری سربار، تراکم دستگاه آغاز شد. در این روش تراکم

تا زمانی که خمیر سیمان یا شیرهی بتن از فضای اندک بین جداره ی سربار و جدارهی قالب بیرون بزند، ادامه می یابد.

در روش چکش لرزنده، بتن تازه در سه لایه درون قالب ریخته شده و هر لایه پس از قرارگیری سربار توسط چکش لرزنده تا زمان مشاهده خمیر سیمان در اطراف سربار متراکم شد. چنانچه در روش چکش لرزنده، خمیر سیمان تا ۲۰ ثانیه پس از شروع تراکم در اطراف سربار مشاهده نشود، عملیات تراکم لایه باید متوقف و لایه بعدی درون قالب ریخته و عملیات تراکم انجام شود. نمونه ها پس از ساخت قبل از خارج شدن از قالب، به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه نگهداری شدند. سپس نمونه ها از قالب خارج شده و به مدت ۲۸ روز در حمام آب در دمای 23 ± 2 درجه سانتیگراد عمل آوری شدند.

۵- آزمون های اصلی

در این تحقیق ابتدا طبق روش متداول آزمایشگاهی، فضای خالی نمونه ها اندازه گیری و سپس از روش CT برای تعیین فضای خالی RCCP بهره گرفته شد. سپس نتایج این دو روش با یکدیگر مقایسه گردید. همچنین با استفاده از روش CT به بررسی تعداد و اندازه ی فضای خالی در RCCP پرداخته شد. در مرحله ی بعد برای تعیین میزان دوام RCCP در شرایط $F - T$ ، ارزیابی های سرعت پالس التراسونیک^۱ (UPV)، تغییرات جرم^۲ (W_{change}) و مدول الاستیسیته ی دینامیکی نسبی^۳ (Pn) انجام و ارتباط آن ها با پارامترهای فضای خالی بررسی گردید

- 1 Ultrasonic Pulse Velocity
- 2 Weight changes
- 3 Relative Dynamic Modulus of Elasticity



شکل ۱. تصویربرداری از نمونه های RCCP

Fig. 1. Imaging of RCCP samples

برداری را نشان می دهد. قبل از تصویربرداری از نمونه باید به نحوه ی قرارگیری نمونه و تنظیمات مناسب جهت تصویربرداری دقت نمود. به دلیل استوانه ای بودن مغزه های RCCP و به منظور یکسان بودن تصاویر گرفته شده از مقاطع نمونه، لازم است تا تصویربرداری از مقاطع دایروی استوانه صورت پذیرد. اسکن در امتداد عمود بر مقطع دایروی، موجب تفاوت در تصاویر اسکن شده و مراحل تعیین فضای خالی را پیچیده میکند. تنظیمات مربوط به سیستم تصویربرداری از قبیل ولتاژ، شدت جریان، ضخامت برش و غیره، توسط کاربر سیستم تصویربرداری انجام می شود. برحسب مورد، این تنظیمات طبق دستورالعمل سیستم تصویربرداری قابل تغییر است. این تنظیمات در شکل ۱، قابل مشاهده نبوده و توسط کاربر سیستم در اتاق کنترل انجام می گیرد.

۵-۲-۲- پردازش تصویر رقومی

پردازش تصویر، اساساً شامل ویرایش و تغییرات تصویر رقومی به منظور بهبود کیفیت تصویر و یا استخراج اطلاعات موردنیاز است. در تصویر رقومی هر جزء تصویر که از پیکسل تشکیل شده است، به عنوان درایه یک ماتریس، مقدار عددی دارد که شدت روشنایی است [۴۰]. نرم افزارهای بسیاری وجود دارند که فقط برای بررسی کیفی تصاویر مناسب هستند و با تغییر در تنظیمات آن، میتوان کیفیت تصویر را تغییر داد. شکل ۲ نحوه ی تغییر کیفیت تصویر در نرم افزارهای مختلف را نشان می دهد. شکل ۲-الف بررسی کیفی تصاویر در نرم افزار دستگاه تصویربرداری CT را نشان میدهد

۵-۱- تعیین درصد فضای خالی به روش آزمایشگاهی

برای انجام این آزمایش هشت نمونه ی مکعبی به ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی متر ساخته شد. به منظور یکسان سازی ابعاد نمونه ها برای انجام آزمایش های فضای خالی آزمایشگاهی و CT، از نمونه ها مغزه هایی به قطر ۹۴ میلی متر گرفته شد. درصد فضای خالی آزمایشگاهی مطابق با استاندارد ASTM C۶۴۲ تعیین شد [۳۹]. وزن نمونه های خشک شده در اون در دمای ۱۰۵ درجه ی سانتیگراد برای تمام نسبت های اختلاط مطابق جدول ۳ تعیین شد (A). وزن نمونه اشباع با سطح خشک برای تمام نسبت های اختلاط مطابق جدول ۳ تعیین شد (B). سپس نمونه ها به مدت پنج ساعت در ظرف مناسب جوشانده شدند، در حالی که کاملاً در آب غوطه ور بودند. سپس نمونه ها به مدت کمتر از ۱۴ ساعت در محیط آزمایشگاهی در دمای ۲۵-۲۰ درجه سانتیگراد خنک شده، سطح آنها توسط حوله خشک و وزن آنها اندازه گیری شد (C). وزن ظاهری نمونه ها در آب در حالی که توسط یک سیم نازک به حالت تعلیق درآمده بودند اندازه گیری شد (D). سرانجام برای هر نمونه با استفاده از رابطه (۱) درصد فضای خالی آزمایشگاهی تعیین شد.

$$V_a = \left(\frac{C - A}{C - D} \right) \times 100 \quad (1)$$

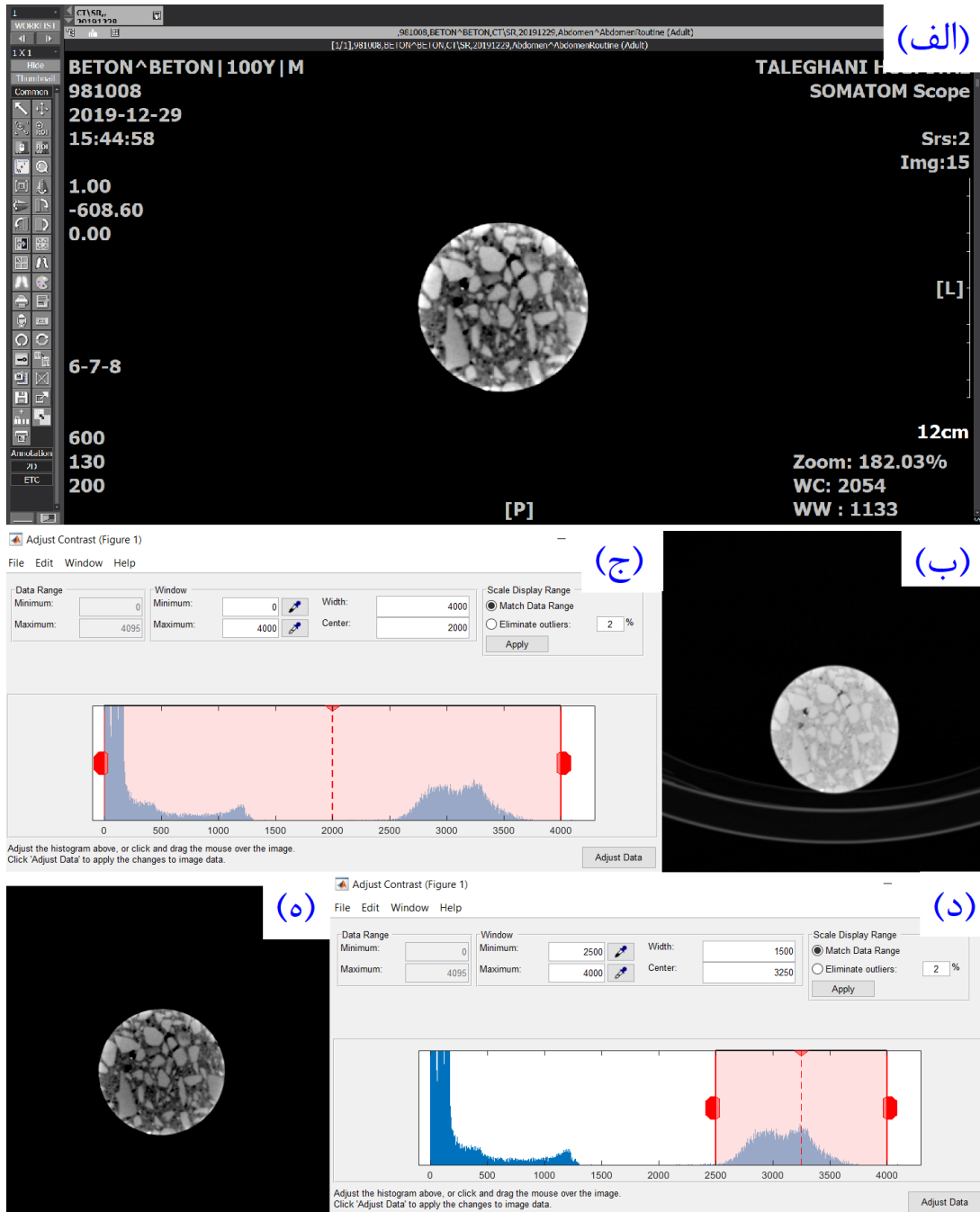
که در این رابطه V_a فضای خالی نمونه (%) و سایر پارامترها قبلاً تعریف شده اند.

۵-۲-۵- توموگرافی کامپیوتری با اشعه ایکس

این بخش شامل جزئیات مربوط به تصویربرداری و پردازش تصویر رقومی برای رسیدن به ساختار داخلی RCCP است. همچنین، روش قطعه بندی براساس حد آستانه برای تشخیص فضای خالی RCCP استفاده شده است.

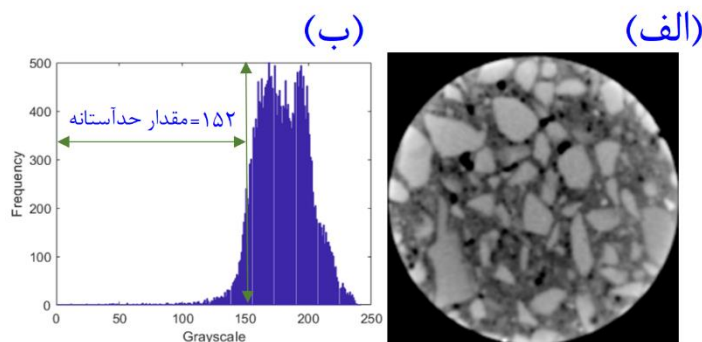
۵-۲-۱- تصویربرداری

در این پژوهش از دستگاه سیتیا سکن مدل ۱۶ اسلایس زیمنس استفاده شد. در زمان آزمایش یک دور چرخش ۳۶۰ درجه ی دستگاه، ۰/۶ S به طول می انجامید. همچنین، آزمایش در ولتاژ و شدت جریان به ترتیب ۱۳۰ keV و ۲۰۰ mA و ضخامت برش ۱ میلی متر انجام شد. باتوجه به توضیحات فوق برای هر نمونه با وضوح ۵۱۲ × ۵۱۲ پیکسل، ۱۵۰ برش بدست آمد. شکل ۱ تصویری از سی تی اسکنر زیمنس و قرارگیری نمونه در دستگاه، برای تصویر



شکل ۲. الف) تصویر ورودی در نرم افزار دستگاه تصویربرداری CT، ب) تصویر ورودی در نرم افزار MATLAB قبل از بهبود کنتراست، ج) بازه ی درجات روشنایی تصویر ب، د) محدود کردن بازه ی درجات روشنایی و ه) تصویر ب بعد از یکنواخت سازی کنتراست

Fig. 2. a) Input image in CT imaging software, b) Input image in MATLAB software before contrast enhancement, c) Brightness range of image b, d) Brightness range, and e) Image b after contrast equalization



شکل ۳. الف) تصویر نمونه ی RCCP (VT-0.45)، ب) نمودار هیستوگرام تصویر الف و مقدار حد آستانه ی انتخابی

Fig. 3. a) RCCP sample image (VT -0.45), b) Histogram diagram of image a and selected threshold value

به تصویری واضح از نمونه دست یافت. شکل ۲- ه تصویر نهایی بعد از یکنواخت سازی کنتراست را نشان می دهد

تصویر اصلی دارای محدوده ی روشنایی یا سطح خاکستری [۰-۴۰۰۰] است و قسمت پس زمینه تصویر یا بخش تاریک دارای ± 15 درجه اختلاف روشنایی در نقاط مختلف و بیانگر وجود نویز در تصویر است. از این رو، استفاده از همه محدوده درجات روشنایی تصویر تأثیری در افزایش دقت پردازش تصویر ندارد. بنابراین، میتوان با تبدیل تصاویر ورودی به تصاویر هشت بیتی و کاهش دامنه درجات روشنایی به $256(2^8)$ ، از تأثیر نویز و حجم محاسبات کاست

۵-۲-۳- قطعه بندی تصویر

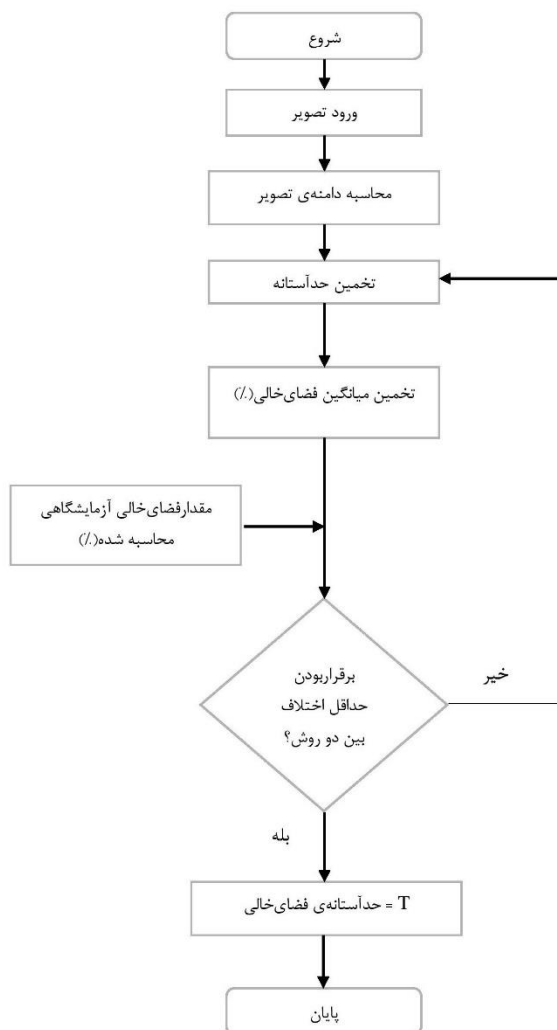
قطعه بندی تصویر، شامل تفکیک و جداسازی تصویر به اجزای تشکیل دهنده ی آن براساس خصوصیات مشترک یعنی درجه ی روشنایی پیکسل های هر شیء است. یکی از کاربردی ترین روش های قطعه بندی تصویر، روش حد آستانه نام دارد. در این روش با انتخاب یک حد آستانه، یک تصویر خاکستری به یک تصویر باینری تبدیل می شود. از نمودار هیستوگرام جهت تعیین محدوده ی مناسب حد آستانه استفاده میشود. هیستوگرام یک تصویر، توزیع درجات روشنایی در تصویر را نشان می دهد. در واقع تعداد پیکسل ها از هر سطح روشنایی برای تصویر ورودی است [۴۰]. شکل ۳- الف یک برش از نمونه ی RCCP و شکل ۳- ب نمودار هیستوگرام و مقدار حد آستانه ی انتخابی را نشان می دهد.

۵-۲-۳-۱- درصد فضای خالی

در این مقاله از الگوریتم خاصی با عنوان الگوریتم حد آستانه ی کلی

که با تغییر در تنظیمات آن می توان جزئیات تصویر را مشاهده کرد. برای بررسی کمیته ای مهندسی و محاسبات عددی، نیاز به نرم افزارهای پیشرفته تر است. تصویر اخذ شده توسط کامپیوتر اسکنر CT با فرم دایکام^۱ (DICOM) ذخیره می شود. در این مطالعه از نرم افزار متلب^۲ (MATLAB) برای پردازش تصاویر و محاسبات عددی استفاده می شود. قابلیت روش های پردازش تصویر بکار گرفته شده به لحاظ تئوری و عملی در منابع اصلی پردازش تصویر رقومی مورد بررسی و تأیید قرار گرفته اند [۴۰]. استفاده از نرم افزار MATLAB به دلیل سهولت در پیاده سازی ساده و قابلیت پردازش ماتریسی آن در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از سایر نرم افزارها که امکان پردازش تصویر را فراهم می سازند، می تواند سرعت پردازش تصویر را تحت تأثیر قرار دهد. با توجه به استاندارد بودن روش های پیاده سازی شده در نرم افزارهای متفاوت، تغییر محسوسی در نتایج قابل تصور نیست. بعد از فراخوانی تصویر در نرم افزار MATLAB، همان طور که در شکل ۲- ب نشان داده شده است، اجزای تصویر به دلیل ضعیف بودن سطح کنتراست، قابل تفکیک نیست. بنابراین، نیاز به بهبود کیفیت تصویر به کمک توابع پردازش تصویر موجود در MATLAB است. شکل ۲- ج بازهی درجات روشنایی یا سطح خاکستری تصویر اولیه را نشان می دهد. در این مقاله با استفاده از یکنواخت سازی کنتراست، برای بهبود کیفیت تصویر مطابق شکل ۲- د استفاده شد. همان طور که در شکل ۲- د نشان داده شده است، درجات روشنایی کمتر از ۲۵۰۰ مربوط به پسزمینه ی تصویر بوده و اطلاعات مفیدی درباره ی جزئیات تصویر نمونه ارائه نمی دهد. بنابراین با محدود کردن درجات روشنایی به ۲۵۰۰-۴۰۰۰، میتوان

1 Digital Imaging and Communications in Medicine
2 MATrix LABoratory



شکل ۴. فلوجارت پیشنهادی برای تعیین حد آستانه‌ی بهینه

Fig. 4. Proposed flowchart to determine the optimal threshold value

(سطر و ستون تصویر)، $f(i,j)$ سطح خاکستری پیکسل مورد نظر (درجه روشنایی) و T مقدار حد آستانه‌ی تعیین شده توسط نمودار هیستوگرام (درجه روشنایی) است.

مطابق رابطه‌ی (۲) اگر درجه روشنایی هر پیکسل تصویر از مقدار T بزرگتر باشد، پیکسل مورد نظر به عنوان پس زمینه با درجه روشنایی ۲۵۵ (سفید) و اگر کمتر از T باشد، به عنوان فضای خالی با درجه روشنایی صفر (سیاه) در نظر گرفته میشود. مطابق فلوجارت شکل ۴، جهت تعیین حدآستانه‌ی مطلوب، بعد از ورود تصویر به MATLAB، یک حد آستانه‌ی اولیه بر اساس نمودار هیستوگرام شکل ۳-ب برای تشخیص فضای خالی از سایر ترکیبات تخمین زده می شود. سپس درصد فضای خالی در هر نمونه از میانگین مساحت فضای خالی در تمام برش های مورد بررسی، مطابق

مبتنی بر حجم، برای تعیین حد آستانه‌ی مورد نظر جهت مشخص کردن درصد فضای خالی استفاده شده است. شکل ۴ فلوجارت پیشنهادی این روش را نشان می دهد. این الگوریتم به دنبال ایجاد یک حد آستانه درجه روشنایی (T)، مربوط به مرز فضای خالی و سایر ترکیبات مخلوط است. مطابق با حدآستانه‌ی T تمام پیکسل های تصویر با تعیین معیارهای رابطه‌ی (۲) به تصاویر باینری (سفید و سیاه) تبدیل می شوند:

$$g(i, j) = \begin{cases} 255 & f(i, j) > T \\ 0 & f(i, j) \leq T \end{cases} \quad (2)$$

که در این رابطه i, j محل قرارگیری هر پیکسل مورد نظر در تصویر

روش به کمترین مقدار برسد. این اختلاف در حد آستانه ی ۱۵۲ به ۰/۱٪ می رسد. بنابراین حد آستانه ی مطلوب برای این نمونه ۱۵۲ می باشد. شکل ۶ حفرات جداسازی شده بر اساس این روش را نشان می دهد.

۵-۲-۳-۲- قطر معادل فضای خالی

یکی دیگر از پارامترهای بدست آمده به کمک قطعه بندی تصویر، قطر معادل فضای خالی است. قطر معادل به عنوان پارامتری برای بررسی اندازه ی فضای خالی معرفی می شود. قطر معادل، قطر یک دایره با مساحت یک حفره ی منفرد است، که مطابق رابطه ی (۴) محاسبه می شود:

$$D = 2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N A_i}{\pi \sum_{i=1}^N P_i}} \quad (4)$$

که در این رابطه D قطر معادل فضای خالی (mm)، A_i مساحت فضای خالی در برش i ام و P_i تعداد فضای خالی در برش i ام است.

۵-۳- دوام در شرایط یخبندان - ذوب در حضور نمک یخ زدا

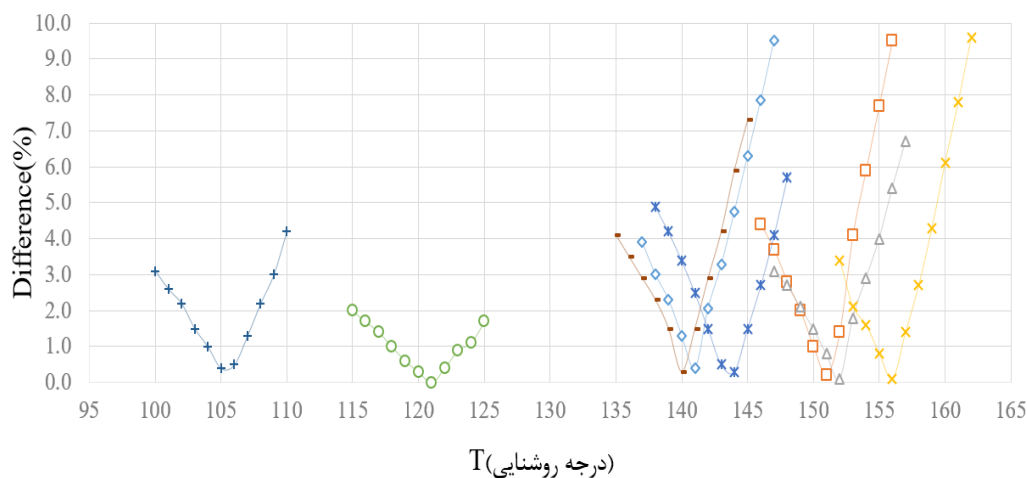
برای ارزیابی دوام نمونه ها در شرایط $F - T$ ، دو نمونه ی منشوری به ابعاد $150 \times 60 \times 55$ میلی متر برای هر طرح اختلاط ساخته شد. نمونه ها پس از عمل آوری به مدت ۲۸ روز، به مدت ۴۸ ساعت در محلول آب و نمک

رابطه ی (۳) محاسبه می گردد. در این پژوهش ۱۰۰ برش از هر نمونه انتخاب گردید.

$$A_V = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{A_{Vi}}{A_{Ti}}}{N} \quad (3)$$

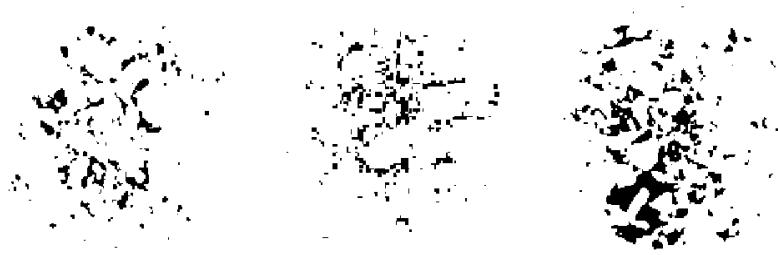
که در این رابطه A_V فضای خالی نمونه (٪)، N تعداد کل برش ها که برابر با ۱۰۰ و A_{Vi} و A_{Ti} به ترتیب مساحت فضای خالی و مساحت کل تصویر مغزه در برش i ام است.

در مرحله ی بعد مقدار فضای خالی بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و اختلاف نتایج محاسبه می شود. سپس در صورت بالا بودن اختلاف در دو روش، مقدار T یک واحد افزایش یا کاهش داده شده و مراحل قبل دوباره تکرار می شود. به این ترتیب مقدار حد آستانه ی مطلوب به عنوان مقداری که حداقل اختلاف بین نتایج CT و آزمایشگاهی برقرار گردد، انتخاب می شود (به عنوان مثال ۱۵۲ برای نمونه ی $VT - 0.45$ در شکل ۳-ب). شکل ۵ نحوه ی تعیین حد آستانه ی مطلوب برای تمام نمونه های $RCCP$ را نشان می دهد. به عنوان مثال در این شکل برای تعیین حد آستانه ی مطلوب نمونه ی $VT - 0.45$ ، ابتدا مقدار حد آستانه ۱۵۰ در نظر گرفته شد. سپس مقدار فضای خالی بدست آمده از این روش با روش آزمایشگاهی مقایسه شده و مقدار اختلاف دو روش ۱/۵٪ گردید. در مرحله ی بعد مقدار حد آستانه، یک واحد افزایش یا کاهش یافت تا اختلاف بین دو



شکل ۵. نحوه ی انتخاب حد آستانه ی بهینه برای نمونه های $RCCP$

Fig. 5. Procedure of the optimal threshold value selection for $RCCP$ samples



شکل ۶. حفرات جداسازی شده در نمونه های RCCP

Fig. 6. Detected air voids in RCCP samples

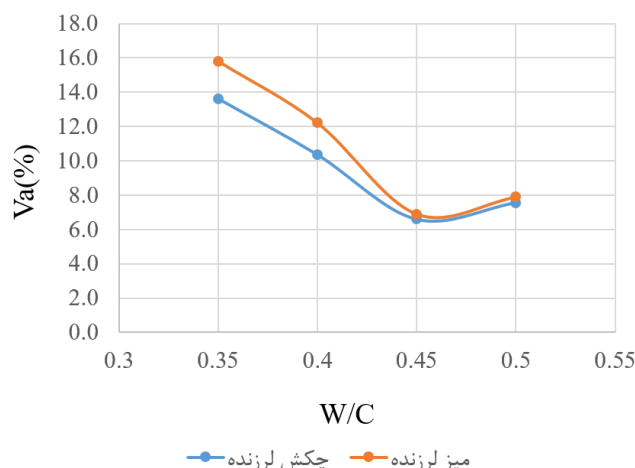


شکل ۷. الف) دستگاه F - T ، ب) صفحه نمایش دستگاه و ج) قرارگیری نمونه های RCCP در دستگاه

Fig. 7. a) F-T device, b) device controller screen, c) placement of samples in the device

با افزایش دما از ۱۸- درجه سانتیگراد به چهار درجه سانتیگراد، در طی پنج ساعت ذوب شدند. بعد از هر ۶۰ چرخه F - T، مقدار P_n و W_{change} به دلیل سست و جدا شدن بخشی از بتن سخت شده طبق استاندارد ASTM C۶۶۶ با دو تکرار آزمایش برای هر نمونه مورد ارزیابی قرار گرفتند. پارامترهای P_n و W_{change} به ترتیب طبق رابطه (۵) و (۶) محاسبه شدند.

NaCl با غلظت سه درصد اشباع شدند. سپس مقاومت هر نمونه در برابر چرخه های F - T سریع مطابق با استاندارد ASTM C۶۶۶ مورد بررسی قرار گرفت [۴۱]. شکل ۷ دستگاه F - T و قرارگیری نمونه ها در آن را نشان می دهد. در این تحقیق، طی هر چرخه F - T، نمونه ها با کاهش دما از چهار درجه سانتیگراد به ۱۸- درجه سانتیگراد منجمد می شوند. پس از آن، نمونه ها



شکل ۸. تغییر درصد حفرات نمونه‌های RCCP با افزایش نسبت آب به سیمان

Fig. 8. Change in the air void content of RCCP samples by increasing the water to cement ratio

مورد استفاده در تحقیق حاضر، فضای خالی با افزایش نسبت آب به سیمان تا ۰/۴۵ کاهش و پس از آن افزایش یافته است. مطابق مطالعات قبلی مقدار حفرات نفوذپذیر شامل حفرات موئینه و حفرات هوای محبوس در RCCP می باشند. این حفرات، فضای خالی درون بتن را فراهم نموده و به عنوان مخزن آب قابل انجماد، باعث از بین رفتن فشار هیدرولیکی ایجاد شده در اثر افزایش حجم یخ و جلوگیری از آسیب دیدگی بتن می شوند [۴۲ و ۴۳]. با توجه به شکل ۸، درصد فضای خالی حداقل مربوط به مخلوط های VH ۰/۴۵ و ۰/۴۵ VT است. در تحقیقات قبلی که بر روی تأثیر فضای خالی بر دوام مخلوط های RCCP بدون افزودنی حباب زا متمرکز و به بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان در ساخت مخلوط متمرکز شده بودند، به این نتیجه رسیدند که افزایش نسبت آب به سیمان تا ۰/۴۱ باعث کاهش فضای خالی میگردد [۴۴]. همچنین در یک پژوهش آزمایشگاهی دیگر، به بررسی تأثیر نسبت های آب به سیمان مختلف در رسیدن به یک مقدار بهینه برای دستیابی به حداقل حفرات، متمرکز شدند. آن ها در تحقیق خود از شش نسبت آب به سیمان مختلف بین ۱/۵ - ۰/۲۵ استفاده کردند. مطابق نتایج آنها، در نسبت آب به سیمان ۰/۵ حداقل حفرات در RCCP ایجاد می گردد [۴۵]. همچنین، مطابق شکل ۸، روش تراکمی چکش لرزنده، فضای خالی کمتری نسبت به میز لرزنده در نمونه های RCCP ایجاد می کند. در یک تحقیق تجربی، به تأثیر روش های تراکمی بر خصوصیات مکانیکی و دوام RCCP پرداختند. در این تحقیق، ۲۰ نمونه ی RCCP، به کمک چهار روش تراکمی از جمله چکش لرزنده و میز لرزنده، دو مقدار سیمان مختلف به همراه

$$P_n = \left[\frac{f_n^2}{f_1^2} \right] \times 100 \quad (5)$$

که در این رابطه P_n مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی ($\%$) و f_1 و f_n به ترتیب سرعت پالس التراسونیک قبل از شروع و بعد از n چرخه $F - T$ (m/s) است

$$W_{change} = \left[\frac{W_n - W_1}{W_1} \right] \times 100 \quad (6)$$

که در این رابطه W_{change} تغییرات وزن ($\%$) و W_1 و W_n به ترتیب وزن نمونه قبل از شروع آزمایش و بعد از n چرخه $F - T$ (g) است.

۶- نتایج و بحث

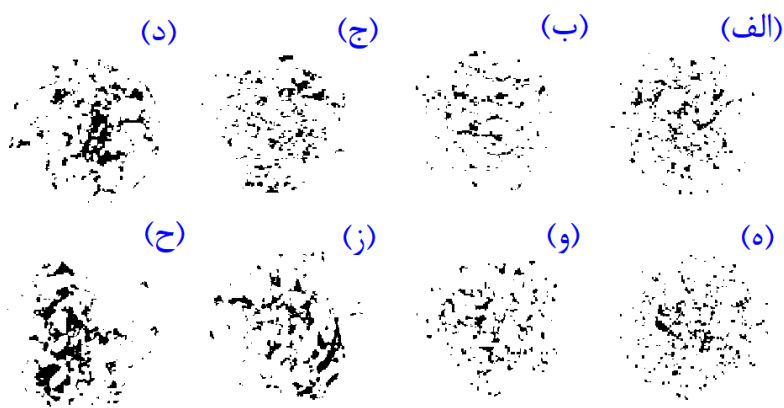
۶-۱- فضای خالی آزمایشگاهی

شکل ۸ درصد حفرات مخلوط های ۲۸ روزه RCCP را در نسبت های مختلف آب به سیمان برای دو روش تراکمی نشان می دهد. مطابق شکل درصد فضای خالی برای روش چکش لرزنده مقادیر پایین تری را نشان می دهد. مخلوط VT ۰/۳۵ دارای بالاترین میزان فضای خالی و VH ۰/۴۵ دارای کمترین فضای خالی می باشند. برای هر دو روش تراکمی

جدول ۴. مقایسه ی نتایج درصد فضای خالی آزمایشگاهی و CT

Table 4. Comparison between the laboratory and CT scan obtained air voids

اختلاف	فضای خالی (%)		نوع مخلوط RCCP
	سی تی اسکن	آزمایشگاهی	
۰/۳	۱۳/۹	۱۳/۶	VH -0.35
۰	۱۰/۳	۱۰/۳	VH -0.4
۰/۴	۶/۲	۶/۶	VH -0.45
۰/۳	۷/۹	۷/۶	VH -0.5
۰/۴	۱۵/۴	۱۵/۸	VT -0.35
۰/۲	۱۲/۴	۱۲/۲	VT -0.4
۰/۱	۷	۶/۹	VT -0.45
۰/۱	۸	۷/۹	VT -0.5



شکل ۹. فضای خالی در نمونه های RCCP: (الف) 0.5- VH (ب) 0.45- VH (ج) 0.4- VH (د) 0.35- VH (ه) 0.5- VT (و) 45- VT، (ز) 0.35- VT (ح) 0.4- VT

Fig. 9. Air void in RCCP samples: a) VH -0.5, b) VH -0.45, c) VH -0.4, d) VH -0.35, e) VT -0.5, and) VT -45, g) VT -0.4, h) VT -0.35

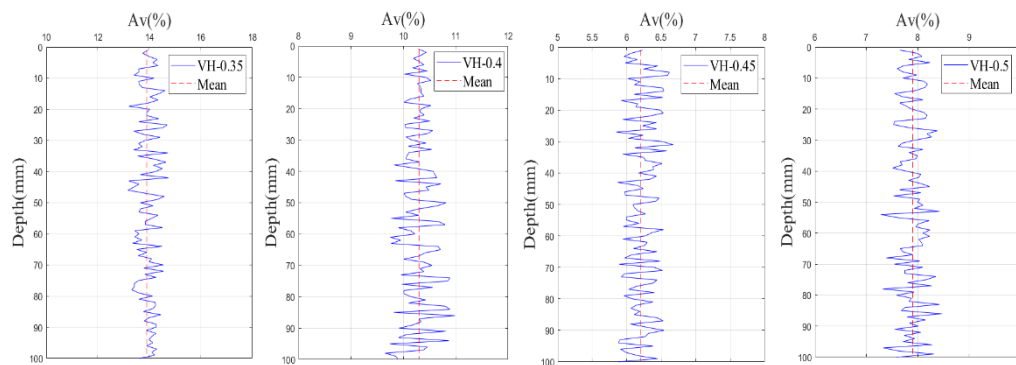
۶-۲-۱- درصد فضای خالی

درصد فضای خالی بدست آمده از تحلیل CT با استفاده از رابطه ی (۳)، در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین، در این جدول نتایج بدست آمده از فضای خالی آزمایشگاهی با فضای خالی CT مقایسه و انحراف معیار مربوطه ارائه شده است. همان طور که در این جدول ملاحظه می شود، مقدار انحراف معیار در تمامی موارد کمتر از ۰/۱۵٪ بوده است. شکل ۹ ساختار فضای خالی در نمونه های RCCP را نشان می دهد. در تصویر قطعه بندی شده، رنگ سفید در پس زمینه نمایانگر مواد جامد و رنگ سیاه نمایانگر فضای خالی است که مطابق روش ارائه شده در بخش روش تحقیق بدست آمده است. مطابق جدول ۴ و شکل ۹، نمونه های 0.45- VH و

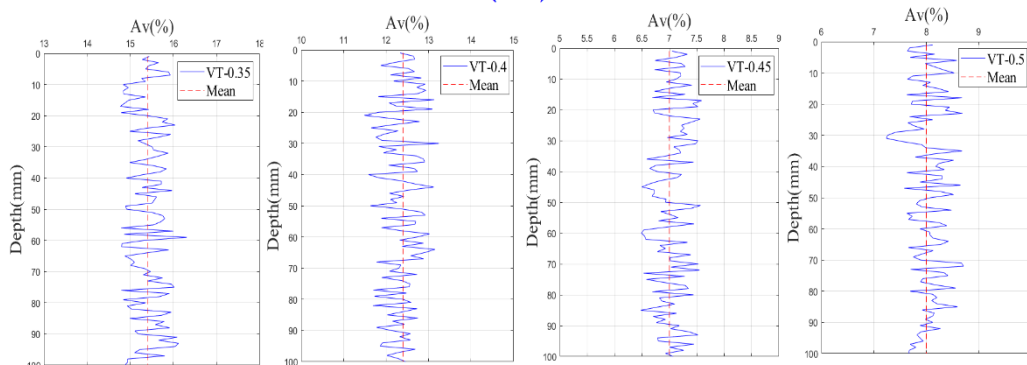
تغییر مقدار آب ساخته شدند. آنها در تحقیق خود به بررسی تأثیر روش تراکم در ایجاد فضای خالی نیز پرداختند. بر اساس نتایج آنها روش تراکمی چکش لرزنده فضای خالی کمتری نسبت به میز لرزنده ایجاد می کند. آن ها دلیل این تفاوت را، پایتتر بودن میزان انرژی تراکمی در روش میز لرزنده نسبت به چکش لرزنده دانستند [۳۶]. مقایسه ی نتایج بدست آمده نشان می دهد که نتایج بدست آمده در تحقیقات قبلی با تحقیق حاضر در یک راستا می باشد.

۶-۲- آنالیز پارامترهای فضای خالی به روش سیتیا سکن

منظور از پارامترهای فضای خالی بررسی شده در این پژوهش، درصد، قطر معادل و تعداد فضای خالی می باشد.



(الف)



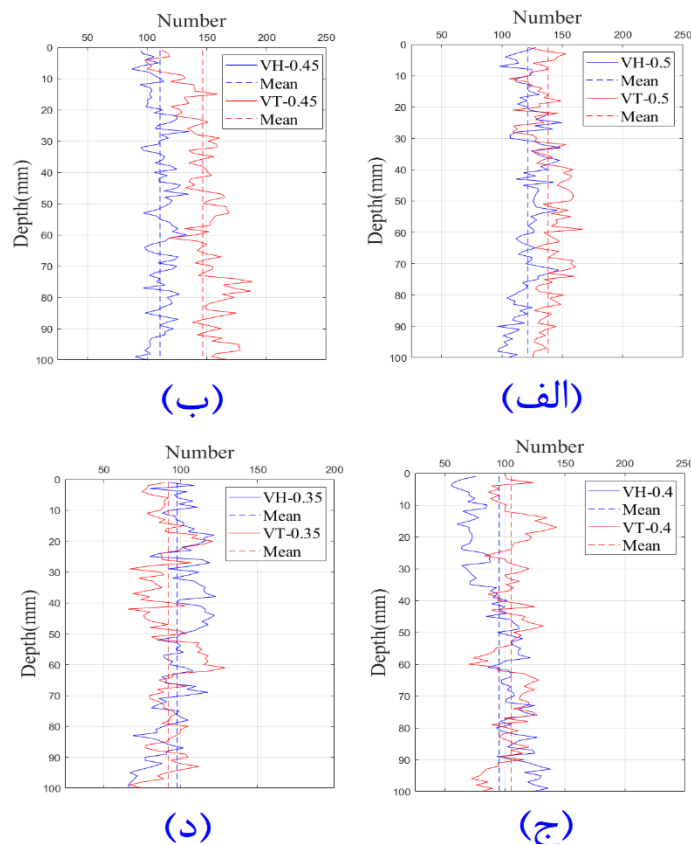
(ب)

شکل ۱۰. نحوه ی توزیع حفرات نمونه های RCCCP (الف: روش تراکمی چکش لرزنده، ب) روش تراکمی میز لرزنده
Fig. 10. Distribution of air void in RCCCP samples: a) Vibrating hammer compaction method, b) Vibrating table compaction method

ها وجود ندارد. همچنین در مقادیر بالاتر، بخشی از تنش اعمالی از طریق متراکم کننده، توسط آب مازاد جذب شده و مانع رسیدن تنش به سنگدانه ها و فشرده تر شدن آن ها می شود.

شکل ۱۰ نحوه ی توزیع درصد فضای خالی نمونه های RCCCP را براساس تحلیل مقطعی نشان می دهد. این آنالیز نحوه ی توزیع فضای خالی از بالا به پایین نمونه را فراهم می کند. خطچین قرمز میانگین درصد فضای خالی در ارتفاع نمونه را نشان می دهد که با مقادیر جدول ۴ یکسان است. فضای خالی در ارتفاع های مختلف نمونه های RCCCP از پایین به بالا و در فواصل ۲۰ میلی متری محاسبه گردید. سپس میانگین و ضریب تغییرات مقادیر فضای خالی محاسبه شد. چون ضریب تغییرات بدست آمده از ۵/۵٪ کمتر بود، می توان این گونه استنباط نمود که فضای خالی به طور همگن و با انحراف بسیار کمی در بالا و پایین نمونه توزیع شده است.

VT - ۰.۳۵ به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار فضای خالی هستند. همچنین مطابق شکل ۹، با کاهش مقدار فضای خالی و افزایش نسبت آب به سیمان تا مقدار ۰/۴۵، حفرات موئینه ی کمتری در ساختار RCCCP ایجاد می شود. علاوه بر این، نمونه های VT - ۰.۳۵، VH - ۰.۳۵ و VT - ۰.۴ دارای بیشترین حفرات موئینه در ترکیب خود می باشند. همچنین، مطابق با جدول ۴ یکی از دلایل افزایش مقدار فضای خالی در نسبت های آب به سیمان کمتر و بیشتر از ۰/۴۵ و حداقل شدن آن در این نسبت، تکمیل فرآیند هیدراتاسیون سیمان می باشد. در نسبت های آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴، به دلیل عدم وجود آب کافی برای پیشرفت قابل توجه هیدراتاسیون سیمان و همچنین در نسبت آب به سیمان ۰/۵، به دلیل وجود آب اضافی در ساختار بتن و ایجاد فضای خالی بیشتر، مقدار حفرات افزایش یافته است. علاوه بر نقش هیدراتاسیون، میتوان به تأثیر تراکم اشاره کرد که در نسبت های آب به سیمان کمتر از ۰/۴۵، آب به میزان کافی برای روغن کاری بین سنگدانه



شکل ۱۱. تجزیه و تحلیل تعداد فضای خالی در ارتفاع نمونه های RCCP برای مخلوط های مختلف بر اساس مقایسه ی روش تراکمی: الف) $W/C = 0.5$ ، ب) $W/C = 0.45$ ، ج) $W/C = 0.4$ ، د) $W/C = 0.35$

Fig. 11. Analysis of the number of air void at the height of RCCP samples for different mixtures based on the comparison of compaction methods: a) $W/C = 0.5$, b) $W/C = 0.45$, c) $W/C = 0.4$, d) $W/C = 0.35$

۲-۲-۶- تعداد فضای خالی

یکی دیگر از پارامترهای بدست آمده از روش CT، تعداد فضای خالی در نمونه ها بوده است. شکل ۱۱ روند تغییرات تعداد فضای خالی در ارتفاع نمونه برای نمونه های با روش تراکمی مختلف و نسبت آب به سیمان مشابه را نشان می دهد. با کم شدن نسبت آب به سیمان تعداد فضای خالی کاهش می یابد. همچنین، با تغییر روش تراکمی از چکش لرزنده به میز لرزنده تعداد فضای خالی افزایش یافته است. به عنوان مثال برای نمونه ی VT ۰.۵- حداکثر ۱۶۷ و برای نمونه ی VH ۰.۳۵- حداکثر ۱۲۳ فضای خالی مشاهده شد. همچنین میانگین نتایج تعداد فضای خالی در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق با نتایج ارائه شده نمونه های VT ۰.۳۵ با ۹۲ و VT ۰.۴۵ با ۱۴۷ به ترتیب کمترین و بیشترین تعداد فضای خالی را در نمونه های RCCP دارند.

۲-۲-۶- قطر معادل فضای خالی

نتایج قطر معادل فضای خالی بدست آمده با استفاده از رابطه ی (۴) در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج ارائه شده در جدول ۵ براساس میانگین قطر معادل در تمام برش ها محاسبه شده است. مطابق جدول ۵ نمونه های VT ۰.۳۵- با ۳/۹۲ میلی متر و VT ۰.۴۵- با ۲/۰۹ میلی متر به ترتیب بیشترین و کمترین قطر معادل را در مقایسه با بقیه ی نمونه ها دارند. همچنین با مقایسه ی نمونه ها در نسبت آب به سیمان مشابه، هر دو روش تراکمی چکش لرزنده و میز لرزنده قطر معادلی نزدیک به یکدیگر را ایجاد می کنند. براساس نتایج جدول ۵ می توان فهمید که خشک بودن نمونه های RCCP در اثر کم بودن مقدار آب به سیمان، باعث ایجاد فضای خالی بزرگتری در ساختار RCCP می شود. این در حالی است که با افزایش نسبت آب به سیمان بعد از بهینه ترین مقدار یعنی ۰/۴۵، قطر معادل افزایش

جدول ۵. تعداد و قطر معادل فضای خالی در نمونه های مختلف مورد تحقیق

Table 5. The number and equivalent diameter of air voids in different studied samples

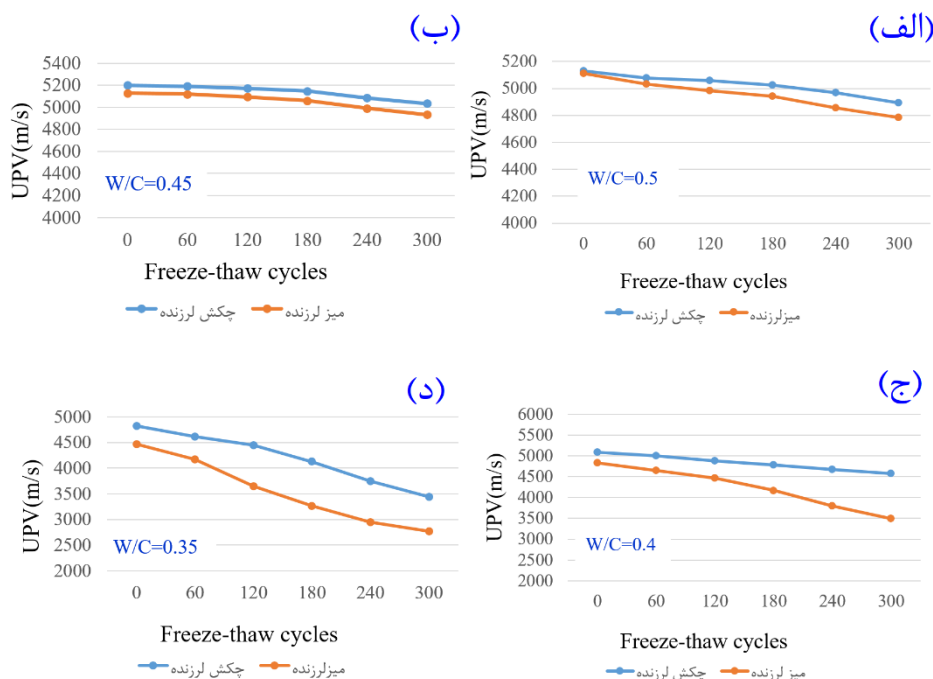
خصوصیات فضای خالی		تعداد	نوع مخلوط RCCP
قطر معادل (میلی متر)			
۳/۵۵		۹۸	VH -0.35
۳/۱۵		۹۵	VH -0.4
۲/۲۴		۱۱۱	VH -0.45
۲/۳۹		۱۲۲	VH -0.5
۳/۹۲		۹۲	VT -0.35
۳/۲۷		۱۰۵	VT -0.4
۲/۰۹		۱۴۷	VT -0.45
۲/۲۹		۱۳۸	VT -0.5

های $VT - 0.35$ با $m/s 4466$ و $VH - 0.45$ با $m/s 5200$ به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار را قبل از قرارگیری در چرخه های $F - T$ دارند. در این شکل تأثیر روش های تراکمی در مخلوط های مختلف نیز مشخص می کند که نمونه های ساخته شده با چکش لرزنده سرعت بالاتری را در پایان 300 چرخه $F - T$ در مقایسه با نمونه های ساخته شده با میز لرزنده دارند. این مسأله می تواند ناشی از تأثیر فضای خالی در نمونه ها باشد که با کاهش فضای خالی UPV افزایش یافته است. در یک پژوهش آزمایشگاهی که بر روی خصوصیات دوام RCCP بدون افزودنی حبابزا متمرکز شده بودند، به بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان بر میزان نفوذپذیری RCCP پرداخته و نتایج حاصل را با دوام $F - T$ مقایسه کردند. به طور مشابه در پژوهش حاضر، آنها نیز اینگونه گزارش نموده اند که، کاهش فضای خالی در RCCP سبب کاهش نفوذپذیری و افزایش UPV میگردد [۵۰]. همچنین از نتایج می توان فهمید که با کاهش نسبت آب به سیمان تفاوت نتایج UPV بین نمونه های چکش لرزنده و میز لرزنده بیشتر مشخص می گردد. مطابق شکل ۱۲- الف و ۱۲- ب، اختلاف نتایج UPV برای نمونه های متراکم شده با چکش لرزنده و میز لرزنده کم است. اما مطابق شکل ۱۲- ج و ۱۲- د، این اختلاف با افزایش چرخه های $F - T$ بیشتر شده است. همچنین در سرتاسر طول آزمایش نتایج بدست آمده از چکش لرزنده بالاتر از میز لرزنده است. این مورد را می توان به حساسیت بیشتر روش تراکمی میز لرزنده به مقدار آب برای رسیدن به کارایی مناسب مرتبط دانست. تراکم به روش میز لرزنده انرژی پایینتری نسبت به روش چکش لرزنده برای تراکم ایجاد می کند. بنابراین، پایین بودن نسبت آب به سیمان، باعث عدم تراکم

می یابد. در یک تحقیق مشابه، تأثیر درصد رطوبت بر توزیع و اندازه ی فضای خالی در RCCP مورد بررسی گرفت. آنها در تحقیق خود از شش درصد رطوبت مختلف استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش بیش از حد درصد رطوبت بیشتر از 0.5% ، اندازه ی فضای خالی افزایش می یابد [۴۶]. همچنین بر اساس جدول ۵، قطر معادل فضای خالی برای نمونه های مورد بررسی، در محدوده ی $2/09 - 3/92$ میلی متر متغیر بوده که با تحقیقات قبلی که اندازه ی فضای خالی را بین یک نانومتر تا 10 میلی متر گزارش نمودند، منطبق است [۴۷].

۳-۶- دوام در سیکل های یخبندان - ذوب در حضور نمک یخزدا

شکل ۱۲ تغییرات UPV در مخلوط های ۲۸ روزه RCCP را در طی 300 چرخه $F - T$ و در حضور محلول نمک نشان می دهد. هر نقطه در نمودارها نشان دهنده میانگین نتایج دو اندازه گیری می باشد. مطابق این شکل بطور کلی با افزایش درصد فضای خالی مقدار UPV کاهش می یابد. مقدار UPV در بتن به پارامترهای مختلفی از جمله سن مخلوط، شرایط رطوبت، تخلخل بتن و نوع سنگدانه بستگی دارد [۴۲]. براساس رابطه کیفی ارائه شده بین UPV و خصوصیات مقاومتی بتن، مقادیر بیش از 4500 ، $3500 - 4500$ ، $3000 - 3500$ و کمتر از 3000 به ترتیب به عنوان بتن قوی، خوب، متوسط و ضعیف رده بندی می شوند [۴۸]. مطابق شکل ۱۲ الف - د، با افزایش چرخه های $F - T$ و پیشرفت خرابی مقدار UPV در تمام نمونه ها کاهش یافته است. در تحقیقات قبلی هم نشان داده شده است که خراب شدن تدریجی بتن باعث کاهش UPV می شود [۴۹]. همچنین نمونه

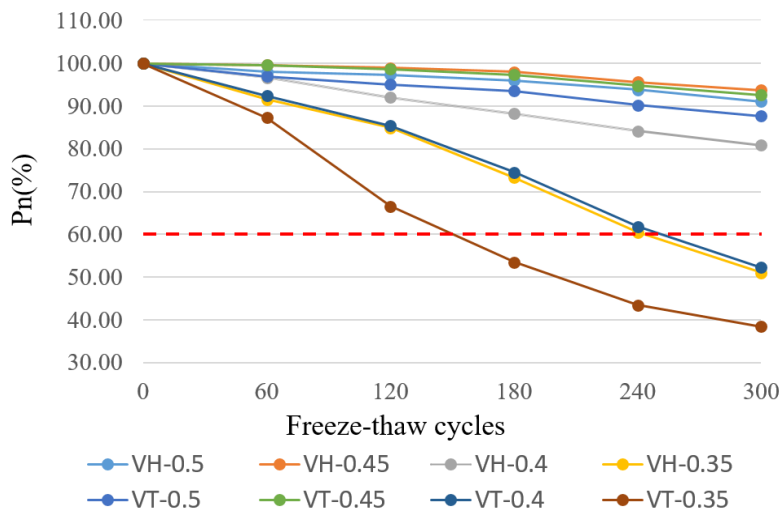


شکل ۱۲. تأثیر چرخه های F - T بر UPV: الف) W/C = 0.5، ب) W/C = 0.45، ج) W/C = 0.4، د) W/C = 0.35
 Fig. 12. The effect of F - T cycles on UPV. a) W/C = 0.5, b) W/C = 0.45, c) W/C = 0.4, d) W/C = 0.35

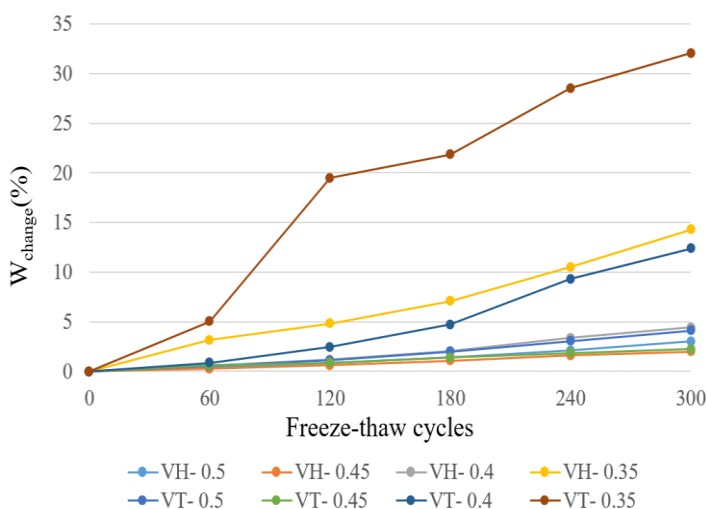
نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ را می توان، به باقیماندن آب آزاد در بتن تازه و ایجاد پوکی در اثر سخت شدن بتن و جذب تنش توسط آب دانست. همچنین مطابق شکل ۱۳ در نمونه های VT - ۰.۳۵، VH - ۰.۳۵ و VT - ۰.۴ بعد از اتمام ۳۰۰ سیکل مقدار Pn به کمتر از ۶۰٪ مقدار اولیه ی خود رسیده است. این مسأله می تواند ناشی از وجود فضای خالی بیش از حد در این نمونه ها و رشد ترک ها و ناپیوستگی های ریز داخلی در آن ها باشد. در تحقیقات قبلی نیز به این مورد اشاره شده است [۵۱]. بنابراین، این طرح ها به دلیل افت قابل توجه مقدار Pn بعد از سیکل های F - T، برای استفاده در شرایط میدانی توصیه نمی شوند. براساس نتایج شکل ۱۳ و بررسی ساختار فضای خالی ارائه شده در شکل ۹، خشکی و تراکم پذیری پایین مخلوط های RCCP در نسبت های آب به سیمان پایین و افزایش قابل توجه حفرات موئینه تأثیر منفی روی نتایج حاصل از دوام دارد. به طور مشابه در یک تحقیق آزمایشگاهی که بر روی مخلوط های RCCP حاوی مقادیر مختلف سیمان انجام شده بود، به تأثیر نسبت آب به سیمان بر خصوصیات مکانیکی و دوام F - T، پرداخته شد. آنها در تحقیق خود به این نتیجه

کافی در RCCP شده و از ایجاد دوغاب سیمان مناسب جهت پر کردن خلل و فرج جلوگیری می کند [۳۶]. نمونه های VT - ۰.۳۵، VH - ۰.۳۵ و VT - ۰.۴ در پایان ۳۰۰ چرخه بر اساس معیارهای گفته شده به ترتیب در رده ی بتن های ضعیف، متوسط و متوسط و بقیه ی مخلوط ها در رده ی بتن قوی قرار می گیرند.

شکل ۱۳ تغییرات پارامتر Pn را برای نمونه های مختلف که با استفاده از رابطه (۵) به دست آمده اند، نشان می دهد. خط چین قرمز معیار حداقل قابل قبول تعیین شده توسط ASTM C666 می باشد. مطابق با نتایج بدست آمده مقدار Pn، با افزایش نسبت آب به سیمان تا مقدار ۰/۴۵ افزایش و پس از آن کاهش یافته است. به گونه ای که برای نمونه های VH - ۰.۴۵ و VT - ۰.۴۵، در انتهای ۳۰۰ چرخه F - T، مقدار Pn به ترتیب ۹۳/۷۳ و ۹۲/۵۸ بوده است. در نسبت های آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵ مقدار پارامتر Pn بسیار به یکدیگر نزدیک بوده است. این مسأله می تواند ناشی از نزدیک بودن مقدار فضای خالی این دو نمونه مطابق جدول ۴ باشد. علاوه بر این، دلیل پایتتر بودن مقدار Pn در نسبت های آب به سیمان ۰/۵ در مقایسه با



شکل ۱۳. تأثیر چرخه های F - T بر Pn
 Fig. 13. The effect of F - T cycles on Pn

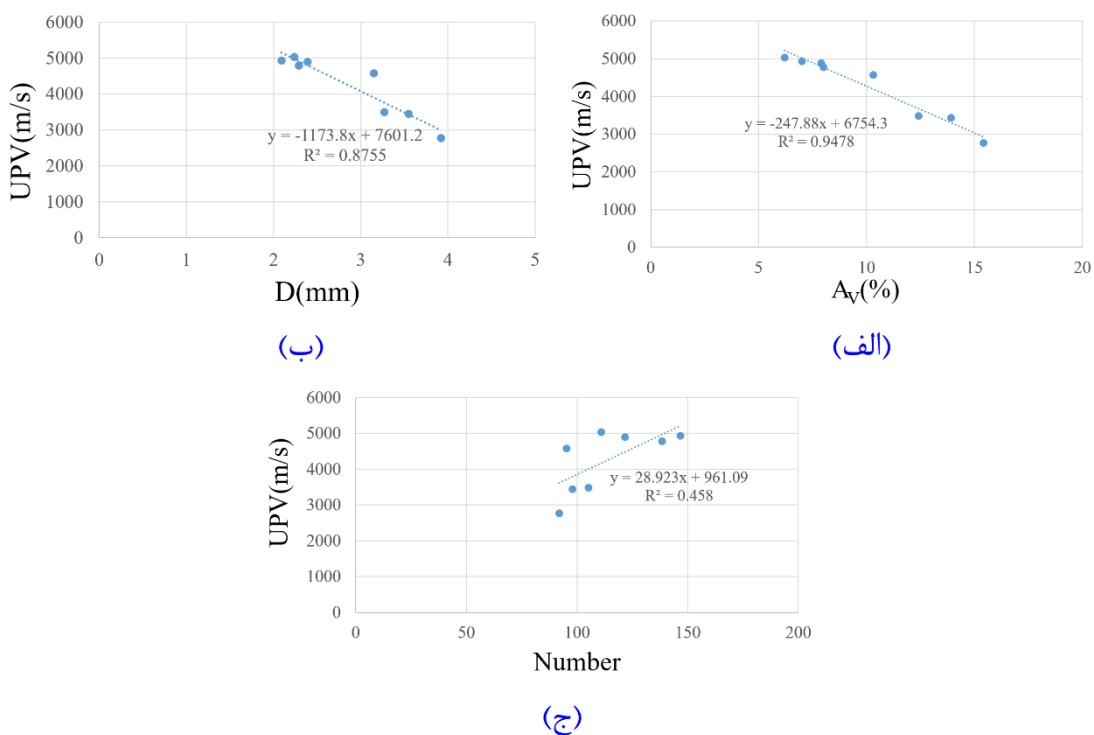


شکل ۱۴. تأثیر چرخه های F - T بر W_change
 Fig. 14. The effect of F - T cycles on W_change

نمونه های $VH-0.35$ و $VT-0.4$ تا ۱۲۰ چرخه مقاومت خوبی را از خود نشان دادند. اما با افزایش تعداد چرخه ها W_{change} بیشتری را متحمل شده و در پایان ۳۰۰ چرخه به ترتیب بیش از ۱۴٪ و ۱۲٪، W_{change} را داشته اند. دلیل این روند، وجود حفرات موئینه در این نمونه ها است که حرکت آب و محلول نمک را بسیار آسان تر می کند و باعث اشباع شدن سریع RCCP می گردد [۴۲]. براساس مطالعات قبلی وجود حفرات موئینه و بزرگ در ساختار بتن می تواند نقطه ی انجماد آب را افزایش داده و سبب انجماد آب در دماهای بالاتر گردد. پس از انجماد آب در حفرات بزرگ، مقداری از آب

رسیدند که کاهش نسبت آب به سیمان از مقدار بهینه، باعث کاهش دوام بتن می شود [۴۵].

شکل ۱۴ تغییرات پارامتر W_{change} را در طول ۳۰۰ چرخه F - T مطابق رابطه (۶) نشان می دهد. مطابق نتایج ارائه شده با افزایش چرخه های F - T، میزان W_{change} نمونه ها افزایش می یابد. به گونه ای که نمونه ی $VT-0.35$ ضعیفترین عملکرد و بیشترین W_{change} را از خود نشان داده است. همچنین، این نمونه در پایان ۳۰۰ چرخه کمترین مقاومت را در چرخه ی F - T از خود نشان داده و میزان W_{change} آن به بیش از ۳۲٪ می رسد.



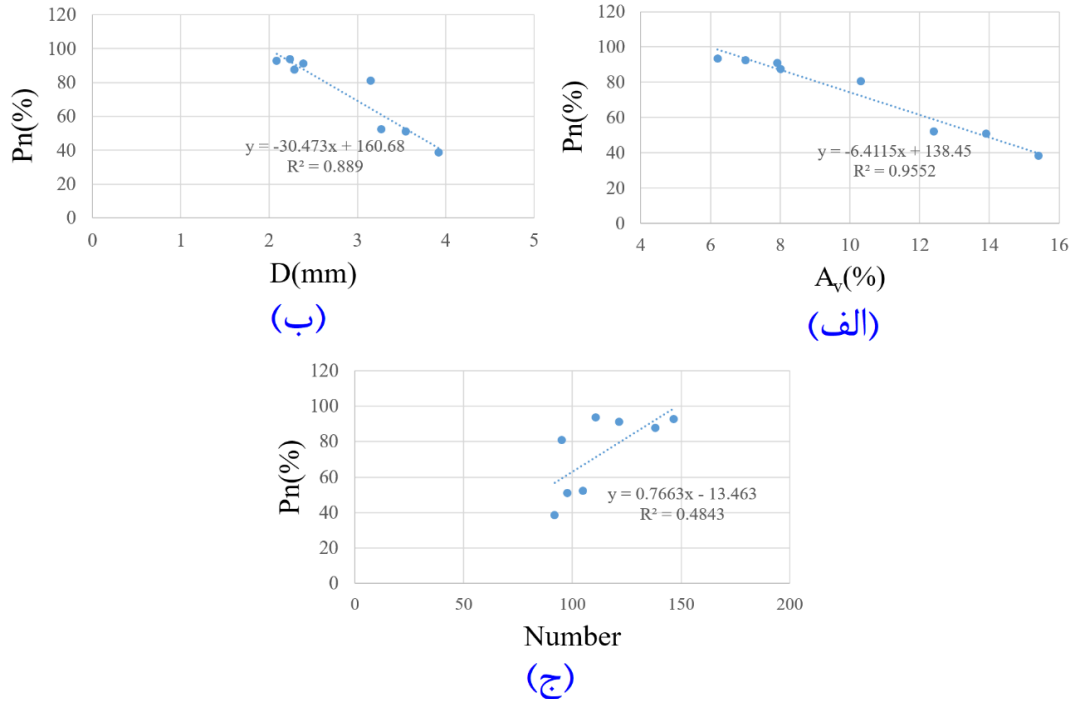
شکل ۱۵. نمودار همبستگی UPV با پارامترهای فضای خالی: الف) مقدار فضای خالی (%، ب) قطر معادل فضای خالی (mm)، ج) تعداد فضای خالی

Fig. 15. Correlation between UPV data and air voids parameters, a) air void content (%), b) air void equivalent diameter (mm), c) air void number

مناسب RCCP و خرابی بیشتر آن می گردد. ترکیبات بهینه ی RCCP که کمترین میزان خرابی و کمترین مقدار W_{change} را داشتند، نمونه های $VH - 0.45$ و $VT - 0.45$ به ترتیب با $1/97\%$ و $2/27\%$ بوده‌اند. علت این مسأله را میتوان به وجود فضای خالی مناسب و عدم رسیدن به درجه اشباع بحرانی در این نمونه ها دانست [۵۲].

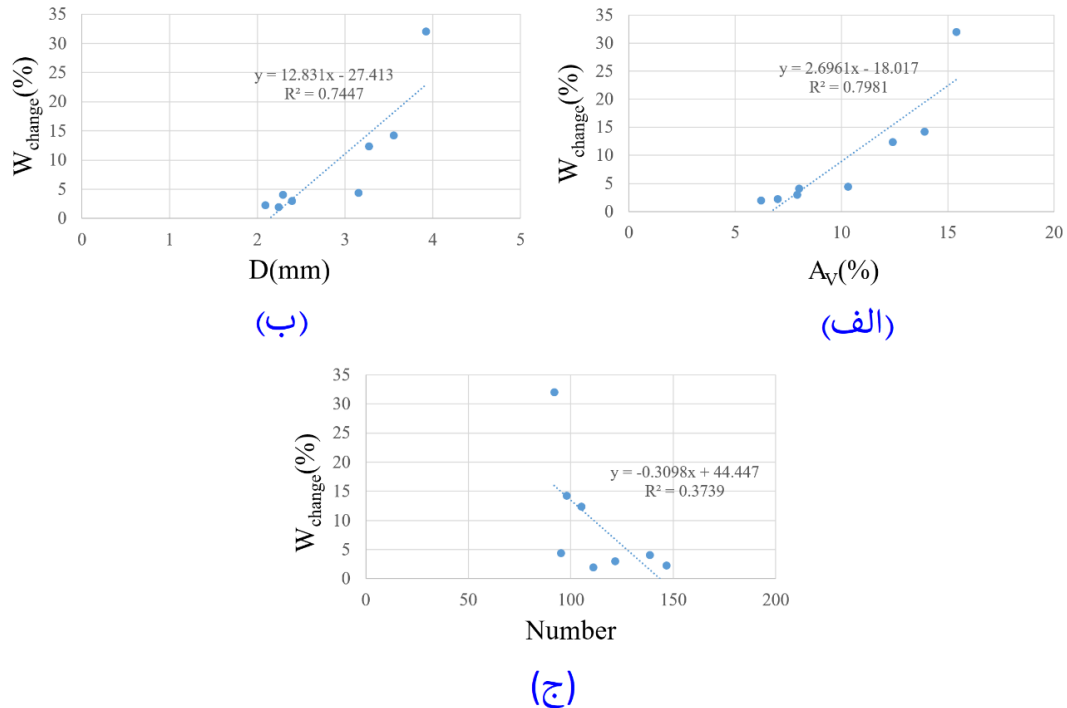
شکل های ۱۵-۱۷ همبستگی پارامترهای فضای خالی را با شاخص های دوام نشان می دهد. مطابق نتایج ارائه شده، شاخص های دوام همبستگی مناسبی با مقدار و قطر معادل فضای خالی در RCCP دارند. اما همبستگی مناسبی بین این شاخص ها و تعداد فضای خالی وجود ندارد. دلیل عدم همبستگی بین تعداد فضای خالی و شاخص های دوام، متفاوت بودن اندازه‌ی فضای خالی در نمونه های مختلف می باشد. این طور می توان بیان کرد که اندازه‌ی فضای خالی در نمونه ها از $0.27-825$ میلی متر مربع متغیر بوده و تعداد فضای خالی معیار صحیحی از میزان مساحت و حجم فضای خالی ارائه نمی دهد. بنابراین همبستگی بین تعداد فضای خالی و شاخص

یخ نزده برای جلوگیری از افزایش حجم بتن وارد حفرات ریز اطراف آن می گردد. آب در حفرات ریز به دمای بسیار پایین تری برای انجماد نیاز دارد. بنابراین، اگر حفرات ریز به مقدار کافی در ساختار بتن ایجاد نگردد، در اثر انجماد افزایش حجم زیادی در بتن ایجاد شده و خرابی بیشتری ایجاد می شود. به طور مشابه در تحقیقات قبلی که بر ارتباط خصوصیات فضای خالی بتن حاوی افزودنی و فاقد افزودنی حبابزا و مقاومت در برابر یخ زدگی متمرکز شده بودند، به این نتیجه رسیدند که کوچک بودن اندازه‌ی فضای خالی، تأثیر مثبت روی دوام بتن در برابر $F - T$ داشته و با افزایش اندازه‌ی فضای خالی W_{change} افزایش می یابد [۳۱]. در نسبت آب به سیمان پایین اختلاف نتایج روش چکش لرزنده و میز لرزنده با افزایش چرخه های $F - T$ بیشتر می شود. برای نمونه های $VH - 0.4$ و $VT - 0.4$ ، تفاوت نتایج W_{change} در پایان آزمایش به حدود 8% می رسد. همچنین این نتیجه برای نمونه های $VH - 0.35$ و $VT - 0.35$ در پایان آزمایش، به حدود 18% میرسد. بنابراین پایین بودن نسبت آب به سیمان در روش تراکم میز لرزنده باعث عدم تراکم



شکل ۱۶. نمودار همبستگی Pn با پارامترهای فضای خالی: الف) مقدار فضای خالی (%، ب) قطر معادل فضای خالی (mm)، ج) تعداد فضای خالی

Fig. 16. Correlation between Pn and air void parameters, a) air void content (%), b) air void equivalent diameter (mm), c) air void number



شکل ۱۷. نمودار همبستگی W_{change} با پارامترهای فضای خالی: الف) مقدار فضای خالی (%، ب) قطر معادل فضای خالی (mm)، ج) تعداد فضای خالی

Fig. 17. Correlation between W_{change} and air void parameters, a) air void content (%), b) air void equivalent diameter, c) air void number

های دوام ضعیف می باشد.

۷- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی ارتباط بین ویژگی های دوام مخلوط RCCP در شرایط سیکل های $F - T$ با میزان فضای خالی پرداخته شد. در این ارتباط تأثیر روش تراکمی و نسبت آب به سیمان از جمله متغیرهای اصلی مورد بررسی بودند. میزان فضای خالی با دو روش آزمایشگاهی و تحلیل با سی تی اسکن تعیین شده و با خصوصیات دوام قبل و بعد از چرخه های $F - T$ مورد مقایسه قرار گرفت. از نتایج بدست آمده و تحلیل های انجام شده نتیجه گیری زیر قابل ارائه است:

۱- براساس نتایج بدست آمده روش الگوریتم حدآستانه ی کلی مبتنی بر حجم، یک روش مناسب برای بررسی پارامترهای فضای خالی RCCP می باشد. با توجه به یکسان بودن شدت تابش اشعه ایکس در یک تصویر، شدت روشنایی دریافت شده توسط سنجنده، بیانگر میزان نفوذپذیری و یا نفوذناپذیری اجزای تشکیل دهنده نمونه است. بنابراین، با تعیین حد آستانه کلی می توان، حفره ها با بیشترین میزان نفوذپذیری را از سایر اجزا تشخیص داد. مقایسه ی نتایج بدست آمده از CT و فضای خالی آزمایشگاهی نشان می دهد که روش CT به خوبی می تواند فضای خالی نمونه ها را برآورد نماید.

۲- براساس نتایج CT، نسبت آب به سیمان یک پارامتر مهم در میزان فضای خالی بدست آمده در RCCP است و در نسبت های آب به سیمان مختلف نوع فضای خالی ایجاد شده متفاوت است. به گونه ای که با افزایش این نسبت تا ۰/۴۵ حفرات موئینه کاهش و بعد از آن حفرات موئینه افزایش یافته است. همچنین براساس تحلیل های انجام شده از روش CT نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ به عنوان مقدار بهینه می تواند انتخاب شود. از دلایل حداقل شدن مقدار فضای خالی در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، نسبت به مقادیر کمتر و بیشتر از آن، می توان به تکمیل فرآیند هیدراتاسیون و نقش آب در جذب تنش اشاره کرد. در نسبت آب به سیمان پایین، پیشرفت هیدراتاسیون با مشکل مواجه شده و در نسبت آب به سیمان بالا، آب تنش های اعمالی از طریق متراکم کننده را جذب می کند.

۳- با توجه به نتایج بدست آمده، انتخاب نسبت آب به سیمان بهینه اثرات مفیدی روی پارامترهای فضای خالی و دوام دارد و در مقدار آب به سیمان ۰/۴۵، به دلیل بهینه بودن درصد فضای خالی، کاهش حفرات موئینه و کوچک بودن قطر معادل، شاخص های UPV، Pn و W_{change} در مناسبترین مقدار خود هستند. به علاوه روش تراکمی در نسبت های آب به

سیمان بالا تأثیر زیادی روی دوام RCCP نداشت. اما در نسبت های آب به سیمان پایین، چکش لرزنده به دلیل قدرت تراکم بالاتر در مقایسه با روش میز لرزنده منتهی به دوام بالاتری گردید. به جز مخلوط های ۰.۳۵ - VH، ۰.۳۵ - VT و ۰.۴ - VT سایر مخلوط ها دوام مناسبی از خود نشان دادند. ۴- نتایج آنالیز رگرسیون بین UPV، Pn و W_{change} با پارامترهای فضای خالی نشان داد که همبستگی مناسبی بین پارامترهای دوام با درصد و اندازه ی فضای خالی وجود داشته و با تعیین درصد و اندازه ی فضای خالی در نمونه های RCCP، می توان دوام این نمونه ها را در برابر چرخه های $F - T$ پیش بینی نمود. اما تعداد فضای خالی به دلیل عدم همبستگی مناسب و متغیر بودن اندازه ی فضای خالی در RCCP معیار مناسبی برای سنجش دوام نیست.

۵- براساس نتایج CT و بررسی ارتباط آن با شاخص های دوام، بهینه ترین ترکیب RCCP، نمونه های ۰.۴۵ - VH و ۰.۴۵ - VT به ترتیب با کمترین فضای خالی ۶/۲ درصد و ۷ درصد و قطر معادل ۲/۲۴ میلی متر و ۲/۰۹ میلی متر می باشند.

در جمع بندی نهایی، دست یابی به یک روش جدید جهت تعیین حد آستانه ی مناسب برای تشخیص فضای خالی RCCP، بررسی روش های توزیع فضای خالی به صورت کمی و مدل سازی سه بعدی فضای خالی، جهت انجام پژوهش های آینده توصیه می گردد.

منابع

- [1] ACI Committee 201, Guid to durable Concrete, Manual of concrete practice, American Concrete Institute, 2000.
- [2] J. Yuan, Z. Du, Y. Wu, F. Xiao, Freezing - thawing resistance evaluations of concrete pavements with deicing salts based on various surfaces and air void parameters, Construction and Building Materials, 204 (2019) 317-326.
- [3] P.K. Mehta, P.J. Monteiro, Concrete microstructure, properties, and materials, 3th Ed., McGraw - Hill Professional, 2017.
- [4] J.A. Distlehorst, G.J. Kurgan, Development of precision statement for determining air void characteristics of fresh concrete with use of air void analyzer, Transportation Research record, 2020(1) (2007) 45-49.

- localized deformations in sand using X - ray computed tomography, *Geotechnical Testing Journal* 23(3) (2000) 274-299.
- [16] K.Y. Kim, T.S. Yun, J. Choo, D.H. Kang, H.S. Shin, Determination of air - void parameters of hardened cement - based materials using X - ray computed tomography, *Construction and Building Materials*, 37 (2012) 93-101.
- [17] H. Lu, X-ray Computed Tomography Assessment of Air Void Distribution in Concrete, PhD Thesis, Department of Civil Engineering University of Toronto, 2017.
- [18] M. Ozen, M. Guler, Assessment of optimum threshold and particle shape parameter for the image analysis of aggregate size distribution of concrete sections, *Optics and Lasers in Engineering* 53 (2014) 122-132.
- [19] G. Sokhansefat, M. Moradian, M. Finnell, A. Behravan, M.T. Ley, C. Lucero, J. Weiss, Using X - ray computed tomography to investigate mortar subjected to freeze-thaw cycles, *Cement and Concrete Composites*, 108 (2020) 103520.
- [20] Y.S. Wang, J.G. Dai, X - ray computed tomography for pore - related characterization and simulation of cement mortar matrix, *NDT & E International*, 86 (2017) 28-35.
- [21] K. Gopalakrishnan, H. Ceylan, F. Inanc, Using X - ray computed tomography to study paving materials, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 160(1) (2007) 15-23.
- [22] M. Kayhanian, D. Anderson, J.T. Harvey, D. Jones, B. Muhunthan, Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots, *Journal of Environmental management*, 95(1) (2012) 114-123.
- [23] T. Suzuki, H. Ogata, R. Takada, M. Aoki, M. Ohtsu, Use of acoustic emission and X - ray computed tomography for damage evaluation of freeze - thawed concrete, *Construction and Building Materials*, 24(12) (2010) 2347-2352.
- [24] W. Tian, N. Han, Evaluation of damage in concrete suffered freeze - thaw cycles by CT technique, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 14(11) (2016) 679-690.
- [5] ASTM C231, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method, Annual Book of ASTM Standards, 2017.
- [6] ASTM C173, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method, ASTM International, Annual Book of ASTM Standards, 2016.
- [7] ASTM C138, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2017.
- [8] ASTM C 457, Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air - Void System in Hardened Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2016.
- [9] ASTM D4404, Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry, Annual Book of ASTM Standards, 2010.
- [10] ASTM C1723, Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy, Annual Book of ASTM Standards, 2016.
- [11] A. du Plessis, W.P. Boshoff, A review of X - ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials, *Construction and Building Materials*, 199 (2019) 637-651.
- [12] D. Wiese, M. Thomas, M. Thornton, D. Peng, A new method of air void analysis for structural concrete, *International Conference on Cement Microscopy*, 22 (2000) 389-398.
- [13] D. Farokhian, R. Azin, A. Ranjbar, Application of medical and dental CT - Scan technologies for determining porosity distribution of the Persian Gulf coastal zone and Zagros basin core samples, *Journal of African Earth Sciences*, 150 (2019) 96-106.
- [14] A. Macedo, C. Vaz, J. Naime, P. Cruvinel, S. Crestana, X - ray microtomography to characterize the physical properties of soil and particulate systems, *Powder technology*, 101(2) (1999) 178-182.
- [15] K.A. Alshibli, S. Sture, N.C. Costes, M.L. Frank, M.R. Lankton, S.N. Batiste, R.A. Swanson, Assessment of

- cement ratios and cement contents on the physical and mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP), *Construction and Building Materials*, 253 (2020) 119177.
- [36] E. Şengün, B. Alam, R. Shabani, I. Yaman, The effects of compaction methods and mix parameters on the properties of roller compacted concrete mixtures, *Construction and Building Materials*, 228 (2019) 116807.
- [37] ASTM C1176, Standard Practice for Making Roller - Compacted Concrete in Cylinder Molds Using Vibrating Table, *Annual Book of ASTM Standards*, 2013.
- [38] ASTM C1435, Standard Practice for Molding Roller - Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer, *Annual Book of ASTM Standards*, 2013.
- [39] ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, 2013.
- [40] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, *Digital image processing (International ed.)*, ed: Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2008.
- [41] ASTM C666, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, *Annual Book of ASTM Standards*, 2015.
- [42] A. Mardani - Aghabaglou, Ö. Andiç - Çakir, K. Ramyar, Freeze – thaw resistance and transport properties of high - volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method, *Cement and Concrete Composites*, 37 (2013) 259-266.
- [43] L. Jiang, D. Niu, L. Yuan, Q. Fei, Durability of concrete under sulfate attack exposed to freeze – thaw cycles, *Cold Regions Science and Technology*, 112 (2015) 112-117.
- [44] S.A.M. Rad, A. Modarres, Durability properties of non-air entrained roller compacted concrete pavement containing coal waste ash in presence of de - icing salts, *Cold Regions Science and Technology*, 137 (2017) 48-59.
- [45] C. Hazaree, H. Ceylan, K. Wang, Influences of mixture composition on properties and freeze – thaw resistance of
- [25] F.M. Nejad, F.Z. Motekshases, H. Zakeri, A. Mehrabi, An image processing approach to asphalt concrete feature extraction, *Journal of Industrial and Intelligent Information*, 3(1) (2015).
- [26] L. Gao, F. Ni, H. Luo, S. Charmot, Characterization of air voids in cold in-place recycling mixtures using X - ray computed tomography, *Construction and Building Materials*, 84 (2015) 429-436.
- [27] L. Zhu, F. Dang, Y. Xue, W. Ding, L. Zhang, Comparative study on the meso - scale damage evolution of concrete under static and dynamic tensile loading using X - ray computed tomography and digital image analysis, *Construction and Building Materials*, 250 (2020) 118848.
- [28] A. Du Plessis, B.J. Olawuyi, W.P. Boshoff, S.G. Le Roux, Simple and fast porosity analysis of concrete using X - ray computed tomography, *Materials and structures*, 49(1-2) (2016) 553-562.
- [29] H. Lu, E. Alymov, S. Shah, K. Peterson, Measurement of air void system in lightweight concrete by X - ray computed tomography, *Construction and Building Materials*, 152 (2017) 467-483.
- [30] F. Yu, D. Sun, M. Hu, J. Wang, Study on the pores characteristics and permeability simulation of pervious concrete based on 2D/3D CT images, *Construction and Building Materials*, 200 (2019) 687-702.
- [31] J. Yuan, Y. Wu, J. Zhang, Characterization of air voids and frost resistance of concrete based on industrial computerized tomographical technology, *Construction and Building Materials*, 168 (2018) 975-983.
- [32] Portland Cement Association, *Guide Specification for Construction of Roller - Compacted Concrete Pavements*, 2004.
- [33] ASTM C150, *Standard Specification for Portland Cement*, *Annual Book of ASTM Standards*, 2016.
- [34] ACI 325, *State of art report on roller compacted concrete pavements*, American Concrete Institute, 2001.
- [35] E. Rahmani, M.K. Sharbatdar, M. Beygi, A comprehensive investigation into the effect of water to

- Effects of deicing salt solutions on physical properties of pavement concretes, Transportation research record, 2290(1) (2012) 69-75.
- [50] A.M. Ashteyat, Y.S. Al Rjoub, Y. Murad, S. Asaad, Mechanical and durability behaviour of roller - compacted concrete containing white cement by pass dust and polypropylene fibre, European Journal of Environmental and Civil Engineering, (2019) 1-18.
- [51] Z.A. Etman, T.I. Ahmed, Effect of freezing - thawing on concrete behavior, Challenge journal of concrete research letters, (2018) 21-36.
- [52] W. Li, M. Pour - Ghaz, J. Castro, J. Weiss, Water absorption and critical degree of saturation relating to freeze - thaw damage in concrete pavement joints, Journal of Materials in Civil Engineering, 24(3) (2012) 299-307.-
- RCC, Construction and Building Materials, 25(1) (2011) 313-319.
- [46] P. Shafigh, M. Hashemi, B.H. Nam, S. Koting, Optimum moisture content in roller - compacted concrete pavement, International Journal of Pavement Engineering, (2019) 1-11.
- [47] S.-H. Kang, S.-G. Hong, J. Moon, The effect of superabsorbent polymer on various scale of pore structure in ultra-high performance concrete, Construction and Building Materials, 172 (2018) 29-40.CEB - FIP, Diagnosis and assessment of concrete structures: state of art report, CEB Bull, (192) (1989) 83-85.
- [48] CEB - FIP, Diagnosis and assessment of concrete structures: state of art report, CEB Bull, (192) (1989) 83-85.
- [49] J. Jain, J. Olek, A. Janusz, D. Jozwiak - Niedzwiedzka,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Kazemi Alamooti, A. Modarres , E. Ghanbari Parmehr ,*The Relationship between Roller Compacted Concrete Durability and Air Void Parameters using X-Ray Computed Tomography*, Amirkabir J. Civil Eng., 53(11) (2022) 5009-5032.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18684.6926

