



Replacement of OPC with RCP in Concrete Containing RCA (Investigation of Mechanical, Economic and Environmental Characteristics)

M. Abdali Kia¹, F. Omidinasab^{1,*}, A. Sahraei Moghadam²

¹Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

²Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

ABSTRACT: This paper presents the results of an experimental study on the properties of environmentally friendly concrete. In the making of specimens, 0%, 15%, and 30% of ordinary Portland cement (OPC) were replaced by recycled concrete powder (RCP) and silica fume (SF). In addition, 0%, 50%, and 100% of natural aggregates (NA) were replaced by recycled concrete aggregates (RCA). In the production of RCA, 3 types of concrete waste with an initial strength of 20, 40, and 80 MPa were used. In this study, rheological, mechanical (compressive, splitting tensile and flexural strengths), economic and environmental (GWP) properties of 28 mix designs were investigated. The results showed that the use of RCA and RCP has a negative effect on rheological and mechanical properties. However, the results showed that the use of RCA and RCP has a positive effect on environmental and economic properties. Moreover, the results indicated that the negative effect of RCA can be prevented by increasing the initial strength of RCA, and the negative effect of RCP can be prevented by using SF. Finally, by optimization of mixing designs, it was concluded that it is justified to use 50% of RCA with an initial strength of 40 and 80 MPa and 30% of RCP and SF, in terms of rheological, mechanical, economic, and environmental properties.

Review History:

Received: 11/13/2020

Revised: 12/25/2020

Accepted: 2/18/2021

Available Online: 2/27/2021

Keywords:

Recycled aggregate

Recycled powder

Mechanical properties

Environment

Optimization

1. INTRODUCTION

Cement is one of the most basic components of concrete, therefore a large amount of this material is produced annually in the world [1]. According to the US Geological Survey, approximately 3,300 million tons of cement were produced worldwide in 2010 [2]. However, the production of cement causes many environmental problems. Cement factories produce the most greenhouse gas after power plants. About 7% of the annual carbon dioxide (CO_2) production is related to the cement production process, so its reduction is a global issue. To overcome this problem, several studies have been done on the use of cement substitutes [1]. In recent years, researchers have sought to replace ordinary Portland cement (OPC) with recycled concrete powder (RCP). To produce higher-quality RCA, mortar attaching to the surface of these aggregates should be separated. RCP constitutes about 10 to 30% of the total recycled resources [3]. Several studies have been conducted to replace OPC with RCP in concrete production [4-7].

In Tehran, more than 42,000 tons of construction waste is produced daily. This volume of construction wastes will have adverse environmental consequences. One of the solutions to manage such wastes is to recycle and reuse them [8]. Since a significant part of natural resources is destroyed annually to produce aggregates used in concrete

*Corresponding author's email: email

construction, recycling and reuse of construction wastes not only reducing environmental pollution but also helps preserve natural resources [9]. In previous research, both increasing and decreasing effects on concrete strength due to the use of recycled concrete aggregates (RCA) as a substitute for natural aggregates (NA) have been reported [10]. Chan et al. [11] reported the adverse effects and Moghadam et al. [12] reported the favorable effects of using RCA. One of the reasons for the variable behavior of concretes containing RCA in previous research could be the initial strength of concrete wastes used in the production of RCA.

In this study, the properties of concretes made with recycled concrete aggregates (RCA) have been investigated. Three types of parent concrete with strength grades of 20, 40, and 80 MPa were considered for RCA production. Moreover, recycled concrete powder (RCP), as well as combination of this powder with micro silica (SF), were used as a substitute for ordinary Portland cement (OPC). Experimental specimens of this paper were made from 28 different mixing designs including replacement of 0, 50, and 100 vol.% NA with RCA produced from concrete wastes with an initial strength of 20, 40, and 80 MPa as well as replacement of 0, 15, and 30 vol.% OPC with RCP and SF. In this study, the flowability and mechanical properties, as well as economic and environmental characteristics of concrete containing recycled materials, were investigated. Finally, optimal mixing



design using multivariate optimization was introduced.

2. METHODOLOGY

RCA production: Parent concretes with three strength grades of 20, 40, and 80 MPa were used to produce RCA. First, a compressive strength test was performed on three standard cylindrical specimens made from each parent concretes, under ASTM C39 [13]. The results of the compressive strength test show good compliance between the compressive strength of the specimen and the considered strength grades for parent concretes. After ensuring the compressive strength of the considered mix designs, the parent concretes were made. After 90 days, parent concretes were demolished and recycled.

Material: In this study, OPC based on ASTM C150 [14] was used. In some of the mixing designs of this study, part of OPC was replaced with RCP, SF, and a combination of them. RCP was obtained from the recycling of concrete wastes. To produce specimens, 4 types of aggregate including 1 type of NA and 3 types of RCA with an initial strength of 20, 40, and 80 MPa were used.

Mix proportions: There are 28 mixing designs in this study, which are presented in Table 1. The variables of these mix designs include the percentage of NA replacement with RCA by 0, 50, and 100 vol.%, the initial strength of RCA 20, 40, and 80 MPa, and the percentage of OPC replacement with RCP and SF by 0, 15, and 30 vol.%. The specimens are named in such a way that the number opposite the letter R indicates the percentage of replacement of NA with RCA, the number opposite the letter C indicates the initial strength of RCA, and the numbers opposite the letters RCP and SF represent the percentage of replacement of OPC with RCP and SF, respectively. From each of the 28 mix designs used, three specimens were made for each test. All specimens were stored for 24 hours at 25 °C temperature and 85% relative humidity. The specimens were then cured in water tanks at 20 °C for 28 days.

Test procedure: To investigate the effect of RCA, OPC, and SF on concrete workability, the slump test was performed under ASTM C143 [15].

Based on ASTM C39 [13], the compressive strength test was performed on cubic specimens, with the loading rate being 0.3 MPa/s. The test used a digital compression testing machine with a capacity of 1000 kN. The test managed to determine the maximum compressive force tolerated by the specimen. For the calculation of compressive strength, Eq. (1) was used.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Where σ_c , P and A are the compressive strength, the maximum compressive force tolerated by the specimen, and the cross-sectional area of the specimen (100 × 100 mm), respectively.

Based on ASTM C496 [16], a Splitting tensile strength test was conducted on cylindrical specimens having a diameter of 100 mm and a height of 200 mm at a loading rate of 0.05

MPa/s. Splitting tensile strength computations were based on Eq. (2).

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (2)$$

Where σ_t , P , D , and L are the splitting tensile strength, applied force, the cylindrical specimen diameter (100 mm), and the cylindrical specimen length (200 mm), respectively.

Based on ASTM C78 [17], the TPB (three-point bending) test was conducted. A load cell with a 100 kN capacity was used to measure the applied force. For the computation of flexural strength of beams Eq. (3) was used.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2b \cdot d^2} \quad (3)$$

Where σ_f , F , L , and b are the flexural strength, the applied force, the span length, the beam width, and the beam height, respectively.

3. RESULTS AND DISCUSSION

RCA had lower density, abrasion resistance, and higher water absorption, in comparison with NA. Increasing the initial strength of RCA increased the density and abrasion resistance and decreased the water absorption of these aggregates.

Replacing 30 vol. % OPC with RCP reduced the concrete workability by 13% and replacing 100 vol. % NA with RCA with initial strengths of 20, 40, and 80 MPa reduced the concrete workability by 38, 36, and 38%, respectively.

Mechanical properties of concrete were reduced due to the use of RCP. Using 15 vol. % of RCP caused a slight reduction and using 30 vol. % significantly reduced mechanical properties. Using 15 and 30 vol. % RCP reduced the compressive strength by 13 and 29%, the splitting tensile strength by 10 and 29%, and the flexural strength by 10 and 26%, respectively.

Using SF compensated the weakness of concrete containing RCP. The mechanical properties of concrete containing 30 vol. % of the combination of RCP and SF were approximately the same as the mechanical properties of concrete containing 100 vol. % of OPC. Using 30 vol. % combination of RCP and SF reduced 1, 5, and 2% in compressive, splitting tensile and flexural strengths, respectively.

Using RCA as an alternative to NA reduced the mechanical properties. Increasing the initial strength of the RCA partially compensated for this weakness. Using 100 vol. % RCA with initial strengths of 20, 40, and 80 MPa reduced the compressive strength by 27, 16, and 9%, splitting tensile strength by 24, 15, and 5%, and flexural strength by 27, 17, and 10%, respectively.

Economic analysis showed that using RCP as an alternative to OPC reduces the cost of mix designs and using RCA as an alternative to NA increases it. The lowest cost was related to the mix design containing 100 vol.% NA and 30 vol.% RCP

Table 1. Mix proportions.

Mix id	Binder (kg/m ³)			Fine aggregate (kg/m ³)	Coarse aggregate (kg/m ³)				Water (kg/m ³)
	OPC	RCP	SF		NA	RCA			
						20MP a	40MP a	80MP a	
R0	488	0	0	652	1024	0	0	0	205
R0-RCP15	414.8	60.2	0	652	1024	0	0	0	205
R0-RCP30	341.6	120.4	0	652	1024	0	0	0	205
R0-RCP15-SF15	341.6	60.2	52.2	652	1024	0	0	0	205
R50-C20	488	0	0	652	512	480	0	0	205
R50-C20-RCP15	414.8	60.2	0	652	512	480	0	0	205
R50-C20-RCP30	341.6	120.4	0	652	512	480	0	0	205
R50-C20-RCP15-SF15	341.6	60.2	52.2	652	512	480	0	0	205
R100-C20	488	0	0	652	0	960	0	0	205
R100-C20-RCP15	414.8	60.2	0	652	0	960	0	0	205
R100-C20-RCP30	341.6	120.4	0	652	0	960	0	0	205
R100-C20-RCP15-SF15	341.6	60.2	52.2	652	0	960	0	0	205
R50-C40	488	0	0	652	512	0	485	0	205
R50-C40-RCP15	414.8	60.2	0	652	512	0	485	0	205
R50-C40-RCP30	341.6	120.4	0	652	512	0	485	0	205
R50-C40-RCP15-SF15	341.6	60.2	52.2	652	512	0	485	0	205
R100-C40	488	0	0	652	0	0	970	0	205
R100-C40-RCP15	414.8	60.2	0	652	0	0	970	0	205
R100-C40-RCP30	341.6	120.4	0	652	0	0	970	0	205
R100-C40-RCP15-SF15	341.6	60.2	52.2	652	0	0	970	0	205
R50-C80	488	0	0	652	512	0	0	497	205
R50-C80-RCP15	414.8	60.2	0	652	512	0	0	497	205
R50-C80-RCP30	341.6	120.4	0	652	512	0	0	497	205
R50-C80-RCP15-SF15	341.6	60.2	52.2	652	512	0	0	497	205
R100-C80	488	0	0	652	0	0	0	994	205
R100-C80-RCP15	414.8	60.2	0	652	0	0	0	994	205
R100-C80-RCP30	341.6	120.4	0	652	0	0	0	994	205
R100-C80-RCP15-SF15	341.6	60.2	52.2	652	0	0	0	994	205

and the highest cost was related to the mix design containing 100 vol.% RCA, 15 vol.% RCP, and 15 vol.% SF. The difference between the most expensive and cheapest mix designs was 59%.

The results of the GWP calculation showed that this parameter is only affected by the binder used and the change in the type of aggregate causes a slight change in it. Replacing OPC with RCP was very effective in reducing GWP. Replacing 15 and 30 vol. % of OPC with RCP reduced GWP by 15 and 30%, respectively.

4. CONCLUSIONS

Multivariate optimization showed that the use of 15 and 30 vol. % RCP and SF and 50 vol. % RCA with initial strengths of 40 and 80 MPa is justifiable in terms of workability, mechanical properties, economic and environmental characteristics.

REFERENCES

- [1] J. De Brito, N. Saikia., Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste, Springer Science & Business Media. (2012).
- [2] US Geological Survey (2011) USGS mineral program cement report, United States Geological Survey.
- [3] H. Shima, H. Tateyashiki, R. Matsushashi, Y. Yoshida., An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis, Journal of advanced concrete technology. 3(1) (2005) 53-67.
- [4] C. Xue, A. Shen, Y. Guo, T. He., Utilization of Construction Waste Composite Powder Materials as Cementitious Materials in Small-Scale Prefabricated Concrete, Advances in Materials Science and Engineering. (2016).
- [5] E. Kwon, J. Ahn, B. Cho, D. Park., A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder, Construction and Building Materials. 83 (2015) 174-180.
- [6] Q. Liu, T. Tong, S. Liu, D. Yang, Q. Yu., Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement, Construction and Building Materials. 73 (2014) 754-763.
- [7] S. Ahmari, X. Ren, V. Toufigh, L. Zhang., Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash, Construction and Building Materials. 35 (2012) 718-

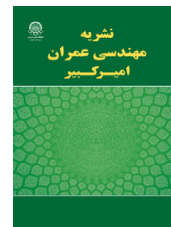
- 729.
- [8] M. Ahmadi, A. Hasani, M. Soleymani., Role of Recycled Steel Fibers from Tires on Concrete Containing Recycled Aggregate from Building Waste, *Concrete research journal*. 7 (2) (2014) 57-68. (In Persian)
- [9] N. D. Oikonomou., Recycled concrete aggregates, *Cem Concr Compos*. 27 (2) (2005) 315-318.
- [10] C.A. Carneiro, P.R.L. Lima, M.B. Leite, R.D.T. Filho., Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*. 46 (2017) 886-893.
- [11] R. Chan, X. Liu, I. Galobardes., Parametric study of functionally graded concretes incorporating steel fibers and recycled aggregates, *Construction and Building Materials*. 242 (2020) 118186.
- [12] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, S. Moazami Goodarzi., Assessment of mechanical properties of environmentally friendly concrete with emphasis on selection of optimal mix designs in terms of resistance and economy, *Amirkabir Journal of civil engineering*. (2020) 17920-671
- [13] ASTM C 39/C 39M-03 (2003). "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens."
- [14] ASTM C150 (2012). "Standard Specification for Portland Cement."
- [15] ASTM C 143/C 143M-15a (2015). "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete."
- [16] ASTM C 496/C 496M-11 (2011). "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens."
- [17] ASTM C78 (2010). "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)."

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Abdali Kia, F. Omidinasab, A. Sahraei Moghadam, *Replacement of OPC with RCP in Concrete Containing RCA (Investigation of Mechanical, Economic and Environmental Characteristics)*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(1) (2021) 25-28.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19255.7114](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19255.7114)





جایگزینی سیمان با پودر نخاله‌های بتنی در بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی (بررسی خصوصیات مکانیکی، اقتصادی و محیط زیستی)

مهدی ابدالی^۱، فریدون امیدوی نسب^{۱*}، امیرحسین صحرایی مقدم^۲

^۱ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

^۲ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۳

بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۰۵

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۳۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۲/۰۹

کلمات کلیدی:

سنگدانه‌های بازیافتی

پودر بازیافتی

خصوصیات مکانیکی

محیط زیست

بهینه‌یابی

خلاصه: در این تحقیق خصوصیات روانی، مکانیکی (مقاومت فشاری، کششی و خمشی)، اقتصادی و محیط زیستی نمونه‌های ساخته شده از ۲۸ طرح اختلاط مختلف بررسی شد. در این طرح‌های اختلاط ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درصد سیمان پرتلند معمولی (OPC) با پودر بازیافتی از نخاله‌های بتنی (RCP) و میکروسیلیس (SF) و ۵۰، ۰ و ۱۰ درصد سنگدانه‌های طبیعی (NA) با سنگدانه‌های بازیافتی از نخاله‌های بتنی (RCA) جایگزین شدند. نخاله‌های بتنی با مقاومت‌های اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال در تهیه RCA مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از RCA بعنوان جایگزین NA و RCP بعنوان جایگزین OPC بر خصوصیات روانی و مکانیکی تأثیر منفی و بر خصوصیات محیط زیستی و اقتصادی تأثیر مثبت دارد. بررسی نتایج نشان داد که تأثیر منفی ناشی از RCA با افزایش مقاومت اولیه نخاله‌های بتنی مورد استفاده در تولید آن و تأثیر منفی ناشی از RCP با استفاده از SF برطرف می‌گردد. در نهایت، با انجام بهینه‌یابی چند متغیره بین طرح‌های اختلاط این نتیجه حاصل شد که جایگزینی ۵۰ درصد از NA با RCA با مقاومت اولیه ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال و جایگزینی ۳۰ درصد از OPC با RCP و SF از لحاظ خصوصیات روانی، مکانیکی، اقتصادی و محیط زیستی توجیه دارد.

۱- مقدمه

جایگزین سیمان انجام شده است [۱]. در سالیان اخیر محققان به دنبال جایگزینی سیمان پرتلند معمولی (OPC^۱) با پودر حاصل از بازیافت نخاله‌های بتنی (RCP^۲) می‌باشند. در تولید سنگدانه‌های بازیافتی از نخاله‌های بتنی به جهت کسب کیفیت مطلوب‌تر اقدام به جداسازی ملات چسبیده به سطح این سنگدانه‌ها می‌شود. این پودر حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد کل منابع بازیافتی را تشکیل می‌دهد [۳]. تحقیقات متعددی در راستای جایگزینی بخشی از OPC با RCP در تولید بتن انجام گرفته است [۴-۷]. Ma و Wang [۸] در پژوهش خود RCP را در نسبت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد جایگزین سیمان OPC کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که خصوصیات مکانیکی بتن‌های ساخته شده با RCP در نسبت‌های جایگزینی

سیمان یکی از اساسی‌ترین اجزای تشکیل دهنده بتن به شمار می‌رود و به همین دلیل سالیانه حجم قابل توجهی از این ماده در دنیا تولید می‌شود [۱]. مطابق گزارش سازمان زمین شناسی آمریکا، در سال ۲۰۱۰ حدوداً ۳۳۰۰ میلیون تن سیمان در سراسر دنیا تولید شده است [۲]. اما این در حالی است که تولید سیمان مشکلات زیست محیطی فراوانی را به بار می‌آورد. کارخانه‌های تولید سیمان بعد از نیروگاه‌های تولید برق بیشترین گاز گلخانه‌ای را تولید می‌کنند. حدود ۷٪ دی اکسید کربن (CO₂) تولیدی سالیانه مربوط به فرآیند تولید سیمان می‌باشد، لذا کاهش آن یک مسأله جهانی است. در راستای رفع این مشکل، تحقیقات متعددی در مورد استفاده از مواد

1 Ordinary Portland cement

2 Recycled concrete powder

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات:omidinasab.f@lu.ac.ir



جدول ۱. طرح‌های اختلاط مورد استفاده در ساخت بتن‌های مادر.

Table 1. Mix proportions of parent concretes

مقاومت فشاری (MPa)	طرح اختلاط (kg/m^3)						عنوان
	فوق روان کننده	آب	درشت دانه	ریز دانه	میکروسیلیس	سیمان	
۲۱/۴	۰	۲۰۵	۱۰۲۴	۸۱۳	۰	۲۹۷	C20
۳۹/۶	۰	۲۰۵	۱۰۲۴	۶۵۲	۰	۴۸۸	C40
۸۲/۳	۱۳/۷۵	۱۵۴	۱۱۰۰	۶۲۳	۴۰	۵۱۰	C80

استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از RCA با مقاومت اولیه بالاتر می‌تواند موجب بهبود رفتار بتن‌های بازیافتی شود. در این تحقیق به بررسی رفتار بتن‌هایی پرداخته شد که در ساخت آن‌ها سنگدانه‌های بازیافت شده از نخاله‌های بتنی (RCA) جایگزین سنگدانه‌های طبیعی (NA) شده است. سه نوع بتن مادر با رده‌های مقاومتی ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال برای تولید RCA در نظر گرفته شد. علاوه بر این، پودر حاصل از بازیافت نخاله‌های بتنی (RCP) و همچنین ترکیب این پودر با میکروسیلیس (SF^3) بعنوان جایگزین سیمان پرتلند معمولی (OPC) بکار گرفته شد. نمونه‌های آزمایشگاهی این تحقیق از ۲۸ طرح اختلاط مختلف شامل جایگزینی ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد NA با RCA تولید شده از نخاله‌های بتنی با مقاومت اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال و همچنین جایگزینی ۰، ۱۵ و ۳۰ درصد OPC با RCP و SF ساخته شدند. در این تحقیق خصوصیات روانی، مکانیکی، اقتصادی و محیط زیستی این نمونه‌ها بررسی و در نهایت با استفاده از بهینه‌یابی چند متغیره طرح‌های اختلاط بهینه معرفی شدند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- تولید RCA

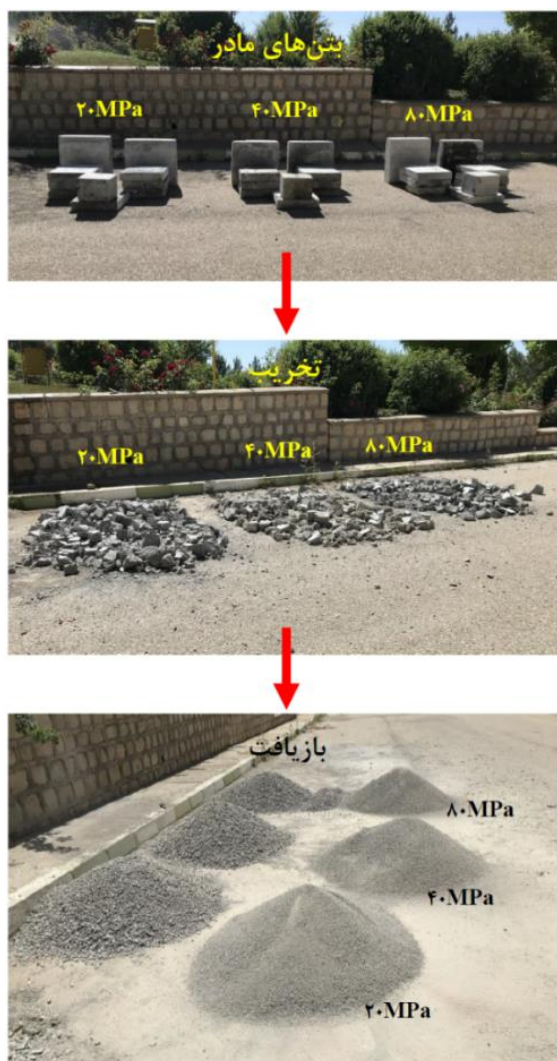
RCA مورد استفاده در ساخت نمونه‌های این تحقیق از بازیافت نخاله‌های بتنی بدست آمد. نخاله‌های بتنی نیز از تخریب بتن‌های مادر حاصل شدند. بتن‌های مادر با سه رده مقاومتی ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال برای تولید RCA ساخته شدند. سه طرح اختلاط نشان داده شده در جدول ۱ در تولید بتن‌های مادر مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا از هر کدام از طرح‌های اختلاط سه نمونه استوانه‌ای

کمتر از ۲۰ درصد تقریباً مشابه نمونه‌های ساخته شده با OPC می‌باشد، در صورتی که در جایگزینی‌های بیشتر از ۲۰ درصد، افت خصوصیات مکانیکی بتن گزارش شده است. در تحقیقی دیگر Kim و Choi [۹] با بررسی خصوصیات مکانیکی بتن‌های حاوی RCP بعنوان جایگزین بخشی از OPC، کاهش مقاومت بتن در اثر استفاده از RCP را گزارش کردند. در نتایج این تحقیق عنوان شد که میزان جایگزینی مجاز OPC با RCP حداکثر ۱۵ درصد می‌باشد.

در شهر تهران روزانه بیش از ۴۲ هزار تن نخاله ساختمانی تولید می‌شود. این حجم از نخاله‌های ساختمانی پیامدهای زیست محیطی نامطلوبی را به دنبال خواهد داشت. یکی از راهکارها برای مدیریت این‌گونه نخاله‌ها، بازیافت و استفاده مجدد از آن‌ها می‌باشد [۱۰]. از آن جایی که سالانه بخش قابل توجهی از منابع طبیعی برای تولید سنگدانه‌های مورد استفاده در ساخت بتن تخریب می‌شوند، بازیافت و استفاده مجدد از نخاله‌های بتنی علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست محیطی می‌تواند به حفظ منابع طبیعی نیز کمک نماید [۱۱]. در تحقیقات پیشین هر دو نوع تأثیر افزایشی و کاهش در مقاومت بتن در اثر استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی از نخاله‌های بتنی (RCA^1) بعنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی (NA^2) گزارش شده است [۱۲]. Chan و همکاران [۱۳] اثرات منفی استفاده از RCA و Moghadam و همکاران [۱۴] اثرات مثبت استفاده از این سنگدانه‌ها را گزارش کرده‌اند. یکی از دلایل رفتار متغیر بتن‌های حاوی RCA در تحقیقات پیشین می‌تواند مقاومت اولیه نخاله‌های بتنی مورد استفاده در ساخت RCA باشد. Afroughsabet و همکاران [۱۵] در تولید بتن بازیافتی از دو نوع RCA شامل RCA بازیافت شده از نخاله‌های بتنی با مقاومت اولیه ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال

1 Recycled concrete aggregate

2 Natural aggregate



شکل ۱. مراحل تولید RCA.
Fig. 1. RCA production process

۱۶، ۱۵ و ۱۲ درصد بدست آمد. بر اساس این نتایج می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که با افزایش مقاومت اولیه RCA، درصد ملات چسبیده به سطح آن‌ها کاهش می‌یابد. Pepe و همکاران [۱۸] گزارش کردند، میزان جذب آب RCA با مقدار ملات چسبیده به سطح آن‌ها رابطه مستقیم دارد. جذب آب NA و RCA بر اساس ASTM C125 [۱۹] محاسبه شد. میزان جذب آب برای NA، ۴/۳ درصد و برای RCA با مقاومت اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب ۹/۶، ۹/۱ و ۷/۵ درصد بدست آمد. افزایش جذب آب RCA نسبت به NA با توجه به ملات چسبیده به سطح این سنگدانه‌ها منطقی است. همچنین در این تحقیق با استفاده از دستگاه لس‌آنجلس مقاومت NA و RCA در مقابل سایش و ضربه تعیین و باهم مقایسه شد. این

استاندارد ساخته و در سن ۲۸ روز آزمایش مقاومت فشاری مطابق با ASTM C39 [۱۶] بر روی آن‌ها انجام شد. میانگین مقاومت فشاری برای هر کدام از طرح‌های اختلاط در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده تطابق خوب مقاومت فشاری نمونه‌ها با رده مقاومتی در نظر گرفته شده می‌باشد. پس از اطمینان از مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط در نظر گرفته شده، اقدام به ساخت بتن‌های مادر شد. پس از گذشت ۹۰ روز از ساخت بتن‌های مادر، اقدام به تخریب و بازیافت مجدد آن‌ها شد. مراحل تولید RCA در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲ - خصوصیات RCA

سنگدانه‌ها از اصلی‌ترین قسمت‌های تشکیل دهنده بتن می‌باشند که خصوصیات آن‌ها نقش بسزایی در رفتار بتن دارد. چگالی و جذب آب دو پارامتر مهم در بررسی خصوصیات سنگدانه‌ها هستند. این دو پارامتر برای NA و RCA محاسبه شدند. NA دارای وزن مخصوص $2/66 \text{ g/cm}^3$ و RCA با مقاومت‌های اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب دارای وزن مخصوص $2/49 \text{ g/cm}^3$ ، $2/52 \text{ g/cm}^3$ و $2/58 \text{ g/cm}^3$ بودند. این نتایج نشان دهنده آن است که وزن مخصوص RCA کمتر از وزن مخصوص NA می‌باشد. علاوه بر این، با توجه به چگالی‌های بدست آمده برای RCA این نتیجه حاصل می‌شود که هرچه مقاومت اولیه RCA بیشتر باشد، وزن مخصوص آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. وزن مخصوص RCA با مقاومت اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب $6/4$ ، $5/3$ و 3 درصد کمتر از چگالی NA بدست آمد. به جهت تعیین میزان ملات چسبیده به سطح RCA آیین نامه مشخصی وجود ندارد. چندین پیشنهاد برای بدست آوردن مقدار ملات چسبیده به سطح RCA وجود دارد که در این تحقیق از روش پیشنهادی Gutierrez و Sanchez [۱۷] استفاده شده است. بر مبنای این پیشنهاد نمونه‌ای از هر کدام از RCA به مدت ۲ ساعت در آب غوطه‌ور شدند. سپس به مدت ۲ ساعت در کوره با دمای 500°C خشک و سپس سریعاً در آب سرد قرار داده شدند. نمونه‌ها بعد از سرد شدن با استفاده از چکش لاستیکی به آرامی مالش داده شدند تا ملات چسبیده به سطح آن‌ها جدا شود. بعد از انجام مراحل فوق با گذراندن نمونه از الک شماره ۴ درصد وزنی ملات چسبیده به RCA با مقاومت اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب



شکل ۲. RCP مورد استفاده.

Fig. 2. Picture of RCP

۲ - ۴ - طرح‌های اختلاط و ساخت نمونه‌ها

در ساخت نمونه‌های این تحقیق ۲۸ طرح اختلاط مختلف بکار رفته است که جزئیات آن‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. متغیرهای این طرح‌های اختلاط شامل درصد جایگزینی NA با RCA (۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد)، مقاومت اولیه بتن‌های مادر در تولید RCA (۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال) و درصد جایگزینی OPC با RCP و SF (۰، ۱۵ و ۳۰ درصد) می‌باشد. نحوه نامگذاری نمونه‌ها به گونه‌ای است که عدد مقابل حرف R نشان دهنده درصد جایگزینی NA با RCA، عدد مقابل حرف C نشان دهنده مقاومت اولیه RCA و اعداد مقابل حروف RCP و SF به ترتیب نشان دهنده درصد جایگزینی OPC با RCP و SF می‌باشد. از هر کدام از ۲۸ طرح اختلاط مورد استفاده تعداد سه نمونه برای هر آزمایش ساخته شد. تصویری از نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق در شکل ۴ نشان داده شده است. نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در آب عمل آوری و سپس آزمایش شدند.

۳ - بررسی خصوصیات بتن‌های بازیافتی

۳ - ۱ - روانی

به منظور بررسی تأثیر نوع سنگدانه و مواد چسبنده مصرفی بر کارایی بتن، آزمایش اسلامپ بر اساس ASTM C143 [۲۲] انجام شد. نتایج این آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. منطبق بر نتایج مربوط به تحقیقات گذشته [۲۳]، در این تحقیق نیز نتایج

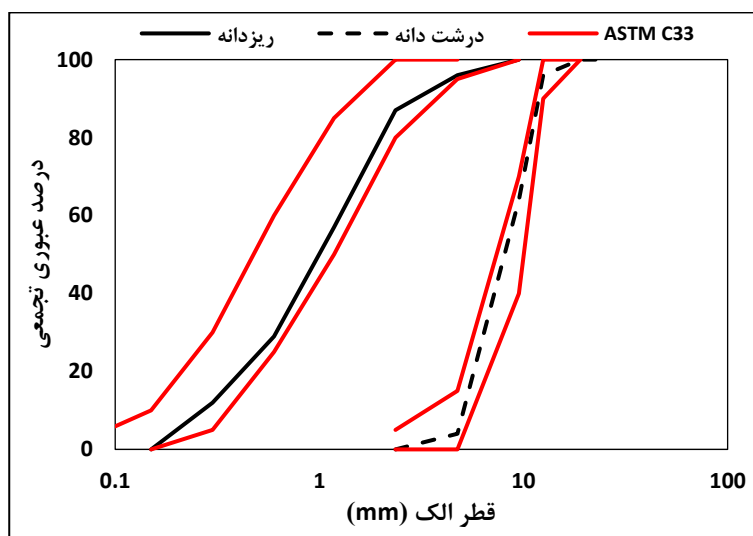
آزمایش بر اساس ASTM C131 [۲۰] انجام شد. میزان سائیدگی برای NA، ۲۲/۷ درصد و برای RCA با مقاومت اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب ۲۹/۸، ۲۷/۴ و ۲۳/۱ درصد بدست آمد. این نتیجه بیانگر آن است که RCA در مقابل سائیدگی مقاومت کمتری را نسبت به NA از خود نشان داده است که با توجه به ساختار متخلخل RCA و ملات چسبیده به سطح آن‌ها، این نتیجه منطقی است. البته توجه به این نکته بسیار حائز اهمیت است که با افزایش مقاومت اولیه RCA، مقاومت آن‌ها در مقابل سائیدگی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

۲ - ۳ - مصالح

در ساخت نمونه‌های این تحقیق از OPC بر اساس ASTM C150 [۲۱] استفاده شد. در طرح‌های اختلاط این تحقیق بخشی از OPC با RCP، SF و ترکیب این دو جایگزین شد. RCP از بازیافت نخاله‌های بتنی بدست آمد. تصویری از RCP مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی OPC و RCP مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است. در ساخت نمونه‌ها ۴ نوع مصالح سنگی شامل ۱ نوع NA و ۳ نوع RCA با مقاومت‌های اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال استفاده شد. مشخصات این سنگدانه‌ها در بخش قبلی بیان شد. این سنگدانه‌ها با دانه بندی یکسانی مطابق شکل ۳ آماده شدند.

جدول ۲. مشخصات OPC، RCP و SF.
Table 2. Properties of OPC, RPC, and SF

SF	RCP	OPC	ترکیبات شیمیایی
۸۶/۲	۵۸/۵	۲۱/۱	SiO ₂ (%)
۱/۴۵	۱۰/۳	۴/۳۷	(%)Al ₂ O ₃
۰/۲	۴/۶	۳/۸۸	(%)Fe ₂ O ₃
۱/۳	۱/۵۲	۱/۵۶	MgO (%)
۰/۲	۰/۶	۰/۵۲	(%)K ₂ O
۰/۱۵	۰/۱	۰/۳۹	(%)Na ₂ O
۳	۱۱/۸	۶۳/۳۳	CaO (%)
-		۵۱	(%)C ₃ S
-		۲۲/۷	(%)C ₂ S
-		۵/۱	(%)C ₃ A
-		۱۱/۹	(%)C ₄ AF
SF	RCP	OPC	خصوصیات فیزیکی
۲/۲۱	۲/۵۵	۳/۱	وزن مخصوص (g/cm ³)
۱۴۰۰۰	۱۱۲۵	۳۰۰۰	سطح مخصوص (/gcm ²)



شکل ۳. نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌ها.
Fig. 3. Particle size distribution curves for aggregates

۲۰ مگاپاسکال موجب کاهش اسلامپ از ۱۲ سانتی‌متر در طرح مرجع (R0) به ترتیب تا ۹/۵ و ۷/۴ سانتی‌متر شد. این نتایج نشان دهنده‌ی آن است که ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال به ترتیب موجب کاهش ۲۱ و ۳۸ درصدی روانی شده است. این در صورتی است که استفاده از همین مقدار RCA با مقاومت اولیه ۴۰

آزمایش اسلامپ نشان دهنده‌ی تأثیر منفی RCA بر روانی بتن بود. با توجه به جذب آب بالای RCA در مقایسه با NA، این تأثیر منفی منطقی بنظر می‌رسد. از طرفی بررسی نتایج نشان داد که تغییر در مقاومت اولیه RCA تأثیری در روانی بتن‌های حاوی این سنگدانه‌ها ندارد. استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه

جدول ۳. طرح‌های اختلاط.

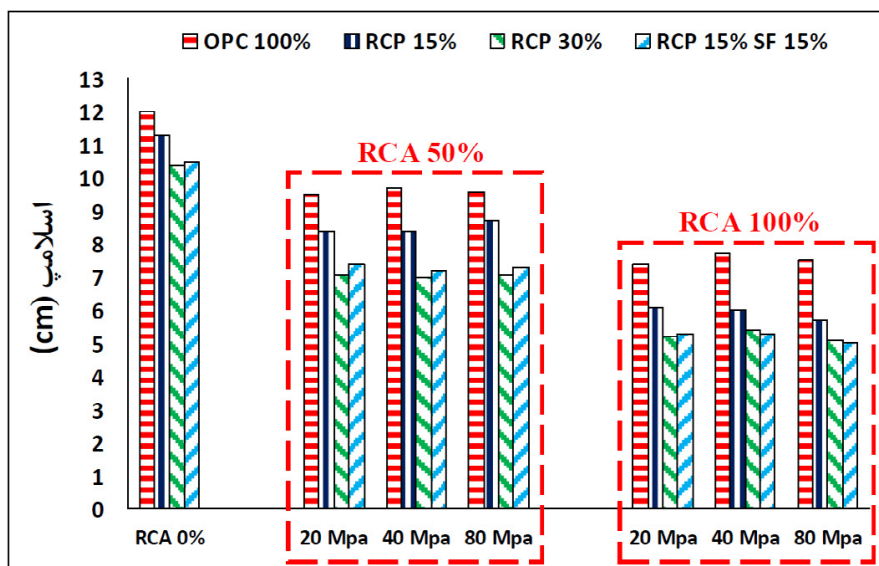
Table 3. Mix proportions

آب (kg/m ³)	درشت دانه (kg/m ³)				ریزدانه (kg/m ³)	ماده چسبنده (kg/m ³)			عنوان طرح
	RCA			NA		SF	RCP	OPC	
	۸۰ MPa	۴۰ MPa	۲۰ MPa						
۲۰۵	.	.	.	۱۰۲۴	۶۵۲	.	.	۴۸۸	R0
۲۰۵	.	.	.	۱۰۲۴	۶۵۲	.	۶۰/۲	۴۱۴/۸	R0-RCP15
۲۰۵	.	.	.	۱۰۲۴	۶۵۲	.	۱۲۰/۴	۳۴۱/۶	R0-RCP30
۲۰۵	.	.	.	۱۰۲۴	۶۵۲	۵۲/۲	۶۰/۲	۳۴۱/۶	R0-RCP15-SF15
۲۰۵	.	.	۴۸۰	۵۱۲	۶۵۲	.	.	۴۸۸	R50-C20
۲۰۵	.	.	۴۸۰	۵۱۲	۶۵۲	.	۶۰/۲	۴۱۴/۸	R50-C20-RCP15
۲۰۵	.	.	۴۸۰	۵۱۲	۶۵۲	.	۱۲۰/۴	۳۴۱/۶	R50-C20-RCP30
۲۰۵	.	.	۴۸۰	۵۱۲	۶۵۲	۵۲/۲	۶۰/۲	۳۴۱/۶	R50-C20-RCP15-SF15
۲۰۵	.	.	۹۶۰	.	۶۵۲	.	.	۴۸۸	R100-C20
۲۰۵	.	.	۹۶۰	.	۶۵۲	.	۶۰/۲	۴۱۴/۸	R100-C20-RCP15
۲۰۵	.	.	۹۶۰	.	۶۵۲	.	۱۲۰/۴	۳۴۱/۶	R100-C20-RCP30
۲۰۵	.	.	۹۶۰	.	۶۵۲	۵۲/۲	۶۰/۲	۳۴۱/۶	R100-C20-RCP15-SF15
۲۰۵	.	۴۸۵	.	۵۱۲	۶۵۲	.	.	۴۸۸	R50-C40
۲۰۵	.	۴۸۵	.	۵۱۲	۶۵۲	.	۶۰/۲	۴۱۴/۸	R50-C40-RCP15
۲۰۵	.	۴۸۵	.	۵۱۲	۶۵۲	.	۱۲۰/۴	۳۴۱/۶	R50-C40-RCP30
۲۰۵	.	۴۸۵	.	۵۱۲	۶۵۲	۵۲/۲	۶۰/۲	۳۴۱/۶	R50-C40-RCP15-SF15
۲۰۵	.	۹۷۰	.	.	۶۵۲	.	.	۴۸۸	R100-C40
۲۰۵	.	۹۷۰	.	.	۶۵۲	.	۶۰/۲	۴۱۴/۸	R100-C40-RCP15
۲۰۵	.	۹۷۰	.	.	۶۵۲	.	۱۲۰/۴	۳۴۱/۶	R100-C40-RCP30
۲۰۵	.	۹۷۰	.	.	۶۵۲	۵۲/۲	۶۰/۲	۳۴۱/۶	R100-C40-RCP15-SF15
۲۰۵	۴۹۷	.	.	۵۱۲	۶۵۲	.	.	۴۸۸	R50-C80
۲۰۵	۴۹۷	.	.	۵۱۲	۶۵۲	.	۶۰/۲	۴۱۴/۸	R50-C80-RCP15
۲۰۵	۴۹۷	.	.	۵۱۲	۶۵۲	.	۱۲۰/۴	۳۴۱/۶	R50-C80-RCP30
۲۰۵	۴۹۷	.	.	۵۱۲	۶۵۲	۵۲/۲	۶۰/۲	۳۴۱/۶	R50-C80-RCP15-SF15
۲۰۵	۹۹۴	.	.	.	۶۵۲	.	.	۴۸۸	R100-C80
۲۰۵	۹۹۴	.	.	.	۶۵۲	.	۶۰/۲	۴۱۴/۸	R100-C80-RCP15
۲۰۵	۹۹۴	.	.	.	۶۵۲	.	۱۲۰/۴	۳۴۱/۶	R100-C80-RCP30
۲۰۵	۹۹۴	.	.	.	۶۵۲	۵۲/۲	۶۰/۲	۳۴۱/۶	R100-C80-RCP15-SF15



شکل ۴. تصویری از نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق.

Fig. 4. Picture of specimens made in this study

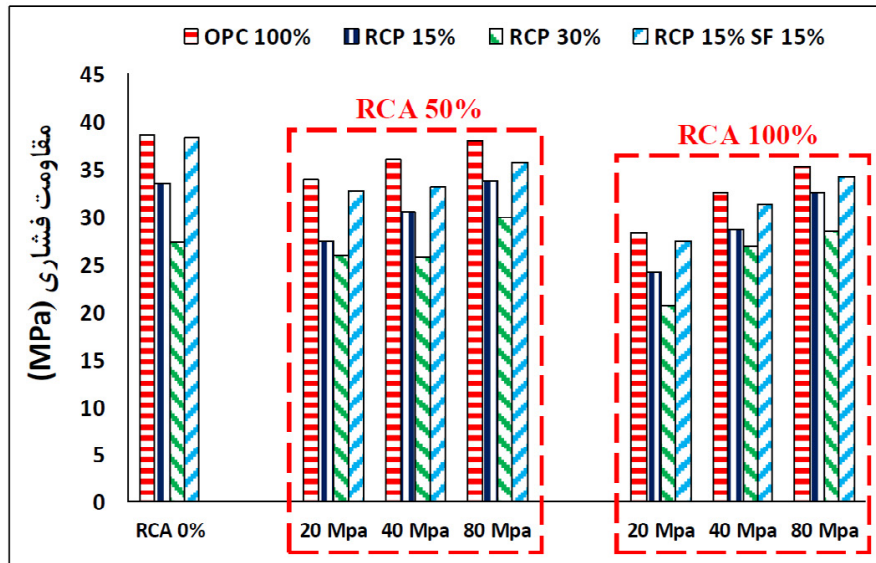


شکل ۵. نتایج آزمایش اسلامپ.

Fig. 5. The results of slump test

اختلاط اعم از طرح‌های حاوی NA و RCA مشاهده شد. جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصد OPC با RCP موجب کاهش ۶ و ۱۳ درصدی روانی در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد NA شد. استفاده از همین مقدار RCP در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال موجب کاهش ۱۸ و ۳۰ درصدی روانی، در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۴۰ مگاپاسکال موجب کاهش ۲۲ و ۳۰ درصدی روانی و در طرح اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال موجب کاهش ۲۴ و ۳۲

مگاپاسکال موجب کاهش ۱۹ و ۳۶ درصدی روانی و استفاده از همین مقدار RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال موجب کاهش ۲۰ و ۳۸ درصدی روانی شده است. این نتایج نشان دهنده تأثیر منفی RCA و عدم تأثیر مقاومت اولیه آن بر روانی بتن می‌باشد. از طرفی، با مقایسه نتایج برای طرح‌های اختلاط حاوی OPC و RCP شاهد کاهش روانی ایجاد شده در اثر استفاده از RCP بودیم. هرچه میزان استفاده از RCP افزایش می‌یابد، افت روانی بتن تشدید می‌شود. کاهش روانی ایجاد شده در اثر استفاده از RCP در تمام طرح‌های



شکل ۶. نتایج آزمایش مقاومت فشاری.

Fig. 6. The results of compressive strength test

درصدی روانی شد. این نتایج بیان کننده‌ی آن است که تأثیر منفی RCP بر روانی بتن در طرح‌های اختلاط حاوی RCA قابل توجه‌تر بوده است. همان‌طور که از نتایج مشخص می‌باشد، استفاده از SF نیز موجب کاهش روانی بتن می‌شود و تقریباً عملکردی مانند RCP در این زمینه دارد. در تحقیقات گذشته نیز اثرات منفی RCP [۹] و SF [۲۴] گزارش شده است. Liv و همکاران [۲۵] بیان کردند که RCP به علت وجود منافذ ریز در سطح خود موجب جذب آب آزاد بتن و کاهش روانی می‌شود.

نتایج نشان داده شده در این شکل مشخص است، RCA در سه میزان ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد جایگزین NA شده است. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که استفاده از RCA موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. یکی از عوامل تأثیرگذار در مقاومت فشاری نمونه‌های این تحقیق، مقاومت اولیه RCA می‌باشد. هرچه میزان مقاومت اولیه نخاله‌های بتنی مورد استفاده در تولید RCA افزایش می‌یابد، افت مقاومت بتن‌های بازیافتی در مقایسه با بتن مرجع تقلیل می‌یابد. مقاومت فشاری نمونه مرجع (نمونه حاوی ۱۰۰ درصد NA و ۱۰۰ درصد OPC) ۳۸/۵ مگاپاسکال بدست آمد. استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال موجب کاهش این مقاومت به ترتیب تا ۳۳/۹ و ۲۸/۲ مگاپاسکال شده است. این در صورتی است که استفاده از همین مقدار RCA با مقاومت اولیه ۴۰ مگاپاسکال موجب کاهش مقاومت فشاری تا ۳۶ و ۳۲/۵ مگاپاسکال و استفاده از همین مقدار RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال موجب کاهش آن تا ۳۷/۹ و ۳۵/۲ مگاپاسکال شده است. این نتایج نشان دهنده‌ی نقش قابل توجه مقاومت اولیه RCA در مقاومت فشاری بتن‌های بازیافتی می‌باشد. بطوری که استفاده از ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال کاهش ۲۷ درصدی را در مقاومت فشاری ایجاد نمود که با افزایش مقاومت اولیه RCA به ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال این کاهش مقاومت به ترتیب تا ۱۶ و ۹ درصد تقلیل یافت. اکثر تحقیقات پیشین نیز کاهش مقاومت فشاری بتن در اثر استفاده

درصدی روانی شد. این نتایج بیان کننده‌ی آن است که تأثیر منفی RCP بر روانی بتن در طرح‌های اختلاط حاوی RCA قابل توجه‌تر بوده است. همان‌طور که از نتایج مشخص می‌باشد، استفاده از SF نیز موجب کاهش روانی بتن می‌شود و تقریباً عملکردی مانند RCP در این زمینه دارد. در تحقیقات گذشته نیز اثرات منفی RCP [۹] و SF [۲۴] گزارش شده است. Liv و همکاران [۲۵] بیان کردند که RCP به علت وجود منافذ ریز در سطح خود موجب جذب آب آزاد بتن و کاهش روانی می‌شود.

۳-۲ - مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس ASTM C39 [۱۶] بر روی نمونه‌های مکعبی با ضلع ۱۰۰ mm با سرعت بارگذاری MPa/sec ۰/۳ انجام شد. در این آزمایش از یک دستگاه جک آزمایش فشاری دیجیتال با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلونیوتن استفاده شد. مقاومت فشاری بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

در این رابطه، σ_c مقاومت فشاری، P حداکثر نیروی فشاری تحمل شده توسط نمونه و A سطح مقطع نمونه می‌باشد. نتایج این آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طوری که در

مقاومت ۲۵ درصدی را در اثر جایگزینی ۴۰ درصد از OPC با RCP گزارش کردند.

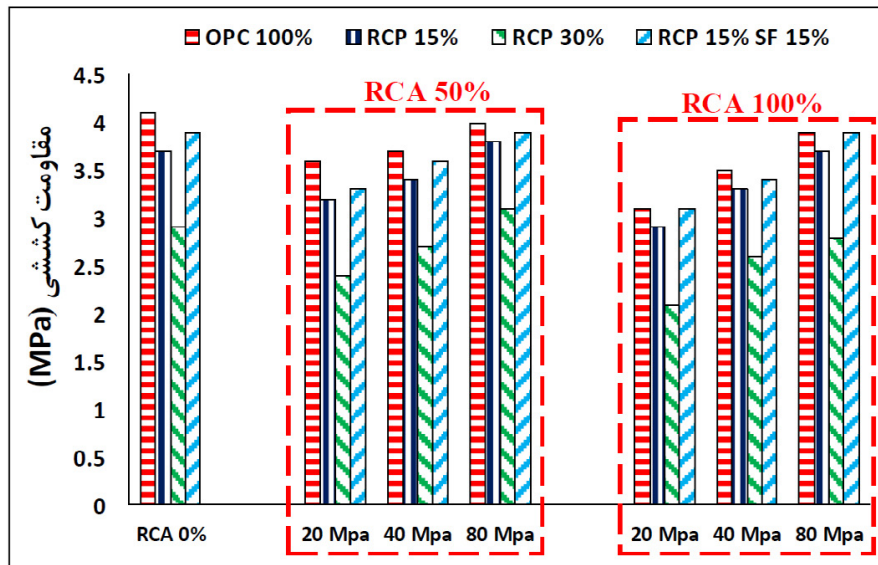
۳ - ۳ - مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی بر اساس ASTM C496 [۳۰] بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ mm و ارتفاع ۲۰۰ mm با سرعت بارگذاری ۰/۰۵ MPa/s انجام شد. مقاومت کششی نمونه‌ها بر اساس رابطه (۲) محاسبه شد.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (2)$$

در این رابطه، σ_t مقاومت کششی، P نیروی اعمال شده، D قطر نمونه استوانه‌ای و L طول نمونه استوانه‌ای می‌باشد. نتایج مربوط به آزمایش مقاومت کششی در شکل ۷ نشان داده شده است. مقاومت کششی نمونه مرجع (حاوی ۱۰۰ درصد NA و ۱۰۰ درصد OPC) برابر ۴/۱ مگاپاسکال بدست آمد. نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی OPC با RCP موجب کاهش مقاومت کششی نمونه‌ها شده است. جایگزینی ۱۵ درصدی OPC با RCP موجب کاهش جزئی و جایگزینی ۳۰ درصدی آن موجب کاهش قابل توجه مقاومت کششی شد. جایگزینی ۱۵ درصدی OPC با RCP در نمونه حاوی ۱۰۰ درصد NA موجب کاهش مقاومت کششی از ۴/۱ مگاپاسکال به ۳/۷ مگاپاسکال (کاهش ۱۰ درصدی) و افزایش این جایگزینی به ۳۰ درصد موجب کاهش آن تا ۲/۹ مگاپاسکال (کاهش ۲۹ درصدی) شد. کاهش مقاومت ناشی از RCP در نمونه‌های حاوی RCA نیز مشاهده شد. جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصدی OPC با RCP در نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت‌های اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب موجب کاهش ۷ و ۳۰ درصدی، ۶ و ۲۶ درصدی و ۵ و ۲۸ درصدی مقاومت کششی شد. این نتایج نشان دهنده آن است که در نمونه‌های حاوی RCA نیز استفاده از ۱۵ درصد RCP موجب کاهش جزئی و استفاده از ۳۰ درصد RCP موجب قابل توجه مقاومت مقاومت کششی شده است. Kim [۳۱] در نتایج تحقیق خود بیان کرد که بتن‌های حاوی ۱۵ تا ۴۵ درصد RCP با افت ۱۰ تا ۴۰ درصدی مقاومت کششی مواجه می‌شوند. همان‌طوری که از نتایج نشان داده شده در شکل ۷ مشخص است، استفاده از ۱۵ درصد

از RCA را گزارش کرده‌اند [۲۶]. با این حال، در برخی تحقیقات مقاومت فشاری برابر [۲۷] و حتی در برخی دیگر مقاومت فشاری بالاتر بتن‌های حاوی RCA در مقایسه با بتن‌های حاوی NA گزارش شده است [۲۸]. بنظر می‌رسد یکی از دلایل رفتار متغیر بتن‌های بازیافتی در گذشته تأثیر مقاومت اولیه RCA مورد استفاده می‌باشد. از دیگر عوامل تأثیرگذار در مقاومت فشاری نمونه‌های این تحقیق جایگزینی OPC با RCP و SF می‌باشد. همان‌طوری که از نمودار نشان دهنده نتایج این آزمایش مشخص می‌باشد، جایگزینی OPC با RCP موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. جایگزینی ۱۵ درصدی OPC با RCP موجب کاهش جزئی مقاومت فشاری شده است، در صورتی که با افزایش این جایگزینی تا ۳۰ درصد، مقاومت فشاری به میزان چشمگیری کاهش یافته است. در نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد NA جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصدی OPC با RCP به ترتیب موجب کاهش ۱۳ و ۲۹ درصدی مقاومت فشاری شده است. استفاده از همین مقدار RCP در نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال موجب کاهش ۱۵ و ۲۷ درصدی، در نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۴۰ مگاپاسکال موجب کاهش ۱۲ و ۱۸ درصدی و در نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال موجب کاهش ۸ و ۱۹ درصدی مقاومت فشاری شده است. از طرفی، نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ترکیب RCP و SF نشان دهنده آن است که استفاده از SF می‌تواند تا میزان قابل توجهی ضعف حاصل از RCP را برطرف نماید. نمونه‌های حاوی ترکیب RCP و SF کاهش مقاومت اندکی را در مقایسه با نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد OPC از خود نشان دادند. بطوری که استفاده از ترکیب RCP و SF در نمونه حاوی ۱۰۰ درصد NA موجب کاهش ۱ درصدی و در نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب موجب کاهش ۳، ۴ و ۳ درصدی مقاومت فشاری شد. این نتایج بیان کننده آن است که استفاده از SF یکی از راه‌های مؤثر در کاهش اثرات منفی RCP بر مقاومت فشاری می‌باشد. در مطالعات پیشین نیز کاهش مقاومت فشاری بتن در اثر جایگزینی OPC با RCP گزارش شده است. Moon و همکاران [۲۹] در پژوهش خود کاهش مقاومت ۳۰ درصدی را در اثر جایگزینی ۳۰ درصد OPC با RCP گزارش کردند، در صورتی که Ma و Wang [۸] کاهش



شکل ۷. نتایج آزمایش مقاومت کششی.

Fig. 7. The results of splitting tensile strength test

مقاومت کششی بتن را در اثر جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد NA با RCA گزارش کردند.

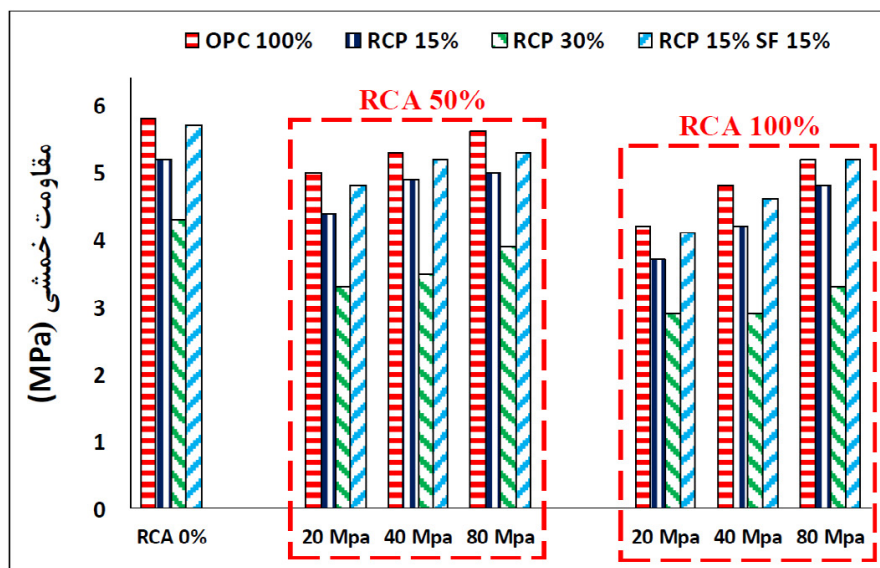
۳ - ۴ - مقاومت خمشی

آزمایش خمش سه نقطه‌ای (اعمال یک بار متمرکز در وسط دهانه) مطابق با ASTM C78 [۳۴] بر روی تیرهای بتنی با طول ۳۲۰، عرض ۶۰ و ارتفاع ۸۰ میلی متر انجام شد. مقاومت خمشی تیرها بر اساس رابطه (۳) محاسبه شد.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2b.d^2} \quad (3)$$

در این رابطه، σ_f مقاومت خمشی، F نیروی خمشی اعمال شده، L طول دهانه تیر (۲۴۰ mm)، b عرض تیر و h ارتفاع تیر می‌باشد. نتایج مربوط به آزمایش مقاومت خمشی در شکل ۸ نشان داده شده است. مشابه نتایج آزمایش مقاومت کششی، در این آزمایش نیز شاهد آن بودیم که جایگزینی OPC با RCP موجب کاهش مقاومت خمشی تیرهای بتنی شده است. از طرفی افزودن SF می‌تواند تا حدودی از این کاهش مقاومت جلوگیری بعمل آورد. استفاده از ۱۵ درصد RCP بعنوان جایگزین OPC مقاومت خمشی را از ۵/۸ مگاپاسکال در نمونه مرجع به ۵/۲ مگاپاسکال کاهش داد. با افزایش میزان جایگزینی OPC با RCP به ۳۰ درصد، مقاومت خمشی به ۴/۳ مگاپاسکال کاهش یافت. بنابراین استفاده ۱۵ درصدی

SF توانسته بخش قابل توجهی از افت مقاومت ناشی از RCP را جبران نماید. بطوری که مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد RCP و ۱۵ درصد SF تقریباً برابر با مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد OPC بدست آمد. بنابراین یکی از راه‌های جبران کاهش مقاومت کششی ناشی از RCP استفاده از SF می‌باشد. Mastali و Dalvand [۳۲] در تحقیقی افزایش ۱۲ و ۱۸ درصدی مقاومت کششی را به ترتیب در اثر جایگزینی ۷ و ۱۴ درصدی OPC با SF گزارش کردند. از طرفی، با مقایسه نمونه‌های حاوی RCA و NA، شاهد تأثیر منفی RCA بر مقاومت کششی نمونه‌ها بودیم. نتایج نشان داد که این تأثیر منفی با افزایش مقاومت اولیه RCA تقلیل می‌یابد. جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصدی NA با RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال مقاومت کششی را نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۱۲ و ۲۴ درصد کاهش داد. این میزان کاهش برای مقادیر مشابه RCA با مقاومت اولیه ۴۰ مگاپاسکال به ترتیب تا ۱۰ و ۱۵ درصد و برای مقادیر مشابه RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب تا ۲ و ۵ درصد رسید. این نتایج نشان دهنده آن است که با افزایش مقاومت اولیه RCA می‌توان تا حدودی افت مقاومت کششی ناشی از آن را جبران نمود. بطوری که مقاومت کششی نمونه‌های حاوی RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال تقریباً مشابه مقاومت کششی نمونه مرجع بدست آمد. در تحقیقات گذشته نیز نتایج مشابه‌ای حاصل شده است. Vagih و همکاران [۳۳] کاهش ۱۴ و ۲۳ درصدی



شکل ۸. نتایج آزمایش مقاومت خمشی.

Fig. 8. The results of flexural strength test

از ۴/۲ مگاپاسکال شد. بنابراین استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال به ترتیب موجب کاهش ۱۴ و ۲۷ درصدی مقاومت خمشی شده است. در صورتی که استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۴۰ مگاپاسکال به ترتیب موجب کاهش ۹ و ۱۷ درصدی و استفاده از همین مقدار RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال موجب کاهش ۳ و ۱۰ درصدی مقاومت خمشی شده است. این نتایج نشان دهنده تأثیر مثبت افزایش مقاومت اولیه RCA بر مقاومت خمشی تیرهای بتنی می‌باشد. در تحقیقات گذشته نیز، همسو با نتایج این تحقیق، تأثیر منفی RCA بر مقاومت خمشی تیرهای بتنی گزارش شده است [۳۷].

۴ - تجزیه و تحلیل اقتصادی

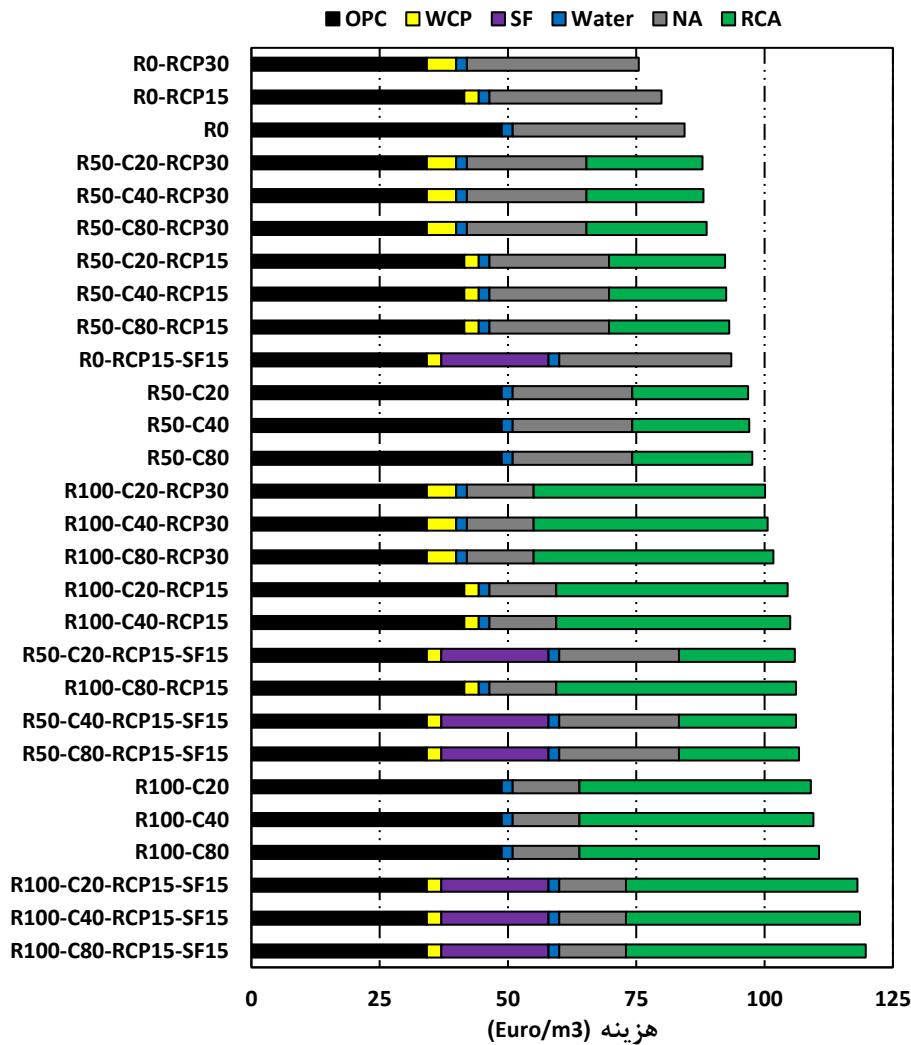
هزینه مربوط به اجزاء تشکیل دهنده طرح‌های اختلاط در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به هزینه اجزاء، هزینه مربوط به ساخت تمام طرح‌های اختلاط محاسبه شد. در شکل ۹ هزینه مربوط به ساخت یک متر مکعب از تمام طرح‌های اختلاط به ترتیب صعودی نشان داده شده است. هزینه مربوط به طرح اختلاط مرجع (R0)، $84/4 \text{ Euro/m}^3$ بدست آمد. جایگزینی OPC با RCP موجب کاهش هزینه ساخت طرح‌های اختلاط شد. کمترین هزینه در بین طرح‌های اختلاط مورد استفاده را طرح حاوی ۳۰ درصد RCP و ۱۰۰ درصد NA با هزینه $75/5 \text{ Euro/m}^3$ به خود اختصاص داد.

از RCP موجب کاهش ۱۰ درصدی و استفاده ۳۰ درصدی از آن موجب کاهش ۲۶ درصدی مقاومت خمشی شده است. این نتایج نشان دهنده آن است که کاهش مقاومت خمشی ناشی از جایگزینی ۱۵ درصدی OPC با RCP جزئی و کاهش مقاومت ناشی از جایگزینی ۳۰ درصدی آن قابل توجه می‌باشد. Zhu و همکاران [۳۵] کاهش ۱۷ و ۱۹ درصدی مقاومت خمشی را به ترتیب در اثر جایگزینی ۱۸ و ۲۷ درصد OPC با RCP گزارش کردند. با بررسی نتایج نمونه‌های حاوی SF شاهد آن هستیم که استفاده از این ماده توانسته است افت مقاومت ناشی از RCP را تا حدودی جبران نماید. بطوری که مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد RCP و ۱۵ درصد SF بعنوان جایگزین ۳۰ درصد از OPC تقریباً مشابه با نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد OPC بدست آمده است. تأثیر مثبت استفاده از SF بر مقاومت خمشی در تحقیقات متعددی در گذشته نیز گزارش شده است [۳۲ و ۳۶]. از طرفی، جایگزینی NA با RCA موجب کاهش مقاومت خمشی تیرهای بتنی شد. با افزایش درصد جایگزینی NA با RCA کاهش مقاومت خمشی تیرها تشدید شد. این در صورتی است که با افزایش مقاومت اولیه RCA شاهد تقلیل افت مقاومت ناشی از آن بودیم. استفاده از ۵۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۲۰ مگاپاسکال موجب کاهش مقاومت خمشی از ۵/۸ مگاپاسکال در تیر بتنی مرجع تا ۵ مگاپاسکال شد. در صورتی که افزایش میزان استفاده از این نوع RCA به ۱۰۰ درصد موجب کاهش مقاومت خمشی تا

جدول ۴. هزینه اجزاء تشکیل دهنده‌ی طرح‌های اختلاط (Euro/kg) [۳۸ و ۳۹].

Table 4. Cost of each component of the mixtures (Euro/kg)

RCA	NA	آب	SF	RCP	OPC
۰/۰۴۷	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۴	۰/۰۴۷	۰/۱



شکل ۹. هزینه ساخت طرح‌های اختلاط به ترتیب صعودی.

Fig. 9. Cost of producing mixing design in this study

۵ - گرمایش جهانی

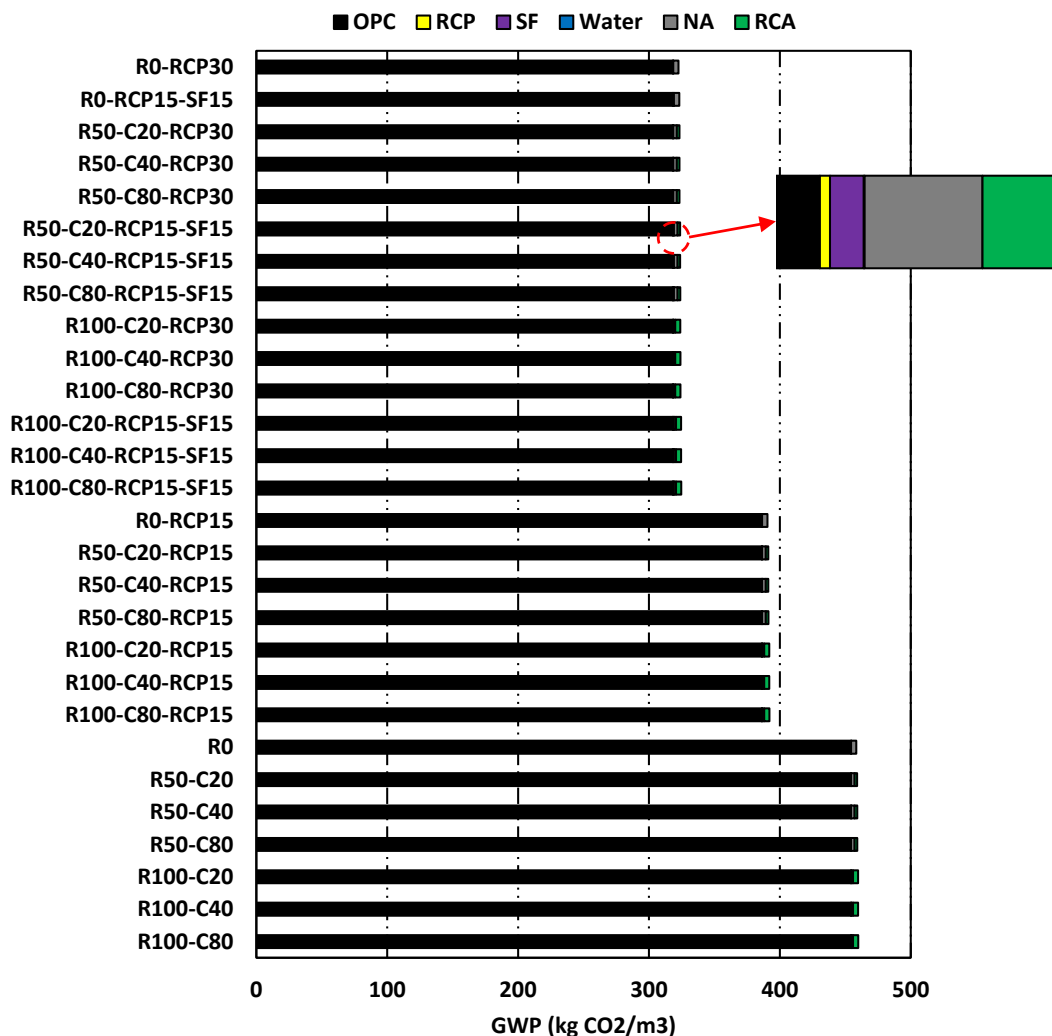
گازهای گلخانه‌ای (GHG^۱) گرما را در جو زمین محبوس می‌کنند. در این تحقیق، به جهت محاسبه میزان GHG تولیدی در هر طرح اختلاط، پتانسیل گرمایش جهانی (GWP^۲) بر اساس پایگاه داده EcoInvent [۴۰] محاسبه شد. میزان GWP برای

این در صورتی است که استفاده از SF و RCA موجب افزایش هزینه ساخت طرح‌های اختلاط شد. بیشترین هزینه مربوط به طرح حاوی ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۸۰ مگاپاسکال، ۱۵ درصد RCP و ۱۵ درصد SF با هزینه ۱۱۹/۷ Euro/m^۳ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد میان ارزانه‌ترین تا گرانترین طرح اختلاط بکار رفته در این تحقیق حدوداً ۵۹ درصد اختلاف می‌باشد.

1 Greenhouse gases
2 Global warming potential

جدول ۵. GWP اجزاء تشکیل دهنده طرح‌های اختلاط (CO₂ kg eq) [۴۰ و ۴۴].
 Table 5. Global warming potential (GWP) of each component of the mixtures (kg eq).

RCA	NA	آب	SF	RCP	OPC
۰/۰۰۴	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۵	۰/۰۰۴	۰/۹۳۱



شکل ۱۰. GWP طرح‌های اختلاط به ترتیب صعودی.

Fig. 10. GWP for each mixing design

در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طوری که از نتایج مشخص است، مقدار OPC مورد استفاده در ساخت بتن بیشترین تأثیر را در میزان GWP دارد. بیشترین میزان GWP مربوط به طرح‌های اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد OPC و کمترین میزان GWP مربوط به طرح‌های اختلاط حاوی ۷۰ درصد OPC و ۳۰ درصد RCP و SF می‌باشد. حذف ۱۵ و ۳۰ درصد از OPC در ساخت بتن به ترتیب موجب کاهش تقریباً ۱۵ و ۳۰ درصدی GWP شده است. بنابراین،

اجزاء تشکیل دهنده‌ی طرح‌های اختلاط در جدول ۵ نشان داده است. مطالعات اخیر نشان داده GWP بتن عمدتاً به نوع مواد چسبنده آن بستگی دارد [۴۱]. بر اساس آمار منتشر شده حدود ۳ درصد از GHG تولیدی در سراسر دنیا مربوط به سیمان می‌باشد [۴۲]. بنابراین، بررسی این پدیده در بتن‌های حاوی مواد جایگزین سیمان ضروری بنظر می‌رسد [۴۳]. میزان GWP برای یک متر مکعب از تمام طرح‌های اختلاط مورد استفاده محاسبه و به ترتیب صعودی

که در آن، d_j مقدار تابع مطلوبیت، Y_j پاسخ و $\min f_j$ و $\max f_j$ به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار بین پاسخ‌های مربوط به معیار j^{th} می‌باشد. توان t_j پارامتر وزنی برای معیار j^{th} است. این پارامتر نشان دهنده‌ی اهمیت معیار مورد نظر است. از آنجایی که معیارهای این تحقیق دارای اهمیت یکسانی می‌باشند، پارامتر وزنی برای تمامی آن‌ها مساوی ۱ در نظر گرفته شد [۴۸]. تابع مطلوبیت برای معیارهایی مانند روانی و خصوصیات مکانیکی که حد بالای آن مطلوب می‌باشد، با استفاده از رابطه (۴) و برای معیارهایی مانند هزینه و GWP که حد پایین آن مطلوب می‌باشد، با استفاده از رابطه (۵) بدست آمد. سپس، تابع مطلوبیت کلی (D) به عنوان تابع هدف مطابق با رابطه (۶) در نظر گرفته شد.

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_m)^{\frac{1}{m}} \quad (۶)$$

در این رابطه، m تعداد معیارها می‌باشد. از آنجایی که در این تحقیق معیارهای تصمیم‌گیری شامل روانی، خصوصیات مکانیکی (مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی)، هزینه و GWP می‌باشد، $m = ۶$ در نظر گرفته شد. هرچقدر مقدار تابع مطلوبیت کلی برای یک طرح اختلاط بیشتر باشد، نشان دهنده‌ی آن است که این طرح اختلاط روانی و مقاومت مکانیکی بیشتر و هزینه‌ی و GWP کمتری دارد. بعد از محاسبه تابع مطلوبیت برای تمام معیارها، تابع مطلوبیت کلی مطابق با رابطه (۶) محاسبه شد. نتایج مربوط به بهینه‌یابی در جدول ۶ نشان داده شد. برای طرح اختلاطی که تابع مطلوبیت مربوط به حتی یک معیار برای آن صفر بدست آمده باشد، تابع مطلوبیت کلی آن نیز صفر خواهد شد [۴۸]. میزان مطلوبیت کلی طرح‌های اختلاط به ترتیب نزولی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در بین ۲۸ طرح اختلاط مورد استفاده تابع مطلوبیت کلی برای ۶ طرح اختلاط R100-C20، R100-C80، R100-C40، R100-C20، R100-C80-RCP15- و R100-C40-RCP30، RCP30 برابر صفر بدست آمد. این نتیجه بیان کننده‌ی آن است که استفاده از این طرح‌های اختلاط کمترین منفعت را بدنبال خواهد داشت. در بین طرح‌های اختلاطی که بیشترین مقدار مطلوبیت کلی را به خود اختصاص داده‌اند، طرح‌های اختلاط حاوی ۵۰ درصد RCA با مقاومت اولیه ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال، ۱۵ و ۳۰ درصد RCP و همچنین

کاهش میزان OPC و جایگزینی آن با مواد چسبنده دیگر از اهمیت بسیار بالایی در کاهش GWP برخوردار است. نکته قابل توجه دیگر در نتایج آن است که نوع سنگدانه‌های مورد استفاده در ساخت بتن تأثیر چندانی در کاهش یا افزایش GWP نداشته و این پارامتر تنها تحت تأثیر مواد چسبنده مورد استفاده در ساخت بتن قرار دارد.

۶- بهینه‌یابی چند متغیره

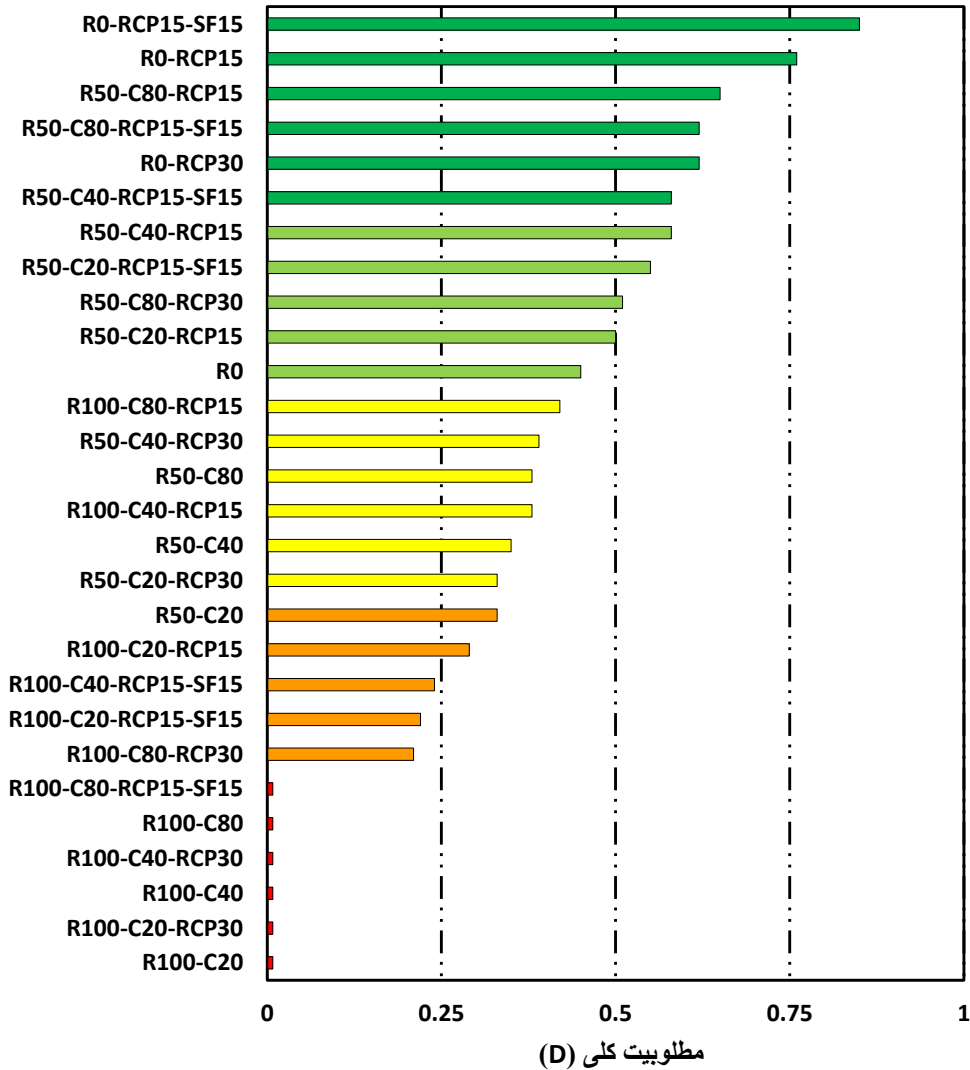
با استفاده از نتایج حاصل شده از آزمایش‌های روانی و خصوصیات مکانیکی و همچنین تجزیه و تحلیل‌های اقتصادی و محیط زیستی، یک روش بهینه‌یابی مورد مطالعه قرار گرفت، تا مناسب‌ترین طرح اختلاط از نظر روانی، خصوصیات مکانیکی (مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی)، جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی انتخاب گردد. یک روش بهینه‌یابی اساساً از یک تابع عملکرد برای تصمیم‌گیری تشکیل می‌شود. در این تابع متغیرهای مستقل و وابسته بر فرمولاسیون و نتیجه تصمیم نهایی تأثیر می‌گذارند [۴۵]. مواد تشکیل دهنده‌ی طرح‌های اختلاط، متغیرهای مستقل می‌باشند، در حالی که روانی، خصوصیات مکانیکی، هزینه و GWP متغیرهای وابسته‌ای هستند که براساس متغیرهای مستقل تغییر می‌کنند. اگر فقط یک معیار وجود داشته باشد، حداکثر یا حداقل مقدار آن به راحتی تعیین می‌شود و نیازی به بهینه‌یابی نیست، اما از آنجایی که در این تحقیق معیارهای مختلفی همچون روانی (آزمایش اسلامپ)، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و همچنین معیارهای اقتصادی و محیط زیستی مد نظر است، بایستی طرح‌های اختلاطی با بیشترین روانی و مقاومت و همچنین کمترین هزینه و GWP از طریق بهینه‌یابی چند متغیره انتخاب شوند. در این تحقیق از یک روش بهینه‌یابی چند متغیره استفاده شده است که تابع مطلوبیت نامیده می‌شود [۴۶]. مقدار این تابع بین ۰ و ۱ می‌باشد. مقدار تابع مطلوبیت با استفاده از روابط (۴) و (۵) محاسبه شد [۴۷].

$$d_j = \left[\frac{Y_j - \min f_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^{t_j} \quad (۴)$$

$$d_j = \left[\frac{\max f_j - Y_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^{t_j} \quad (۵)$$

جدول ۶. مطلوبیت کلی طرح‌های اختلاط.
Table 6. Desirability of the mix designs

مطلوبیت کلی	مطلوبیت						طرح اختلاط
	محیط زیست	اقتصاد	خصوصیات مکانیکی			روانی	
			خمش	کشش	فشار		
۰/۴۵	۰/۰۱	۰/۱۸	۱	۱	۱	۱	R0
۰/۷۶	۰/۵۱	۰/۰۹	۰/۷۹	۰/۱۸	۰/۷۲	۰/۰۹	R0-RCP15
۰/۶۲	۱	۱	۰/۴۸	۰/۰۴	۰/۳۷	۰/۷۷	R0-RCP30
۰/۱۸۵	۱	۰/۵۹	۰/۹۷	۰/۱۸۵	۰/۹۹	۰/۷۹	R0-RCP15-SF15
۰/۳۳	۰/۰۱	۰/۵۲	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۷۴	۰/۶۴	R50-C20
۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۶۲	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۳۸	۰/۴۹	R50-C20-RCP15
۰/۳۳	۰/۹۹	۰/۷۲	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۰۳	۰/۰۳	R50-C20-RCP30
۰/۵۵	۰/۹۹	۰/۳۱	۰/۶۶	۰/۰۶	۰/۶۸	۰/۳۴	R50-C20-RCP15-SF15
۰	۰	۰/۲۴	۰/۴۵	۰/۰۵	۰/۴۲	۰/۳۴	R100-C20
۰/۲۹	۰/۱۵	۰/۳۴	۰/۲۸	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۱۶	R100-C20-RCP15
۰	۰/۹۹	۰/۴۴	۰	۰	۰	۰/۰۳	R100-C20-RCP30
۰/۲۲	۰/۹۹	۰/۰۴	۰/۴۱	۰/۰۵	۰/۳۸	۰/۰۴	R100-C20-RCP15-SF15
۰/۳۵	۰/۰۱	۰/۵۱	۰/۱۸۳	۰/۰۱۸	۰/۱۸۶	۰/۶۷	R50-C40
۰/۵۸	۰/۱۵	۰/۶۲	۰/۶۹	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۴۹	R50-C40-RCP15
۰/۳۹	۰/۹۹	۰/۷۱	۰/۲۱	۰/۰۳	۰/۲۸	۰/۲۹	R50-C40-RCP30
۰/۵۸	۰/۹۹	۰/۳۱	۰/۷۹	۰/۷۵	۰/۶۹	۰/۳۱	R50-C40-RCP15-SF15
۰	۰	۰/۲۳	۰/۶۶	۰/۰۷	۰/۶۶	۰/۳۹	R100-C40
۰/۳۸	۰/۱۵	۰/۳۳	۰/۴۵	۰/۰۶	۰/۴۵	۰/۱۴	R100-C40-RCP15
۰	۰/۹۹	۰/۴۳	۰	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۰۶	R100-C40-RCP30
۰/۲۴	۰/۹۹	۰/۰۲	۰/۵۹	۰/۶۵	۰/۵۹	۰/۰۴	R100-C40-RCP15-SF15
۰/۳۸	۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۶۶	R50-C80
۰/۶۵	۰/۱۵	۰/۰۶	۰/۷۲	۰/۱۸۵	۰/۷۴	۰/۵۳	R50-C80-RCP15
۰/۵۱	۰/۹۹	۰/۰۷	۰/۳۴	۰/۰۵	۰/۵۲	۰/۰۳	R50-C80-RCP30
۰/۶۲	۰/۹۹	۰/۲۹	۰/۱۸۳	۰/۰۹	۰/۱۸۴	۰/۳۳	R50-C80-RCP15-SF15
۰	۰	۰/۲۱	۰/۷۹	۰/۰۹	۰/۱۸۲	۰/۳۶	R100-C80
۰/۴۲	۰/۴۹	۰/۳۱	۰/۶۶	۰/۰۱۸	۰/۶۶	۰/۰۱	R100-C80-RCP15
۰/۲۱	۰/۹۹	۰/۴۱	۰/۱۴	۰/۳۵	۰/۴۴	۰/۰۱	R100-C80-RCP30
۰	۰/۹۸	۰	۰/۷۹	۰/۰۹	۰/۷۶	۰	R100-C80-RCP15-SF15



شکل ۱۱. مطلوبیت کلی طرح‌های اختلاط به ترتیب نزولی.
 Fig. 11. Overall desirability of all mixing designs

۱- RCA در مقایسه با NA چگالی کمتر، مقاومت سائیدگی کمتر و جذب آب بیشتری داشت. افزایش مقاومت اولیه RCA باعث افزایش چگالی، افزایش مقاومت سائیدگی و کاهش جذب آب این سنگدانه‌ها شد.

۲- جایگزینی OPC با RCP و جایگزینی NA با RCA موجب کاهش کارایی بتن شد. این کاهش برای جایگزینی ۳۰ درصدی OPC با RCP به ۱۳ درصد و برای جایگزینی ۱۰۰ درصدی NA با RCA با مقاومت‌های اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب به ۳۸، ۳۶ و ۳۸ درصد رسید.

۳- خصوصیات مکانیکی بتن در اثر استفاده از RCP تضعیف شدند. استفاده ۱۵ درصدی از RCP موجب کاهش جزئی و استفاده

۳۰ درصد از ترکیب RCP و SF به چشم می‌خورد. این نتیجه بیانگر آن است که جایگزینی ۵۰ درصد NA با RCA با مقاومت اولیه بالا و همچنین جایگزینی ۳۰ درصد OPC با RCP و SF می‌تواند منفعت به دنبال داشته باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در نمونه‌های این تحقیق RCP بعنوان جایگزین ۱۵ و ۳۰ درصد از OPC و RCA بعنوان جایگزین ۵۰ و ۱۰۰ درصد از NA استفاده شد. ۳ نوع نخاله بتنی با مقاومت‌های اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال در تولید RCA مورد استفاده قرار گرفت. با بررسی خصوصیات روانی، مکانیکی، اقتصادی و محیط زیستی نتایج زیر بصورت خلاصه حاصل شد:

مراجع

- [1] J. De Brito, N. Saikia., Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste, Springer Science & Business Media. (2012).
- [2] US Geological Survey (2011) USGS mineral program cement report, United States Geological Survey.
- [3] H. Shima, H. Tateyashiki, R. Matsuhashi, Y. Yoshida., An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis, Journal of advanced concrete technology. 3(1) (2005) 53-67.
- [4] C. Xue, A. Shen, Y. Guo, T. He., Utilization of Construction Waste Composite Powder Materials as Cementitious Materials in Small-Scale Prefabricated Concrete, Advances in Materials Science and Engineering. (2016).
- [5] E. Kwon, J. Ahn, B. Cho, D. Park., A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder, Construction and Building Materials. 83 (2015) 174-180.
- [6] Q. Liu, T. Tong, S. Liu, D. Yang, Q. Yu., Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement, Construction and Building Materials. 73 (2014) 754-763.
- [7] S. Ahmari, X. Ren, V. Toufigh, L. Zhang., Production of geopolymetric binder from blended waste concrete powder and fly ash, Construction and Building Materials. 35 (2012) 718-729.
- [8] X. Ma, Z. Wang., Effect of ground waste concrete powder on cement properties, Advances in Materials Science and Engineering. (2013).
- [9] Y. J. Kim, Y. W. Choi., Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement, Construction and building materials. 30 (2012) 500-504.
- [10] M. Ahmadi, A. Hasani, M. Soleymani., Role of Recycled Steel Fibers from Tires on Concrete Containing Recycled Aggregate from Building Waste, Concrete research journal. 7 (2) (2014) 57-68. (In Persian)
- [11] N. D. Oikonomou., Recycled concrete aggregates, Cem Concr Compos. 27 (2) (2005) 315-318.
- [12] C.A. Carneiro, P.R.L. Lima, M.B. Leite, R.D.T. Filho., ۳۰ درصدی از آن موجب کاهش قابل توجه خصوصیات مکانیکی شد. ۱۵ و ۳۰ درصد RCP به ترتیب موجب کاهش ۱۳ و ۲۹ درصدی مقاومت فشاری، ۱۰ و ۲۹ درصدی مقاومت کششی و ۱۰ و ۲۶ درصدی مقاومت خمشی شد.
- ۴- استفاده از SF توانست ضعف حاصل از RCP را جبران نماید. خصوصیات مکانیکی نمونه‌های حاوی ۳۰ درصد از ترکیب RCP و SF تقریباً مشابه خصوصیات مکانیکی نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد OPC بدست آمد. استفاده ۳۰ درصدی از ترکیب RCP و SF موجب کاهش ۱، ۵ و ۲ درصدی به ترتیب در مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی شد.
- ۵- استفاده از RCA بعنوان جایگزین NA موجب تضعیف خصوصیات مکانیکی شد. افزایش مقاومت اولیه RCA توانست تا حدودی این ضعف را جبران نماید. استفاده از ۱۰۰ درصد RCA با مقاومت‌های اولیه ۲۰، ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال به ترتیب موجب کاهش ۲۷، ۱۶ و ۹ درصدی مقاومت فشاری، ۲۴، ۱۵ و ۵ درصدی مقاومت کششی و ۲۷، ۱۷ و ۱۰ درصدی مقاومت خمشی شد.
- ۶- تجزیه و تحلیل اقتصادی نشان داد که استفاده از RCP بعنوان جایگزین OPC موجب کاهش هزینه و استفاده از RCA بعنوان جایگزین NA موجب افزایش هزینه ساخت طرح‌های اختلاط می‌شود. کمترین هزینه مربوط به طرح حاوی ۱۰۰ درصد NA و ۳۰ درصد RCP و بیشترین هزینه مربوط به طرح حاوی ۱۰۰ درصد RCA، ۱۵ درصد RCP و ۱۵ درصد SF بود. اختلاف میان هزینه گرانترین و ارزانترین طرح‌های اختلاط ۵۹ درصد بود.
- ۷- نتایج محاسبه GWP نشان داد که این پارامتر تنها تحت تأثیر مواد چسبنده مورد استفاده در بتن قرار دارد و تغییر در نوع سنگدانه مصرفی تغییر محسوسی در آن ایجاد نمی‌کند. جایگزینی OPC با RCP در کاهش میزان GWP بسیار مؤثر بود. جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصدی OPC با RCP توانست به ترتیب ۱۵ و ۳۰ درصد GWP را کاهش دهد.
- ۸- در نهایت، بهینه‌یابی چند متغیره نشان داد که استفاده از ۱۵ و ۳۰ درصد RCP و SF و ۵۰ درصد RCA با مقاومت‌های اولیه ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال می‌تواند از لحاظ خصوصیات روانی، مکانیکی، اقتصادی و محیط زیستی منفعت داشته باشد.

- [23] K. Akhavan Kazemi, O. Eren, A. R. Rezaei., Some mechanical properties of normal and recycled aggregate concretes, *Scientia Iranica A*. 22 (6) (2015) 1972-1980.
- [24] M. Benaicha, X. Roguiez, O. Jalbaud, Y. Burtschell, A. Hafidi Alaoui., Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self-compacting concrete, *J. Constr. Build. Mater.* 84 (2015) 103-110.
- [25] X. Y. Lv, L. S. Wang, X. Chen, Q. Y. Li., Experimental study on the activity of concrete recycled powder, *Journal of Qingdao Technological University*. 30 (2009) 137-139.
- [26] S.W. Tabsh, A.S. Abdelfatah., Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete, *Constr Build Mater.* 23 (2009) 1163-1167.
- [27] F.T. Olorunsogo, N. Padayachee., Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes, *Cem Concr Res.* 32 (2002) 179-185.
- [28] A. Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz., Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC, *Cement Concrete Compos.* 24 (2002) 269-279.
- [29] D. J. Moon, Y. B. Kim, J. S. Ryou., An approach for the recycling of waste concrete powder as cementitious materials, *Journal of Ceramic Processing Research*. 9(3) (2008) 278-281.
- [30] ASTM C 496/C 496M-11 (2011). "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens."
- [31] Y.J. Kim, Quality properties of self-consolidating concrete mixed with waste concrete powder, *Construct. Build. Mater.* 135 (2017) 177-185.
- [21] M. Mastali, A. Dalvand, Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC), *Construction and Building Materials*. 125 (2016) 196-209.
- [33] A.M. Wagih, H.Z. El-Karmoty, M. Ebid, S.H. Okba., Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete, *Housing and Building National Research Center*. 9 (2013) 193-200.
- [34] ASTM C78 (2010). "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)."
- Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*. 46 (2017) 886-893.
- [13] R. Chan, X. Liu, I. Galobardes., Parametric study of functionally graded concretes incorporating steel fibres and recycled aggregates, *Construction and Building Materials*. 242 (2020) 118186.
- [14] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, S. Moazami Goodarzi., Assessment of mechanical properties of environmentally friendly concrete with emphasis on selection of optimal mix designs in terms of resistance and economy, *Amirkabir journal of civil engineering*. (2020) 17920-6712. (In Persian)
- [15] V. Afroughsabet, L. Biolzi, T. Ozbakkaloglu., Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete, *Composite Structures*. 181 (2017) 273-284.
- [16] ASTM C 39/C 39M-03 (2003). "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens."
- [17] M. D. J. Sanchez, P.A. Gutierrez., Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and building materials*. 23 (2009) 872-877.
- [18] M. Pepe, R. D. Toledo Filho, E. A. Koenders, E. Martinelli., Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete, *Construction and Building Materials*. 69 (2014) 124-132.
- [19] ASTM C125-19, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [20] ASTM C131 / C131M-14 (2006). "Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine."
- [21] ASTM C150 (2012). "Standard Specification for Portland Cement."
- [22] ASTM C 143/C 143M-15a (2015). "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete."

- Full probabilistic service life prediction and life cycle assessment of concrete with fly ash and blast-furnace slag in a submerged marine environment: a parameter study, *Int J Environ Sust Dev*. 11 (2012) 32-49.
- [42] P. Van den Heede, N. De Belie., Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green'concretes: literature review and theoretical calculations, *Cement Concr. Compos*. 34 (2012) 431-442.
- [43] A. Akbar, K.M. Liew, Assessing recycling potential of carbon fiber reinforced plastic waste in production of eco-efficient cement-based materials, *Journal of Cleaner Production*. 274 (2020) 123001.
- [44] A. Hajimohammadi, T. Ngo, P. Mendis, T. Nguyen, A. Kashani, J.S.J. van Deventer., Pore characteristics in one-part mix geopolymers foamed by H₂O₂: the impact of mix design, *Mater. Des*. 130 (2017) 381-391.
- [45] F. Bayramov, C. Tasdemir, M. A. Tasdemir., Optimization of fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method, *Cement Concr Compos*. 26 (2004) 665-675.
- [46] W.F. Smith., *Experimental design for formulation*, American Statistical Association. (2005).
- [47] O. Sengul, M.A. Tasdemir., Compressive strength and rapid chloride permeability of concretes with ground fly ash and slag, *Mater Civ Eng*. 21 (2009) 494-501.
- [48] O. Sengul., Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires, *Construct Build Mater*. 122 (2016) 649-58.
- [35] P. Zhu, X. Maa, W. Qu, Z. Li, Z. Mac., Investigation of using recycled powder from waste of clay bricks and cement solids in reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*. 113 (2016) 246-254.
- [36] M. Mastali, A. Dalvand, The impact resistance and mechanical properties of fiber reinforced self-compacting concrete (SCC) containing nano-SiO₂ and silica fume, *Journal of Environmental and Civil Engineering*. 22(1) (2018) 1-27.
- [37] Y. Hua, Z. Tang, W. Li, Y. Li, V. W. Y. Tamd., Physical-mechanical properties of fly ash/GGBFS geopolymer composites with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*. 226 (2019) 139-151.
- [38] M. Mastali, Z. Abdollahnejad, F. Pacheco-Torgal., Carbon dioxide sequestration on fly ash/waste glassalkali-based mortars with recycled aggregates: compressive strength, hydration products, carbon footprint, and cost analysis, *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*. (2018) 299-348.
- [39] M. Mastali, A. Dalvand, A.R. Sattarifard, Z. Abdollahnejad, M. Illikainen., Characterization and optimization of hardened properties of selfconsolidating concrete incorporating recycled steel, industrial steel, polypropylene and hybrid fibers, *Composites Part B*. 151 (2018) 186-200.
- [40] Ecoinvent, *The Life Cycle Inventory Data Version 2.0*, 2008.
- [41] P. Van den Heede, M. Maes, E. Gruyaert, N. De Belie.,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Abdali Kia, F. Omidinasab, A. Sahraei Moghadam, *Replacement of OPC with RCP in Concrete Containing RCA (Investigation of Mechanical, Economic and Environmental Characteristics)*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(1) (2021) 107-126.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19255.7114](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19255.7114)



