

## Właściwości alkalicznie aktywowanych wałowanych betonów żużlowych wytwarzanych z kruszyw odpadowych

## Properties of alkali-activated roller compacted concretes produced from waste aggregates

Saadet Gökçe Gök<sup>1\*</sup>, Ismail Kilic<sup>1</sup>, Ozkan Sengul<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kirklareli University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Kayali Campus, Kirklareli, Turkey

<sup>2</sup>Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, ITU Ayazaga Campus, Maslak, Istanbul, Turkey

\*Corresponding author: S. G. Gök: e-mail: [saadet.gokce.gok@klu.edu.tr](mailto:saadet.gokce.gok@klu.edu.tr)

### Streszczenie

Zużycie energii i emisja dwutlenku węgla podczas produkcji cementu powoduje potrzebę poszukiwania alternatywnych materiałów budowlanych. Istnieje coraz większe zapotrzebowanie na bardziej przyjazne dla środowiska, bardziej ekonomiczne, trwałe i wytrzymałe materiały. Badania nad recyklingiem odpadów w budownictwie przyczyniają się do zaspokojenia tej potrzeby. W tych badaniach opracowano nowy materiał, który umożliwia ponowne wykorzystanie odpadów, przy użyciu znanych technik. Beton wałowany zagęszczony walcem, aktywowany alkaliami, został wyprodukowany z recyklingu gruboziarnistych kruszyw i zbadano właściwości mechaniczne tego materiału. Celem tych doświadczeń było uzyskanie materiału konstrukcyjnego składającego się z odpadów lub produktów ubocznych. Stosowano zmielony granulowany żużel wielkopiecowy aktywowany krzemianem sodu i 10 – molowym roztworem wodorotlenku sodu. Stosunek  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  w roztworze aktywatora wynosił 2,5. Grube kruszywa uzyskano z odpadów betonu wałowanego i wyprodukowano materiał przyjazny dla środowiska, bez użycia cementu. Ponieważ beton wałowany jest wytwarzany z bardzo gęstą konsystencją w porównaniu do betonu konwencjonalnego, ilość zastosowanego aktywatora jest niewielka, co zapewnia korzyści środowiskowe i ekonomiczne. Wytrzymałość na ściskanie kostkowych próbek betonu wałowanego zbadano po 7 i 28 dniach. Mieszanki wykonane z żużla wielkopiecowego aktywowanego alkaliami uzyskane w tych badaniach i zagęszczonego w trakcie wałowania, osiągnęły wytrzymałość na ściskanie większą od betonu z cementu portlandzkiego. Określono również gęstość, całkowitą absorpcję wody, prędkość impulsu ultradźwiękowego i moduł sprężystości tego betonu.

**Słowa kluczowe:** aktywacja alkaliami; żużel wielkopiecowy; właściwości mechaniczne; beton zagęszczany walcem; kruszywa odpadowe

### Summary

The energy consumption and the release of carbon dioxide during cement production require the search for alternative building materials. There is an increasing need for more environmentally friendly, more economical, durable and high-strength materials. Studies on recycling of waste materials in construction contribute to meeting this need. In this study, a new material that allows reuse of wastes was produced using known materials and techniques. Alkali-activated roller compacted concrete [AARCC] was produced with recycled coarse aggregates and the mechanical properties of this material were investigated. In this experimental study, the objective was to produce an alternative construction material composed of waste or by-products. Ground granulated blast furnace slag [GGBFS] was activated with a sodium silicate [ $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ] and 10 M sodium hydroxide [NaOH] solution. The  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  ratio was 2.5 in the activator solution. The coarse aggregates were obtained from roller compacted concrete (RCC) wastes and an environmentally friendly material was produced without using any cement. As a roller compacted concrete is produced with a very dry consistency compared to conventional concrete, the amount of activator used is low, which provides environmental and economic benefits. The compressive strengths of the cube RCC specimens were determined at the ages of 7 and 28 days. Using the mix proportions designed in this study, it was found that the compressive strengths of alkali-activated RCCs were higher than roller compacted Portland cement concrete having high dosage of cement. Unit mass, total water absorption, ultrasonic pulse velocity [UPV], and modulus of elasticity of alkali-activated RCCs were also determined.

**Keywords:** alkali-activation; blast furnace slag; mechanical properties; roller compacted concrete; waste aggregate

## 1. Wprowadzenie

Cement portlandzki [CP] w Stanach Zjednoczonych osiąga ponad 120 mln ton rocznego zużycia, a jego światową produkcję oszacowano na 4,65 mld ton w 2016 roku (1, 2). Produkcja betonu konwencjonalnego wymaga stosowania cementu, kruszywa mineralnych i wody. Produkcja jednej tony cementu powoduje emisję około 0,8 tony dwutlenku węgla i gazów cieplarnianych. Roczna światowa produkcja CP odpowiada za 8% globalnej emisji dwutlenku węgla (3). Stwierdzono, że obecna emisja gazów cieplarnianych jest o około 55% większa niż w 1990 r. i o 40% niż w 2000 r. W roku 2017 wyniosła ona 55,1 Gt (4). Tym samym zrównoważone zastosowanie betonu konwencjonalnego wydają się wątpliwe. W celu wykorzystania materiałów odpadowych w betonie w celu produkcji bardziej przyjaznego dla środowiska i zrównoważonego materiału budowlanego oraz zmniejszenia kosztów, stosuje się produkty uboczne, przede wszystkim popiół lotny i żużel wielkopiecowy. Zastępują one nawet do 40-60 procent cementu w betonie. Żużel wielkopiecowy jest produktem ubocznym podczas produkcji surówki żelaza w wielkich piecach, w hutach. Jest on granulowany przez nagłe ochłodzenie, a do stosowania w spoiwach budowlanych musi być mielony.

Ulepszanie technologii powinno sprawić, że produkcja cementu będzie bardziej energooszczędna i przyjazna dla środowiska. Sugerowane rozwiązania dla zrównoważonego betonu przedstawiają się następująco: zmniejszenie ilości cementu, stosowanie oczyszczonych ścieków zamiast wody oraz kruszyw z recyklingu (5-6). W celu zmniejszenia ilości cementu, może on być całkowicie zastąpiony materiałami pucolanowymi, do których zaliczamy metakaolin, żużel wielkopiecowy i pył krzemionkowy, aktywowane alkalicznie. Ta aktywacja nadaje im właściwości wiążące.

Stopień zmniejszenia emisji dwutlenku węgla w przypadku betonów z materiałów aktywowanych alkaliem, w porównaniu z klasycznym betonem z cementu portlandzkiego, wynosi zazwyczaj od 55 do 75%. Jednak zmniejszenie emisji dwutlenku węgla w przypadku spoiw aktywowanych alkaliem zależy od rodzaju i ilości zastosowanych aktywatorów alkalicznych (7).

W materiałach aktywowanych alkaliem mogą wystąpić problemy z urabialnością, których nie można rozwiązać przez dodanie domieszek chemicznych, głównie plastyfikatorów, spełniających dobrze swoją rolę tylko w przypadku cementu portlandzkiego.

W niniejszej pracy wyprodukowano beton z żużla aktywowanego alkaliem oraz z kruszywem z recyklingu, stosując inną metodę produkcji, polegającą na zagęszczaniu mieszanki półsuchej. Jako spoiwo zamiast cementu zastosowano zmielony żużel wielkopiecowy, który aktywowano krzemianem sodu i 10-molowym roztworem wodorotlenku sodu. Dodatek aktywatora był niewielki, ze względu na jego suchą konsystencję.

Do produkcji wykorzystano kruszywo grube, uzyskane z recyklingu odpadów betonu wałowanego [BW]. Zbadano także właściwości tych betonów aktywowanych alkaliem, zagęszczanych walcem,

## 1. Introduction

Ordinary Portland cement [OPC] reaches more than 120 million metric tons of annual consumption in the United States, and global cement production was estimated at 4.65 billion tonnes in 2016 (1, 2). Conventional concrete production requires the usage of cement, quarries and water. Production of one tonne of cement causes approximately one tonne of carbon dioxide and greenhouse gas emission. The annual production of OPCs in the world is responsible for 8% of global carbon dioxide emissions (3). Present greenhouse gas emissions have been reported to be approximately 55% higher than in 1990 and 40% higher than in 2000, and global greenhouse gas emissions were 55.1 Gt in 2017 (4). In this manner, sustainability of conventional concrete is questionable. To reuse waste materials in concrete for a more environmentally friendly and sustainable building material and decrease the production cost of conventional concrete, by-products such as fly ash and blast furnace slag replace 40-60% of cement in concrete. Blast furnace slag is a by-product released from blast furnaces during pig iron production in metallurgical plants, granulated by rapid cooling and ground to smaller particles.

Improving technologies should make cement production more energy efficient and environmentally friendly. Suggested solutions for sustainable concrete are as follows: reducing the amount of cement used, using treated wastewater as mixing water, and using recycled aggregates (5-6). To reduce the amount of cement, the cement may be replaced with pozzolanic materials. Cement can be completely replaced by pozzolanic materials, such as metakaolin, blast furnace slag, and silica fume, with an alkali-activation process, which transformed these materials and gave them binding properties. Alkali-activated pozzolanic materials-based concretes reduce carbon dioxide emissions compared to ordinary Portland cement concrete, generally between 55 and 75%. However, the reduction in carbon dioxide emissions connected with alkali-activated concrete depends on the type, concentration, and dosage of the alkaline activators used (7).

In alkali-activated materials, there can be workability problems that cannot be solved with the addition of chemical admixtures such as plasticizers that work well with ordinary Portland cement. In this study, alkali-activated slag concrete was produced with recycled aggregates by using a different production method, by compacting the semi-dry mixture. As a binder, blast furnace slag was used instead of cement. Ground granulated blast furnace slag was activated with sodium silicate and a 10 molar sodium hydroxide solution, the content of which was low due to dry consistency. The coarse aggregate used in production was obtained by recycling RCC wastes, and the properties of the alkali-activated roller compacted concretes, especially compressive strength, unit weight, total water absorption, ultrasonic pulse velocity [UPV] and modulus of elasticity were investigated.

w zakresie wytrzymałości na ściskanie, ciężaru jednostkowego, całkowitej absorpcji wody, prędkości impulsu ultradźwiękowego [PIU] oraz modułu sprężystości.

## 2. Materiały i metody

W pracy wyprodukowano betony ze zmielonego granulowanego żużla wielkopieczowego aktywowanego alkalicznie i zagęszczanego walcem.

Kruszywa grube otrzymano z recyklingu odpadów z BW o stosunku wodno-cementowym 0,35 i zawartości cementu 429 kg/m<sup>3</sup> i wyrównano uziarnienie, krusząc te odpady w kruszarce szczękowej. Skład ziarnowy kruszyw podano w tablicy 1. Badanie ścieralności metodą Los Angeles przeprowadzono w przypadku kruszyw grubych zgodnie z normą ASTM C131 (8), a stratę ścieralności oznaczono metodą Los Angeles [LA], która dla kruszyw z recyklingu wyniosła 24%. Zgodnie ze Specyfikacją Techniczną Generalnej Dyrekcji Tureckich Autostrad (9), ubytek z powodu ścierania metodą LA dla kruszyw grubych stosowanych w nawierzchniach drogowych, powinien być mniejszy niż 30%. Ubytek z powodu ścierania metodą LA dla kruszyw grubych użytych w doświadczeniach był poniżej tej wartości granicznej. Dodatkowo dla 500 obrotów wymagane jest, aby ubytek z powodu ścierania metodą LA był poniżej 50% dla kruszyw stosowanych do wykonywania budynków (10). Warunek ten jest również spełniony. Jako kruszywo drobne zastosowano piasek naturalny.

Rysunek 1 przedstawia rozdrobnione i przesiane kruszywo grube, uzyskane z odpadów BW.

Do przygotowania próbki wzorcowej zastosowano kruszywo dolomitowe [D]. Wartość ubytku z powodu ścierania metodą LA kruszywa dolomitowego wynosiła 20%. Gęstości kruszyw wynosiły 2,72, 2,80 i 2,53 g/cm<sup>3</sup> odpowiednio dla piasku, dolomitu i kruszyw odpadowych [KO]. Nasiąkliwość kruszywa odpadowego wynosiła 3,30%. Nasiąkliwość wynosiła odpowiednio 1,30% i 0,56% dla piasku naturalnego i kruszywa dolomitowego. Zaleca się, aby nasiąkliwość dla kruszyw grubych była poniżej 1% (11).

Mielony granulowany żużel wielkopieczowy otrzymano z firmy Oyak Bolu Cement zlokalizowanej w Turcji, a właściwości techniczne

Tablica 1 / Table 1

### SKŁAD ZIARNOWY KRUSZYWA

### GRAIN SIZE DISTRIBUTION OF THE AGGREGATES

Sieve Size Rozmiar oczek sita, mm	Percentage passing / Procent przejścia, %		
	Dolomite Aggregate Kruszywo dolomitowe	Recycled Aggregate Kruszywo z recyklingu	Natural Sand Piasek naturalny
16	100	100	100
12.5	69	95	100
9.5	53	83	100
8	43	61	100
4	0	0	100
2	0	0	96
1	0	0	86
0.5	0	0	57
0.25	0	0	21

## 2. Materials and Methods

In this study, roller compacted concretes were produced by alkali-activation of ground granulated blast furnace slag.

The recycled coarse aggregates were obtained from RCC wastes. The original concrete had a water/cement ratio of 0.35 and a cement content of 429 kg/m<sup>3</sup>. It was crushed in a jaw crusher and classified according to grain size, forming RCC aggregate. The grain size distribution of the aggregates is given in Table 1. The Los Angeles abrasion test was performed on coarse aggregates according to ASTM C131 (8) and the Los Angeles abrasion loss value of recycled aggregates was determined as 24%. According to the Technical Specifications of the General Directorate of Turkish Highways (9), the LA abrasion loss for coarse aggregates to be used in road pavements, should be less than 30%. The LA abrasion loss of the coarse aggregates used in the experiments was below this limit value. In addition, for 500 revolutions, LA abrasion loss is required for buildings to be below 50% (10). This condition is also met. Natural sand was used as fine aggregates.

Fig. 1 shows the crushed and sieved coarse aggregates, obtained from RCC wastes.

In the production of the reference specimen, dolomite aggregates [D] were used. Los Angeles abrasion loss value of dolomite aggregates was 20%. The density of the aggregates were 2.72, 2.80



Rys. 1. Kruszywo z rozdrobnionego BW o różnych wymiarach: (a) 4-8 mm, (b) 8-12,5 mm, (c) 12,5-16 mm

Fig. 1. Crushed RCC aggregates of different sizes: (a) 4-8 mm, (b) 8-12.5 mm, (c) 12.5-16 mm



GGBFS podano w tablicy 2. Wymagania normowe dla żuźla wielkopieczowego są określone w normie TS EN 15167-1 (12).

Zmielony granulowany żużel wielkopieczowy aktywowano aktywatorem alkalicznym zawierającym 10 M wodorotlenek sodu i krzemian sodu, w których stosunek masowy krzemianu sodu do roztworu wodorotlenku sodu wynosił 2,5. Do przygotowania roztworu stosowano wodorotlenku sodu w postaci stałej o czystości 99%. 1 litr 10-molowego roztworu NaOH zawiera 400 gramów NaOH [forma stała] +812,2 gramów wody. Masa 1 litra roztworu wynosi 1212,2 gramów. Właściwości techniczne krzemianu sodu podano w tablicy 3. Ze względu na to, że rozpuszczanie wodorotlenku sodu w wodzie jest reakcją egzotermiczną, roztwór aktywatora przygotowywano 24 godziny przed przygotowaniem betonów, aby zapewnić wystarczające ochłodzenie. W BW stosunek wody do spoiwa był mały, aby zapewnić suchą konsystencję i zerową wartość rozplywu mieszanki betonowej.

W celu porównania wytrzymałości materiału opartego na GŻW z konwencjonalnym BW zawierającym cement, przygotowano również BW zawierający cement zamiast żuźla wielkopieczowego. Ze względu na to, że cement jest stosowany w tej samej zawartości co żużel wielkopieczowy, jego zawartość w tym badanym betonie jest duża, w porównaniu z zawartością w konwencjonalnym BW. Cement stosowany w badaniach to cement portlandzki CEM I 42,5 R. Proporcje mieszanki dla betonów zagęszczanych walcem podano w tablicy 4. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że kruszywo było nasycone wodą.

W produkcji BW świeży beton zagęszczano w dwóch warstwach, a każdą warstwę zagęszczano przez 10 sekund. W stanie świeżym rozplyw mieszanki betonowej wynosił zero. Wykonano próbki w kształcie sześcienu o wymiarach 15 cm×15 cm×15 cm w celu określenia modułu sprężystości, prędkości impulsu ultradźwiękowego oraz wytrzymałości na ściskanie. Do zagęszczania stosowano młot wibracyjny z kwadratową głowicą, o długości krawędzi 146 mm. Produkcja betonu zagęszczanego walcem odbywała się zgodnie z normą ASTM C 1435 (15). Próbki rozformowano 24 godziny po zaformowaniu i wszystkie dojrzewały w wodzie, do dnia badania.

Wytrzymałość na ściskanie próbek sześciennych oznaczono po 7 i 28 dniach, zgodnie z normą TS EN 12390-3 (16). W próbie jednoosiowego ściskania próbek prędkość obciążania wynosiła 0,602 MPa/s (13,545 kN/s). Badania absorpcji wody przeprowa-

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI TECHNICZNE KRZEMIANU SODU (14)

TECHNICAL PROPERTIES OF SODIUM SILICATE (14)

Formula / Wzór	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
Density / Gęstość	2.61 g/cm <sup>3</sup>
Boiling point / Temperatura wrzenia	68% solution boils at 121°C [250°F; 394 K]
Melting point / Temperatura topnienia	1088°C
Molar mass / Masa molowa	122.06 g/mol
CAS No / numer CAS	10213-79-3

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI TECHNICZNE GŻWP (13)

TECHNICAL PROPERTIES OF GGBFS (13)

Typical Specifications Typowa specyfikacja		Standard Value Wartość standardowa	GGBFS GŻWP
Activity, 7 days Aktywność, 7 dni	%	min. 10.0	50.0
Activity, 28 days Aktywność, 28 dni	%	42.5-62.5	75.0
Volume expansion Stałość objętości	mm	-	1.0
Specific surface Powierzchnia właściwa	cm <sup>2</sup> /g	-	4800
MgO	%	max. 18.0	7.0
S	%	max. 2.0	0.75
SO <sub>3</sub>	%	max. 2.50	0.15
Cl	%	max. 0.1000	0.0100
Loss on ignition Staty prażenia	%	max. 3.00	0.10
Moisture Wilgotność	%	max. 1.00	0.10
CaO+MgO+SiO <sub>2</sub>	%	min. 66.67	82.50
(CaO+MgO)/SiO <sub>2</sub>	%	min. 1.0	1.06

and 2.53 g/cm<sup>3</sup> for sand, dolomite and waste aggregates [WA], respectively. The water absorption of the waste aggregate was 3.30%. The water absorption were 1.30% and 0.56% for natural sand and dolomite aggregate, respectively. Water absorption is recommended to be below 1% for coarse aggregates (11).

Ground granulated blast furnace slag was obtained from Oyak Bolu Cement, which is located in Turkey, and the technical properties of GGBFS are given in Table 2. Standard values for blast furnace slag are expressed in the TS EN 15167-1 (12) standard.

Ground granulated blast furnace slag was activated with the alkaline activator containing 10 molar sodium hydroxide and sodium silicate, where the ratio of sodium silicate to sodium hydroxide solution was 2.5 by mass. Sodium hydroxide in solid form with a purity of 99% was used for alkali activation. 1 liter of 10 molar NaOH solution contains 400 grams of NaOH (solid)+812.2 grams of water, the mass of 1 liter of solution is 1212.2 grams. The technical properties of sodium silicate are given in Table 3. As dissolving sodium hydroxide in water is an exothermic reaction, the activator solution was prepared 24 h before casting to provide sufficient cooling. In the RCC design, the water/binder ratio was low to provide dry consistency and zero slump value in the fresh state.

In order to compare the strength of the GGBFS-based material with the conventional RCC containing cement, RCC containing cement instead of blast furnace slag was also produced. Since cement is used in the same amount as blast furnace slag, its dosage has been high for a conventional RCC. The cement used in the experimental study was CEM I 42.5 R Portland cement. The mix-proportions of the compacted roller concretes are given in Table 4. The calculations were made considering that the aggregates were water-saturated.

dzono zgodnie z normą BS EN 772-11 (17). Po 28 dniach oznaczono moduł sprężystości i prędkość przejścia impulsu ultradźwiękowego. W badaniach stosowano tester ultradźwiękowy Pundit PL200 marki Proceq, który posłużył do wyznaczenia prędkości fali ultradźwiękowej oraz dynamicznego modułu sprężystości. Przetworniki fali S użyte do wyznaczenia modułu sprężystości mają szerokość pasma 250 kHz i wielkość apertury  $\Phi 41$  mm $\times$ 32 mm, a przetworniki fali P mają szerokość pasma 54 kHz i wielkość apertury  $\Phi 50$  mm $\times$ 46 mm. Do wyznaczenia prędkości impulsu ultradźwiękowego wykorzystano przetworniki fali P o częstotliwości 54 kHz i długości fali 68,5 mm. W celu określenia modułu sprężystości wykonano pierwszy pomiar przy użyciu przetworników fal P o częstotliwości 54 kHz i długości fali 68,5 mm, a następnie przetworniki te usunięto i zastąpiono przetwornikami fal S o częstotliwości 250 kHz i długości fali 10 mm, po czym wykonano drugi pomiar. Po wykonaniu pomiarów za pomocą przetworników fali S i P, odczytano z wyświetlacza urządzenia moduł sprężystości betonu zagęszczonego walcem. Do obliczenia długości fali przyjęto prędkość impulsu 3700 m/s [fala podłużna] i 2500 m/s [fala poprzeczna] (18). W każdej grupie badawczej zbadano po trzy próbki sześciennie i przedstawiono wartości średnie.

### 3. Wyniki i omówienie

#### 3.1. Gęstość

Na gęstość betonu bezpośredni wpływ ma gęstość materiałów użytych do produkcji oraz ilość pustek powstałych w mikrostrukturze materiału. W procesie zagęszczania zmniejsza się ilość uwięzionego powietrza, a w betonach zagęszczanych walcem uzyskuje się większą gęstość. Ponadto, dzięki zastosowaniu suchej mieszanki, można utrzymywać mniejszy stosunek wody do cementu i uzyskać mniej porowatą mikrostrukturę. W jednostce

In RCC production, fresh concrete was compacted in two layers and each layer was compacted for 10 seconds. The slump value was zero in the fresh state. 15 cm $\times$ 15 cm $\times$ 15 cm cube specimens were produced in order to determine modulus of elasticity, ultrasonic pulse velocity and compressive strength values. The compaction process was made with a vibratory hammer that had a square head with 146 mm edge length. The production of roller compacted concrete was carried out according to ASTM C 1435 (15). The samples were demolded 24 h after casting and all samples were water, cured until the day of testing.

The compressive strength of the cube samples was determined at the ages of 7 days and 28 days, according to TS EN 12390-3 (16). The loading rate was 0.602 MPa/s [13.545 kN/s] in the concrete uniaxial compression test. The water absorption tests were applied according to BS EN 772-11 (17). At the age of 28 days, modulus of elasticity and ultrasonic pulse velocity were determined. The Proceq Pundit PL200 ultrasonic tester was used in tests conducted to determine UPV and dynamic modulus of elasticity. The S-wave transducers used to determine the modulus of elasticity have a bandwidth of 250 kHz and the aperture size is  $\Phi 41$  mm $\times$ 32 mm. The P-wave transducers have a bandwidth of 54 kHz and an aperture size of  $\Phi 50$  mm $\times$ 46 mm. 54 kHz P-wave transducers with a wavelength of 68.5 mm were used to determine the velocity of the ultrasonic pulse. In order to determine the modulus of elasticity, first measurement was taken by using 54 kHz P-wave transducers with wavelength of 68.5 mm, and then these transducers were removed and replaced with 250 kHz S-wave transducers with a wavelength of 10 mm, and the second measurement was made. After the measurements using S and P wave transducers, the modulus of elasticity of the roller compacted concrete was determined from the digital display of the device. A pulse velocity of 3700 m/s [longitudinal wave] and 2500 m/s [shear wave] were used in the calculation of wavelengths (18).

Tablica 4 / Table 4

PROPORCJE MIESZANKI BW

MIX PROPORTIONS OF RCCS

Materials / Materiały	Amount / Ilość, kg			
	PC-100% D	GGBFS-100% D MGŻW-100% D	GGBFS-50% WA+50% D MGŻW-50% WA+50% D	GGBFS-100% WA MGŻW-100% WA
Cement	730.9	0.0	0.0	0.0
Added Water / Woda dodana	212.0	0.0	0.0	0.0
Sodium Hydroxide Solution / Roztwór wodorotlenku sodu	0.0	90.5	90.5	90.5
Sodium Silicate / Krzemian sodowy	0.0	226.6	226.6	226.6
GGBFS / MGŻW	0.0	730.9	730.9	730.9
Natural Sand [0-4 mm] / Piasek naturalny [0-4 mm]	471.8	471.8	471.8	471.8
Waste Aggregate [8 mm] / Kruszywo odpadowe [4-8 mm]	0.0	0.0	176.9	353.8
Waste Aggregate [8-12.5 mm] / Kruszywo odpadowe [8-12,5 mm]	0.0	0.0	141.5	283.1
Waste Aggregate [12.5-16 mm] / Kruszywo odpadowe [12,5-16 mm]	0.0	0.0	35.4	70.8
Dolomite [4-8 mm] / Dolomit [4-8 mm]	353.8	353.8	176.9	0.0
Dolomite [8-12.5 mm] / Dolomit [8-12,5 mm]	283.1	283.1	141.5	0.0
Dolomite [12.5-16 mm] / Dolomit [12,5-16 mm]	70.8	70.8	35.4	0.0

objętości BW znajduje się więcej części stałych, gęstość betonu zagęszczanego walcem jest o około 1 do 3% większa niż betonu konwencjonalnego i zazwyczaj przekracza  $2,4 \text{ t/m}^3$  (19). W betonach wałowanych zawartość cementu jest mniejsza i wynosi około  $200 \text{ kg/m}^3$  (20). W tym badaniu projekt betonu jest całkowicie odmienny od ogólnego projektu BW, ponieważ żużel wielkopiecowy jest używany zamiast cementu, a produkcja cementowego BW jest wykonywana jako odniesienie do aktywowanego alkalicznie BW [AABW] z tymi samymi proporcjami mieszanki. W przeciwnym razie oczywiste jest, że projektowanie BW z dozowaniem cementu na poziomie 730,9 jest nieopłacalne. Produkcja staje się godna uwagi pod względem inżynierskim, jeśli cement nie byłby używany w tak dużych dawkach, a granulowany żużel wielkopiecowy GŻW zostałby użyty sam jako spoiwo, co eliminuje problemy, które mógłby spowodować cement.

Gęstość stwardniałych BW podano w tablicy 5. Najmniejszą wartość uzyskano dla betonu z cementu portlandzkiego. Ponieważ gęstość kruszywa odpadowego była mniejsza, zastosowanie kruszywa odpadowego spowodowało zmniejszenie gęstości BW.

Wraz z wiekiem próbki gęstość betonu zwiększała się. Można powiedzieć, że zjawisko to jest spowodowane tworzeniem się mniej porowatej mikrostruktury, wraz z postępem hydratacji.

Po 7 dniach maksymalna różnica w gęstości pomiędzy BW z cementu portlandzkiego a żużlowym aktywowanym alkalicznie z kruszywem dolomitowym, wynosiła 7,1%. Różnica ta zmniejszyła się do 5,1% w ciągu 28 dni.

Gęstości betonu zaktywowanego alkaliami żużla i wyprodukowanego z kruszyw odpadowych, były prawie takie same jak betonu wałowanego z cementu portlandzkiego i dolomitu. Po 28 dniach różnica wynosiła 0,46%. Powoduje to, że zastosowanie spoiwa uzyskanego z żużla zamiast cementu, nie spowoduje poważnych zmian w masie całkowitej konstrukcji. Stwierdzono, że zastosowanie kruszywa odpadowego zamiast dolomitu, zmniejszyło masę konstrukcji, co będzie korzystne w produkcji elementów prefabrykowanych, gdy pożądane jest zmniejszenie masy budynku w celu zmniejszenia sił wywołanych trzęsieniem ziemi. Należy wziąć pod uwagę, że wytrzymałość będzie również ważna przy ograniczaniu masy konstrukcji, zgodnie z założeniami.

Tablica 5 / Table 5

GĘSTOŚĆ BETONÓW WAŁOWANYCH

DENSITY OF RCCS

	Density at the age of 7 days Gęstość po 7 dniach, $\text{g/cm}^3$	Density at the age of 28 days Gęstość po 28 dniach, $\text{g/cm}^3$
PC-100% D	2.12	2.17
GGBFS-100% D ZGŻW-100% D	2.27	2.28
GGBFS-50% WA+50% D ZGŻW-50% KO+50% D	2.22	2.24
GGBFS-100% WA ZGŻW-100% WA	2.14	2.18

Three cube specimens were tested for each test group and the mean values were presented.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Density

The density of concrete is directly affected by the specific weight of the materials used in production, such as aggregates and the amount of voids formed in the structure of the material. With compaction process, the amount of entrained air is reduced and a higher density is obtained in roller compacted concretes. In addition, thanks to the use of dry mix, a lower water/cement ratio can be used and a less porous microstructure is obtained. More solids are contained in unit volume of RCC, the density of roller compacted concrete is approximately 1 to 3% higher than conventional concrete and generally exceeds  $2.4 \text{ t/m}^3$  (19). The cement content is lower in roller compacted concretes, which is around  $200 \text{ kg/m}^3$  (20). In this study, the concrete design is completely different from the general RCC design, since blast furnace slag is used instead of cement and the production of cemented RCC is made as a reference to AARCC with the same mix proportions. Otherwise, it is obvious that the design of RCC with a cement dosage of 730.9 is not cost-effective. Production becomes remarkable in terms of engineering, since cement was not used with such high dosage and GGBFS was used alone as binder, this eliminates the problems that cement will cause. Therefore, more lightweight concretes were produced compared to conventional concrete, which can provide a number of advantages depending on its purpose.

The density of hardened RCCs is given in Table 5. The lowest value was obtained with ordinary Portland cement. As the density of the waste aggregate was low, the use of the waste aggregate caused a decrease in the the density values in AARCCs.

With increasing specimen age, the density of concrete increased. It can be said that this phenomenon is caused by the formation of a less porous microstructure, with the progress of hydration.

After 7 days, the maximum difference in unit weights was between Portland cement RCCs and AARCCs produced with dolomite aggregates, which was 7.1%. This difference decreased to 5.1% after 28 days.

The unit weight values of alkali-activated slag concrete produced entirely with waste aggregate were almost the same as those of Portland cement RCCs, produced with dolomite. After 28 days, the difference between these values was 0.5%. The use of waste aggregate instead of dolomite was found to decrease the mass of the structure. This will be beneficial in prefabricated element production when it is desired to reduce the mass of the building, in order to reduce the earthquake forces that will



### 3.2. Nasiąkliwość

Nasiąkliwość, moduł sprężystości i prędkość impulsu ultradźwiękowego betonów zagęszczanych walcem podano w tablicy 6.

Nasiąkliwość, mieszcząca się w przedziale od 4,2% do 4,6%, jest duża we wszystkich wykonanych próbkach, co jest związane z dużym udziałem materiału drobnziarnistego w wykonanym betonie. Niemniej jednak, nasiąkliwość betonów aktywowanych alkaliami była mniejsza niż betonów zagęszczonych walcem, z cementu portlandzkiego.

W badaniach przeprowadzonych z kruszywem z recyklingu, w różnych ilościach jako kruszywem grubym w betonie zwykłym, jego nasiąkliwość wynosiła od 1,65% do 1,97%. Zwiększona zawartość kruszywa z recyklingu spowodowała ten wzrost nasiąkliwości (21). W innym badaniu, wraz ze zwiększeniem dodatku kruszyw z recyklingu, nasiąkliwość wzrastała i wahała się od 5,0% do 8,5%, a wartości te ulegały zmniejszeniu, gdy kruszywa z recyklingu były „ulepszane” mechanicznym rozdrabnianiem w młynie kulowym (22).

Oczekuje się, że zastosowanie kruszywa z recyklingu zwiększy nasiąkliwość ze względu na chropowatość powierzchni i porowatość kruszywa. Chociaż oczekuje się, że pozostałości zaprawy otaczające kruszywo odpadowe również zwiększą nasiąkliwość, nie zaznaczyło się to wyraźnie w niniejszych badaniach. Debieb i in. (23) stwierdzili również, że w przypadku stosowania tylko kruszywa z recyklingu, nasiąkliwość betonów z tym kruszywem zagęszczanych walcem, jest porównywalna z betonami z kruszywem naturalnym, co jest spowodowane zagęszczaniem. Nasiąkliwość alkalicznie aktywowanego betonu zagęszczanego walcem z kruszywem dolomitowym, była mniejsza niż BW z cementu portlandzkiego. Zastosowanie kruszywa odpadowego zmniejszyło nasiąkliwość, a nasiąkliwość zagęszczanego BW zawierającego kruszywo odpadowe, była również mniejsza niż BW z cementu portlandzkiego. Im mniejsza jest nasiąkliwość, tym lepsza jest trwałość betonu. Gdy wartość ta jest mała, można stwierdzić, że niektóre substancje, które mogą uszkodzić beton wnikać w niego, będą ulegać absorpcji w mniejszym stopniu. W porównaniu z próbkami wzorcowymi, zastosowanie kruszyw odpadowych było również korzystne pod względem tej absorpcji. Nasiąkliwość można poprawić zmniejszając zawartość materiału drobnziarnistego.

### 3.3. Moduł sprężystości

W niniejszej pracy moduł sprężystości nie został wyznaczony z wykresu naprężenie – odkształcenie, a uzyskano go pośrednio, za pomocą testera ultradźwiękowego. Dlatego też punkt pomiarowy ma wpływ na jego wyniki. Moduł sprężystości jest po prostu stosunkiem pomiędzy naprężeniem i odkształceniem, w obszarze sprężystym. Im większy moduł sprężystości materiału, tym może on przenosić większe obciążenie, bez trwałej deformacji. Moduł sprężystości betonów zagęszczanych walcem jest zazwyczaj

Tablica 6 / Table 6

NASIĄKLIWOŚĆ, MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI I PRĘDKOŚĆ IMPULSU ULTRADŹWIĘKOWEGO BETONÓW WAŁOWANYCH

WATER ABSORPTION, MODULUS OF ELASTICITY AND ULTRASONIC PULSE VELOCITY OF RCCS

	Water absorption Nasiąkliwość, %	Modulus of elasticity Moduł sztywości, GPa	UPV, km/s
PC-100% D	4.55	35.1	4.37
GGBFS-100% D ZGŻW-100% D	4.33	48.2	4.47
GGBFS-50% WA+50% D ZGŻW-50% KO+50% D	4.17	39.6	4.22
GGBFS-100% WA ZGŻW-100% WA	4.21	38.5	4.17

occur. It should be taken into account that the strength values will also be important when the mass of the structure is reduced in accordance with the purpose.

### 3.2. Water absorption

The water absorption, modulus of elasticity, and ultrasonic pulse velocity of RCCs are given in Table 6.

Water absorption, which ranges between 4.2% and 4.6%, is high in all specimens produced. This is related to the excess amount of fine material in the concrete mix. However, the water absorption of the alkali-activated concretes was lower than those of the Portland cement RCCs.

In a study conducted with the use of recycled aggregate in different amounts as a coarse aggregate in plain concrete, the water absorption values of the concrete ranged from 1.7% to 2.0% and the increased amount of recycled aggregate increased the water absorption percentages (21). In another study, with increasing use of recycled aggregates, the water absorption increased and varied between 5.0% and 8.5%. These values decreased when recycled aggregates were improved with a mechanical grinding method, ball milling enhancement method with an “optimization” process (22).

The use of recycled aggregate is expected to increase water absorption, due to the roughness of the aggregate surface and porosity. While the mortar residues surrounding the waste aggregates are also expected to increase the water absorption values, this was not clearly observed in this study. Debieb et al. (23) also stated that with the use of 100% of recycled aggregate, the sorptivity of the recycled aggregate roller compacted concretes is comparable with natural aggregate concrete, which is due to the effect of compaction. The water absorption of alkali-activated RCC produced with dolomite aggregate was lower than that of Portland cement RCC. The use of waste aggregate decreased this value, and the water absorption percentages of AARCCs containing waste aggregates were also lower than those of Portland cement RCC. The lower the amount of water absorption, the better the concrete in terms of durability. When this value is low, it can be said that some substances that can damage the concrete through water absorption, will penetrate less. Compared to reference specimens,

podobny lub większy od modułu sprężystości betonu konwencjonalnego, z taką samą zawartością cementu (24).

Ogólnie rzecz biorąc, moduł sprężystości w materiałach aktywowanych alkaliami jest mniejszy niż w betonach z cementu, ale w tym przypadku mamy do czynienia z sytuacją odwrotną. Największy moduł sprężystości uzyskano w przypadku betonu zagęszczanego walcem, z żużla aktywowanego alkalicznie, z kruszywem dolomitowym. Wynik ten jest spowodowany zagęszczaniem. Rodzaj kruszywa jest jednym z czynników wpływających na moduł sprężystości, a zastosowanie kruszywa odpadowego zmniejszyło moduł sprężystości. Moduł sprężystości betonu zależy w znacznym stopniu od modułu kruszywa, a kruszywo betonowe z recyklingu, ma mniejszy moduł niż kruszywo naturalne (11, 25). Uwodnione cząstki cementu związane z kruszywami odpadowymi wpływały na moduł sprężystości. Niemniej jednak moduł sprężystości zagęszczonego walcem betonu aktywowanego alkaliami i uzyskanych tylko z kruszyw odpadowych, był większy niż beton zagęszczony walcem z cementu portlandzkiego, z kruszywem dolomitowym. Najmniejszy dynamiczny moduł sprężystości uzyskano w przypadku próbek betonu zagęszczanego walcem, z cementu portlandzkiego. Etxeberria i in. (26) stwierdzili, że zastosowanie kruszywa z recyklingu zmniejsza moduł sprężystości betonu z cementu portlandzkiego. Natomiast moduł sprężystości w betonie kontrolnym wynosił 32,56 GPa, w wykonanych przez nich badaniach. Przy zastosowaniu kruszywa z recyklingu uzyskali oni moduł sprężystości w zakresie od 27,8 do 31,3 GPa, ze względu na to, że kruszywa z recyklingu są bardziej podatne na odkształcenia niż kruszywa naturalne. Z podobnym wynikiem spotkali się również Demirel i Simsek (27), którzy stwierdzili, że wraz ze wzrostem dodatku kruszywa grubego z recyklingu, notuje się spadek modułu sprężystości w betonach z cementem portlandzkim, z kruszywem z recyklingu.

### 3.4. Prędkość impulsu ultradźwiękowego

Tester ultradźwiękowy dostarcza informacji o wytrzymałości betonu na ściskanie, określając czas przejścia fal ultradźwiękowych powstał między odbiornikiem a nadajnikiem w betonie. Za pomocą ultradźwiękowej metody badania prędkości impulsów, która jest metodą nieniszczącą, można również uzyskać dane dotyczące wytrzymałości na ściskanie, modułu sprężystości oraz jednorodności betonu, ewentualnych wad i pęknięć. Nie ma bezpośredniej zależności pomiędzy prędkością przejścia ultradźwięku przez beton a wytrzymałością betonu na ściskanie, ale jest ona związana z gęstością betonu. W betonie o małej gęstości – beton z większą zawartością pustek, ultradźwięki mają dłuższy czas na dotarcie z jednej powierzchni betonu do drugiej. Innymi słowy, wraz ze wzrostem zawartości pustek w betonie, maleje prędkość impulsu ultradźwiękowego i odwrotnie. Istnieje wprost proporcjonalna zależność wytrzymałości na ściskanie betonu od jego gęstości. Ze względu na to, że beton o dużym stosunku wody do cementu ma więcej kapilar, jego gęstość i wytrzymałość na ściskanie są małe. W tym przypadku wytrzymałość betonu na ściskanie można określić pośrednio metodą prędkości impulsów ultradźwiękowych [PIU].

the use of waste aggregates has also been beneficial in this regard. Water absorption percentages can be optimized by reducing the content of fine material and dosage.

### 3.3. Modulus of Elasticity

In this study, the modulus of elasticity was not determined from the stress-strain diagram, but was obtained indirectly with an ultrasonic tester. Therefore, the measured point has an effect on the results. The modulus of elasticity is simply the ratio between stress and strain in the elastic region. The higher the modulus of elasticity of a material, the higher the strength it can withstand without permanent deformation. Modulus of elasticity of roller compacted concretes is generally similar or higher than the modulus of elasticity of conventional concrete with the same dosage of cement (24).

In general, the value of the modulus of elasticity in alkali-activated materials is lower than that of cement-produced concrete, but the opposite situation is encountered here. The highest value of modulus of elasticity was obtained with alkali-activated slag RCCs produced with dolomite aggregates, and this result was obtained because of the effect of compaction. The type of aggregate is one of the factors affecting the modulus of elasticity, and the use of waste aggregate decreased the modulus of elasticity. The modulus of concrete depends significantly on the modulus of the aggregates, and recycled concrete aggregate has a lower modulus than natural aggregate (11, 25). The hydrated cement particles adhered to the surface in the waste aggregates affected the modulus of elasticity. Nevertheless, the modulus of elasticity of alkali-activated RCCs produced entirely with waste aggregate was higher than that of Portland cement RCCs produced with dolomite aggregates. The lowest value of dynamic modulus of elasticity was obtained with Portland cement RCC specimens. Etxeberria et al. (26) stated that the use of recycled aggregate decreased the values of modulus of elasticity of OPC concrete, while the modulus of elasticity in control concrete was 32.56 GPa. In their study they obtained modulus of elasticity ranging between 31.30 and 27.76 GPa with the use of recycled aggregate, due to the recycled aggregates are more prone to deformation than raw aggregates. Demirel and Simsek (27) also encountered a similar result, and stated that as the amount of recycled coarse aggregate increased, a decrement in elastic modulus was observed in recycled aggregate OPC concretes.

### 3.4. Ultrasonic pulse velocity

The ultrasonic tester gives information on the compressive strength of the concrete by determining the transition time of the ultrasound waves formed between the receiver and the transmitter in the concrete. With the ultrasonic pulse velocity test method, which is a non-destructive testing method, data about compressive strength, elastic modulus, the homogeneity of the concrete, if any, defect, and crack formation in the concrete can also be obtained. There is no direct relationship between the transition speed of the ultrasonic sound that passes through the concrete and the compressive strength of the concrete, but it is related to the density of the concrete. In a low density concrete [concrete



Zgodnie z normą ASTM C 597 (28), jakość betonu uznaje się za dobrą, jeśli PIU wynosi od 3,5 do 4,5 km/s. Można powiedzieć, że im większa wartość PIU, tym mniejsza ilość pustych przestrzeni w betonie, a tym samym beton jest bardziej nieprzepuszczalny i trwały. Po zbadaniu PIU wytworzonych w zagęszczaniu walcem betonie stwierdzono, że największą PIU ma BW aktywowany alkaliem, który nie zawierał kruszywa odpadowego. Dodatek kruszywa odpadowego zmniejszył tę wartość, jednak nawet najniższa uzyskana wartość PIU była większa od 3,5 i można stwierdzić, że jakość betonu była wystarczająca. W przypadku zastosowania 100% kruszywa odpadowego stwierdzono spadek prędkości impulsu ultradźwiękowego w aktywowanym alkalicznie, zagęszczanym walcem betonie o 6,7%.

### 3.5. Wytrzymałość na ściskanie

Głównymi produktami hydratacji żużla aktywowanego alkaliem są: hydrat krzemianu wapnia [faza C-S-H] o małym stosunku Ca/Si, hydrotalcyt oraz uwodnione glinian wapnia typu AFm (29, 30). Faza C-S-H w zwykłym cemencie portlandzkim i żużlu aktywowanym alkaliem różni się od siebie pod względem morfologii i składu chemicznego (29, 31, 32).

Oczekuje się, że zastosowanie kruszywa odpadowego zmniejszy wytrzymałość na ściskanie betonu z CP, dlatego w celu uzyskania zbliżonych wytrzymałości do betonu z kruszywem naturalnym, zaleca się stosowanie około 5-10% dodatkowego cementu w produkcji betonu z kruszywem z recyklingu (26, 33).

Wartości średnie i odchylenia standardowe wytrzymałości na ściskanie BW podano w tablicy 7, a graficznie przedstawiono na rysunku 2. Po porównaniu wyników wytrzymałości na ściskanie stwierdzono, że wytrzymałość wczesna BW aktywowanych alkaliem była większa od BW z cementem portlandzkim o 11,2%-14,1%. Gruskovnjak i in. (34) wykazali, że tworzenie się zewnętrznego C-S-H jest znacznie szybsze w żużlach aktywowanych alkaliem niż w zwykłym cemencie portlandzkim, na co wpływ ma szybkie rozpuszczanie się składnika Na-metakrzemianowego oraz duże rozdrobnienie żużla, w układach z żużłami aktywowanymi alkaliem.

Badając wyniki wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach stwierdzono, że zastosowanie w AABW odpadowych kruszyw uzyskanych z BW zamiast kruszyw dolomitowych, nie spowodowało wyraźnej różnicy ich wytrzymałości. Natomiast po 28 dniach różnica

with more voids], ultrasound has a longer time to reach from one surface of the concrete to the other. In other words, as the content of voids inside the concrete increases, the ultrasonic pulse velocity decreases, and vice versa. There is a direct proportional relationship between the density of concrete and compressive strength. Since concrete with a high water/cement ratio has more capillary voids, its density and compressive strengths are also lower. In this case, the compressive strength of the concrete can be determined indirectly by the ultrasonic pulse velocity method.

According to ASTM C 597 (28), the concrete quality is considered good if the UPV is between 3.5 and 4.5 km/s. It can be said that the higher the UPV, the smaller the amount of voids in the concrete, thus the concrete becomes more impermeable and durable. As the UPV values of the produced RCCs were examined, it was observed that the highest UPV value belongs to alkali-activated RCC, which did not contain any waste aggregate. The use of waste aggregate decreased this value, however, even the lowest UPV value obtained was greater than 3.5, and it can be said that the quality of the concrete was sufficient. With the use of 100% waste aggregate, a 6.7% decrease in the ultrasonic pulse velocity values of AARCC was observed.

### 3.5. Compressive Strength

The main hydration products of alkali-activated slag are calcium silicate hydrate [C-S-H phase] having a low ratio of Ca/Si, hydrotalcite and hydrated Aluminate-Ferrite mono (sulfate) (AFm) phase (29, 30). The C-S-H phases in ordinary Portland cement and alkali-activated slag pastes are different from each other in terms of morphology, chemical composition and crystallinity (29, 31, 32).

The use of waste aggregate is expected to decrease the compressive strength of OPC concrete, therefore, in order to obtain similar strength properties to natural aggregate concrete, the use of approximately 5-10% additional cement in the production of recycled aggregate concrete is recommended (26, 33).

The mean and standard deviation values for the compressive strengths of the RCCs are given in Table 7 and are shown graphically in Figure 2. When the compressive strength results were compared, it was observed that the early strength values of the alkali-activated RCCs were higher than those of the Portland cement RCCs by 11.2%-14.1%. Gruskovnjak et al. (34) stated that the formation of the outer product C-S-H is much faster in

Tablica 7 / Table 7

WARTOŚCI ŚREDNIE I ODCHYLENIA STANDARDOWE [W NAWIASACH] DLA WYTRZYMAŁOŚCI BETONU NA ŚCISKANIE  
MEAN AND STANDARD DEVIATION [IN PARENTHESES] VALUES FOR CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH

	Compressive strength at the age of 7 days Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach, g/cm <sup>3</sup>	Compressive strength at the age of 28 days Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, g/cm <sup>3</sup>
PC-100% D	54.5 (0.3)	63.1 (1.6)
GGBFS-100% D / ZGŻW-100% D	60.6 (2.0)	88.5 (0.6)
GGBFS-50% WA+50% D / ZGŻW-50% KO+50% D	62.2 (1.8)	82.2 (7.6)
GGBFS-100% WA / ZGŻW-100% WA	61.8 (3.8)	81.2 (5.1)

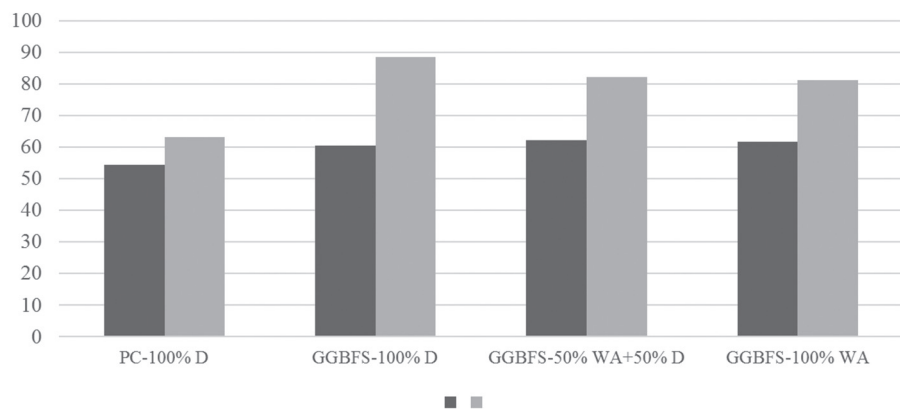
wytrzymałości na ściskanie nieznacznie wzrosła, a odpadowe kruszywa obniżyły tę wytrzymałość. Niemniej jednak, dzięki aktywacji alkalicznej uzyskano wysokie wartości wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z próbkami BW z cementu portlandzkiego, które nie zawierały kruszywa odpadowego. Podczas gdy wartości wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach w przypadku próbek AABW, wykonanych całkowicie z odpadowego kruszywa, były o 8,2% niższe, niż dla próbek tylko z dolomitowego kruszywa. Były one o 28,7% wyższe niż wytrzymałość na ściskanie próbek wykonanych z cementu portlandzkiego. Wartości wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z mieszanki kruszywa odpadowego z kruszywem dolomitowym, w równych proporcjach masowych, po 28 dniach mieściły się w przedziale uzyskanych przy zastosowaniu tylko tych kruszyw.

Według Etxeberria i in. (35) nowa strefa przejściowa kruszywa z recyklingu z zaczynem cementowym, która miała niższy stosunek wodno-cementowy niż tworząca strefę przejściową zaprawa z kruszywa z recyklingu z zaczynem cementowym, miała duży wpływ na wyniki badań wytrzymałości betonu na ściskanie.

#### 4. Wnioski i zalecenia

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń laboratoryjnych można wyciągnąć następujące wnioski:

- Proces zagęszczania umożliwił dobrą urabialność betonu o konsystencji półsuchej, co pozwoliło na zmniejszenie dodatku aktywatora. Zapewnia to korzyści ekologiczne i ekonomiczne w produkcji betonu.
- Gęstość AABW z żużla aktywowanego alkaliem, zawierającego tylko kruszywo odpadowe, były zbliżone do BW z cementu portlandzkiego, z kruszywem dolomitowym.
- Zastosowanie kruszywa z recyklingu BW obniżyło obciążenie jednostkowe betonu ze względu na mniejszy ciężar właściwy kruszywa odpadowego.
- Zastosowanie kruszywa odpadowego zamiast dolomitu zmniejszyło ciężar konstrukcji, co daje korzyści w produkcji elementów prefabrykowanych, gdy korzystne jest zmniejszenie ciężaru budynku, w celu zmniejszenia występujących sił związanych z trzęsieniem ziemi.
- Zastosowanie kruszywa z recyklingu BW zamiast kruszywa dolomitowego zmniejszyło nasiąkliwość betonu zagęszczanego walcem z zastosowaniem żużla wielkiepiecowego. Pomimo tego uzyskano dużą nasiąkliwość.
- Zastosowanie odpadowych kruszyw z BW obniżyło dynamiczny moduł sprężystości AABW, aktywowanego alkaliem. Jednakże, moduł sprężystości tych AABW, wytworzonych tylko z kruszywa odpadowego, był wyższy niż BW z cementu portlandzkiego uzyskanego z kruszywa dolomitowego.



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie betonów wałowanych

Fig. 2. Compressive strengths of RCCs

alkali-activated slags than in ordinary Portland cement, which is influenced by the fast dissolution of Na-metasilicate component and the high fineness of slag in alkali-activated slag systems.

When the 7-day compressive strength results were examined, it was observed that the use of waste RCC aggregates in alkali-activated RCC instead of dolomite aggregates did not make a significant difference in their strength values, but after 28 days, the difference between compressive strength values increased slightly and the waste aggregates decreased the strength. Nevertheless, with alkali-activation, high compressive strength was obtained compared to Portland cement RCC specimens that did not contain waste aggregate. Although the compressive strength of the 28-day-old alkali-activated RCC samples produced exclusively with waste aggregate was 8.2% lower than those produced with dolomite aggregate, it was 28.7% higher than the compressive strength of the samples produced with Portland cement. 28-days compressive strength values of the specimens produced by mixing the waste aggregate and dolomite aggregate equally by mass were between the values obtained by using these aggregates alone.

According to Etxeberria et al. (35), the new interfacial transition zone between the recycled aggregate and the cement paste, which had a lower water/cement ratio than the adhered mortar present in recycled aggregate and the new cement paste, was effective on compressive strength test results of concrete.

#### 4. Conclusions and recommendations

Based on the laboratory experiments, the following conclusions can be drawn:

- The compaction process allowed good workability in semi-dry consistency, thus reducing the amount of activator. This provides an environmental and economic advantage in concrete production.
- The density of alkali-activated slag RCCs produced entirely with waste aggregate was very close to that of Portland cement RCCs produced with dolomite aggregate.

- W AABW z żużlem aktywowanym alkaliami zastosowanie kruszywa odpadowego obniżyło prędkość impulsu ultradźwiękowego, jednak nawet najniższa uzyskana prędkość UPV była większa od 3,5 i można stwierdzić, że jakość betonu była wystarczająca wg ASTM C 597 (28).
- Stwierdzono, że zastosowanie w aktywowanych alkaliami BW kruszyw odpadowych z BW zamiast kruszyw dolomitowych nie spowodowało znacznej różnicy wytrzymałości betonu na ściskanie po 7 dniach.
- Dużą wytrzymałość na ściskanie można było uzyskać dzięki alkalicznej aktywacji ZGŻW. Stwierdzono, że biorąc pod uwagę wytrzymałość na ściskanie BW aktywowany alkaliami przewyższa BW z cementu portlandzkiego. Zastosowanie kruszyw odpadowych zmniejszyło wytrzymałość na ściskanie, niemniej jednak wytrzymałość ZZWB aktywowanego alkaliami oraz z kruszywami odpadowymi były większe od betonów BW z dużą zawartością cementu portlandzkiego, wyprodukowanych z kruszywem dolomitowym.
- Pomimo, że zastosowanie odpadowego kruszywa BW nieznacznie zmniejsza wytrzymałość na ściskanie, to przy odpowiednim zaprojektowaniu może być ono stosowane w betonie aktywowanym alkaliami i zagęszczanym walcem.

Obróbka cieplna byłaby odpowiednią metodą szybkiego wzrostu wytrzymałości w materiałach aktywowanych alkaliami. W produkcji elementów prefabrykowanych, twardnienie dojrzewaniem betonu w podwyższonej temperaturze może być preferowane po wstępnych testach, gdy wymagana jest wysoka wytrzymałość. Zalecane są dalsze badania w tym zakresie.

## Konflikt interesów

Autorzy nie zgłosili konfliktu interesów.

## Literatura / References

1. Portland Cement Association, USA Cement Industry Annual Yearbook. 62. (2016).
2. CEMBUREAU, Activity Report 2017 of The European Cement Association. (March), 1–48. (2017). Retrieved from [www.cembureau.eu](http://www.cembureau.eu)
3. R. M. Andrew, Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production. *Earth Syst. Sci. Data* **10**(4), 195–217 (2018).
4. J. G. J. Olivier, J. A. H. W. Peters, Trends in global CO<sub>2</sub> and total greenhouse gas emissions: 2018 report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. (December). (2018). Retrieved from <<https://www.pbl.nl/en/publications/trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2018-report>>
5. N. Arioglu, D. D. Hatipoglu, M. O. Arioglu-Salmona, E. Arioglu, Investigation of concrete industry in the concept of sustainability. (in Turkish), (2002). Retrieved from <<https://yapimerkezi.com.tr/PdfDosyalari/ebdb652b-b1d9-4d19-af20-c28ded302fbd-7a5c3811-1160-4f5f-8669-beb507c87990.pdf>>, date retrieved 10.02.2020
6. R. Drochytka, Z. Dufek, M. Michalčíková, J. Hodul, Study of possibilities of using special types of building and demolition waste in civil engineering. *Period. Polytech. Civil Eng.* **64**(1) 304–314 (2020).

- The use of recycled RCC aggregate decreased the density of concrete due to the low density of waste aggregate.
- Using waste aggregate instead of dolomite decreases the mass of the structure, which provides advantages in the production of prefabricated elements, when it is desired to reduce the mass of the building to reduce the forces of the earthquake that will occur.
- The use of recycled RCC aggregate instead of dolomite aggregate decreased the water absorption of roller compacted concretes produced with GGBFS. Nevertheless, high water absorption values were obtained.
- The use of waste RCC aggregates decreased the dynamic modulus of elasticity of alkali-activated RCCs. However, the modulus of elasticity of alkali-activated RCCs produced entirely with waste aggregate was higher than that of Portland cement RCCs produced with dolomite aggregates.
- In alkali-activated slag RCCs, the use of waste aggregate decreased the ultrasonic pulse velocity value, however, even the lowest UPV value obtained was greater than 3.5, and it can be said that the concrete quality was sufficient according to ASTM C 597 (28).
- The use of waste RCC aggregates in alkali-activated RCC instead of dolomite aggregates was found to not make a significant difference in their compressive strength values of 7 d.
- High compressive strength can be achieved with alkali activation of GGBFS. It was found that alkali-activated RCC was superior to Portland cement RCC in terms of compressive strength. The use of waste aggregates decreased compressive strength values. Nevertheless, the strength of alkali-activated RCCs containing waste aggregates was greater than that of high dosage Portland cement RCCs produced with dolomite aggregates.
- Although the use of waste RCC aggregate decreases the compressive strength values slightly, it can be used in alkali-activated roller compacted concrete with appropriate design.

Heat treatment would be an appropriate way to develop rapid strength in alkali-activated materials. In the production of prefabricated elements, heat curing can be preferred after preliminary tests when high strength is required. Further research on this topic is recommended.

## Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.



7. K. H. Yang, J. K. Song, K. I. Song, Assessment of CO<sub>2</sub> reduction of alkali-activated concrete. *J. Clean. Prod.* **39**, 265–272. (2013).
8. ASTM C131 / C131M-14, Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine (2006).
9. General Directorate of Highways of Turkey, Highway technical specifications, General Directorate of Highways of Turkey; Ankara, Turkey. (2006).
10. TS 706 EN 12620+A1, Aggregates for concrete, Turkish Standards Institution; Ankara. (2009).
11. A. M. Neville, *Properties of Concrete*, Longman 981-4053-56-2, by Pearson Education Asia. 2000.
12. TS EN 15167-1, Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria, Turkish Standards Institution; Ankara. (2006).
13. Unye Cement, <http://www.unyecimento.com.tr/documents/bolu-ogutulumus-yuksek-firin-curufle.html>, date retrieved 03.02.2020.
14. Koray Chemical Company, <https://www.koraykimya.com/sodyum-silikat>, date retrieved 03.02.2020
15. ASTM C 1435, Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer, American Society for Testing and Materials, (2014).
16. TS EN 12390-3, Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens, Turkish Standards Institution; Ankara. (2003).
17. BS EN 772-11, Methods of Test for Masonry Units Part 11: Determination of Water Absorption of Aggregate Concrete, Manufactured Stone and Natural Action and the Initial Rate of Water Absorption of Clay Masonry Units, BSI Stand. Publ.; London, UK. (2011).
18. Proceq, [https://www.proceq.com/uploads/tx\\_proceqproductcms/import\\_data/files/Pundit%20PL-2\\_Sales%20Flyer\\_English\\_high.pdf](https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Pundit%20PL-2_Sales%20Flyer_English_high.pdf), date retrieved 07.11.2019
19. ACI Committee 207.5R-99, Roller-compacted mass concrete, ACI Committee Report. (1999).
20. P. Delhez, X. Willem, F. Michel, L. Courard, "Use of concrete recycled aggregates in roller compacted concrete", in: Vazquez E, Hendriks ChF, Jansen GMT. *Proceedings of an International RILEM Conference on Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*. RILEM, 675–683 (2004).
21. G. Durmus, O. Simsek, M. Dayi, "Effect of recycled coarse aggregates on concrete properties", *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.* **24**(1), 183-189 (in Turkish) (2009).
22. H. Dilbas, O. Cakir, Enhancement of recycled aggregate concrete properties with mechanical grinding method. *Hazir Beton*, March-April 2018, 80-86 (in Turkish) (2018).
23. F. Debieb, L. Courard, S. Kenai, R. Degeimbre, Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.* **23**, 3382–3387 (2009).
24. J. R. Berry, S. D. Tayabji, Report on Roller-Compacted Concrete Pavements, **95**, 1–32. (2001).
25. S. Frondistou-Yannas, Waste concrete as aggregate for new concrete. *ACI J.* **78**, 373–376. (1977).
26. M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra, Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res.* **37**, 735–742 (2007).
27. C. Demirel, O. Simsek, The usability of C30 class waste concrete as recycled aggregate in concrete", *Selcuk Univ. J. Eng. Sci. Tech.*, **2**(2), (in Turkish) (2014).
28. ASTM C 597, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete (2002).
29. S. D. Wang, K. L. Scrivener, Hydration products of alkali activated slag cement. *Cem. Concr. Res.* **25**(3), 561-571 (1995).
30. W. Jiang, M. R. Silsbee, , D. M. Roy, Alkali activation reaction mechanism and its influences on microstructure of slag cement. *Proc. 10<sup>th</sup> ICCG Göteborg*, **3**, 3ii100, (1997).
31. I. G. Richardson, The nature of C-S-H in hardened cements. *Cem. Concr. Res.* **29**(8), 1131-1147. (1999).
32. I. G. Richardson, A. R. Brough, G. W. Groves, C. M. Dobson, The characterization of hardened alkali-activated blast furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (C-S-H) phase. *Cem. Concr. Res.* **24**(5), 813-829 (1994).
33. S. Marinkovic, V. Radonjanin, M. Malesev, I. Ignjatovic, Comparative Environmental Assessment of Natural and Recycled Aggregate Concrete. *Waste Manag.* **30**, 2255–2264. (2010).
34. A. Gruskovnjak, B. Lothenbach, L. Holzer, R. Figi, F. Winnefeld, "Hydration of alkali-activated slag: comparison with ordinary Portland cement", *Adv. Cem. Res.* **18**(3), 119-128 (2006).
35. M. Etxeberria, E. Vázquez, A. R. Marí, Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Mag. Concr. Res.* **58**, 683–690 (2006).