

Wpływ odpadowego pyłu marmurowego zastosowanego jako substytut drobnej frakcji piasku na właściwości mechaniczne betonu

The effects of waste marble dust applying as a fine sand on the mechanical properties of concrete

1. Wprowadzenie

Marmur stosowany jest jako materiał budowlany od starożytności. Zagospodarowanie na skalę przemysłową drobnociarnistego pyłu marmurowego stanowi w skali światowej problem z punktu widzenia ochrony środowiska naturalnego (1). Bloki marmuru tną się na mniejsze fragmenty w celu nadania im pożądanego kształtu. W procesie przycinania i szlifowania około 25% masy przekształca się w pył. W Turcji pył ten jest poddawany sedymentacji i kierowany na wysypiska odpadów, gdzie dochodzi do pylenia, co stanowi zagrożenie dla roślin i organizmów zwierzęcych. Dlatego też utylizacja pyłu w różnych sektorach gospodarki, szczególnie w budownictwie, rolnictwie, przemyśle szklarskim i papierniczym przyczyniłaby się do ochrony środowiska (2).

W budownictwie nie tylko pył marmurowy, ale również inne materiały, takie jak pył krzemionkowy, popiół lotny, pumeks, granulowany żużel wielkopieczowy są powszechnie stosowane jako dodatki mineralne zastępujące cement (3-5). Pył marmurowy może być stosowany do wytwarzania nowych produktów, lub jako domieszka; w ten sposób zasoby naturalne marmuru mogą być wykorzystane bardziej racjonalnie i środowisko będzie chronione przed zanieczyszczeniem odpadem z jego przeróbki (6).

W literaturze spotkać można prace dotyczące właściwości betonów z pyłem marmurowym, czy z odpadowym kruszywem marmurowym, w tym betonów samozagęszczalnych, w których pył pełni funkcję domieszki lub kruszywa drobnociarnistego (piasku) (1, 7-9). Prowadzono badania nad zastosowaniem odpadu z przeróbki marmuru do betonów asfaltowych (2, 10, 11), jako dodatku do cementu (12), jako kruszywa grubego (13) i jako kruszywa drobnego < 1 mm (14).

Pył marmurowy zastępuje w całości frakcję 0-4 mm kruszywa, lub jedynie frakcję < 1 mm. Jednakże nie prowadzono badań właściwości betonu, w którym odpadowy pył marmurowy byłby substytutem bardzo drobnej frakcji piasku (< 0,25 mm).

Badania nad zagospodarowaniem odpadowego pyłu marmurowego, pochodzącego z rejonu bliskiego autorowi pracy, w charakte-

1. Introduction

Marble has been commonly used as a building material since the ancient times. The industry's disposal of the marble powder material, consisting of very fine powder, today constitutes one of the environmental problems around the world (1). Marble blocks are cut into smaller blocks in order to give them the desired smooth shape. During the cutting process about 25% the original marble mass is lost in the form of dust. In Turkey marble dust is settled by sedimentation and then dumped away which results in environmental pollution, in addition to forming dust in summer and threatening both agriculture and public health. Therefore, utilization of the marble dust in various industrial sectors especially the construction, agriculture, glass and paper industries would help to protect the environment (2).

In addition to marble powder, silica fume, fly ash, pumice powder and ground granulated blast furnace slag are widely used in the construction sector as a mineral admixtures instead of cement (3-5).

Marble dust can be used either to produce new products or as an admixture so that the natural sources are used more efficiently and the environment is saved from dumpsites of marble waste (6).

Many studies have been conducted concerning on the performance of the concrete containing waste marble dust or waste marble aggregate, such as its addition into self compacting concrete as an admixture or sand (1, 7-9), as well as its utilization in the mixture of asphaltic concrete (2, 10, 11) and its utilization as an additive in cement production (12), the usage of marble as a coarse aggregate (13) and as a fine aggregate passing through 1 mm sieve (14).

Generally, in literature waste marble dust has been replaced either all of the fine aggregate (0-4 mm) or passing 1 mm sieve. However, not a single study on the performance of the concrete prepared by replacing very fine sand (passing 0.25 mm sieve) with waste marble dust.

The studies concerning the utilization of marble dust, which is obtained as a by-product of marble sawing and shaping proc-

rze frakcji piaskowej kruszywa w betonie zwykłym nie doprowadziły do zadowalających wyników; innymi słowy, konieczne są dodatkowe badania, aby w pełni ocenić potencjalne korzyści związane z zastosowaniem tego materiału.

Dlatego też podjęto badania nad zastosowaniem pyłu jako materiału zastępującego drobnoziarnistą frakcją piasku (ziarna poniżej 0,25 mm), wprowadzanego w ilości odpowiednio 0%, 25%, 50% i 100% masy.

2. Materiały

Sporządzono 4 serie próbek betonu, w tym serię kontrolną, w celu zbadania wpływu odpadowego proszku marmurowego na właściwości betonu, zastępując drobnoziarnistą frakcją piasku (ziarna poniżej 0,25 mm) pyłem w ilości odpowiednio 0%, 25%, 50% i 100% masy.

2.1. Cement

Próbki betonu sporządzono z mieszanki zawierającej cement, który w/g normy ASTM jest cementem I typu; w Turcji jest to cement CEM I 42,5.

2.2. Odpadowy pył marmurowy

Odpadowy pył marmurowy w postaci szlamu pozyskano jako odpad przemysłowy wprost ze składowiska w zakładzie przerobczym. Materiał ten powstaje podczas cięcia, kształtowania i polerowania wyrobów marmurowych w rejonie Elazığ. Wilgotny szlam suszono przed wprowadzeniem do mieszanek. Wysuszony materiał przesiewano przez sito o boku oczka 0,25 mm. Skład chemiczny pyłu marmurowego i cementu podany jest w tablicy 1.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY PYŁU MARMUROWEGO I CEMENTU

CHEMICAL PROPERTIES OF USED MARBLE DUST AND CONCRETE

Składnik Oxide compounds (mass %)	CEM I 42.5	Pył marmurowy Marble dust (Cherry)
SiO ₂	21.12	28.35
Al ₂ O ₃	5.62	0.42
Fe ₂ O ₃	3.24	9.70
CaO	62.94	40.45
MgO	2.73	16.25
Gęstość / Density, (g/cm ³)	3.10	2.79

2.3. Kruszywo

Wszystkie próbki betonu wyprodukowano w oparciu o kruszywa z rejonu Elazığ. Maksymalna wielkość ziaren kruszywa wynosiła 16 mm. Gęstości poszczególnych frakcji kruszywa wynosiły odpowiednio 2780 kg/m³ (frakcja 0–4 mm) i 2730 kg/m³ frakcja

esses in the factories those operating in our region as a fine sand aggregate into the normal strength concrete have not reached a convincing conclusion; in other words, additional studies and investigations are necessary to fully evaluate the potential usages of this waste material.

Therefore, the aim of this current study is both to avoid the environmental pollution and to investigate the usability of the marble dust instead of very fine sand passing through a 0.25 mm sieve at proportions of 0%, 25%, 50% and 100% by weight on the concrete. In this way, we will help to protect the environment by consuming the waste marble dust obtained as a by-product of marble sawing and shaping processes in the factories those operating in our region.

2. Materials

A total of four series of concrete specimens including the control specimen were prepared in order to examine the effect of substituting marble dust (0%, 25%, 50% and 100% by weight) for the fine material (passing through 0.25 mm sieve) on the mechanical properties of concrete.

2.1. Cement

Commercial grades ASTM Type I Portland cement, which produced as CEM I Portland cement (CEM I 42.5) in Turkey was used in order to prepare all concrete specimens.

2.2. Waste marble dust (WMD)

The marble sludge was obtained in wet form as an industrial by-product directly from the deposits of marble factories, which forms during the sawing, shaping, and polishing processes of marble in Elazığ region. The wet marble sludge was dried up prior to the preparation of the samples. The dried material was sieved on 0.25 mm sieve and finally the marble dust was obtained to be used in the experiments. The chemical properties of the marble dust and cement are given in Table 1.

2.3. Aggregate

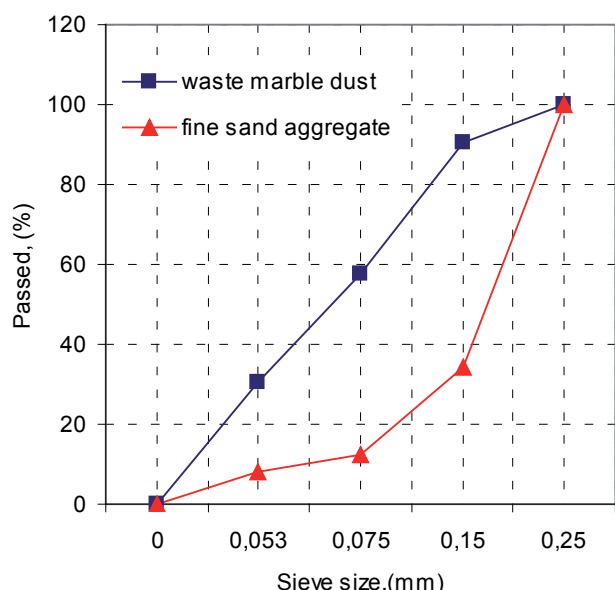
All concrete specimens were produced with coarse and fine aggregates from the province of Elazığ (Turkey). Maximum aggregate size was 16 mm. The density of the 0–4 mm and 4–16 mm aggregates group were 2780 kg/m³ and 2730 kg/m³, respectively. In concrete mix proportioning, aggregates were composed of 53% sand (0–4 mm) and 47% gravel (4–16 mm). Tap water was used as the mixing water during the preparation of the concrete specimens. Table 2 presents the properties of aggregate used at in this study.

Tablica 2 / Table 2

ROZKŁAD WIELKOŚCI ZIARN KRUSZYWA

GRAIN SIZE DISTRIBUTION OF THE AGGREGATE

Średnica Sieve Size, mm	16	8	4	2	1	0.50	0.25
Przesiew Passing, %	100	67	53	44	32	19	10



Rys. 1. Rozkład wielkości ziarn drobnej frakcji piasku i pyłu marmurowego

Fig. 1. Grain size distribution of fine sand aggregate and waste marble dust

(4–16 mm). Przy sporządzaniu mieszanek zastosowano mieszanki kruszywa zawierające 53% piasku (0–4 mm) i 47% żwiru (4–16 mm). W badaniach użyto wody wodociągowej. W tabelicy 2 przedstawiono właściwości kruszyw zastosowanych w pracy.

W analizie sitowej określono udział kruszywa przechodzącego przez sito 0,25 mm na 10% (tabela 2, ostatnia kolumna). Różne ilości odsianej frakcji < 0,25 mm kruszywa (odpowiednio 0%, 25%, 50% i 100% masy) zastępowano pyłem marmurowym; rozkład wielkości ziaren drobnej frakcji piasku i odpadowego pyłu marmurowego pokazano na rys. 1. Cztery różne serie próbek (tabela 3) sporządzono według zaleceń Amerykańskiego Instytutu Betonu (ACI 211.1) (15).

2.4. Skład mieszanek betonowych

W celu określenia takich właściwości betonu, jak wytrzymałość na ściskanie, porowatość, sorpcyjność, UPV wykonano 80 próbek betonów w kształcie kostek 100x100x100 mm; skład mieszanek podano w tabelicy 3. Próbkę w formach przechowywano przez 24 godziny w temperaturze 20°C, a po rozformowaniu pielęgnowano w nasyconej wapnem wodzie w temperaturze 23±1°C. Badania przeprowadzono po 3, 7, 28 i 90 dniach.

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD MIESZANKI BETONOWEJ, kg/m³

DETAILS OF CONCRETE MIXES, kg/m³

Próbka Specimen	Woda Water	Kruszywo drobne Fine aggregate		Kruszywo grube Coarse Aggregate	Cement	Pył marmurowy Marble dust
		(0-0.25 mm)	(0.25-4 mm)	(4-16 mm)		
MD0	255	156	680	725	500	-
MD25	255	117	680	725	500	39
MD50	255	78	680	725	500	78
MD100	255	-	680	725	500	156

As a result of the conducted sieve analysis, the passing percentage of the aggregate passing through 0.25 mm sieve was determined to be 10% (see Table 2 last column). Various proportions (0%, 25%, 50% and 100% by weight) of this sieved material have been substituted with waste marble dust. The grain size distribution of fine sand aggregate and WMD are given in Fig. 1. Four different series presented on Table 3 was prepared according to ACI 211.1 (15).

2.4. Mix proportions

A total of 80 cubic specimens (100x100x100 mm) were prepared in order to determine the properties of the concretes such as compressive strength, apparent porosity, sorptivity and UPV.

Mixtures prepared according to Table 3 were cast in cubic mould. After casting, these specimens were kept in the molds for 24h at room temperature of 20°C. After demolding, these specimens were cured in lime saturated water at 23±1°C for 3, 7, 28 and 90 days.

3. Methods

3.1. Ultrasonic pulse velocity

The ultrasonic pulse velocity value was automatically determined with a device in what duration ultrasonic waves passed from specimens surfaces of which are clean and remained between wave transmitter and receiver nozzles and wave speed was calculated by using equation [1] (16).

$$V = (h / t) \cdot 10^6 \quad [1]$$

where V = ultrasonic wave speed (m/sec), h = distance between the surface of concrete specimen from which the ultrasonic wave is sent and the surface the wave is received (m), t = time passed from concrete surface from which the ultrasonic wave is sent and the surface the wave is received (μ s).

3.2. Sorptivity

After measurement of the UPV values, these three specimens were also used for sorptivity measurement. Measurements of capillary sorption were carried out using specimens pre-conditioned in the oven at about 50°C until constant mass was achieved. Then, the concrete specimens were cooled down to room temperature. One surface of tested specimens were exposed to the water by placing

3. Metody

3.1 Metoda ultradźwiękowa

Prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych mierzono za pomocą zautomatyzowanego betonoskopu, w którym rejestrowano czas przejścia impulsu przez kostkę betonu pomiędzy głowicą nadawczą i odbiorczą, przylegającymi do oczyszczonych ścian próbki. Prędkość rozchodzenia się fali obliczano według wzoru [1] (16):

$$V = (h / t) \cdot 10^6 \quad [1]$$

gdzie V = prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych (m/sec), h = droga impulsu ultradźwiękowego w betonie (m), t = czas przejścia impulsu ultradźwiękowego pomiędzy głowicami (μ s).

3.2. Sorpcyjność

Trzy próbki zastosowane w pomiarach prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych poddano następnie badaniom sorpcyjności. Pomiar sorpcji kapilarnej przeprowadzono po uprzednim wygrzewaniu próbek w piecu w temperaturze około 50°C do stałej masy. Następnie próbki chłodzono do temperatury pokojowej. Jak to pokazano na rys. 1 próbki zostały poddane działaniu wody przez ułożenie w płaskim pojemniku tylko na jednej ścianie. Utrzymywano stały poziom wody w pojemniku, około 5 mm od podstawy kostki. Boki kostki pokryto warstwą parafiny, aby uniknąć niekontrolowanego przepływu wody. Po określonym czasie przechowywania próbki pozostające w kontakcie z wodą ważono, a następnie obliczano ilość wody zaabsorbowanej w przeliczeniu na jednostkę powierzchni przekroju próbki. Pomiar przeprowadzono po 0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 i 1440 min. Badania prowadzono do 28 dnia dojrzewania w celu wyznaczenia współczynnika sorpcyjności (k) z równania:

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad [2]$$

gdzie Q = ilość zaabsorbowanej wody w (cm^3); A = przekrój próbki w kontakcie z wodą (cm^2); t = czas (s) i k = współczynnik sorpcyjności próbki ($\text{cm/s}^{1/2}$). W celu określenia współczynnika sorpcyjności wykreślono zależność Q/A w funkcji pierwiastka kwadratowego z czasu (\sqrt{t}), a następnie wyznaczono k jako współczynnik kierunkowy prostej opisującej zależność pomiędzy Q/A i \sqrt{t} . Metoda ta została zastosowana również w innych pracach (17, 18).

3.3 Porowatość

Porowatość oznaczano dla próbek 100 x 100 x 100 mm korzystając z prawa Archimidesa, na podstawie wzajemnych relacji pomiędzy ciężarem próbki w powietrzu, próbki nasyconej wodą i próbki wysuszonej w temperaturze 105°C do stałej masy. Porowatość obliczano według równania [3]; metoda określania porowatości została wcześniej opisana w pracach (19-22).

$$P = \frac{(W_{sat} - W_{dry})}{(W_{sat} - W_{wat})} 100 \quad [3]$$

them on a pan. The water level in the pan was maintained at about 5 mm above the base of the specimens during the experiment. The lower areas on the sides of the specimens were coated with paraffin to achieve unidirectional flow. At certain times, the mass of the specimens was measured using a balance, then the amount of water absorbed was calculated and normalized with respect to the cross-section area of the specimens exposed to the water at various times such as 0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 and 1440 min. A test was also carried out to determine the sorptivity coefficient of specimens at the 28th day. For each mixture three cubic specimens were prepared. The sorptivity coefficient (k) was obtained by using the following equation:

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad [2]$$

where Q = the amount of water absorbed in (cm^3); A = the cross-section of specimen that was in contact with water (cm^2); t = time (s) and k = the sorptivity coefficient of the specimen ($\text{cm/s}^{1/2}$). To determine the sorptivity coefficient, Q/A was plotted against the square root of time (\sqrt{t}), and then, k was calculated from the slope of the linear relation between Q/A and \sqrt{t} . This method for measuring the capillary absorption of the concrete specimens was also used by (17, 18).

3.3. Porosity

Porosity value was determined on 100 x 100 x 100 mm cubic specimens according to Archimedes principle related to the weights of saturated specimens in air and in water, and the dry weight (oven drying at 105°C to constant weight). The porosity was calculated from equation [3]. This method for measuring the porosity has previously been reported (19-22).

$$P = \frac{(W_{sat} - W_{dry})}{(W_{sat} - W_{wat})} 100 \quad [3]$$

3.4. Dynamic modulus of elasticity

The dynamic modulus of elasticity of the specimens was calculated with the following formula (16,23):

$$E_d = \frac{V^2 n(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} (10^{-6}) \quad [4]$$

where μ = poisson, n = unit weight (kg/m^3) and V = ultrasonic pulse velocity (m/s).

3.5. Compressive Strength

The values of unit weight, porosity, sorptivity, UPV and dynamic modulus of elasticity of the specimens were determined before the compressive strength test at the 28th day.

Five specimens for each series were used for the determination of the compressive strength according to ASTM C39 (24). The compression load was applied at a rate of 3kN/s by using a compression machine with a capacity of 3000 kN. All results have been discussed in section below.

3.4. Moduł sprężystości

Moduł sprężystości próbek był obliczany w oparciu o następujące równanie (16, 23):

$$E_d = \frac{V^2 n(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} (10^{-6}) \quad [4]$$

gdzie μ = liczba Poissona, n = gęstość objętościowa betonu (kg/m^3) i V = prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych (m/s).

3.5. Wytrzymałość na ściskanie

Wartości gęstości objętościowej betonu, porowatości, sorpcyjności, prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych i modułu sprężystości oznaczano przed badaniami wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach twardnienia.

Badaniom wytrzymałości na ściskanie według normy ASTM C39 (24) poddawano po pięć próbek z każdej serii. Szybkość wzrostu obciążenia wynosiła 3kN/s, zastosowano prasę o zakresie 3000 kN. Omówienie wyników zostanie przedstawione poniżej.

4. Omówienie wyników badań

Wyniki przedstawione w tabelicy 4 wskazują, że ze wzrostem zawartości pyłu marmurowego zwiększa się gęstość objętościowa betonu. Jest to tendencja spodziewana, z uwagi na większy ciężar właściwy pyłu marmurowego niż kruszywa drobnego.

Można zauważyć, że wytrzymałość na ściskanie wzrasta ze zwiększeniem udziału pyłu. Wzrost ten wynosi w przybliżeniu 10% i 5% odpowiednio po 28 i 90 dniach dla próbki MD100 w porównaniu z MD0 (bez pyłu). Można to wytłumaczyć zmniejszeniem udziału pyłu w kształtowaniu wytrzymałości po długim czasie twardnienia. Wartości odchylenia standardowego podane w tabelicy 4 świadczą o dokładności danych doświadczalnych.

Zmiana wytrzymałości na ściskanie z czasem twardnienia jest lepiej widoczna na rys. 2 dla wszystkich serii próbek. Najwyższe war-

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNE PRÓBEK

RESULTS OF MECHANICAL AND PHYSICAL TESTS OF THE SPECIMENS

Oznaczenie Code	f_c , MPa				Gęstość objętościowa Unit weight, kg/m^3	Porowatość Porosity %	Sorpcyjność Sorptivity $\text{cm/s}^{1/2}$	E_{din} , GPa	UPV, Km/sec
	3d	7d	28d	90d					
MD0	14.32 (1.67)*	35.5 (1.95)	48.68 (1.96)	60.51 (1.48)	2235	7.125	1.256	36.03	4,233
MD25	15.8 (1.88)	35.54 (2.24)	50.25 (2.64)	61.44 (2.29)	2252	7.085	1.189	41.45	4,521
MD50	17.66 (2.03)	36.43 (3.75)	50.69 (3.12)	61.50 (3.35)	2284	6.729	1.162	43.35	4,592
MD100	21.46 (1.58)	38.97 (2.23)	53.39 (2.11)	63.30 (2.21)	2305	6.596	1.124	45.01	4,658

* W nawiasie - odchylenie standardowe

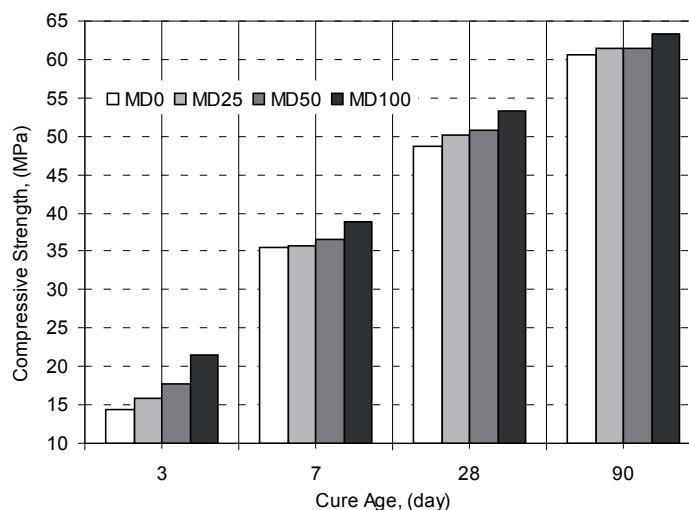
* The value in the parentheses is standard deviations

4. Results and discussion

The results given in Table 4 indicate that as the amount of the WMD in the concretes increase, the unit weights of the specimens increase. This is an expected outcome since specific gravity of WMD is higher than fine aggregate. Therefore the unit weight of concretes increases as the percentage of WMD content increases.

It is seen that from Table 4 that compressive strength have increased with the increase of WMD content. These increases for MD100 were approximately 10% and 5% at 28 and 90 days, respectively, compared to the MD0 (without WMD). It is explained that as curing time increases, the WMD's contribution to the compressive strength decreases. Despite the increase in compressive strength at lower level, the standard deviation values given in Table 4 support the accuracy of the experimental data.

The change on the compressive strength with increasing time can be better seen in Fig. 2, for all series. The highest compressive strength at curing ages of 3, 7 28 and 90 days has been exhibited



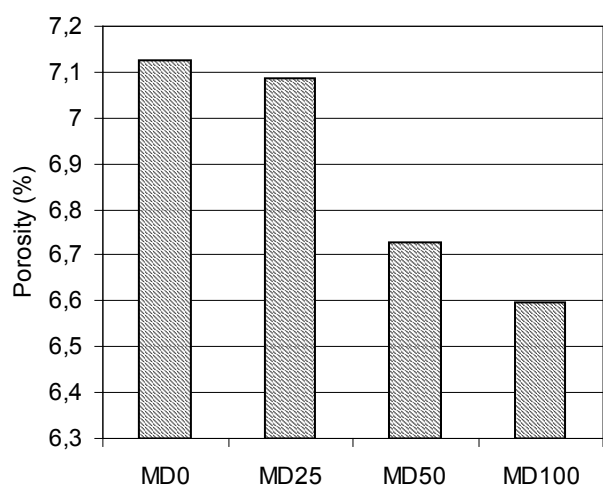
Rys. 2. Zmiany wytrzymałości na ściskanie w funkcji czasu

Fig. 2. Change of the compressive strength after different curing age

tości wytrzymałości na ściskanie po 3, 7 28 i 90 dniach wykazują próbki serii MD100. Podobne wyniki przedstawił Binici i wsp. (14).

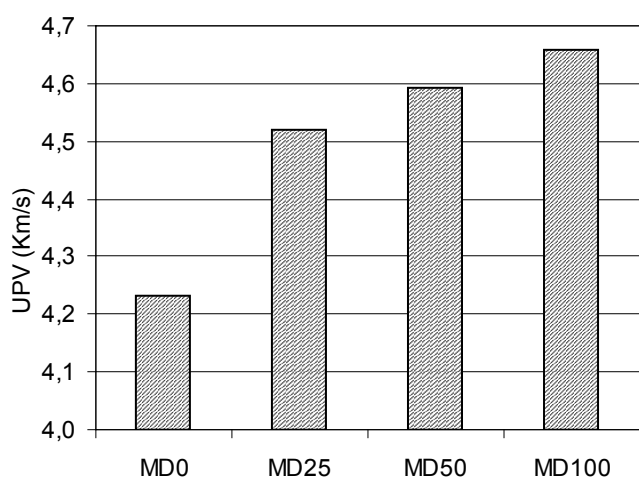
W przypadku gdy pył marmurowy zastosowano w charakterze substytutu cementu, zwiększenie dodatku pyłu skutkowało zmniejszeniem wytrzymałości (25). Türker i wsp. (26) stwierdzili, że jest to wynikiem zmniejszenia ilości C_2S i C_3S , które są głównymi składnikami cementu kształtującymi jego wytrzymałość. Ale w prezentowanej pracy użyto pyłu jako zamiennika drobnej frakcji piasku ($< 0,25mm$), a nie cementu i jak można stwierdzić na podstawie zestawienia wyników w tabelicy 4 wytrzymałość na ściskanie była coraz większa ze wzrostem zawartości dodatku, w całym zakresie czasowym objętym badaniami.

Na rys. 3 i 4 zobrazowano zmiany porowatości i prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w funkcji zawartości pyłu. Porowatość zmniejsza się, natomiast prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych wzrasta ze wzrostem dodatku. Jak podawano wcześniej (27), pył marmurowy działa jako wypełniacz zmniejszający porowatość. Wyniki przedstawione na rys. 3 i 4 wyjaśnia-



Rys. 3. Porowatość

Fig. 3. Porosity values of series



Rys. 4. Prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych

Fig. 4. UPV values of series

by MD100. Similar results have been reported earlier by Binici et al. (14).

In cases where the marble dust has been used as a substitute for cement at equal weights, an increase in amount of added marble dust decreases the compressive strength (25). Türker et al. (26), have stated that this decrease arises from the diminution of C_2S and C_3S , which are the main constituents and strength providers of cement, by the marble dust additive. But in this work, since the marble dust has replaced the fine sand aggregate (passing through a 0.25 mm sieve) instead of the cement, as also shown in Table 4, increase of the compressive strength have been recorded, rising with higher percentage marble dust additions at all curing ages.

Fig. 3 and 4 show the changes of the porosity and UPV with the usage of marble dust, respectively. In Fig. 3 and 4, the porosity of the concrete decreased and its UPV increased with increasing percentages of marble dust additions. As mentioned in the literature, the filler effect of marble dust on cement hydration is associated with the reduction of the porosity (27). These two figures provide support for the compressive strength values of the samples.

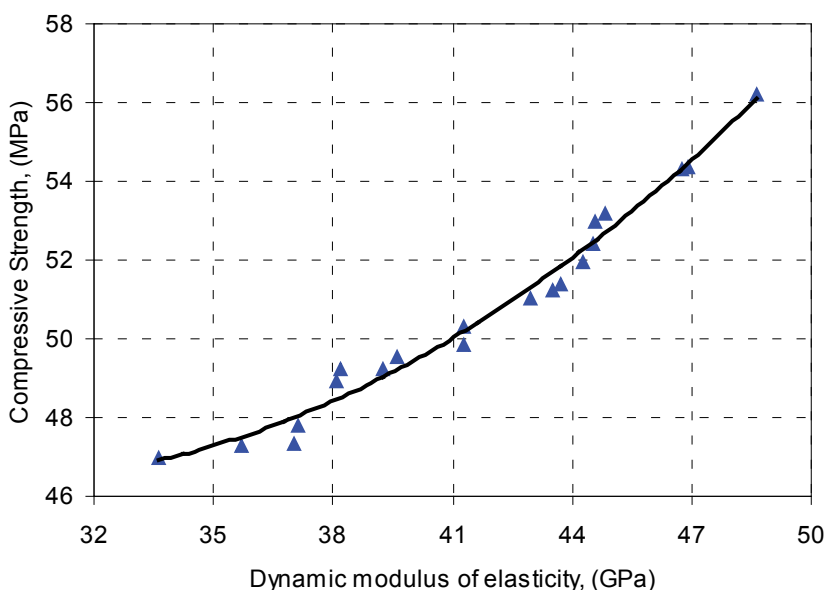
In addition, as can be seen from Table 4, the sorptivity coefficient of the concrete also has been decreased with the increase in WMD content. Similar findings have been reported earlier by Topcu et al. (22) and Türkmen and Kantarcı (28). Again in Table 4, sorptivity coefficient of the concrete has decreased with increasing compressive strength. This finding is in accordance with the literature. Taşdemir (17) reported that the sorptivity coefficient of concrete decreases slightly with increasing compressive strength. Again, Topcu et al. (22) reported that concrete has lower compressive strength as a result of the higher capillarity coefficient obtained for self compacting concrete.

UPV values were used for calculating dynamic modulus of elasticity of the specimens. The relationship between compressive strength and dynamic modulus of elasticity of the series at 28 days is shown in Fig. 5.

The histogram on Fig.5 t shows the positive correlation between elasticity modulus and compressive strength (29). At the end of the regression analysis, equation of the curve and regression coefficient (R^2) is determined as $y = 0,0251x^2 - 1,4546x + 67,426$ and 0.9797, respectively.

In this equation, y refers to compressive strength and x refers to dynamic modulus of elasticity. When the value of dynamic modulus of elasticity calculated from non-destructive test is known, the compressive strength values can be calculated by using this equation.

In Table 4, it is seen that the highest elasticity modulus has been obtained for the MD100 sample possessing the highest compressive strength and highest unit weight. This finding is in accordance with the literature. Topcu and Isikdag (23), reported that concrete has higher modulus of elasticity as a result of the higher compressive strength.



Rys. 5. Moduł sprężystości w funkcji wytrzymałości na ściskanie

Fig. 5. Relationship between compressive strength and dynamic modulus of elasticity

ją więc wpływ pyłu na wzrost wytrzymałości na ściskanie badanych próbek z pyłem.

Z danych przedstawionych w tabelicy 4 wynika również, że współczynnik sorpcyjności betonu maleje ze wzrostem zawartości pyłu marmurowego. Podobne spostrzeżenia można znaleźć w publikacjach Topcu i wsp. (22) oraz Türkmena i Kantarcı (28). W tabelicy 4 można również odczytać, że malejącemu współczynnikowi sorpcyjności betonu odpowiada większa wytrzymałość na ściskanie, co pozostaje w zgodności z danymi literaturowymi. Według Taşdemir (17) współczynnik sorpcyjności betonu nieznacznie maleje ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie. Z kolei w cytowanej już pracy Topcu i wsp. (22) stwierdzili, że beton samozagęszczalny wykazuje mniejszą wytrzymałość na ściskanie w wyniku wyższej kapilarności.

Moduł sprężystości próbek obliczano na podstawie prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych; zależność pomiędzy tymi wielkościami, pokazana jest na rys. 5 dla serii po 28 dniach twardnienia.

Rys. 5 wskazuje również na dodatnią korelację modułu sprężystości i wytrzymałości na ściskanie (29). Przeprowadzono w oparciu o te dane analizę regresji i sformułowano równanie krzywej regresji, które ma postać: $y = 0,0251x^2 - 1,4546x + 67,426$, jak również określono współczynnik regresji R^2 jako wynoszący 0,9797.

W równaniu tym y odnosi się do wytrzymałości na ściskanie, a x do modułu sprężystości. Gdy znana jest wartość modułu sprężystości obliczona na podstawie badań nieniszczących betonu można, stosując to równanie, obliczyć wartości wytrzymałości na ściskanie.

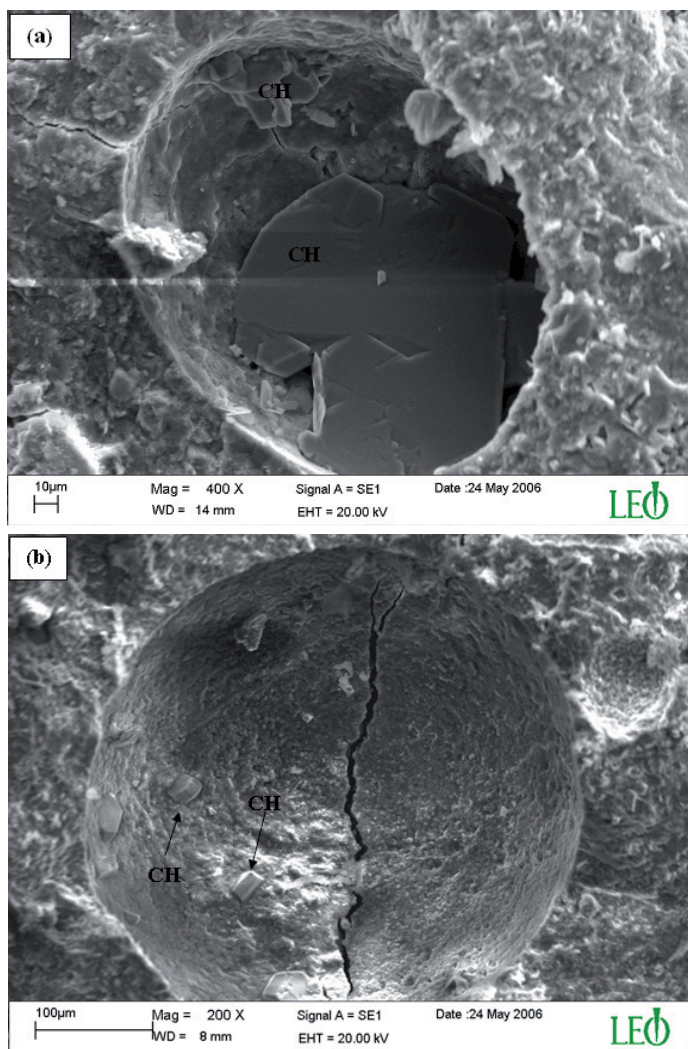
Z danych przedstawionych w tabelicy 4 wynika, że największą wartość modułu sprężystości wykazuje próbka MD100, charakteryzująca się też największą wytrzymałością i ciężarem właściwym, co pozostaje w zgodności z danymi literaturowymi. Podobne spostrzeżenia można znaleźć w pracy Topcu i Isikdag (23).

Two scanning electron microscope (SEM) micrographs illustrating the microstructure characteristics of some specimens are shown in Fig. 6. As observed by the SEM, the CH morphology in specimens with and without WMD are different. Large crystals of CH have crystallized in the fissures and large pores (Fig. 6a). This kind of large CH crystals were only observed in the specimen produced without WMD (MD0). On the other hand, the CH crystals with smaller size are well dispersed into the matrix of the WMD added specimen (MD50), (see Fig. 6b). This situation can be explained by the filler effect of limestone in the concrete (26). It can be stated that the use of marble dust effectively decreases the porosity of hardened concrete. As a result, CH, which is one of the most important compounds in cement paste, has no space to grow to larger sizes. Thus in the WMD added specimens, the CH crystals were only observed in the concrete in a scattered and small size.

5. Conclusions

On the basis of the experimental results presented in this paper, the following conclusions can be drawn:

- The test results indicated that the unit weight of the concrete increased as a result of the fact that certain proportions of WMD had been added to the concrete as very fine aggregate substitutes. This is an expected outcome due to the high specific gravity of WMD.
- Compressive strength of the concrete has increased with increasing percentages of marble dust additions at all curing ages. The highest compressive strength has MD100 specimen, especially at early curing ages.
- The concrete series with WMD as the substitute of the very fine aggregate passing through 0.25 mm sieve performed better than the series without addition of marble dust in terms of compressive strength. As a matter of fact marble dust both had a filler effect (particularly important at early ages) and played a noticeable role in the hydration process. Noting that the proportion of cement is kept constant at each series, it is an expected outcome that an enhancement in the mechanical and physical properties has taken place by virtue of the marble dust's contribution to the hydration process.
- The porosity of the concrete decreased and UPV increased with increasing percentage of marble dust additions. As mentioned in the literature, the filler effect of marble dust on cement hydration is associated with the reduction of the porosity. It can be stated that usage of marble dust effectively decreases the porosity of the hardened concrete. Furthermore, the highest dynamic modulus of elasticity has been obtained from the MD100 sample having the highest compressive strength.
- The SEM investigations indicated that $Ca(OH)_2$ morphology in specimens with and without WMD are different from each



Rys. 6. Zdjęcia SEM próbek MD0 (a) i MD50 (b)

Fig. 6. SEM micrographs of MD0 (a) and MD50 (b)

Na rys. 6 pokazano kilka zdjęć dokumentujących obserwacje mikrostruktury wybranych próbek za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego. Jak można zauważyć, mikrostruktura $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w próbkach z dodatkiem pyłu różni się od mikrostruktury w próbce bez dodatku. W próbkach bez dodatku pyłu (MD0) gromadzą się, w szczelinach i dużych porach, kryształy CH sporych rozmiarów (rys. 6a). Z kolei w próbce z pyłem (MD10) drobne kryształy CH są równomiernie rozproszony w matrycy cementowej, co jest widoczne na rys. 6b. Można to wyjaśnić działaniem dodatku jako wypełniacza (26). Wcześniej stwierdzono, że zastosowanie pyłu marmurowego prowadzi do zmniejszenia porowatości. W wyniku tego kryształy CH, który jest ważnym składnikiem zaczynu, nie mają miejsca, aby swobodnie wzrastać do dużych rozmiarów. I dlatego w próbkach z dodatkiem pyłu znajduje się jedynie drobne, rozproszone kryształy CH (rys. 6b).

5. Wnioski

Na podstawie zaprezentowanych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

other. While large crystals in the samples without replacement of the very fine aggregate with WMD in the series of specimens in which fine sand material have been replaced by WMD, the CH crystals are small and dispersed through the matrix. The differences between the appearances of CH crystals verify the fact that the marble dust has also played a noticeable role during the hydration process.

The results of this study show that, WMD can be used to improve the mechanical and physical properties of the conventional concrete. The possibility of utilizing WMD as an alternative very fine aggregate in the production of concrete will also induce a relief on waste disposal issues.

In future studies, we think that it would be worthwhile to investigate the effects of elevated temperatures on the mechanical properties of the concretes containing WMD admixtures.

Acknowledgement

The author would like to acknowledge Assoc. Prof. Dr. Salih Yazicioglu of the Technical Education Faculty Construction Department of the Firat University, for reading the paper in draft and for his helpful suggestions.

Literatura / References

1. V. Corinaldesi, G. Moriconi, T. R. Naik, Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 24, 113-117 (2010).
2. M. Karasahin, S. Terzi, Evaluation of marble dust in the mixture of asphaltic concrete. *Construction and Building Materials*, 21, 616-620 (2007).
3. B. Demirel, S. Yazicioğlu, Thermoelectric behavior of carbon fiber reinforced lightweight concrete with mineral admixtures, *New Carbon Materials*, 23(1), 21-24 (2008).
4. B. Demirel, S. Yazicioğlu, The effect of silica fume on the mechanical properties of carbon fiber reinforced lightweight concrete. *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 11(1), 103-109 (2007).
5. S. Yazicioğlu, B. Demirel, The effect of the pumice of Elazig region used as pozzolanic additive on the compressive strength of concrete in increasing cure ages. *Science and Engineering Journal of Firat University*, 18(3), 367-374 (2006) (in Turkish).
6. M. S. Hameed, A. S. S. Sekar, Properties of green concrete containing quarry rock dust and marble sludge powder as fine aggregate. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(4), 83-89 (2009).
7. K. E. Alyamac, R. Ince, A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction and Building Materials*, 23, 1201-1210 (2009).
8. E. Güneysi, M. Gesoglu, E. Özbay, Effects of marble powder and slag on the properties of self compacting mortars. *Materials and Structures*, 42, 813-826 (2009).
9. O. Unal, T. Uygunoglu, Investigation of mechanical properties of waste marble dusty concrete which under the effect of freeze and thaw. *Turkey 4th Marble Symposium*, 147-157, December 2003.
10. H. Akbulut, C. Gürer, Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. *Building and Environment*, 42, 1921-1930

- Wyniki badań wykazują, że gęstość objętościowa betonu wzrasta w wyniku wprowadzenia pyłu marmurowego jako materiału zastępującego drobnoziarnistą frakcją piasku (ziarna poniżej 0,25 mm), co jest efektem spodziewanym z uwagi na dużą gęstość tego dodatku.
- Wytrzymałość betonu na ściskanie wzrasta ze wzrostem zawartości dodatku, w całym zakresie czasowym objętym badaniami. Najwyższe wartości wytrzymałości na ściskanie wykazują próbki serii MD100, zwłaszcza po krótkim czasie dojrzewania.
- Serie próbek betonu, w których zastąpiono drobnoziarnistą frakcją piasku (ziarna poniżej 0,25 mm) wykazują lepsze właściwości wytrzymałościowe niż serie bez dodatku. Pył marmurowy działa jako wypełniacz, co jest szczególnie istotne w początkowym okresie twardnienia, jak również uczestniczy w procesie hydratacji. Przy stałej zawartości cementu w betonach udział pyłu w procesie hydratacji skutkuje polepszeniem fizykomechanicznych właściwości materiałów.
- Porowatość betonów zmniejsza się, natomiast prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych wzrasta ze wzrostem dodatku pyłu marmurowego. Zgodnie z wcześniej publikowanymi danymi działanie pyłu jako wypełniacza zmniejsza porowatość stwardniałego betonu. Najwyższą wartość modułu sprężystości wykazuje próbka MD100, która również odznacza się najwyższą wytrzymałością.
- Obserwacje pod elektronowym mikroskopem skaningowym wykazują, że mikrostruktura Ca (OH)₂ w próbkach z dodatkiem pyłu różni się od mikrostruktury w próbce bez dodatku. Duże, kryształy CH gromadzące się w szczelinach i dużych porach obecne są w próbkach bez dodatku pyłu, podczas gdy w próbce z pyłem dodawanym jako materiał zastępujący drobnoziarnistą frakcją piasku drobne kryształy CH są równomiernie rozproszony w matrycy cementowej. Wyniki te potwierdzają aktywną rolę pyłu w procesie hydratacji.

Wyniki badań pokazują, że odpadowy pył marmurowy może modyfikować właściwości fizykomechaniczne betonu zwykłego. Możliwość zastosowania pyłu marmurowego w technologii betonu wpisuje się również w problematykę zagospodarowania odpadów.

W przyszłości autor zamierza zbadać wpływ temperatury na właściwości betonu z pyłem marmurowym.

Podziękowania

Autor składa podziękowania Assoc. Prof. Dr. Salih Yazicioglu z Technical Education Faculty Construction Department Firat University za dyskusje pomocne przy opracowaniu manuskryptu.

(2007).

11. H. Binici, T. Shah, O. Aksogan, H. Kaplan, Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*, 208, 299-308 (2008).
12. H. Y. Aruntas, M. Gürü, M. Dayı, İ. Tekin, Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. *Materials and Design*, 31(8), 4039-4042 (2010).
13. K. Wu, B. Chen, W. Yao, D. Zhang, Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1421-1425 (2001).
14. H. Binici, H. Kaplan, S. Yilmaz, Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. *Scientific Research and Essay*, 2(9), 372-379 (2007).
15. ACI 211.1. Standard practice for selecting proportions for normal, heavy-weight and mass concrete. *ACI Manual of Concrete Practice*, 38 (1993).
16. T. Erdogan, *Concrete*, METU Press, 741 (2003) (in Turkish).
17. C. Tasdemir, Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, 1637-1642 (2003).
18. İ. Türkmen, Influence of different curing conditions on the physical and mechanical properties of concretes with admixtures of silica fume and blast furnace slag, *Materials Letters*, 57(29), 4560-4569 (2003).
19. T. Gonen, S. Yazicioglu, The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete, *Building and Environment*, 42, 3080-3085 (2007).
20. V. G. Papadakis, M. N. Fardis, C. G. Veyenas, Hydration and carbonation of pozzolanic cements, *ACI Mater. J.*, 89(2), 119-130 (1992).
21. J. A. Rossignolo, M. V. Agnesini, Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 375-380 (2004).
22. İ. B. Topcu, T. Bilir, T. Uygunoglu, Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 1947-1953 (2009).
23. İ. B. Topcu, B. Isikdag, Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *Journal of Materials Processing Technology*, 204, 34-38 (2008).
24. ASTM C39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, *Annual Book of ASTM Standards* (1994).
25. S. Valls, A. Yagüe, E. Vazquez, C. Mariscal, Physical and mechanical properties of concrete with added dry sludge from a sewage treatment plant. *Cement and Concrete Research*, 34, 2203-2208 (2004).
26. P. Türker, B. Erdogan, K. Erdogdu, Influence of marble powder on microstructure and hydration of cements. *Cement and Concrete World*, 7(38), 50-62 (2002).
27. P. Kristulovic, N. Kamenic, K. Popovic, A new approach in evaluation of filler effect in cement. *Cement and Concrete Research*, 24(4), 721-727 (1994).
28. İ. Türkmen, A. Kantarcı, Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of selfcompacting concrete. *Build Environ*, 42(6), 2378-2383 (2007).
29. İ. B. Topcu, *Statistics in Civil Engineering*, Eskişehir, 153 (2006) (in Turkish).