

Wykorzystanie odpadów przemysłowych w produkcji przyjaznego dla środowiska betonu

Utilization of industrial waste for green concrete

1. Wprowadzenie

Różne grupy zawodowe, a mianowicie inżynierowie, architekci, nauki stosowane i inni specjaliści rozpatrują środowisko z różnej perspektywy. Jako podgrupa wymienionych zawodów, specjaliści zajmujący się materiałami i ochroną środowiska będą przede wszystkim rozpatrywać wpływ materiałów budowlanych z punktu widzenia zrównoważonego rozwoju (18). W celu zmniejszenia niekorzystnego wpływu emisji CO₂ na atmosferę ziemi Europejska Rada do spraw zrównoważonego rozwoju podjęła inicjatywę popierającą uwzględnienie zrównoważonego rozwoju w produkcji cementu i wprowadzenie wskaźników charakteryzujących te zmiany (8).

Beton pozostanie głównym materiałem do prowadzenia prac budowlanych z zakresu infrastruktury na całym świecie w XXI wieku (5). Wprowadzenie zasad zrównoważonego rozwoju opartego na rozwoju korzystnych dla środowiska materiałów cementowych stworzyło zapotrzebowanie na dobre surowce, które zmniejszą zużycie energii i emisję CO₂ (19). Zainteresowanie budzą teraz odpady przemysłowe mające właściwości puzolanowe, do których należą przede wszystkim popioły lotne i granulowany żużel wielkopiecowy (7, 10, 14). Jest bardzo dużo cytowań literatury w artykułach na ten temat. Wykorzystanie tych odpadów do produkcji innych materiałów zmniejszy oczywiście zanieczyszczenie środowiska. Najbardziej popularnymi odpadami przemysłowymi są popioły lotne, których ilość na świecie wynosi około 600 milionów ton (2, 10); w Turcji jest ich około 14 milionów ton (12, 17).

Popioły lotne są ubocznym produktem spalania pyłu węglowego z węgla brunatnych i kamiennych w elektrowniach; unoszone z gazami cząstki są wytrącane w elektrofiltrach, filtrach workowych lub w skruberach. Te cząstki mają kształt kulisty i ich wymiary zawarte są w przedziale 1-150 μm (3, 4). Norma ASTM C618 wyróżnia klasy popiołów lotnych F i C (3). W przypadku, gdy suma SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ w popiele ze spalania węgla kamiennego jest większa od 70%, jest on zaliczany do klasy F. Jeżeli ta suma w popiele ze spalania węgla brunatnego jest w przedziale od 50 – 70% zalicza się go do klasy C. Większość popiołów lotnych klasy C ma

1. Introduction

Different professions, such as engineering, architecture, applied sciences and other specialisations assess the environment from different perspectives. As a subgroup of the professions mentioned, materials and environmental engineers deal with the effects of building materials on sustainability (18). In order to reduce the detrimental effects on the Earth's atmosphere such as the greenhouse effect and volatile emissions, The World Board of Commerce for Sustainable Development has taken the initiative to encourage cement sustainability to improve environmental management of cement production and the implementation of specific sustainability management indicators for this industrial activity (8).

Concrete will remain the primary component of infrastructure throughout the world in the 21st century (5). Once the sustainable solutions based on green cementitious materials are developed, the need for valuable raw materials will be reduced together with energy consumption and greenhouse gas emissions (19). Researchers now pay more attention to industrial waste products that exhibit pozzolanic features. These are, for example, fly ash and granulated blast-furnace slag (14, 10, 7). Utilizing these materials in the production of building materials will obviously help to decrease the amount of environmental pollution. Fly ash is the common industrial waste and is generated approximately 600 million tons throughout the world (2, 10); in Turkey, it is about 14 million tons (17, 12).

Fly ash is a by-product of the combustion of pulverized coals such as lignite and bituminous coals in power plants; fine particles are captured in electrostatic precipitators, baghouses and wet scrubbers. These particles are of a spherical form with diameters between 1-150 μm (3, 4). ASTM C 618 (3) classifies fly ashes as Class F and Class C. When the total amount of SiO₂+Al₂O₃+FeO₃, in fly ash from bituminous coal burning, is larger than 70%, it is referred to as Class F. If the same chemical composition, obtained from the burning of lignite or subbituminous coal, is between 70%-50%, then it is referred to as Class C. Most Class C fly ashes have also self-cementing properties. In addition, the amount of CaO is

właściwości hydrauliczne. Dodatkowo zawartość CaO jest także znaczna; jeżeli jest ona większa od 10% taki popiół jest nazywany wysoko wapniowym (klasa C), lub nisko wapniowym (klasa F). Popioły lotne stosowane do produkcji cementu lub betonu mogą poprawić właściwości techniczne produktu finalnego, niezależnie od korzyści ekonomicznych i ekologicznych. Dodanie popiołów lotnych do betonu poprawia wytrzymałość po długim okresie twardnienia i trwałość w przypadku eksploatacji w trudnym środowisku (11). Popioły lotne ze względu na kulisty kształt cząstek polepszają konsystencję oraz ułatwiają układanie i zagęszczanie betonu. Najdroższym składnikiem betonu jest cement; jeżeli jego część zostaje zastąpiona popiołem lotnym zmniejsza to w pewnym stopniu koszt betonu (9, 11, 16).

W pracy zbadano wpływ dodatku popiołów lotnych z trzech elektrowni zastępujących w różnym stopniu cement w betonie na jego mechaniczne właściwości po 7, 28 i 90 dniach twardnienia.

2. Materiały i metody

Program doświadczeń obejmował zbadanie właściwości materiałów stosowanych do wytwarzania próbek betonu oraz ilość dodatku, a także właściwości mieszanki betonowej obejmujące rozpyły, gęstość i zawartość powietrza, a w przypadku betonu wytrzymałość na ściskanie i zginanie.

2.1. Materiały

W doświadczeniach stosowano następujące materiały: cement portlandzki CEM I, naturalne kruszywo, piasek i wodę wodociągową

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY I WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE POPIOŁÓW LOTNYCH
CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF THE FLY ASHES

Tlenki Component	AFA	CFA	YFA	ASTM C 618	
				Klasa F Class F	Klasa C Class C
Skład chemiczny/ Content, mass %					
SiO ₂	18.08	46.74	52.14	-	-
Al ₂ O ₃	8.90	14.42	21.10	-	-
Fe ₂ O ₃	3.27	9.24	5.88	-	-
S+A+F	30.45	70.13	79.12	> 70	> 50
CaO	48.68	13.36	10.25	-	-
MgO	2.24	5.26	2.36	< 5	< 5
K ₂ O	0.35	1.98	2.63	-	-
Na ₂ O	0.18	2.13	2.41	< 1.50	< 1.50
SO ₃	14.78	6.00	1.44	< 5	< 5
Straty prażenia, % LOI, %	3.25	0.54	0.50	< 12	< 6
Właściwości fizyczne/ Physical properties					
Gęstość/Density, g/cm ³	2.72	2.44	2.48	-	-
Miałkość/Blaine fineness, cm ² /g	2700	2130	2750	-	-
Aktywność pucolanowa Pozzolanic activity	50	62.5	61	-	-

also important; if CaO content is higher than 10%, then it is called high-calcium fly ash (Class C), or low-calcium fly ash (Class F). When utilized in cement and concrete manufacturing, fly ashes may improve technical properties of the final product in addition to the economical and ecological benefits. Employing fly ashes in concrete increases the late strength values and improves the durability in harsh environments (11). Fly ashes, owing to the spherical shape of their particles, provide consistency, easy placement and compaction of fresh concrete. Cement is the most expensive constituent of the concrete; if some part of it is replaced by fly ash, then the cost of concrete might be somewhat lowered (11, 9, 16).

In this study, waste fly ashes from three different power plants were used to replace cement in varying ratios and the effects of replacement on the mechanical properties of concrete after 7, 28 and 90 days of curing were investigated.

2. Materials and experimental methods

The experimental program involved firstly the examination of raw materials properties used in manufacturing of the concrete specimens along with mixture proportioning; then, the quality control tests of fresh concrete covering slump, density and air content and, finally, the compressive and flexural strengths of hardened concrete samples were also measured.

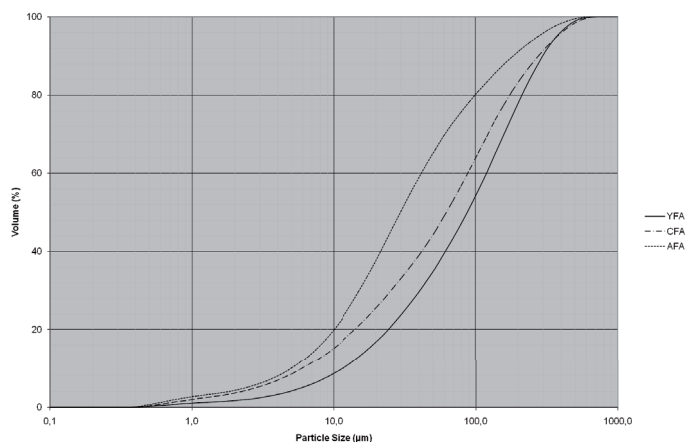
2.1. Materials

The following materials were used in this study: Portland cement CEM I, tap water, natural coarse aggregates, fine aggregate and fly ashes from Afsin-Elbistan (AFA), Cayirhan (CFA) and Yatagan (YFA) power plants. Chemical and physical properties of these fly ashes were determined by Ankara Cement Factory and are given in Table 1.

The cumulative curves for the particle size distribution of fly ashes are depicted in Fig. 1. Scanning electron micrographs of AFA, CFA, YFA fly ashes are shown in Fig. 2. and the X-ray diffraction patterns of AFA, CFA, YFA in Fig. 3.

2.2. Test samples and mixture properties

The concrete mixture was prepared in accordance with the Turkish Standard TS 802 (1). The composition of the mixtures is given in Table 2. The fly ashes CFA and YFA were class F fly ashes, but AFA has much higher SO₃ and CaO content. This ash is the high calcium fly ash with high content of anhydrite. Mixture proportioning per a cubic meter, was: 315 kg of cement, 722 kg of fine aggregate, 1126 kg of coarse aggregate, and 175



Rys. 1. Rozkład ziarnowy popiołów

Fig. 1. Particle size distribution of AFA, CFA and YFA fly ashes

oraz popioły lotne z trzech elektrowni: AFA, CFA i YFA. Skład chemiczny i właściwości fizyczne tych popiołów podano w tablicy 1.

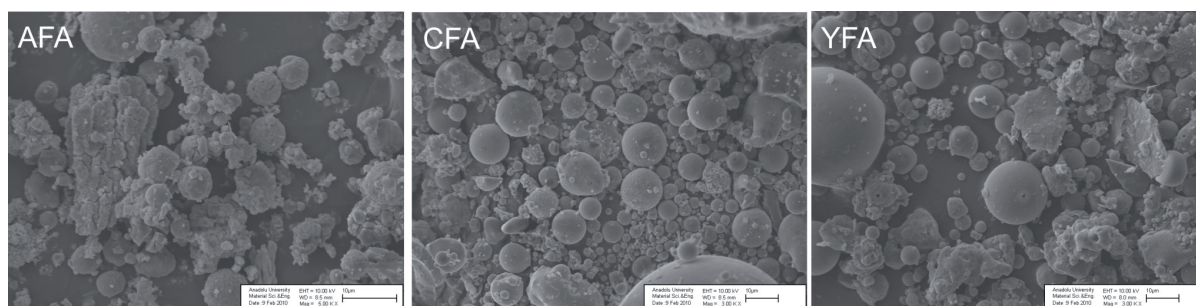
Krzywe kumulacyjne rozkładu ziarnowego tych popiołów pokazano na rysunku 1, a na rysunku 2 zdjęcia tych popiołów pod mikroskopem elektronowym, natomiast na rysunku 3 ich rentgenogramy.

kg of water with a w/c ratio of 0.53. According to the Turkish Standard TS 802, cylindrical samples of 150 x 300 mm and prismatic of 100 x 100 x 500 mm were cast from each mixture to determine the compressive and flexural strengths of hardened concrete; three specimens were used for strength measurements after each curing period. The specimens were demoulded after 24 hours and cured in lime-saturated water at 20±2 °C for 7, 28 and 90 days.

3. Results and discussion

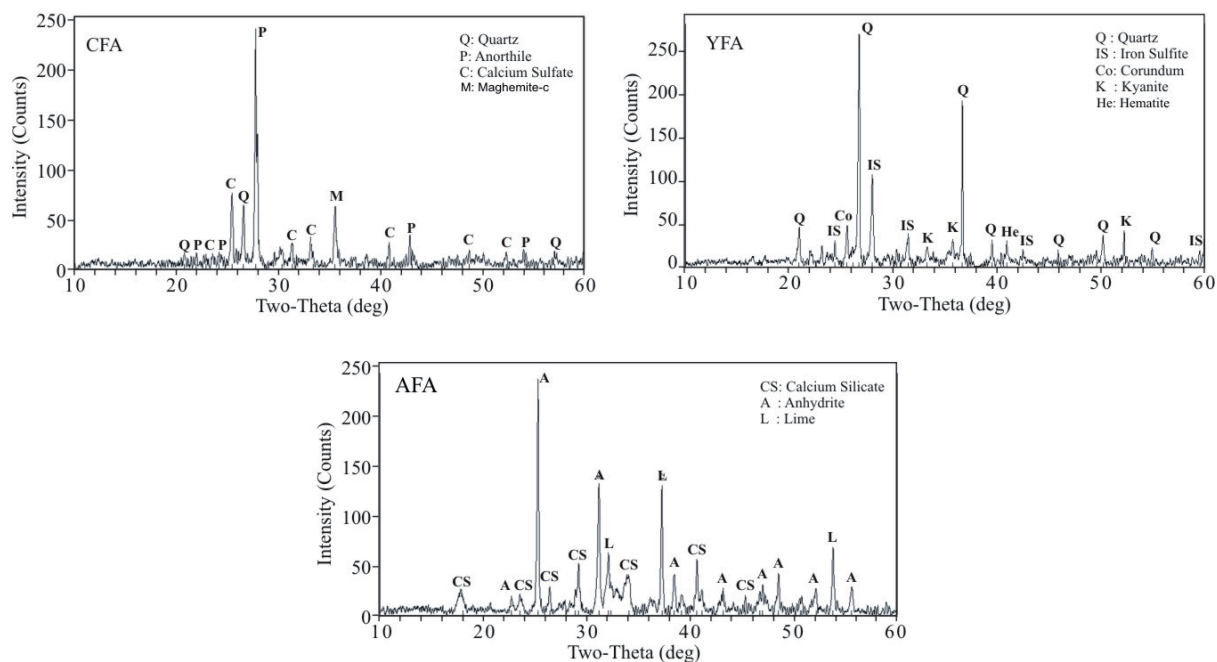
3.1. Concrete mixtures

The composition and results of measured concrete mixtures properties, i.e. slump, density and entrapped air, are given in Table 2. As it can be seen, the slump decreased parallel with the addition of fly ash. This decrease might be probably attributed to the volume increase of the paste due to the lower density of fly ash replacing cement in the mix. Fly ash, although equal in mass, would have a larger volume than that of cement. Water requirement was higher due to the fly ash content; however, the amount of water had to be kept constant w/b = 0.53, which resulted in the decrease of slump.



Rys. 2. Obrazy pod skaningowym mikroskopem elektronowym popiołów

Fig. 2. Scanning electron micrographs of AFA, CFA and YFA fly ashes



Rys. 3. Rentgenogramy popiołów

Fig. 3. The X-ray patterns of AFA, CFA, and YFA ashes

2.2. Próbk i właściwości mieszanki betonowej

Przygotowano mieszanki betonowe zgodnie z normą turecką TS 802 (1). Składy mieszanek podano w tablicy 2. Popioły lotne CFA i YFA należały do klasy F, przy czym popiół CFA miał nieznacznie przekroczoną zawartość SO_3 . Natomiast popiół AFA był popiołem wysoko-wapiennym, o bardzo dużej zawartości anhydrytu. Skład betonu był następujący (kg/m^3): cement – 315, piasek 722, kruszywo – 1126, woda – 175 kg, w/c – 0,53. Zgodnie z turecką normą TS 802 z każdej mieszanki przygotowano próbki walcowe 50 x 300 mm i beleczki 100 x 100 x 500 mm w celu oznaczenia wytrzymałości na zginanie i ściskanie; po każdym okresie pomiarowym badano po trzy próbki.

Próbki rozformowywano po 24 godzinach i przechowywano w nasyconym roztworze wodnym w $20 \pm 2^\circ C$ przez okres 7, 28 i 90 dni.

3. Wyniki i ich omówienie

3.1. Mieszanki betonowe

Wyniki badań rozptywu, gęstości i zawartości powietrza podano w tablicy 2. Wyniki te wykazują, że rozptyw maleje ze wzrostem

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD I WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI BETONOWEJ

COMPOSITION AND PROPERTIES OF CONCRETE MIXTURES

Cement kg/m^3	Popiół lotny/Fly ash added			Rozptyw Slump mm	Gęstość Density kg/dm^3	Zawartość powietrza Entrapped air, %
	%	Ilość Amount kg/m^3	Źródło Source			
315.0	0	0	-	80	2.326	2.2
291.4	7.5	23.6	AFA	80	2.325	2.2
			CFA	76	2.325	2.2
			YFA	78	2.320	2.1
283.5	10.0	31.5	AFA	75	2.323	2.3
			CFA	74	2.316	2.3
			YFA	73	2.314	2.2
275.6	12.5	39.4	AFA	70	2.317	2.3
			CFA	68	2.308	2.4
			YFA	67	2.310	2.4
267.8	15.0	47.3	AFA	60	2.303	2.3
			CFA	62	2.293	2.3
			YFA	60	2.301	2.4
259.9	17.5	55.1	AFA	50	2.292	2.3
			CFA	48	2.290	2.4
			YFA	49	2.285	2.5
252.0	20.0	63.0	AFA	40	2.290	2.4
			CFA	38	2.284	2.5
			YFA	38	2.280	2.5
244.2	22.5	70.9	AFA	34	2.286	2.5
			CFA	32	2.281	2.4
			YFA	30	2.278	2.6

Although the measured density of concrete mix was decreasing with the increase of fly ash content, this reduction was insignificant. Likewise, entrapped air did not exhibit considerable differences; air content equal 2.2% was measured in control specimens while it was 2.6% for the highest fly ash-cement replacement ratio of 22.5%.

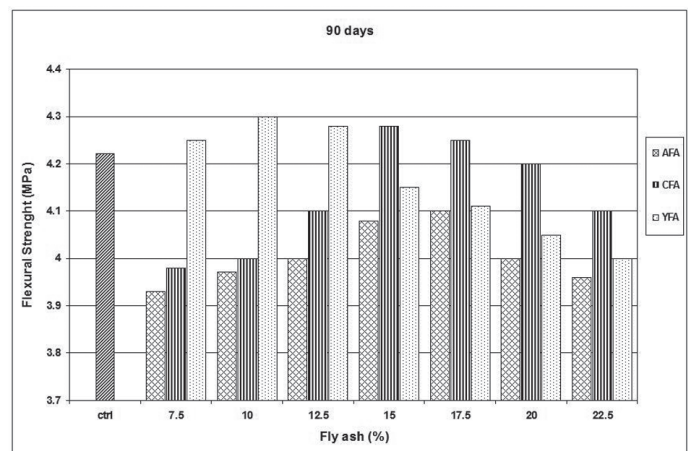
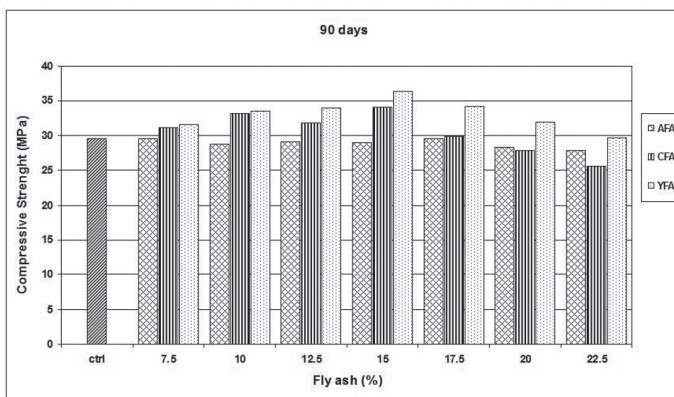
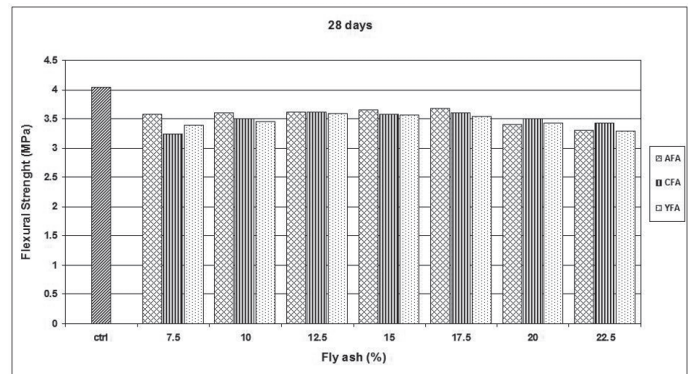
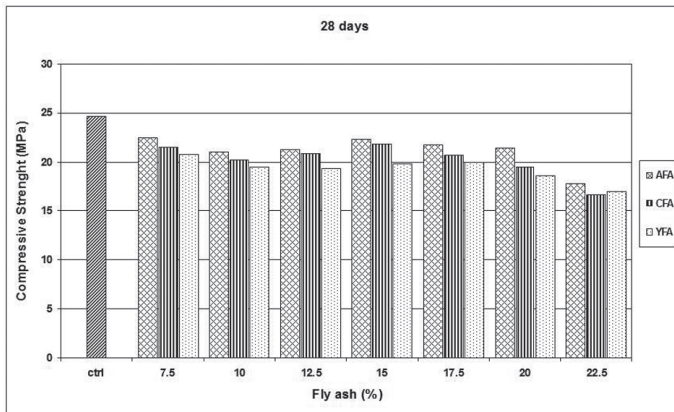
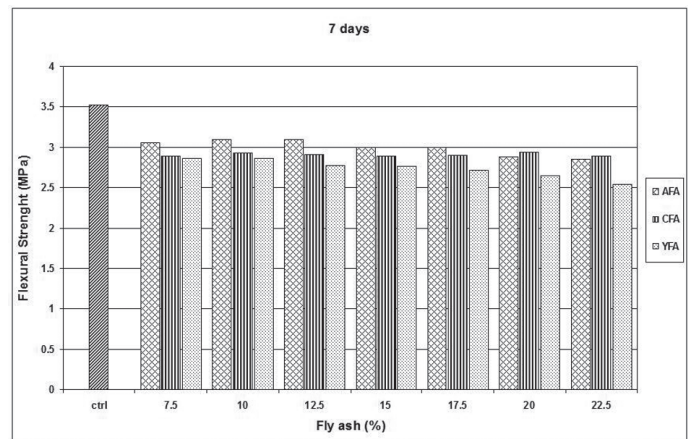
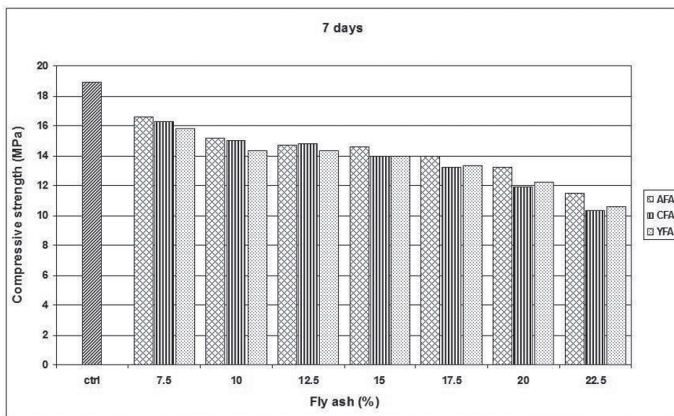
3.2. Compressive strength of cylindrical samples

In Fig. 4 the compressive strength of the cylindrical concrete samples were presented. Strength measured after 7 days of concrete hardening were lower for all cement replacement ratios. The lowest strength was observed for the mixes with 22.5% fly ash addition, replacing cement. This reduction of compressive strength was about 45% with respect to that of the control specimens. When the fly ash containing mixes were compared between themselves, it was observed that all mixes gave similar results after 7 days of hardening.

The compressive strength of concrete with fly ash addition after 28 days of hardening still had lower values when compared to those of the control specimens. The samples with fly ash addition between 7.5% and 20.0% yielded similar results, but 22.5% percent replacement showed noticeable reductions of strength in all mixes.

The compressive strength of concrete after 90 days differed from the results after a shorter hardening time. The concrete containing AFA ash (the one with high calcium) showed similar results to the control specimens, even for 22.5% cement replacement the difference was not significant. Concrete samples with addition of fly ash CFA showed an increase of compressive strength until the 15% replacement ratio for which the highest strength was obtained equal to 15%. 17.5% replacement produced essentially the same strength as that of the control specimens while the remaining 20.0% and 22.5% replacement levels gave lower strength than that of the control samples. Concrete samples with YFA ash addition presented the increase of compressive strength, and only 22.5% replacement presented almost the same strength as the control specimen. It should be noted that the strength was increasing with the increase of fly ash addition till 15% and then gradually fell down to the level of control specimens. The highest strength increase equal to 23% was found for 15% of cement replacement.

The deviations in the strength of the concrete samples containing fly ashes addition from three sources may be attributed to the differences of chemical compositions and in the minor degree of different fly ash fineness. However, the greatest importance will be attributed to the differences of pozzolanic activity of these three applied fly ashes.



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie próbek betonu z dodatkiem popiołu po 7, 28 i 90 dniach twardnienia

Fig. 4. Compressive strength of concrete samples with fly ash addition after 7, 28, and 90 days of hardening

dotadku popiołu. Ten spadek może być prawdopodobnie spowodowany zwiększeniem objętości zaczynu, w związku z mniejszą gęstością popiołu zastępującego cement w mieszance. Popiół lotny przy tej samej masie będzie miał większą objętość niż cement. Wodożądność była większa w związku z dodatkiem popiołu, jednak ilość wody utrzymywano na tym samym poziomie (stałe $w/c+P$), co zmniejszyło rozpyływ.

Aczkolwiek znaleziona gęstość mieszanki betonowej malała ze wzrostem udziału popiołu lotnego, jednak ten spadek był bardzo mały. Także zawartość powietrza nie wykazała znaczących różnic: zawartość na poziomie 2,2% znaleziono w próbce kontrolnej podczas gdy w przypadku największego dodatku popiołu równego 22,5% wynosiła ona 2,6%.

Rys. 4. Wytrzymałość na zginanie próbek betonu z dodatkiem popiołu po 7, 28 i 90 dniach twardnienia

Fig. 5. Flexural strength of concrete with the fly ashes addition after 7, 28, and 90 days of hardening

3.3. Flexural strength of prismatic samples

In Fig. 5 the results of flexural strengths measurements of concrete samples are depicted. The flexural strength after 7 and 28 days was lower than those of the control specimens. The replacement of 22.5% of cement caused an average reduction of 21% of flexural strength after 7 days of curing while the reduction was 17% after 28 days. However, AFA containing mix presented a little higher strength compared to the mixes with CFA and YFA fly ashes after 7 days, but the difference was not very significant. Another comment of the results was that the replacement ratios between 7.5% and 17.5% gave similar flexural strength for all three dif-

3.2. Wytrzymałość na ściskanie próbek walcowych

Na rysunku 4 pokazano wytrzymałość na ściskanie walcowych próbek betonu. Zmierzona wytrzymałość wszystkich próbek po 7 dniach twardnienia była niższa w przypadku dodatku popiołu lotnego zastępującego cement. Najmniejszą wytrzymałość osiągnęły próbki, w których 22,5% cementu zastąpiono popiołem lotnym; spadek wytrzymałości na ściskanie wyniósł około 45% w porównaniu z próbkami kontrolnymi. Natomiast wszystkie mieszanki zawierające dodatek popiołu lotnego osiągnęły podobną wytrzymałość po 7 dniach twardnienia.

Wytrzymałość na ściskanie betonu z dodatkiem popiołu lotnego po 28 dniach twardnienia była niższa niż próbki kontrolne. Próbki z dodatkiem popiołu od 7,5% do 20% miały podobną wytrzymałość, jednak próbki z dodatkiem 22,5% wykazały znaczny spadek wytrzymałości w przypadku wszystkich stwardniałych mieszanek.

Wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach różniła się od wyników po krótszym okresie twardnienia. Próbki betonu z dodatkiem popiołu AFA (popiół z dużą zawartością wapnia) wykazały wytrzymałość podobną do próbek kontrolnych; nawet próbka z 22,5% dodatkiem tego popiołu dała bardzo małą różnicę. Natomiast próbki betonu z dodatkiem popiołu CFA wykazały przyrost wytrzymałości na ściskanie aż do poziomu dodatku wynoszącego 19%, w przypadku którego osiągnęły największą wytrzymałość, a wzrost wyniósł 15%. Zastąpienie cementu na poziomie 17,5% dało bez mała taką samą wytrzymałość co próbki kontrolnej, podczas gdy dodatek 20% i 22,5% dał mniejszą wytrzymałość od próbki kontrolnej. Próbki betonu z dodatkiem popiołu YFA wykazały przyrost wytrzymałości, tylko próbka z dodatkiem 22,5% osiągnęła prawie taką samą wytrzymałość jak próbki kontrolne. Trzeba podkreślić, że wytrzymałość rosła ze zwiększeniem dodatku popiołu do 15%, a następnie stopniowo malała do wartości osiągniętej przez próbki kontrolne. Największy przyrost wytrzymałości wynoszący 23% stwierdzono przy dodatku równym 15%. Wahania wytrzymałości próbek betonu zawierających popioły lotne z różnych elektrowni można prawdopodobnie przypisać różnicom w składzie chemicznym i miakłości stosowanych popiołów. Jednak największe znaczenie będą miały różnice aktywności pucolanowej trzech stosowanych popiołów lotnych.

3.3. Wytrzymałość na zginanie beleczek

Na rysunku 5 pokazano wyniki pomiarów wytrzymałości na zginanie. Wytrzymałość na zginanie po 7 i 28 dniach twardnienia była niższa niż próbek kontrolnych. Zastąpienie cementu popiołem dodanym w ilości 22,5% spowodowało zmniejszenie wytrzymałości na zginanie o 21% po 7 dniach twardnienia, a o 17% po 28 dniach. Jednak, w przypadku próbek betonu z dodatkiem popiołu AFA wytrzymałość była trochę wyższa w porównaniu z mieszankami zawierającymi popioły YFA i CFA po 7 dniach twardnienia, lecz różnica była mała. Można więc stwierdzić, że dodatek od 7,5 do 17,5% dawał w przypadku wszystkich trzech popiołów bardzo podobne wyniki po 7 dniach twardnienia. Pomiary po 90 dniach także pokazano na rysunku 5. Można stwierdzić, że próbki betonu

ferent fly ashes used. The measurements after 90 days are also shown in Fig 5. It is evident that the concrete with AFA addition had lower flexural strength than the control samples as well as of other mixes with CFA and YFA. The closest value to the flexural of control samples was obtained with 17.5% YFA fly ash addition.

4. Conclusions

The following conclusions may be drawn from the experimental results:

- 1) Both workability and density of concrete decreased while air content increased with the increase of fly ash addition; also water demand was higher in the mixes in which fly ash were replacing cement.
- 2) Compressive strength was lower after 7 and 28 days of hardening, the reductions were more pronounced at the highest replacement ratio of 22.5%. On the other hand, after 90 days, the results were getting closer to those of the control specimens for the AFA and even better results were obtained for CFA and YFA containing samples. The highest increase in the compressive strength equal to 23% was found for 15% replacement for the specimens produced with YFA.
- 3) Flexural strengths of all specimens with fly ash addition were low after 7 and 28 days of hardening.
- 4) CFA and YFA addition both produced similar flexural strength after 90 days as those of the control specimens without any relevance to the replacement ratios; however, high calcium AFA did not reach the level of control samples after 90 days of hardening.
- 5) Both compressive and flexural strength for YFA containing mixes yielded better results than their alternatives.
- 6) The trend observed in the changes of compressive strength of the concrete specimens manufactured with the addition of fly ash from three different sources was the same as in the case of flexural strength. More specifically, the results for the specimens produced with high calcium AFA ash were lower in comparison to the strength of the specimens cast with CFA and YFA at all ages; on the other hand, the results obtained for concrete samples with CFA and YFA additions resembled each other, although a little in favor of YFA, at all curing ages.

Literatura / References

1. TS 802, (1985), Beton Karışım Hesabı Esasları (in Turkish), TSE.
2. N. Fung, High Performance Concrete, Beijing, China Building Industry Press, (1996).
3. ASTM, Standard Specifications for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, ASTM C 618, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, ASTM C 618-85 (1997).
4. Z. Sekulic, S. Popov, M. Duricic, A. Rosic, Mechanical activation of cement with addition of fly ash, Mater Lett; **39**: 115-21 (1999).
5. V. M. Malhotra, Making Concrete "Greener" with Fly Ash, Concrete and Sustainable Development, Concr. Int. 21 (5) 61-66 (1999).

z popiołem AFA mają niższą wytrzymałość na zginanie niż próbki porównawcze, a także z dodatkiem dwóch innych popiołów CFA i YFA. Najbliższą wytrzymałość do próbek kontrolnych uzyskał beton z dodatkiem 17,5 % popiołu lotnego YFA.

4. Wnioski

Uzyskane wyniki pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- 1) Urabialność mieszanek betonowych uległa pogorszeniu, a gęstość zmniejszeniu, natomiast zawartość powietrza wzrosła nieznacznie z dodatkiem popiołu lotnego zastępującego cement.
- 2) Wytrzymałość na ściskanie była mniejsza po 7 i 28 dniach twardnienia, przy czym ten spadek był większy przy największym dodatku popiołu wynoszącym 22,5%. Natomiast po 90 dniach była mniejsza różnica w wytrzymałości próbek z popiołem AFA w porównaniu z kontrolnymi, a jeszcze lepszą wytrzymałość miały próbki z dodatkiem popiołów CFA i YFA. Największy wzrost wytrzymałości na ściskanie wynoszący 23% wykazały próbki z dodatkiem popiołu YFA.
- 3) Wytrzymałość na zginanie wszystkich próbek z dodatkiem popiołu była niższa po 7 i 28 dniach twardnienia.
- 4) Próbki z dodatkiem popiołów CFA i YFA miały zbliżone wytrzymałości po 90 dniach do próbek kontrolnych, niezależnie od poziomu zastąpionego cementu, jednak popiół AFA o dużej zawartości wapnia nie osiągnął tego poziomu wytrzymałości.
- 5) Wytrzymałość na ściskanie i zginanie próbek betonu z dodatkiem popiołu YFA była lepsza niż z pozostałymi popiołami.
- 6) Tendencje zmian wytrzymałości na ściskanie próbek betonu uzyskanych z dodatkiem popiołów lotnych z trzech różnych elektrowni były takie same w przypadku wytrzymałości na zginanie. Szczególnie wyniki dla próbek wytworzonych z dodatkiem popiołu AFA o dużej zawartości wapnia były niższe od wytrzymałości próbek z dodatkiem popiołów CFA i YFA po wszystkich badanych okresach; z drugiej strony wytrzymałość próbek z dodatkiem popiołu CFA lub YFA była zbliżona, jednak z niewielką przewagą próbek z popiołem YFA po wszystkich badanych okresach.

6. P. K. Mehta, Reflections Advancements in Concrete Technology, 2nd International Symposium on Cement and Concrete Technology in the 2000s, 6-10 September, Vol.1, 43-57, İstanbul 2000.
7. T. Sugama, L. Weber, L. E. Brothers, Sodium-polyphosphate-modified fly ash/calcium aluminate blend cement: durability in wet, harsh geothermal environments, *Mater Lett*; 44: 45-53 (2000).
8. Infocer, Instituto para la Sostenibilidad de los Recursos, España, *Boletín* (2002).
9. E. Yasar, C. D. Atis, A. Kilic, H. Gulsen, Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash, *Mater Lett*; 57: 2267-70 (2003).
10. G. Li, X. Zhao, Properties of Concrete Incorporating Fly Ash and Ground Granulated Blast-Furnace Slag, *Cement & Concrete Composites* 25, 293-299 (2003).
11. R. Siddique, Performance Characteristics of High-Volume Class F Fly Ash Concrete, *Cement Concrete Res*; 34: 487-93 (2004).
12. C. D. Atis, U. K. Sevim, F. Ozcan, C. Bilim, O. Karahan, et al., Strength properties of roller compacted concrete containing a non-standard high calcium fly ash, *Mater Lett*; 58: 1446-50 (2004).
13. J. Ryou, Examination of grinding techniques for the reuse of by-products of cement production, *Mater Lett*; 58: 425-7 (2004).
14. S. Antiohos, K. Managari, S. Tsimas, Evaluation of blends of high and low calcium fly ashes for use as supplementary cementing materials regular, *Cement Concrete Comp*, 27, 349-56 (2005).
15. S. Antiohos, S. Tsimas, Investigating The Role of Reactive Silica in the Hydration Mechanisms of High-Calcium Fly Ash/Cement Systems, *Cement & Concrete Composites* 27, 171-81 (2005).
16. S. Tsimas, A. Moutsatsou-Tsima, High-calcium Fly Ash as Fourth Constituent in Concrete: Problems, Solutions and Perspectives, *Cement Concrete Composites*; 27:231-237 (2005).
17. H. Y. Aruntas, Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, *Gazi Üniversitesi Muh. Mim. Fak. Dergisi*; 21 (1):193-203, (in Turkish) (2006).
18. E. P. Mora, Life Cycle, Sustainability and the Transcendent Quality of Building Materials, *Building and Environment*, 42:1329–1334 (2007).
19. R. D. Toledo Filho, J. P. Gonçalves, B. B. Americano, E. M. R. Fairbairn, Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil, *Cement and Concrete Research* 37, 1357–1365 (2007).