

## Wpływ wskaźnika płaskości ziaren kruszywa grubego na właściwości betonu

### Effect of flakiness of coarse aggregate on concrete

Süleyman Karahan, Hakan Güneyli\*, Aslihan Güneyli

Department of Geological Engineering, Çukurova University, 01330 Balcalı, Adana, Turkey

\*corresponding Author, hguneyli@cukurova.edu.tr

#### Streszczenie

Wpływ płaskości, jednej z cech kształtu kruszywa, na właściwości betonu nie jest zagadnieniem dostatecznie wyjaśnionym. Ponadto, nie istnieją zadowalająco szczegółowe ograniczenia dotyczące płaskości w skali globalnej. W pracy, w której jako kruszywo zastosowano kamień wapienny, opisano wpływ płaskości na właściwości betonu zarówno przed związaniem, jak i po stwardnieniu. W związku z tym przeprowadzono badania konsystencji betonu metodą stożka opadowego przed wiązaniem oraz badania wytrzymałości na ściskanie po 7, 28 i 60 dniach. Stosowano mieszanki betonowe o tym samym składzie z kruszywem wapiennym, o różnym stopniu płaskości. Zwiększenie zawartości ziaren płaskich w kruszywie grubym powodowało flokulację i segregację, prowadzącą do niejednorodności mieszanki betonowej. Wraz ze wzrostem stopnia płaskości wyraźnie malał opad stożka mieszanki, a zwiększenie wskaźnika płaskości o 25% powodowało zmniejszenie opadu stożka średnio o 18 mm. Wyniki doświadczeń wykazały, że wytrzymałość na ściskanie betonu zmniejsza się znacznie wraz ze wzrostem płaskości. Zgodnie z tymi niekorzystnymi zależnościami o dużych współczynnikach korelacji, wzrost zawartości ziaren płaskich w kruszywie grubym o 25% powodował spadek wytrzymałości na ściskanie o średnio 0,9, 0,4 i 1,2 MPa dla czasów wynoszących odpowiednio 7, 28 i 60 dni. Ponadto, zwiększenie udziału ziaren płaskich zwiększało szczególnie zakres i odchylenie standardowe wytrzymałości na ściskanie, przy tym samym udziale procentowym ziaren płaskich, przy czym tendencja ta była najbardziej wyraźna po 60 dniach. Zjawisko to wykazuje, że różnice i wahania wytrzymałości na ściskanie próbek betonowych o tym samym udziale procentowym ziaren płaskich, wyraźnie wzrastają wraz ze zwiększeniem płaskości kruszywa.

**Słowa kluczowe:** kruszywo, płaskość, wytrzymałość na ściskanie, opad stożka

#### Summary

The effect of flakiness, one of the shape property of aggregate on concrete, is not an issue sufficiently clarified. In addition, there are no satisfactorily detailed limitations for flakiness on a global scale. This study, in which limestone was used as an aggregate, describes the dependence of flakiness on the concrete behaviour both in the fresh and hardened state. In this context, slump tests in the fresh state and compressive strength tests in the hardened state at 7, 28 and 60 days were carried out using concrete mixes prepared in the same design and with different flakiness percentages. An increase of flaky particle fraction in coarse aggregate caused flocculation and segregation leading to the inhomogeneity of concrete mix. The slump of the mix decreased markedly as the flakiness increased, and an increase in flakiness by 25% resulted in an average reduction of 18 mm in the slump value. The test results indicated that the compressive strength of concrete decreased significantly with increasing flakiness. According to these negative linear relationships with strong correlation coefficients, an increase in the flaky coarse particles by 25% led to a decrease in compressive strength of average 0.9, 0.4 and 1.2 MPa for the curing times of 7, 28 and 60 days, respectively. Furthermore, the increase in flakiness enhanced particularly the range and standard deviation of compressive strength values with the same flakiness percentage, which this trend was most pronounced and meaningful at 60 days. This phenomenon exhibits that the differences and uncertainty in the compressive strength of the concrete specimens with the same flakiness percentage, increase distinctly with the increase in the flakiness.

**Keywords:** aggregate, flakiness, compressive strength, slump

## 1. Wprowadzenie

Właściwości ziaren kruszywa, do których należą wielkość uziarnienia, chropowatość i kształt, mają duży wpływ na właściwości użytkowe betonu, zarówno w mieszanke przed związaniem, jak i po stwardnieniu, a także mają duże znaczenie dla kosztów produkcji betonu (1-4). Kształt ziaren bezpośrednio wpływa na trwałość, urabialność, odporność na ścinanie, wytrzymałość na rozciąganie, sztywność i zachowanie zmęczeniowe betonu (2, 5-9). Płaskość, jedna z cech kształtu kruszywa, jest problematyczną właściwością związaną z zachowaniem się betonu (1, 2, 4, 10-12). Ziarno płaskie określa się jako ziarno, którego grubość – stanowiąca najmniejszy wymiar, jest mniejsza niż 0,6 x średni wymiar oczka sita frakcji kruszywa, przez które przechodzi to ziarno (13). Natomiast, ziarno wydłużone, którego długość – stanowiąca największy wymiar, jest większa niż 1,8 x średni wymiar oczka sita frakcji kruszywa, przez które przechodzi to ziarno (14). Ziarna płaskie i/lub wydłużone zwiększają szczególnie zawartość pustek, co prowadzi do problemów z urabialnością, i segregacją mieszanki (15-17). Ponadto, ziarna płaskie w kruszywie grubym powodują duże zużycie cementu, piasku i wody przy wytwarzaniu mieszanki (18-19), a także małe jej zagęszczenie, złe wykończenie powierzchni i trudności z uzyskaniem poprawnej mikrostruktury (20).

Nawet jeżeli nie ustalono wartości granicznych dla zawartości ziaren płaskich lub wydłużonych w kruszywach grubych, ziarna o takim kształcie i w przypadku zawartości przekraczającej 10 do 15% masy kruszywa grubego, są zwykle uważane za niepożądane dla betonu o dowolnym zastosowaniu (17). Norma angielska BS 882: 1992 ogranicza płaskość kruszywa grubego do 50% w przypadku żwiru naturalnego i do 40% kruszywa grubego kruszonego i częściowo kruszonego (21). Niewiele jest badań bezpośrednio dotyczących wpływu płaskości kruszywa grubego na właściwości użytkowe betonu zarówno w stanie świeżym, jak i utwardzonym. W badaniach dostępnych w literaturze jako kruszywo grube do mieszanki betonowej zastosowano bazalt (12), diabaz (4), granit (2, 11, 19), fillit (19) oraz naturalne kruszywo rzeczne (5). Jak można zauważyć, w literaturze nie ma badań na ten temat dla wapienia, który jest jednym z najczęściej używanych źródeł kruszyw, w którym może występować problem płaskości.

W artykule opisano przeprowadzone doświadczenia wpływu płaskości rozdrobnionego kamienia wapiennego na właściwości betonu z cementu portlandzkiego.

## 2. Materiały

Do sporządzania betonu zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 zgodny z TS EN: 197-1 (22) oraz superplastyfikator oparty na naftalenie. Jako kruszywa drobne i grube zastosowano pokruszony wapień pochodzący z kamieniołomu położonego obok miasta Adana, w południowej Turcji. Kruszywa wysuszono w suszarce i zbadało ich właściwości fizyczne, a mianowicie absorpcję wody, ciężar właściwy, udarność, wskaźnik płaskości i wydłużenia, ścieralność Los Angeles i zawartość drobnych cząstek z zastosowaniem błękitu

## 1. Introduction

The aggregate particle properties, such as size, grading, roughness and shape have a significant influence on the performance of concrete, both in the fresh and hardened state, and are of great importance for the cost of concrete (1-4). Particle shape directly affects durability, workability, shear resistance, tensile strength, stiffness and fatigue behaviour of concrete (2, 5-9). Flakiness, one of the shape characteristics of aggregate, is a problematic property associated with concrete behaviour (1, 2, 4, 10-12). A flaky particle is defined as a particle whose thickness [least dimension] is lower than 0.6 times the mean sieve size of the size fraction to which the particle belongs (13), and an elongated particle as a particle whose length [largest dimension] is more than 1.8 times the mean sieve size of the size fraction (14). Flaky and/or elongated particles especially raise higher void content, leading to workability and mobility problems, harshness and segregation (15-17). Besides, flaky particles in coarse aggregate are causing a great consumption of cement, sand and water in concrete design (18-19), and low compaction, poor surface finishing and structural weakness (20).

Even though there are no recognized limits for the presence of flaky or elongated particles in the coarse aggregate are laid down, such particles (flaky or elongated) present in excess of 10 to 15 percent of the mass of coarse aggregate, are usually considered non preferred for the intended use (17). In addition, British Standard BS 882: 1992 restricts the flakiness of the coarse aggregate to 50% for natural gravel and to 40% for crushed and partially crushed coarse aggregate (21). There are very few studies directly dealing with the influence of the flakiness of coarse aggregates on concrete performance, either in the fresh and hardened state. In the investigations available in the literature, basalt (12), diabase (4), granite (2, 11, 19), phyllite (19) and natural river aggregate (5) were used as coarse aggregate in the concrete mix. As can be seen, no investigation on this subject for limestone, which is one of the most widely used aggregate sources, and could have flakiness problems, is available in the literature.

This paper describes experimental research into the effect of the flakiness of crushed limestone on Portland cement concrete properties.

## 2. Materials

Ordinary Portland cement CEM I 42.5 conforming to TS EN: 197-1 (22) and naphthalene-based superplasticizer were used for concrete works. Crushed limestone was used as both fine and coarse aggregates, obtained from a commercial quarry located in Adana city, South of Turkey. The aggregates were oven-dried and physical properties such as water absorption, specific gravity, aggregate impact value, flakiness index, elongation index, Los Angeles abrasion value and methylene blue value were determined per the Turkish standard specifications according to TS 706 EN: 12620 +A1 (23). Table 1 exhibits the results of the physical and mechanical properties tests conducted on the aggregates that

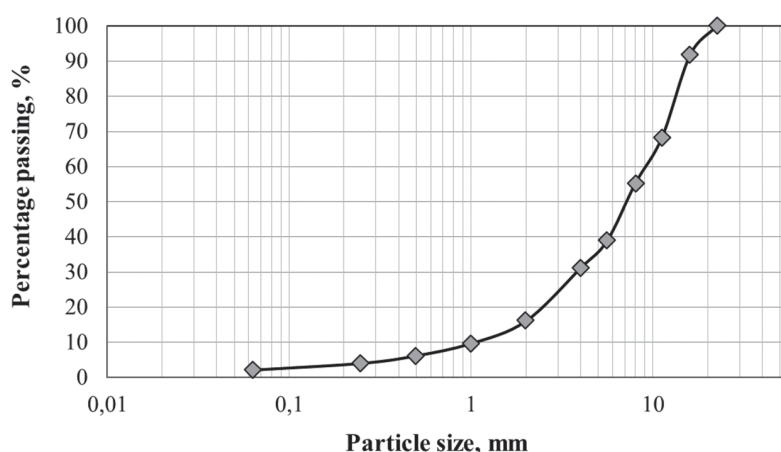
Tablica 1 / Table 1

PROPERTIES OF AGGRGETATES

WŁAŚCIWOŚCI KRUSZYW

Specific gravity / Ciężar właściwy, -	0-4 mm	$r_a=2.74$ $r_{rd}=2.67$ $r_{ssd}=2.70$	4-11.2 mm	$r_a=2.71$ $r_{rd}=2.67$ $r_{ssd}=2.69$	11.2-22.4 mm	$r_a=2.71$ $r_{rd}=2.67$ $r_{ssd}=2.68$
Water absorption / Nasiąkliwość, %		1.10		0.54		0.49
Aggregate impact / Udarność, %	9.9					
Flakiness index / Wskaźnik płaskości, %	10					
Elongation index / Wskaźnik kształtu, %	7					
Los Angeles abrasion / wskaźnik Los Angeles, %	21					
Methylene Blue value / Zawartość cząstek drobnych, [for / dla <0.063mm], g/100g	1.5					

metylenowego, zgodnie z turecką normą TS 706 EN: 12620 +A1 (23). W tablicy 1 zestawiono wyniki badań właściwości fizycznych i mechanicznych kruszyw, które stosowano w doświadczeniach. Analizę sitową wykonano zgodnie z normą TS 3530 EN: 933-1 (24). Rozkład wielkości ziaren kruszyw w badaniach wynosi 31,1% dla 0-4 mm, 37,2% dla 4-11,2 mm i 11,2-31,7% dla 11,2-22,4 mm [rys. 1]. Gęstość właściwa, w stanie suchym oraz w stanie nasyconym i powierzchniowo suchym kruszyw użytych w badaniach, wynoszą odpowiednio 2,74, 2,67 i 2,70 g/cm<sup>3</sup> dla 0-4 mm; 2,71, 2,67 i 2,69 dla 4-11,2 mm; oraz 2,71, 2,67 i 2,68 dla 11,2-22,4 mm.



Rys. 1. Krzywa uziarnienia kruszywa

Fig. 1. Aggregate grading curve

3. Metody

Analizę sitową na pokruszonym kruszywie wapiennym wykonano zgodnie z TS 3530 EN: 933-1 (24). Krzywą uziarnienia kruszywa przedstawiono na rys. 1. Usunięto frakcję kruszywa pozostającego na sicie 80 mm i przechodzącego przez sito 4,0 mm. Każdą z poszczególnych frakcji pozostających na sitach ważono i przechowywano na osobnych tacach, z zaznaczonym na nich uziarnieniem. Na podstawie sumy mas frakcji zebranych na tacach obliczono procent pozostający na poszczególnych sitach.

Za pomocą specjalnych sit, opisanych w tablicy 3, oddzielono ziarna płaskie. Całą frakcję umieszczono na sicie i wstrząsano nim do momentu, gdy większość ziaren płaskich przeszła przez to sito. Ze względu na to, że największy rozmiar ziaren w kruszywie wyniósł 22,4 mm, do oddzielenia ziaren płaskich zastosowano sita

were used for this research work. The sieve analysis was done as per the requirements of TS 3530 EN: 933-1 (24). The particle size distribution of aggregates in the study was 31.1% for 0-4 mm, 37.2% for 4-11.2 mm and 11.2-31.7% for 11.2-22.4 mm (Fig. 1). The specific gravity, dry, and saturated surface dry densities of aggregates used in the study were 2.74, 2.67 and 2.70 for 0-4 mm; 2.71, 2.67 and 2.69 for 4-11.2 mm; and 2.71, 2.67 and 2.68 for 11.2-22.4 mm, respectively.

3. Methods

A sieve analysis in accordance with TS 3530 EN: 933-1 (24) was carried out on the crushed limestone aggregate used in this study. The gradation curve of the aggregate is seen in Fig. 1.

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD MIESZANKI BETONOWEJ

CONCRETE MIXTURE PROPORTIONS

Target 28 day strength Projektowana wytrzymałość, MPa	W/C	Content / Zawartość, kg/m <sup>3</sup>				Air content Zawartość powietrza, %
		Cement	Water / Woda	Fine aggregate Kruszywo drobne	Coarse aggregate Kruszywo grube	
30	0.50	300	150	1033.8	851.8	1.50

prętowe o szczelinach od 12,5 do 2,15 mm, dla frakcji wymiarowych odpowiednio od 25-20 do 5-4 mm. Następnie zatrzymane na sitach ziarna niepłaskie i przechodzące płaskie, przechowywano na osobnych tacach, z zaznaczonym ich uziarnieniem. Zachowując główną krzywą uziarnienia przedstawioną na rys. 1, sporządzono pięć mieszanek kruszyw o zróżnicowanym udziale ziaren płaskich od 100% do 75, 50 i 25% oraz braku tych pierwszych. W każdej frakcji kruszywa grubego zachowano taki sam procentowy udział ziaren płaskich, wymagany dla poszczególnych mieszanek kruszywa, które opisano wcześniej.

Betony wykonano z kruszyw wapiennych o tym samym uziarnieniu, ale o różnych udziałach ziaren płaskich w kruszywie grubym, wynoszących 25, 50, 75 i 100%. Skład mieszanki zaprojektowano w celu uzyskania wytrzymałości na ściskanie wynoszącej po 28 dniach 30 MPa [C30]. Ich składy podano w tablicy 2. Jedyną zmienną w składzie betonu była procentowa zawartość ziaren płaskich, w kruszywie grubym. Główne proporcje mieszanki betonowej – cement, kruszywo drobne, kruszywo grube, porowatość i stosunek wody do cementu, były zgodne z TS: 802 (25), podane w tablicy 4. Wszystkie mieszanki przygotowano w konwencjonalnej betoniarce z bębniem obrotowym, zgodnie z normą TS EN: 206-1 (26). Temperatura i wilgotność względna otoczenia w laboratorium podczas mieszania i pomiaru opadu stożka wynosiły odpowiednio 15-22°C i 35-40%. Po zakończeniu procesu mieszania, mieszankę umieszczono w taczkach, które następnie przykryto za pomocą folii polietylenowej, aby zapobiec parowaniu wody. W przypadku każdej mieszanki betonowej mierzono początkową temperaturę betonu, a następnie niezwłocznie wykonano badania opadu stożka, zgodnie z TS EN: 12350-2 (27). Początkowe temperatury betonu wszystkich mieszanek mieściły się w zakresie od 22 do 26°C.

W stalowych formach o wymiarach 150 x 150 x 150 mm przygotowano siedemdziesiąt pięć próbek betonowych, które przechowywano w formach przez 24 godziny, w warunkach laboratoryjnych. Po rozformowaniu kostki betonowe umieszczono w wodzie, w temperaturze 20°C. Zgodnie z opisaną powyżej metodą, przygotowano piętnaście próbek betonowych dla każdej frakcji ziaren płaskich, w celu pięciokrotnego pomiaru wytrzymałości na ściskanie, po trzech różnych okresach 7, 28 i 60 dni. Wytrzymałość na ściskanie kostek betonowych w stanie nasyconym i powierzchniowo suchym [SSD] mierzono zgodnie z normą TS EN: 12390-3 (28).

All the aggregates retained on the 80 mm test sieve and passing the 4.0 mm test sieve, were discarded. Each of the individual size fractions retained on the sieves was weighed and stored in separate trays with their size marked on the trays. From the sums of the masses of the fractions in the trays, the individual percentage retained on the various sieves was calculated.

Using the special sieves seen in Table 3 Column C, the flaky grains were separated. The whole of the size-fraction was placed into the sieve and the sieve was shaken until the majority of the flaky particles were passed through the slots. Since the largest grain size in the aggregate was 22.4 mm, bar sieves with aperture ranged from 12.5 to 2.15 mm for the size-fractions varied from 25-20 to 5-4 mm, respectively, were used to separate the flaky particles. Following, the particles retained [cubic] and passed [flaky] were stored in discrete trays with their size marked on the trays. Keeping the main gradation curve seen in Fig. 1, five aggregate mixes containing varied flaky grain percentages from 100% to 0% by mass [100, 75, 50, 25 and 0% flaky] were prepared. The same percentage of flaky particle required for each individual aggregate mixture mentioned above, was maintained in every coarse [4.0 mm] size fraction.

Concretes made using the crushed limestone aggregates with the same gradation but six different flaky particle percentages in coarse aggregates, as follows 0, 25, 50, 75 and 100% were designed for target 28-day cube compressive strength of 30 MPa [C<sub>30</sub>]. Their proportions as shown in Table 2. The only variable in concrete design was the percentage of flaky grains in coarse aggregate. The main concrete mix proportions (cement, fine aggregates, coarse aggregates, air and water/cement ratio) depending on TS: 802 (25) are seen in Table 4. All mixtures were mixed in a conventional rotary drum concrete mixer following the TS EN: 206-1 standard (26). The ambient temperature and relative humidity in the laboratory during mixing and measuring of slump flow were in the range of 15-22°C and 35-40%, respectively. Following completion of the mixing process, the concrete was poured into wheelbarrows which were then isolated using polyethylene sheets, to prevent water evaporation. For each concrete mixture, the initial concrete temperature was measured, and then the slump tests were performed immediately in accordance with TS EN: 12350-2 (27). The initial concrete temperatures of all mixtures were in the range of 22-26°C.

Tablica 3 / Table 3

SITA PRĘTOWE STOSOWANE W BADANIACH [WEDŁUG TS 706 EN 12620 +A1]  
BAR SIEVES USED IN THE STUDY [ACCORDING TO TS 706 EN 12620 +A1]

Fraction of grain sizes $d_i/D_i$ Frakcja o wymiarach $d_i/D_i$		Width of Slot in Thickness Gauge of Special Bar Sieve Szerokość szczeliny specjalnego sita prętowego, mm
$d_i$ , mm	$D_i$ , mm	
20	25	12.5 ± 0.2
16	20	10.0 ± 0.1
10	12.5	6.3 ± 0.1
8	10	5.0 ± 0.1
5	6.3	3.15 ± 0.1
4	5	± 0.1

## 4. Wyniki badań i dyskusja

### 4.1. Właściwości świeżej mieszanki

O ile mieszanka betonowa składająca się w 100% z niepłaskiego kruszywa grubego dawała się łatwo mieszać i odlewać, o tyle wraz ze wzrostem zawartości ziaren płaskich w mieszance, mieszanie i umieszczanie w formach stawało się coraz trudniejsze. Ponadto stwierdzono, że flokulacja i segregacja świeżej mieszanki betonowej znacznie się zwiększa wraz ze wzrostem zawartości ziaren

płaskich, w kruszywie grubym [rys. 2]. Duże ziarna płaskie miały tendencję do otaczania się i pokrywania drobnymi ziarnami i powstawały konglomeraty o słabych wiązaniach, które absorbowały więcej wody niż fragmenty betonu, składające się z grubych, niepłaskich ziaren.

Ponadto zwiększenie zawartości ziaren płaskich powodowało zwiększenie zapotrzebowania na energię podczas mieszania i odlewania betonu. Uzyskanie jednorodnej mieszanki w przypadku świeżego betonu, zawierającego we frakcji grubej więcej od 25% ziaren płaskich, było prawie niemożliwe. Stwierdzono, że niejednorodność jest proporcjonalna do płaskości.

W celu stwierdzenia wpływu płaskości na opad stożka wykonano badania konsystencji betonu tą metodą, która jest najczęściej stosowana w praktyce. Jak widać z rysunku 3, o ile opadu stożka nie można było wykorzystać w przypadku próbek zawierających 100% kruszywa grubego płaskiego, to wraz ze zmniejszaniem ich udziału opad stożka wzrastał.

Zmniejszanie opadu stożka w zależności od udziału ziaren płaskich w kruszywie grubym dla wszystkich mieszanek pokazano na rys. 4. Wyniki pomiarów wykazały, że płaskość jest jednym z głównych czynników określających opad stożka betonu, wykazując niemal doskonałą ujemną zależność liniową o dużym współczynniku korelacji [ $R^2 = 0,99$ ], pomiędzy nimi. W przypadku tego składu betonu zwiększenie zawartości kruszywa grubego płaskiego o 25%, prowadzi do zmniejszenia opadu stożka, średnio o 18 mm. W rezultacie płaskość ma duży ujemny wpływ na urabialność świeżego



Rys. 2. Mieszanka betonowa zawierająca 50% kruszywa grubego płaskiego

Fig. 2. Concrete mix containing 50% flaky coarse aggregate

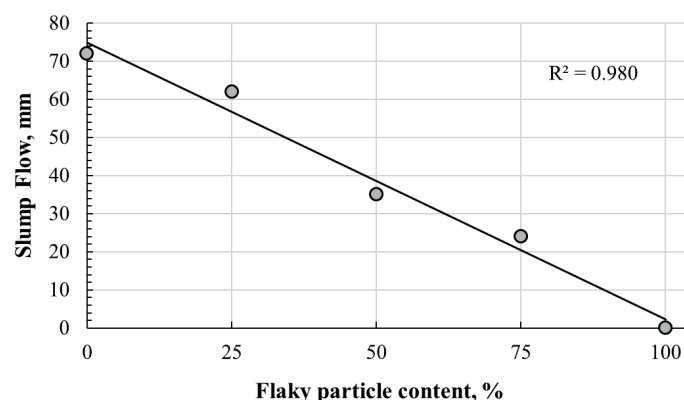
A total of seventy-five concrete specimens were cast in steel cube moulds of 150 x 150 x 150 mm, and kept in moulds for 24 hours in laboratory conditions. After demoulding, concrete cube specimens were cured in water at 20°C. Following the procedure described above, fifteen concrete cube specimens, for each flaky particle fraction were prepared, to repeat the compression test five times at three different ages of 7, 28 and 60 days. Compressive strength of saturated surface dry [SSD] concrete cube specimens was measured according to the specification of TS EN: 12390-3 (28).

## 4. Test results and discussion

### 4.1. Fresh mix properties

While the concrete mix consisting of 100% cubic coarse aggregate could be easily mixed and cast, as the amount of flaky grains increases in the mixtures, the application of mixing and casting became increasingly difficult. In addition to that, it was observed in this process that flocculation and segregation in the fresh concrete mix increased significantly with the increase of flaky coarse particles [Fig. 2]. Flaky coarse particles tended to be covered and surrounded by fines, hence producing flocks having weak surround bonds and absorbing more water than that of concrete sections consisting of cubic coarse grains.

Furthermore, the increment of flaky particle amount led to more effort and energy demand during the mixing and casting. It was



Rys. 4. Zmiana opadu stożka a zawartość ziaren płaskich

Fig. 4. Slump change versus flakiness



Rys. 3. Opad stożka mieszanki betonowej z 50 i 100% udziałem kruszywa płaskiego

Fig. 3. The slumps of some fresh concrete with 0, 50 and 100% flakiness

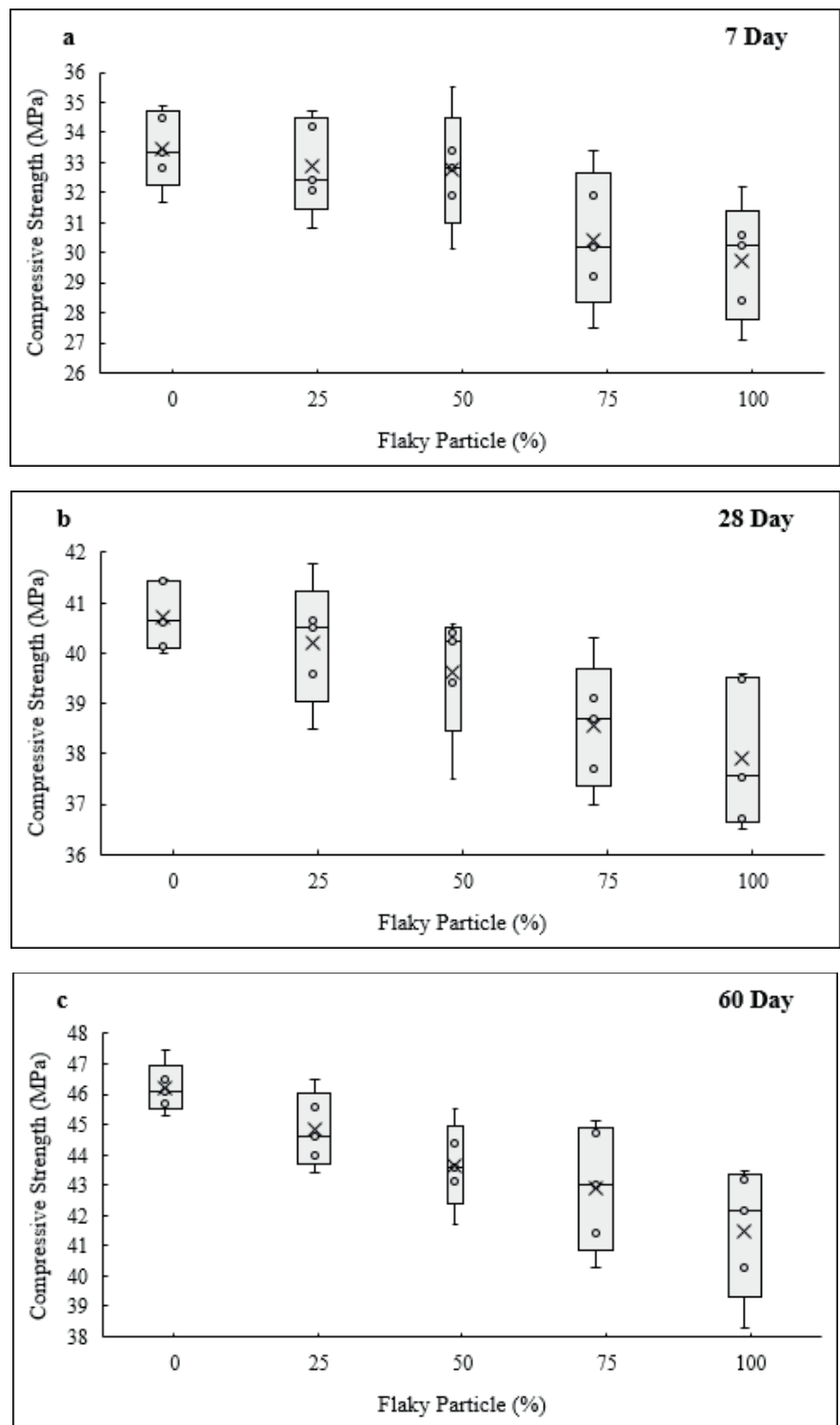
betonu. Zmniejszenie opadu stożka w wyniku wzrostu udziału ziaren płaskich można łączyć ze wzrostem stopnia flokulacji i segregacji oraz zmiennej zawartości wody, powodującej niejednorodność masy betonowej.

#### 4.2. Wytrzymałość na ściskanie

Zmiany wytrzymałości na ściskanie w zależności od zawartości ziaren płaskich w kruszywie grubym dla różnych okresów dojrzewania betonu przedstawiono na rys. 5. Dla wszystkich grup o tym samym czasie dojrzewania betonu wytrzymałość na ściskanie próbek o tym samym składzie ulegała znacznemu liniowemu zmniejszeniu wraz ze wzrostem zawartości ziaren płaskich. Analiza spadku wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem zawartości ziaren płaskich za pomocą wykresów pudełkowych wykazuje, że zakres wytrzymałości na ściskanie – linia T, wyraźnie wzrasta wraz ze zwiększeniem płaskości (rys. 5). Pomimo, że ten zakres wytrzymałości na ściskanie dotyczył wszystkich okresów dojrzewania betonu, był on najbardziej wyraźny i znaczący po 60 dniach (rys. 5-c).

Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie wraz z odchyleniami standardowymi dla badanych próbek betonów, z różnym udziałem ziaren grubych płaskich podano w tabeli 5, a także przedstawiono odpowiednio na rysunkach 6 i 7-9. Duży spadek wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem zawartości ziaren grubych płaskich, stwierdzono dla wszystkich okresów dojrzewania również na rys. 6. Stwierdzono silne korelacje liniowe – wartości  $R^2$  0,945, 0,992, 0,995 odpowiednio po 7, 28 i 60 dniach pomiędzy średnią wartością wytrzymałości na ściskanie, a zawartością ziaren grubych płaskich – rysunek 6. Zgodnie z tymi liniowymi zależnościami, wzrost zawartości ziaren grubych płaskich o 25% powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie średnio o 0,93, 0,4 i 1,18 MPa po okresach dojrzewania wynoszących odpowiednio 7, 28 i 60 dni.

Na rysunkach 7-9 przedstawiono zmiany odchylenia standardowego wytrzymałości na ściskanie w zależności od procentowego udziału ziaren płaskich, dla wszystkich okresów dojrzewania. Z rysunków wynika, że wraz ze wzrostem udziału ziaren płaskich znacznie wzrastały odchylenia standardowe. Ta zmiana odchylenia standardowego była najbliższa liniowej po 60 dniach, wykazując bardzo duży współczynnik korelacji  $R^2=0,98$ . Ponieważ od-



Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie betonów w zależności od udziału ziaren płaskich kruszywa po 7 (a), 28 (b) i 60 (c) dniach twardnienia. Linia środkowa, górne i dolne zawiasy pudełka, okrąg i x reprezentują odpowiednio medianę, 75. i 25. percentyl danych, wartości przerywane i średnią arytmetyczną, podczas gdy linia T wskazuje zakres danych, to znaczy wartości maksymalne i minimalne.

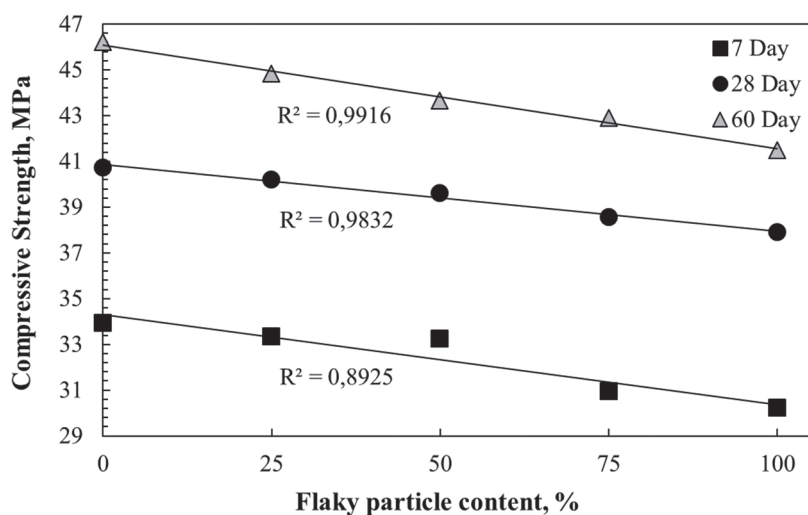
Fig. 5. Compressive strength of concretes versus flakiness of aggregates after 7 (a), 28 (b) and 60 (c) days days of curing. The middle line, the upper and lower hinges of the box, the circle and the x represents the median value, the 75<sup>th</sup> and 25<sup>th</sup> percentiles of the data, the intermittent values and the arithmetic mean, respectively, while the T-line indicates the data range, viz. max. and min values

Tablica 4 / Table 4

ŚREDNIA WARTOŚĆ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE BETONÓW I ODCHYLENIA STANDARDOWE (WARTOŚCI KURSYWĄ W NAWIASACH)

AVERAGE VALUE OF COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETES AND STANDARD DEVIATION (THE VALUES AS ITALIC IN PARENTHESES)

Flaky Particle content Zawartość ziaren płaskich, %	Compressive Strength [with Standard Deviation] Wytrzymałość ns ściskanie [odchylenie standardowe], MPa		
	7 Day	28 Day	60 Day
0	33.4 [1.30]	40.2 [0.62]	45.7 [0.91]
25	32.9 [1.60]	39.7 [1.24]	44.3 [1.36]
50	32.7 [2.00]	39.1 [1.27]	43.2 [1.37]
75	30.4 [2.30]	38.1 [1.28]	42.4 [1.88]
100	29.7 [1.99]	37.4 [1.33]	41.0 [1.83]



Rys. 6. Zmiana wytrzymałości na ściskanie a płaskość w betonach w różnym wieku

Fig. 6. Compressive strength change versus flakiness for the concretes at all ages

chylenie standardowe wytrzymałości na ściskanie wzrasta wraz z powiększeniem się zawartości ziaren płaskich jednoznacznie wykazuje, że wzrost stopnia płaskości zwiększa również zakres wytrzymałości, co stwierdzono w analizie zależności pomiędzy płaskością a wytrzymałością, wykonanej za pomocą wykresów pudełkowych [rys. 5].

W rezultacie analiza wartości średniej, zakresu i odchylenia standardowego wytrzymałości na ściskanie odpowiadających procentowej zawartości ziaren płaskich [rys. 5, 6 i 7-9] wykazuje, że o ile wzrost płaskości zmniejsza wyraźnie i liniowo wytrzymałość, o tyle różnice i niepewność wytrzymałości próbek betonowych o tej samej zawartości ziaren płaskich wyraźnie wzrastają. W praktyce budowlanej oznacza to, że wzrost udziału ziarna płaskiego w kruszywie grubym, doprowadzi do powstania stref krytycznych, które będą się inaczej zachowywać, co najprawdopodobniej może spowodować szereg nieprzewidywalnych problemów inżynierskich.

almost impossible to obtain a homogeneous mixture for the fresh concrete mix containing more than 25% flaky coarse grain. It was noted that inhomogeneity was proportional to flakiness.

Slump tests, mostly accepted as a measure of the consistency of fresh concrete, were performed to observe the effect of flakiness on slump behaviour. As can be seen in Figure 3, while the slump of the concrete containing 100% flaky coarse aggregate was zero, it increased markedly as the flakiness decreased.

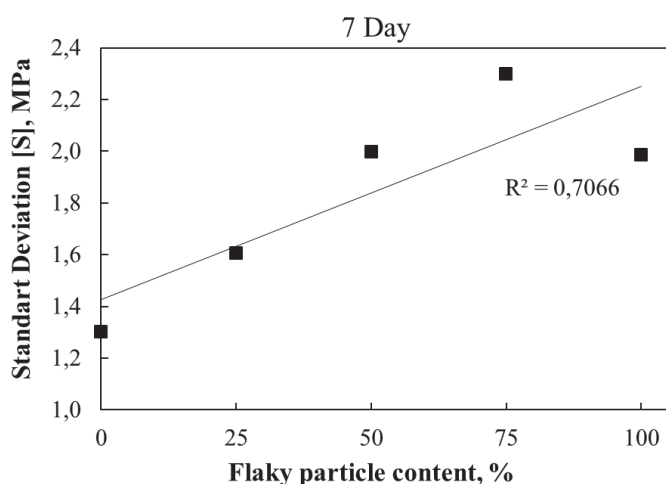
The variation of slump with respect to flaky particle percentage in coarse aggregate for all mixes, is plotted in Fig. 4. The results reveal that flakiness is one of the main parameters determining the slump behavior of fresh concrete, indicating an almost perfect negative linear relationship, having a strong correlation coefficient [R=0.99] between them. For this particular concrete design, the increase in the content of flaky coarse aggregate by 25% leads to an average 18 mm reduction in the slump. Consequently, the flakiness has a significant negative influence on the workability of the fresh concrete. The reduction in slump due to the increase in flakiness can be explained in terms of the increase in the amount

of flocculation and segregation, and sections with various water content, leading to inhomogeneity of concrete mass.

#### 4.2. Compressive strength

The development of compressive strength corresponding to the flaky particle percentage in coarse aggregate based on the curing time, is presented in Fig. 5. For all ages, the compressive strength of concretes with the same design was significantly reduced linearly, with an increase in the fraction of flaky particles. The analysis of the decrease of compressive strength with the increase of flakiness through the box plot graphs, indicates that the range of compressive strength values (T-line) increased markedly with an increase of flakiness (Fig. 5). Although this range pattern of compressive strength was valid for all the concrete ages, it was most pronounced and meaningful after 60 days (Figure 5-c).

Average compressive strength with their standard deviations for the concretes including different percentages of flaky coarse particles tested in this study are given in Table 5, and presented graphically in Fig. 6 and 7-9, respectively. A significant decrease in compressive strength with increasing flaky coarse particle content was observed for all the cure times in Fig. 6 as well. Strong linear correlations (*R* values of 0.945, 0.992, 0.995 for 7, 28 and 60 days, respectively) were found between the average compressive strength value and the flaky coarse particle content (Fig. 6). According to these linear relationships, an increase in the flaky coarse particle of 25% leads to a decrease in compressive strength of average 0.93, 0.4 and 1.18 MPa for the cure times of 7, 28 and 60 days, respectively.



Rys. 7. Zależność pomiędzy odchyleniem standardowym [S] wytrzymałości na ściskanie a procentowym udziałem ziaren płaskich w betonach po 7 dniach

Fig. 7. Relation between the standard deviation [S] of compressive strength and the flaky particle percentage of concretes after 7 days

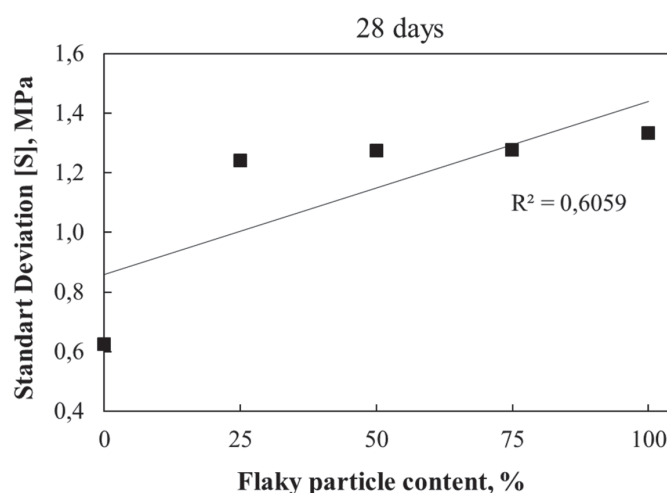
## 5. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski:

1. Przygotowanie mieszanek, stosowanie mieszania i odlewania staje się coraz trudniejsze, a flokulacja i segregacja świeżej mieszanki betonowej znacznie wzrasta, w przypadku zwiększenia zawartości ziaren płaskich w kruszywie grubym. Uzyskanie jednorodnej mieszanki, zawierającej więcej od 25% ziaren grubych płaskich było prawie niemożliwe. Niejednorodność była proporcjonalna do płaskości.
2. Wzrost płaskości powodował liniowe zmniejszenie opadu stożka. W przypadku składu betonu, którą stosowano w badaniach, zwiększenie zawartości kruszywa grubego płaskiego o 25% doprowadziło do zmniejszenia opadu stożka o średnio 18 mm. Zawartość 100% kruszywa grubego płaskiego w betonie powoduje brak opadu stożka.
3. Zwiększenie zawartości ziaren płaskich w kruszywie grubym powodowało wyraźnie liniowy spadek wytrzymałości na ściskanie betonów, po wszystkich okresach dojrzewania. Zgodnie z tymi ujemnymi liniowymi zależnościami, wzrost zawartości ziaren grubych płaskich o 25% doprowadził do spadku wytrzymałości na ściskanie o średnio 0,9, 0,4 i 1,2 MPa, dla czasów dojrzewania wynoszących odpowiednio 7, 28 i 60 dni.
4. Wzrost zawartości ziaren płaskich zwiększał zakres i odchylenie standardowe wytrzymałości na ściskanie, przy tym samym udziale procentowym ziaren płaskich. Tendencja ta była najbardziej wyraźna po 60 dniach.

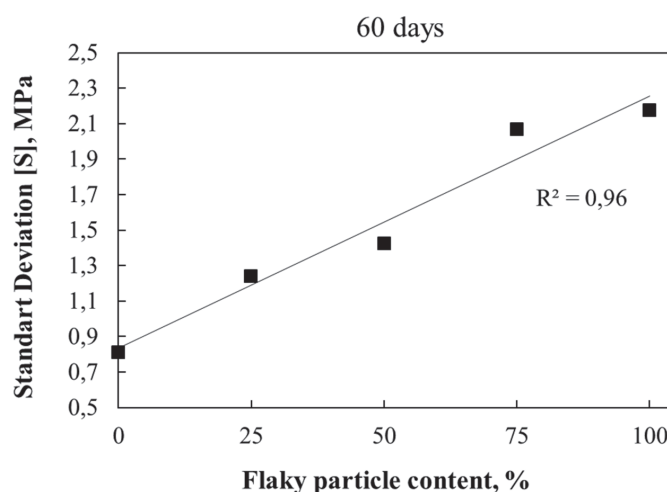
## Podziękowania

Autorzy dziękują pani Funda Özkarakoyuncu, kierownikowi laboratorium w Kaksan Karaisali Lime Industry and Trade. Inc.,



Rys. 8. Zależność pomiędzy odchyleniem standardowym [S] wytrzymałości na ściskanie a procentowym udziałem ziaren płaskich w betonach po 28 dniach

Fig. 8. Relation between the standard deviation [S] of compressive strength and the flaky particle percentage of concretes after 28 days



Rys. 9. Zależność pomiędzy odchyleniem standardowym (S) wytrzymałości na ściskanie a procentowym udziałem ziaren płaskich w betonach po 60 dniach

Fig. 9. Relation between the standard deviation (S) of compressive strength and the flaky particle percentage of concretes after 60 days

The variations of standard deviations of the compressive strength with respect to flakiness percentage for all curing times are plotted in Figs. 7-9. The figures indicate that the standard deviations were significantly increased with the increment of flaky particle percentage. This change of the standard deviations was most linear after 60 days, having a very strong correlation coefficient [R=0.98]. The fact that the standard deviation of compressive strength increases with the increase in flaky particle amount clearly shows that the increase in flakiness increases the range of the strength values as well, as stated in the analysis of the relations between flakiness and strength made through the box plot graphs (Fig. 5).

As a result, the analysis of the average, range and standard deviation values of compressive strength corresponding to the



Adana-Turcja, za pomoc w przygotowaniu próbek; oraz Panu Subutay Yanık, dyrektorowi laboratorium Tarsus İmar İnşaat Industry and Trade. Inc. Concrete Factory, Tarsus-Turcja, za jego zgodę na wykorzystanie zakładu betoniarskiego do przygotowania i badania próbek. Badania zostały sfinansowane przez Jednostkę Projektów Badań Naukowych Uniwersytetu Çukurova [Projekt nr MMF2012YL2].

## Literatura / References

1. M. Bengtsson, C.M. Evertsson, An empirical model for predicting flakiness in cone crushing. *IJMP*, **79**, 49-60 (2006).
2. S.S. Jamkar, and C.B.K. Rao, Index of Aggregate Particle Shape and Texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning. *Cem. Concr. Res.* **34**, 2021-2027 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.010>.
3. B. Hudson, Modification to the Fine Aggregate Angularity Test Investigation into the Way We Measure Fine Aggregate Angularity, Proc. 7<sup>th</sup> Ann. Symp. International Center for Aggregates Research, Austin, TX (1999).
4. E.B. Frazao, N.C. Sbrighi, The influence of the shape of the coarse aggregate on some hydraulic concrete properties. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* **30**, 221-224 (1984).
5. P. Polat, M.M. Yadollahi, A.E. Sağsoz, S. Arasan, The correlation between aggregate shape and compressive strength of concrete: digital image approach. *Int. J. Struct. & Civil Engg. Res.* **2**, 62-80 (2013).
6. S.T. Erdoğan, Determination of aggregate shape properties using X-ray tomographic methods and the effect of shape on concrete rheology [PhD], Austin, Dissertation, University of Texas (2005).
7. S.T. Erdogan, P.N. Quiroga, D.W. Fowler, H.A. Saleh, R.A. Livingston, E.J. Garboczi, P.M. Ketcham, J.G. Hagedorn, S.G. Satterfield, Three-dimensional shape analysis of coarse aggregates: New techniques for and preliminary results on several different coarse aggregates and reference rocks. *Cem. Concr. Res.* **36**, 1619-1627 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.04.003>.
8. A.K.H. Kwan, C.F. Mora, H.C. Chan, Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cem. Concr. Res.* **29**, 1403-1410 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00105-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00105-2).
9. M.A. Ozol, Significance of test and properties of concrete and concrete-making materials-Test and properties of concrete aggregates: Chapter 35-Shape, surface texture, surface area, and coatings. ASTM, (1978).
10. M.F. Kaplan, Flexural and compressive strength of concrete as affected by properties of coarse aggregates. *ACI J. Proc.* **55**(5), 1193-1208 (1959). <https://doi.org/10.14359/11415>.
11. M. Santhanam, P.J.A. Raj, Influence of the degree of flakiness of local aggregate on the properties of self-compacting concrete, 29<sup>th</sup> Conf. Our World in Concrete&Structures: 25 - 26 August 2004, Singapore. 455-459 (2004).
12. R. Yoshida, E.B. Frazao, A.M.P. Giroldo, Estudo sobre a forma de agregados rochosos, Proceedings of the Semana paulista de geologia aplicada, 4., Anais, Sao Paulo (1972).
13. BS 812-105.1. Methods for determination of particle size and shape. Flakiness index. London, UK: British Standards Institute (1989).
14. BS 812-105.2. Methods for determination of particle size and shape. Elongation index of coarse aggregate. London, UK: British Standards Institute (1990).

percentage of flakiness (Fig. 5, 6 and 7-9) states that whereas the increment of flakiness decreases significantly and linearly the strength, the differences and uncertainty in the strength values of the concrete specimens with the same flakiness percentage, increase distinctly. In construction practice, this means that the increase in the percentage of flaky particles in coarse aggregate will lead to form critical zones that behave differently, which can most likely cause a number of unpredictable engineering problems.

## 5. Conclusions

Based on the above results and discussion, the following conclusions can be drawn:

1. In the process of fresh concrete preparation, the application of mixing and casting became increasingly difficult, and flocculation and segregation in the fresh concrete mixture increased significantly, as the amount of flaky particles in coarse aggregate increases in the mixtures. It was almost impossible to obtain a homogeneous mixture for the fresh concrete mix containing more than 25% flaky coarse grains. Inhomogeneity was proportional to the flakiness.
2. The increase in the flakiness resulted in a linear decline of the slump. For the particular concrete design applied in this study, the increase in the content of flaky coarse aggregate by 25% led to an average of 18 mm reduction in the slump. The slump of the concrete containing 100% flaky coarse aggregate was zero.
3. The increase of flaky particle content in coarse aggregate caused a significant linear decrease in the compressive strength of concretes, for all the curing times. According to these negative linear relationships, an increase in the flaky coarse particle by 25% led to a decrease in compressive strength of average 0.9, 0.4 and 1.2 MPa for the curing times of 7, 28 and 60 days, respectively.
4. The increase in flaky particle content enhanced the range and standard deviation of compressive strength with the same flakiness percentage. This trend was most pronounced and meaningful after 60 days.

## Acknowledgments

The authors thank Mrs. Funda Özkarakoyuncu, laboratory manager of Kaksan Karaisalı Lime Industry and Trade. Inc., Adana-Turkey, for her help in sample preparation; and Mr. Subutay Yanık, laboratory director of Tarsus İmar İnşaat Industry and Trade. Inc. Concrete Factory, Tarsus-Turkey, for her permission to use the concrete facility for sample preparation and testing. This study was funded by the Scientific Research Projects Unit of Çukurova University [Project No. MMF2012YL2].

15. P.N. Quiroga, The Effect of the Aggregates Characteristics on the Performance of Portland Cement Concrete, [PhD.], Austin, The University of Texas (2003).
16. J.M.S. Shilstone, Concrete Mixture Optimization. *Concr. Int. Des. Constr.* **12**(6), 33-39 (1990).
17. A.M. Neville, J.J. Brooks, *Concrete Technology*, Longman Scientific & Technical, England (2010).
18. Bureau of Reclamation. *Concrete manual*. 8<sup>ed</sup>. Washington, USA: Government Printing Office; (1975).
19. M. Adom-Asamoah, R.O. Afrifa, A study of concrete properties using phyllite as coarse aggregates, *Mater. Des.* **31**, 4561-4566 (2010).
20. A.W. Allen, Influence of mineral aggregates on the strength and durability of concrete. *Symposium on mineral aggregates (ASTM STP, 83)*: ASTM; 1948:153 (1948).
21. BS 882. *Specification for aggregates from natural sources for concrete*. London, UK: British Standard (1992).
22. TS EN 197-1. *Cement: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. Ankara: Annual Book of TSE Standards, Turkish Standards Institute (2002).
23. TS 706 EN: 12620 +A1. *Aggregates for concrete*. Ankara: Annual Book of TSE Standards, Turkish Standards Institute (2009).
24. TS 3530 EN: 933-1/A1. *Tests for geometrical properties of aggregates. Determination of particle size distribution - Sieving method*. Ankara: Annual Book of TSE Standards, Turkish Standards Institute (2007).
25. TS 802. *Design Concrete Mixes*. Ankara: Annual Book of TSE Standards, Turkish Standards Institute (2009).
26. TS EN 206:D1. *Concrete - Specification, performance, production and conformity*. Ankara: Annual Book of TSE Standards, Turkish Standards Institute (2002).
27. TS EN 12350-2. *Testing fresh concrete. Slump test*. Ankara: Annual Book of TSE Standards, Turkish Standards Institute (2010).
28. TS EN 12390-3. *Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens*. Ankara: Annual Book of TSE Standards, Turkish Standards Institute (2003).