

Egemen Teomete¹, Ozgun Ilkim Kocyigit²

¹ Civil Engineering Department, Dokuz Eylul University, Kaynaklar, Buca, Izmir, Turkey

² Dokuz Eylul University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Kaynaklar, Izmir, Turkey

Zależność pomiędzy odkształceniem przy ściskaniu a oporem elektrycznym kompozytów cementowych zbrojonych włóknami węglowymi

Correlation between compressive strain and electrical resistance in carbon fiber reinforced cement composites

Słowa kluczowe: kompozyty cementowe, włókna węglowe, inteligentne materiały, samo-kontrola, odkształcenie betonu

Keywords: cement composites, carbon fiber, smart materials, self sensing, strain

1. Wprowadzenie

Konstrukcje betonowe narażone są na trzęsienia ziemi, zniszczenia materiałowe oraz szereg czynników środowiskowych. Infrastruktura betonowa często ulega zniszczeniu już w trakcie cyklu życia, czego przykładem jest 30% mostów w USA, które zostały uznane za konstrukcyjnie słabe (1). Stała kontrola stanu konstrukcji jest ważna dla ochrony przed awariami i ma ogromny wpływ na koszty napraw i utrzymania w dobrym stanie konstrukcji betonowych. Czujniki tensometryczne, które są szeroko stosowane do oceny stanu konstrukcji mają małą trwałość i czułość oraz wysoką cenę, co ogranicza ich zastosowanie (2, 3). Zawarte w konstrukcji materiały inteligentne, które potrafią wykrywać odkształcenie i/lub zniszczenie zmniejszają koszty stałej kontroli stanu konstrukcji betonowych oraz będą ważnym czynnikiem unowocześnienia i postępu w przemyśle budowlanym.

Dodatek włókien węglowych zwiększa przewodność elektryczną matrycy cementowej w betonie. Równocześnie stwierdzono, że opór elektryczny betonu ulega zmianom w przypadku jego odkształcenia (4-7). W badaniach stosowano różne konfiguracje

1. Introduction

Concrete structures are challenged by earthquakes, material degradations and other environmental factors. Concrete structures are frequently deteriorated within design life, while 30% of bridges were found to be structurally deficient in the USA (1). Structural health monitoring is important to protect the lives and to manage the assets for repair and maintenance of concrete structures. Strain gauges which are used widely in structural health monitoring have low durability, low sensitivity and high cost which makes their use limited (2, 3). Integral smart materials which can sense strain and/or damage will reduce the cost of health monitoring of concrete structures and will be an important advancement in the construction industry.

By addition of carbon fibers, the electrical conductivity of the cement matrix composite material will be increased. The electrical resistance was found to be sensitive to strain (4-7). Different electrode configurations and methods have been applied in several works for electrical properties of concrete measurements. Two and four electrode methods were used by different researchers (8, 9).

elektrod i metod dla oceny właściwości elektrycznych kompozytów cementowych. Między innymi metody dwu i czteroelektrodowe były stosowane przez różnych badaczy (8, 9).

W obwodowym układzie elektrod taśmę lub farbę przewodzącą nanosi się powierzchniowo wzdłuż obwodu próbki (1, 10, 11). W drugiej metodzie elektroda przewodząca umieszczana jest w kompozycie.

Zbrojenie matrycy cementowej włóknami węglowymi zwiększa wytrzymałość na rozciąganie, plastyczność oraz odporność na zginanie, jednocześnie zmniejszając pękanie wywołane skurczem (12).

Przewodzenie elektryczne w kompozytach cementowych zachodzi poprzez przewodzenie jonowe lub elektronowe (8).

Kompozyty cementowe były stosowane jako detektory pojazdów (13). Kompozyty cementowe na bazie tytanianu baru badano pod kątem właściwości ferro i piezoelektrycznych przy różnych stężeniach tytanianu baru (14). Kompozyty cementowe badano w zakresie piezoelektrycznych współczynników odkształcenia oraz współczynników napięcia (15). W badaniach przewodności elektrycznej kompozytów cementowych zbrojonych włóknami węglowymi stosowano teorię perkolacji (16). Geopolimery badano pod kątem wykrywania odkształceń (17). Badano czułość kompozytów cementowych z dodatkiem węgla kamiennego na odkształcenia (18, 19). W celu określenia czułości na odkształcenia przy rozciąganiu matryc cementowych zbrojonych włóknami stalowymi stosowano pomiar wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu (20).

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI WŁÓKIEN WĘGLOWYCH (DANE DOSTARCZONE PRZEZ PRODUCENTA WŁÓKIEN DOWAKSA CO.).
THE PROPERTIES OF CARBON FIBERS (DATA SUPPLIED BY CARBON FIBER MANUFACTURER DOWAKSA CO.)

Średnica / Diameter, μm	Gęstość / Density g/cm ³	Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength, MPa	Moduł sprężystości Modulus of Elasticity, GPa	Odkształcenie przy zerwaniu Strain at rupture, %
7	1.75	3500	235	1.5

W pracy zbadano dwadzieścia jeden różnych mieszanek z różnym dodatkiem włókien węglowych o różnej długości. W przypadku każdej mieszanki przygotowywano do pomiarów wytrzymałości na ściskanie po trzy próbki. Równocześnie przeprowadzono pomiary odkształceń oraz właściwości elektrycznych. Zaprezentowano nowe wnioski dotyczące czułości na odkształcenie przy ścisnaniu kompozytów cementowych zbrojonych włóknami węglowymi.

2. Metody i materiały

Przygotowano dwadzieścia jeden różnych mieszanek i zbadano ich właściwości. Celem badań było wytypowanie mieszanki, która daje najlepszą korelację odkształcenia ze zmianą oporu elektrycznego.

In cement based composites the electric conduction is achieved by either electrolytic conduction or electronic conduction (8).

A conductive tape or paint is pasted to the perimeter of the sample in the perimetral electrode configuration (1, 10-11). In the embedded electrode method a conductive electrode is inserted into the composite. Carbon fiber reinforcement of cement matrix increases tensile strength and ductility while decreasing shrinkage cracking (12).

Cement composites were used as vehicle detectors (13). The cement based barium titanate composites were investigated for different barium titanate concentrations for ferroelectric and piezoelectric properties (14). Cement based composites were tested for piezoelectric strain factors and voltage factors (15). The percolation theory was used in studying electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement composites (16). Geopolymers were studied for strain sensing (17). Carbon black filled cement composites were studied for strain sensitivity (18, 19). The cylinder splitting tensile test was used for determining the tensile strain sensitivity of the steel fiber reinforced cement matrix composites (20).

In this work, twenty one mixes with different carbon fiber lengths and volume ratios were studied. Apart from compressive strength, the strain and electrical properties were measured.

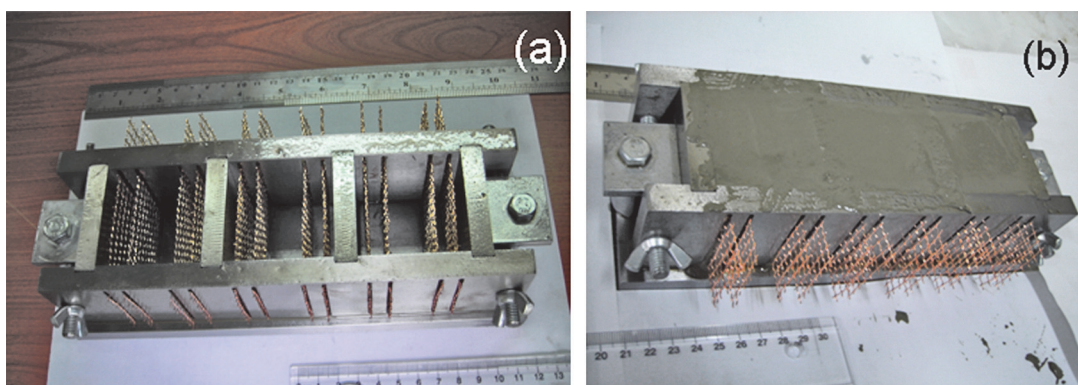
2. Materials and methods

Twenty-one different mixes were designed and tested. The aim of the tests was to find the mix that gives the strongest correlation between strain and electrical resistance change. The cement used

Tablica 2 / Table 2

MIESZANKI Z WŁÓKNAMI WĘGLOWYMI O RÓŻNEJ DŁUGOŚCI I Z RÓŻNYM UDZIAŁEM OBJĘTOŚCIOWYM
THE MORTARS WITH DIFFERENT CARBON FIBER LENGTHS AND VOLUME FRACTIONS

Długość włókien Fiber length mm	Udział objętościowy włókien Fiber volume fraction, %					
	0.2	0.35	0.5	0.8	1	1.5
6	C1	-	C2	C3	C4	C5
3	C6	-	C7	C8	C9	C10
13	C11	C12	C13	C14	C15	-
16	C16	C17	C18	C19	C20	-



Rys. 1. a) Elektrody w postaci siatki z drutów miedzianych w formie. b) Po wypełnieniu formy mieszanką

Fig. 1. a) Copper wire mesh electrodes in the mold. b) After the mix was cast in the mold

Stosowano cement CEM I 42,5R. We wszystkich mieszankach stosunek piasek/cement wynosił 1, a udział pyłu krzemionkowego w cemencie wynosił 10%, stosunek woda/cement był 0,4, a dodatek superplastyfikatora Sika ViscoCrete High Tech 30 wynosił masowo 2% cementu. W mieszankach stosowano cztery różne długości włókien węglowych: 3 mm, 6 mm, 13 mm i 16 mm. Właściwości włókien węglowych przedstawiono w tabelicy 1. Mieszanka M1 nie zawierała włókien. Długość włókien węglowych oraz ich udział objętościowy w pozostałych mieszankach przedstawiono w tabelicy 2.

W przypadku każdej mieszanki przygotowano i zbadano po trzy 5 cm kostki. Elektrode stanowiła siatka z drutu miedzianego. Oczko siatki wynosiło 5 mm, a średnica drutu 600 μm . Kostki formowano w specjalnie wykonanych formach sześciennych o boku 5 cm. Jak pokazano na rysunku 1a na przeciwległych bocznych ścianach formy znajdowały się 4 otwory szerokie na 2 mm i długie na 46 mm, w których umieszczono siatkę miedzianą. Mieszankę wylewano do formy po umieszczeniu elektrod w otworach (rysunek 1b). Dwadzieścia cztery godziny po zafornowaniu próbki rozformowywano i przechowywano w wodzie przez 28 dni. Po 28 dniach próbki dojrzewały w warunkach laboratoryjnych przez 7 dni w celu wyrównania wilgotności.

Wytrzymałość na ściskanie mierzono przy szybkości przemieszczania głowicy prasy wynoszącej 0,5 mm/min. W trakcie badań zastosowano układ czteroelektrodowy. Stałe napięcie było przyłożone do elektrod prądowych (E_c) (rysunek 2 a-b). Opór odniesienia $R_r=1000$ Ohm był szeregowo połączony z próbką w obwodzie. Równocześnie z przyłożonym obciążeniem ściskającym mierzono różnicę potencjału pomiędzy elektrodami napięciowymi (E_v) jako V_s , natomiast przez V_r oznaczono mierzoną różnicę potencjału na oporze odniesienia (R_r) (rysunek 2 a-b). Do ciągłego pomiaru odkształcenia próbki, w kierunku działania siły, zastosowano czujnik tensometryczny. W trakcie badania rejestrowano z częstotliwością 10 Hz obciążenie ściskające, przesuw głowicy, pomiary prowadzone przez czujnik tensometryczny, różnice potencjałów V_s i V_r . Podczas pomiarów stosowano rejestrator National Instruments, oraz komputer.

was CEM I 42.5R, the ratio of sand to cement was 1 and w/c ratio was 0.4 10% by mass of cement the silica fume was added; the superplasticizer Sika ViscoCrete High Tech 30 was applied in the quantity 2% by mass of cement in all mixes. The carbon fibers used were the polyacrylonitrile based unsized fibers. Four different fiber lengths of 3 mm, 6 mm, 13 mm and 16 mm were used in the mix design. The properties of carbon fibers are presented in Table 1.

The mix M1 did not contain fibers. The carbon fiber length and volume fractions of the other mixes are presented in Table 2.

Three samples of 5 cm cube from each mix were cast, cured and tested. Thus, the total number of sixty three samples were tested in this study. Copper wire mesh was used as an electrode. The mesh opening was 5mm and wire diameter was 600 μm . Five cm cube molds were designed and manufactured for this study. On the opposite side walls of the mold, there are four, 2 mm wide, 46 mm long slots for passing the copper wire mesh as seen in Fig. 1a. The mix was cast in the molds after the electrodes were inserted through the slots (see Fig. 1b). 24 hours after casting, the samples were demolded and cured in water for 28 days. After 28 days, the samples were cured in laboratory for 7 days to attain the moisture content of the samples at the steady state.

Compressive strength was tested with a displacement rate of stroke of 0.5 mm/min (Table 3). The four electrode configuration was used during the tests. DC current was applied to current electrodes (E_c) as seen in Fig. 2 (a-b). The reference resistance $R_r=1000$ Ohm was in series with the sample in the circuit. Simultaneously to the compressive strength test, the potential difference between voltage electrodes of the sample (E_v) was measured as V_s , while the potential difference across the reference resistance (R_r) was measured as V_r as shown in Fig. 2 (a-b). A strain gauge was used to monitor the strain of the sample. The load, the stroke of the loading head, strain gauge data and potential differences V_s and V_r were recorded at a rate of 10 Hz (10 data in a second) during the compression test. A National Instruments data logger, DC power source, and a PC to record the data were used in these measurements.

The current in the circuit (I_c) was calculated from Ohm's law (Eq. 1). This current (I_c) and the potential difference between voltage

Natężenie prądu w obwodzie (I_c) obliczano z prawa Ohma [równanie 1], natomiast to natężenie oraz różnicą potencjałów pomiędzy elektrodami napięciowymi (V_s) wprowadzono do równania 2 w celu obliczenia oporu próbki (R_s).

$$I_c = \frac{V_r}{R_r} \quad [1]$$

$$R_s = \frac{V_s}{I_c} \quad [2]$$

Z równania 3 wyliczano procentową zmianę oporu próbki (%R) w trakcie jej obciążania.

$$\%R = \left(\frac{R_s}{R_{s0}} - 1 \right) \cdot 100 \quad [3]$$

Współczynnik czujnika (K) oraz liniowość (LE) są wskaźnikami eksploatacyjnymi czujnika tensometrycznego. Współczynnik (K) jest zdefiniowany jako cząstkowa zmiana oporu elektrycznego na jednostkę odkształcenia i może być wyliczony z równania 4. Współczynnik czujnika jest miarą czułości czujników tensometrycznych na odkształcenia. Nachylenie krzywej procentowej zmiany oporu (%R) w funkcji odkształcenia, podzielone przez 100, daje współczynnik czujnika. Im większa jest czułość czujnika, tym większy jest współczynnik K. Współczynnik komercyjnych metalowych czujników tensometrycznych wynosi około 2. Jak wynika z równania 5 liniowość (LE) jest procentową maksymalną różnicą pomiędzy krzywą wejście-wyjście (krzywa %R w funkcji odkształcenia), a dopasowaną prostą regresji liniowej dla całego zakresu wyjścia (R_{fs}). Błąd pomiaru odkształcenia maleje z malejącą liniowością.

$$K = \frac{(R - R_{so}) / R_{so}}{\Delta \epsilon} \quad [4]$$

$$\%LE = \left(\frac{\Delta_{max}}{\%R_{fs}} \right) \times 100 \quad [5]$$

Maksymalne odkształcenie, które można oznaczyć z małym błędem nazywa się granicą odkształcenia. Granica odkształcenia (SL) typowego komercyjnego metalowego czujnika tensometrycznego wynosi 0,5% - 3%.

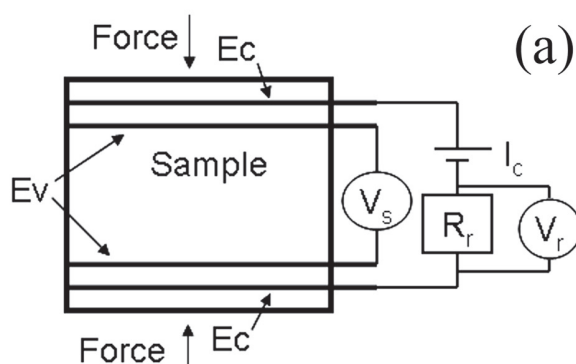


Tabela 3 / Table 3

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE ZAPRAW

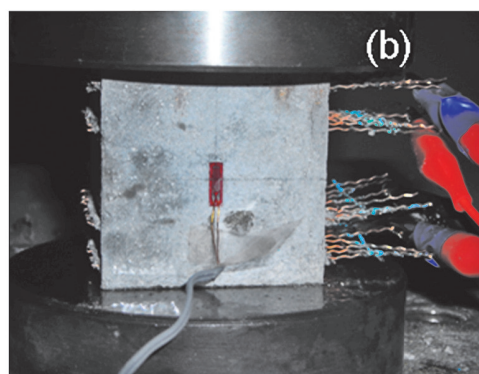
THE COMPRESSIVE STRENGTH OF THE MORTARS AFTER 28 DAYS OF HARDENING

Oznaczenie próbki Sample	Długość włókien Fiber length, mm	Udział objętościowy frakcji Volume fraction, %	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa
M1	0	0	75
C1	6	0,2	90
C2	6	0,5	89
C3	6	0,8	86
C4	6	1	75
C5	6	1,5	74
C6	3	0,2	89
C7	3	0,5	90
C8	3	0,8	91
C9	3	1	91
C10	3	1,5	82
C11	13	0,2	80
C12	13	0,35	85
C13	13	0,5	87
C14	13	0,8	84
C15	13	1	91
C16	16	0,2	86
C17	16	0,35	85
C18	16	0,5	87
C19	16	0,8	91
C20	16	1	89

electrodes of the sample (V_s) was introduced to Eq. 2 for the resistance of the sample (R_s) calculation.

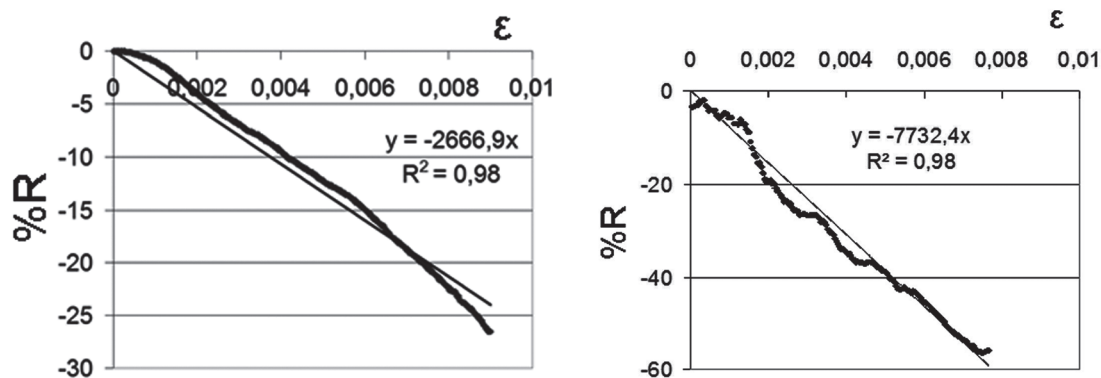
$$I_c = \frac{V_r}{R_r} \quad [1]$$

$$R_s = \frac{V_s}{I_c} \quad [2]$$



Rys. 2. a) Schemat obwodu pomiarowego podczas badania na ściskanie, b) Próbka w trakcie badania na ściskanie

Fig. 2. a) The test circuit diagram during compression test, b) the sample at the compression test



Rys. 3. Krzywa zmiana procentowa oporu elektrycznego - odkształcenie a) mieszanka M1 bez włókien, (K=30; LE=10%; SL=0,9%) b) mieszanka C1 z włóknami węglowymi o długości L=6mm, objętościowy udział 0,2% (K=73; LE=10%; SL=0,76%)

Fig. 3. The percent change of electrical resistance- strain graph a) M1 mixture without fiber, (K=30; LE=10%; SL=0.9%) b) C1 mixture with carbon fiber length L= 6 mm, 0.2% volume fraction (K=73; LE=10%; SL=0.76%)

3. Wyniki pomiarów

Z powodu ograniczeń objętościowych artykułu wybrano tylko niektóre typowe wyniki z sześćdziesięciu trzech doświadczeń, które zostały tutaj przedstawione. Wytrzymałość na ściskanie mieszanek podano w tabelicy 3. Dodatek włókien węglowych w zakresie do 1% udziału objętościowego zwiększył wytrzymałość na ściskanie w porównaniu do mieszanki M1, która nie zawierała włókien.

Mieszanka bez dodatku włókien (M1) miała współczynnik K=30. Jej czułość jest 15 razy większa od czułości komercyjnych metalowych czujników tensometrycznych. Jej liniowość wynosi 10%, a granica odkształcenia (SL) wynosi 0,9%. Współczynnik korelacji mieszanki wynosi 0,98 (rysunek 3a).

Mieszanka C1z dodatkiem 0,2% włókien węglowych o długości L=6 mm ma współczynnik K równy 73. Zatem mieszanka C1 jest 35 razy bardziej czuła niż komercyjne metalowe czujniki tensometryczne. Jej liniowość wynosi 10%, a granica odkształcenia 0,76%. Współczynnik korelacji najlepszego dopasowania prostej do wykresu odkształcenie - %R wynosi 0,98 (rysunek 3b).

Mieszanka C4 z 1% dodatkiem włókien węglowych o długości L=6 mm ma współczynnik K=70, liniowość LE=9% i granicę odkształcenia SL=0,79%. Współczynnik korelacji wynosi 0,99 (rysunek 4a). Czułość mieszanki C4 jest 35 razy większa niż komercyjnych metalowych czujników tensometrycznych, natomiast błąd oszacowania odkształcenia jest mały.

Mieszanka C6 z 0,2% dodatkiem włókien węglowych o długości L=3 mm, ma współczynnik K=48, liniowość LE=9%, granicę odkształcenia SL=1,13%. Błąd oszacowania odkształcenia jest mały a granica odkształcenia jest wysoka. Współczynnik korelacji najlepszego dopasowania prostej wynosi 0,99 (rysunek 4b).

Mieszanka C7 z dodatkiem 0,5% włókien węglowych o długości L=3 mm, ma współczynnik K=102, który jest 50 razy bardziej czuły na odkształcenie niż komercyjne metalowe czujniki tensometryczne. Jej liniowość jest mała i wynosi LE=8%, a granica odkształcenia SL=0,7%. Współczynnik korelacji wynosi 0,99, zatem jest dobra korelacja pomiędzy odkształceniem a %R (rysunek 5a).

During the compression test the change of the sample resistance (%R) was calculated from Eq. 3.

$$\%R = \left(\frac{R_s}{R_{s0}} - 1 \right) \cdot 100 \quad [3]$$

Gauge factor (K) and linearity (LE) are the performance measures of a strain gauge. Gauge factor (K) is defined as the fractional change of electrical resistance per unit strain, and can be calculated using Eq. 4. The gauge factor is a measure of strain sensitivity of strain gauges. The slope of percentage change in resistance (%R) versus strain curve divided by 100 gives the gauge factor. The more sensitive the sensor is, the higher the K. The gauge factor of commercial metal strain gauges is around 2. Linearity (LE) is the percentage of maximum difference between input-output curve (%R versus strain curve) and fitted linear regression line, to the full scale output (R_{fs}), as given in Eq. (5). The error of strain measurement decreases with decreasing linearity.

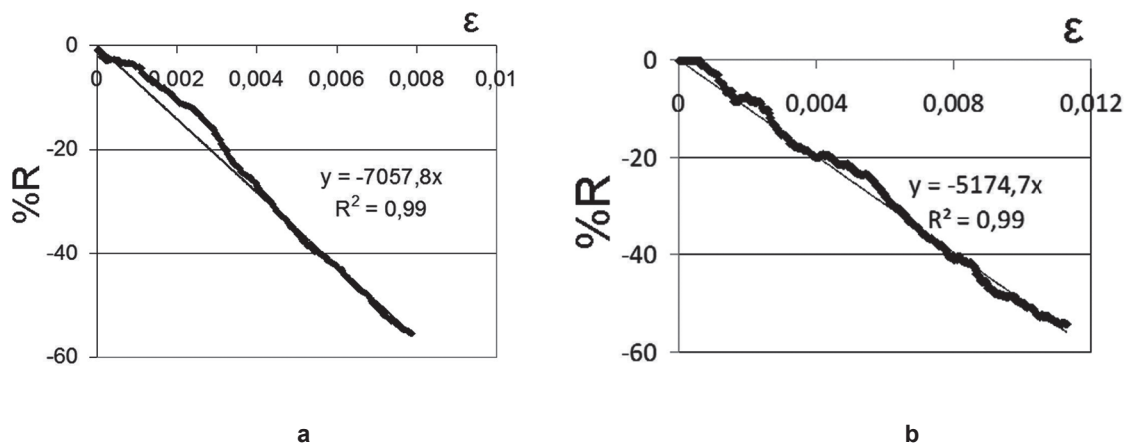
$$K = \frac{(R - R_{s0}) / R_{s0}}{\Delta \varepsilon} \quad [4]$$

$$\%LE = \left(\frac{\Delta_{max}}{\%R_{fs}} \right) \times 100 \quad [5]$$

The maximum strain that can be measured with a small error is strain limit (SL). The strain limit (SL) of typical commercial metal strain gauge is between 0.5% - 3%.

3. Results and discussion

In total, sixty three compression tests were conducted and they represent 21 different mixes. Due to space restriction, only some of the typical results have been presented here. The compressive strengths of the mixes are presented in Table 3. The addition of carbon fibers up to 1% volume fraction increased the compressive strength with respect to the mix M1 which does not have fibers.



Rys. 4. Krzywa zmiany procentowej oporu elektrycznego - odkształcenie a) mieszanka C4 z włóknami węglowymi o długości L=6mm, objętościowy udział 1%, (K=70; LE=9%; SL=0,79%) b) mieszanka C6 z włóknami węglowymi o długości L=3mm, objętościowy udział 0,2% (K=48; LE=9%; SL=1,13%)

Fig. 4. The percent change of electrical resistance- strain graph a) C4 mixture with carbon fiber length L=6mm, 1% volume fraction, (K=70; LE=9%; SL=0.79%) b) C6 mixture with carbon fiber length L=3mm, 0.2% volume fraction (K=48; LE=9%; SL=1.13%)



Rys. 5. Krzywa zmiany procentowej oporu elektrycznego - odkształcenie a) mieszanka C7 z włóknami węglowymi o długości L=3 mm, objętościowy udział 0,5%, (K=102; LE=8%; SL=0,7%) b) mieszanka C8 z włóknami węglowymi o długości L=3mm, objętościowy udział 0,8% (K=73; LE=12%; SL=0,9%)

Fig. 5. The percent change of electrical resistance- strain graph a) C7 mixture with carbon fiber length L=3 mm, 0.5% volume fraction, (K=102; LE=8%; SL=0.7%) b) C8 mixture with carbon fiber length L=3mm, 0.8% volume fraction (K=73; LE=12%; SL=0.9%)

Mieszanka C8 z dodatkiem 0,8% objętościowych włókien węglowych o długości L=3 mm, ma współczynnik K=73, liniowość LE=12% i granicę odkształcenia SL=0,9%. Mieszanka C8 jest 35 razy bardziej czuła niż komercyjne metalowe czujniki tensometryczne. Współczynnik korelacji tej mieszanki wynosi 0,98 (rysunek 5b).

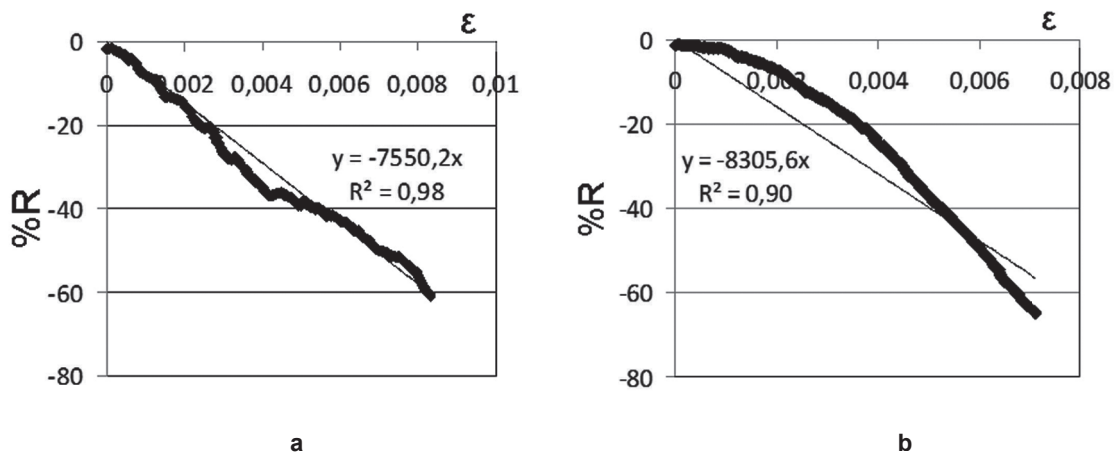
Mieszanka C10 z 1,5% udziałem objętościowym włókien węglowych o długości L=3 mm ma współczynnik K=72, liniowość LE=9% i granicę odkształcenia SL=0,83%. Mieszanka C10 jest znacznie bardziej czuła na odkształcenie niż komercyjne metalowe czujniki tensometryczne. Ma mały błąd wykrywania odkształcenia. Współczynnik korelacji najlepszego dopasowania prostej wynosi 0,98 (rysunek 6a).

Mieszanka C13 z dodatkiem 0,5% objętościowych włókien węglowych o długości L=13 mm, ma współczynnik K=90, liniowość LE=16% i granicę odkształcenia SL=0,71%. Mieszanka C13 jest 45 razy bardziej czuła na odkształcenie niż komercyjne metalowe czujniki tensometryczne. Współczynnik korelacji najlepszego dopasowania prostej wynosi 0,9 (rysunek 6b).

The examination of the cement mortars as a gauge for strain of mortar determination has given several interesting results which will be shortly presented. The mortar without fibers (M1), has a gauge factor of K=30. Its sensitivity is 15 times higher than the sensitivity of the commercial metal strain gauges. It has a linearity of 10% and its strain limit (SL) is 0.9%. It has a correlation coefficient of 0.98 as shown in Fig. 3a.

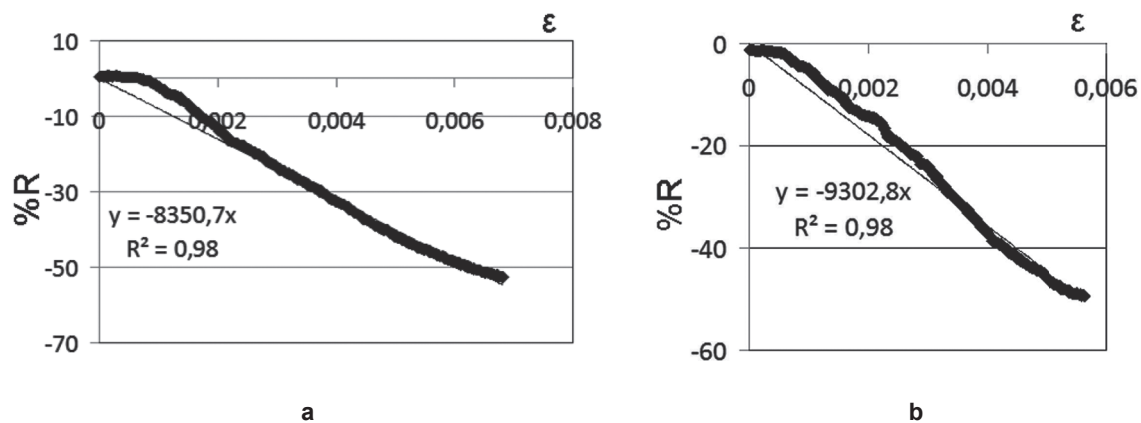
The C1 mortar with L=6 mm carbon fibers addition of 0.2% volume has a gauge factor of 73. Thus, it is 35 times more sensitive than the commercial metal strain gauges. Its linearity is 10% and strain limit is 0.76%. The correlation coefficient of the curve best fitting line to strain -%R graph is 0.98 (Fig. 3b).

C4 mortar with carbon fiber length of L=6 mm and 1% volume fraction, has the gauge factor K=70, linearity LE=9% and strain limit SL=0.79%. The correlation coefficient is 0.99 (Fig. 4a). The sensitivity of the system is 35 times higher than commercial metal strain gauges, while the error for strain estimation is low.



Rys. 6. Krzywa zmiany procentowej oporu elektrycznego - odkształcenie a) mieszanka C10 z włóknami węglowymi o długości L=3 mm, objętościowy udział 1,5%, (K=72; LE=9%; SL=0,83%) b) mieszanka C13 z włóknami węglowymi o długości L=13mm, udział objętościowy 0,5% (K=90; LE=16%; SL=0,71%)

Fig. 6. The percent change of electrical resistance- strain graph a) C10 mixture with carbon fiber length L=3 mm, 1.5% volume fraction, (K=72; LE=9%; SL=0.83%) b) C13 mixture with carbon fiber length L=13mm, 0.5% volume fraction (K=90; LE=16%; SL=0.71%)



Rys. 7. Krzywa zmiany procentowej oporu elektrycznego - odkształcenie a) mieszanka C14 z włóknami węglowymi o długości L=13 mm, udział objętościowy 0,8%, (K=76; LE=13%; SL=0,68%) b) mieszanka C19 z włóknami węglowymi o długości L=16 mm, udział objętościowy 0,8% (K=87; LE=11%; SL=0,57%)

Fig. 7. The percent change of electrical resistance- strain graph a) C14 mixture with carbon fiber length L=13 mm, 0.8% volume fraction, (K=76; LE=13%; SL=0.68%) b) C19 mixture with carbon fiber length L=16mm, 0.8% volume fraction (K=87; LE=11%; SL=0.57%)

Mieszanka C14 z 0,8% dodatkiem włókien węglowych o długości L=13 mm ma współczynnik K=76, liniowość LE=13% i granicę odkształcenia SL=0,68%. Współczynnik korelacji najlepszego dopasowania prostej do wykresu odkształcenie - %R wynosi 0,98 (rysunek 7a).

Mieszanka C19 z 0,8% dodatkiem włókien węglowych o długości L=16 mm, ma współczynnik K=87, liniowość LE=11% i granicę odkształcenia SL=0,57%. Współczynnik korelacji dla mieszanki C19 wynosi 0,98 (rysunek 7b).

Mieszanka C20 z 1% udziałem objętościowym włókien węglowych o długości L=16 mm, ma współczynnik K=149, liniowość LE=14% i granicę odkształcenia SL=0,4%. Mieszanka C20 jest 75 razy bardziej czuła niż komercyjne metalowe czujniki tensometryczne, natomiast ma mały błąd w szacowaniu odkształcenia (rysunek 8).

Wyniki pokazały, że kompozyty cementowe z włóknami węglowymi są bardziej czułe niż komercyjne metalowe czujniki tensometryczne. Ich błąd wynosi około 10% w wykrywaniu odkształcenia oraz

The mortar C6 with the carbon fiber of the length of L= 3 mm, and 0.2% volume fraction has the gauge factor of K=48, linearity LE=9%, strain limit SL=1.13%. The error in strain estimation is low and its strain limit is high. The correlation coefficient of the best curve fitting line is 0.99 (as seen in Fig. 4b).

Mix C7 with carbon fiber of the length of L= 3 mm, 0.5% volume fraction, has the gauge factor K=102, which has 50 times higher sensitivity to strain than the commercial metal strain gauges. It has a linearity of LE=8% which is low and a strain limit of SL=0.7%. The correlation coefficient is 0.99, thus there is a strong correlation between strain and %R (Fig. 5a).

The C8 mortar with carbon fiber of the 3 mm length, in the volume fraction 0.8%, has a gauge factor of K=73, linearity of LE=12% and strain limit SL of 0.9%. Thus C8 is 35 times more sensitive than the commercial metal strain gauges. Its correlation coefficient is 0.98 (Fig. 5b).

mają korzystny zakres oznaczania odkształcenia konstrukcji betonowych. Współczynniki korelacji odkształcenie - %R są bliskie 1, co jest obiecujące z uwagi na zastosowanie kompozytów o matrycy cementowej, jako czujników tensometrycznych w konstrukcjach betonowych. Czujniki tensometryczne oparte na cemencie mogą znajdować się blisko powierzchni lub w samym konstrukcyjnym elemencie betonowym, pozwalając na pomiar odkształcenia na powierzchni oraz wewnątrz elementu. Czujniki tensometryczne oparte na matrycy cementowej są bardziej trwałe niż czujniki tensometryczne z metalowej folii. W celu stosowania czujników tensometrycznych z matrycy cementowej efekt poprzecznego odkształcenia prostopadłego do obwodu elektrycznego został również podkreślony (21).

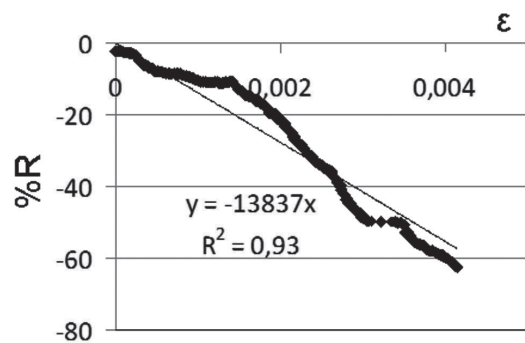
Czujniki tensometryczne oparte na matrycy cementowej mogą być stosowane do stałej kontroli odkształcenia przez długi okres czasu, z dużą czułością. Najnowsze badania wykazały, że czujniki oparte na matrycy cementowej mogą być także wykorzystywane do wykrywania spękań (22).

4. Wnioski

Wyniki doświadczeń pokazały, że matryca cementowa z włóknami węglowymi ma jako czujnik współczynnik K od 48 do 102 i wzrasta ze wzrostem zawartości włókien węglowych. Matryca cementowa zawierająca 1% włókien węglowych ma współczynnik K tak duży, że wynosi 149. We wszystkich przypadkach jest on znacznie większy niż współczynnik K typowych, komercyjnych czujników metalowych, który wynosi około 2. Zatem czujniki z matrycy cementowej są znacznie bardziej czułe na odkształcenie niż komercyjne metalowe czujniki tensometryczne. Współczynnik korelacji odkształcenie - %R dla kompozytów o matrycy cementowej jest bliski 1, co wskazuje na bardzo dobrą korelację pomiędzy odkształceniem a zmianą oporu elektrycznego. Różnica pomiędzy najlepszym dopasowaniem prostej do krzywej odkształcenie - %R a samymi danymi wynosi około 10%. Tak więc, błąd oszacowania odkształcenia przez kompozyty cementowe może wynieść około 10%, co jest akceptowalne. Dla kompozytów cementowych granica odkształcenia, będąca maksymalnym odkształceniem, dla którego czujnik może być zastosowany z akceptowalnym błędem, została ustalona na poziomie od 0,5% do 1,1% i jest w zakresie odkształceń, które mogą wystąpić w konstrukcji betonowej w trakcie całego okresu eksploatacyjnego.

Jak pokazano na wykresach odkształcenie - %R opór elektryczny podczas odkształcenia przy ścisaniu maleje z powodu zwiększenia kontaktu włókno-włókno, włókno-matryca oraz zamykania się rys.

Klasyczne czujniki stosowane do stałej kontroli stanu konstrukcji dostarczają punktowych danych, są niskiej trwałości i mają małą czułość, a równocześnie są drogie. Rozwój i stosowanie inteligentnych materiałów konstrukcyjnych, które potrafią wykrywać własne odkształcenia i uszkodzenia umożliwią stałą kontrolę stanu całej konstrukcji, przy większej niezawodności i mniejszych kosztach.



Rys. 8. Krzywa zmiany procentowej oporu elektrycznego - odkształcenie dla mieszanki C20 z włóknami węglowymi o długości L=16 mm, udział objętościowy 1%, (K=149; LE=14%; SL=0,4%)

Fig. 8. The percent change of electrical resistance- strain graph for C20 mixture with carbon fiber length L=16 mm, 1% volume fraction, (K=149; LE=14%; SL=0.4%)

C10 mortar with the carbon fiber of the length of 3 mm, with the 1.5% volume fraction, has the gauge factor K=72; linearity LE=9% and strain limit SL=0.83%. This C10 mortar has much higher sensitivity than the commercial metal strain gauges for strain measurement. It has a low error in strain sensing. The correlation coefficient of the curve best fitting line is 0.98 (Fig. 6a).

The mortar C13 containing carbon fibers of the length L=13 mm, 0.5% volume fraction and has a gauge factor of K=90; linearity of LE=16% and strain limit of SL=0.71%. Thus C13 has 45 times higher sensitivity to strain than the commercial metal strain gauges. The correlation coefficient of the best curve fitting line is 0.9 (Fig. 6b).

The C14 mortar which contains the carbon fibers addition of the length L=13 mm in the quality of 0.8% volume fraction. It has a gauge factor of K=76; linearity of LE=13% and SL=0.68%. The correlation coefficient of the best curve fitting line to strain - %R is 0.98 (Fig. 7a).

The mortar C19 with 0.8% volume fraction carbon fibers addition of the length L=16 mm, has a gauge factor of K=87, linearity of LE=11%; and strain limit of SL=0.57%. The correlation coefficient for C19 is 0.98 (Fig. 7b).

The C20 mortar with the carbon fiber addition of the length L=16 mm, in the content equal to 1% volume fraction has a gauge factor K=149, linearity LE=14%, and strain limit of SL=0.4%. This C20 mortar is 75 times more sensitive than the commercial metal strain gauges, and has a low error of strain estimating (Fig. 8).

The results reveal that the cement mortar with the carbon fibers addition have much higher sensitivity than the commercial metal strain gauges. Their error is in tolerance, around 10% in strain sensing and they have practical strain limits to measure strain of a concrete structure. The correlation coefficients of strain - %R data are close to 1, which is promising for the use of the cement matrix composites as a strain sensor in concrete structures. The cement based strain sensors can be located near the surface or in the

Inteligentne materiały są stosowane w różnych przemysłach. Niniejsza praca jest przyczynkiem do rozwoju inteligentnych materiałów do zastosowania w budownictwie.

Podziękowanie

Praca wspierana jest przez Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) w ramach Grantu nr: 110M221. Autor pragnie podziękować Sika Construction Chemicals Co. za zapewnienie pyłu krzemionkowego i superplastyfikatora oraz DowAksa Co. za włókna węglowe zastosowane w pracy. Autor jest wdzięczny Prof. Dr. Tahir Kemal Erdem za jego wkład w niniejszej pracy.

Literatura / References

1. F. Reza, G. B. Batson, J. A. Yamamuro, J. S. Lee, Resistance changes during compression of carbon fiber cement composites. *J. Mat. Civil. Eng.*, **15**, 5, 476-483 (2003).
2. D. D. L. Chung, Review functional properties of cement –matrix composites. *J. Mat. Sci.*, **36**, 1315-1324 (2001).
3. E. Teomete, T. K. Erdem, Cement Based Strain Sensor: A Step to Smart Concrete. *Cement Wapno Beton*, **77**, 78-92 (2011).
4. B. Demirel, S. Yazicioglu, N. Orhan, Electrical behaviour of carbon fibre-reinforced concrete with increasing loading in varying and constant frequencies. *Mag. Concr. Res.*, **58**, 10, 691-697 (2006).
5. D. D. L. Chung, Self-monitoring structural materials. *Mat. Sci. Eng.*, **22**, 57-78 (1998).
6. X. Fu, E. Ma, D. D. L. Chung, W.A. Anderson, Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement, *Cem. Concr. Res.*, **27**, 6, 845-852 (1997).
7. X. Fu, D. D. L. Chung, Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar. *Cem. Concr. Res.*, **27**, 9, 1313-1318 (1997).
8. M. Chiarello, R. Zinno, Electrical conductivity of self-monitoring CFRC. *Cem. Concr. Comp.*, **27**, 463-469 (2005).
9. B. Han, X. Guan, J. Ou, Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors. *Sens. Actuators A.*, **135**, 360-369 (2007).
10. F. Reza, J. A. Yamamuro, G. B. Batson, Electrical resistance change in compact tension specimens of carbon fiber cement composites. *Cem. Concr. Comp.*, **26**, 873-881 (2004).
11. B. Chen, J. Liu, Damage in carbon fiber –reinforced concrete, monitored by both electrical resistance measurement and acoustic emission analysis. *Constr. Build. Mater.*, **22**, 2196-2201 (2008).
12. D. D. L. Chung, Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material, *Composites Part B: Engineering*, **31**, 511-526 (2000).
13. B. Han, K. Zhang, X. Yu, E. Kwon, J. Ou, Nickel particle-based self-sensing pavement for vehicle detection. *Measurement*, **44**, 1645–1650 (2011).
14. R. Rianyoi, R. Potong, N. Jaitanong, R. Yimnirun, A. Chaipanich, Dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties of 0-3 barium titanate–Portland cement composites. *Appl. Phys. A.*, **104**, 661–666 (2011).
15. H. Gong, Y. Zhang, J. Quan, S. Che, Preparation and properties of cement based piezoelectric composites modified by CNTs. *Curr. Appl. Phys.*, **11**, 653-656 (2011).

concrete structural element, enabling strain measurement on the surface and within the element. The cement mortar based strain sensors are much more durable than metal foil strain gauges. In order to use cement matrix strain sensors, the effect of transverse strain, perpendicular to electric current, was also explained (21).

The cement matrix based strain sensors have higher durability and can be used for a long time to monitor strain with good sensitivity. The recent research has revealed that cement matrix based sensors can be also used for crack detection (22).

4. Conclusions

The results of experiments have shown that the cement matrix composites with carbon fibres have the gauge factors in the range from 48 to 102, increasing with the carbon fibres share. In the mortars with 1% volume fraction of fibres it can even be as high as 149. In all cases it is much higher than the gauge factor of a typical commercial metal strain gauge which is around 2. Thus, the cement matrix composites present much higher sensitivity tools for strain measurements than commercial metal strain gauges. The correlation coefficient between strain - %R data for the cement matrix composites is close to 1 which is the proof of strong correlation between the strain and electrical resistance change. The difference between the best curve fitting line for strain - %R data and the data itself is around 10%. Thus, the error in estimation of a strain with the cement matrix composites may give an error of around 10%, which is tolerable. The strain limit, which is the maximum strain that a sensor can measure with a tolerable error, for cement matrix composites was found to be 0.5% to 1.1%, which is in the range of strains that a concrete structure may show in whole exploitation period.

During the application of compressive strain, due to the increase in fiber – fiber contact; fiber- matrix contact and crack closure, the electrical resistance decreases as it is shown in the strain -%R graphs.

Classical sensors used in structural health monitoring give pointwise data, have low durability and low sensitivity while having high cost. The development and use of smart structural materials which can sense their own strain and damage will enable volumetric monitoring of structures while increasing the reliability and decreasing the cost of structural health monitoring. Smart materials are used in different industries. This study is a contribution towards the development of smart materials for the use in the building industry.

Acknowledgements

This work has been supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) through Grant no: 110M221. The author would like to thank Sika Construction Chemicals Co. for providing the silica fume and super-plasticizer and DowAksa Co. for carbon fibers used in this study. The author is

16. B. Chen, K. Wu, W. Yao, Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites. *Cem. Concr. Comp.*, **26**, 291–297 (2004).
17. S. Vaidya, E. N. Allouche, Strain sensing of carbon fiber reinforced geopolymer concrete. *Mat. Struct.*, **44**, 1467–1475 (2011).
18. H. Li, H. Xiao, J. Ou, Electrical property of cement-based composites filled with carbon black under long-term wet and loading condition. *Comp. Sci. Tech.*, **68**, 2114-2119 (2008).
19. H. Li, H. Xiao, J. Ou, Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement – based composites. *Cem. Concr. Comp.*, **28**, 824-828 (2006).
20. E. Teomete, O.I. Kocyigit, Tensile strain sensitivity of steel fiber reinforced cement matrix composites tested by split tensile test. *Constr. Build. Mat.*, **47**, 962–968 (2013).
21. E. Teomete, Transverse Strain Sensitivity of Steel Fiber Reinforced Cement Composites Tested by Compression and Split Tensile Tests. *Constr. Build. Mat.*, **55**, 31 March 2014, Pages 136–145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.016>
22. E. Teomete, Relations of Crack Length and Electrical Resistance for Smart Cement Based Composites. *Cement Wapno Beton*, **79**, 329-334, 2013.

thankful to Assoc. Prof. Dr. Tahir Kemal Erdem for his contributions to the work.