



Investigation of mechanical and electrical properties of ultra-low rate SWCNT added UHPC

Muhammet Seis¹, Serkan Subaşı^{1*}, Muhammed Maraşlı², Heydar Dehghanpour²

¹Department of Civil Engineering, Faculty Engineering, Düzce University, Düzce 81620, Türkiye

²Fibrobeton Company, İstanbul 34810, Türkiye

Highlights:

- Production of UHPCs with different SWCNT ratios
- Realization of electrical and non-destructive tests
- Determination of mechanical properties

Keywords:

- UHPC
- Composite
- Carbon nanotube
- SWCNT
- Electrical resistivity

Article Info:

Research Article

Received: 29.04.2021

Accepted: 12.02.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.929690

Correspondence:

Author: Serkan Subaşı

e-mail:

serkansubasi@duzce.edu.tr

phone: +90 380 542 1133

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the mechanical and electrical properties of ultra-high performance concretes (UHPCs) produced using different ratios of SWCNT were investigated. The electrical resistivity results are summarized in Figure A (a) and the FE-SEM image obtained is given in Figure A (b).

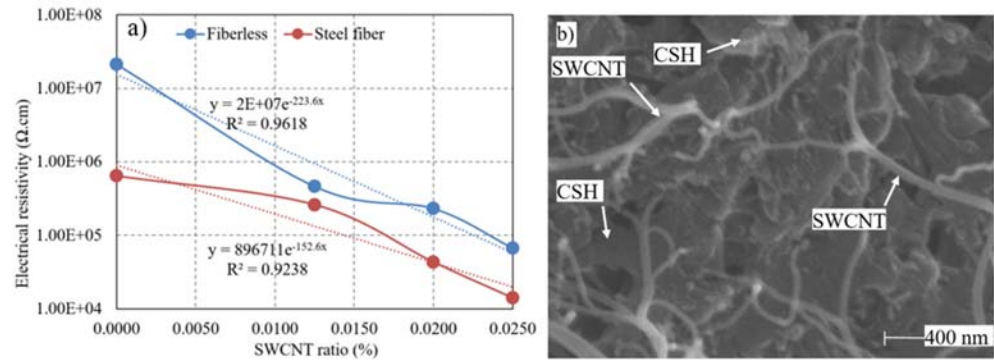


Figure A. Electrical resistivity results (a) and SEM image (b) of SWCNT added UHPC

Purpose: Recently, the availability of ultra-high performance concretes (UHPC) in modern construction technology, especially in areas such as building facades and bridge elements, has attracted attention by researchers. The number of studies investigating the effects of SWCNT on UHPC is quite limited. The aim of the present study is to improve both the mechanical and electrical conductivity of composites by using low rates of single walled carbon nanotubes (SWCNT) in micro steel fiber and fiberless UHPCs.

Theory and Methods:

The electrical resistivities of specimens obtained from different mixtures were measured by the two-point uniaxial method. In order to determine the mechanical properties of the produced composites, compressive and flexural tests were carried out on the cylinder samples. As non-destructive methods (Figure A), Schmidt hammer and ultrasonic pulse velocity tests of the specimens were performed. In addition, FE-SEM analysis was conducted to monitor the interaction between matrix and SWCNT.

Results:

According to the results, a thousand-fold decrease was observed using SWCNT compared to the electrical resistivity of the reference specimen, an insulating material. Mechanical tests revealed that the 0.02% SWCNT added fibrous sample increased the compressive and flexural strengths of 20% and 104%, respectively, compared to the reference. Density, mechanical and electrical results confirmed the values obtained from non-destructive test methods.

Conclusion:

It has been observed that SWCNT has positive effects on UHPC in terms of mechanical and electrical aspects. The results obtained will contribute to the literature, especially in terms of electrical resistivity. However, in order to produce SWCNT added full conductor class UHPC, it is necessary to use SWCNT at high dosages. For this, the difficulties occurring in workability must be fulfilled. The increase in SWCNT ratio significantly affected the spread diameter of the mixtures.



Ultra düşük oranlarda SWCNT ilaveli UHPC'lerin mekanik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi

Muhammet Seis¹, Serkan Subaşı^{1*}, Muhammed Maraşlı², Heydar Dehghanpour²

¹Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce, 81620, Türkiye

²Fibrobeton Firması, İstanbul 34810, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Farklı SWCNT oranlarına sahip UHPC'lerin üretimi
- Elektriksel ve tahribatsız testlerin gerçekleştirilmesi
- Mekanik özelliklerin belirlenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 29.04.2021
Kabul: 12.02.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.929690

Anahtar Kelimeler:

UHPC,
Kompozit,
karbon nanotüp,
SWCNT,
elektriksel direnç

ÖZ

Nanoteknolojinin gelişmesi ile birlikte inşaat sektöründe de özellikle yapı malzemeleri alanında spesifik özelliklere sahip nano malzemelerin kullanılması araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Literatüre göre çimentolu malzemelerin karışımlarında karbon nanotüp (CNT)'ler kullanılabilirliği yüksek olan nano malzemeler arasında yer almaktadır. Çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ilaveli betonlar üzerinde birçok çalışma olması ile birlikte tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT)'lerin beton üzerinde davranışlarını inceleyen araştırmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada çimento ağırlığının %0,0125, 0,020 ve 0,025 oranlarında SWCNT kullanılarak üretilen ultra yüksek performanslı çimentolu kompozitlerin (UHPC) mekanik ve elektriksel özellikleri araştırılmıştır. Hazırlanan 8 adet UHPC karışımlarının 4 tanesinde sadece SWCNT, 4 tanesinde ise SWCNT+ çelik fiber katılmıştır. UHPC karışımlarında çelik lifler ağırlıkça %4 oranında kullanılmıştır. İletkenlik ve eğilme deneyleri 12X3X2 cm numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. 28 günlük basınç dayanımları, 7 cm çapında ve 14 cm uzunluğunda silindirik numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Elektriksel direnç ölçümü için çimentolu malzemelerin ölçümünde yaygın olan iki noktalı tek eksenli yöntem kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre SWCNT'nin UHPC'lerin mekanik özellikler üzerinde olumlu etkileri gözlenmiştir. SWCNT eklenmesi ve oranının artmasıyla elektriksel direnç azalmıştır, ancak gerçekleşen akım hızının artırılması için daha yüksek oranlarda SWCNT kullanılmasının gerekli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çelik lifli karışımlarda elektriksel direnç parametreleri üzerinde SWCNT'nin etkisi daha belirgin olduğu görülmüştür.

Investigation of mechanical and electrical properties of ultra-low rate SWCNT added UHPC

HIGHLIGHTS

- Production of UHPCs with different SWCNT ratios
- Realization of electrical and non-destructive tests
- Determination of mechanical properties

Article Info

Research Article
Received: 29.04.2021
Accepted: 12.02.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.929690

Keywords:

UHPC,
composite,
carbon nanotube,
SWCNT, electrical resistance

ABSTRACT

With the development of nanotechnology, the use of nano materials with specific features in the construction industry, especially in the field of building materials, attracts attention by many researchers. According to the literature, carbon nanotubes (CNTs) are among the highly usable nanomaterials in the mixtures of cementitious materials. Although there are many studies on multi-walled carbon nanotube (MWCNT) added concretes, there are limited studies investigating the behavior of single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) on concrete. In the present study, the mechanical and electrical properties of ultra-high performance concretes (UHPCs) produced by using SWCNT at the ratios of 0.0125, 0.020 and 0.025 % of cement weight were investigated. By adding 4.2 % steel fiber to the same mixtures, a total of 8 mixes with the reference were obtained. Conductivity and bending tests were carried out on 12X3X2 cm specimens. For electrical resistance measurement, the two-point uniaxial method, which is common in measuring cementitious materials, was used. According to the results, positive effects of SWCNT on mechanical properties have been observed. With the addition of SWCNT and increasing its ratio, the electrical resistance decreased, but it was found that high rates of SWCNT were required to increase the current rate. In addition, the effect of SWCNT was more pronounced in steel fiber added mixtures.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : mmseis@hotmail.com, *serkansubasi@düzce.edu.tr, muhammed@fibrobeton.com.tr, heydar.dehghanpour@yahoo.com / Tel: +90 380 542 1133

1. Giriş (Introduction)

Çimentolu malzemeler inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanına sahip olduklarına rağmen düşük çekme dayanımları nedeniyle hala bir takım çözülmeyen kusurları mevcuttur. Farklı yük etkenleri altında betonun iç yapısındaki nano ve mikro ölçekli kusurlar zamanla genişleyebilir ve betonun bütünlüğü için büyük risklere yol açabilir. Betondaki mikro çatlakların önlenmesi için genellikle cam lifi [1], karbon lifi [2], bazalt lifi [3] ve polipropilen lifi [3] gibi mikro elyaf kullanılmaktadır. Bu lifler, içyapıdaki mikroçatlakların önlenmesi için doğru bir alternatif olabilir ancak mikro çatlaklara yol açan nano ölçekli çatlaklar için bir çözüm değildir. Bu tür çatlakların oluşumu ve genişlemesinin önlenmesi için birçok yazar tarafından çeşitli yöntemler önerilmiştir.

Son zamanlarda nano teknolojinin gelişmesi ile birlikte, inşaat sektöründe yapı malzemeleri alanında da gelişmeler gözlenmektedir. Özellikle karbon nanotüpler (CNT) [4], karbon nanofiber [5], nano karbon siyahı [6] ve diğer nano yapı malzemeler [7] üzerinde yoğunlaşmış birçok araştırma bulunmaktadır. CNT çimentolu malzemelerde farklı amaçlarla katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır [8, 9]. En iyi mekanik, fiziksel, elektriksel ve spesifik yüzey alanına sahip olması CNT'yi araştırmacılar için kayda değer kılmaktadır [10]. CNT'ler, karbon-karbon sp² bağlarından oluşan grafitik katmanları nedeniyle yüksek bir sertliğe ve ekstenel mukavemete sahip olup, çimento esaslı malzemelerde köprü oluşturarak çatlak önleme görevi sağlar [11, 12]. Karbon nanotüp, bir karbon allotropudur ve tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) olarak iki gruba ayrılmaktadır [13]. CNT'nin çimento esaslı malzemelerde kullanılabilirliği ilk olarak Brenner vd. [14] tarafından önerilmiş ve 2008'de patenti alınmıştır.

Çimentolu bir matrisi bir arada tutan kalsiyum silikat hidratların (C-S-H), yüksek boy/çap oranına sahip olmaları nedeniyle nano ölçekli CNT'ler tarafından kontrol edilebilmesi beklenmektedir [15]. Çimento esaslı malzemelerde daha çok MWCNT [16–18] araştırılmış, SWCNT-çimento [19] esaslı malzemeler üzerindeki çalışmalar oldukça sınırlıdır. CNT'ler, çimentolu malzemelerin elektriksel iletkenliğini [20, 21] ve piezorezistivitesini [17] ve mekanik [22] özelliklerini iyileştirmektedir. CNT'ler sadece çimentolu malzemelerde değil, geopolimer gibi çimentosuz diğer yapı malzemelerindeki etkileri de araştırılmıştır [23, 24].

SWCNT-çimentolu malzemeler üzerinde sınırlı sayıda yapılan örnek çalışmalar özetlenmiştir. Kang vd. [25], ağırlıkça % 0, 0,02, 0,04 ve % 0,06 SWCNT katkılı çimento kompozitlerinin mekanik özelliklerini incelemiştir. Dispersiyon olarak kullanılan TritonX-100 ajanının varlığı ile hem basınç hem de eğilme mukavemetinin arttığı, dispersiyon ajanı olmadan SWCNT oranındaki artışın mukavemetin azalmasına neden olduğu sonucuna varılmıştır. Li vd. [26], SWCNT ve grafen oksidin çimento üzerindeki birleşik etkilerini araştırmışlardır. Eğilme testi sonuçlarına göre SWCNT-GO içeren çimentolu kompozitlerin mukavemetinde %72,7 artış gözlenmiştir. Aynı ayrı GO ve CNT ilaveli kompozitlerin dayanımı sırasıyla %51,2 ve %26,3 artmıştır. Jonathan vd. [27], SWCNT'ler üzerindeki çimento hidrasyon ürünlerinin büyümesini incelemiştir. SWCNT'nin portland çimentosunda C₃S'nin hidrasyon reaksiyonunu hızlandırdığı bulunmuştur. İlk olarak, hem C₃A hem de C₃S hidrasyon ürünlerinin temorfolojisinin SWCNT varlığından etkilendiği belirtilmiştir. Özellikle, nanotüpler hızla C-S-H ile kaplanırken, nanotüplerin C₃S hidrasyon ürünleri için çekirdeklenme görevi gördüğü gözlenmiştir. Elde edilen yapılar çimento taneciklerinin yüzeyinde kalırken, sonike edilen portland çimentosu numunelerinde, tipik C-S-H kümeleri oluşturmak için tane yüzeylerinden büyüdüğü

fark edilmiştir. UHPC'ler, çok yüksek basınç dayanımı, yüksek eğilme ve çekme dayanımları ve yüksek süneklığe sahip betonlardır [28]. Ayrıca çok düşük su/bağlayıcı oranı matristeki gözenek hacminin ve boyutlarının azaltılmasına neden olur [29, 30]. Özellikle kabuk eleman uygulamalarında talebi her geçen gün artan UHPC betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi önemlidir. UHPC ürünlerinin geliştirilmesi ile daha dayanımlı ve geometri açısından daha düşük kalınlıklarda özellikle köprüler gibi yapısal alanlarda [31, 32] kullanılabilir ve estetik görünümü kabuk elemanlar için uygulanması mümkündür [33]. Bu çalışmada, UHPC'lerin mikro ve nanoyapılarının iyileştirilmesi için farklı oranlarda SWCNT kullanılarak üretilen UHPC-SWCNT kompozitlerinin mekanik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Betonların yüksek elektrik direnci birçok deneysel çalışmada doğrulanmıştır. Açık havada kurutulmuş betonun elektrik özdirenci 6,54 x 10⁵ - 11 x 10⁵ Ω.cm. Ayrıca doygun ve kuru betonun elektrik özdirenci sırasıyla 10⁶ Ω.cm ve 10⁹ Ω.cm olarak bildirilmiştir. Çeşitli iletken katkı maddelerinin eklenmesiyle betonun iletkenliği artırılabilir ve düşük özdirence sahip betonlar elde edilebilir [2, 34, 35].

2. Materyal ve Yöntemler (Materials and Methods)

2.1. Malzeme Özellikleri (Properties of Materials)

Karışımlarda bağlayıcı olarak CEM I / 52,5 R Portlant çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun tane boyut aralığı Şekil 1a'da verilmiştir. Dolgu malzemesi olarak 90-850 µm tane boyut aralığına sahip silis kumu, 2-850 µm tane boyut aralığına sahip kuvars tozu kullanılmıştır. Karışımlara puzolanik malzeme olarak ELKEM firmasından temin edilen Microwhite silis dumanı (SD) ilave edilmiştir. İşlenebilirliğin sağlanması için tercih edilen polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı (SP) prekast betonlarda kullanıldığında, vibrasyon teknikleri kullanılmadan dahi betonun iyi yerleşmesine ve uygun işlenebilirliğine yol açmaktadır. Lif olarak 12,5 mm uzunluğunda 0,175 mm çapında olan paslanmaz çelik lif tercih edilmiştir. Kullanılan lifin çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri sırasıyla 2800 MPa ve 210 GP'dır.

Çalışmada kullanılan disperse edilmiş SWCNT beta-302 taşıyıcı olup TUBALL firmasından temin edilmiştir. Bu CNT'nin konsantr taşıyıcısı, sürfaktan, stabilize edici ajan-alkilen glikol türevi ve distiril bifenil türevinden oluşmaktadır [36]. TUBALL MATRIX 302, macunsu doku formunda siyah renkli pullar halindedir. Kullanılan SWCNT'nin karbon içeriği ağırlıkça %99 ± 1 ve çapı 1-2 nm, uzunluğu ise çapının yaklaşık 3000 katıdır. SWCNT'nin FE-SEM görüntüsü Şekil 1b'de gösterilmektedir.

2.2. Karışım Tasarımı (Mix Design)

Deneylelerdeki betonların üretiminde ilk önce maksimum doluluğu sağlayacak şekilde parçacık paketleme modeli çeşitlerinden olan modifiye Andreassan modeli kullanılarak agrega oranları belirlenmiştir. Modelin gösterdiği eğriye uygun granülometride 3 farklı çapta yüksek dayanıma sahip agrega miktarları belirlenmiştir. UHPC üretimine yönelik yapılmış literatür çalışmaları incelenerek karışımdaki çimento 800 kg/m³ miktarlarına karar verilmiştir. Çimento miktarına göre silis dumanı (SD) oranını %25 olarak belirlenmiştir. UHPC üretiminde kullanılan SD miktarı literatür ve firma önerisine göre hesaplanmıştır. Literatür çalışmalarını dikkate alarak en düşük oranlarda eklenecek SWCNT miktarları belirlenmiştir. Karışımda binde 4 (0,004) SWCNT katkılı sulu çözelti şeklinde disperse edilmiş SWCNT'ler 3 farklı miktarda sırasıyla 100, 150 ve 200 gr kullanarak SWCNT-UHPC kompozitler üretilmiştir. Ayrıca CNT'siz referans numune dökümleri yapılmıştır. Betonda

kullanılan tüm kuru karışımlar 2 dk. karıştırılmıştır. Suyun %70'i ve SP eklenerek yaklaşık 5 dakika karıştırılan betona SWCNT ile kalan su ilave edilerek karışım yaklaşık 2 dk. daha karıştırılarak kalıba dökülmüştür. Geri kalan harca hesaplanan çelik lif (ÇL) eklenerek yaklaşık 2 dk. kadar karıştırılıp kalıba dökülmüştür. Bu şekilde sadece SWCNT ve SWCNT+Çelik lifli UHPC üretimi yapılmıştır. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0,22 olarak belirlenmiştir. Kullanılan karışım suyu sıcaklığı 9°C'lerde ölçülmüştür. Karışımların sıcaklığı üretim esnasında ortalama 24,5°C olarak ölçülmüştür. UHPC karışımında kullanılan malzemelerin ağırlıkça yüzde oranları Tablo 1'de verilmiştir.

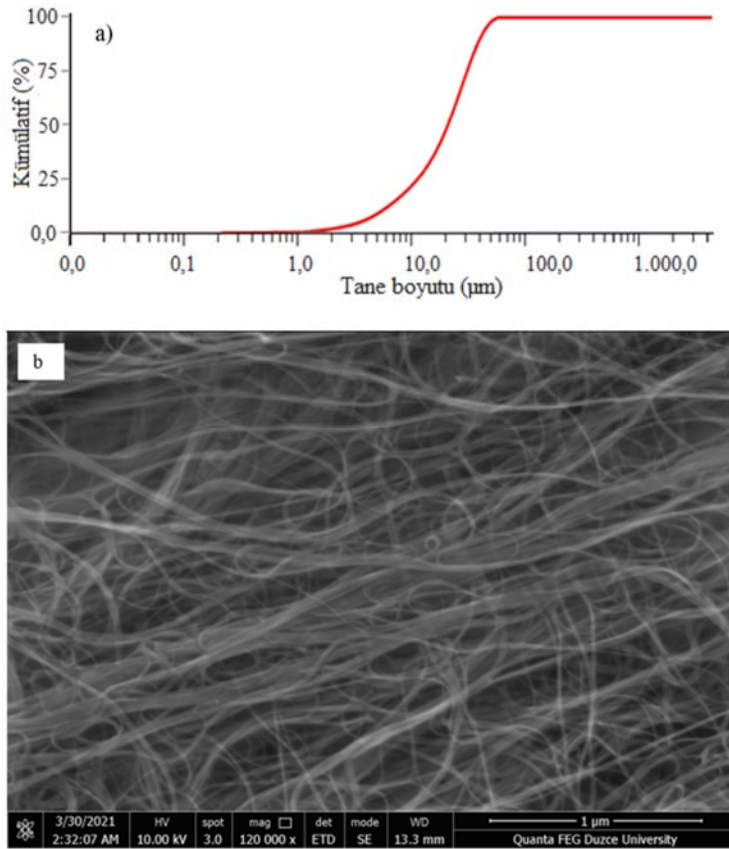
2.3. Test Yöntemleri (Test Methods)

Karışımlar hazırlandıktan sonra işlenebilirliklerinin kontrolü için ASTM-C 1611/C 1611M – 05 [37] standardına göre Slump testi yapılmıştır. Basınç dayanımının belirlenmesi için üretilen 28 günlük

70 X 140 mm silindir numuneler TS EN 12390-3 [38] standardına göre test edilmiştir.

Betonun elektriksel direnci, iki noktalı tek eksenli, Wenner prop ve C1760-12 ASTM [39] gibi farklı yöntemlerle ölçülebilir. Bu çalışmada direnç ölçümü, genel bir ölçüm yöntemi olan iki noktalı tek eksenli yöntemle gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğinin şematik görünümü Şekil 2'de gösterilmektedir. Bu test yönteminde beton numunenin iki paralel yüzeyi arasında belirli bir gerilim uygulanarak direnç (R) değeri elde edilir ve Eş. 1'den özdirenç (ρ) değeri hesaplanır. Denklemde L numune uzunluğu ve A numunenin kesit alanını ifade etmektedir. Tüm numuneler için 40 V potansiyel farkı uygulanmıştır.

$$R = \frac{\rho L}{A} (\Omega) \quad (1)$$



Şekil 1. Kullanılan çimentonun tane boyut aralığı (a), SWCNT'nin FE-SEM görüntüsü (b)
(Particle size range of the cement used (a), FE-SEM image of SWCNT (b)).

Tablo 1. UHPC-SWCNT kompozitlerin karışım detayları. (Mixing details of UHPC-SWCNT composites)

No	Numune kodu	Agrega (%)	Çimento (%)	SD (%)	SP/bağlayıcı (%)	Su/bağlayıcı (%)	SWCNT (%)	ÇL (%)
1	Ref	49,5	34,21	8,55	5	22	0	0
2	CNT100	49,5	34,21	8,55	5	22	0,0125	0
3	CNT150	49,5	34,21	8,55	5	22	0,0200	0
4	CNT200	49,5	34,21	8,55	5	22	0,0250	0
5	Ref-ÇL	49,5	34,21	8,55	5	22	0	4
6	ÇL-CNT100	49,5	34,21	8,55	5	22	0,0125	4
7	ÇL-CNT150	49,5	34,21	8,55	5	22	0,0200	4
8	ÇL-CNT200	49,5	34,21	8,55	5	22	0,0250	4

Eğilme ve iletkenlik deneyleri için her karışımdan birer adet 30 X 30 X 2 cm boyutlarında plak numuneler üretilmiştir. 28 Gün kürleme sonrası 12 x 3 x 2 cm prizmatik numuneler kesilmiştir. Kesilen numunelerin iki noktalı tek eksenli yöntem ile özdirençleri belirlendikten sonra eğilme testine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı deneylerinden önce, numunelerin her iki tarafı Schmidt çekici ile test edilmiş ve 12 test sonrası ortalama değerler elde edilmiştir. Bu çalışmada, manuel N Tipi test çekici kullanılmış ve test prosedürü ASTM C805 [40] tarafından verilen tavsiyelere uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Tüm karışımlardan elde edilen numunelerin ultrason geçiş hızlarını belirlemek için, ASTM C597'ye [41] uygun ultrasonik geçiş hızı (UPV) testi gerçekleştirilmiştir. UPV deneyinde 28 günlük basınç dayanımı için hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Her numune için üç okuma yapılmış ve aritmetik ortalamasını alarak, numunenin ultrasonik geçiş hızı m/s cinsinden elde edilmiştir. SWCNT ile UHPC matrisi arasındaki etkileşimi mikro yapıda incelemek için FE-SEM (Field emission scanning electron microscopy) görüntüsü alınmıştır.

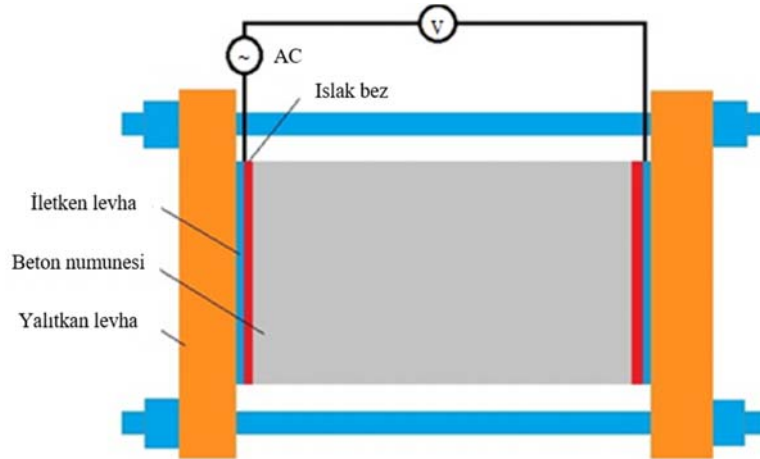
3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results And Discussions)

3.1. Yayılma Çapı (Slump Flow)

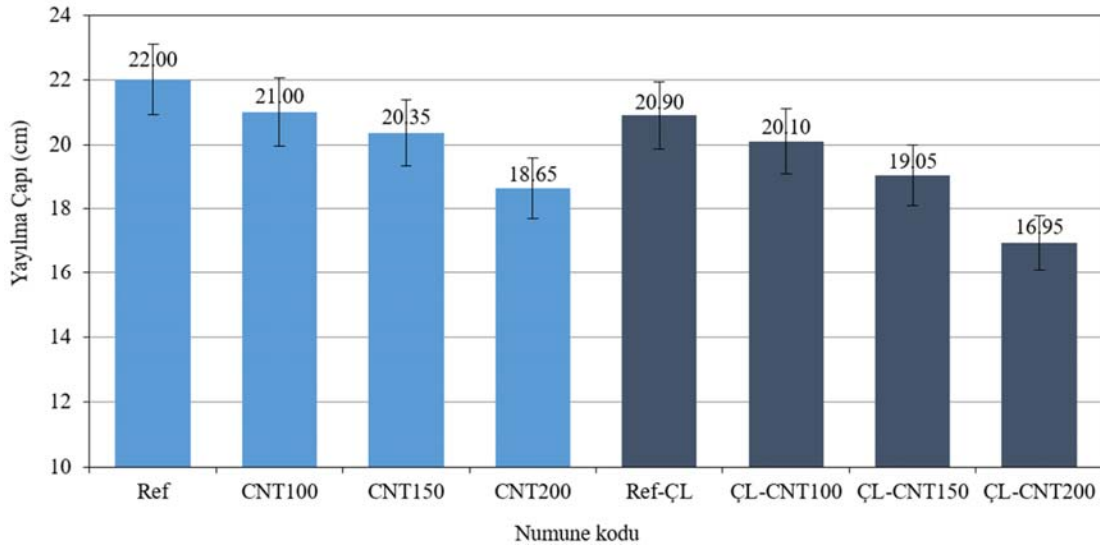
SWCNT ve çelik lifi ilaveli 8 Farklı karışımın işlenebilirlik davranışlarının incelenmesi için yapılan yayılma çapı deney sonuçları

Şekil 3'te karşılaştırılmıştır. Karışımlar çelik lifli ve lifsiz olarak iki gruba ayrıldığında, SWCNT oranına bağlı olarak bir paralellik gözlemlenmiştir. En kıvamlı karışım herhangi bir katkı malzemesi içermeyen referans numunesine ait olduğu belirlenmiştir. Sadece SWCNT ilaveli karışımların slump değerleri dikkate alındığında, CNT oranının %0,025'e artmasıyla, işlenebilirliğin %15,23 azalması gözlemlenmiştir. ÇL ile birlikte kullanılan %0,0125, 0,02 ve 0,025 SWCNT içeren karışımların yayılma çapı değerleri sırasıyla %8,6, 13,41 ve 22,95 azalmıştır.

Birçok çalışmada MWCNT'nin çimentolu malzemelerin işlenebilirliği üzerinde önemli etkisi olduğu doğrulanmıştır. CNT'lerin yüksek özgül yüzey alanı, işlenebilirliğin azalmasını ana nedenidir [42, 43]. Dolayısıyla, SWCNT, MWCNT'den daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olması nedeniyle, çimentolu malzemelerin işlenebilirliğini daha da etkileyebilir. Raki ve diğerleri [44], CNT'lerin alüminat fazlarla (esas olarak C₃A) etkileşimi ve karışımın işlenebilirliğinde bir azalmaya neden olduklarını belirtmektedir. Taze betonda, C₃A fazı işlenebilirliği etkilemede anahtar bir role sahiptir [43]. Makar ve Chan'ın [27] çalışmasında, SWCNT'lerin C₃A oluşumunun inhibisyonuna neden olduğu bildirilmiştir. Öte yandan, çekirdek görevi gören SWCNT üzerindeki hızlı C-S-H konsantrasyonu, işlenebilirliğin düşmesi için başka bir potansiyel nedendir.



Şekil 2. İki noktalı tek eksenli direnç ölçümünün şematik görüntüsü (Schematic view of two-point uniaxial resistance measurement)



Şekil 3. Karışımların yayılma çapı deney sonuçları (Slump flow test results of mixtures)

3.2. Yoğunluk (Density)

Farklı karışımlardan elde edilen UHPC-SWCNT kompozitlerin yoğunlukları Şekil 4'te verilmiştir. Çelik lifli ilaveli kompozitlerin yoğunluğu lifsizlere kıyasla daha yüksek olması ile birlikte, SWCNT oranının yoğunluk üzerinde önemli etkisi görülmemiştir. Sadece ÇL içeren kompozitin yoğunluğu referansa kıyasla %0,07 artmıştır. SWCNT eklenmesi ve oranının %0,025'e artmasıyla yoğunluk 2,93 g/cm³'ten 2,83 g/cm³'e düşmüştür.

Bazı çalışmalarda, CNT'lerin dolgu ve çekirdeklenme etkileri çimento matrisinin yoğunluğunun artırılabilirliği hakkında bilgi verilmiştir [43]. Literatürde genel olarak, MWCNT'nin çimento esaslı malzemelerin özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır ve SWCNT'nin etkisi üzerine araştırmalar çok sınırlıdır. Bunun yanı sıra literatürde MWCNT'nin çimentolu malzemelerin yoğunluğu üzerinde belirsiz etkileri olduğu belirtilmiştir. [45, 46] çalışmalarda MWCNT eklenerek yoğunluğu artırıldığı, [47] araştırmada yoğunluğu azalttığı ve [48]'de etkisiz olduğu bildirilmiştir. Numune yoğunlukları ile yayılma deney sonuçları karşılaştırıldığında, lifsiz karışımlarda yoğunluk-yayılma arasında anlamlı bir ilişki görünmezken, lifli karışımlarda işlenebilirliğin azalmasıyla yoğunluk da azalmıştır. İşlenebilirlikteki azalma oranı %18,8 ve yoğunluktaki azalma oranı %3,4 olarak hesaplanmıştır. Lifli karışımlardaki yoğunluk değerlerinin azalması, topaklanmaktan kaynaklanan boşluklar ile ilişkilendirilebilir.

3.3. Elektriksel Özdirenç (Electrical Resistivity)

UHPC-SWCNT kompozitlerin elektriksel özdirenç değerleri Şekil 5'te verilmiştir. Tüm değerler 40 volt potansiyel farkı uygulayarak elde edilen akım miktarına göre hesaplanmıştır. Özdirenç sonuçları dikkate alındığında, referans UHPC numunesinin özdirenç değeri en az 100 kat diğer karışımların özdirenç değerlerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sadece SWCNT ilaveli numunelerin özdirenç sonuçları incelendiğinde, %0,02 SWCNT içeren numunenin özdirenç değerinde, %0,0125 SWCNT içeren numunenin özdirençine kıyasla 2 kat azalma gözlenmiştir. %0,025 SWCNT içeren numunenin özdirenç değeri ise, %0,0125 SWCNT içeren numunesinin özdirençinden 6,85 kat daha düşük elde edilmiştir. Aynı karışımların lifli olanlarının iletkenlik sonuçları paralel bir ilişki sergileyerek, biraz daha iyileşmiştir. En düşük özdirenç değeri 1,4 x 10⁴ Ω.cm olarak ÇL-CNT200 karışımına ait olduğu belirlenmiştir. Her iki grupta da SWCNT

miktarı ile özdirenç değerleri arasında logaritmik bir ilişki olduğu anlaşılmıştır. İlişkiler, korelasyon katsayılarının (R) 0,90 üzeri olması ile doğrulanmış, lifsiz ve lifli karışımlar için aşağıda sırasıyla Eş. 2 ve Eş. 3 olarak sunulmuştur. Denklemlerde, ρ_{LS} ; lifsiz olan kompozitlerin özdirençleri, ρ_{LF} ; lifli olan kompozitlerin özdirenç ve CNT; çimento ağırlığının %0-0,025 arasında değişen SWCNT oranıdır. İletkenlik sonuçları literatürle karşılaştırıldığında, özdirenç değerleri referans numunesinin sonuçlarından her ne kadar düşük olsa da, iletken bir betonun sonuçları yanında oldukça yetersiz kalmaktadır.

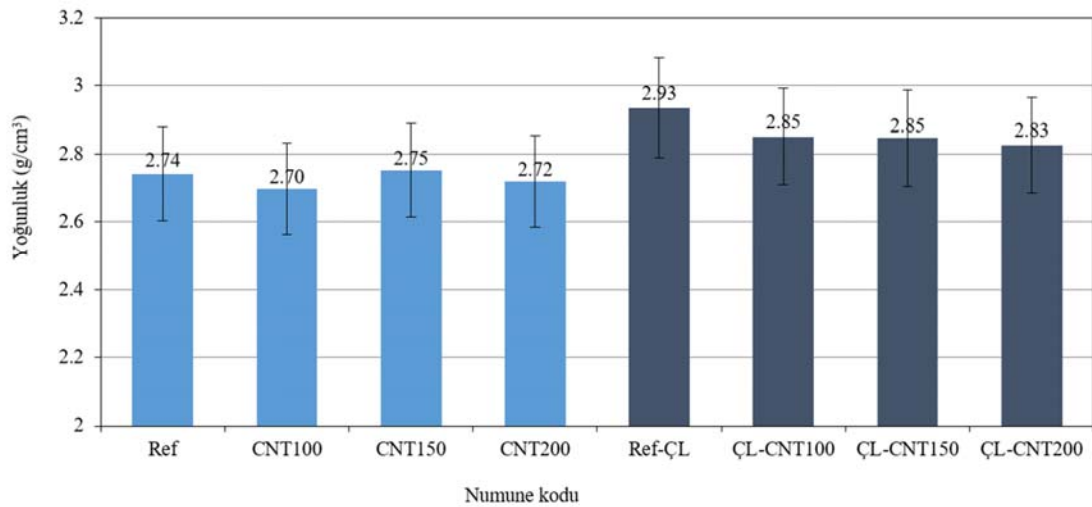
$$\rho_{LS} = 2E + 7, e^{-223,6CNT} \quad (2)$$

$$\rho_{LF} = 896711, e^{-152,6CNT} \quad (3)$$

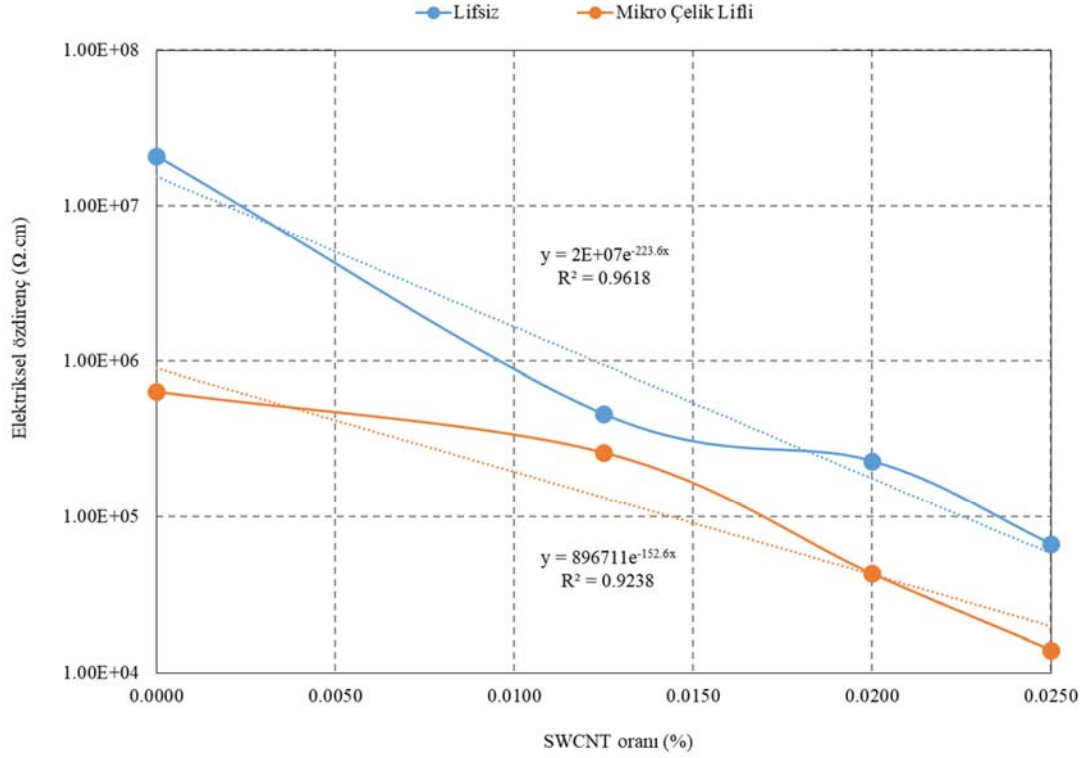
Betonun elektriksel direncinin yüksek seviyelerde olduğu farklı araştırmalarla doğrulanmıştır. Dış mekanda kurutulmuş betonun elektriksel özdirenç 6,54 X 10⁵-11,4 X 10⁵ Ω.cm olarak belirlenmiştir. Ayrıca, farklı araştırmacılar tarafından yapılan araştırmalara göre, doymuş betonun ve kuru betonun elektriksel özdirençinin sırasıyla 10⁶ Ω.cm ve 10⁹ Ω.cm olduğu tespit edilmiştir [35]. Betonlar için bir iletkenlik sınıfının belirlenmesi farklı amaçlara göre değişebilir. Örneğin Dehghanpour vd. 'nin [2] çalışmasında ısı üretilebilir bir betonun maksimum özdirenç değeri yaklaşık 500 Ω.cm olarak belirtilmiştir. Bu değer kendi kendini algılayan betonlarda değişebilir. D'Alessandro vd [49], kendi kendini algılayan karbon-nanotüp içeren çimentolu malzemeler imal etmek için çeşitli prosedürler hakkında sistematik bir araştırma sunmuşlardır. Nanotüplerin suda dispersiyon, kimyasal dispersantlar ve farklı karışım stratejileri kullanılarak, nanotüplerin dispersiyon kalitesi, ayrışma hızı ve SEM görüntüleri araştırılmıştır. %0-1,6 MWCNT içeren farklı karışımların farklı deney prosedürlerine göre özdirenç değerleri yaklaşık 10³-10⁷ Ω.cm arasında elde edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre kendi kendini algılayabilir çimentolu malzemelerin elde edilebilmesi için, minimum MWCNT içeriğinin çimento ağırlığına göre %1 olduğu bulunmuştur.

3.4. Uhpç 'lerin Basınç Dayanımları (Compressive Strength Uhpcs)

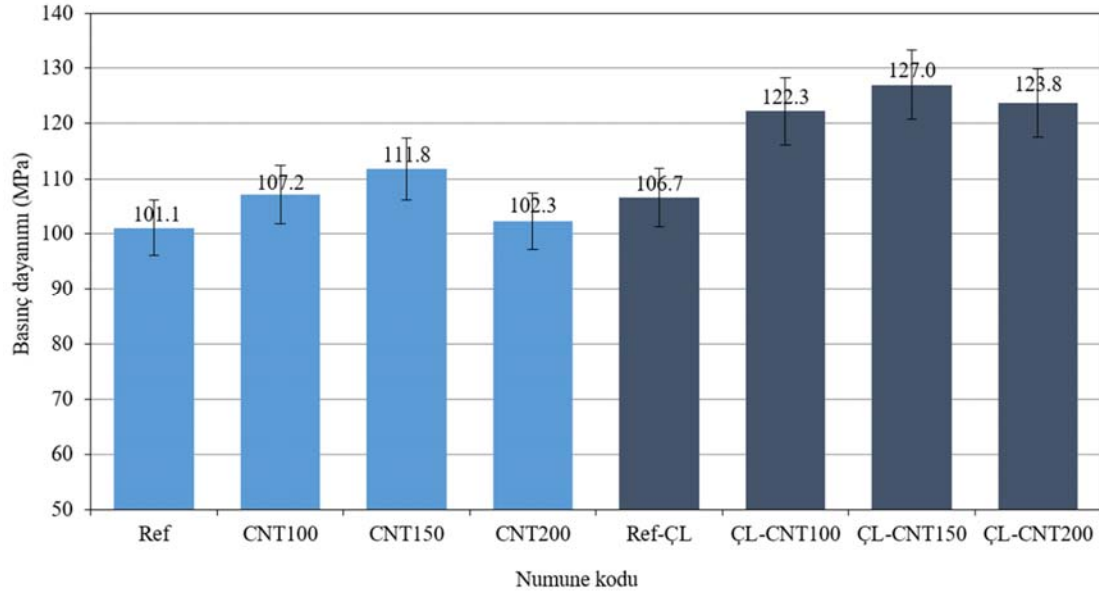
Kompozitlerin basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, lifli ve lifsiz grupların dayanımları arasında, SWCNT oranına bağlı olarak paralel bir ilişki gözlenmektedir. Şekil 6'da karşılaştırılan sonuçlara göre, her



Şekil 4. Kompozitlerin yoğunluk değerleri (Density values of composites)



Şekil 5. 28 Günlük kompozitlerin elektriksel özdirenç sonuçları (Electrical resistivity results of 28-day composites.)



Şekil 6. 28 Günlük basınç dayanımı sonuçları (28-day compressive strength results.)

iki grupta da SWCNT oranının %0,020'ye kadar artmasıyla basınç dayanımları artmıştır, SWCNT oranı %0,025'e olunca dayanımda azalma gözlenmiştir. Lifsiz karışımlarda, maksimum basınç dayanımı referansa kıyasla %10 artışla, %0,020 SWCNT ilaveli numuneye ait olduğu belirlenmiştir. Aynı karışımın lifli olanında ise %20 gelişme tespit edilmiştir. %0,025 SWCNT ilaveli kompozitin dayanımındaki azalma nedeni işlenebilirliğin düşmesinden kaynaklanabilir. Bu durum yoğunluk sonuçlarında da geçerlidir. Kang vd. [25], ağırlıkça %0, 0,02, 0,04 ve 0,06 (çimento ağırlığına göre) SWCNT katkılı

çimento kompozitlerinin dayanımını araştırmışlardır. SWNT'nin olumlu etkisi, dispersiyon katkı maddesi kullanılan karışımlarda gözlenmiştir. Maksimum basınç dayanımı, Ağırlıkça %0,06 SWCNT içeren kompozit için elde edilmiştir. Keriené vd. [45] MWCNT'lerin otoklavlanmış ve otoklavlanmamış gaz beton üzerindeki etkisini ayrı ayrı incelemiştir. Farklı MWCNT oranlarına sahip karışım sonuçlarına göre maksimum basınç dayanımının, %11,03 artışla, ağırlıkça %0,02 nanotüp eklenen karışıma ait olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, ısıtma süresi boyunca büzülmede azalma gözlemiştir.

Musso vd. [50], işlevselleştirilmiş CNT'lerin mekanik özelliklerde olumsuz etkisi olduğunu bildirirken, hem büyütülmüş hem de tavllanmış CNT'ler ile önemli bir gelişme sağlandığını rapor etmişlerdir.

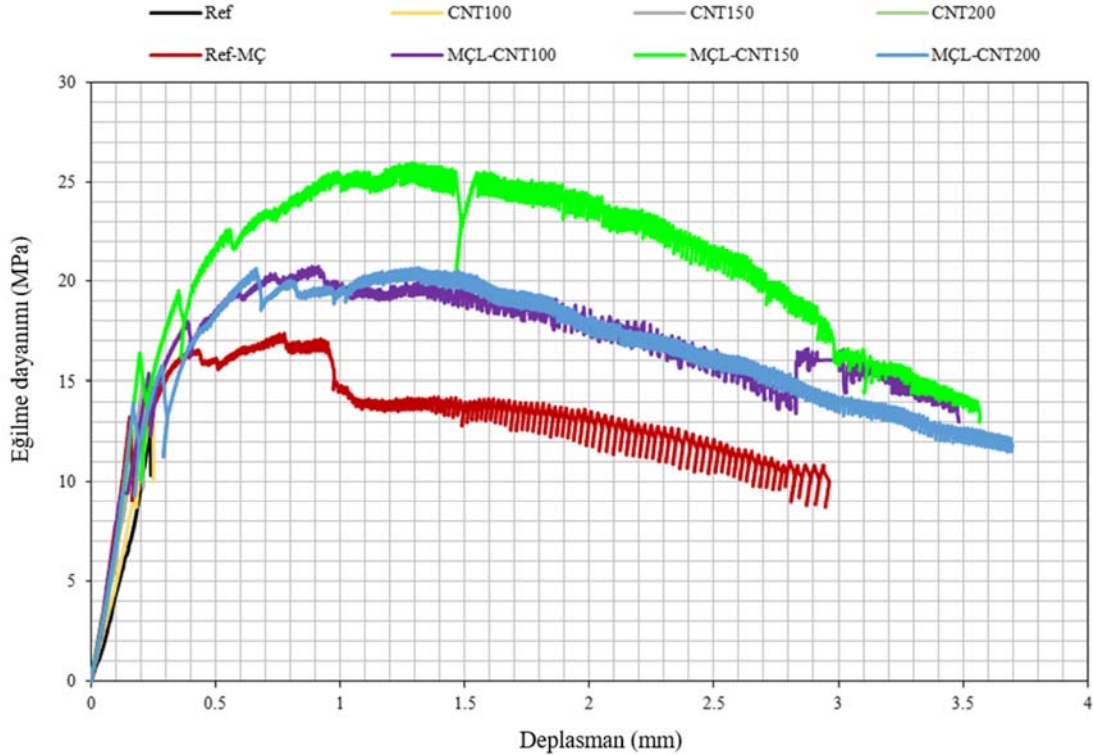
3.5. Uhpc 'lerin Eğilme Dayanımları (Flexural strength Of Uhpcs)

Referans numunesi dahil olmak üzere 8 farklı karışıma sahip UHPC-SWCNT numunelerin deplasman-eğilme gerilmesi eğrileri Şekil 7'de verilmiştir. Sadece SWCNT ilaveli Ref-CNT100, Ref-CNT150 ve Ref-CNT200 UHPC kompozitlerin maksimum eğilme dayanımları, referansa kıyasla, sırasıyla %16,97, %19,65 ve %-0,4 olarak değişmiştir. Bu numunelerin deformasyon davranışları dikkate alındığında, ÇL olmadan diğerlerine kıyasla daha düşük deplasman göstermişlerdir. Maksimum deplasman seviyeleri 0,17-0,25 mm arasından değişmektedir. ÇL ilaveli karışımlarda SWCNT etkisi hem dayanım hem de deformasyon açısından daha belirgindir. Sadece ÇL ilaveli kompozitin maksimum eğilme dayanımı referansa kıyasla %37,265 artmıştır. ÇL içeren %0,0125, %0,02 ve %0,025 SWCNT ilaveli kompozitlerin eğilme dayanımlarında sırasıyla %63,7, %104 ve %63,30 artış gözlenmiştir. Lifli kompozitlerin eğrilerindeki aşağı yönde ortaya çıkan büyük pikler meydana gelen ani çatlakları belirtmektedir. Oluşan ilk çatlakların ardından liflerin devreye girmesiyle numunenin tekrar yük almasıyla deplasman-gerilme eğrisi maksimum dayanım noktasına yönelmektedir. Eğrilerdeki gözlenen sapmalar ÇL'lerin ani kaymaları ve tekrardan yük almalarından kaynaklanmaktadır. Deney esnasında da liflerin çekilme ve kopma sesleri bu durumu doğrulamıştır. Bu durum ÇL-CNT0 numunesinde daha belirgindir. SWCNT ilaveli kompozitlerde lif ile matris arasındaki aderansın artmasından dolayı sapma boyutları daha az gözlenmektedir. Birçok çalışmada [45-47], CNT'lerin çimentolu malzemelerin eğilme dayanımı üzerinde olumlu etkileri rapor edilmiştir. Bununla birlikte, çalışmalarda eğilme dayanımına ilişkin bazı tutarsızlıklar da bildirilmiştir. CNT takviyeli çimentolu malzemelerde, CNT ile çimento arasındaki bağ, eğilme dayanımı için

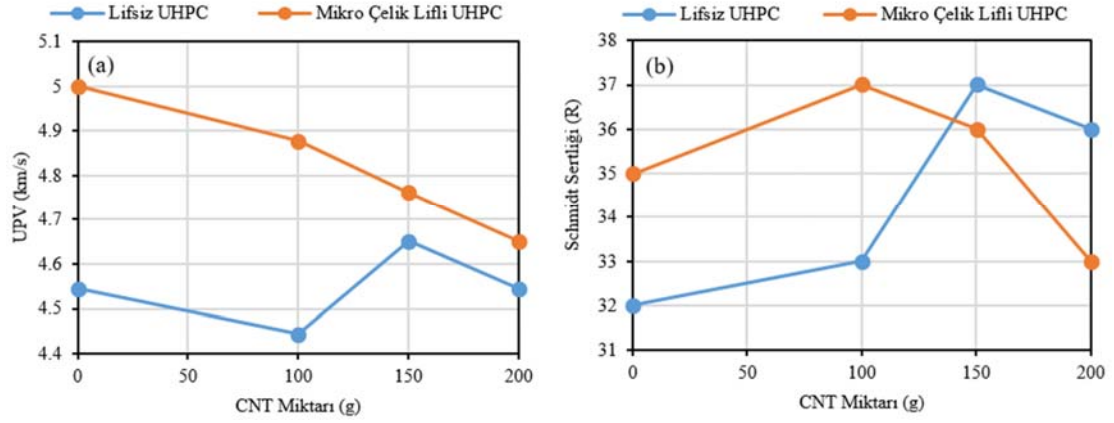
en önemli faktördür. Bununla birlikte, CNT'nin dispersiyon tipi, kalitesi ve özelliği, bağ mekanizmasını önemli ölçüde etkileyebilir.

3.6. Tahribatsız Test Sonuçları (Non-Destructive Test Results)

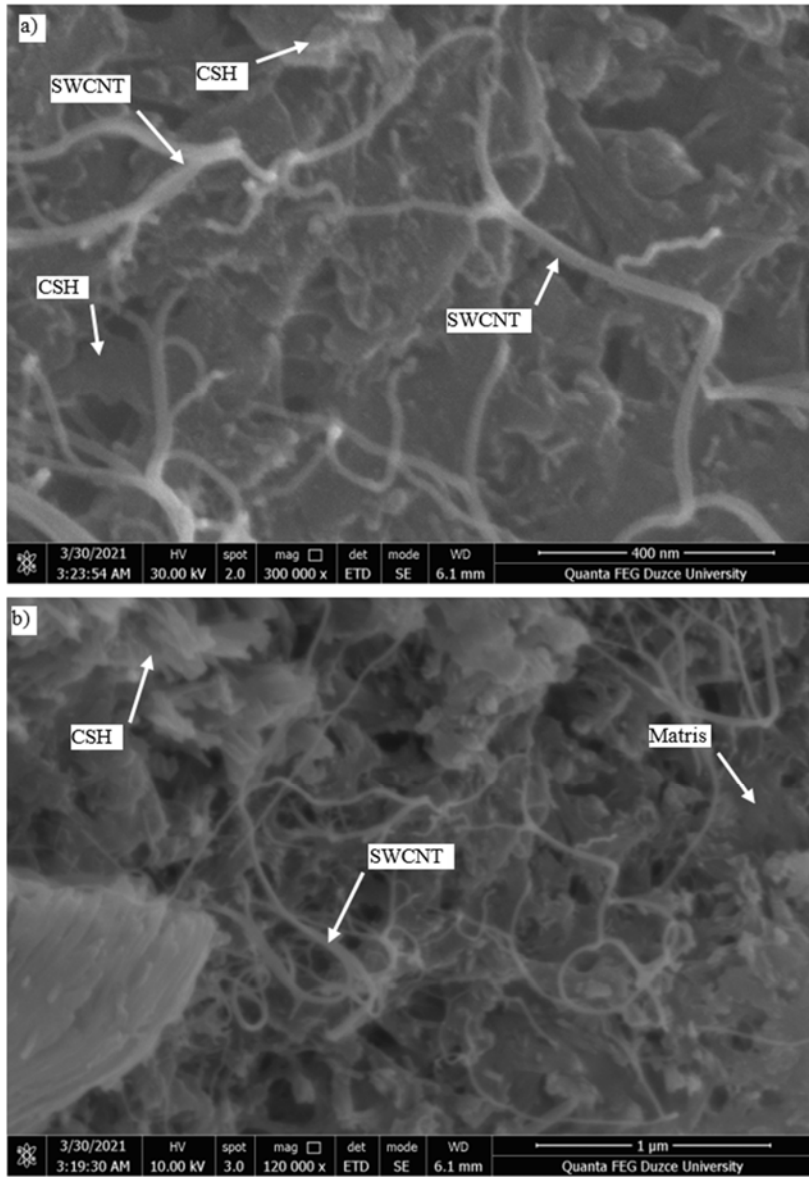
Tüm karışımlardan elde edilen silindirik numuneler için tahribatsız yöntem olarak UPV ve Schmidt testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 8'de grafik halinde gösterilmektedir. Schmidt çekiçi ile elde edilen değerler 32-37 arasında değişmekte olup minimum ve maksimum değerler sırasıyla Referans ve CNT150/ÇL-100 numunelerine ait olduğu belirlenmiştir. Kazemi vd. 'nin [51] çalışmasında 16-41 MPa dayanıma sahip olan betonların Schmidt değerleri 11-34 arasında rapor edilmiştir. Kovler vd. [52] 22-57 MPa arasında basınç dayanımları olan betonlar için 12-45 arasında Schmidt değerleri ölçmüşlerdir. Diğer bir çalışmada ise basınç dayanımları 10-40 MPa seviyesinde olan betonlar için 11-38 arasında Schmidt değerleri elde edilmiştir [53]. Schmidt çekiç testinde ölçek indeksi olarak geri tepme sayısı, ölçülen değer ile basınç dayanımı arasındaki korelasyon eğrilerinin oluşturulmasıyla, prekast işlerde ve şantiyede beton malzemelerin dayanım tahmini için kullanılabilir. UPV değerleri incelendiğinde yoğunlukla Schmidt değerleri ile paralel bir ilişki halinde oldukları gözlenmektedir. Tahribatsız yöntem olarak bilinen UPV test yöntemi, yapı malzemelerinin tahmini basınç dayanımını belirlemek için kullanılan bir tekniktir. UPV, ultrasonik darbenin, genellikle beton ve harç numunelerinde, malzeme boyunca belirli bir mesafeye gitmesi için geçen süreyi ifade eder. Ek olarak, gözeneklilik, mikro çatlaklar ve boşluklar gibi dahili kusurlar da UPV testi ile tespit edilebilir. Dolayısıyla UPV testi yaparak, malzemenin homojenliği hakkında da bilgi edinmek mümkündür [54]. Bu çalışmada da UPV sonuçları elde edilen yoğunluk değerleri ile kıyaslanarak doğrulanabilir. Minimum UPV değeri yoğunluğu en yüksek ve maksimum UPV değeri yoğunluğu en düşük olan kompozite ait olduğu bulunmuştur. Lifsiz karışımlarda maksimum UPV değeri 4,65 km/s olarak %0,020 SWCNT ilaveli kompozit için elde edilmiştir.



Şekil 7. UHPC-SWCNT kompozitlerin 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları (28-day flexural strength results of UHPC-SWCNT composites.)



Şekil 8. UPV (a) ve Schmidt (b) test sonuçları (UPV (a) and Schmidt (b) test results)



Şekil 9. UHPC-SWCNT kompozitlerin örnek FE-SEM görüntüleri; (a) 120 bin ve (b) 300 bin büyütmede (FE-SEM images of UHP-SWCNT composites; At 120 thousand (a) and 300 thousand (b) magnification.)

Lifli olan karışımlarda ise maksimum geçiş hızı değeri 5 km/s olarak CNT'siz kompozit için ölçülmüş, ardından eklenen farklı oranlarda SWCNT ile UPV değerleri azalmıştır. Bu, azalan işlenebilirlik nedeniyle iç yapıdaki meydana gelen boşluklardan kaynaklanabilir. Aksine, ÇL'nin UPV değerleri üzerinde olumlu etkisi gözlenmiştir ve referansa kıyasla en büyük artış %10 olarak ÇL-0 karışımı için kaydedilmiştir. Bu çalışmada elde edilen UPV değerleri literatür ile karşılaştırarak doğrulanmıştır. Rosszila vd. [55] 40 MPa'lardan 100 MPa'lara varan yüksek dayanımlı betonlar için 3,74-4,42 km/s UPV değerleri elde etmişler.

3.7. Fe-Sem Analiz Görüntüleri (Fe-Sem Analysis Images)

Üretilen kompozitlerin mikro yapısının incelenmesi için, örnek olarak %0,025 SWCNT ilaveli kompozitin 120 ve 300 bin FE-SEM görüntüleri Şekil 9'da verilmiştir. Görüntülerde SWCNT'ler C-S-H ürünleri arasında bir ağ oluşturarak, aralarında iyi bir bağ olduğu gözlenmektedir. SWCNT'lerin parlak görünmesinin nedeni, elektriksel olarak çok iyi iletkenliğe sahip olmalarıdır. Çimento ürünleri için köprü görevi gören SWCNT'ler, matriste mikro çatlakların oluşmasını/gelişmesini engelleyerek, kompoziti olası hasarlardan korumaktadır. Bu, çimento esaslı malzemeler için mekanik ve dayanıklılık açısından önemlidir. Çimentonun hidrasyon ürünlerinin morfolojisine göre, görüntülerde gözlenen çapı yaklaşık 50 nm olan lifsi ürünlerin (Şekil 9a) CSH olduğu bilinmektedir [11]. CSH-gel, matrisin mukavemetini sağlayan birçok önemli mühendislik özelliğine sahip bir çimento ürünüdür. SWCNT'lerin bu ürünlerle etkileşimi, karışımların işlenebilirliğindeki azalmanın nedeni olabileceği düşünülmektedir. SEM görüntülerindeki karbon nanotüplerin bir biriyle temas halinde olması elektriksel özdirenç sonuçlarını da doğrulamaktadır. Karbon nanotüpler matris içerisinde ağ oluşturarak yüksel iletkenlikleri sayesinde matrisin özdirençinin azalmasına neden olmaktadır. Homojen dağılımı şartıyla, daha yüksek oranlarda SWCNT kullanarak daha düşük özdirençle UHPC'lerin üretilmesi mümkün olabilir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Çelik lifli ve lifsiz olmak üzere 8 farklı SWCNT ilaveli UHPC kompozitler üretildi ve mekanik özellikleri ile elektriksel iletkenlik özellikleri araştırıldı. Elde edilen bulgulardan aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

Lifli ve lifsiz UHPC karışımlarında, SWCNT eklenmesi ve oranının artması ile, işlenebilirlik önemli derecede etkilenmiştir. ÇL'nin işlenebilirlik üzerinde az bir etkisi olmasıyla birlikte, SWCNT ilaveli karışımlarda etkisi biraz daha artmıştır. %0,025 SWCNT ilaveli lifli kompozitin işlenebilirliği referansa kıyasla %22,95 azalmıştır. Yayılma çapı değerlerindeki azalmalar UHPC kompozitlerin tüm özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. Farklı yöntemler ile işlenebilirlik probleminin giderilmesi halinde, daha yüksek dozajlarda SWCNT ilavesi ile daha yüksek performanslı ürünlerin elde edilmesi mümkündür.

Lifsiz kompozitlerde, SWCNT oranının yoğunluk değerleri üzerinde önemli etkisinin olmaması ile birlikte, maksimum yoğunluk değeri %0,020 SWCNT içeren karışım için elde edilmiştir. Farklı dispersiyon katkı malzemeleri kullanarak daha homojen ve yoğun karışımların üretilmesi sonraki çalışmalarda araştırılabilir.

SWCNT kullanarak yalıtkan bir malzemesi olan referans numunesinin elektriksel özdirençine kıyasla bin kat azalma gözlenmiştir. Ancak elde edilen özdirenç değerleri tamamen iletken adlandırılan betonlar sınıfında yer almamaktadır. UHPC'lerin elektriksel iletkenliğini istenilen seviyeye getirilmesi, kullanılan

SWCNT oranı, dispersiyon özelliği ve diğer katkı malzemeleri ile yönetilebilir. Tüm karışımların basınç ve eğilme dayanımları artan SWCNT oranı ile artmıştır. Lifsiz ve çelik lifli UHPC karışımlarında SWCNT oranının %0,020'ye kadar artmasıyla basınç dayanımları Sırasıyla %10 ve %20 oranında artmıştır. Ancak SWCNT içeriğinin %0,025'e artmasıyla, dayanımlarda biraz azalma gözlenmiştir. Bunun nedeninin işlenebilirlikteki azalmadan kaynaklandığı belirtilmiştir. Tahribatsız yöntemler olarak UPV ve Schmidt test sonuçları ile diğer özellikler arasında bir bağ olduğu doğrulanmıştır. Özellikle UPV sonuçları ile yoğunluk değerleri arasında paralel bir ilişki gözlenmiştir. FE-SEM görüntüleri UHPC'nin mikro yapısındaki C-S-H ile SWCNT arasındaki etkileşimi doğrulamıştır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmada malzeme temini, deney üretim ve bazı testlerin yapımında katkı sağlayan Fibrobeton A.Ş. firmasına ve Ar-Ge personeline teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

1. Kasagani H., Rao C.B.K., Effect of graded fibers on stress strain behaviour of glass fiber reinforced concrete in tension, *Construction and Building Materials*, 183, 592–604, 2018.
2. Dehghanpour H., Yilmaz K., Ipek M., Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes, *Construction and Building Materials*, 221, 2019.
3. Zhou H., Jia B., Huang H., Mou Y., Experimental study on basic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete, *Materials*, 13, 2020.
4. Hawreen A., Bogas J.A., Kurda R., Mechanical characterization of concrete reinforced with different types of carbon nanotubes, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 8361–8376, 2019.
5. Zhu X., Gao Y., Dai Z., Corr D.J., Shah S.P., Effect of interfacial transition zone on the Young's modulus of carbon nanofiber reinforced cement concrete, *Cement and Concrete Research*, 107, 49–63, 2018.
6. Dehghanpour H., Yilmaz K., A more sustainable approach for producing less expensive electrically conductive concrete mixtures: Experimental and FE study, *Cold Regions Science and Technology*, 184, 103231, 2021.
7. Arabacı E., Pekmezci B.Y., Evaluation of physical and mechanical properties of nonstructural composite panels used in buildings, 3, 1347–1360, 2021.
8. Kordkheili H.Y., Shehni S.E., Niyatzade G., Effect of carbon nanotube on physical and mechanical properties of natural fiber/glass fiber/cement composites, *Journal of Forestry Research*, 26, 247–251, 2015.
9. Kordkheili H.Y., Hiziroglu S., Farsi M., Some of the physical and mechanical properties of cement composites manufactured from carbon nanotubes and bagasse fiber, *Materials and Design*, 33, 395–398, 2012.
10. Chong K.P., Garboczi E.J., Smart and designer structural material systems, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4, 417–430, 2002.
11. Nguyen T.N.M., Yoo D.Y., Kim J.J., Cementitious material reinforced by carbon nanotube-Nylon 66 hybrid nanofibers: Mechanical strength and microstructure analysis, *Materials Today Communications*, 23, 100845, 2020.
12. Morsy M.S., Alsayed S.H., Aqel M., Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar, *Construction and Building Materials*, 25, 145–149, 2011.
13. John F., Controlled patterning and growth of single wall and multi wall carbon nanotubes, 1, 512–514, 2005.
14. Brenner M., Mariputtana A., Michael K., Li G.Y., Carbon nanotube-fiber reinforced cement and concrete, US20080134942A1, 2008.
15. Raza A., Bhandari M., Kim H.K., Son H.M., Huang B., Nam I.W., A study on mechanical characteristics of cement composites fabricated with nano-silica and carbon nanotube, *Applied Sciences (Switzerland)*, 11, 1–16, 2021.
16. Şimşek B., Multi-walled carbon nanotubes with different features reinforced cement pastes: A compressive and systematic approach using principal component analysis, *Journal of Building Engineering*, 32, 2020.

17. Zhao P., Wang S., Kadlec A., Li Z., Wang X., Properties of cement-sand-based piezoelectric composites with carbon nanotubes modification, *Ceramics International*, 42, 15030–15034, 2016.
18. Potong R., Rianyo R., Ngamjarurojana A., Chaipanich A., Influence of carbon nanotubes on the performance of bismuth sodium titanate-bismuth potassium titanate-barium titanate ceramic/cement composites, *Ceramics International*, 43, 75–78, 2017.
19. Gürbilek N., Nanotechnology in civil infrastructure, *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53, 1689–1699, 2013.
20. Jang S.H., Hochstein D.P., Kawashima S., Yin H., Experiments and micromechanical modeling of electrical conductivity of carbon nanotube/cement composites with moisture, *Cement and Concrete Composites*, 77, 49–59, 2017.
21. Macías E.G., Alessandro A.D., Castro-Triguero R., Pérez-Mira D., Ubertini F., Micromechanics modeling of the electrical conductivity of carbon nanotube cement-matrix composites, *Composites Part B: Engineering*, 108, 451–469, 2017.
22. Khuzin A., Ibragimov R., Processes of structure formation and paste matrix hydration with multilayer carbon nanotubes additives, *Journal of Building Engineering*, 35, 102030, 2021.
23. Li F., Liu L., Zheming Yang, S. Li, Influence of modified multi-walled carbon nanotubes on the mechanical behavior and toughening mechanism of an environmentally friendly granulated blast furnace slag-based geopolymer matrix, *Ceramics International*, 47, 907–922, 2021.
24. Li F., Yang Z., Zheng A., Li S., Properties of modified engineered geopolymer composites incorporating multi-walled carbon Nanotubes (MWCNTs) and granulated blast furnace Slag (GBFS), *Ceramics International*, 1–16, 2021.
25. Kang J., Al-sabah S., Effect of single-walled carbon nanotubes on strength properties of cement composites, *Materials*, 1–21, 2020.
26. Li X., Wei W., Qin H., Hu Y.H., Co-effects of graphene oxide sheets and single wall carbon nanotubes on mechanical properties of cement, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 85, 39–43, 2015.
27. Makar J.M., Chan G.W., Growth of cement hydration products on single-walled carbon nanotubes, *Journal of the American Ceramic Society*, 92, 1303–1310, 2009.
28. Yalçinkaya Ç., Felekoğlu B., Yazıcı H., Influence of aggregate volume on the shrinkage, rheological and mechanical properties of ultra-high performance concrete, 1701–1718, 2020.
29. Chen H.J., Yu Y.L., Tang C.W., Mechanical properties of ultra-high performance concrete before and after exposure to high temperatures, *Materials*, 13, 2020.
30. Türker K., Birol T., Evaluation of using ultra-high performance fiber reinforced concrete in I-section RC beam, 3, 1431–1448, 2021.
31. Başaran B., Kalkan İ., Comparison of different FRP reinforcement-concrete bond test methods according to parameters affecting this bond, 3, 1581–1593, 2021.
32. Marasli M., Subasi S., Dehghanpour H., Ozdal V., Kohen B., Experimental investigation of pull-out and shear behavior of lifting sockets in precast UHPC panels, *ALKU Journal of Science*, 3, 82–93, 2021.
33. Topbas A., Tülen F.O., Marasli M., Kohen B., A prefabricated uhpc shell pedestrian bridge, *Structural Membranes 2019-9th International Conf*, 2019.
34. Dehghanpour H., Yilmaz K., Investigation of specimen size, geometry and temperature effects on resistivity of electrically conductive concretes, *Construction and Building Materials*, 250, 2020.
35. Dehghanpour H., Yilmaz K., Afshari F., Ipek M., Electrically conductive concrete: A laboratory-based investigation and numerical analysis approach, *Construction and Building Materials*, 260, 119948, 2020.
36. TUBALL, Technical Data Sheet of TUBALL™ MATRIX 302, V02_201905, 0–2, 2018.
37. C 1611/C 1611M, Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete, American Society for Testing and Materials, 205AD, 2006.
38. TS EN 12390-3, Hardened concrete tests - Part 3: Determination of compressive strength, Turkish Standard, 2002.
39. Dehghanpour H., Yilmaz K., The relationship between resistances measured by two-probe, Wenner probe and C1760-12 ASTM methods in electrically conductive concretes, *SN Applied Sciences*, 2, (10), 2020.
40. ASTM C805, Standard test method for rebound number of hardened concrete, American Society for Testing and Materials, 1997.
41. ASTM C597, Standard test method for pulse velocity through concrete, American Society for Testing and Materials, 2009.
42. A.M. Rashad, Effect of carbon nanotubes (CNTs) on the properties of traditional cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 153, 81–101, 2017.
43. Xu S., Lyu Y., Xu S., Li Q., Enhancing the initial cracking fracture toughness of steel-polyvinyl alcohol hybrid fibers ultra high toughness cementitious composites by incorporating multi-walled carbon nanotubes, *Construction and Building Materials*, 195, 269–282, 2019.
44. Raki L., Beaudoin J., Alizadeh R., Makar J., Sato T., Cement and concrete nanoscience and nanotechnology, *Materials*, 3, 918–942, 2010.
45. Keriene J., Kligys M., Laukaitis A., Yakovlev G., Špokauskas A., Aleknevičius M., The influence of multi-walled carbon nanotubes additive on properties of non-autoclaved and autoclaved aerated concretes, *Construction and Building Materials*, 49, 527–535, 2013.
46. Chaipanich A., Nochaiya T., Wongkeo W., Torkittikul P., Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes-fly ash cement composites, *Materials Science and Engineering A*, 527, 1063–1067, 2010.
47. Hu Y., Luo D., Li P., Li Q., Sun G., Fracture toughness enhancement of cement paste with multi-walled carbon nanotubes, *Construction and Building Materials*, 70, 332–338, 2014.
48. Camacho M.D.C., Galao O., Baeza F.J., Zornoza E., Garcés P., Mechanical properties and durability of CNT cement composites, *Materials*, 7, 1640–1651, 2014.
49. Alessandro A. D., Rallini M., Ubertini F., Materazzi A.L., Kenny J.M., Investigations on scalable fabrication procedures for self-sensing carbon nanotube cement-matrix composites for SHM applications, *Cement and Concrete Composites*, 65, 200–213, 2016.
50. Musso S., Tulliani J.M., G. Ferro, Tagliaferro A., Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites, *Composites Science and Technology*, 69, 1985–1990, 2009.
51. Kazemi M., Hajforoush M., Talebi P.K., Daneshfar M., Shokrgozar A., Jahandari S., Saberian M., Li J., In-situ strength estimation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete using Schmidt rebound hammer and point load test, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 9, 289–306, 2020.
52. Kovler K., Wang F., Muravin B., Testing of concrete by rebound method: Leeb versus Schmidt hammers, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 51, 1–14, 2018.
53. Kazemi M., Madandoust R., Brito J.D., Compressive strength assessment of recycled aggregate concrete using Schmidt rebound hammer and core testing, *Construction and Building Materials*, 224, 630–638, 2019.
54. Rao K.J., Keerthi K., Vasam S., Acid resistance of quaternary blended recycled aggregate concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 8, 423–433, 2018.
55. Hamid R., Yusof K.M., Zain M.F.M., A combined ultrasound method applied to high performance concrete with silica fume, *Construction and Building Materials*, 24, 94–98, 2010.

