

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKSEL İLETKEN BETONLARDA PİROLİZ YÖNTEMİ
İLE ELDE EDİLEN NANO KARBON SİYAHININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Heydar DEGHANPOUR

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMELERİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKSEL İLETKEN BETONLARDA PİROLİZ YÖNTEMİ
İLE ELDE EDİLEN NANO KARBON SİYAHININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Heydar DEHGHANPOUR

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMELERİ

Bu tez tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Kemalettin Yılmaz
Jüri Başkanı

Doç.Dr.
Ferhat AYDIN
Üye

Dr.Öğr.Üyesi
Muhammet Zeki ÖZYURT
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Heydar DEHGHANPOUR

16.05.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Metin İPEK'e ve bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Doç. Dr. Ferhat AYDIN'a teşekkür ederim. Araştırmanın elektriksel Bölümü ile ilgili yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Prof.Dr. Mehmet BAYRAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Elektriksel direnç ölçme yöntemi ile ilgili bana destek olan Sakarya Üniversitesi, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığında Elektronik Teknikeri İbrahim ALTUNAL'a teşekkür ederim. Numune üretim aşamasında malzeme temininde yardımlarını esirgemeyen İnci Beton ve Geyve Beton firmalarına teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans çalışmalarımda maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2018-2-7-65) teşekkür ederim.

Ayrıca eğitim boyunca her türlü bana destek olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Kaynak Araştırması	1
1.2. Literatür Özeti	3
BÖLÜM 2.	
KURUMSAL TEMELLER	7
2.1. Çimento	7
2.2. Beton	7
2.3. Kompozit Malzemeler	7
2.4. Karbon ve Türevi Malzemeler	9
2.5. Piroлиз Yöntemi ile Atık Lastiklerden Karbon Siyahı Üretim	11
2.6. Karbon Fiber (KF) ve Üretim Prosedürü	13
2.6.1. Karbon fiberin yapısı	14
2.6.2. Karbon fiberlerin kullanım alanları	16
2.7. Çelik Fiber	16
2.8. Selüloz Yapısı	18
2.9. Karboksi Metil Selüloz	19

2.10. Metil Selüloz	22
2.11. Elektriksel İletkenlik	23
2.12. Bant Enerjileri	23
2.13. Ohm Yasası	24
2.14. Elektriksel İletken Beton	26
2.15. Betonun Elektriksel İletkenliği	26

BÖLÜM 3.

MATERYAL VE YÖNTEM	30
3.1. Materyal	30
3.1.1. Çimento	31
3.1.2. Agregası	32
3.1.3. Su	33
3.1.4. Karbon fiber (KF)	34
3.1.5. Nano karbon siyahı (NKS)	35
3.1.6. Çelik fiber (ÇF)	36
3.1.7. Kimyasal katkıları	37
3.2. Karışım Tasarımı	38
3.3. Karışımların Kalıplanması	39
3.4. Numunelerin Kür İşlemi	39
3.5. Test Yöntemleri	45
3.5.1. Mekaniksel test yöntemleri	45
3.5.2. Çarpma test yöntemi	46
3.5.3. Elektriksel direnç ölçme test yöntemleri	47

BÖLÜM 4.

ARAŞTIRMA BULGULARI	50
4.1. Elektriksel Direnç (ED) Deneyleri	50
4.1.1. İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen direnç (İYÖD) değerleri	53
4.1.1.1. NKS ve KF'in İYÖD değerleri üzerinde ayrı ayrı etkileri	53

4.1.1.2. NKS ile KF'in birlikte İYÖD değerleri üzerinde etkileri	54
4.1.1.3. NKS, KF ve ÇF'in üçü birlikte İYÖD değerleri üzerinde etkileri	55
4.1.2. Wenner prop yöntem ile ölçülen direnç (WYÖD) değerleri	56
4.1.2.1. NKS ve KF'in WYÖD değerleri üzerinde ayrı ayrı etkileri	56
4.1.2.2. NKS ile KF'in birlikte WYÖD değerleri üzerinde etkileri	57
4.1.2.3. NKS, KF ve ÇF'in üçü birlikte WYÖD değerleri üzerinde etkileri	58
4.1.3. C1760-12 ASTM yöntemi ile ölçülen direnç (ASTM-D) değerleri	59
4.1.3.1. NKS ve KF'in ASTM-D değerleri üzerinde ayrı ayrı etkileri	59
4.1.3.2. NKS ile KF'in birlikte ASTM-D değerleri üzerinde etkileri	60
4.1.3.3. NKS, KF ve ÇF'in üçü birlikte ASTM-D değerleri üzerinde etkileri	61
4.2. Basınç Deneyleri	62
4.2.1. NKS ve KF'in basınç dayanımı üzerinde ayrı ayrı etkileri	62
4.2.2. NKS ile KF'in birlikte basınç dayanımı üzerinde etkileri	63
4.2.3. NKS, KF ve ÇF'in üçü birlikte basınç dayanımı üzerinde etkileri	64
4.3. Eğilme Deneyleri	65
4.3.1. NKS ve KF'in eğilme dayanımı üzerinde ayrı ayrı etkileri	65
4.3.2. NKS ile KF'in birlikte eğilme dayanımı üzerinde etkileri	66
4.3.3. NKS, KF ve ÇF'in üçü birlikte eğilme dayanımı üzerinde etkileri	67
4.4. Çarpma Deneyleri	68
4.4.1. NKS ve KF'in çarpma enerjisi üzerinde ayrı ayrı etkileri	68
4.4.2. NKS ile KF'in birlikte çarpma enerjisi üzerinde etkileri	69

4.4.3. NKS, KF ve ÇF'in üçü birlikte çarpma enerjisi üzerinde etkileri	70
4.5. İYÖD ve WYÖD arasındaki ilişki	71
4.6. İYÖD ve ASTM-D arasındaki ilişki	72
4.7. WYÖD ve ASTM-D arasındaki ilişki	73
4.8. Basınç dayanımı ve İYÖD arasındaki ilişki	74
4.9. Eğilme dayanımı ve İYÖD arasındaki ilişki	75
4.10. Çarpma enerjisi ve İYÖD arasındaki ilişki	76
4.11. Basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki	75
4.12. Basınç dayanımı ve çarpma enerjisi arasındaki ilişki	77
 BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE SONUÇ	79
5.1. Elektriksel direnç sonuçları	79
5.2. Basınç dayanım sonuçları	81
5.3. Eğilme dayanım sonuçları	81
5.4. Çarpma enerjisi sonuçları	82
5.5. İYÖD değerleri, basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve çarpma enerji değerleri arasındaki ilişkiler	82
5.6. Öneriler	83
 KAYNAKLAR	84
EKLER	93
ÖZGEÇMİŞ	111

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Alan
AI	: İnce Agregat
AII	: İri Agregat
ASTM	: American Society for Testing and Materials
ASTM-D	: ASTM Yöntemi ile Ölçülen Direnç
CNT	: Carbon Nanotube
CEA	: Conductivity-Enhancing Agent
C/F	: Coarse / Fine
ÇF	: Çelik Fiber
DP	: Plimerizasyon Derecesi
ED	: Elektriksel Direnç
EİB	: Elektriksel İletken Beton
EDS	: Energy Dispersive Spectrometer
E _U	: Nihai çarpma enerjisi
FDA	: Fiber-Dispersive Agent
İYÖD	: İki Noktalı Tek Eksenli Yöntem ile Ölçülen Direnç
I	: Akım
KF	: Karbon Fiber
KMS	: Karboksi Metil Selüloz
L	: Uzunluk
MKAA	: Monokloroasetik asit
NKS	: Nano Karbon Siyahı
R	: Direnç
SA	: Süper Akışkanlaştırıcı
SEM	: Scanning Electron Microscope
TEM	: Tunneling Electron Microscope

V	: Voltaj
WYÖD	: Wenner prop Yöntemi ile Ölçülen Direnç
ρ	: Elektriksel öz direnç
Ω	: Elektriksel direnç birimi
σ_c	: Basınç dayanımı
σ_f	: Eğilme dayanımı
η	: Viskozluk
ϕ	: Akıcılık



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Karbon siyahı yapısı [66]	9
Şekil 2.2. Karbon allotropları a Elmas. Karbon atomları bir dörtgen kafes- düzeneği içinde birbirine bağlanır. b Grafit. Karbon atomları, bir altıgen kafes tabakalar halinde bir araya birleştirilir. c Amorf karbon. Karbon atomları rastgele düzenlenmektedirler. d Küresel fulleren, C60. Karbon atomları fullerenler beşgen ve altıgen biçiminde bir arada bağlanırlar. e Elipsoidal fulleren, C70. Karbon atomları bir elipsoidal formu içinde bir araya gelirler. f Tüp fulleren, SWCNT. Karbon atomları, bir boru şekilli biçimi içindedir [65]	10
Şekil 2.3. Grafenin küresel amorf (sol), karbon nanotüp (orta) ve grafit (sağ) içerisinde sarılmışı	11
Şekil 2.4. Piroliz üretim akış diyagramı [61]	12
Şekil 2.5. Piroliz sonrası çıkan ortalama ürün miktarı [61]	12
Şekil 2.6. Karbon fiberin birim hücresi [66]	15
Şekil 2.7. Çelik Fiberlerin Sınıflandırılması (TS 10513, 1992) [69]	17
Şekil 2.8. Glikozun yapısı	19
Şekil 2.9. Selüloz yapı zinciri [71]	19
Şekil 2.10. Alkali selüloz ile monokloroasetik asit reaksiyonu sonucu KMS üretimi [71]	19
Şekil 2.11. Metil selüloz yapısı [71]	22
Şekil 2.12. Şematik enerji bant görüntüleri [73]	24
Şekil 2.13. Farklı malzemelerin elektriksel ve termal özellikleri [77]	25
Şekil 2.14. Gözenekli bir ortamda elektronik taşıma olaylarının modeli: (A = toplam alan; A_w = su alanı; L = toplam uzunluk; L_e = su için akış yolunun uzunluğu)	28
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan çimentonun SEM görüntüsü	31
Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan çimentoya ait EDS grafiği	32

Şekil 3.3. 0-0.5 mm (sol) ve 5-15 mm (sağ) Agrega tipi	32
Şekil 3.4. Sakarya büyükşehir belediyesi su kalitesi raporu	33
Şekil 3.5. 7.0 µm Çapında 12 mm uzunluğunda KF	34
Şekil 3.6. Piroliz yöntemi ile elde edilmiş karbon siyahının a; SEM (Norouzi, 2016) ve b; TEM görüntüsü [99] ve c-d; mevcut çalışmada kullanılan NCS'nın SEM görüntüleri	36
Şekil 3.7. Tez çalışmasında kullanılan çelik fiber	37
Şekil 3.8. Karboksi metil selüloz	37
Şekil 3.9. Kalıplanmış numune örnekleri; a) basınç ve ED, b) eğilme deneyi ve c) çarpma deney numuneleri	40
Şekil 3.10. Numunelerin kür havuzunda yerleştirilmesi	40
Şekil 3.11. Silindir numunelerin pürzlü taraflarının kesilmesi	41
Şekil 3.12. Numunelerin oda sıcaklığında kurutulması	41
Şekil 3.13. Basınç (üst) ve eğilme (alt) test cihazları	45
Şekil 3.14. Çarpma test aleti	47
Şekil 3.15. İki noktalı tek eksenli iletkenlik ölçme düzeneği	49
Şekil 3.16. Wenner prop yöntemi ile iletkenlik ölçme düzeneği	49
Şekil 3.17. C1760-12 WYÖD yöntemine göre iletkenlik ölçme ekipmanı	49
Şekil 4.1. KF ve NKS içeren iletken betonların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerleri	53
Şekil 4.2. İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması	54
Şekil 4.3. NKS, KF ve ÇF içeren betonların İYÖD değerlerinin kıyaslanması ...	55
Şekil 4.4. KF ve NKS içeren iletken betonların Wenner prop yöntem ile ölçülen WYÖD değerleri	56
Şekil 4.5. Wenner prop yöntem ile ölçülen WYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması	57
Şekil 4.6. NKS, KF ve ÇF içeren betonların WYÖD değerlerinin kıyaslanması ..	58
Şekil 4.7. KF ve NKS içeren iletken betonların C1760-12 ASTM standartına göre ölçülen ASTM-D değerleri	59
Şekil 4.8. İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması	60

Şekil 4.9. NKS, KF ve ÇF içeren iletken betonların ASTM-D değerlerinin kıyaslanması	61
Şekil 4.10. KF ve NKS içeren iletken betonların basınç dayanımları	62
Şekil 4.11. KF içeren iletken betonlarda NKS oranlarının basınç dayanımına etkisi	63
Şekil 4.12. Üç fazlı elektriksel iletken betonlarda basınç dayanımlarının karşılaştırılması	64
Şekil 4.13. NKS ve KF içeren iletken betonların eğilme dayanımlarının kıyaslanması	65
Şekil 4.14. Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların eğilme dayanımlarına NKS'nın etkisi	66
Şekil 4.15. İletken betonlarda NKS, KF ve ÇF'in eğilme dayanımına etkisinin incelenmesi	67
Şekil 4.16. NKS ve KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarlarının kıyaslanması	68
Şekil 4.17. Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarına NKS'nın etkisi	69
Şekil 4.18. İletken betonlarda NKS, KF ve ÇF'in çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarına etkisinin incelenmesi	70
Şekil 4.19. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda İYÖD ve WYÖD değerleri arasındaki ilişki	71
Şekil 4.20. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda İYÖD ve ASTM-D değerleri arasındaki ilişki	72
Şekil 4.21. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda WYÖD ve ASTM-D değerleri arasındaki ilişki	73
Şekil 4.22. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda basınç dayanımları ve İYÖD değerleri arasındaki ilişki	74
Şekil 4.23. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda eğilme dayanımları ve İYÖD değerleri arasındaki ilişki	75
Şekil 4.24. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda çarpmaya karşı absorbe ettiği nihai enerji değeri ve İYÖD değerleri arasındaki ilişki	76

Şekil 4.25. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda basınç dayanımları ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki	77
Şekil 4.26. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda basınç dayanımları ve çarpmaya karşı absorbe edilen nihai enerji değerleri arasındaki ilişkiler	78



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Çimentonun EDS analiz sonuçları	31
Tablo 3.2. Karışım detayları	42
Tablo 4.1. Elektriksel, mekaniksel ve çarpma deney sonuçları	51



ÖZET

Anahtar kelimeler: Elektriksel iletken beton, nano karbon siyahı, karbon fiber, çelik fiber, direnç

Bu çalışmada geniş kullanım alanına sahip olan elektriksel iletken betonların üretilmesi ve incelenmesi amaçlanmıştır. Karışımlarda elektriksel direnci çok düşük olarak kullanılan karbon fiberi atık lastiklerden elde edilen nano karbon siyahı ile birlikte kullanarak maliyetin azaltılması hedeflenmiştir. Bunun için farklı miktarlarda nano karbon siyahı, karbon fiber ve çelik fiber içeren karışımlardan oluşan 36 sayıda elektriksel iletken beton üretilmiştir. Elektriksel iletken betonların Mekaniksel, elektriksel ve çarpma deneyleri yapılarak sonuçları incelenmiştir.

Yapılan deney sonuçlarına göre farklı fonksiyonlardaki nano karbon siyahı, karbon fiber ve çelik fiber içeren numunelerin mekaniksel özellikleri gelişmiştir. Bütün karbon fiber katkılı elektriksel iletken beton numunelerin elektriksel dirençleri kontrol numuneye kıyasla azalmıştır ve karbon fiber içerik oranı arttıkça bu özellik daha net olarak ortaya çıkmıştır. Karışımlarda sadece piroliz yöntemi ile elde edilen nano karbon siyahı tek başına kullanıldığı zaman elektriksel direncin azalmasında olumlu bir sonuç elde edilmemiştir, ancak karbon fiber ve çelik fiber içeren iletken betonlara nano karbon siyahı ilave edildiğinde karbon fiber ve çelik fiberin direnç azaltma kabiliyeti önemli derecede artmıştır.

Çalışmada incelenen elektriksel direnç, mekaniksel ve çarpma özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Sonuçlara göre üç farklı yöntem ile ölçülen direnç değerleri arasında doğrusal, ve direnç değerleri ile mekaniksel dayanımları ve çarpma enerjisi aralarında doğrusal olmayan bir bağlantı olduğu tesbit edilmiştir.

EVALUATION OF NANO CARBON BLACK OBTAINED BY PYROLYSIS METHOD IN ELECTRICAL CONDUCTIVE CONCRETE

SUMMARY

Keywords: Grape Electrical conductive concrete, nano carbon black, carbon fiber, steel fiber, resistance

In this study, it is aimed to production and investigation of electrical conductive concretes which have wide usage area. Also,It is aimed to reduce the cost by using carbon fiber with nano carbon black obtained from waste tires. For this, electrical conductive concrete with 36 numbers consisting of mixtures containing different amounts of nano carbon black, carbon fiber and steel fiber has been produced. Mechanical, electrical and multiplication tests of electrical conductive concrete were performed and the results were examined.

According to the results of the tests, mechanical strengths of the specimens containing nano carbon black, carbon fiber and steel fiber in different functions increased. The electrical resistances of all carbon fiber doped conductive concrete specimens decreased compared to the control specimen and this feature became more evident as the carbon fiber content ratio increased. A positive result was not obtained in the reduction of the electrical resistance when the nano carbon black obtained by the pyrolysis method was used in the mixtures, but the ability of carbon fiber and steel fiber to decrease the resistance was significantly increased when nano carbon black was added to conductive concretes containing carbon fiber and steel fiber.

In this study, the relationship between electrical resistance, mechanical and impact properties were investigated. According to the results, the resistance values measured by three different methods were found to be linear, and there was a nonlinear relationship between resistance values and mechanical strengths and impact energy.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Kaynak Araştırması

Elektriksel iletken betonun (EİB) keşf edilmesinden yani 1965 [1] yılından günümüze kadar çimentolu harç ve betonların iletkenliği ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. EİB'ler yapıların sağlığını izlemede kendi kendine algılama malzemesi olarak, elektromanyetik girişim koruyucu için elektromanyetik radyasyon reflektörü olarak ve kendiliğinden ısıtmalı döşeme sistemlerinde direnç malzemesi olarak kullanılmaktadır [2-6]. Kendiliğinden ısıtmalı döşeme sistemleri son zamanlarda yol ve hava limanı pistlerinde kar ve buzu eritmek ve birikmesini önlemek için uygulanmaktadır [7-11].

Betonun elektriksel öz direncinin yüksek seviyelerde olduğu farklı yazarlar tarafından teyit edilmiştir. Açık havada kurutulmuş betonun elektriksel öz direncini $6.54 \times 10^5 - 11.4 \times 10^5 \Omega\text{-cm}$ olarak tesbit edilmiştir [6, 12]. Buna ek olarak farklı araştırmacılar tarafından yapılan araştırmalara göre doymuş beton ve kuru betonun elektriksel öz direnci sırasıyla $10^6 \Omega\text{-cm}$ ve $10^9 \Omega\text{-cm}$ olarak rapor edilmiştir [13, 14].

Katkısız beton tek başına bir matris düşünülürse elektriksel iletken olarak yalıtkan ve yarı iletken malzemeler arasında yer almaktadır. Beton matrisine iletken bir katkı malzemesi ilave ederek iletkenliği artırılabilir [15-21]. Elektriksel iletken katkı içeriği betonun diğer fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin bozulmasını önlemek için sınırlı miktarlarda kullanılmalıdır. Kullanılan katkı malzemeler farklı iletkenliğe, geometriye ve cinse sahip olabilir. Bir çok çalışmada elektriksel iletken katkı malzemesi olarak grafit ve karbon siyahı gibi toz halindeki malzemeler kullanılmıştır. Çoğu çalışmada ise çelik fiber ve karbon fiber (KF) gibi tek boyutlu iletken malzemeler kullanılmıştır [7, 19, 22-38]. El-Dieb (2018), farklı iletken dolgu

malzemelerin çok fonksiyonlu elektriksel iletken betonlarda davranışlarını incelemiştir. Beton karışımı, 30 MPa'lık basınç dayanımına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. İletken dolgu malzemesi olarak dört farklı oranlarda (% 1, % 3, %5 ve % 7) çelik talaşası, karbon tozu ve grafit tozu kullanılmıştır. Sonuçlara göre her üç dolgu malzemesinin artmasıyla elektriksel direnç (ED) ve basınç dayanımının azalması görülmüştür ve basınç dayanımının azalmasını en çok çelik talaşası etkilemiştir. Bununla birlikte direncin azalmasında grafitin diğerlerine göre daha etkili olduğu belirlenmiştir [13]. Buna ek olarak iletken çimentolu malzemeler ve betonlarda çelik talaşası, çelik yünü, karbon nano fiber ve karbon nanotüp gibi diğer malzemeler de incelenmiştir [13, 37-41]. Betonun iletkenliğini artırmak amacıyla iletken katkı malzemeleri tek fazlı ve çok fazlı olarak kullanılabilir. Wu ve ark (2014), yol üst yapılarında donmayı engellemek amacıyla üretilen üç fazlı elektriksel iletken betonun özelliklerini incelemişlerdir. İletken karışımlarda iletken katkı malzemesi olarak grafit, çelik fiber ve KF kullanılmıştır. Sonuçlara göre çelik fiber ve grafit içeren kompozit betonlarda grafit oranının artmasıyla basınç değeri ve bununla birlikte ED azalmıştır. Üç fazlı kompozit betonlarda ise maksimum basınç değeri % 1.2 çelik fiber, % 0.4 KF ve % 6 grafit içeren kompozite ve minimum ED değeri % 1.0 çelik fiber, % 0.4 KF ve % 4 grafit içeren kompozite ait olduğu belirlenmiştir [7].

Farklı araştırmalardan elde edilen sonuçlara göre, dolgu maddesinin boyutu ve dağılımı, beton iletkenliğini etkilemesi açısından, o maddenin iletkenliğinden ve kullanılan miktarından daha önemli olduğu anlaşılmıştır [13, 26]. Bazı araştırmalar, bileşen tipleri, agrega içeriği, su-çimento oranı ve kum-çimento oranı, betonun elektriksel direncinde önemli etkileyici faktörler olduğunu ortaya koymuşlardır [42-47]. Sassani ve ark (2017) KF içeren elektriksel iletken betonlarda beş farklı değişkenlerin mühendislik özelliklerinde etkisini incelemişlerdir. Değişkenler; KF dozajı, Fiber uzunluğu, İri-ince agrega hacim oranı (C / F), CEA (iletkenlik artırıcı ajanı) dozajı FDA (fiber dağıtıcı ajanı) dozajından oluşmaktadır. Bulgulara göre KF dozajının artmasıyla Elektriksel direncinin azalması görülmüştür, uzun fiberin kısa fibree göre direncin azalmasında az miktarda etkili olduğu belirlenmiştir. C / F oranının artmasıyla direnç artmıştır. CEA miktarının artması direnci belirgin

seviyede azaltmıştır. FDA' nın varlığı direnci azaltmıştır ama FDA'nın artmasıyla direncin değişmesinde önemli bir fark görülmemiştir [6].

KF, farklı amaçlar için elektriksel iletken çimentolu kompozitlerin üretiminde elektriksel iletken katkı malzemesi olarak kullanılmış ve test edilmiş bir malzemedir [6]. Ayrıca daha önceki çalışmalardan KF takviyeli betonların fiziksel ve mekaniksel olarak dayanımlı olduğu tesbit edilmiştir [48-50]. KF katkılı betonlarda iletkenlik özelliğini etkileyen faktör sadece KF içeriği değil, KF uzunluğu, karışım yöntemi ve dağılım gibi faktörler de önemlidir. Birçok çalışmada karbon fiberin beton içerisinde dağılımını sağlamak için toz halinde olan metil selüloz katkı malzemesi kullanılmıştır [6, 49, 51].

Bazı araştırma sonuçlarına göre çeşitli yöntemler ile ölçülen ED sonuçları arasında farklıklar rapor edilmiştir [52-56]. Ghosh ve ark (2015), farklı karışımlara sahip yüksek performanslı silindirik beton numunelerinin elektriksel dirençlerini iki farklı toplu ED ve yüzeysel ED ölçme yöntemleri ile ölçerek kıyaslamışlardır. Toplu elektriksel direnç ölçme için Merlin elektriksel direnç ölçme cihazı kullanılmıştır, yüzeysel elektriksel direnç ölçme için dört proflu Wenner prop test cihazı kullanılmıştır. Sonuçlara göre toplu elektriksel direnç değerinin yüzeysel direnç değerine oranı farklı karışımlar için 0.29 ile 0.49 arasında hesaplanmıştır. Bu değerın miktarı teorik hesaplamaya göre 0.38 olarak ifade edilmiştir [56].

1.2. Literatür Özeti

Chung (2002), çimento matrisli kompozitlerin elektriksel iletkenlikleri ile ilgili bir araştırma yapmıştır. Araştırmada kompozit malzemenin elektriksel direncine, termoelektrik ve elektro manyetik davranışlarına odaklanmıştır. Farklı çalışmaların bulgularına göre kısa fiberlerin elektriksel iletkenlik artırıcı etkisini belirlemiştir [57].

Wu ve ark (2014), yol üst yapılarında donmayı engellemek amacıyla üretilen üç fazlı elektriksel iletken betonun özelliklerini incelemiştir. İletken karışımlarda iletken katkı malzemesi olarak grafit, çelik fiber ve KF kullanılmıştır. Sonuçlara göre çelik

fiber ve grafit içeren kompozit betonlarda grafit oranının artmasıyla basınç değeri ve bununla birlikte elektriksel direnç azalmıştır. Üç fazlı kompozit betonlarda ise maksimum basınç değeri % 1.2 çelik fiber, % 0.4 KF ve % 6 grafit içeren kmpozite ve minimum elektriksel direnç değeri % 1.0 çelik fiber, % 0.4 KF ve % 4 grafit içeren kmpozite ait olduğu belirlenmiştir [7].

El-Dieb (2017), farklı iletken dolgu malzemelerin Çok fonksiyonlu elektriksel iletken betonlarda davranışlarını incelemiştir. Beton karışımı, 30 MPa'lık basınç dayanımına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. İletken dolgu malzemesi olarak dört farklı oranlarda (% 1, % 3, %5 ve % 7) çelik talaşası, karbon tozu ve grafit tozu kullanılmıştır. Sonuçlara göre her üç dolgu malzemesinin artmasıyla elektriksel direnç ve basınç dayanımının azalması görülmüştür ve basınç dayanımının azalmasını en çok çelik talaşası etkilemiştir. Bununla birlikte direncin azalmasında grafitin diğerlerine göre daha etkili olduğu belirlenmiştir [13].

Sassani ve ark (2017), KF içeren elektriksel iletken betonlarda beş farklı değişkenlerin mühendislik özelliklerinde etkisini incelemişlerdir. Değişkenler; KF dozajı, Fiber uzunluğu, İri-ince agreg a hacim oranı (C / F), CEA (iletkenlik artırıcı ajanı) dozajı FDA (fiber dağıtıcı ajanı) dozajından oluşmaktadır. Bulgulara göre KF dozajının artmasıyla Elektriksel direncinin azalması görülmüştür, uzun fiberin kısa fibere göre direncin azalmasında az miktarda etkili olduğu belirlenmiştir. C / F oranının artmasıyla direnç artmıştır. CEA miktarının artması direnci belirgin seviyede azaltmıştır. FDA'nın artmasıyla direncin değişmesinde önemli bir fark görülmemiştir [6].

Ghosh ve ark (2015), farklı karışımlara sahip yüksek performanslı silindir beton numunelerinin elektriksel dirençlerini iki farklı toplu ED ve yüzeysel ED ölçme yöntemleri ile ölçerek kıyaslamışlardır. Toplu ED ölçme için Merlin ED ölçme cihazı kullanılmıştır, yüzeysel ED ölçme için dört proplu Wenner prop test cihazı kullanılmıştır. Sonuçlara göre toplu ED değerinin yüzeysel direnç değerine oranı farklı karışımlar için 0.29 ile 0.49 arasında hesaplanmıştır. Bu değerin miktarı teorik hesaplamaya göre 0.38 olarak ifade edilmiştir [56].

Wu ve ark (2013), farklı miktarlarda grafit içeren elektriksel iletken beton numunelerine belirli voltajlar uyguluyarak betonun elektriksel iletkenlik ve termal özelliklerini incelemişler. Elde edilen değerlere göre voltaj arttıkça ED azalmıştır ve bununla birlikte betonun ısısı artmıştır. Sonuçlara göre grafit içeriği, numune boyutu ve uygulanan voltaj seviyesini, betonun elektriksel ve termal özelliklerinde önemli rol olduğu ifade edilmiştir. Buna ek olarak üstün elektriksel ve termal özellikleri % 2 çelik ve % 10 grafit içeren karışım ile ilgili olduğu belirlenmiştir [58].

Zuofu ve ark (2006), KF içeren elektriksel iletken beton ile ilgili çalışmalarında incelemek amacıyla metil selülozun çözülmesi için kullanılan su miktarını artırarak betonun elektriksel direncini incelemişlerdir. Bu yöntem ile direncin azalabilmesini önermişler ve kar-buz birikmesini önlemek ve ya çözmek için uygulanan elektriksel iletken betonlarda kullanılan karbon fiberin minimum olarak kullanılmasını ifade etmişler [46].

Chen ve ark (2014), numune parametrelerinin beton direncinde etkisini araştırmışlardır. Bunun için numune geometrisi, numune boyutu, ölçüm prob aralığı ve nem içeriği incelenmeye alınmıştır. Sonuçlara göre elektriksel direnci etkileyen en önemli faktör nem içeriği ile ilgilidir. Oda sıcaklığında kurutulan beton numunelerin direnci etüvde kurutulan beton numunelerin direncinden 6.9-8 kat daha düşük olarak ölçülmüştür [55].

Lavagna ve ark (2018), işlevsel hale getirilmiş (fonksiyonlaşmış) KF içeren çimento kompozitlerinin eğilme, tokluk ve basın dayanımı ve elektriksel iletkenliğini incelemişlerdir. Bu özelliklerin sağlanması için karbon fiberin suda iyice dağılması ve KF ile çimento arasındaki etkileşimin önemli oldukları ifade edilmiştir [59].

Yehia ve ark (1999), köprü güvertelerinde kar ve buz birikmesini önlemek için elektriksel iletken beton uygulamasını önermişlerdir. Yaptıkları araştırmada elektriksel direncin ölçülmesi için 152 x 38 x 38 & 152 x 152 x 102 mm prizmatik numuneler üretmişler ve hacimsel olarak % 15 - % 20 çelik fiber içeren karışımların elektriksel direncini 500-10 Ω .Cm olarak elde etmişlerdir. Daha sonra aynı

karışımlardan 305 x 305 x 50 mm plaka numuneler üretmişler ve 30 dk boyunca 48 volt DC voltaj uyguluyarak plaka numunelerinin sıcaklığını -1.1°C ' den 15.6°C ' ye yükseldiğini farketmişler [17].



BÖLÜM 2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Çimento

Çimento esas olarak, doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcı malzeme olarak tanımlanır. Çimento, su ile karıştırılıp plastik hamur durumuna geldikten bir süre sonra havada ya da su içinde yavaş yavaş katılaşır. Bu katılaşma olayına piriz adı verilir. Aynı zamanda betonun en önemli hammaddesi olan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır [60, 61].

2.2. Beton

Beton, çimento, su, agrega ve gerektiğinde katkı maddelerinin belirli oranlarda homojen olarak karıştırılmasından oluşan, başlangıçta plastik kıvamda olup şekil verilebilen, zamanla katılaşp sertleşerek dayanım kazanan ve tekrar çözünmeyen kompozit bir yapı malzemesidir [62].

2.3. Kompozit Malzemeler

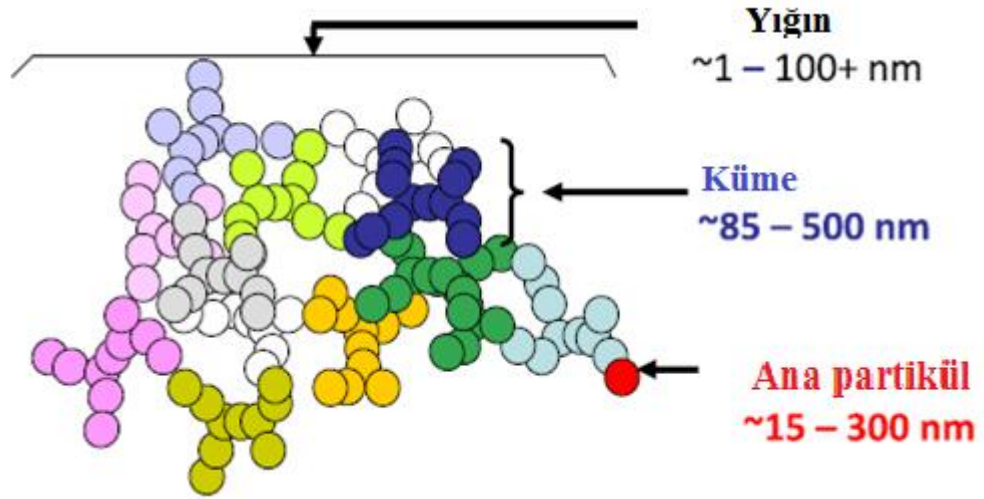
Kompozit malzeme, tek başına kullanıldığında tek tek bileşenlerin, daha iyi özelliklerle sonuçlanan iki ya da daha fazla malzemenin bir birleşimi olarak tanımlanabilir. Metal alaşımlarının tersine, her bir malzeme, kendi kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini muhafaza eder. Her kompozit malzeme, bir takviye elemanı ve bir matristen oluşur. Kompozit malzemelerin ana avantajları spesifik özellikleridir. Takviye edici faz mukavemet ve sağlamlık sağlar. Çoğu durumda, takviye malzemesi matrisinden daha sert, güçlü ve daha dayanıklıdır. Takviye, genellikle, bir fiber ya da bir partikül halinde olur. Partikül takviyeli kompozitlerde,

partikül tüm yönlerde yaklaşık olarak eşit boyutlara sahip bulunmaktadır. Partiküller küresel, düzenli veya düzensiz geometriye sahip olarak kullanılabilirler. Partikül takviyeli kompozitler sürekli fiber takviyeli kompozitlerden daha zayıf ve kırılğıandırılar, ama sürekli fiber takviyeli kompozitlerden maliyet açısından daha uygundurlar [63]. Kompozit malzemeler kullanılan matris malzemesine göre bir sınıflandırmada üç gruba ayrılır; bunlar metal matrisli, polimer matrisli ve seramik matrisli kompozitlerdir. Özellikle yüksek dayanım gerektiren alanlarda, metallerin elastisite modülü yüksek olduğu için, metal matrisli kompozitler kullanılır. Seramik matrisli kompozitler ise sertlik, aşınma ve korozyona dayanıklı malzemeler gerektiren alanlarda kullanılmaktadır. Polimerler havacılık, sporculuk ve havacılık araçları gibi düşük ağırlık ve hafif malzemelere ihtiyaç duyulan alanlarda kullanılır. Karbon genellikle metal, seramik ve polimer matrisli kompozitlerde takviye edici malzemesi olarak kullanılır. Bununla birlikte elektriksel iletkenliği yüksek olduğu için elektriksel alanlarda (yakıt pilleri, kapasitörler, vb) gelişmiş nano kompozitlerde polimerlerde iletkenliği artırma amacıyla da kullanılabilir.

Metaller bilinen en iletken malzemelerdir, ama bu malzemelerin yüksek ağırlık, korozyona karşı direci düşük ve şekil verilebilirliği güç olmaları gibi dezavantajları da vardır, dolayısıyla uygulamalarda birçok sorunlar ortaya çıkabilir. Bu sorunların çözülebilmesi için bileşim vasıtasıyla iletkenliği iyi olan ametal malzemesi olarak bilinen karbon, kompozitlerinin üretilmesinde dikkat çekici olmuştı. Bir kompozit içerisinde elektriksel olarak iletken parçacıkların konsantrasyonu belli bir seviyeyi aştığı zaman, parçacıkların birbiriyle temas etmesi nedeniyle malzeme içerisindeki elektronların hareketine bir yol oluşur. Ayrıca elektronların kolay hareket edebilmesi için toz halinde kullanılan iletken maddenin yanında fiber şeklindeki iletken malzemelerin kullanılması önem arz etmektedir. Bu şekilde, kompozit malzeme elektriksel olarak iletken hale gelir. Kompozitlerde iletkenliğin artma sınırı iletken dolgu maddesinin şekline bağlıdır. Yüksek en boy oranına sahip parçacıklar kullanılırsa, daha az miktarla, daha iletken bir kompozit elde edilir [64].

2.4. Karbon ve Türevi Malzemeler

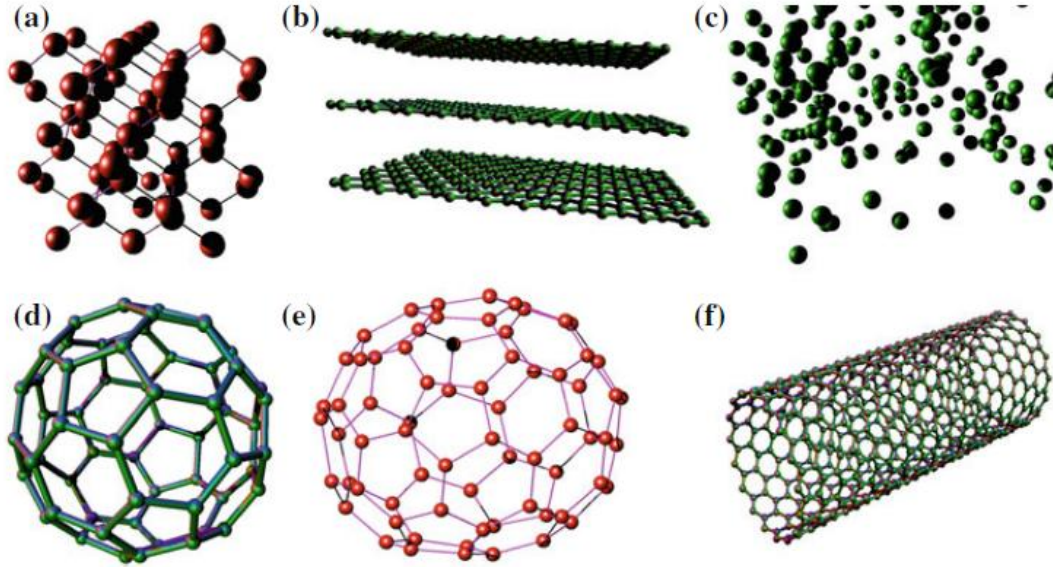
C sembolü ile gösterilen karbon (latince: karbo "kömür"), atom numarası 6 ve periyodik tablonun 14. Grubunda yer alan ametal bir maddedir ve dört elektron vermesi ile kovalent bağlar oluşturur. Bu ametalin sabit üç doğal izotopu vardır (12C, 13C ve 14C). Karbon eski çağlardan beri bilinen birçok unsurlardan biridir ve kütle olarak evrende en bol bulunan dördüncü kimyasal elementtir. Aynı zamanda insan vücudunda kütle olarak bulunan ikinci elementtir [65]. Karbon siyahının (carbon black) ticari olarak üretilmesi yaklaşık yüz yıl olmuştur. Toz halinde olan ince siyah saf karbon elementinin birçok kullanım alanı vardır. Genellikle karbon siyahı mürekkepler, boyalar, plastik, araç lastikleri, kauçuk, kaplamalar ve otomotiv ürünlerinde katkı veya takviye maddesi olarak kullanılmaktadır. Bu elementin özgül yüzey alanı, parçacık boyutu ve yapısı, iletkenlik ve renk gibi özelliklerini kontrollü koşullar altında etkileyen bir maddedir. Karbon siyahı yapısı Şekil 2.1.'de verilmiştir [66].



Şekil 2.1. Karbon siyahı yapısı [66].

Karbonun iyi bilinen allotropları elmas, grafit, amorf karbon ve fullerenerlerdir. Şekil 2.2.'de bu allotropların kristalografik yapıları gösterilmiştir. Elmas (Şekil 2.2.a) yüksek optik dağılma ve sertliği ile ünlüdür ve yüksek sertliğinden dolayı endüstriyel kesme ve parlatma araçlarında uygulanabilir. Grafit tabakalı ve düzlemsel bir yapıya

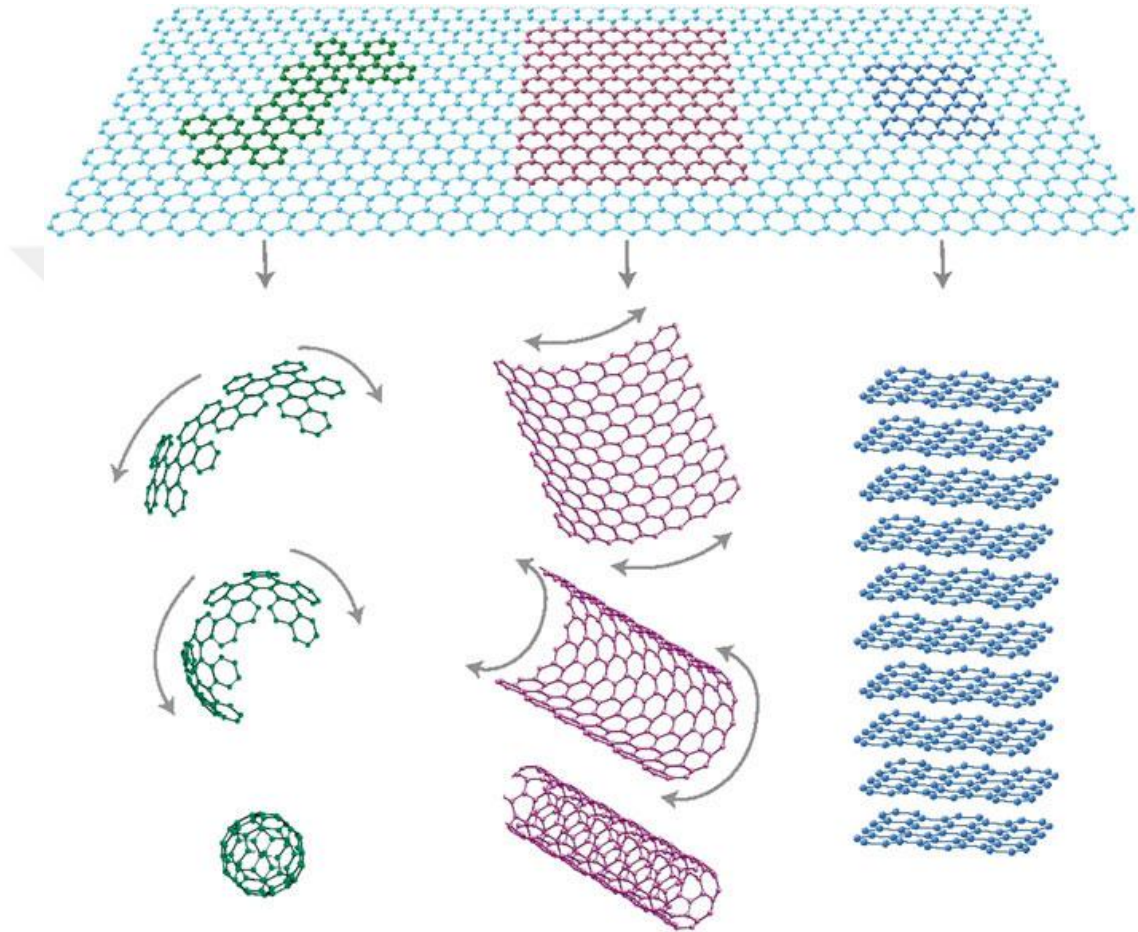
sahiptir (Şekil 2.2.b). Her tabakada karbon atomları altıgen bir kafes şeklinde düzenlenmiştir, kafes parametresi 0.142 nm iken düzlemler arası mesafe 0.333 nm'dir. Karbon atomları ve Van der Waals çekme kuvveti bu tabakaları birlikte tutar [65].



Şekil 2.2. Karbon allotropları a Elmas. Karbon atomları bir dörtgen kafes-düzeneği içinde birbirine bağlanır. b Grafit. Karbon atomları, bir altıgen kafes tabakalar halinde bir araya birleştirilir. c Amorf karbon. Karbon atomları rastgele düzenlenmektedirler. d Küresel fullerene, C60. Karbon atomları fullerenler beşgen ve altıgen biçiminde bir arada bağlanırlar. e Elipsoidal fullerene, C70. Karbon atomları bir elipsoidal formu içinde bir araya gelirler. f Tüp fullerene, SWCNT. Karbon atomları, bir boru şekilli biçimi içindedir [65].

Grafiti oluşturan her bir tabaka grafen (ilk iki boyutlu kristal atom) olarak adlandırılmıştır. Son yıllarda grafen üzerinde yapılan araştırmalarda çok önemli gelişmeler olmuştur. Bu kumaşa benzer bir karbon atom kalınlığında olan malzeme, yüksek mekanik gücü, oldukça yüksek elektrik ve termal iletkenlik ve gazlara karşı sızdırmazlık ve çok çeşitli uygulamalar için birçok üst özellikleri bir araya getirir [67]. Amorf karbon is ve siyah karbon gibi herhangi bir kristal yapıya sahip değildir (Şekil 2.2.d). Amorf karbon mürekkep, boya ve endüstriyel kauçuk için dolgu maddeleri olarak kullanılabilir. Karbonun dördüncü allotropu nano ölçüde olan fullerenlerdir. Şekil 2.2.d-f fulleren üyelerinin yapılarını gösterir. Fulleren ailesi küresel fullerenler, ellipsoidal fullerenler, uzun silindirik CNT (karbon nanotüpler) ve düzlemsel grafeni içermektedir. Nanoteknolojinin gelişmesiyle birlikte fullerenler nano uygulamalarında önemli bir rol oynar. Grafen karbonun küresel, grafit ve

nanotüp allotroplarının temel yapı elemanıdır (Şekil 2.3.). Örneğin kristal yapılı grafit birlikte istiflenmiş birçok grafen levhalardan oluşmaktadır. Grafen süper fiziksel özellik ve yüksek iletkenliğe sahip olduğundan dolayı güneş pilleri, süperkapasitörler, elektronik aygıtlarda ve optik özelliği gerektiren alanlarda uygulanmaktadır [65].

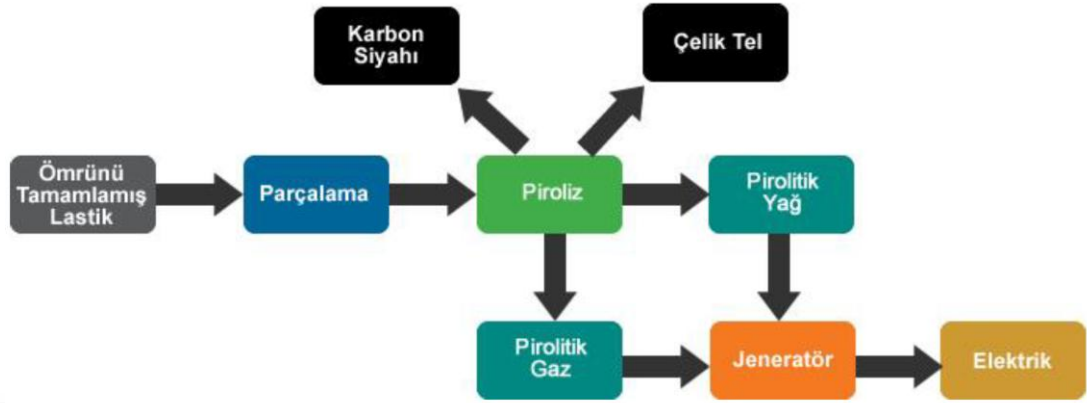


Şekil 2.3. Grafenin küresel amorf (sol), karbon nanotüp (orta) ve grafit (sağ) içerisinde sarılmışı.

2.5. Piroliz Yöntemi ile Atık Lastiklerden Karbon Siyahı Üretimi

Türkiye’de 2015 verilerine göre yaklaşık 18 milyon araç bulunmaktadır. Bu verilere göre yılda ortalama 386.000 ton geri dönüşüm yapılacak lastik bulunmaktadır. Piroliz tabanlı teknoloji kullanılarak ham maddesi lastik olan ürünün işlenmesiyle, katma değeri yüksek ürün üretilir, çevre kirliliği önlenir, atık miktar azaltılır, enerji

tasarrufu yapılır. Şekil 2.4.'de atık lastiklerin geri dönüşümü için uygulanan piroliz yöntemiyle elde edilen ürünler görülmektedir [61].



Geri dönüşüm lastikleri bu sistemde öncelikle yanak telleri ayrıştırılarak parçalanması için hazırlanır ve konveyörlerle parçalayıcıya gönderilir. Geri dönüşüm lastikleri maksimum 10 cm boyutlarında parçalanarak silolara taşınır. Parçalanmış lastikler vakum altında ısıtılarak lastik molekülleri parçalanır ve reaktör içinde hidro karbon dönüşümü sağlanır, çeşitli safhalardan geçtikten sonra katı karbon kalıncaya kadar işlemler devam eder ve daha sonra distilasyon sistemine gönderilir. Piroliz üretimi sonunda reaktör tabanında lastik içinde bulunan çelik teller ve karbon karası olarak iki madde kalır. Karbon karası ve teller manyetik sistem bölümüne alınarak tellerden karbon karası ayrışımı yapılır ve iki ürün de satışa hazır olarak depolanır. Karbon karası genellikle lastik (vasıta) üretiminde kullanılır. Atık lastiklerin geri dönüşümü sırasında %20-%28 oranında karbon siyahı açığa çıkmaktadır [61]. Piroliz sonrası karbon siyahı ile birlikte ortaya çıkan ürün Şekil 2.5.'de verilmiştir.

Ürün Tipi	Verim	Özellik
Karbon Siyahı	%20-28	N200-N330 Kalitesinde (ASTM)
Pirolitik Yağ	%40-48	10.000 kcal/m ³ kcal ısı değerinde, düşük kükürt sahip olma
Pirolitik Gaz	%9-14	10.000 kcal/m ³ ısı değerinde
Çelik Tel	%9-14	Satışa Hazır Preslenmiş

Şekil 2.5. Piroliz sonrası çıkan ortalama ürün miktarı [61].

2.6. Karbon Fiber (KF) ve Üretim Prosedürü

KF ilk defa karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu bilinmesinden dolayı üretilmiştir. Cam fiberlerinin metale göre sertliğinin çok düşük olmasından dolayı sertliğin 3- 5 kat artırılması çok belirgin bir amaçtı. KF'ler çok yüksek ısı işlem uygulandığında Fiberler tam anlamıyla karbonlaşırlar ve bu fiberlere grafit fiberi denir. Günümüzde ise bu fark ortadan kalkmaktadır. Artık KF'i de grafit fiberi de aynı malzemeyi tanımlamaktadır. KF'i epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri gösterir. KF üreticileri devamlı bir gelişim içerisinde çalışmalarından dolayı karbon fiberlerinin çeşitleri sürekli değişmektedir. Karbon fiberlerinin üretimi çok pahalı olduğu için ancak uçak sanayinde, spor gereçlerinde veya tıbbi malzemelerin yüksek değerli uygulamalarında kullanılmaktadır [68].

Karbon fiberler piyasada iki biçimde bulunmaktadır [68]:

1) Sürekli fiber: Dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda, ve prepreglerler (ön emprenye) ile kullanılmaktadır. Bütün reçinelerle kombine edilebilirler.

2) Kırpılmış fiber: Genellikle enjeksiyon kalıplamada ve basınçlı kalıplarda makine parçaları ve kimyasal valf yapımında kullanılırlar. Elde edilen ürünler mükemmel korozyon ve yorgunluk dayanımının yanı sıra yüksek sağlamlık ve sertlik özelliklerine sahiptirler. Karbon fiberi çoğunlukla iki malzemedен elde edilir;

1) Zift

2) PAN (Poliakrilonitril)

Zift tabanlı karbon fiberleri göreceli olarak daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Buna bağlı olarak yapısal uygulamalarda nadiren kullanılırlar. PAN tabanlı karbon fiberleri kompozit malzemeleri daha sağlam ve daha hafif olmaları için sürekli

geliştirilmektedir. PAN'ın karbon fiberine dönüşümü birbirini takip eden dört aşamada gerçekleşmektedir [68]:

a) Oksidasyon: Bu aşamada fiberler hava ortamında 300 derecede ısıtılır. Bu işlem, fiberden Hidrojen'in ayrılmasını ve daha uçucu olan Oksijen'in eklenmesini sağlar. Ardından karbonizasyon aşaması için fiberler kesilerek grafit teknelerine konur. Polimer, merdiven yapısından kararlı bir halka yapısına dönüşür. Bu işlem sırasında fiberin rengi beyazdan kahverengiye, ardından siyah olur.

b) Karbonizasyon: Fiberlerin yanıcı olmayan atmosferde 3000 °C'ye kadar ısıtılmasıyla fiberlerin %100 karbonlaşma sağlanması aşamasıdır. Karbonizasyon işleminde uygulanan sıcaklık üretilen fiberlerinin sınıfını belirler.

c) Yüzey İyileştirmesi: Karbonun yüzeyinin temizlenmesi ve fiberin kompozit malzemenin reçinesine daha iyi yapışabilmesi için elektrolitik banyoya yatırılır.

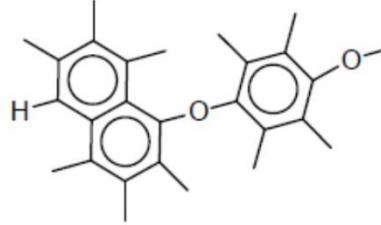
d) Kaplama; Fiberi sonraki işlemlerden (prepreg gibi) korumak için yapılan nötr bir sonlandırma işlemidir. Fiberler reçine ile kaplanır. Genellikle bu kaplama işlemi için epoksi kullanılır. Kompozit malzemede kullanılacak olan reçine ile fiberler arasında bir arayüz görevi görür.

Karbon fiberlerinin tüm diğer fiberlere göre en önemli avantajı yüksek elastisite modülüne sahip olmasıdır. KF bilinen tüm malzemelerle eşit ağırlıklı olarak karşılaştırıldığında en sert malzemedir [68].

2.6.1. Karbon Fiberin Yapısı

Element olarak karbon, fiziksel ve mekanik özellikleri farklı olan şekilsiz (amorf) ya da billur yapıda olabilir. Bu nedenle karbon fiberlerinin nitelikleri, fiber mikroyapısına ve atom yapısına bağlıdır. Bu etmenler, kullanılan başlangıç hammaddesi, üretim ortam ve şartları, ısıl işlemin sıcaklığı tarafından belirlenir.

Yüksek mekanik dayanıklılık için, billur grafit biçimi yeğlenir. Bu biçim, altı köşeli, sık tabakalı billur yapıdadır. Karbon fiberin birim hücresi Şekil 2.6.'da verilmiştir.



Şekil 2.6.Karbon fiberin birim hücresi [66].

Tabakalar arasında 3,35 angströmlük aralıklar vardır ve anizotropi (billur tanelerinin her doğrultuda farklı fiziksel özellikler taşıması) özelliği gösterir. Bugüne kadar bulunan en sağlam malzeme, ipliksi grafit billurlarıdır. Isıl işlem sırasında grafit yapısı yönlendirilirse, rijit ve sağlam karbon fiber elde edilir.

Düzgün molekül yapısı, organik başlangıç fiberi kullanılarak, billur tabakaların fiber eksenine paralel olarak dizilmesi ile sağlanabilir. Grafitleştirmeden sonra, küçük grafit fiberciklerinden oluşan (fibril) ağ yapılar elde edilir. Ağ yapıların her biri, 15 billur tabakası kalınlığında, 150 angström genişliğinde, 10 000 - 100 000 angström uzunluğundadır. Fibercikler kusurlu biçimde bir araya geldiklerinden, genellikle, boylamasına uzanan boşluklar ortaya çıkar. Zift gibi, daha ucuz ve düzensiz başlangıç fiberleriyle de, uzama grafitleştirmesi yoluyla, benzer bir etki ortaya çıkarılabilir. Bu süreçte fiberler, 2200 - 2900 °C deki grafitleştirme sırasında gerdirilir. Fiberin enine kesiti, yuvarlak, düzensiz hatta kemik biçiminde olabilir. Yüzey görünüşü, başlangıç fiberine bağlı olarak değişir. Örneğin; poliakrilonitrilli fiberde pürüzsüz; rayonlarda boydan boya oluklu olur. Reçinelere yapışma özelliklerini artırma amacıyla, fiber yüzeyleri genellikle işlenir. Bu amaçla ya gaz ve sıvı yükseltgeme (çukur oluşturma) ya da iplikleştirme (yüzeyde silikon nitrür billurlarının oluşması) yöntemlerinden yararlanılır [69, 70].

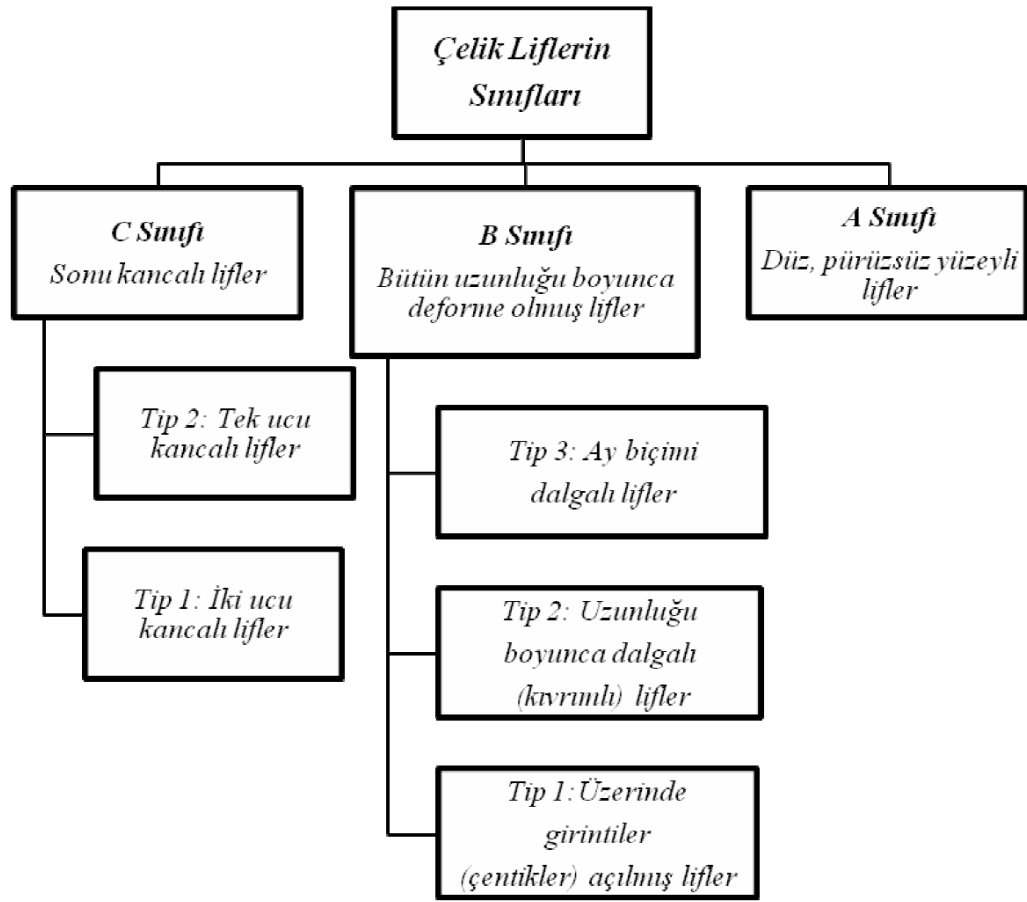
2.6.2. Karbon Fiberlerin Kullanım Alanları

Karbon fiberi pahalı olmasına karşın günümüzde endüstriden uzay alanına kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Karbon fiberi tüketimini %21 hava-uzay endüstrisi; %15 endüstriyel uygulamalar; %14 spor malzemeleri; %11 rüzgar enerjisi; %10 otomotiv sanayi; %9 elektronik; %8 yağ ve gaz; %8 inşaat ve yapı; %4 denizcilik alanı oluşturmaktadır [69].

İnşaat alanında yapısal güçlendirme amacıyla uygulanmaktadırlar. Burada sargı, eğilme, darbe dayanımı, sehim amaçlı kontrol gibi nedenlerle karbon fiberleri ya da kompozitleri tercih edilmektedir. KF ve kompozit malzemeler bir ofis binası prototipi inşa edilirken geleneksel tekniklerden farklı olarak binanın temel yapısıyla birlikte dokunmuştur. Ayrıca çift yüzölümlü transparan ve yarısaydam membranlardan oluşturulmuştur. Binanın yapısı, silindirik hacminin çevresinde her iki yönde de sarılmış, karbon fiberlerinden yapılmış yüzlerce fit uzunluğundaki 40 tane sarmal banttandır. Bükülmez dahili bir çekirdeğe ve sağlamlık için kullanılan kolon serilerine ihtiyaç duyulmadan, bu 30 cm genişliğinde ve 1 inç kalınlığındaki ince bantlar, binanın tabanından çatısına kadar aralıksız devam etmektedir. Böylece oluşacak dikey basınç ortadan kaldırılmaktadır. Karbon yünü ve keçeleri ısı izolasyon maddesi olarak kullanılmaktadırlar. Karbon fiberleri köprü iskelelerinde, kirişlerde, sütunlarda ve döşemelerde antisismik takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca mil, ızgara ve inşaat demirlerinde de takviye elemanı olarak kullanılmaktadırlar. Japonya’da depreme dayanıklı binalarda takviye malzemesi olarak kullanılması düşünülmektedir [69].

2.7. Çelik Fiber

TS 10513, 1992’e [71] göre; çelik fiberler A, B ve C sınıfı olarak üç farklı sınıfa ayrılmıştır. Aşağıdaki Şekil 2.7’de standartta tanımlanan fiberlerin gruplandırılması görülmektedir.



Şekil 2.7.Çelik Fiberlerin Sınıflandırılması (TS 10513, 1992) [69].

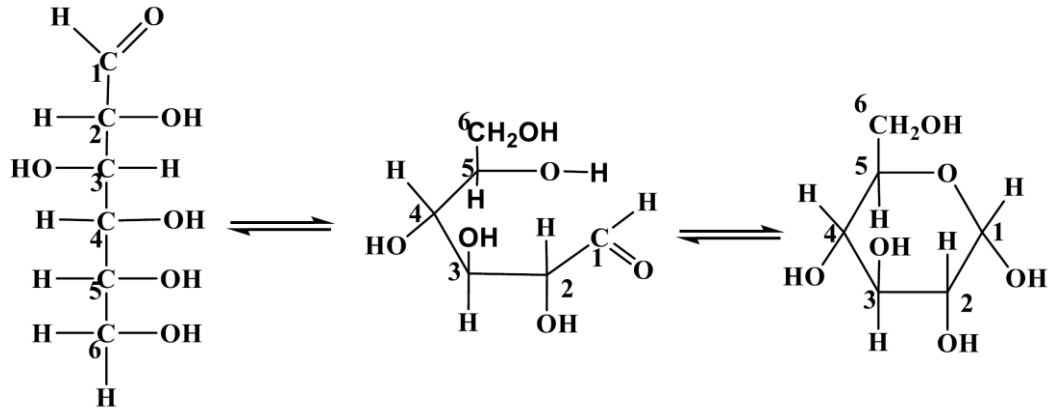
ACI 544.3R-93'e [72] göre, betonun zayıf özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılan çelik fiberlerin tanımı fiber boyunun eşdeğer fiber çapına bölünmesiyle elde edilen uzunluk/çap oranı olarak kabul edilmektedir. Bu oran aynı zamanda fiberin narinliğini göstermektedir. Literatürde çelik fiberli betonlarda genellikle, uzunluğu 12.7 mm ile 63.5 mm arasında olan, 0.45 mm ile 1mm çaplı, narinliği 30 ile 150 arasında olan çelik fiberlerin yaygın olarak kullanıldığı bildirilmiştir. Kullanılan fiberlerin en kesitleri ise genelde dairesel, oval ve dikdörgendir. Çelik fiberlerin betonda ticari anlamda yaygın olarak kullanım oranları ise hacimce %0.25 (20 kg/m³) ile %2 (157 kg/m³) arasındadır. Çelik fiberlerin kullanım oranı betonun amacına uygun olarak bu alt ve üst limitler arasında seçilmektedir. Yine bu komite raporuna göre; farklı çelik fiberlerin yük etkisiyle kopmadan, matristen sıyrılmalarına rağmen çekme dayanımlarının en az 345 N/mm² olması istenmektedir. Uçları kancalı üretilen

elik fiberlerin sıyrılma davranışları düz olanlara oranla daha yüksek olduğundan kancalı fiberler fiberli betonlar için önerilmektedir.

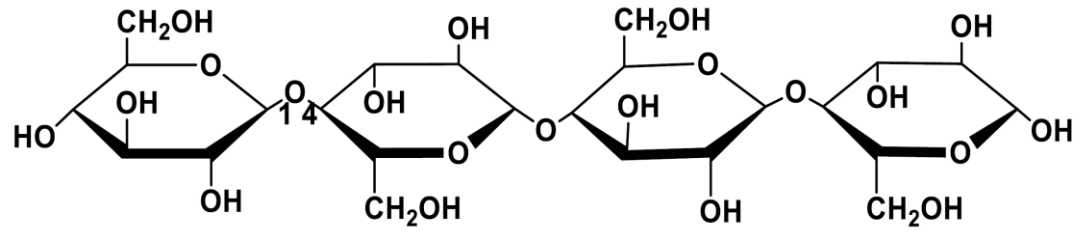
elik fiberlerin beton içerisindeki performansı, bu malzemelerin narinlik oranı ve fiberlerin geometrik yapısı ile yakından ilişkilidir. Ucu bükülmüş, dalgalandırılmış fiberlerin çekme etkisi ile harç fazından ayrılması diğer düz fiberlere kıyasla daha zordur. Fiberlerin belli bir çekme gerilmesi altında matrinden sıyrılması, fiberli betonun performansını olumsuz yönde etkileyen en önemli unsurdur [73].

2.8. Selüloz Yapısı

Selüloz, kimyasal formülü ($C_6H_{10}O_5$)n olan dallanmamış yapıdaki β -D-glikopiranoz üniteleri tarafından glikozid bağı ile bağlanan yapılardır. Selüloz ana bileşen olarak yıllık yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilen ve doğada en bol bulunan biyopolimerdir. Yıllık yenilenebilir kaynaklardan 1011 - 1012 ton selüloz sentezlenmektedir. ^1H -NMR spektroskopisinde β -D glikopiranoz ünitesinde olan en düşük serbest molekülünün enerji konformasyonun $4C_1$ olduğu görülür. Böylece hidroksil gruplar ekvatorial halka düzleminde düzenlenmiş ve hidrojen atomları eksenini üzerinde dikey pozisyonadırlar . Selülozun her bir glikoz nitesi için üç adet hidroksil grubu C-2, C-3, C-6 numaralı atomlarda bulunur, burada oksijen atomları ile hidroksil gruplar arasında glikozid bağı oluşturacak şekilde her ikisi de etkileşir. Bir selüloz molekülü içindeki glikoz birimlerinin sayısı polimerizasyon derecesi (DP) olarak ifade edilmektedir [74]. şekil 2.8.'de glikozun yapısı, ve şekil 2.9.'de selüloz yapı zinciri gösterilmiştir.



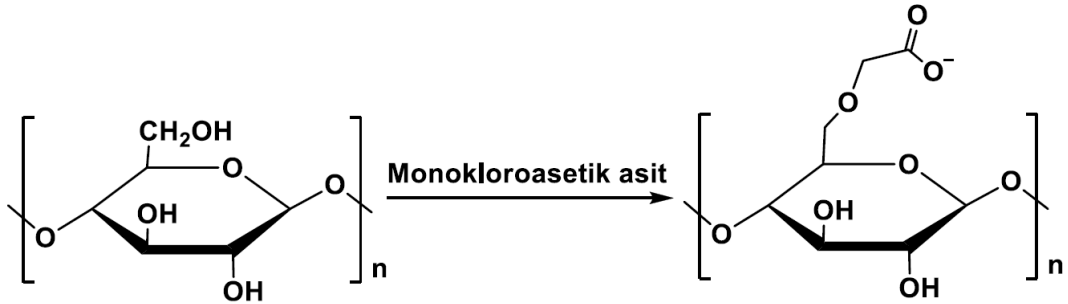
Şekil 2.8. Glikozun yapısı.



Şekil 2.9. Selüloz yapı zinciri [71].

2.9. Karboksi Metil Selüloz

Karboksimetil selüloz (KMS) üretimi alkali selüloz ile monokloroasetik asit veya Na-monokloroasetatın reaksiyonu sonucu üretilmektedir (Şekil 2.10.). KMS tek başına veya nişasta ile birlikte pamuklu ve sentetik ipliklerin haşılانmasında, çimento ve seramik sanayisinde, duvar kâğıdı yapıştırıcısında, lateks yapıştırıcılarda, koyulaştırıcı ve su tutucu olarak kullanılmaktadır [74].



Şekil 2.10. Alkali selüloz ile monokloroasetik asit reaksiyonu sonucu KMS üretimi [71].

KMS'nin fizyolojik olarak inert olması, sudaki çözünürlüğü, belli pH'ya dayanıklılığı, su tutma kapasitesinin yüksek oluşu, diğer kolloitlerle olan geçimliliği ve düşük miktarlarda kullanımının yeterli olması kullanım alanlarında tercihinin başta gelen faktörlerindendir. KMS'nin sodyum ve tuzu geniş alanda ve değişik sanayi alanlarında bağlayıcı, şişirme, jelleşme ajanı olarak, film yapıcı, yapıştırıcı ve stabilizatör olarak kullanılmaktadır. Bu madde saflık derecesine göre ilaç, gıda ve diğer sanayide kullanılır. Tüm sanayi alanlarında viskozitesi ve süstitüsyon derecesi maddenin kullanım yerini belirtmektedir [75].

KMS'nin üretimindeki gelişmelere ve bu günkü üretim proseslerine bakıldığında genel olarak iki farklı yöntemin varlığı görülür. Bu yöntemlerin ilki kuru sistem olarak bilinir ve tercih nedeni yatırım açısından ekonomik olmasıdır, bu methodda kullanılan alet ve makina sayısı az olduğu gibi yardımcı solvanlara gerek yoktur. Kuru yöntem daha çok teknik KMS üretimi için kullanılır. Diğer yöntemde ise daha çok yatırım ve yardımcı madde olarak organik solvanlara ihtiyaç vardır. Bu methodda alkalizasyon, basamağın da daldırma ve püskürtme teknikleri ile yapılmaktadır. Daldırma tekniğinde aşırı sodyum hidroksit çözeltisi gerekir ayrıca bunun ardından presleme söz konusu olduğu için ek makinalar gerektirir. Püskürtme tekniğinde ise bu basamağa gerek yoktur. KMS imalatı için uygulanan ikinci methodda ürün daha kalitelidir. Serbest MKAA kullanılan reaksiyonlarda ikinci bir alkalizasyon gerekir. Bilindiği gibi kostik muamelesinde meydana gelen selüloz sodyum tuzu asit ile reaksiyona girdiği anda karboksil grubu açığa çıkar. Monokloroasetik asit (MKAA) sodyum tuzu kullanıldığı taktirde ikinci alkalizasyona gerek kalmadan tek basamakta ham ürün elde edilir. Serbest MKAA kullanılırsa alkali ile sodyum tuzuna geçilebilir [75].

OH OH.NaOH 0-CH₂C(=O)H 0-CH₂C(=O)Na | Alkali | MKAA | Alkali | - C > - C > - C - > - C - / II I 0-CH₂C(=O)Na Reaksiyon ortamında su ve organik solvanlar penetrasyonu arttırarak reaksiyonu hızlandırabilirler. Organik solvan kullanılan reaksiyonların karıştırılmasında zorluklar ortaya çıkar, bu sorun uygun alet seçimi ile bertaraf edilebilir. Ayrıca bu şekilde elde edilen ürün yüksek viskoziteye sahip olur. Reaksiyon ortamında kullanılan suyun aşırıısı zamlı kütle oluşumuna neden olur.

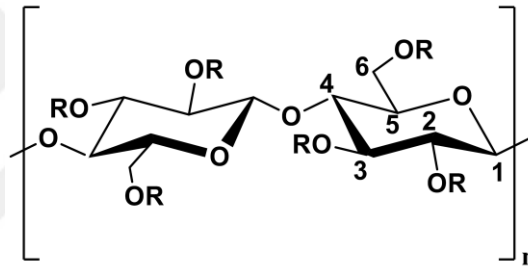
Ortamdaki su selülozu şişirip dağılımını sağlayacak şekilde uygun miktarda ilave edilmelidir. Daha kaliteli ürün eldesi alkali ve asit oranını artırarak mümkündür. Üründen yapılan çözeltinin bulanıklık miktarını düşürmek amacıyla ikinci alkalizasyon önemli bir basamaktır. Viskozite yönünden incelediğimizde ham madde olarak linter kullanılırsa son ürünün ağaç selülozuna nazaran daha viskoz olduğu görülür. Değişik viskozitedeki KMS ürünlerinin farklı sanayide kullanılmasından dolayı; farklı viskozitede ürün imalatı üretici açısından önemli bir faktör olarak bilinmektedir. Değişik selüloz tipleri DP değerlerine göre farklı viskozite gösterirler fakat değişik tiplerde selüloz türlerinin depolanması büyük maliyet oluşturur. Bunun için kaydedilen önemli gelişme katalizör kullanımıdır. Okside edici katalizörler kullanılarak istenilen viskozitede ürün eldesi mümkün olacaktır. Katalizör kullanımının sakıncalı görüldüğü yerler gıda ve farmasötik sanayidir. Her ne kadar kullanılan katalizörler uygun sol van ile izole edilebilirse, bu saflaştırma %100 olmadığı için bu sanayiye yönelik ürün eldesinde katalizör kullanılmamalıdır. Viskozite ile ilgili diğer alternatif, selüloz fiberlerinin öğütülmesidir. Öğütme ile DP düşerek viskozite etkilenecek ayrıca yüzey alanı artarak reaksiyonu kolay yürüyecektir [75].

KMS üretiminde diğer önemli faktör ürünün çözünürlüğüdür. Çözünürlüğü artırmak için ürünlerin düşük ısıda ve hatta don durulma sıcaklığında eldesi yararlıdır. KMS üretiminde sübstütüanların dağılımı ürünün akışkanlığını etkiler, sübstütüanların düzenli olarak dağılımı akışkanlığı arttırdığı gibi düzensiz dağılımı "kısa" akışkanlık olayını ortaya çıkarır. KMS çözeltisinin pH değeri 3.5 altına düştüğünde serbest asit KMS oluşumuna neden olarak çözeltinin yapıştırıcı özelliğini kaybettirecektir. Laboratuvar çalışmalarında KMS'ye alternatif olarak at kestanesi meyve pulpasının alkilasyon reaksiyonu ve MKAA ile muameleleri sonucu meyvada bulunan karbohidrat karışımı alkilenmiştir. Sonuç olarak elde edilen ürün önemli derecede kullanım açısından KMS'de bulunan özellikleri taşımaktadır. Elde edilen maddenin viskozitesi KMS den daha yüksektir, yapıştırıcı özelliğinden dolayı duvar kağıt yapıştırıcısı olarak kullanılabilir. Fizyolojik olarak inert olduğu kanıtlanırsa film yapıcı özelliğinden yararlanılarak geciktirilmiş salınım yapan ilaç dozaj sistemini oluşturabilir. Maddenin viskozite ve jelleşme özellikleri dikkate alınarak bu

bulguların değerlendirilmesine çalışılmaktadır. Tüm polimerlerde olduğu gibi KMS yarı sentetik bir polimer olarak ülkelerin sanayi sektöründe yerini bulmuştur ve madde üretiminin ekonomik oluşu, ayrıca halk ve çevre sağlığı açısından inert olması nedeniyle gelecekte kullanım alanının daha genişleyeceğine inanılmaktadır [75].

2.10. Metil Selüloz

Metil selüloz beyaz veya kirli beyaz renğinde, fiberli ya da granüler toz halindedir. Metil selüloz ilk kez Suida tarafından sentezlenmiştir (Şekil 2.11.) Metil selüloz iyodometan, klorometan ve dimetil sülfat kullanılarak Williamson eterfikasyonu ile sentezlenmektedir [74].



Şekil 2.11. Metil selüloz yapısı [71].

Yüksek viskoziteye sahip metil selüloz, pamuk linterlerinden oda sıcaklığında, % 2 sulu çözelti içinde, 10.000 ile 50.000 mPas arasındaki yüksek polimerleşme derecesine sahip olarak elde edilmektedir. Düşük viskozitede metil selüloz, sülfitle işlenmiş odun hamurlarından üretilmektedir. Metil selüloz üretimi için ligninin son derece saf ve % 86'dan daha fazla selüloz içeriğine sahip olması gerekmektedir. Sülfatla işlenmiş odun hamurlarının kullanımı pek yaygın değildir. Metil selüloz ayrıca yıllık bitki hamurlarından da elde edilebilmektedir [74, 76].

Metil selülozun uygulamalarında, Viskozite kullanılan en önemli özelliktir. Viskozite akışkanlığa karşı gösterilen direnç olarak tanımlanır. Akışkanların gösterdiği bu dirence viskozluk denir ve genellikle η ile simgelenir. Viskozluğun tersi olan niceliğe

akıcılık denir ve genellikle ϕ ile simgelenir. Akıcılık ve viskozluk $\phi = 1/\eta$ eşitliğine göre ters orantılıdır. Viskozitesi yüksek olan sıvının akışkanlığı düşüktür [74].

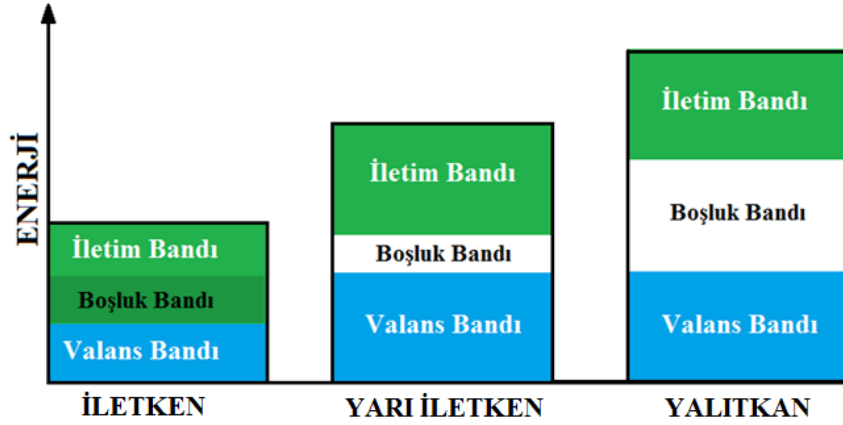
2.11. Elektriksel İletkenlik

Bilindiği gibi her bir atom, çekirdek ve çekirdeği çevreleyen elektron bulutu olarak adlandırılan iki ana bölümden oluşur. Elektronlar çekirdeğin etrafında hareket eder ve çekirdek arasındaki elektrostatik çekimiyle atom çekirdeğinden ayrılmazlar. Eğer atomda, çekirdeğin elektrostatik çekiminden ayrılabilen ve serbestçe hareket edebilen elektronlar veya elektronlar varsa, bunlar serbest elektronlar olarak adlandırılır. Elektronlar negatif yüke sahip olduklarından dolayı hareket ederken elektrik yükü iletimine sebep olurlar. Bu nedenle, serbest elektrona sahip maddeler iletkenler olarak adlandırılırlar. Öte yandan, atomda hiçbir elektron atom çekirdeğinin elektrostatik çekiminden serbest bırakılamazsa, artık elektrik yükünün transferi için herhangi bir faktör söz konusu değil ve bu malzemeye iletken olmayan veya yalıtkan denir [77].

2.12. Bant Enerjileri

Malzemelerde atomların en dış yörüngesindeki valans elektronlarının bulunduğu banda valans bandı denir. İletkenlerde valans bandı ile iletim bandı arasında boşluk bandının olmamasızlığının nedeniyle, çok hafif bir enerji yardımıyla valans bandı ile iletim bandı arasında serbest elektronların transferi gerçekleşir. Bu durum yalıtkanlarda valans bandı ile iletim bandı arasındaki büyük boşluk bandının varlığı nedeniyle gerçekleşmez, yani valans bağından iletim bandına elektron transfer edilemez. Bazı maddelerde valans bandı ile iletim bandı arasında da yalıtkanlarda olan boşluk bandına göre küçük boşluk bandı bulunmaktadır. Bu malzemeler normal durumda yalıtkanlardır, valans bandı enerjisi seviyesinde bir enerji uygulandığında iletkenlik özelliği gösterirler. Dolayısıyla valans bandından iletim bandına doğru elektron hareketi ile elektriksel iletkenlik sağlanmış olur. Bu sebepten bu malzemelere yarıiletken adı verilir. [2, 78, 79]. Elektriksel olarak üç'e ayrılan,

iletken, yarıiletken ve yalıtkanların bant enerjileri şematik olarak Şekil 2.12.'de verilmiştir.



Şekil 2.12. Şematik enerji bant görüntüleri [73].

2.13. Ohm Yasası

İletken bir katı malzemede sabit sıcaklıklarda, uygulanan bir elektrik yükü alanında oluşan akım iki uç arasındaki potansiyel farkıyla doğrudan ve iki uç arasındaki meydana gelen direnç ile ters orantılıdır. Bu bağlantı ohm kanunu veya ohm yasası ile ifade edilmektedir. uygulanan voltaj (V), geçen akım (I) ve direnç (R) arasındaki ilişki Denklem 2.1'de verilmiştir.

$$V = I \cdot R \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'deki direncin birimi ohm'dur. Bir elektriksel iletken malzemede elektrik akımına karşı gösterdiği direnç ile ifade edilmektedir ve malzemenin cinsi, uzunluğu ve elektrik yükü uygulanacak kesit alanına bağlıdır. Yani:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2'de öz direnç adı verilen ρ her malzeme için sabitidir. Öz direnç iletkenlik (σ) ile ters orantılıdır (Denklem 2.3) ve ohm.metre ($\Omega.m$) birimi ile ifade

edilir. Özdirenç malzemedan malzemeye değişir ve her malzeme için özel bir faktör olarak sayılır. Örneğin, iyi bir iletken olarak kabul edilen gümüşün özdirenci, 1.6×10^{-8} ohm'dur ve güçlü bir yalıtkan olan camın elektriksel özdirenci, 10^{10} ~ 10^{14} ohm'dur. Şekil 2.13.'de, bazı malzemelerin oda sıcaklığındaki elektriksel özdirenci verilmiştir.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.3)$$

Direnci R olan bir malzemenin iletkenliği (G) aşağıdaki bağlantıdan hesaplanabilir ve SI birimi $1/\Omega$ ile tanımlanır [80]:

$$G = \frac{1}{R} \quad (2.4)$$

Madde ⇨	20 °C de Özdirenç ($\Omega \cdot m$) ⇨	Sıcaklık katsayısı [K^{-1}] ⇨
Gümüş	1.59×10^{-8}	0.0038
Bakır	1.72×10^{-8}	0.0039
Altın	2.44×10^{-8}	0.0034
Alüminyum	2.82×10^{-8}	0.0039
Kalsiyum	3.3×10^{-8}	
Tungsten	5.60×10^{-8}	0.0045
Nikel	6.99×10^{-8}	
Demir	1.0×10^{-7}	0.005
Kalay	1.09×10^{-7}	0.0045
Platin	1.06×10^{-7}	0.00392
Kurşun	2.2×10^{-7}	0.0039
Manganin	4.82×10^{-7}	0.000002
Konstantan	4.9×10^{-7}	0.00001
Cıva	9.8×10^{-7}	0.0009
Nikorome	1.10×10^{-6}	0.0004
Karbon	3.5×10^{-5}	-0.0005
Germanyum	4.6×10^{-1}	-0.048
Silikon	6.40×10^2	-0.075
Cam	10^{10} to 10^{14}	
Sert lastik	$\approx 10^{13}$	
Kükürt	10^{15}	

Şekil 2.13. Farklı malzemelerin elektriksel ve termal özellikleri [77].

2.14. Elektriksel İletken Beton

Nano teknolojinin gelişmesi ile birlikte, bütün bilim dallarında olduğu gibi inşaat alanında da yeni ve farklı özelliklere sahip malzemelerin üretimi ve uygulanması mümkün olmaktadır. Son yıllarda, farklı yazarlar tarafından, nano karbon partikül, KF ve karbon nanotüp gibi elektrik iletkenliğe sahip malzemelerin, yüksek elektririk dirençli beton üzerindeki etkileri incelenmeye başlanmıştır. Beton yüksek elektriksel dirençli bir malzemedir, betonun bileşiminde karbon, grafit ve çelik fiberleri gibi elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerin kullanılmasıyla betonun elektriksel direnci azaltılabilir yani iletkenliğinin artırılabilmesi mümkün olur [81].

2.15. Betonun Elektriksel İletkenliği

literatürdeki elektriksel iletkenliği ile ilgili çalışmaların çoğu biraz daha durabilite konusuna dayalıdır [82-84]. Çünkü durabilite problemleri genellikle betondaki boşluklar veya çatlaklardan kaynaklanmaktadır ve bu problemlerin incelenmesi için iletkenlik değerinin belirlenmesi önem arz eder [84]. Bu alanda iletkenlik ile ilgili yaygın olarak kullanılan test yöntemlerden biri klor iyon geçirgenliğidir. Bu yöntemde 6 saat boyunca uygulanan 60 volt potansiyel farkı uygulanması sonucunda coulomb cinsinden olan iletilen yük miktarı değerlendirmeye alınır [4] Ancak elde edilen yüksek akım değerleri betonun iç yapısı açısından kötü olduğunu ifade eder.

Betonun iyon geçirgenlik dışındaki elektriksel iletkenliğinin incelenmesi, bazı özelliklerine ilişkin bir parametre olarak kullanılabilmesi için, inşaat yapı malzemeleri dalında ilgi çekici konulardan biridir [71].

Beton, birbirine bağlı bir gözenek ağına sahip heterojen bir kompozit olduğundan, Gözeneklerin doygunluğunun derecesine bağlı olarak (yani, nem içeriği), beton farklı iletken özellikler sergileyecektir. Beton numunesi, ıslak olduğunda düşük elektrik direnci gösterebilir, ancak aynı betonun kuru bir durumda daha yüksek direnci olacaktır. Genel olarak betonun elektriksel iletkenliği doğrudan ölçülemez. Elektriksel iletkenlik, öz direncin tersinden bulunur, öz direnç ise elektriğe maruz

kalan beton numunesi tarafından sunulan dirençten elde edilir [71]. Çoğu araştırmada yarı iletken davranışı gösteren doymuş betonun direnci 100 $\Omega.m$ ve iyi yalıtkan olarak tanınan etüvde kurutulmuş betonun direnci 109 $\Omega.m$ olarak belirlenmiştir [71, 85].

Gözenekli bir ortamdaki elektronik taşıma olgusunda, parçacıkların yönelimini uygulanan elektrik alanına paralel olduğunu kabul ederek paralel olarak üç farklı direnç modellenenir. Birincisi parçacıkların elektrik iletimdeki dirençtir, R_p , ikincisi gözenek suyu boyunca iyonik iletimindeki dirençtir, R_w , ve üçüncü direnç, R_s , parçacık-su ara yüzey arasındaki iyonik taşınmanın özel şeklidir. Karışımdaki toplam direnç değeri aşağıdaki bağlantıdan hesaplanabilir [86]:

$$\frac{1}{R_{mix}} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_s} \quad (2.5)$$

Dolayısıyla bulk elektriksel iletkenlik için aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$G_{mix} = G_p + G_w + G_s \quad (2.6)$$

Denklem 2.6'daki bulk iletkenlik terimlerine [87] göre, Şekil 2.14.'ün geometrisi dikkate alınarak, öz (spesifik) iletkenlik açısından ifade edilebilir[86, 87]:

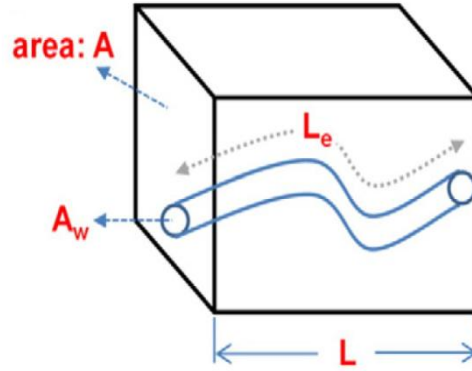
$$G_{mix} = \sigma_{mix} \cdot \frac{A}{L} \quad (2.7)$$

$$G_p = \sigma_p \cdot \frac{A_p}{L_p} \quad (2.8)$$

$$G_w = \sigma_w \cdot \frac{A_w}{L_e} \quad (2.9)$$

$$G_s = \sigma_s \cdot \frac{A_s}{L_e} \cdot S_p \quad (2.10)$$

Burada G_{mix} , G_p , ve G_w sırasıyla karışım, partiküller ve gözenek suyu iletkenliğidir, G_s ise yüzey iletkenliğidir ve S/m birimi ile ifade edilir ve S_p spesifik iç yüzeyidir.



Şekil 2.14. Gözenekli bir ortamda elektronik taşıma olaylarının modeli: (A = toplam alan; Aw = su alanı; L = toplam uzunluk; Le = su için akış yolunun uzunluğu).

Geometrinin analizi aşağıdaki ilişkilere yol açar:

$$\frac{A.L}{V_T} = \frac{A_w.L_e}{V_w} = \frac{A_p.L_p}{V_p} = 1 \quad (2.11)$$

Gözenek suyunun ve parçacıkların alanları aşağıdaki gibi porozite, n, cinsinden ifade edilebilir:

$$\frac{V_w}{V_T} \cdot \frac{A.L}{L_e} = n \cdot \frac{A.L}{L_e} \quad (2.12)$$

$$\frac{V_p}{V_T} \cdot \frac{A.L}{L_p} = (1 - n) \cdot \frac{A.L}{L_p} \quad (2.13)$$

Burada, n: gözeneklilik; VT: toplam hacim; Vw: su hacmi; Vp: parçacıkların hacmi; A: toplam alan; Aw: su alanı; Ap: parçacıkların alanı; L: toplam uzunluk; Le: su için akış yolunun uzunluğu; Lp: parçacıkların uzunluğu; ve eğrilik katsayısı, T, şöyle tanımlanabilir:

$$T = \frac{L_e}{L} \quad (2.14)$$

2.11, 2.13, 2.14 ve 2.15 denklemlerini denklem 2.6'da yerleştirip basitleştirerek karışımın öz iletkenlik değeri denklem 2.15'deki gibi özetlenebilir:

$$\sigma_{mix} = \sigma_p \cdot n(1 - n) \cdot \left(\frac{L}{L_p}\right)^2 + \sigma_w \cdot \frac{n}{T^2} + \sigma_s \cdot S_p \cdot \frac{n}{T^2} \quad (2.15)$$

Gelişmiş EİB üretimi için betonun genel bileşenleri dışında elektrik iletkenliğe sahip malzemelerin kullanılması gerekmektedir. Betonun iletkenliğini iyileştirmek için farklı araştırmacılar tarafından çeşitli yöntemler önerilmiştir.



BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada amacımız geniş kullanım alanına sahip olan EİB üretimi ve incelenmesidir. Bunun için farklı karışım dizaynlarında üretilen elektriksel iletkenliğe sahip betonların laboratuvar ortamında genel mekaniksel, elektriksel ve çarpma özelliklerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Karışımlarda elektriksel direnci çok düşük olarak kullanılan karbon fiberi nano karbon siyahı (NKS) ile birlikte kullanarak maliyetin azaltılması hedeflenmiştir.

EİB karışımları için iri taneli ve ince taneli olmak üzere iki farklı agrega kullanılmıştır. Üretilecek karışımın su miktarı ve çökme değeri, tane dağılımı ve maksimum tane boyutu TS802 standartına uygun bir şekilde seçilmiştir. TS 802 (Beton Karışımı Hesap Esasları) beton karışımında yer alacak malzeme miktarlarının hesaplanmasına dair önerilen Türk Standartıdır. Aşağıda bu çalışmada kullanılan malzemeler ile ilgili bilgiler verilmiştir:

Çimento: CEM I 42,5 R - Portland Çimento

Agrega: Kırma agrega, 0-0.5 ve 5-15 mm

Su: İçilebilir musluk suyu

Karbon fiber: 6 mm ve 12 mm kırılmış karbon fiber

Nano karbon siyahı: Atık lastiklerden piroliz yöntemi ile elde edilen karbon siyahı.

Çelik fiber: 0.75 mm çapında 30 mm uzunluğunda çelik telleri

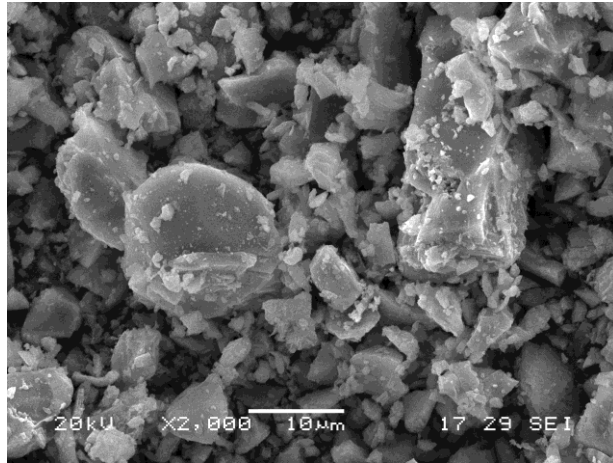
Kimyasal katkıları: Süper akışkanlaştırıcı – Karboksi metil selüloz

3.1.1. Çimento

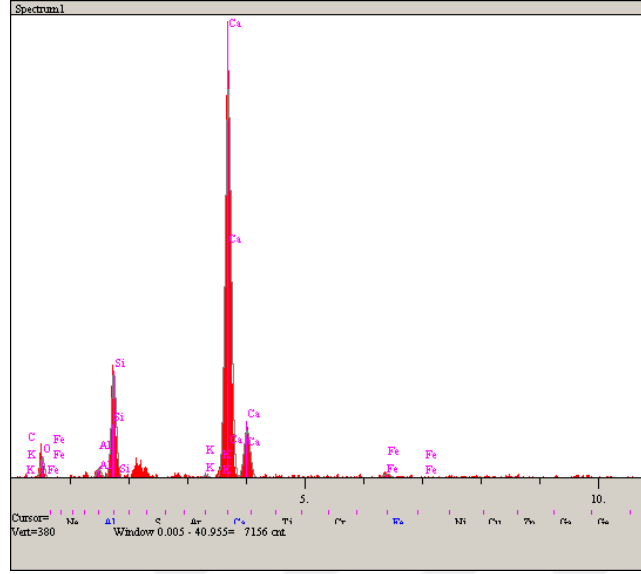
Elektriksel iletken betonlar inşaat sektöründe genellikle hava limanı pistleri ve köprü güverteleri gibi hassas alanlarda kullanıldığından dolayı beton sınıfını önem taşır. Daha önceki çalışmalara göre bu tip betonların sınıfı C35-C40 üzerinde tasarlanmıştır. Bunun için önceki çalışmalarda da belirlendiği gibi 1 m³ beton için 400 kg'ın üzerinde yüksek dayanımlı çimentolar kullanılmalıdır [6, 58, 88]. Bu nedenle tez çalışmasında 42.5 CEM I R tipi yüksek dayanımlı çimento tercih edilmiştir. Kullanılan çimentonun EDS analiz sonucu kimyasal elementleri tablo 3.1'de özetlenmiştir. Ayrıca çimentonun SEM ve EDS analizleri yapılarak sırasıyla Şekil 3.1. ve Şekil 3.2. de verilmiştir.

Tablo 3.1. Çimentonun EDS analiz sonuçları

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
C	Ka	0.06	0.156	0.048	wt.%
O	Ka	14.29	2.390	25.508	wt.%
Al	Ka	7.75	1.760	1.192	wt.%
Si	Ka	89.23	5.972	11.860	wt.%
K	Ka	2.66	1.030	0.321	wt.%
Ca	Ka	407.91	12.768	59.666	wt.%
Fe	Ka	4.65	1.363	1.405	wt.%
				100.000	wt.%
					Total



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan çimentonun SEM görüntüsü.



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan çimentoya ait EDS grafiği.

3.1.2. Agregat

Tez çalışmasında tane boyut aralıkları 0-0.5 ve 5-15 mm olan iki farklı kırma agregat tipi kullanılmıştır. Bütün karışımlarda iki farklı agregat oranı eşit (850 kg/m^3) olarak alınmıştır (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. 0-0.5 mm (sol) ve 5-15 mm (sağ) Agregat tipi.

3.1.3. Su

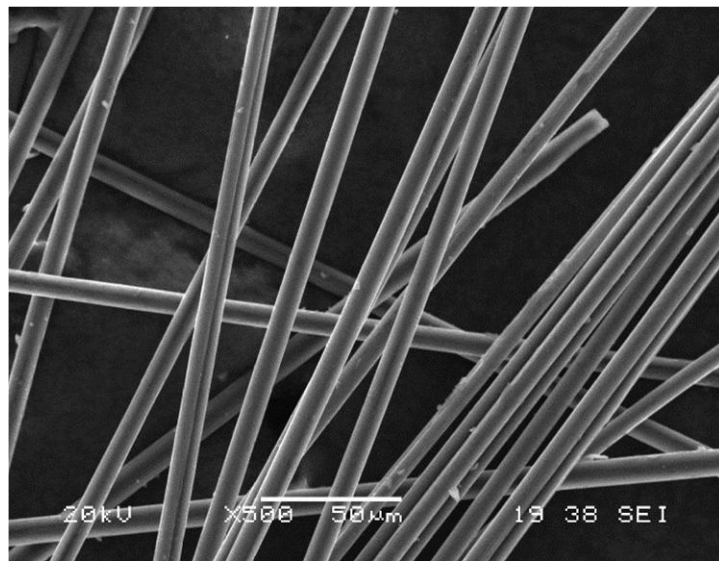
Deneylerde, içilebilir nitelikte olan Sakarya Büyük şehir Belediyesi şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Suyun 2018 yılındaki yapılan rapor sonucu şekil 3.4.'de verilmiştir.

 T.C SAKARYA BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ SASKİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ ÇEVRE KORUMA ve KONTROL DAİRESİ BAŞKANLIĞI 										
Parametre	TÜRK STANDARTLARI TS 286 2005	DÜNYA SAĞLIK TEŞKİLATI WHO 1993	ABD ÇEVRE KORUMA AJANSI EPA 2003	AVRUPA BİRLİĞİ EC 1998	SAĞLIK BAKANLIĞI İ.T.A.S.H.Y 2013	Hızırılıyas	Kurtköy	Muradiye	Yeşilyurt	Karapürçek
SAKARYA SU KALİTESİ RAPORU EKİM 2018										
MİKROBİYOLOJİK ÖZELLİKLER (EMS/100 mL)										
E.Coli	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Enterekok	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Koliform Bakteri	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KİMYASAL ÖZELLİKLER (mg/L)										
Çinko	-	3	5	-	-	0,011	0,012	0,009	0,006	0,007
Arsenik	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,004	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Baryum	-	0,70	2,00	-	-	0,01	0,02	0,01	0,01	0,10
Kadmiyum	0,005	0,003	0,005	0,005	0,005	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Toplam Krom	0,050	0,050	0,100	0,050	0,050	<0,001	0,002	<0,001	<0,001	<0,001
Bakır	2	2	1	2	2	0,005	0,006	0,007	0,001	0,152
Florür	1,5	1,5	2	1,5	1,5	0,06	<0,04	<0,04	<0,04	0,05
Siyanür	0,050	0,070	0,200	0,050	0,050	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020
Kurşun	0,010	0,010	0,015	0,010	0,010	0,000	0,001	<0,0001	0,000	0,000
Civa	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	<0,0001	<0,0001
Nitrat	50	50	45	50	50	<0,2	2,1	2,3	2,2	0,5
Nitrit	0,5	-	-	-	0,5	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Selenyum	0,010	0,010	0,050	0,010	0,010	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Gümüş	-	0,100	0,100	-	-	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Antimon	0,005	0,020	0,006	0,005	0,005	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,001	<0,0002
Berilyum	-	-	0,004	-	-	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Top.Çöz. Madde	-	1000	500	-	-	174	172	173	196	209
DEZENFEKSİYON YAN ÜRÜNLERİ (µg/L)										
T.Trihalometanlar	100	460	80	100	100	-	-	-	-	-
GÖSTERGE ÖZELLİKLERİ (mg/L)										
Alüminyum	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,055	0,122	0,188	0,124	0,063
Demir	0,200	0,300	0,300	0,200	0,200	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Mangan	0,050	0,100	0,050	0,050	0,050	<0,003	<0,003	<0,003	0,003	<0,003
PH	6,5-9,5	6,5-8	6,5 - 8,5	6,5 - 9,5	6,5-9,5	8,31	8,13	8,18	8,22	8,04
T.Organik Karbon	-	-	-	-	-	2,36	0,66	0,88	1,28	0,95
Sülfat	250	250	250	250	250	15,95	18,98	30,83	21,47	32,65
Klorür	250	250	250	250	250	12,02	5,15	4,27	4,45	5,09
Amonyum	0,5	1,5	-	0,5	0,5	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Sodyum	200	200	-	200	-	8,80	2,88	2,80	2,51	5,77
Bulanıklık (NTU)	1	5	1	1	1	0,64	0,87	0,80	0,85	0,82
İletkenlik (µS/cm)	2500	2500	-	-	2500	259	257	258	292	312
Renk (birim)	20	15	15	-	Normal	<10	<10	<10	<10	<10
Koku					Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Tat					Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
İLAVE PARAMETRELER (mg/L)										
Kalsiyum	-	300	-	-	-	36,9	42,4	43,3	52,4	50,7
Sertlik (Fs°)	-	50	-	-	-	12,3	13,8	13,9	16,1	16,0
Magnezyum	-	-	-	-	-	7,5	7,7	7,4	7,3	8,1
Potasyum	-	-	-	-	-	1,70	0,84	0,90	0,83	1,16
Serbest Klor	-	5	4	-	0,2-0,5	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Şekil 3.4. Sakarya büyükşehir belediyesi su kalitesi raporu.

3.1.4. Karbon fiber (KF)

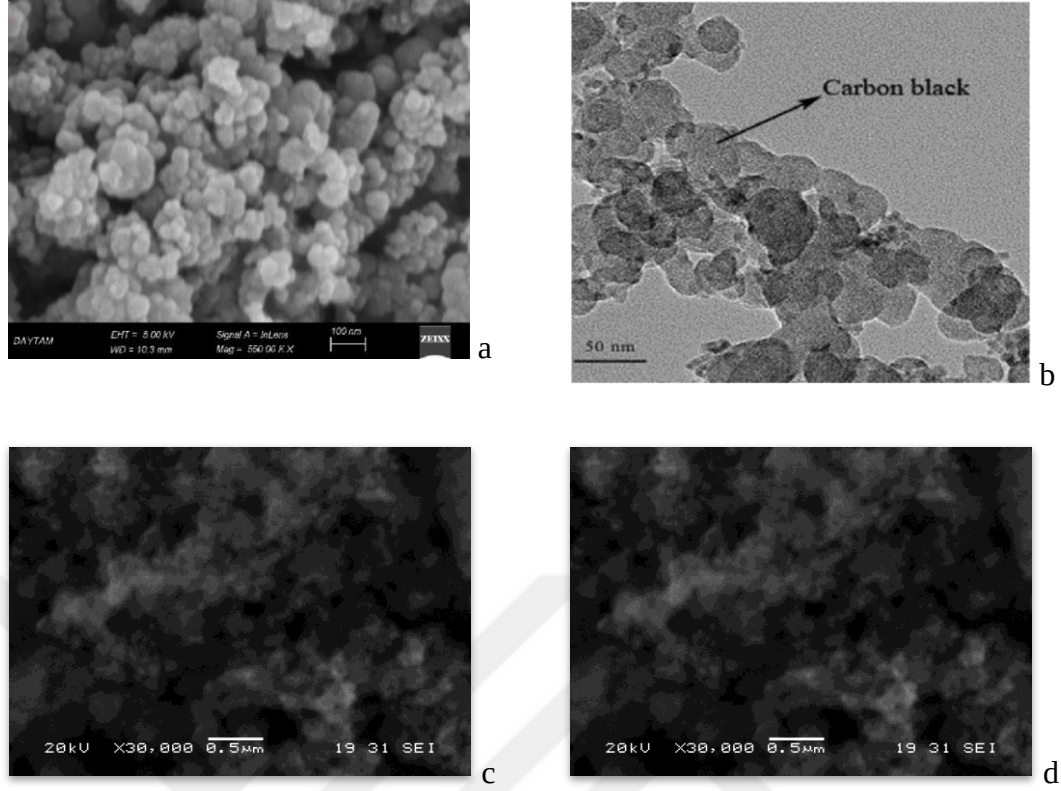
KF, farklı amaçlarla elektriksel iletken çimento bağlayıcı malzemelerde katkı malzemesi olarak kullanılan önemli maddelerdendir [89, 90]. Normal portland çimentolu betonun elektriksel direnci 6.54×10^5 and $11.4 \times 10^5 \Omega\text{-cm}$ gibi yüksek seviyelerdeyken düşük oranlarda KF kullanarak bu değerin sadece 30-40 $\Omega\text{-cm}$ 'ye kadar indirilmesi mümkündür [6]. Ayrıca farklı yazarlar tarafından karbon fiberin, çimentolu malzemeler üzerinde mekaniksel özellikleri açısından da, olumlu etkileri rapor edilmiştir [91, 92]. Bununla birlikte daha önceki araştırmalar, KF takviyeli betonun donma-çözölmeye dayanıklılık, çekme dayanımı, yorulma , büzölme potansiyeli ve genleşme duyarlılığı açısından da daha iyi sonuçlar öne sürölmüştür [48-50]. Bu çalışmada toplam karışım ağırlığına oranla %0.2, %0.5 ve %1 olmak üzere üç farklı oranlarda, en etkin elektriksel katkı malzemesi olarak KF kullanılmıştır. Fiberlerin beton karışımında dağılımını kolaylaştırmak için dağıtıcı katkı malzemesi olarak karboksi metil selöloz kullanılmıştır. Literatür araştırmalarına göre karbon fiberin %0.75 gibi yüksek oranlarda kullanılması durumunda su çimento oranı 0.45 olan bir beton karışımı normal işlenebilirlik özelliği göstermektedir [93]. Kullanılan karbon fiberin filament çapı 7.2 μm ve uzunluğu ise eşit oranlarında ki 6mm ve 12 mm'ye sahiptir. 7.2 μm Çapındaki karbon fiberin görüntüsü Şekil 3.5.'de verilmiştir.



Şekil 3.5. 7.0 μm Çapında 12 mm uzunluğunda KF.

3.1.5. Nano karbon siyahı (NKS)

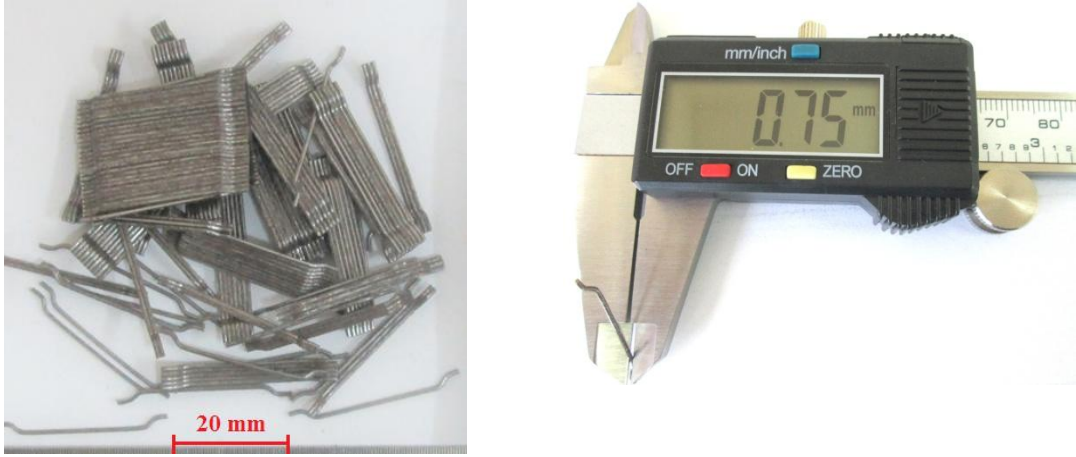
Karbon eski çağlardan beri bilinen birçok unsurlardan biridir ve kütle olarak evrende en çok bulunan dördüncü kimyasal elementtir. NKS'nin (Nano carbon black) ticari olarak üretilmesi yaklaşık yüz yıl olmuştur [77]. KF iyi elektriksel iletkenliğe sahip olduğundan dolayı genellikle elektrik ileten kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılır [94, 95]. Son yıllarda KF çimentolu malzemelerde de farklı amaçlarla kullanılmaktadır [96, 97]. KF partikül boyutu ve bununla birlikte özgül yüzey alanının değişmesi ile, BP2000, Vulcan XC72 ve Regal gibi farklı ticari isimler olarak piyasada bulunmaktadır [77]. Öte yandan karbon siyahı atık lastikleri piroliz yöntemi ile geri dönüştüren sanayilerde büyük hacimlerde bir yan ürün olarak elde edilmekte ve doğayı çok kirletici bir malzeme olduğu için bu malzemenin son yıllarda daha da artması büyük bir problem haline gelmiştir. Piroliz yöntemi ile elde edilen NKS'nin beton üzerindeki dayanım açısından etkileri Noruzi (2016) tarafından araştırılmış, farklı oranlarda bu nano malzemenin kullanılması sonuçlarına göre %4 nano karbon içeren beton numuneler maksimum basınç dayanımı sergilemiştir. Dolayısıyla bu malzemenin elektriksel iletkenlik artırılması amacıyla betonda kullanılması halde dayanım açısından problem olacağı düşünülmemektedir. Bu çalışmada bağlayıcının ağırlığına oranla 0, %3, %6, ve %10 olmak üzere 4 farklı oranlarda piroliz yöntemi ile elde edilmiş nano karbon siyahının değerlendirilmesi planlanmıştır. Piroliz yöntemi ile elde edilen nano karbon siyahının özgül yüzey alanı, üretim esnasında uygulanan sıcaklığın 600 C'ye yükselmesi ile 88 m².g'a kadar artırılabilir [98]. Elde edilen KF ASTM isimlendirilmesine göre N200-N330 arasında yer almaktadır [61].



Şekil 3.6. Piroliz yöntemi ile elde edilmiş karbon siyahının a; SEM (Norouzi., 2016) ve b; TEM görüntüsü [99] ve c-d; mevcut çalışmada kullanılan NCS'nin SEM görüntüleri.

3.1.6. Çelik fiber (ÇF)

Çelik fiber betonun çekme, eğilme, kayma ve tokluk gibi özelliklerinin iyileştirilmesinde en yaygın olarak kullanılan malzemelerdendir. Ayrıca çelik fiber iletken betonların üretilmesinin ilk çağlarında da iletken katkı malzemesi olarak kullanılmıştır [7, 17, 88]. Çelik fiber betondaki alkali ortamda bulunduğu zamanla üzerinde elektriksel direnci artıran pasif bir film tabaka oluşur. Bu durumda çelik fiber içeren elektriksel iletken betonun direnci bir yıl süre sonra 60 kat azalır. Bu nedenle iletken betonlarda çelik fiberin tek başına kullanılması uygun görülmemektedir. Bununla birlikte yeterli iletkenliğin elde edilmesi için yüksek hacimlerde çelik fiber kullanarak karışımın işlenebilirliği azalır ve maliyeti artar. Çelik fiber hacim oranı genellikle %2 ile %1.0 arasında seçilmelidir [7]. Bu çalışmada uzunluğu 30 mm, çapı 0.75 mm ve 1400 MPa çekme dayanımı olan çelik fiber kullanılmıştır (Şekil 3.7.). Çelik fiber içeren karışımların hepsinde çelik fiber oranı % 2 olarak seçilmiştir.



Şekil 3.7. Tez çalışmasında kullanılan çelik fiber.

3.1.7. Kimyasal katkıları

Beton karışımında ince çaplı KF ve ince taneli KF kullanıldığı durumda malzemelerin yüksek özgül yüzey alanına sahip olması nedeniyle gereğinden fazla suya ihtiyaç duyulmuştur, su miktarını azaltmak amacıyla, ticari ismi MasterGlenium SKY4123 olan süper akışkanlaştırıcı kimyasal sıvı malzemesi kullanılmıştır. Fiberlerin beton karışımında dağılımını kolaylaştırmak için çeşitli kimyasallar kullanılabilir; çoğu araştırmacıların buldukları sonuçlara göre metil selüloz, az miktardaki dozajlarda etkili bir Fiberler dağıtıcı malzemedir [6, 49]. İnce toz halindeki metilselüloz karışım suyunda çözülerek betona ilave edilir [6]. Türkiye'de saf metil selülozun bulunması güç olduğu için bol miktarda bulunan karboksi metil selüloz kullanılmıştır (Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. Karboksi metil selüloz

3.2. Karışım Tasarımı

Elektriksel iletken betonlarda kullanılan karbon fiberin optimum miktarı literatürdeki çalışmalara göre 0.75-1% olarak bulunmuştur [6, 99]. Ancak KF ile nano karbon siyahının birlikte kullanılması ile ilişkin daha önceden herhangi bir çalışma olmadığı için bu çalışmadaki elektriksel iletken beton karışımlarında 4 farklı oranlarda KF ve 4 farklı oranlarda KF kullanarak optimum KF ve KF miktarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Bütün karışımlar 0 ve % 2 (47 kg/m^3) çelik fiber içerdiğine göre 2 gruptan oluşmaktadır. Karışım detayları Tablo 3.1.' de özetlenmiştir. NO 1-20 karışımları çelik fiber içermeyen karışım grubunu oluşturmaktadır ve No 21-36 karışımları grupları % 2 çelik fiber içeren karışım grubunu grubunu oluşturmaktadır.

Tablo 3.1'den de görüldüğü gibi bazı karışımlarda fiber dağıtıcı amacıyla karboksi metil selüloz kullanılmıştır. Ancak % 1 KF içeren karışımlarda karboksi metil selüloz kullanıldığı zaman üretim esnasında işlenebilirlik kaybından dolayı bu karışımlarda karboksi metil selüloz kullanımı iptal edilmiştir.

Bütün karışımlarda mıcır : kum : çimento orano sabit olarak 1 : 1 : 0.5 alınmıştır. Karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.45 tutulmuştur ve işlenebilirliğin geliştirilmesi için değişken olan süper akışkanlaştırıcı katkısı kullanılmıştır.

KF takviyeli betonun işlenebilirliği ve kıvamında çökme deneyi uygun bir gösterge değildir, çünkü bir karışım, yeterli işlenebilirliğe ve kıvama sahipken düşük çökme gösterebilir [99]. Ayrıca karışımlarda KF oranı arttıkça çimento macun oranının azalması görülmüştür, ancak aynı karışımlarda nano karbon siyahının artmasıyla bu problemin ortadan kalkması anlaşılmıştır. Bu araştırmada, kontrol beton karışımı 80 mm kenarlı KF eklenmesi ve miktarının artmasıyla bu değer yaklaşık 40 mm'ye düşmüştür. Sonuç olarak Tablo 3.1.' de özetlenen bütün karışımların işlenebilirliği, kalıpların doldurulması ve sıkıştırılması ile ilgili herhangi bir sorun yaşanılmamıştır.

3.3. Karışımların Kalıplanması

Üretilen elektriksel iletken betonun basınç dayanımı ve ED ölçme testleri için daha önceden temizlenip yağlanmış 10 cm çapında 20 cm yüksekliğindeki silindir numunel kalıpları kullanılmıştır. Her bir beton karışımından 3 adet silindir kalıplara yerleştirilerek 45 saniye boyunca sarsma tablası kullanarak sıkıştırılmıştır. Ayrıca bütün karışımlar için eğilme deneyi maksadıyla 10 x 10 x 40 cm lik prizmatik numuneler kullanılmıştır. Her bir eğilme deneyi için 2 adet prizmatik numune kalıplarına beton karışımı doldurarak silindir kalıplardaki şartlarda sıkıştırılmıştır. Çarpma deneyi için üretilmesi amaçlanan beton plakalarına ait özel bir numune kalıbı olmadığı için 10 x 10 x 10 cm küp numune kalıpları kullanarak kalıpların dip kısmına ayarlı bir şekilde 3 cm kalınlığında beton karışımı doldurarak yine diğer kalıpların sıkıştırılması şartları altında sıkıştırılmıştır. Kalıplanan numunelerin örnekleri Şekil 3.9.'da verilmiştir.

3.4. Numunelerin Kür İşlemi

Bütün numuneler 24 saat priz için beklendikten sonra kalıplardan çıkartılmış, içilebilir su şebekesine bağlı olan oda sıcaklığındaki musluk suyu ile doldurulmuş havuzda küre tabi tutulmuştur (Şekil 3.10.). Numuneler 7 Gün boyunca kür için bekletildikten sonra çıkartıldı. Silindir numunelerin başlarından pürüzlü olduğu için 1 cm kesilmiştir (Şekil 3.11.). Bütün numuneler kurutulmaları için laboratuvar ortamında bekletilmiştir (Şekil 3.12.).



Şekil 3.9. Kalıplanmış numune örnekleri; a) basınç ve ED, b) eğilme deneyi ve c) çarpma deney numuneleri.



Şekil 3.10. Numunelerin kür havuzunda yerleştirilmesi.



Şekil 3.11. Silindir numunelerin pürz  taraflarının kesilmesi.



Şekil 3.12. Numunelerin oda sıcaklığında kurutulması.

Tablo 3.2. Karışım detayları.

No	Karışım Kodu	AI (0-5 mm) (kg)	AII (5-15 mm) (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	ÇF (%)	NKS (kg)	KF (kg)	KMS (%)	SA(%)
1	N0K0D0Ç0	850.00	850.00	425.00	191.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50
2	N3K0D0Ç0	844.90	844.90	422.45	195.84	0.00	12.75	0.00	0.00	0.50
3	N6K0D0Ç0	839.80	839.80	419.90	200.43	0.00	25.5	0.00	0.00	0.50
4	N10K0D0Ç0	833.00	833.00	416.50	206.55	0.00	42.50	0.00	0.00	0.75
5	N0K0.2D0.2Ç0	848.53	848.53	424.26	190.92	0.00	0.00	3.60	0.20	0.75
6	N3K0.2D0.2Ç0	843.43	843.43	421.72	195.51	0.00	12.75	3.60	0.20	0.75
7	N6K0.2D0.2Ç0	838.33	838.33	419.17	200.10	0.00	25.5	3.60	0.20	0.75
8	N6K0.2D0Ç0	838.33	838.33	419.17	200.10	0.00	25.5	3.60	0.00	0.75
9	N10K0.2D0.2Ç0	831.56	831.56	415.78	206.23	0.00	42.50	3.60	0.20	1.00
10	N10K0.2D0Ç0	831.56	831.56	415.78	206.23	0.00	42.50	3.60	0.00	1.00
11	N0K0.5D0.2Ç0	846.43	846.43	423.22	190.45	0.00	0.00	9.00	0.20	1.25
12	N3K0.5D0.2Ç0	841.33	841.33	420.67	195.04	0.00	12.75	9.00	0.20	1.25
13	N6K0.5D0.2Ç0	836.23	836.23	418.12	199.63	0.00	25.5	9.00	0.20	1.50
14	N6K0.5D0Ç0	836.23	836.23	418.12	199.63	0.00	25.5	9.00	0.00	1.50
15	N10K0.5D0.2Ç0	829.43	829.43	414.72	205.75	0.00	42.50	9.00	0.20	1.50
16	N10K0.5D0Ç0	829.43	829.43	414.72	205.75	0.00	42.50	9.00	0.20	1.50
17	N0K1D0Ç0	842.78	842.78	421.39	189.63	0.00	0.00	18.00	0.00	1.75
18	N3K1D0Ç0	837.68	837.68	418.84	194.22	0.00	12.75	18.00	0.00	1.75
19	N6K1D0Ç0	832.58	832.58	416.29	198.81	0.00	25.5	18.00	0.00	1.75
20	N10K1D0Ç0	825.78	825.78	412.89	204.93	0.00	42.50	18.00	0.00	2.00

Tablo 3.2. (Devamı)

21	N0K0D0Ç2	831.22	831.22	415.61	187.02	0.60	0.00	0.00	0.00	0.50
22	N3K0D0Ç2	826.12	826.12	413.06	191.61	0.60	12.75	0.00	0.00	0.50
23	N6K0D0Ç2	821.02	821.02	410.51	196.20	0.60	25.5	0.00	0.00	0.50
24	N10K0D0Ç2	814.22	814.22	407.11	202.32	0.60	42.50	0.00	0.00	0.75
25	N0K0.2D0Ç2	829.77	829.77	414.89	186.70	0.60	0.00	3.60	0.00	0.75
26	N3K0.2D0Ç2	824.67	826.12	412.34	191.29	0.60	12.75	3.60	0.00	0.75
27	N6K0.2D0Ç2	819.57	819.57	409.79	195.88	0.60	25.5	3.60	0.00	0.75
28	N10K0.2D0Ç2	812.77	812.77	406.39	202.00	0.60	42.50	3.60	0.00	1.00
29	N0K0.5D0Ç2	827.56	827.56	413.78	186.20	0.60	0.00	9.00	0.00	1.25
30	N3K0.5D0Ç2	822.46	822.46	411.23	190.79	0.60	12.75	9.00	0.00	1.25
31	N6K0.5D0Ç2	817.36	817.36	408.68	195.38	0.60	25.5	9.00	0.00	1.50
32	N10K0.5D0Ç2	810.56	810.56	405.28	201.50	0.60	42.50	9.00	0.00	1.50
33	N0K1D0Ç2	823.99	823.99	412.00	185.40	0.60	0.00	18.00	0.00	1.75
34	N3K1D0Ç2	818.89	818.89	409.44	189.99	0.60	12.75	18.00	0.00	1.75
35	N6K1D0Ç2	813.79	813.79	406.90	194.58	0.60	25.5	18.00	0.00	1.75
36	N10K1D0Ç2	806.99	806.99	403.50	200.70	0.60	42.50	18.00	0.00	2.00

Tablo 3.2.'deki kısaltmalar :

AI: ince Agregat

AII: iri agregat

ÇF: çelik fiber

NKS: nano karbon siyahı

KF: karbon fiber

KMS: karboksil metil selüloz

SA: süper akışkanlaştırıcı

Karışım kodlarında

N: nano karbon siyahı (NKS))

K: karbon fiber (KF)

D: dağıtıcı (KMS)

Ç: çelik fiber (ÇF)

3.5. Test Yöntemleri

3.5.1. Mekaniksel test yöntemleri

Üretilen elektriksel iletken betonun basınç dayanımı 10 cm çapında 20 cm yüksekliğindeki silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Basınç dayanımının belirlenmesi için 250 ton kapasiteli üniversal laboratuvar test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.13.üst). Elde edilen bütün karışımlar için ayrıca 10 x 10 x 40 cm lik prizmatik eğilme numuneleri üretilmiştir. Eğilme deneyleri 5 ton kapasiteli laboratuvar tes cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.13.alt).



Şekil 3.13. Basınç (üst) ve eğilme (alt) test cihazları.

3.5.2. Çarpma test yöntemi

Darbe durumları iki sınıfa ayrılabilir, yüksek ve düşük hızlı darbesi [100]. ACI 544.2R-89 [101] standardında önerilen çarpma testi, çimentolu malzeme levhasının darbe dayanımını ölçmek için en uygun test yöntemidir [102]. Bu yöntemde 152 mm çapında, 63.5 kalınlığında bir silindir numune kullanılır. Numunenin orta noktasında 63.5 mm çapında çelik top sabit tutulur. Çelik top üzerine 457 mm yüksekliğinden 4.54 kg ağırlığında Manuel olarak bir kütle düşürülür Numunenin darbeye karşı adsorbe ettiği enerji miktarının elde edilmesi için düşürme işlemi numune kırılıncaya kadar tekrarlanır ve tekrar sayısına göre enerji miktarı denklem 3.2'den hesaplanır.

$$e=m \times g \times h \quad (3.1)$$

$$EA_u=N_u \times e \quad (3.2)$$

Burada, her bir darbe için e = enerji (Joules), m = düşürülen kütlenin ağırlığı, g (yer çekimi) = 9.81 m / s², h = kütlenin düşme yüksekliği, EA_u = adsorbe edilen nihai enerji, N_u = nihai çarpma sayısı.

Boyut ve kalınlıktaki sınırlamalar, ACI 544.2R-89'un çarpma yönteminin dezavantajlarından biridir. Ayrıca düşürme kütlesi olarak 4.54 kg'lık bir çelik kullanılması, bu yöntemin diğer bir dezavantajıdır, çünkü düşük bir enerji emilimi kapasitesine sahip numuneler ilk düşürme sırasında başarısız olacaktır. Diğer bir deyişle, adsorbe edilen enerji miktarının hesaplanmasında bir belirsizlik olacaktır. J. Yahaghi ve arkadaşları farklı kalınlıklardaki 10 x 10 cm'lik plaka numuneler üzerine farklı ağırlıklardaki çelik top düşürerek numunelerin kırılma enerjilerini incelemişlerdir.

Bu çalışmada çarpma testi için 10 x 10 x 3 cm plaka numuneler üretilmiştir. Deneyin gerçekleşmesi için laboratuvarında tasarlanan çarpma aleti kullanılmıştır (Şekil 3.14.). Deneyde plaka numune, aletin alt kısmında yer alan kare şeklindeki mesnete yerleştirilir. 45 cm yüksekliğinden 1.100 kg'lık bir kütle numunenin ortasına serbest olarak düşürülerek çarpma testi gerçekleştirir. Numunede nihai çatlak oluşuncaya kadar

Çarpma işlemi devam eder. Çarpma sayısını kullanarak denklem 3.2'den nihai enerji değeri elde edilir.



şekil 3.14. Çarpma test aleti.

3.5.3. Elektriksel direnç olme test yöntemleri

Üretilen betonun elektriksel direncini olmek için 10 cm çapında 20 cm yüksekliğinde standart silindir numuneler kullanılmıştır. Elektriksel iletken betonun direnci farklı yöntemler ile ollebilir. Aşağıda bu yöntemler ile ilgili açıklamalar verilmiştir:

1. İki noktalı tek eksenli yöntem (İTY): bu yöntemde numunenin iki yüzey arasında belirli bir potansiyel farkı uygulanır (Şek 3.15). Uygulanan voltaj sonucu numunenin iki yüzey arasındaki gerçekleşen elektriksel akım ölçülür. Ohm kanununu kullanarak numunenin elektriksel direnci hesaplanır (Denklem 3.3).

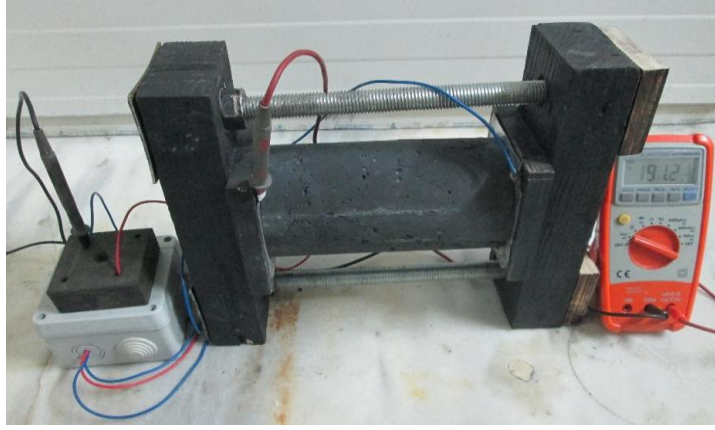
$$V=I.R \quad (3.3)$$

2. Dört proflu veya wenner prop yöntemi (WPY): bu yöntemde direnç ölçümü silindirik bir numunenin yüzeyine temas edilen dört proflu ekipmana voltaj uyguluyarak gerçekleşir. Bu çalışmada kullanılan dört proflu yüzeysel direnç ölçme düzeneği Şek 3.16.'da verilmiştir. İki iç prop arası belirli bir potansiyel farkı uyguluyarak iki dış proflar arası gerçekleşen akım miktarı ölçülür. Ohm kanunundan direnç hesaplanır ve denklem 3.4'ü kullanarak numunenin yüzeysel özdirenci elde edilir.

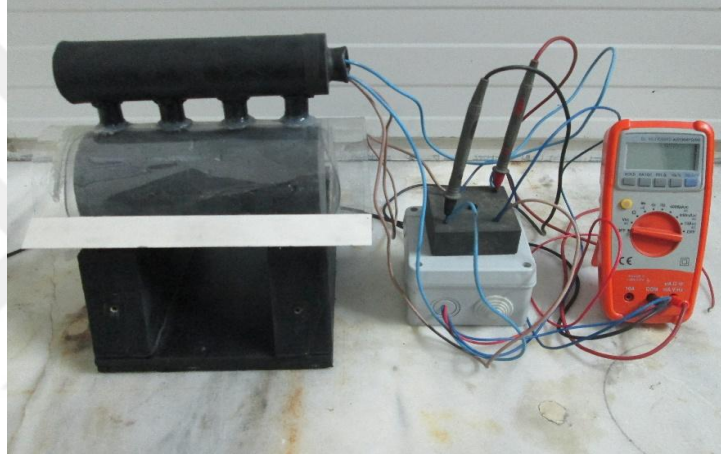
$$\rho=2.\pi.a.R \quad (3.4)$$

Burada ρ elektriksel özdirenç, a proflar arası mesafe ve R numunenin elektriksel direncidir.

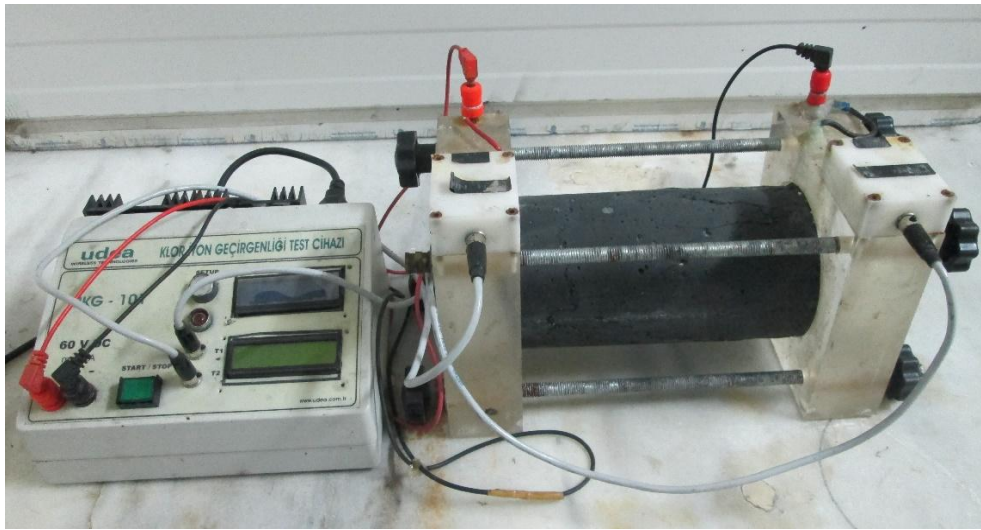
3. C1760-12 WYÖD yöntemi: bu yöntemde numunelerin elektriksel direnci C1760-12 WYÖD C1760-12 standartlarına uygun cihaz (Şekil 3.17.) ile yapılmaktadır. C1760-12'ye göre Deney, her iki yüzeyi de sodyum klorür içeren çözeltiye yerleştirilmiş beton numuneden 1 dk içerisinde geçen akım miktarının ölçülmesi ile gerçekleşmektedir.



Şekil 3.15. İki noktalı tek eksenli iletkenlik ölçme düzeneği.



Şekil 3.16. Wenner prop yöntemi ile iletkenlik ölçme düzeneği.



Şekil 3.17. C1760-12 WYÖD yöntemine göre iletkenlik ölçme ekipmanı.

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde laboratuvar ortamında farklı karışımlardan elde üretilen numunelerin elektriksel, mekaniksel ve çarpma özelliklerinin değerlendirilmesi ele alınmıştır. Elektriksel ölçümleri 7, 14 ve 28 günlük silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elektriksel test yönteminde kullanılan aynı silindir numuneler daha sonra 28 günlük basınç dayanımlarının belirlenmesi için kullanılmıştır. Eğilme deney sonuçları 28 günlük prizmatik numunelerden elde edilmiştir. Çarpma enerjisinin elde edilmesi için 10 X 10 X 3 cm plaka numuneler kullanılmıştır. Bütün sonuçlar Tablo 4.1’de özet olarak verilmiştir.

4.1. Elektriksel Direnç (ED) Deneyleri

7, 14 ve 28 Günlük numunelerin ED sonuçlarına göre bütün numunelerin elektriksel direnci zamanla artmıştır. Bu değişim direncin azalmasıyla önemsiz hale gelmiştir. Diğer bir ifadeyle zamanla iletken numunelerin direnç değerleri birbirine yaklaşmıştır. Bu durum NKS %0.5 ve %1 KF içeren karışım gruplarında daha belirgin şekilde öne çıkmıştır. Sonuçlara göre her üç yöntemde de zamana bağlı olarak ED değerleri artmıştır. Aşağıda bütün karışımların 28 günlük ölçülen elektriksel dirençleri farklı faktörlere göre grafiklerde incelenmiştir, ölçülen 7 günlük ve 14 günlük dirençler ise Şekil B1-33’de 28 günlük sonuçlar ile kıyaslanarak verilmiştir.

Tablo 4.1’de da görüldüğü gibi, Fiber dağıtıcı olarak kullanılan KMS’nin orta oranlarda KF içeren iletken betonlarda olumlu etkileri görülmüştür, ancak yüksek miktarda KF içeren betonlarda işlenebilirliği oldukça azalttığı için kullanılması uygun görülmemiştir.

Tablo 4.1. Elektriksel, mekaniksel ve çarpma deney sonuçları.

No	Numune kodu	İYÖD (Ω .cm)			WYÖD (Ω .cm)	ASTM-D (Ω .cm)	σ_c (Mpa)	σ_f (Mpa)	Eu (J)
		7 Gün	21 Gün	28 Gün					
1	N0K0D0Ç0	7233,08	10660,80	22496,10	95209.00	7291.02	44,15	4,98	22,66
2	N3K0D0Ç0	7022,59	11106,86	22496,10	93483.00	7291.02	44,45	6,33	27,52
3	N6K0D0Ç0	10379,29	13012,45	25524,42	94950.84	8548.09	49,28	6,88	24,28
4	N10K0D0Ç0	10369,29	12823,86	23491,50	95845.32	9534.41	52,26	6,42	24,28
5	N0K0.2D0.2Ç0	18871,13	11344,19	19376,20	93005.76	7511.96	51,85	5,69	29,14
6	N3K0.2D0.2Ç0	10409,96	8269,59	13012,45	46844.81	7082.71	54,20	6,59	59,89
7	N6K0.2D0.2Ç0	4568,91	6216,72	8400,44	32257.69	8263.16	53,71	7,08	58,27
8	N6K0.2D0Ç0	66363,49	25524,42	46570,87	262659.70	7746.71	50,45	9,30	69,60
9	N10K0.2D0.2Ç0	2894,81	3921,03	4915,81	24185.80	7291.02	51,04	7,75	79,31
10	N10K0.2D0Ç0	58128,60	22883,96	1629,55	8995.12	8263.16	55,95	8,82	67,98
11	N0K0.5D0.2Ç0	1325,28	1460,95	1629,55	8799.58	3098.68	48,15	8,17	76,08
12	N3K0.5D0.2Ç0	1108,83	1156,66	1438,77	4316.31	1792.83	45,56	7,71	90,64
13	N6K0.5D0.2Ç0	228,43	212,36	222,45	560.58	708.27	45,49	7,63	72,84
14	N6K0.5D0Ç0	1403,78	1727,09	1907,00	6407.51	6356.28	56,22	8,80	71,22
15	N10K0.5D0.2Ç0	352,90	418,04	385,78	1444.35	1087.26	42,16	8,13	66,36
16	N10K0.5D0Ç0	772,79	833,19	866,65	3265.53	1424.68	53,81	9,17	74,46
17	N0K1D0Ç0	206,08	212,36	175,80	569.59	679.16	48,66	8,55	45,32

Tablo 4.1. (Devamı)

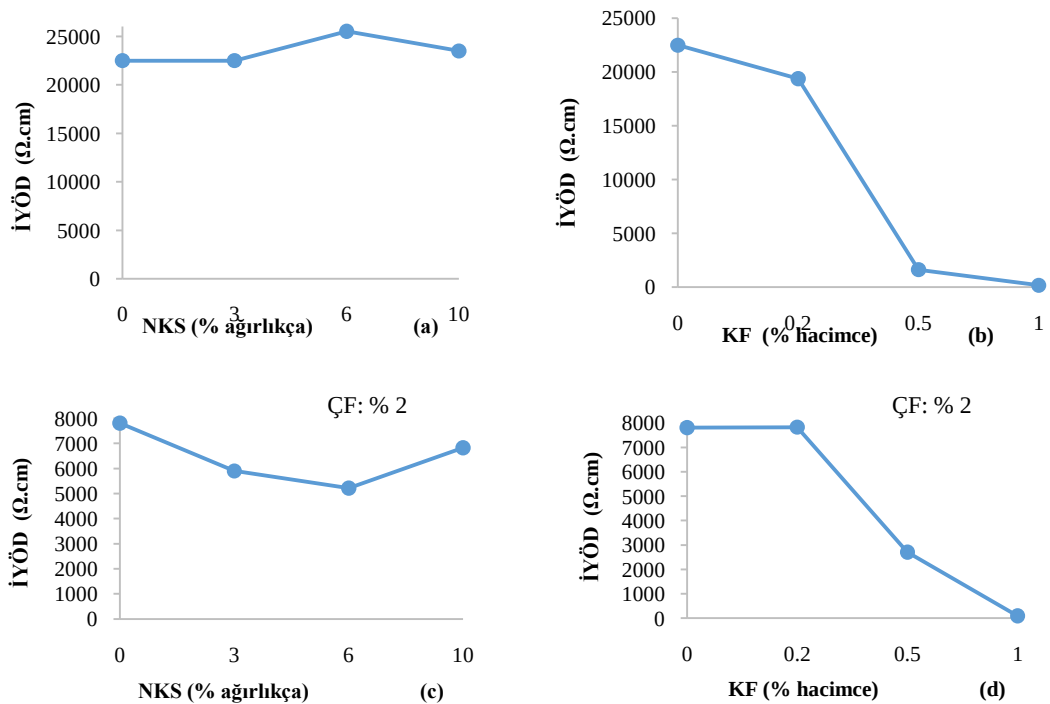
18	N3K1D0Ç0	115,92	111,30	113,03	321.46	467.73	48,86	9,30	46,94
19	N6K1D0Ç0	99,79	95,66	80,08	188.34	450.72	47,82	8,62	55,03
20	N10K1D0Ç0	132,07	130,44	97,24	246.20	487.98	53,37	8,74	53,42
21	N0K0D0Ç2	2904,31	4989,74	7807,47	38412.75	7746.71	48,51	6,53	132,73
22	N3K0D0Ç2	2110,13	4115,57	5898,98	32562.35	5508.77	47,11	9,02	165,10
23	N6K0D0Ç2	2046,68	4090,20	5218,62	28180.55	5902.26	44,52	8,70	160,25
24	N10K0D0Ç2	2602,49	4870,71	6824,01	20472.03	6523.55	50,76	8,71	153,77
25	N0K0.2D0Ç2	3776,02	5287,93	7830,50	19732.86	6523.55	47,79	7,20	152,15
26	N3K0.2D0Ç2	2469,34	4439,03	6290,38	21135.67	6197.37	51,18	6,35	155,39
27	N6K0.2D0Ç2	2615,31	4553,24	6538,27	24322.38	6885.96	50,85	6,70	152,15
28	N10K0.2D0Ç2	1712,61	2901,14	3979,82	16237.66	5902.26	54,54	6,26	142,44
29	N0K0.5D0Ç2	1478,85	2221,37	2708,71	13261.86	6356.28	55,07	7,02	192,62
30	N3K0.5D0Ç2	864,67	1043,45	1098,73	4113.66	2100.80	56,33	8,15	186,14
31	N6K0.5D0Ç2	603,58	659,35	696,18	2673.34	1652.63	56,99	8,12	200,71
32	N10K0.5D0Ç2	764,78	878,11	940,33	3452.88	1983.16	55,15	7,62	203,95
33	N0K1D0Ç2	141,95	131,41	95,83	276.00	420.16	50,40	7,62	205,57
34	N3K1D0Ç2	107,47	97,95	77,39	195.03	406.38	52,84	7,91	218,52
35	N6K1D0Ç2	127,32	110,15	85,22	194.30	413.85	62,01	8,68	234,70
36	N10K1D0Ç2	317,15	316,02	305,47	916.41	739.98	62,23	9,31	249,27

4.1.1. İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen direnç (İYÖD) değerleri

4.1.1.1. NKS ve KF'in İYÖD değerleri üzerinde ayrı ayrı etkileri

Karışımlarda sadece NKS kullanıldığı zaman, elde edilen İYÖD değerlerine göre, elektriksel direncin azalmasında bir değişiklik görünmemiştir ve hatta NKS oranının artmasıyla İYÖD değerlerinin az miktarda olsa da arttığı görülmüştür (Şekil 4.1.a). Bu karışımlara % 2 ÇF ilave edildiği zaman İYÖD değerlerinin 3 kattan daha fazla azaldığı gözlenmiştir (Şekil 4.1.c). NKS ve % 2 ÇF içeren numune sonuçları arasında şekilden de anlaşıldığı gibi minimum (5218,62 $\Omega.cm$) İYÖD değeri % 6 NKS içeren numuneye aittir (Tablo 4.1.).

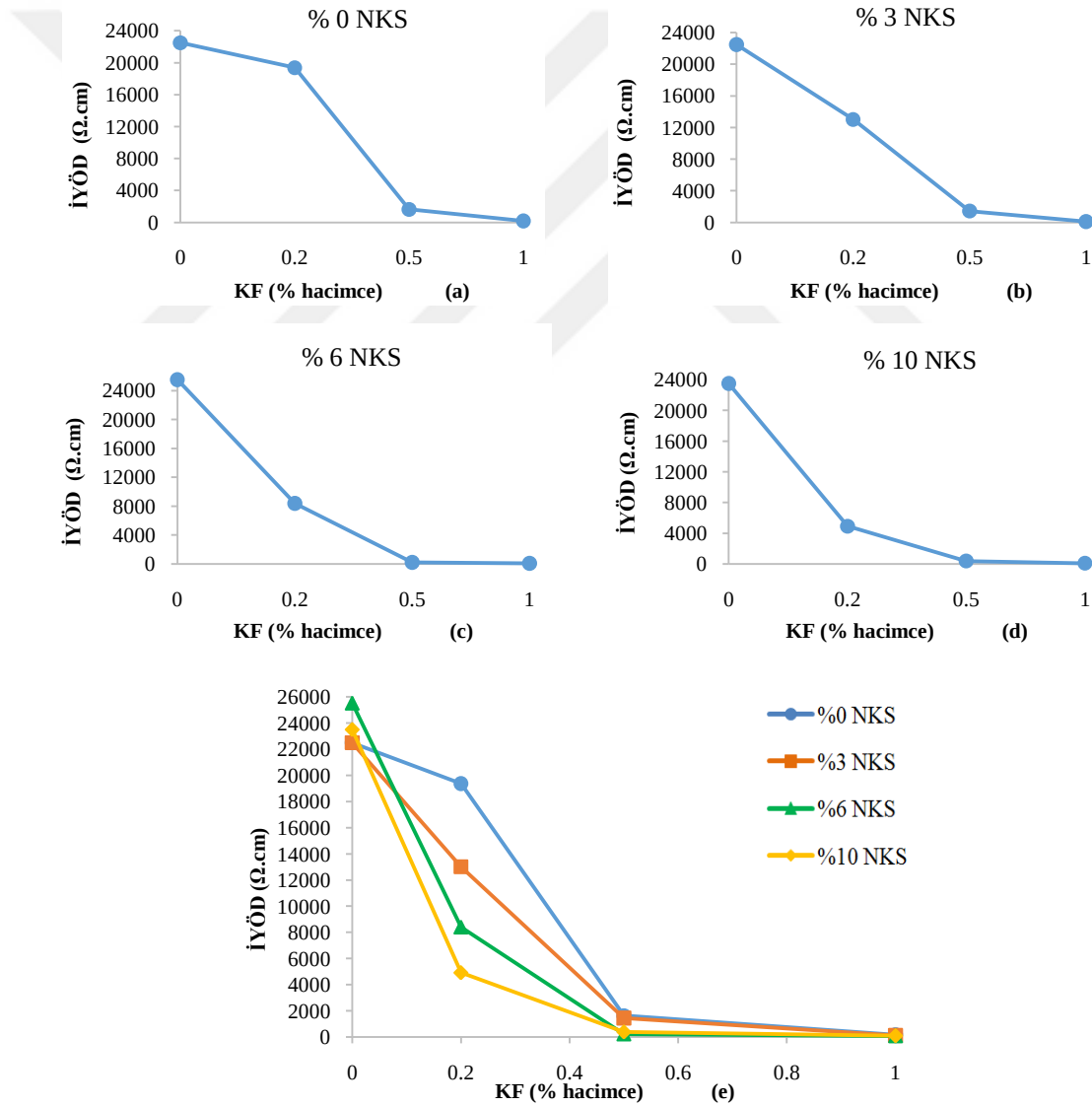
KF'in beton üzerinde vurguladığı etki düşük oranlarda kullanıldığı zaman da ortaya çıkmıştır, ancak Şekil 4.1.b'de de görüldüğü gibi KF içeriği % 0.5'in üzerine çıktığı zaman İYÖD değerlerinin yüksek hızla azalmıştır. KF ile % 2 ÇF ikisi bir arada kullanıldığı zaman İYÖD değerinin sadece KF içeren numune sonuçlarına göre yaklaşık 2 kat azaldığı görülmüştür fakat % 0.5 ve % 1 KF içeren karışımlarda ÇF elektriksel direncin azaltmasına yan etki göstermiştir.



Şekil 4.1. KF ve NKS içeren iletken betonların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerleri.

4.1.1.2. NKS ile KF'in birlikte İYÖD değerleri üzerinde etkileri

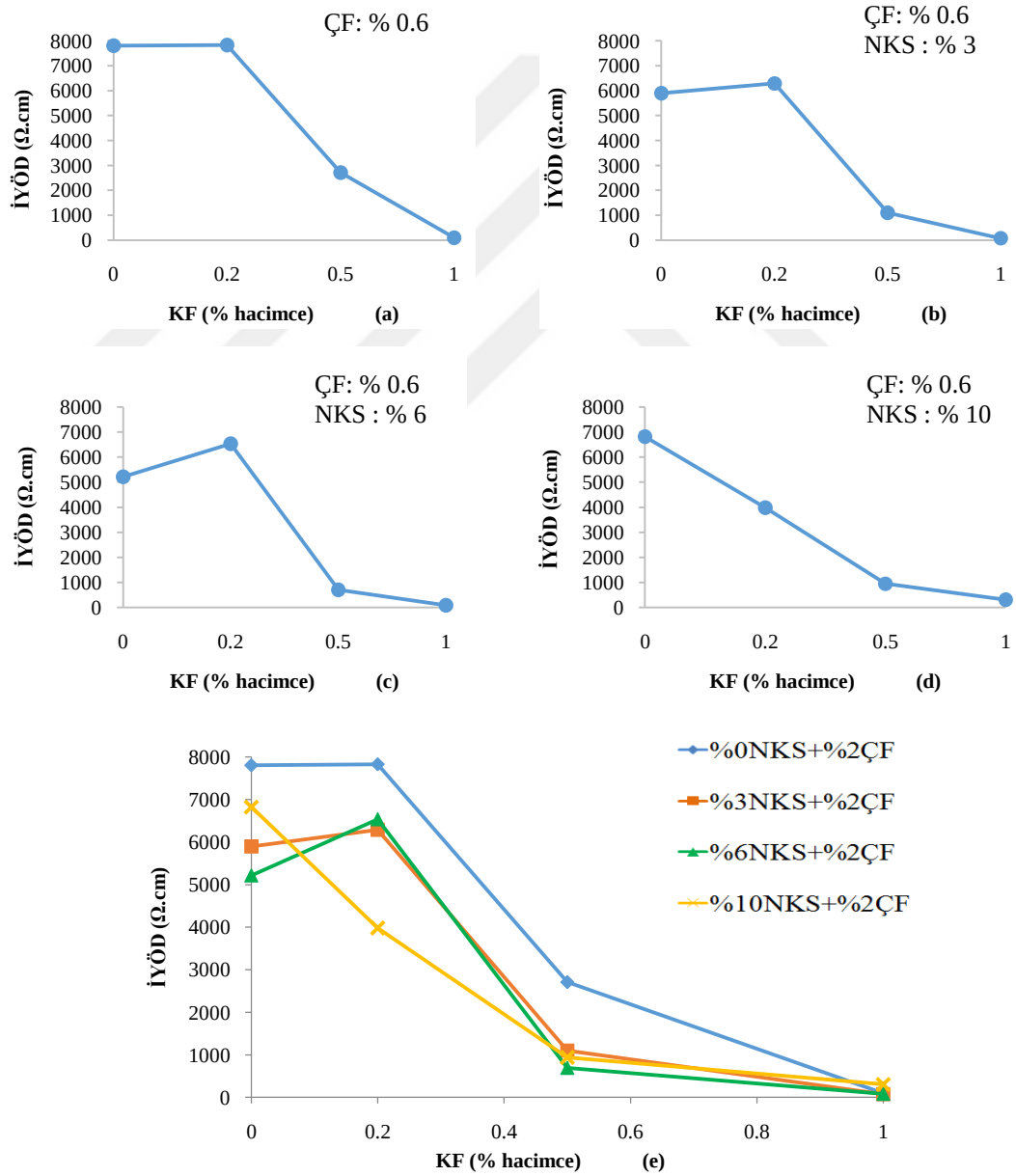
Şekil 4.2.'de farklı oranlarda KF içeren karışımlar üzerinde NKS oranının ED açısından etkisi araştırılmıştır. Grafiklerden anlaşıldığı gibi NKS içeriğinin artmasıyla KF'in direnç azaltma kabiliyeti, 2 ile 7 kat arasında, artmıştır. Bu durum özellikle az miktarlarda KF içeren karışım sonuçlarında yani birinci derecede % 0.2 ve ikinci derecede % 0.5 içeren numunelerde daha belirgin şekilde ortaya çıkmıştır. KF içeriğinin artmasıyla nano karbon siyahının ED üzerinde etkisi azalmıştır. Bütün karışımların İYÖD değerleri Tablo 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.2. İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması.

4.1.1.3. NKS, KF ve ÇF'in üçü birlikte İYÖD değerleri üzerinde etkileri

Üç fazlı elektriksel iletken betonların İYÖD değerleri Şekil 4. 3.'de grafikler halinde verilmiştir. Bütün grafiklerde İYÖD değerleri normal betona kıyasla yaklaşık 3 kat azalmıştır (Tablı 4.1). Şekil 4.3.e'de de görüldüğü gibi NKS her üç oranda da kullanıldığı halde İYÖD değerleri sadece ÇF içeren numuneye kıyasla 2 ile 4 kat arasında azalmıştır. Şekil 4.3.e.'den ayrıca üç fazlı elektriksel betonda NKS oranları arasında önemli fark olmadığı anlaşılmıştır.



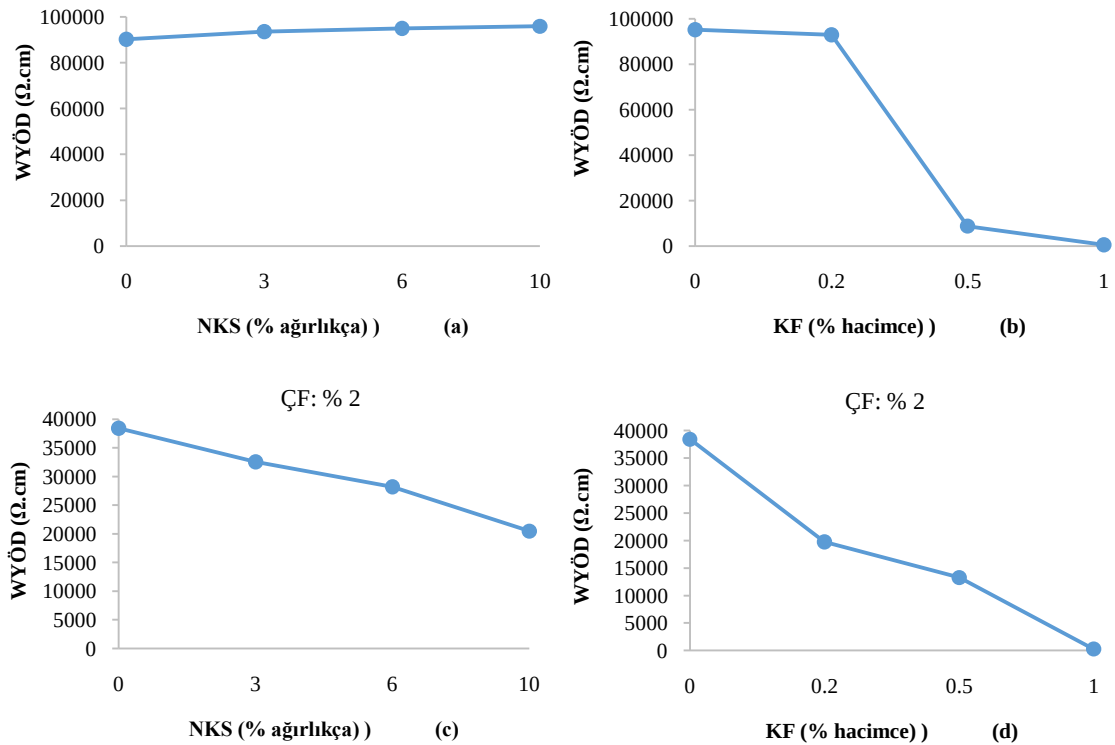
Şekil 4.3. NKS, KF ve ÇF içeren betonların İYÖD değerlerinin kıyaslanması.

4.1.2. Wenner prop Yöntem ile ölçülen Direnç (WYÖD) Değerleri

4.1.2.1. NKS ve KF'in WYÖD değerleri üzerinde ayrı ayrı etkileri

Şekil 4.4.'de NKS, NKS-ÇF, KF ve KF-ÇF içeren iletken betonların WYÖD değerleri verilmiştir. Buradaki sonuçlar Bölüm 4.1.1'deki İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen direnç değerleri (İYÖD) ile kıyaslandığında grafiklerde bir eğim benzerliği görülmektedir. Ancak bu yöntemde bütün değerler İYÖD yöntemi ile elde edilen sonuçların yaklaşık 4 kat üzerinde ölçülmüştür.

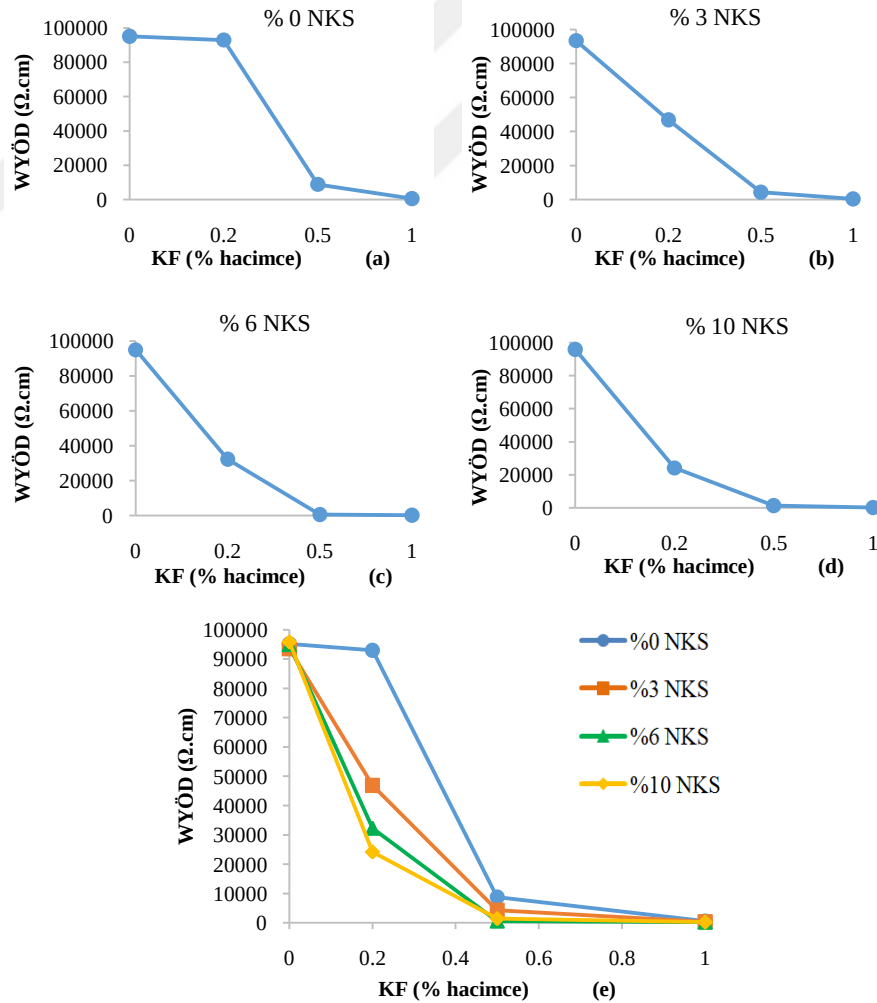
Bu yöntemde de iki noktalı tek eksenli yöntemde olduğu gibi ÇF eklenmesiyle numunelerin elektriksel direnci iki kattan daha fazla azalmıştır. Ayrıca KF içeren numunelerde KF içeriğinin artmasıyla direnç hızlı bir şekilde azalmıştır ve % 1 KF ve % 1 KF-% 2 ÇF içeren iletken betonların WYÖD değerleri sırasıyla 569 ve 276 Ω .cm olarak diğer karışım sonuçlarına göre oldukça düşük çıkmıştır.



Şekil 4.4. KF ve NKS içeren iletken betonların Wenner prop yöntem ile ölçülen WYÖD değerleri.

4.1.2.2. NKS ile KF'in birlikte WYÖD değerleri üzerinde etkileri

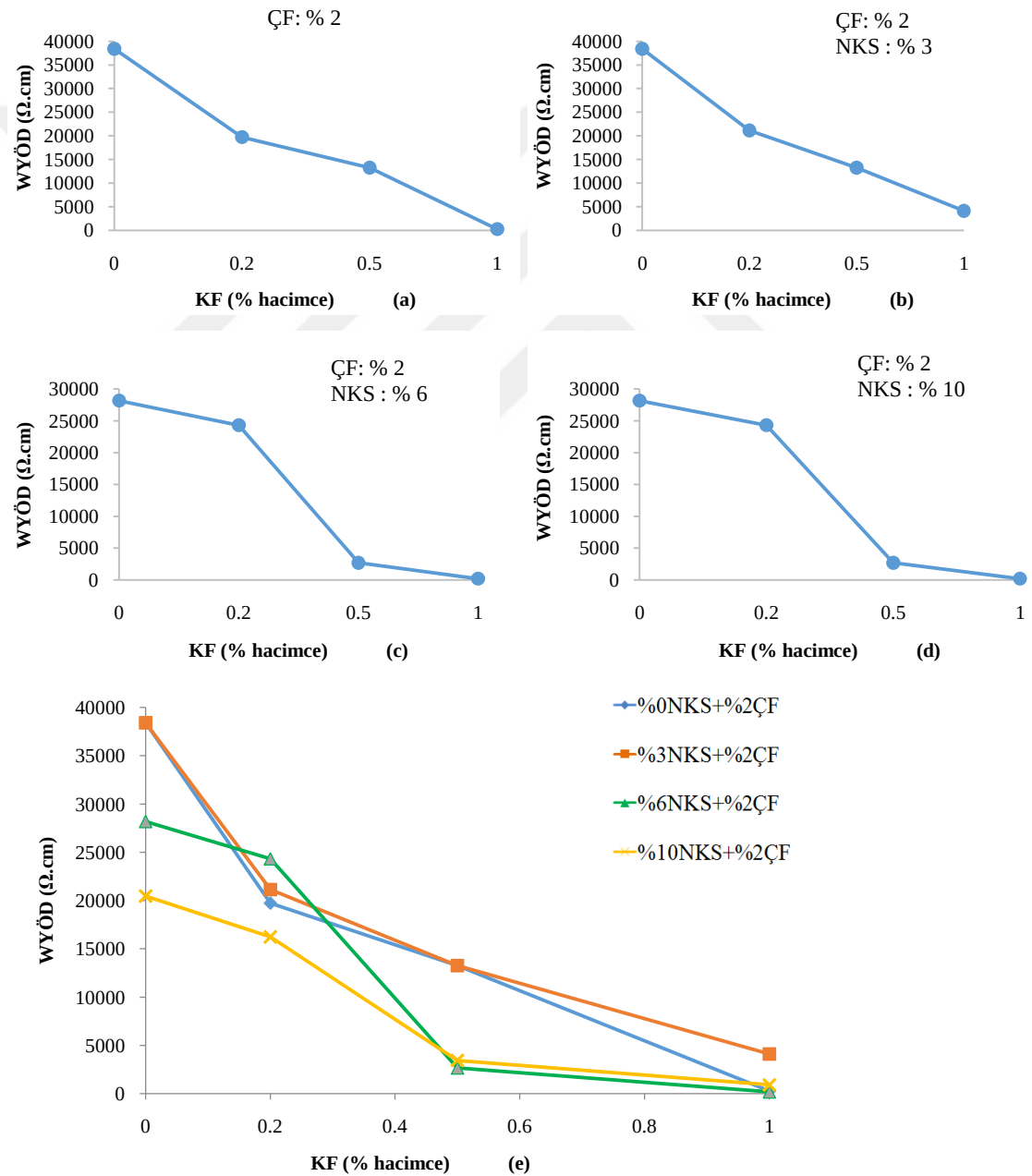
Farklı oranlarda KF içeren elektriksel iletken betonların WYÖD değerleri KF içeriğinin artmasıyla artmıştır (Şekil 4. 5). Ayrıca aynı karışımlardan elde edilen iletken betonlara NKS eklendiğinde KF'in etkisi 3-15 kat artmıştır. % 0.2 KF içeren numunenin WYÖD değeri 95005 Ω .cm ken % 3 NKS eklenerek bu değer 10 kat azalarak 8995 Ω .cm düşmüştür. % 0.5 KF ve % 6 NKS içeren WYÖD değeri sadece % 0.5 KF içeren numuneye kıyasla 15 kat azalarak 560 Ω .cm olarak ölçülmüştür. Maksimum (% 1) KF içeren numunenin WYÖD değeri 3 kat azalarak 569 Ω .cm'den 188 Ω .cm'ye düşmüştür. Bu durum Şekil 4.5.e.'de de görüldüğü gibi, KF oranını % 0.5 olduğu zaman NKS'nın daha etkili olduğu ve KF oranı % 0.5'in üzerine çıktığı zaman NKS'nın etkisinin azaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.5. Wenner prop yöntem ile ölçülen WYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması.

4.1.2.3. NKS, KF ve ÇF'in üçü birlikte WYÖD değerleri üzerinde etkileri

Üç fazlı elektriksel iletken betonların WYÖD değerleri Şekil 4.6.'de grafikler halinde verilmiştir. KF, NKS ve ÇF üçü bir arada kullanıldığı zaman en iyi WYÖD sonuçları % 3 ve 6 NKS, %1 KF ve % 2 ÇF içeren karışımlar ile ilişkili olduğu tesbit edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.6.'dan da anlaşıldığı gibi NKS içeriği yüksek olan karışımların WYÖD değerleri diğerlerine göre 1.5 ~ 5 kat daha düşük çıkmıştır.



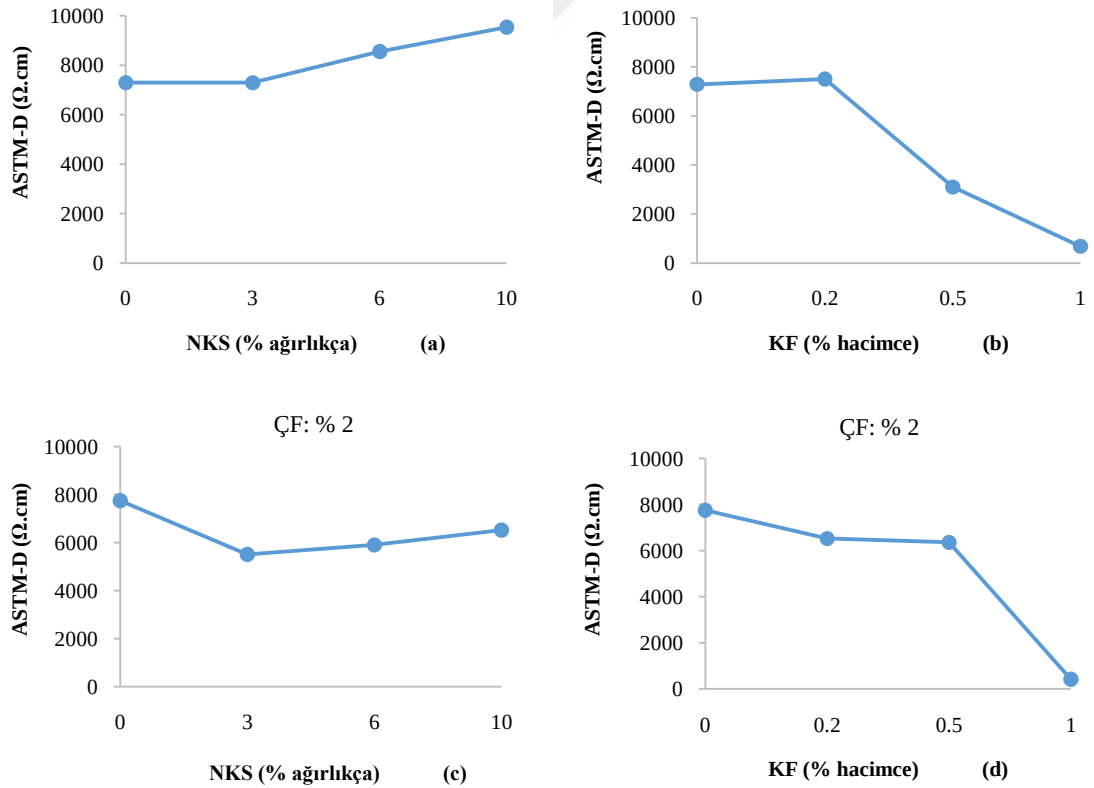
Şekil 4.6. NKS, KF ve ÇF içeren betonların WYÖD değerlerinin kıyaslanması.

4.1.3. C1760-12 ASTM yöntemi ile ölçülen direnç (ASTM-D) değerleri

4.1.3.1. NKS ve KF'in ASTM-D değerleri üzerinde ayrı ayrı etkileri

Bü bölümde farklı karışımlardan elde edilen elektriksel iletken betonların ASTM-D değerleri sunulmuştur. Genellikle ASTM-değerleri daha önceki bölümlerde incelenen İYÖD ve WYÖD değerlerine grafiksel olarak bir benzerlik göstermektedir.

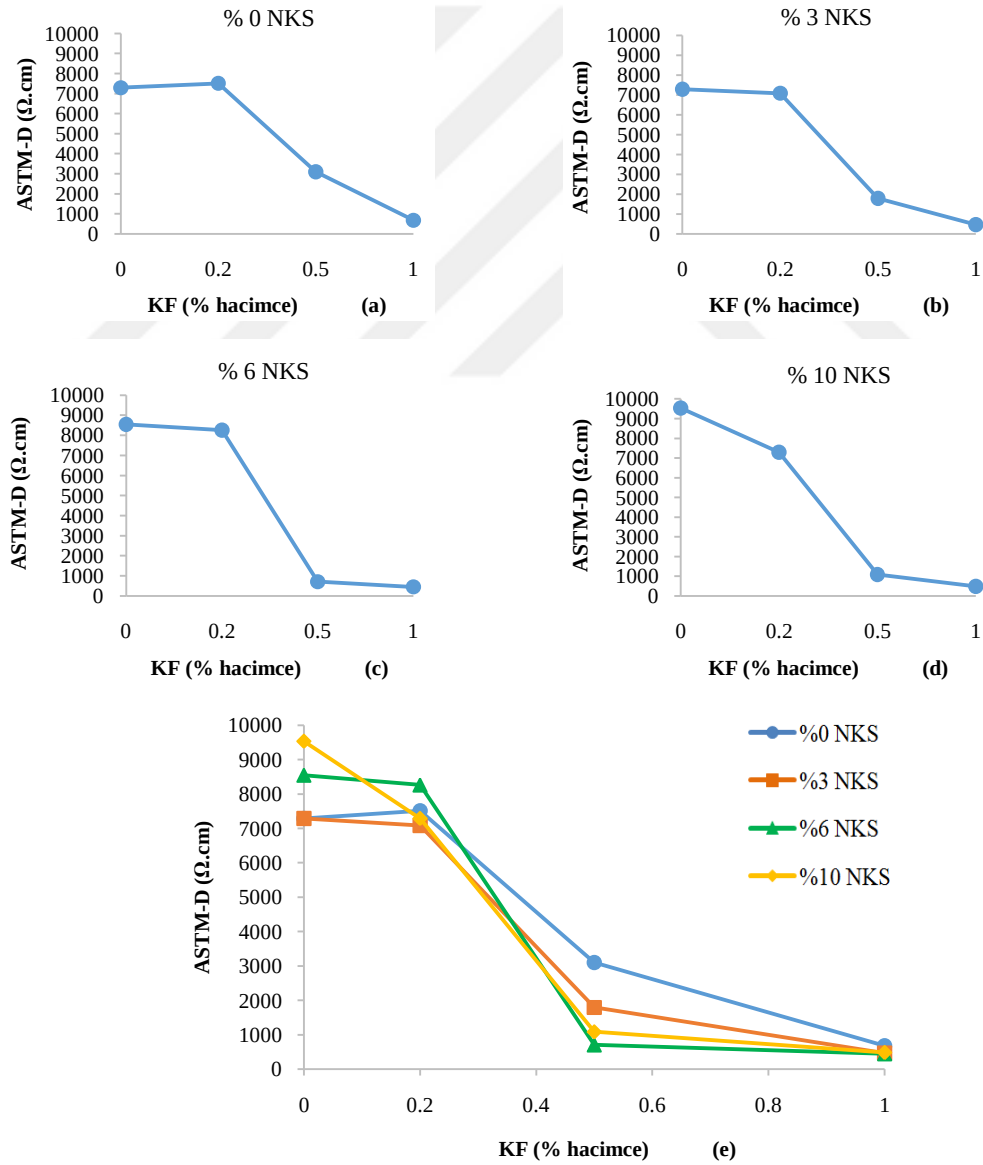
ASTM-D değerlerine göre sadece NKS içeren karışımlarda NKS'nin olumsuz etkisi ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra sadece ÇF içeren karışımlara NKS, özellikle % 3 eklendiği zaman, direncin azalmasında olumlu etkiler sergilemiştir (Şekil 4.7.c). KF-ÇF içeren karışımların ASTM-D değerleri sadece KF içeren karışımların sonuçlarıyla karşılaştırıldığında ÇF'in eklenmesi betonun direncinde kayda değer bir etkisi bulunmamıştır.



Şekil 4.7. KF ve NKS içeren iletken betonların C1760-12 ASTM standartına göre ölçülen ASTM-D değerleri.

4.1.3.2. NKS ile KF'in birlikte ASTM-D değerleri üzerinde etkileri

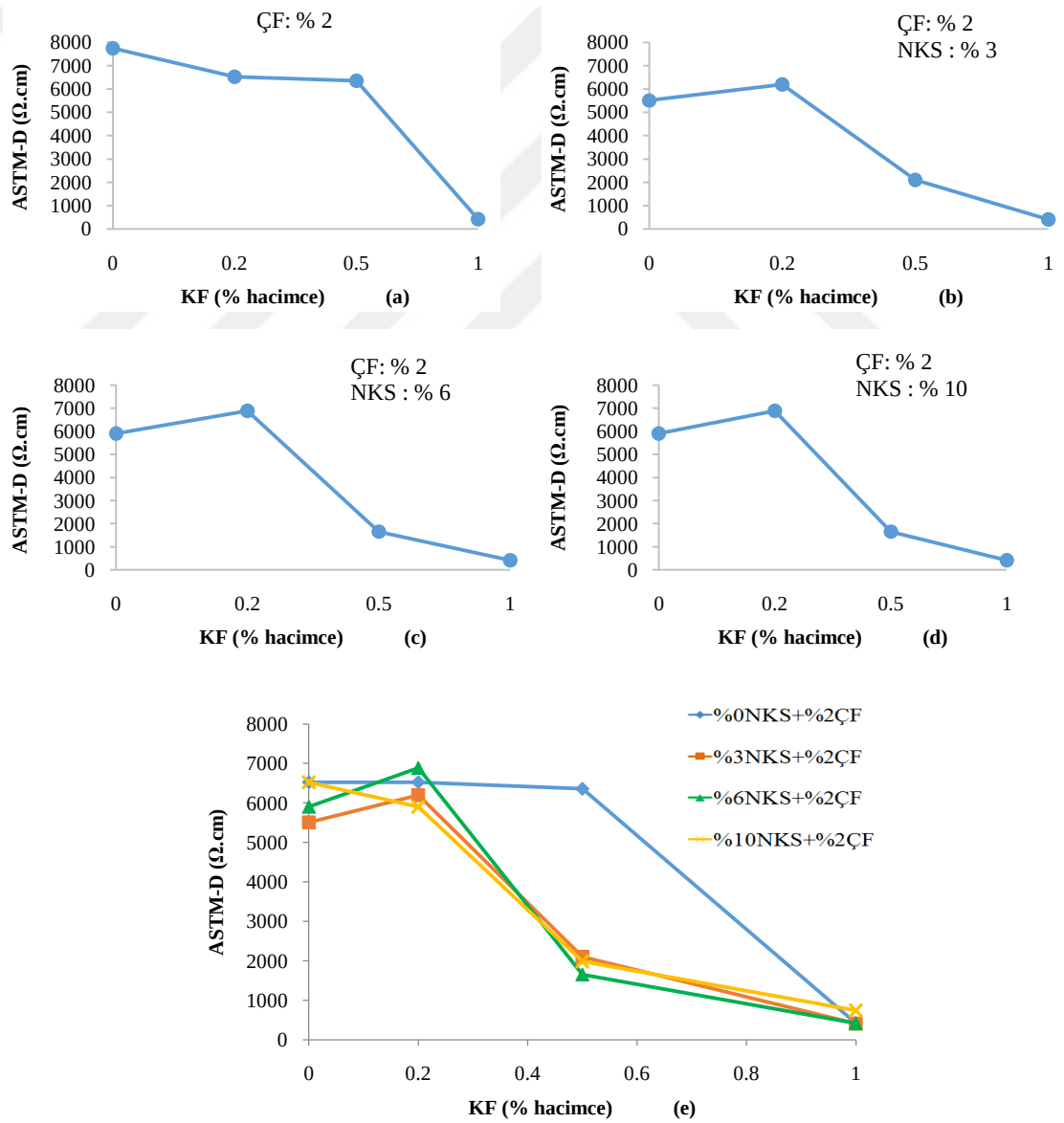
Şekil 4.8.'de farklı oranlarda KF içeren karışımlar üzerinde NKS oranının ED açısından etkisi araştırılmıştır ve ASTM-D değerleri sunulmuştur. Grafiklerde de görüldüğü gibi NKS içeriğinin artmasıyla KF'in direnç azaltma kabiliyeti artmıştır. Bu durum özellikle az miktarlarda KF içeren karışım sonuçlarında yani birinci derecede % 0.2 ve ikinci derecede % 0.5 içeren numunelerde daha belirgin şekilde ortaya çıkmıştır. KF içeriğinin artmasıyla nano karbon siyahının ED üzerinde etkisi azalmıştır.



Şekil 4.8. İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması.

4.1.3.3. NKS, KF ve ÇF'in üçü birlikte ASTM-D değerleri üzerinde etkileri

Şekil 4.9.'da üç fazlı elektriksel iletken betonların ASTM-D değerleri verilmiştir. Bütün grafiklerde ASTM-D değerlerinin normal betona kıyasla azaldığı görülmektedir. Şekil 4.8.e.'de de görüldüğü gibi NKS her üç oranda da kullanıldığı zaman ASTM-D değerleri sadece ÇF içeren numuneye kıyasla azalmıştır. Özellikle % 0.5 NKS içeren üç fazlı iletken betonlarda önemli bir direnç azalması görülmüştür (yaklaşık 4 kat). Ancak KF oranının % 1'e kadar arttığı zaman ASTM-D değeri en düşük olarak kaydedilmiştir fakat NKS etkisiz hale gelmiştir.

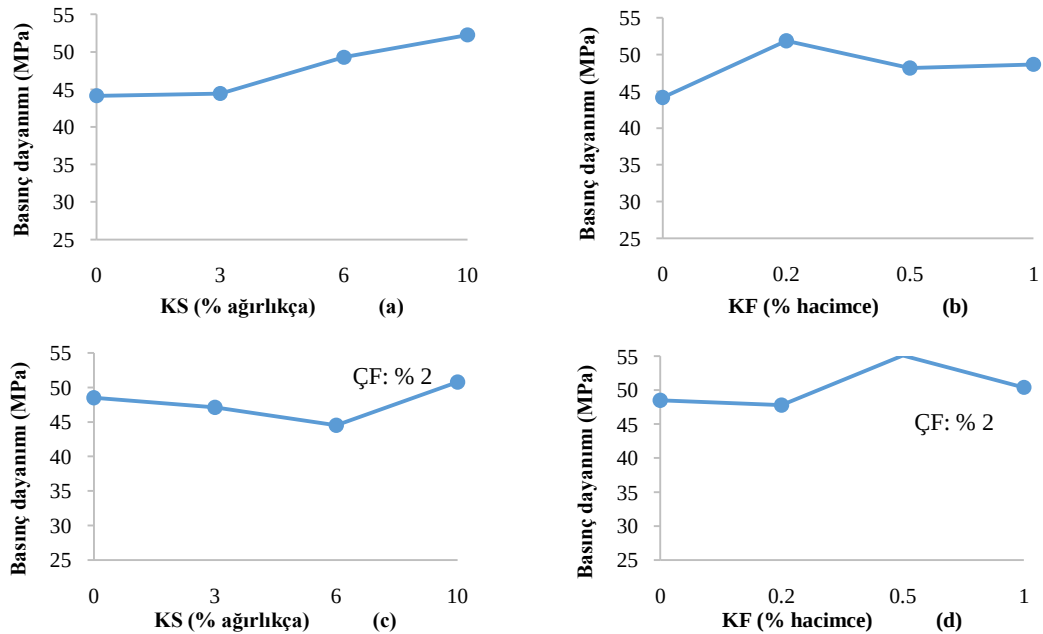


Şekil 4.9. NKS, KF ve ÇF içeren iletken betonların ASTM-D değerlerinin kıyaslanması.

4.2. Basınç Deneyleri

4.2.1. NKS ve KF'in basınç dayanımı üzerinde ayrı ayrı etkileri

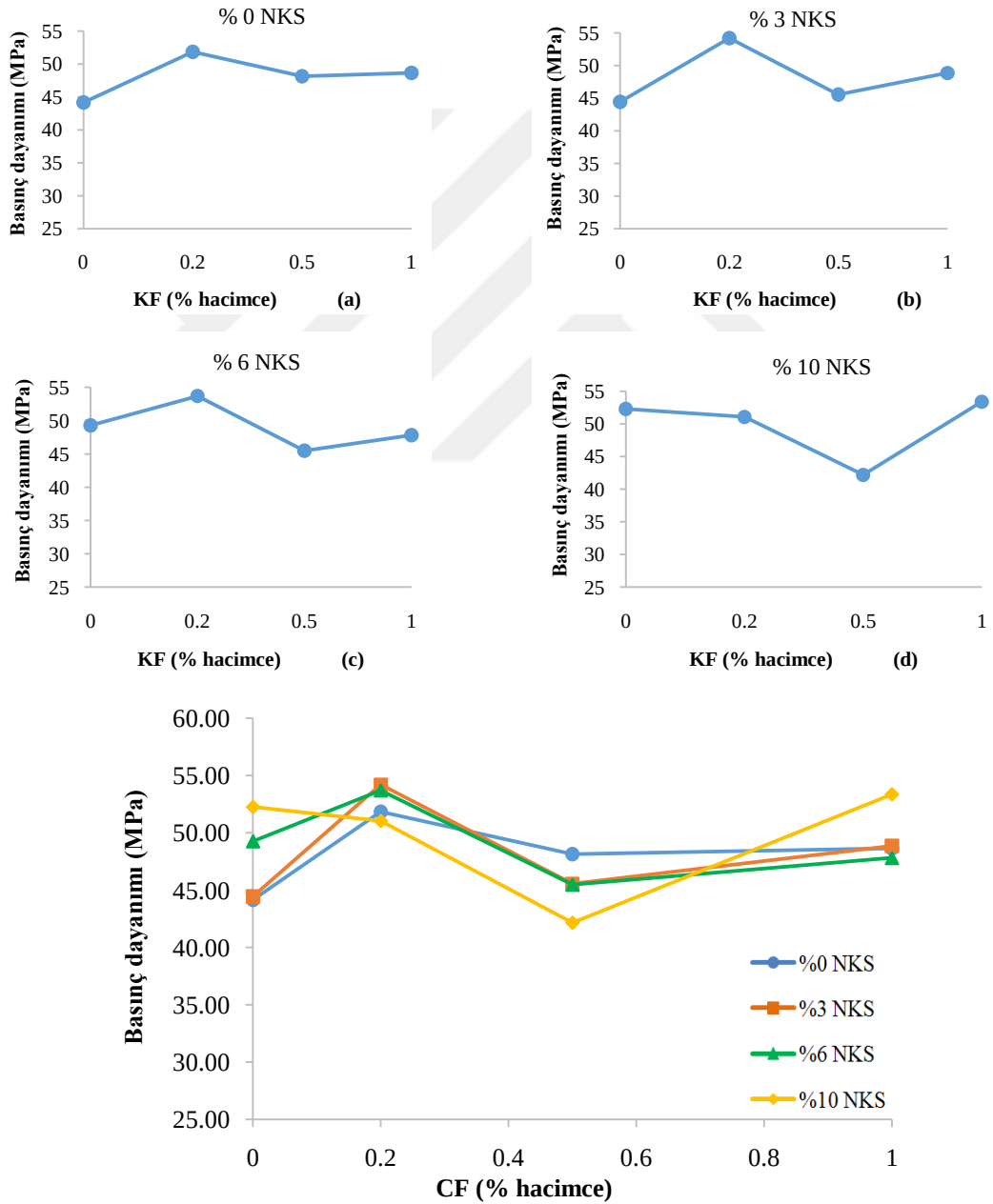
Üretilen elektriksel iletken betonların basınç değerleri farklı faktörlere göre kıyaslanarak Şekil 4.10.12.'de grafiksel olarak özetlenmiştir. Şekil 4.10.'da KF ve NKS içeren iletken betonların ÇF içerip içermediği durumlarda elde edilen basınç değerleri verilmiştir. Deneylerde kontrol beton numunenin basınç dayanımı 44.15 MPa olarak belirlenmiştir. Sadece NKS içeren numunelerin basınç değerleri NKS içeriğinin artmasıyla sürekli artmıştır ve maksimum basınç değeri % 10 NKS kullanıldığı zaman 52.26 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 4.10.a). NKS içeren karışımlarda % 2 ÇF eklendiği zaman % 0-6 NKS içeren karışımların basınç dayanımlarında bir gelişme olmamıştır ancak ÇF oranı % 10'a kadar arttığında basınç dayanımı 50.76'ya çıkmıştır (Şekil 4.10.c). KF'in elektriksel iletken betonlar basınç dayanımında olumlu etkisi kaydedilmiştir ve % 0.2 KF içeren numunenin basınç dayanımı 51.85 MPa olarak diğerlerinden daha fazla elde edilmiştir (Şekil 4.10.b). ÇF'in KF ile birlikte kullanıldığı zaman basınç dayanımına olumsuz etkisi olmamıştır ve maksimum basınç dayanımı % 0.5 KF kullanıldığı zaman 55.07 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.10. KF ve NKS içeren iletken betonların basınç dayanımları.

4.2.2. NKS ile KF'in birlikte basınç dayanımı üzerinde etkileri

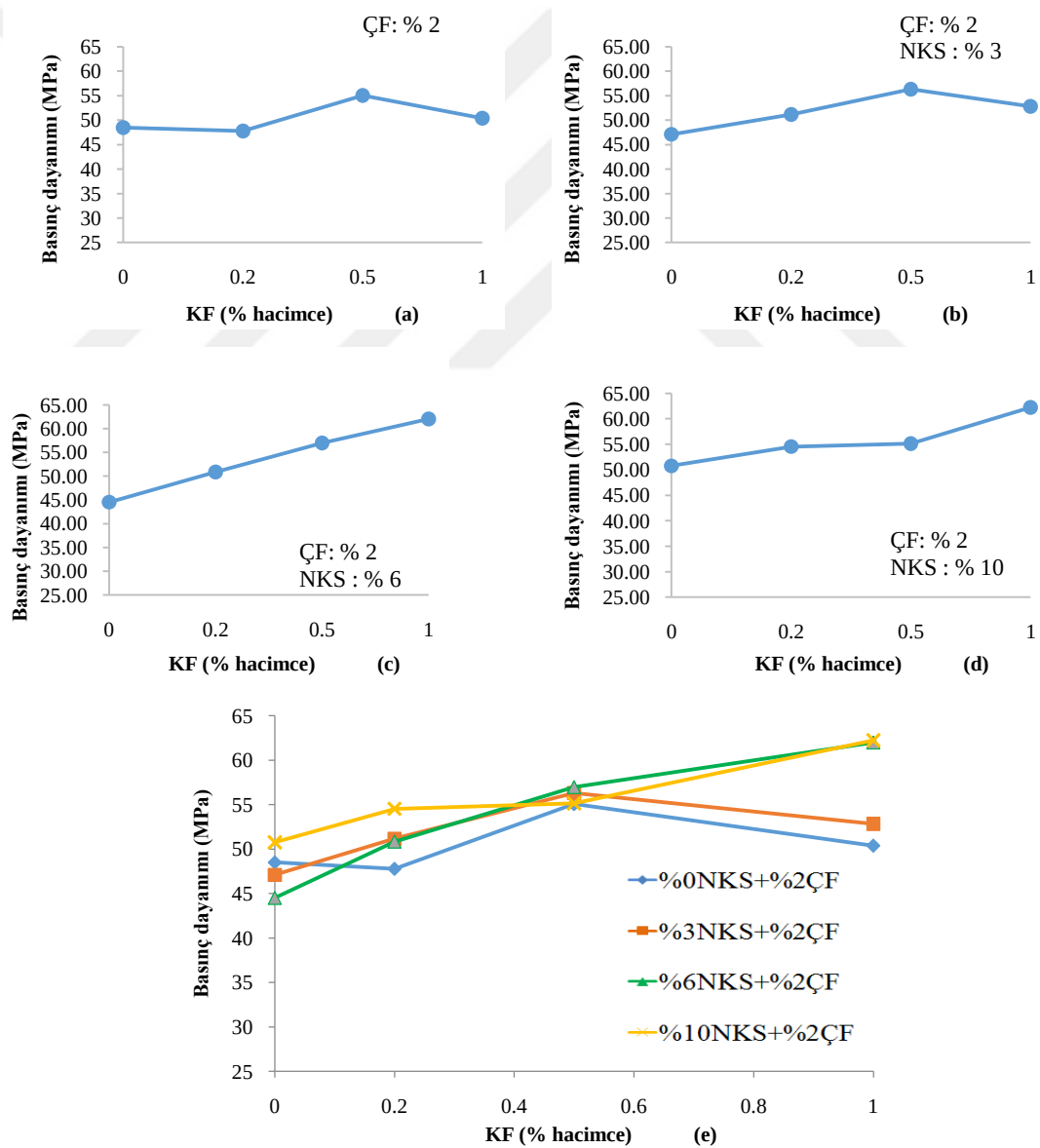
Şekil 4.11.'de de görülmek üzere KF ile NKS birlikte kullanıldığı zaman basınç dayanımında kayda değer bir gelişme görülmemiştir. Bu karışım grubunda minimum basınç dayanımını % 0.5 KF ve % 10 NKS içeren numuneye aittir (42.16 MPa) ve maksimum basınç dayanımının % 1 KF ve % 10 NKS içeren numuneye ait olduğu belirlenmiştir (53.37 MPa).



Şekil 4.11. KF içeren iletken betonlarda NKS oranlarının basınç dayanımına etkisi.

4.2.3. NKS, KF ve ÇF'in üçü birlikte basınç dayanımı üzerinde etkileri

KF, NKS ve ÇF içeren elektriksel iletken betonların basınç dayanımları Şekil 4.12.'de sunulmuştur. NKS içermeyen numunelerde düzenli bir dayanım artışı görülmemiştir (Şekil 4.12.a), ancak NKS içeren KF takviyeli bütün karışımlarda KF miktarının artmasıyla basınç dayanımı da artmıştır (Şekil 4.12.b-d). KF içeren iletken betonlarda NKS oranlarının etkisi Şekil 4.12.e.'den daha net görülebilir. % 2 ÇF içeren ve NKS içeriği % 6 ve % 10 olan karışımlarda özellikle % 1 KF takviyeli betonlarda basınç dayanımı % 41 artarak, 62 MPa olarak, daha yüksek çıkmıştır.



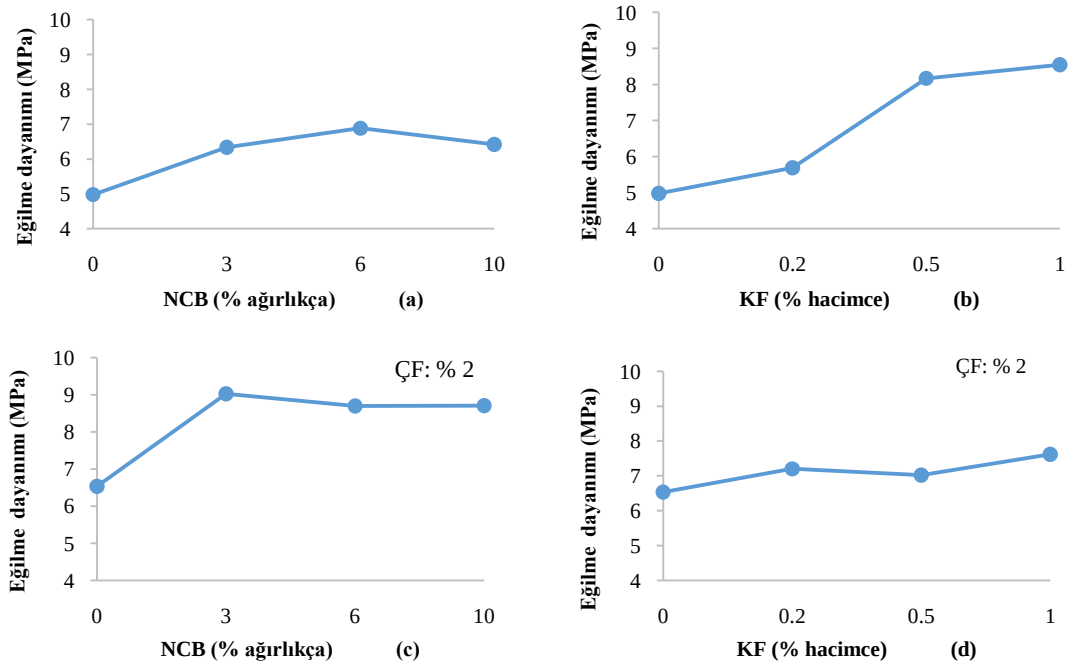
Şekil 4.12. Üç fazlı elektriksel iletken betonlarda basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

4.3. Eğilme Deneyleri

4.3.1. NKS ve KF'in eğilme dayanımı üzerinde ayrı ayrı etkileri

Üretilen bütün elektriksel iletken betonların NKS, KF ve ÇF içeriğine göre eğilme özelliği incelenmiştir ve aşağıda grafikler halinde özetlenmiştir. NKS'nın beton üzerinde eğilme dayanımı açısından olumlu etkisi Şekil 4.13.a.'dan görülebilir. Kontrol beton numunenin eğilme dayanımı 4.98 MPa bulunmuştur, % 6 NKS eklenmesi ile bu değer % 38 artarak 6.88 MPa ölçülmüştür. % 2 ÇF içeren karışımlara farklı oranlarda NKS eklendiği zaman yine eğilme dayanımında önemli artış görülmüştür (Şekil 4.13.c). Bu durumda maksimum eğilme dayanımı % 3 NKS katkılı betonda 9.02 MPa olarak elde edilmiştir.

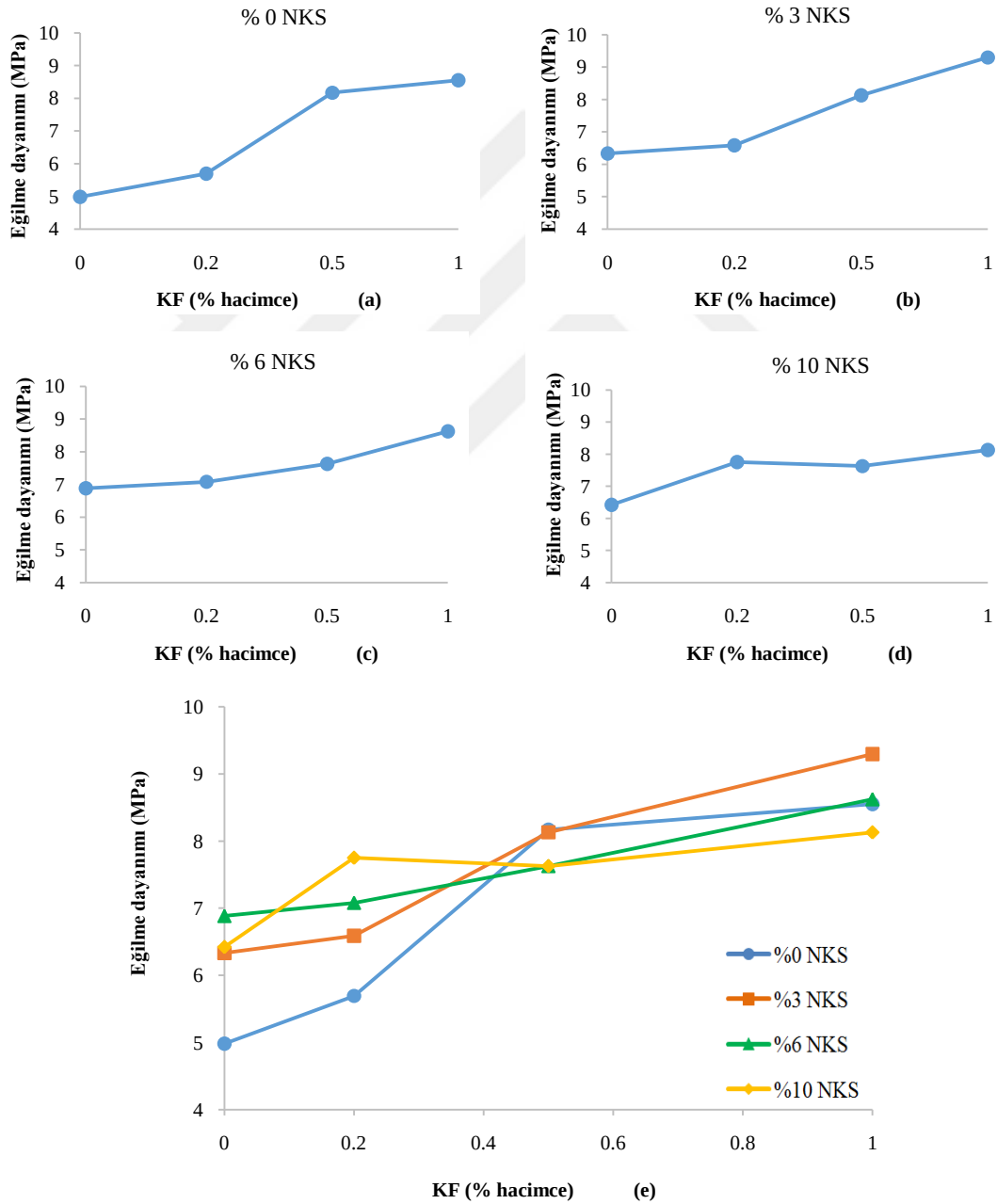
KF'in de önemli derecede olumlu etkisi Şekil 4.13.c.'den belirlenmiştir. Sadece KF içeren betonlarda KF oranının artmasıyla eğilme dayanımı artmıştır ve maksimum dayanım % 1 KF içeren beton için 8.55 MPa olarak elde edilmiştir. % 2 ÇF içeren beton numunesinin eğilme dayanımı 6.53 MPa ken, farklı oranlarda KF eklendiği zaman eğilme dayanımının hafif bir eğimle 7.62'ye kadar artması görülmüştür.



Şekil 4.13. NKS ve KF içeren iletken betonların eğilme dayanımlarının kıyaslanması.

4.3.2. NKS ile KF'in birlikte eğilme dayanımı üzerinde etkileri

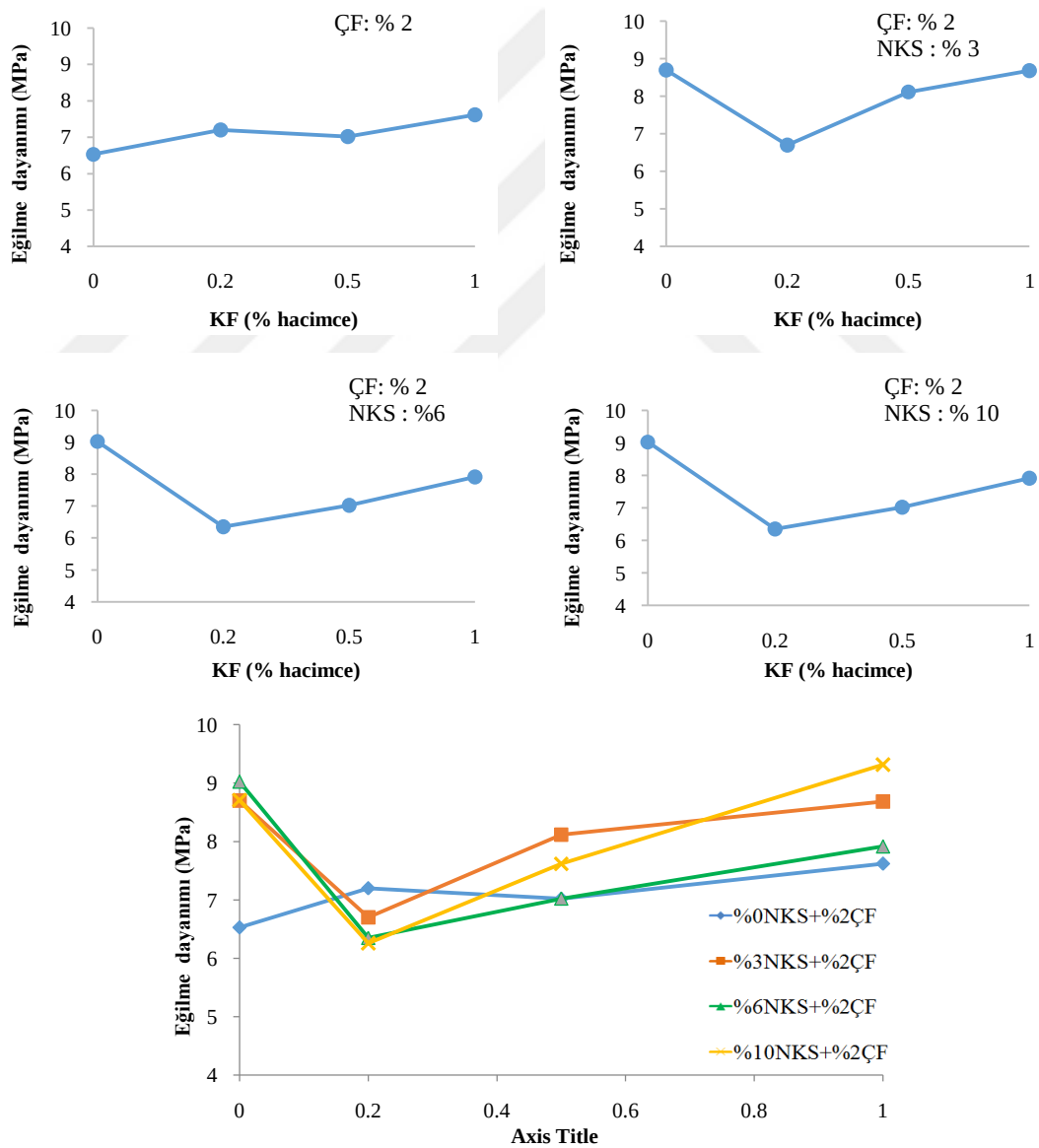
Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların eğilme dayanımları NKS içeriğine göre incelenmiştir ve Şekil 4.14.'te kıyaslanarak verilmiştir. % 3, %6 ve %10 olarak her üçöranda da NKS eklendiğinde eğilme dayanımları, % 20 ~ % 80 artarak, 6 ile 9 MPa arasında elde edilmiştir ki sadece KF içeren karışımlara kıyasla önemli değişiklik bulunmamaktadır (Şekil 4.14.e).



Şekil 4.14. Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların eğilme dayanımlarına NKS'nın etkisi.

4.3.3. NKS, KF ve ÇF'in üçü birlikte eğilme dayanımı üzerinde etkileri

Şekil 4.15.'de farklı karışımlardaki iletken betonlarda NKS, KF ve ÇF'in eğilme dayanımına etkisi incelenmiştir. % 2 ÇF katkılı farklı oranlarda KF içeren numunelerin eğilme dayanımı 6 ile 8 MPa arasında artarak değişmiştir (Şekil 4.15.a). % 2 ÇF ve farklı oranlarda KF içeren karışımlara her üç oranda (% 3, 6 ve 10) NKS ilave edildiğinde bütün karışımlarda % 0.2 KF içeren numunelerin eğilme dayanımı % 20 ~ %50 azalarak 6 ~ 7 MPa olarak ölçülmüştür ve KF oranının artmasıyla bu değer 8-9 MPa'a kadar yükselmiştir.



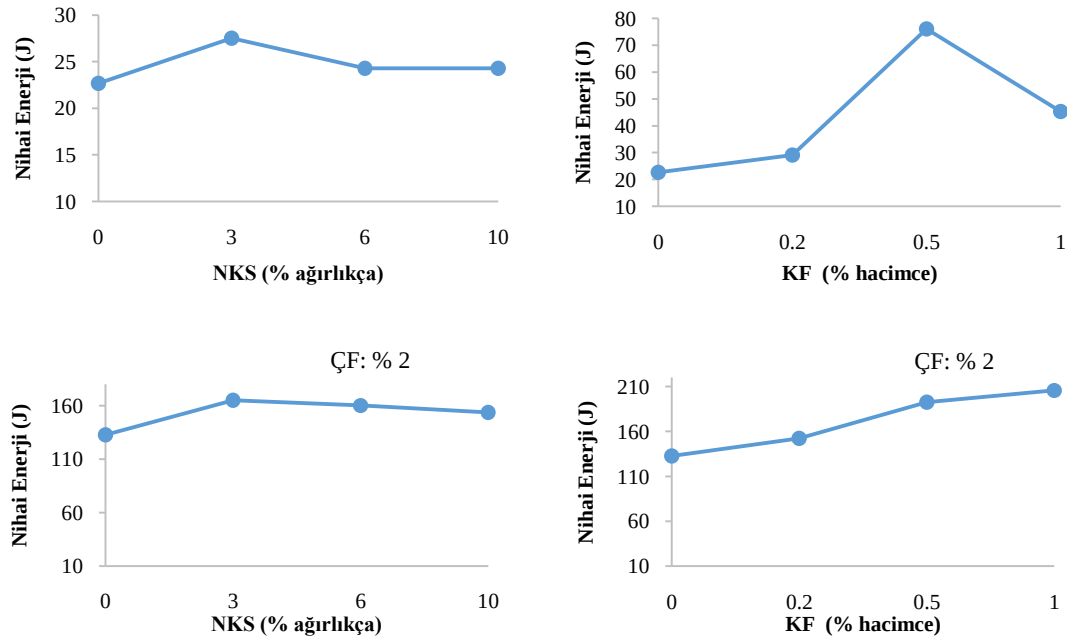
Şekil 4.15. İletken betonlarda NKS, KF ve ÇF'in eğilme dayanımına etkisinin incelenmesi.

4.4. Çarpma Deneyleri

4.4.1.1. NKS ve KF'in çarpma enerjisi üzerinde ayrı ayrı etkileri

Bölüm 3.5.2'de açıklanan çarpma test yöntemi ile farklı karışımlardaki iletken betonların darbeye karşı absorbe ettiği enerji miktarı hesaplanmış ve aşağıdaki şekillerde grafikler halinde sunulmuştur. Üç farklı oranlarda NKS içeren betonlar ile kontrol numune arasında çarpma enerjisi açısından anlamlı bir fark bulunmamıştır ve nihai enerji değerleri 22 ile 27 j arasında hesaplanmıştır (Şekil 4.16.a). % 2 ÇF katkılı aynı karışımların nihai enerji değerleri 6 kat artarak 132 ile 165 j arasında hesaplanmıştır ve bu grupta maksimum absorbe edilen enerji değeri % 3 NKS içeren karışım için 165.10 j olarak elde edilmiştir (Şekil 4.16.c).

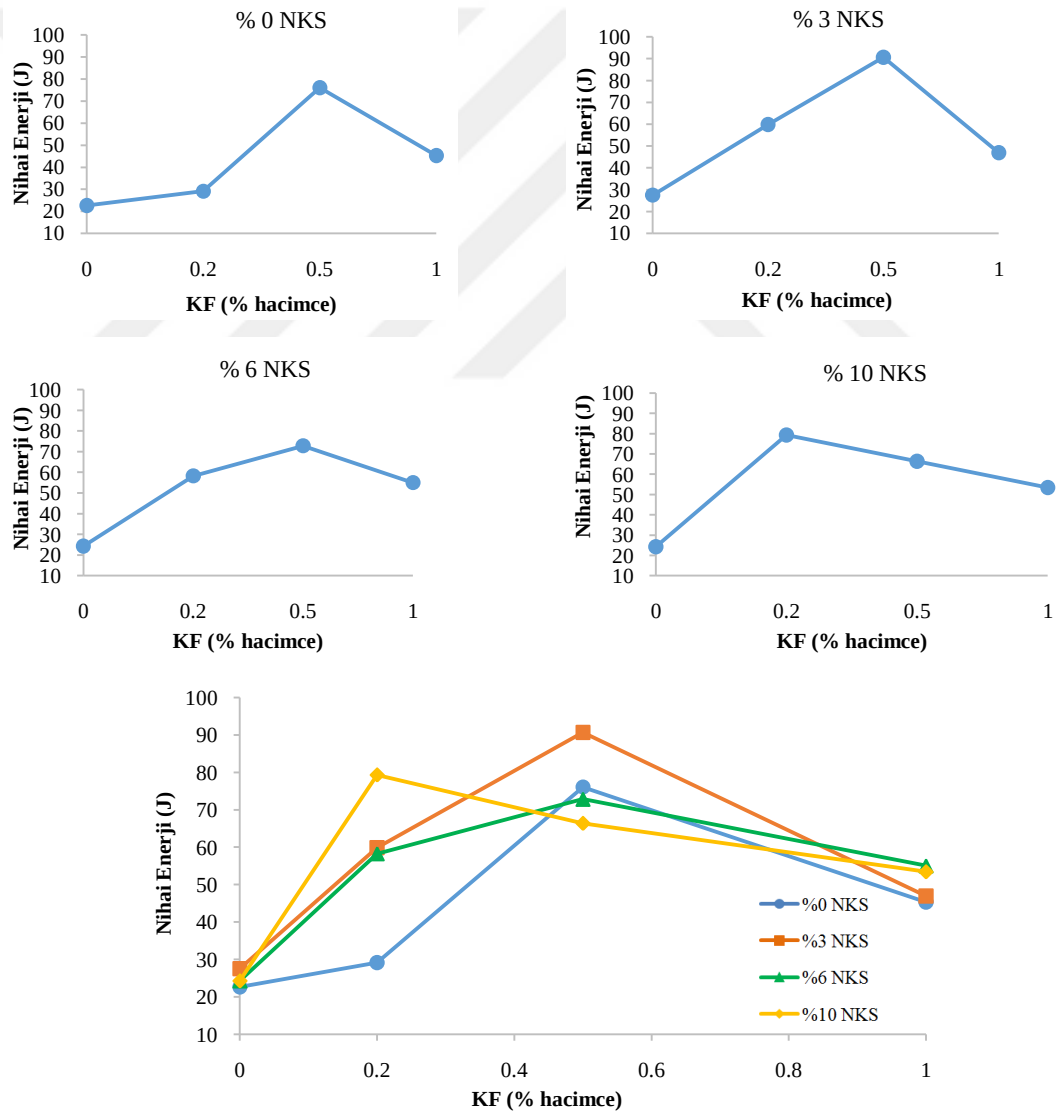
Üç Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarı Şekil 4.16.b.'de verilmiştir. KF içeriğinin artmasıyla nihai enerji miktarı KF oranı % 0.5'e çıktığı zaman 76 j'a kadar artmıştır daha sonra 45 j'a düşmüştür. % 2 ÇF takviyeli KF içeren iletken betonlar nihai enerji değerleri ise, KF içeriğinin 0'dan % 1' kadar arttığında, 130 J'dan 205 J'a kadar arttığı tesbit edilmiştir.



Şekil 4.16. NKS ve KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarlarının kıyaslanması.

4.4.2. NKS ile KF'in birlikte çarpma enerjisi üzerinde etkileri

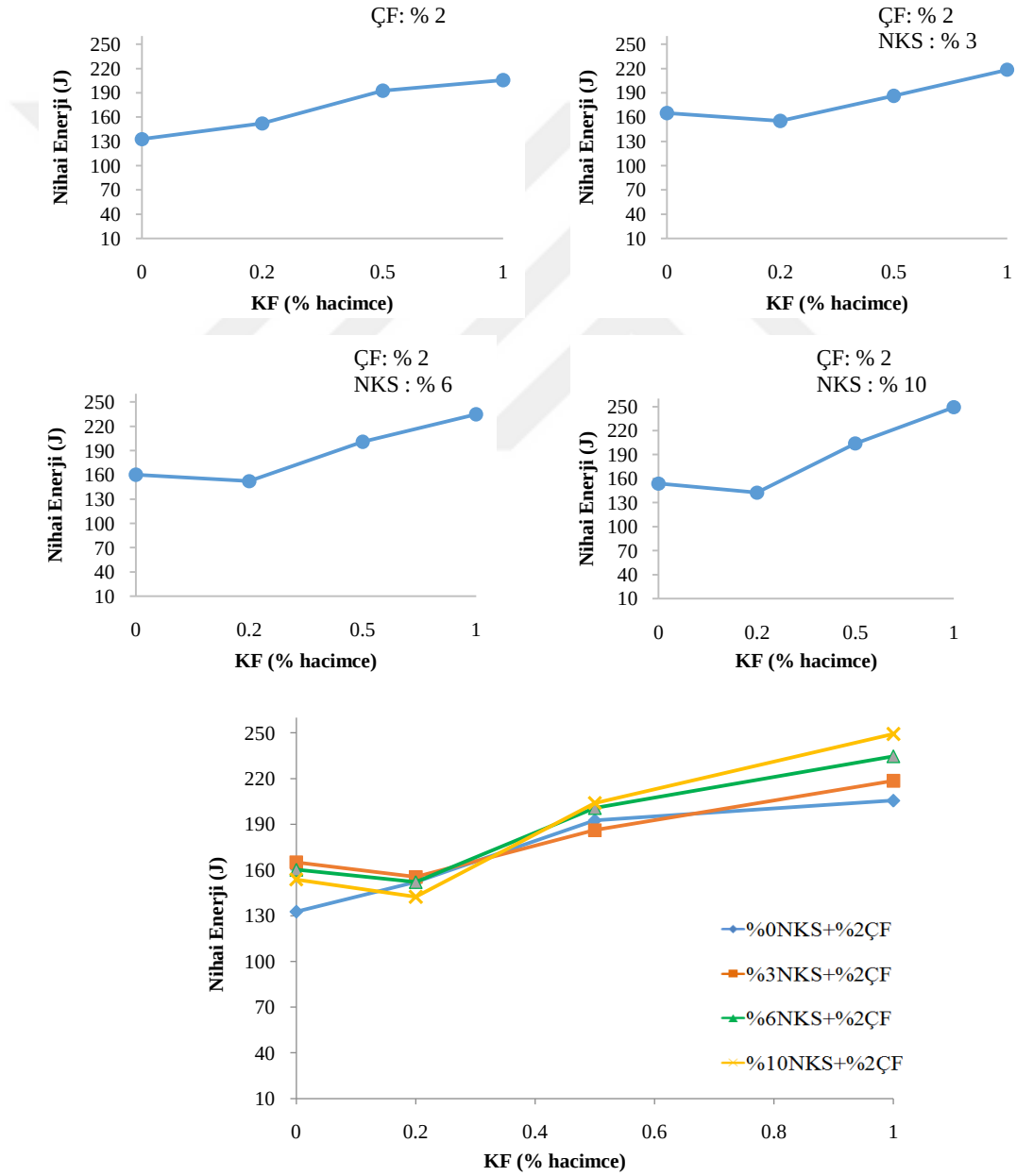
Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarına NKS'nın etkisi Şekil 4.17.'de kıyaslanarak verilmiştir. KF içeren iletken betonlara NKS eklendiğinde maksimum enerji miktarı, NKS 0 ile % 6 arasında kullanıldığı zaman, % 0.5 KF ve % 6 NKS içeren numunelerden elde edilmiştir (Şekil 4.17.a.e). % 10 NKS kullanıldığında maksimum enerji miktarı % 0.2 KF içeren numune ile ilişkili olduğu anlaşılmıştır ve KF oranının artmasıyla enerji miktarı azalmağa başlamıştır (Şekil 4.17.d).



Şekil 4.17. Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarına NKS'nın etkisi.

4.4.3. NKS, KF ve ÇF'in üçü birlikte çarpma enerjisi üzerinde etkileri

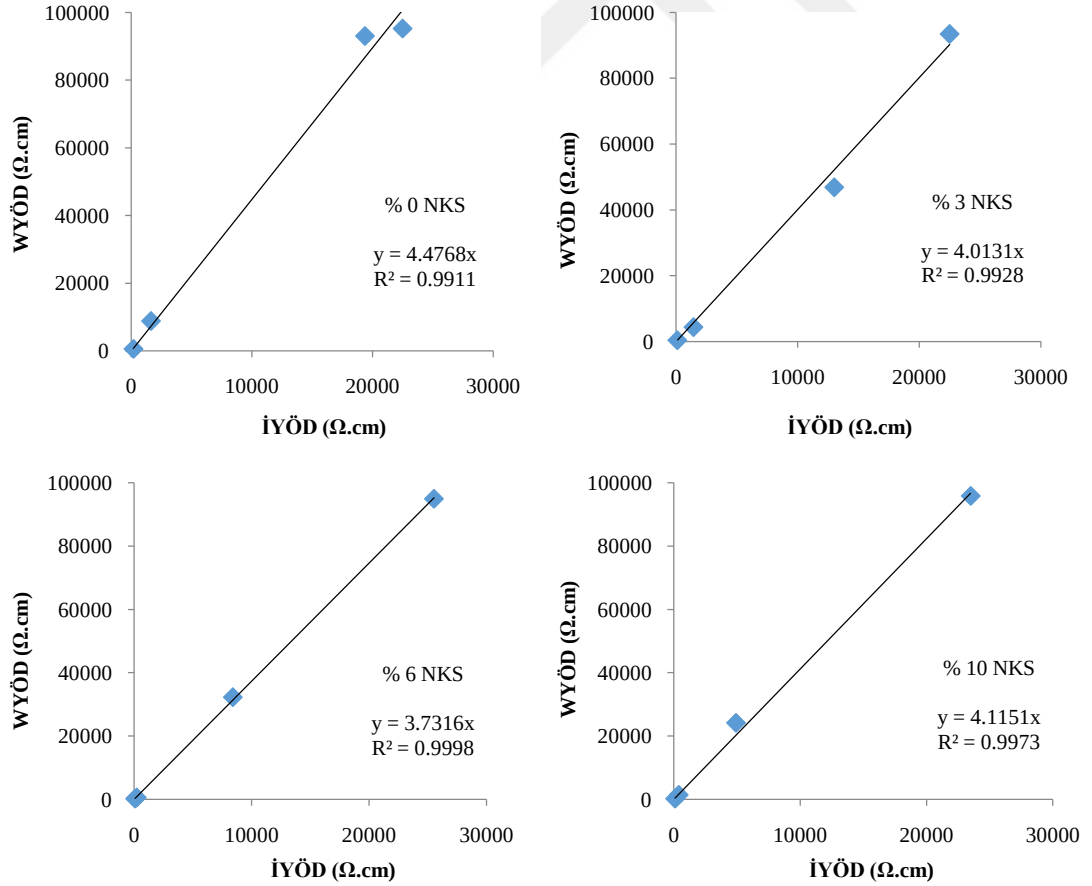
Şekil 4.18.'de üç fazlı elektriksel iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettikleri nihai enerji miktarları grafiklerde karşılaştırılmıştır. Hem ÇF ve hem NKS katkılı iletken betonlarda KF oranının artmasıyla nihai enerji miktarı 11 kata kadar artmıştır. Şekil 4.18.e.'ye göre absorbe edilen maksimum enerji miktarı % 10 NKS ve % 1 KF içeren numune ile ilişkilidir.



Şekil 4.18. İletken betonlarda NKS, KF ve ÇF'in çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarına etkisinin incelenmesi.

4.5. İYÖD ve WYÖD Arasındaki İlişki

% 0'dan % 1'e kadar dört farklı oranlarda KF içeren iletken betonların iki farklı yöntem ile ölçülen ED değerleri bir doğrusal eğri üzerinde kıyaslanmıştır ve aralarındaki ilişki Excel yardımıyla denklem halinde elde edilmiştir. (Şekil 4.19.). Eğrilerdeki R^2 değeri iki değişken arasındaki ilişkinin gücünü açıklayan bir saptama katsayısıdır. Bu değer 0'dan büyük olmalıdır ve her ne kadar 1'e yaklaşırsa iki değişken arasındaki ilişkinin güçlü olduğunu isbat eder. Literatürdeki bazı çalışmalarda iki değişken arasındaki denklemin kabul edilebilmesi için R^2 katsayısı 0.70'in üstünde olmalıdır [100, 103]. Şekil 4.19.'daki İYÖD ile WYÖD arasındaki ilişkiler, R^2 katsayısı 0.99'un üstünde olduğu, için kabul edilebilir. Ayrıca şekillerdeki denklemlerde, NKS oranına göre, WYÖD değeri İYÖD değerinin yaklaşık 4 kat olduğu belirlenmektedir. NKS oranları iki yöntem ile elde edilen direnç değerleri arasındaki ilişkiyi çok fazla etkilememiştir.



Şekil 4.19. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda İYÖD ve WYÖD değerleri arasındaki ilişki.

4.6. İYÖD ve ASTM-D Arasındaki İlişki

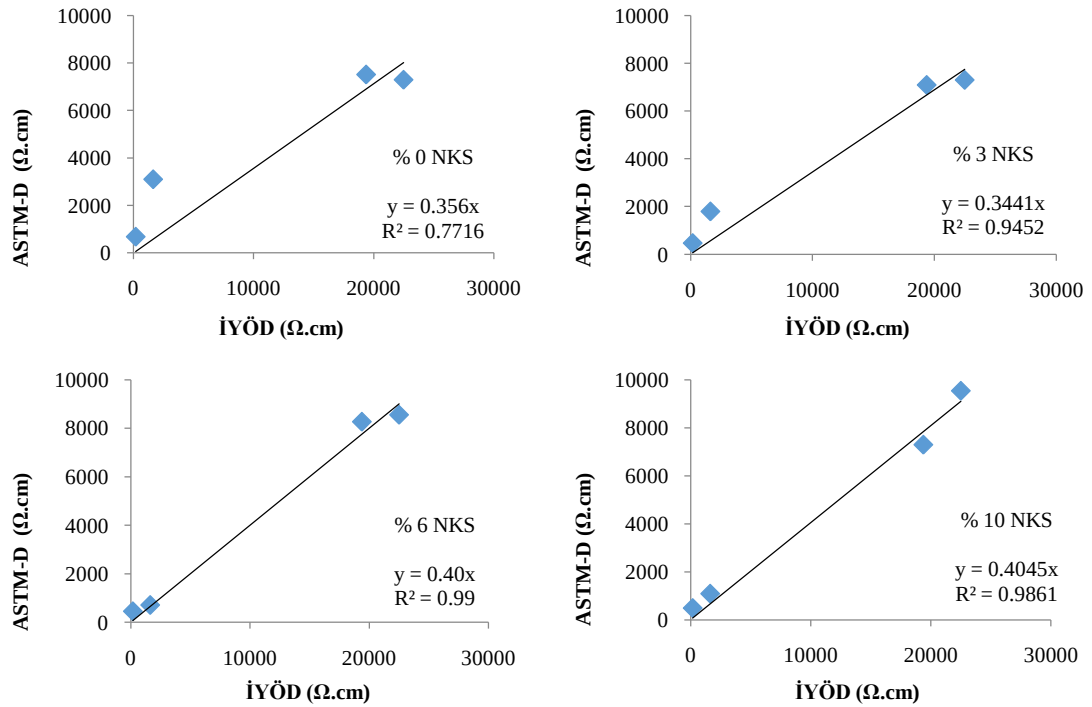
Şekil 4.20.'de farklı oranlarda KF içeren iletken betonların İYÖD ve ASTM-D değerleri arasındaki ilişkiler NKS içeriği durumlarına göre grafikler halinde verilmiştir. KF içeren karışımlarda NKS olmadan İYÖD ve ASTM-D değerlerinin değişmesi birbirilerine yakın olmayıp perakende değerler elde edilmiştir ($R^2 = 0.7716$). bunun yanısıra tüm NKS katkılı karışımlarda İYÖD ve WYÖD değerlerinin değişmesi bir doğrultuda hareket etmektedir ($R^2 > 0.9$). diğer bir ifadeyle NKS katkılı iletken betonlardan iki farklı yöntem ile ölçülen direnç değerleri belirli bir kat sayı ile paralel olarak elde edilmiştir. Bu grupta tüm R^2 değerleri 0.70'in üzerinde olduğu için elde edilen denklemler geçerli sayılabilir. Şekildeki denklemlerden ASTM-D'in İYÖD'ye oranı aşağıda verilmiştir:

$$\% 0 \text{ NKS: } \text{ASTM-D} = 0.356 \times \text{İYÖD} \quad (4.1)$$

$$\% 3 \text{ NKS: } \text{ASTM-D} = 0.344 \times \text{İYÖD} \quad (4.2)$$

$$\% 6 \text{ NKS: } \text{ASTM-D} = 0.400 \times \text{İYÖD} \quad (4.3)$$

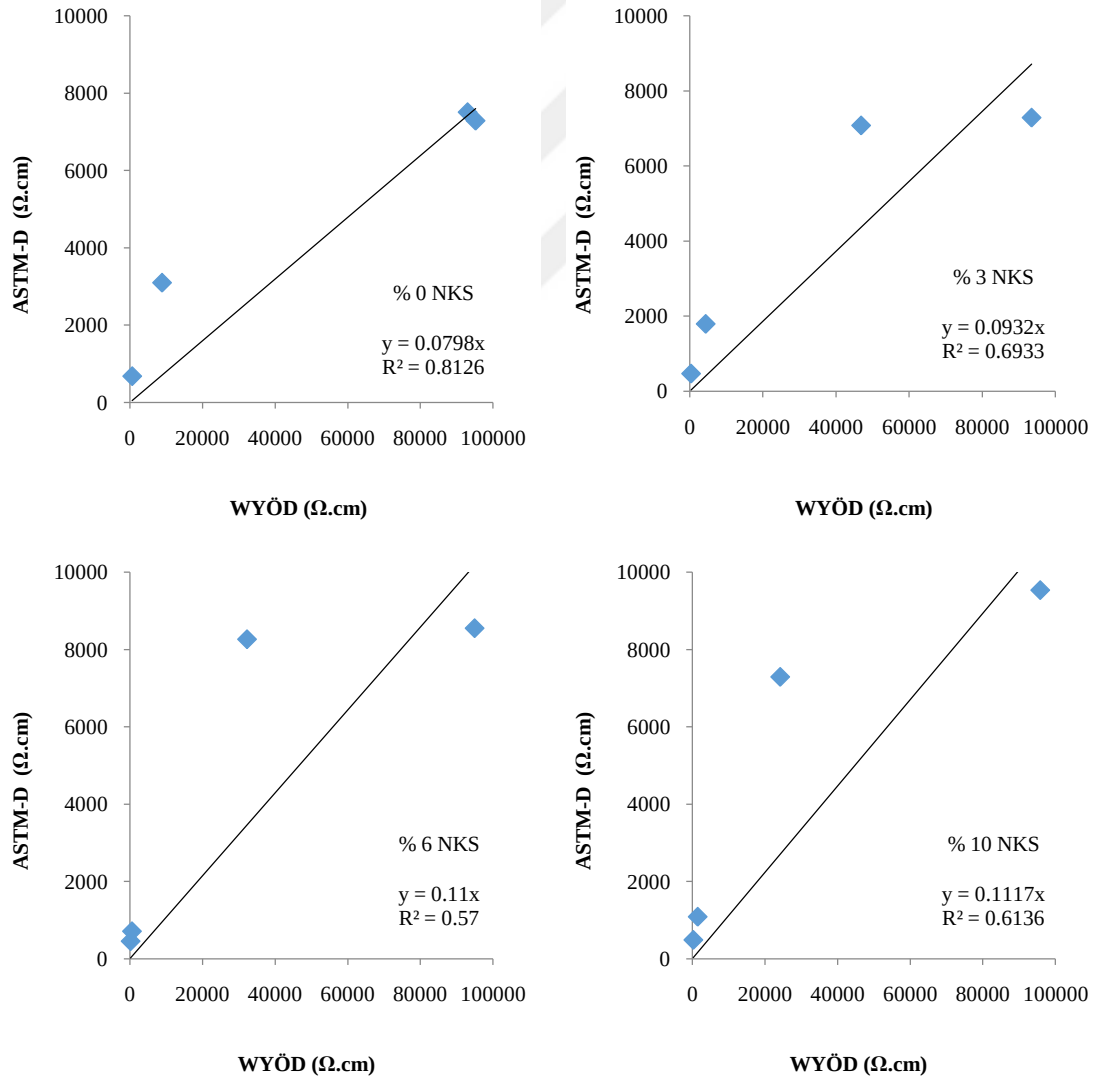
$$\% 10 \text{ NKS: } \text{ASTM-D} = 0.404 \times \text{İYÖD} \quad (4.4)$$



Şekil 4.20. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda İYÖD ve ASTM-D değerleri arasındaki ilişki.

4.7. WYÖD ve ASTM-D Arasındaki İlişki

% 0 ile % 1 arasında KF içeren elektriksel iletken betonların, 4 farklı miktarlarda NKS içeriklerine göre, Wenner prop ve ASTM yöntemi ile ölçülen direnç değerleri arasındaki doğrusal ilişkiler Şekil 4.21.'de verilmiştir. Saptama katsayılarına göre NKS içermeyen iletken betonlarda (Şekil 4.21.a) $R^2 = 0.8126$ olduğu için bu grupta WYÖD ile ASTM-D arasındaki doğrusal denklem kabul edilebilir, ancak NKS içeren gruplarda R^2 değeri düşük olduğundan WYÖD ile ASTM-D arasındaki doğrusal denklemlerin sunulması uygun görülmemektedir. Dolayısıyla bu durumlar için doğrusal olmayan denklemler önerilir.



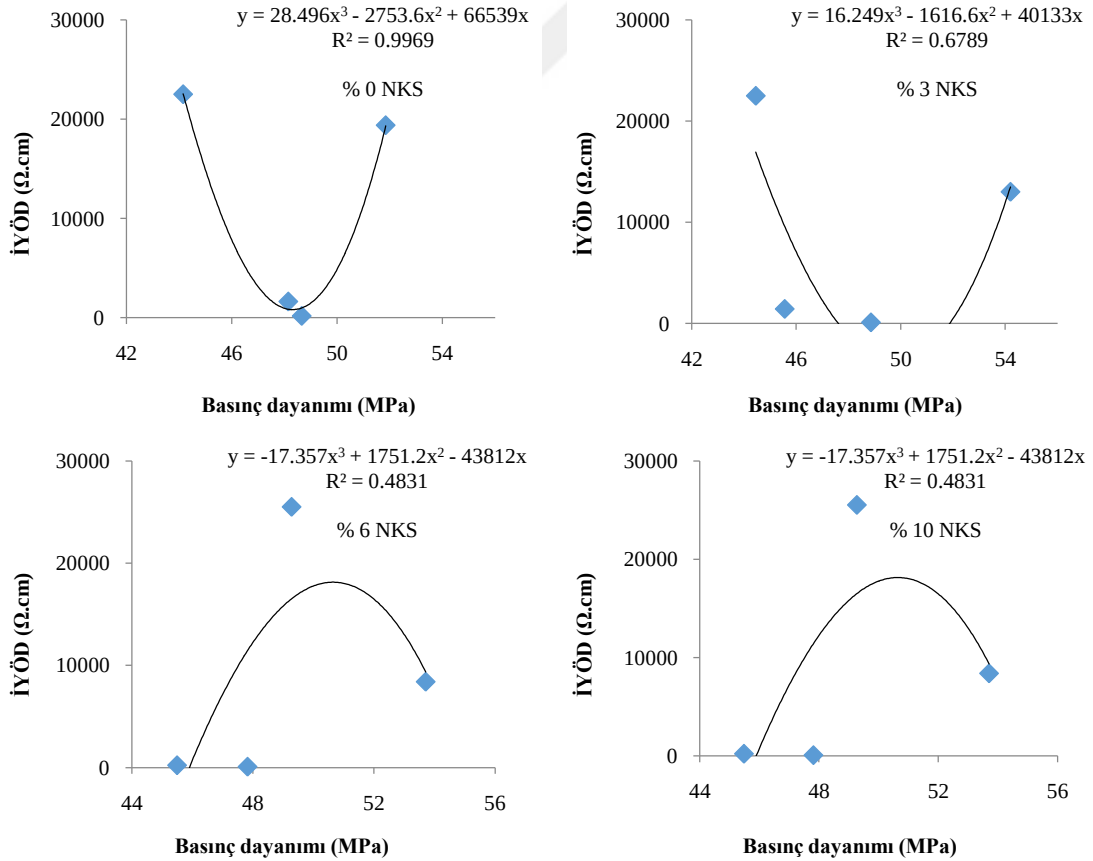
Şekil 4.21. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda WYÖD ve ASTM-D değerleri arasındaki ilişki.

4.8. Basınç dayanımı ve İYÖD Arasındaki İlişki

İletken betonların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen direnç değeri ve basınç dayanımı arasındaki ilişkileri incelenmiştir ve şekil 4.22.'de özetlenmiştir. Buradaki iki değişken sonuçları doğrusal bir eğriden çok saptığı için bu değişkenler arasında doğrusal olmayan üçüncü dereceden bir denklem önerilmiştir. 4 Farklı oranlarda KF içeren NKS katkısız iletken betonlarda $R^2=0.9969$ olduğu için bu grubunda elde edilen denklem 4.5 kabul edilebilir, ancak diğer gruplar (NKS katkılı) için elde edilen denklemler, R^2 değerleri 0.7'in altında olduğundan, geçerli sayılmaz.

$$\% 0 \text{ NKS: } y = 28.496x^3 - 2753.6x^2 + 66539x \quad (4.5)$$

Denklem 4.5'de y: iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değeridir (İYÖD), x: iletken betonların basınç dayanımıdır.



Şekil 4.22. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda basınç dayanımları ve İYÖD değerleri arasındaki ilişki.

4.9. Eğilme Dayanımı ve İYÖD Arasındaki İlişki

Şekil 4.23.'te iletken betonların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri (İYÖD) ile eğilme dayanımları arasındaki ilişkiler grafikler ve doğrusal olmayan denklemler halinde verilmiştir. Bütün eğrilerde R^2 katsayısı 0.70'ten fazla olduğundan elde edilen denklemler geçerli sayılır. % 0, 3, 6 ve 10 NKS içeren KF katkılı iletken betonlar için bu denklemler aşağıda sırasıyla verilmiştir:

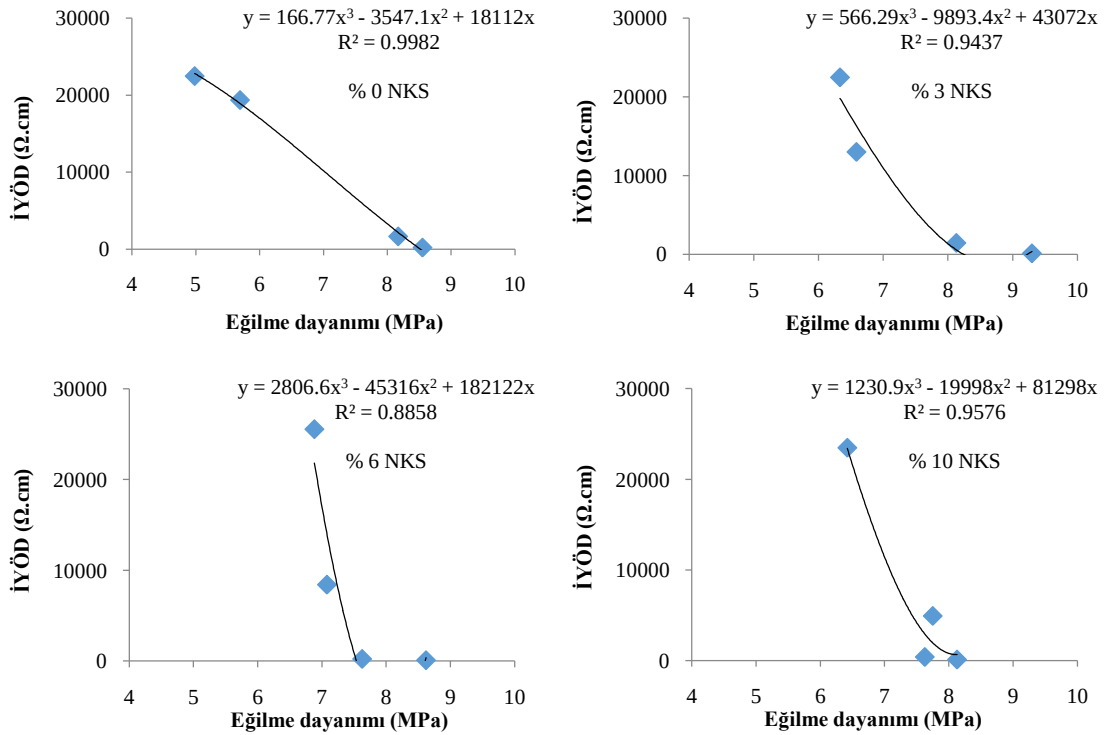
$$\% 0 \text{ NKS: } y = 166.77x^3 - 3547.1x^2 + 18112x \quad (4.6)$$

$$\% 3 \text{ NKS: } y = 566.29x^3 - 9893.4x^2 + 43072x \quad (4.7)$$

$$\% 6 \text{ NKS: } y = 2806.6x^3 - 45316x^2 + 182122x \quad (4.8)$$

$$\% 10 \text{ NKS: } y = 1230.9x^3 - 19998x^2 + 81298x \quad (4.9)$$

Burada, y: iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değeridir (İYÖD), x: iletken betonların eğilme dayanımıdır.



Şekil 4.23. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda eğilme dayanımları ve İYÖD değerleri arasındaki ilişki.

4.10. Çarpma Enerjisi ve İYÖD Arasındaki İlişki

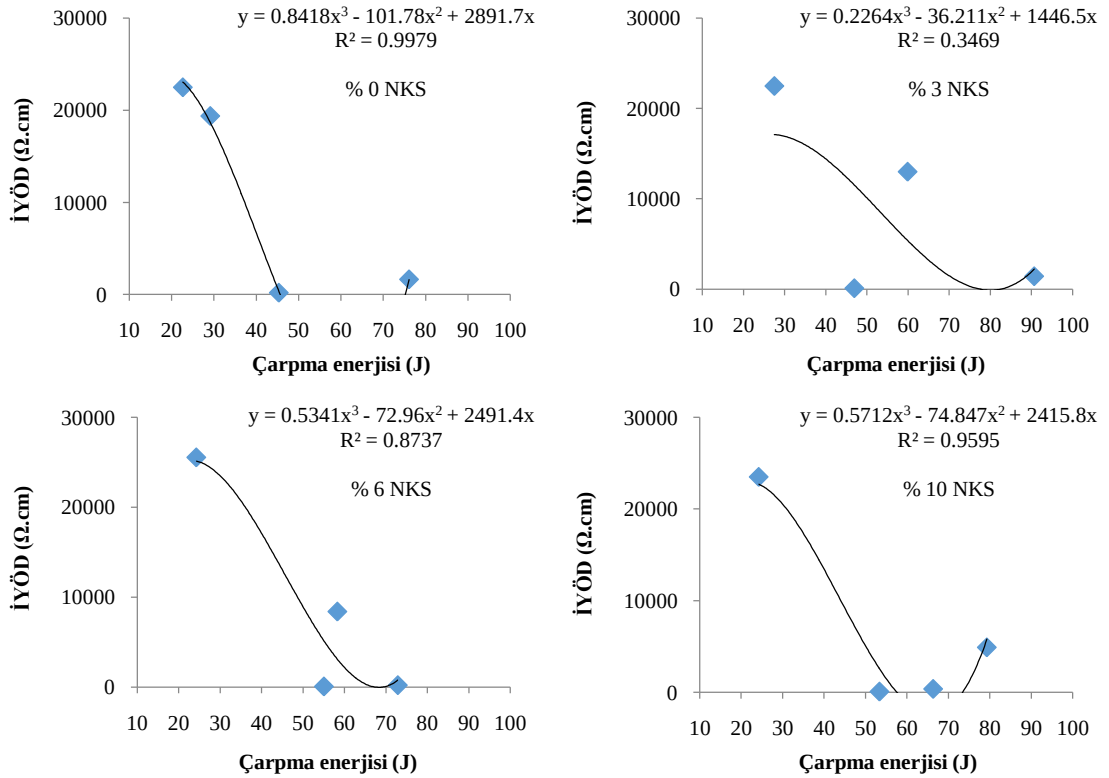
Üretilen iletken betonların çarpmaya karşı elde edilen nihai enerji değerleri ile İYÖD değerleri arasındaki ilişkiler doğrusal olmayan denklemler ile incelenmiştir ve Şekil 4.24.'te sunulmuştur. R^2 değerlerine göre sadece % 3 NKS içeren betonlarda (Şekil 4.24-b) iki değişken arasındaki elde edilen denklem güvenilir değil, bunun dışında diğer gruplar (% 0, 6 ve % 10 NKS içeren betonlar) için bulunan denklemler kabul edilebilir. Bu gruplar için önerilen denklemler sırasıyla aşağıda verilmiştir:

$$\% 0 \text{ NKS: } y = 0.8418x^3 - 101.78x^2 + 2891.7x \quad (4.10)$$

$$\% 6 \text{ NKS: } y = 0.5341x^3 - 72.96x^2 + 2491.4x \quad (4.11)$$

$$\% 10 \text{ NKS: } y = 0.5712x^3 - 74.847x^2 + 2415.8x \quad (4.12)$$

Burada, y: iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değeridir (İYÖD), x: iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği nihai enerji değeridir (E_u).



Şekil 4.24. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda çarpmaya karşı absorbe ettiği nihai enerji değeri ve İYÖD değerleri arasındaki ilişki.

4.11. Basınç ve Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki

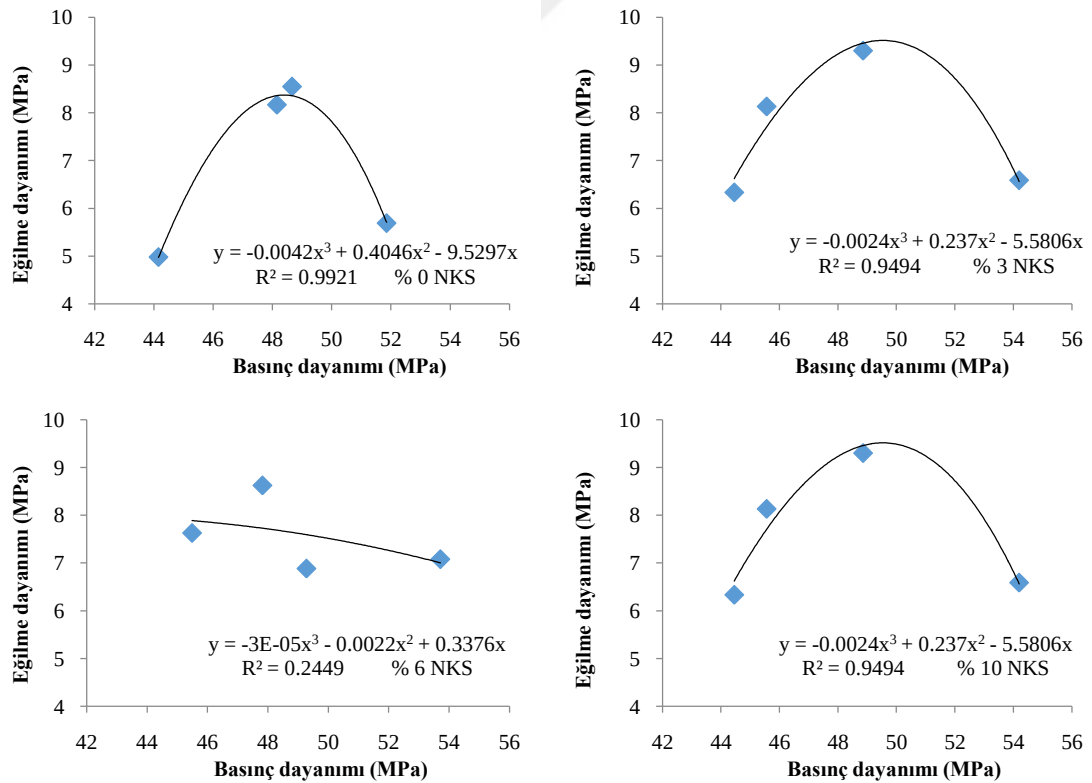
Şekil 4.25.'te farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı iletken betonların basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi % 6 NKS içeren iletken beton grubu (Şekil 4.25.c) dışında diğer gruplar da önerilen denklemler geçerli sayılabilir. Şekil 4.25.c.'de iki değişken arasındaki ilişki gücünü açıklayan R^2 değeri çok düşük olduğu herhangi bir denklem yazılması uygun görülmemektedir. 4.13-4.15 Denklemlerde basınç dayanımları ile eğilme dayanımları arasındaki önerilebilir bağlantılar sunulmaktadır:

$$\% 0 \text{ NKS: } y = -0.0042x^3 + 0.4046x^2 - 9.5297x \quad (4.13)$$

$$\% 3 \text{ NKS: } y = -0.0024x^3 + 0.237x^2 - 5.5806x \quad (4.14)$$

$$\% 10 \text{ NKS: } y = -0.0024x^3 + 0.237x^2 - 5.5806x \quad (4.15)$$

Burada, y: Eğilme dayanımı ve x: basınç dayanımıdır.



Şekil 4.25. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda basınç dayanımları ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki.

4.12. Basınç Dayanımı ve Çarpma Enerjisi Arasındaki İlişki

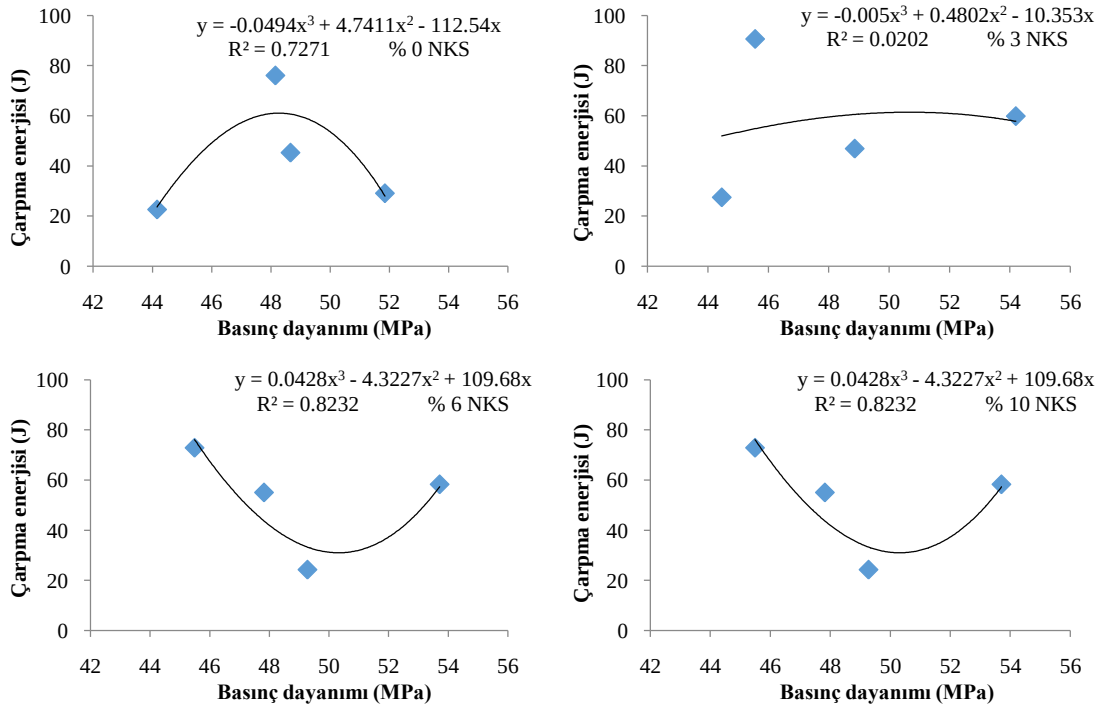
Basınç dayanımı ve çarpmaya karşı absorbe edilen nihai enerji değerleri arasındaki ilişkiler Şekil 4.26.'da dğrusal olmayan eğriler halinde sunulmuştur. Şekil 4.26.b.'de % 3 NKS katkılı iletken beton grubunda basınç ve çarpma deney sonuçlarının perakende elde edildiğinden aralarında doğrusal ve doğrusal olmayan herhangi bir ilişki bulunmamaktadır. Bunun dışında diğer gruplarda (Şekil 4.26.a, 4.26.c ve 4.26.d) basınç ve çarpma sonuçları arasında doğrusal olmayan uygun bağlantılar görülmektedir. Bu bağlantılar aşağıdaki 4.16, 4.17 ve 4.18 denklemlerinde sunulmuştur:

$$\% 0 \text{ NKS: } y = -0.0494x^3 + 4.7411x^2 - 112.54x \quad (4.16)$$

$$\% 3 \text{ NKS: } y = 0.0428x^3 - 4.3227x^2 + 109.68x \quad (4.17)$$

$$\% 10 \text{ NKS: } y = 0.0428x^3 - 4.3227x^2 + 109.68x \quad (4.18)$$

Burada, y: çarpmaya karşı absorbe edilen nihai enerji değeri ve x: basınç dayanımıdır.



Şekil 4.26. Farklı oranlarda NKS içeren KF katkılı betonlarda basınç dayanımları ve çarpmaya karşı absorbe edilen nihai enerji değerleri arasındaki ilişkiler.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada farklı miktarlarda NKS, KF ve ÇF içeren karışımlardan oluşan 36 sayıda elektriksel iletken beton üretilmiştir. Elektriksel iletken betonların Mekaniksel, elektriksel ve çarpma deneyleri yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre farklı fonksiyonlardaki NKS, KF ve ÇF içeren numunelerin hem basınç ve hem eğilme dayanımları artmıştır. Bütün KF katkılı iletken beton numunelerin elektriksel dirençleri kontrol numuneye kıyasla azalmıştır ve KF içerik oranı arttıkça bu özellik daha net olarak ortaya çıkmıştır. Karışımlarda sadece piroliz yöntemi ile elde edilen NKS kullanıldığı zaman elektriksel direncin azalmasında olumlu bir sonuç elde edilmemiştir, ancak KF ve ÇF içeren iletken betonlara NKS ilave edildiğinde KF ve ÇF'in direnç azaltma kabiliyeti önemli derecede artmıştır. KF ve ÇF, üretilen iletken beton numunelerin çarpmaya karşı absorbe edilen nihai enerji miktarının artmasında da olumlu etkiler sergilemişlerdir. Aşağıda mekaniksel, elektriksel ve çarpma deney sonuçlarıyla ilgili açıklamalar madde madde sunulmuştur:

5.1. Elektriksel Direnç Sonuçları

ED ölçme deneyleri üç farklı yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Her üç yöntem ile ölçülen direnç değerleri arasındaki ilişkiler de ayrı ayrı doğrusal eğri ve denklemler halinde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile ilgili açıklamalar aşağıda özet olarak sunulmuştur:

Sonuçlara göre KF betonun elektriksel direncini etkileyen en önemli malzemedir. Örneğin bu çalışmada KF % 1 tek başına kullanıldığı durumda betonun direnci $2.2 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 'nin üzerinden $175 \Omega \cdot \text{cm}$ 'ye kadar azalmıştır. Aynı karışıma ek olarak % 6 NKS ekleyerek bu değer 2 kattan fazla azalarak $80 \Omega \cdot \text{cm}$ olduğu farkedilmiştir. Bu durum deney sonuçlarından % 0.5 KF içeren iletken betonlar için de anlaşılmıştır.

Sadece % 0.5 KF içeren iletken betonun direni $1629 \Omega \cdot \text{Cm}$ ölçülürken bu karışıma % 6 NKS ekleyerek direnç değeri $222 \Omega \cdot \text{Cm}$ olarak ölçülmüştür.

ÇF miktarı betonda maksimum kullanılabilecek oranını geçmemesi nedeniyle tek oranda % 2 kullanılmıştır. Bu oran bir iletken betonda iletkenlik artırıcı olarak ÇF için düşük bir adettir. Genellikle iletken betonlarda iletkenlik artırıcı olarak % 15-20 arasında ÇF kullanılır [17]. Dolayısıyla bu çalışmada % 2 ÇF içeren karışımlardan önemli bir direnç azalması beklenilmemiştir ve sadece çalışmada kullanılan diğer malzemeler NKS ve KF) ile birlikte etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Sonuçlara göre sadece ÇF içeren beton numunesinin elektriksel direnci kontrol numuneye göre $2.2 \times 10^4 \Omega \cdot \text{Cm}$ 'den $7.8 \times 10^3 \Omega \cdot \text{Cm}$ 'ye düşmüştür, aynı karışıma % 6 NKS ilave ederek direnci $5.2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{Cm}$ olarak ölçülmüştür. Bu değerler elektriksel iletken betonlarda beklenen düşük rakemlerden oldukça fazla olduğu için, iletkenlik artırma amacıyla düşük miktarlarda ÇF kullanılması önerilmemektedir.

İki noktali tek eksenli yöntem ile ölçme yöntemi beton direncini ölçmek için en yaygın yöntemdir [6, 13, 17], bu yöntem ile elde edilen değerler literatür çalışmaları ile kıyaslanarak sonuçlar arasındaki benzerlikler tesbit edilmiştir [6, 46]. Bunun yanında dört noktali veya Wenner prop yöntemi ile ölçülen yüzeysel direnç değerleri sonuçlara göre iki noktali yöntem ile ölçülen değerlerin ortalama 4 katı kadar bulunmuştur. WYÖD/İYÖD oranı farklı çalışmalarda çeşitli parametrelerin etkisi altında hesaplanmıştır. Ghosh ve ark (2015) 10 x 20 cm silindir numuneler için WYÖD/İYÖD oranını $2-3 \Omega \cdot \text{Cm}$ arasında belirtmişlerdir [104]. Ghosh ve ark (2015) diğer bir çalışmalarında farklı malzemeler içeren numunelerin ED değerlerini ölçerek WYÖD/İYÖD oranını $2-5 \Omega \cdot \text{Cm}$ olarak hesaplamışlardır [56]. Dolayısıyla literatür çalışmalarında iletken beton için elde edilen WYÖD/İYÖD oranı $2-5 \Omega \cdot \text{Cm}$ olduğuna göre bu çalışmada, farklı karışımlara sahip iletken betonların, bulunan WYÖD/İYÖD değeri ortalama 4 olarak doğrulanabilir. ASTM standartına göre ölçülen direnç değerleri, iki noktali yöntem ile ölçülen değerlerin 0.37 katı olarak elde edilmiştir. Literatürde ASTM standartına göre ölçülen direnç değerleri ve iki noktali tek eksenli yöntem ile ölçülen direnç değeri arasında yapılacak karşılaştırmaya rastlanılmamıştır.

Sonuç olarak üç farklı iletken malzemeleri üretilen elektriksel iletken beton karışımlarında, ayrı ayrı, ikişer ve üçü bir arada kullanıp inceleyerek iletkenlik açısından en iyi sonuçlar NKS ile KF ikisi birlikte kullanıldığı zaman elde edilmiştir.

5.2. Basınç Dayanım Sonuçları

Elde edilen basınç dayanım sonuçlarına göre elektriksel iletken betonlarda kullanılan NKS, KF ve ÇF malzemeleri betonun basınç dayanımında olumsuz etki sergilememiştir. Bunun yanısıra çoğu numunenin basınç dayanımı 50 MPa'ın üzerinde elde edilmiştir oysa kontrol numunenin basınç dayanımı 44 MPa olarak ölçülmüştür.

Sadece NKS içeren numunelerin basınç değerleri NKS içeriğinin artmasıyla sürekli artmıştır ve maksimum basınç değeri % 10 NKS kullanıldığı zaman 52.26 MPa olarak elde edilmiştir. Aynı karışımlara % 2 ÇF eklendiği zaman basınç dayanımlarında bir gelişme olmamıştır. KF'in elektriksel iletken betonlar basınç dayanımında olumlu etkisi kaydedilmiştir ve % 0.2 KF içeren numunenin basınç dayanımı 51.85 MPa olarak diğerlerinden daha fazla elde edilmiştir ÇF'in KF ile birlikte kullanıldığı zaman basınç dayanımına olumsuz etkisi olmamıştır ve maksimum basınç dayanımı % 0.5 KF kullanıldığı zaman 55.07 MPa olarak bulunmuştur. NKS, KF ve ÇF üçü bir arada kullanıldığı zaman en iyi basınç sonuçları ortaya çıkmıştır ve maksimum basınç dayanımı 62.23 MPa olarak N10K1D0Ç2 karışıma ait olduğu anlaşılmıştır.

5.3. Eğilme Dayanım Sonuçları

Tüm üretilen iletken betonların eğilme dayanım sonuçları kontrol numunesinin eğilme dayanımına (~ 5 MPa) kıyasla artmıştır. % 6 NKS içeren numunenin eğilme dayanımı 6.88 MPa ölçülmüştür. Farklı oranlarda NKS ile % 2 ÇF kullanıldığı zaman % 3 NKS içeren numune daha yüksek sonuç vermiştir(9.02 MPa). Sadece KF içeren betonlarda KF oranının artmasıyla eğilme dayanımı artmıştır ve maksimum dayanım % 1 KF içeren beton için 8.55 MPa olarak elde edilmiştir. NKS ile KF ikisi

birlikte kullanıldığı zaman eğilme dayanımı 6 ile 9 MPa arasında elde edilmiştir. NKS, KF ve ÇF üçü bir arada kullanıldığında ise eğilme dayanımı 6-8 MPa arasında ölçülmüştür. Sonuç olarak NKS, KF ve ÇF malzemeler hem ayrı ayrı hem ikişer ve hem üçü birlikte kullanıldığı zaman betonun eğilme dayanımı üzerinde olumlu etkisi bulunmamıştır.

5.4. Çarpma Enerjisi Sonuçları

İncelenen çarpma deney sonuçlarına göre sadece NKS içeren beton numunelerinin absorbe ettiği nihai enerji değerleri arasında bir gelişme olmamıştır. Ancak ÇF ve KF eklendiği zaman nihai enerji miktarının önemli derecede arttığı görülmüştür. Sonuçlara göre ÇF ve KF arasında çarpma enerjisini etkileyen en önemlisi ÇF'dir. KF içeriğinin artmasıyla nihai enerji miktarı KF oranı % 0.5'e çıktığı zaman 76 j'a kadar artmıştır daha sonra 45 j'a düşmüştür. % 2 ÇF takviyeli KF içeren iletken betonlar nihai enerji değerleri ise, KF ile NKS birlikte kullanıldığı zaman maksimum enerji miktarı, NKS 0 ile % 6 arasında kullanıldığında, % 0.5 KF ve % 6 NKS içeren numunelerden elde edilmiştir. NKS, KF ve ÇF üçü birlikte kullanıldığında NKS ve KF'in artmasıyla nihai enerji miktarı artmıştır ve maksimum enerji değeri % 10 NKS ve % 1 KF içeren numuneye ait olarak 249 J elde edilmiştir.

5.5. İYÖD Değerleri, Basınç Dayanımları, Eğilme Dayanımları ve Çarpma Enerji Değerleri Arasındaki İlişkiler

Tüm karışımlardan elde edilen iletken beton numuneler için ölçülen İYÖD değerleri, Basınç dayanımları, Eğilme dayanımları ve çarpma enerji değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir ve çoğu durumlar için kayda değer yaklaşımlar elde edilmiştir. Ancak bu özellikler arasında bağ oluşturmak için doğrusal eğriler tanımlandığında iki değişken arasındaki perakendelikten dolayı doğrusal bir ilişki ortaya çıkmamıştırç dolayısıyla bu özellikler arasında doğrusal olmayan üçüncü dereceden bir eğri tanımlayarak tahmini denklemler elde edilmiştir. Elde edilen eğrilere göre R^2 değeri 0.70'in üstünde olan denklemler kabul edilebilir [100, 103].

5.6. Öneriler

Üç farklı yöntem ile ölçülen ED sonuçlarına göre iletken betonların direncini ölçmek için iki noktalı tek eksenli direnç ölçme yöntemi en uygun görülmüştür. Dolayısıyla iletken betonların direncini ölçmek için bu yöntemin kullanılması önerilir.

Bu çalışmadan elde edilen ED değerlerine göre % 0.5 ve % 1 KF içeren iletken betonlar en iyi sonuçlar vermişlerdir, ayrıca bu karışımlara 3 farklı oranlarda (% 3, % 6 ve % 10) NKS ekleyerek % 6 NKS katkılı iletken betonların dirençleri daha optimum olarak elde edilmiştir. Ve bu durumda hem ekonomikliği ve hem uygun bir direnç değerini göz önüne alarak % 0.5 KF ve % 6 NKS içeren karışımların iletken beton olarak üretilmesi önerilmektedir. Ayrıca mekaniksel ve çarpma deney sonuçlarına göre bu karışımlara sahip beton numunelerin sonuçları olumlu olarak elde edilmiştir.

Bir atık malzemesi olarak piroliz yöntemi ile elde edilen NKS'in bu çalışmada ortaya koyduğu olumlu sonuçlarından dolayı bu malzemenin gerek elektriksel iletken betonlarda KF ile birlikte kullanarak maliyeti düşürmek amacıyla gerekse tek başına basınç dayanımını artırmak amacıyla kullanılması önerilir.

İYÖD değerleri, Basınç dayanımları, Eğilme dayanımları ve çarpma enerji değerleri arasındaki ilişkiler incelenerek elde edilen kabul edilebilir denklemler bu çalışmadaki fonksiyonlara sahip iletken betonların üretilmesinde bir ön bilgi olarak önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Barnard, E., Electrically Conductive Cement and Concrete. US3166518 A, 1965.
- [2] Çavas, M., Nano yapılı metal oksit yari iletkenler kullanılarak foto du yotların üret ilmes in Fırat Üniversitesi, Metalurji Egitimi Anabilim Dalı. 2011.
- [3] Howser, R., H. Dhonde, and Y. Mo, Self-sensing of carbon nanofiber concrete columns subjected to reversed cyclic loading. Smart materials and structures, 2011. 20(8): p. 085031.
- [4] Gomis, J., O. Galao, V. Gomis, E. Zornoza, and P. Garcés, Self-heating and deicing conductive cement. Experimental study and modeling. Construction and Building Materials, 2015. 75: p. 442-449.
- [5] Wen, S. and D. Chung, Electromagnetic interference shielding reaching 70 dB in steel fiber cement. Cement and Concrete Research, 2004. 34(2): p. 329-332.
- [6] Sassani, A., H. Ceylan, S. Kim, K. Gopalakrishnan, A. Arabzadeh, and P.C. Taylor, Influence of mix design variables on engineering properties of carbon fiber-modified electrically conductive concrete. Construction and Building Materials, 2017. 152: p. 168-181.
- [7] Wu, J., J. Liu, and F. Yang, Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing. Construction and Building Materials, 2015. 75: p. 129-135.
- [8] Arabzadeh, A., H. Ceylan, S. Kim, K. Gopalakrishnan, and A. Sassani. Fabrication of polytetrafluoroethylene-coated asphalt concrete biomimetic surfaces: a nanomaterials-based pavement winter maintenance approach. in International Conference on Transportation and Development 2016. 2016.
- [9] Arabzadeh, A., H. Ceylan, S. Kim, K. Gopalakrishnan, A. Sassani, S. Sundararajan, and P.C. Taylor, Superhydrophobic coatings on Portland cement concrete surfaces. Construction and Building Materials, 2017. 141: p. 393-401.
- [10] Ceylan, H., A. Arabzadeh, A. Sassani, S. Kim, and K. Gopalakrishnan. Innovative nano-engineered asphalt concrete for ice and snow controls in pavement systems. in Proc., 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. 2016.

- [11] Arabzadeh, A., H. Ceylan, S. Kim, K. Gopalakrishnan, A. Sassani, S. Sundararajan, P.C. Taylor, and A. Abdullah, Influence of deicing salts on the water-repellency of Portland cement concrete coated with polytetrafluoroethylene and polyetheretherketone, in *Airfield and Highway Pavements 2017*. 2017. p. 217-227.
- [12] Whittington, H., J. McCarter, and M. Forde, The conduction of electricity through concrete. *Magazine of concrete research*, 1981. 33(114): p. 48-60.
- [13] El-Dieb, A.S., M.A. El-Ghareeb, M.A. Abdel-Rahman, and A.N. El Sayed, Multifunctional electrically conductive concrete using different fillers. *Journal of Building Engineering*, 2018. 15: p. 61-69.
- [14] Tang, Z., Z. Li, J. Qian, and K. Wang, Experimental study on deicing performance of carbon fiber reinforced conductive concrete. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY*, 2005. 21(1): p. 113-117.
- [15] Tuan, C.Y., *Conductive concrete for bridge deck deicing and anti-icing*. 2004, Department of Civil Engineering, University of Nebraska-Lincoln.
- [16] Wu, S., L. Mo, Z. Shui, and Z. Chen, Investigation of the conductivity of asphalt concrete containing conductive fillers. *Carbon*, 2005. 43(7): p. 1358-1363.
- [17] Yehia, S. and C.Y. Tuan, Conductive concrete overlay for bridge deck deicing. *Materials Journal*, 1999. 96(3): p. 382-390.
- [18] Yehia, S. and C. Tuan, Thin conductive concrete overlay for bridge deck deicing and anti-icing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2000(1698): p. 45-53.
- [19] Wen, S. and D. Chung, A comparative study of steel-and carbon-fibre cement as piezoresistive strain sensors. *Advances in cement research*, 2003. 15(3): p. 119-128.
- [20] El-Dieb, A.S., Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers. *Materials & Design*, 2009. 30(10): p. 4286-4292.
- [21] Abu-Eishah, S.I., A.S. El-Dieb, and M.S. Bedir, Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. *Construction and Building Materials*, 2012. 34: p. 249-256.
- [22] Banthia, N., S. Djeridane, and M. Pigeon, Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements. *Cement and Concrete research*, 1992. 22(5): p. 804-814.

- [23] Fu, X. and D. Chung, Carbon fiber reinforced mortar as an electrical contact material for cathodic protection. *Cement and concrete research*, 1995. 25(4): p. 689-694.
- [24] Wen, S. and D. Chung, Uniaxial tension in carbon fiber reinforced cement, sensed by electrical resistivity measurement in longitudinal and transverse directions. *Cement and Concrete Research*, 2000. 30(8): p. 1289-1294.
- [25] Wen, S. and D. Chung, Strain-sensing characteristics of carbon fiber-reinforced cement. *ACI materials journal*, 2005. 102(4): p. 244.
- [26] Wen, S. and D. Chung, Double percolation in the electrical conduction in carbon fiber reinforced cement-based materials. *Carbon*, 2007. 45(2): p. 263-267.
- [27] Zhu, S. and D. Chung, Numerical assessment of the methods of measurement of the electrical resistance in carbon fiber reinforced cement. *Smart materials and structures*, 2007. 16(4): p. 1164.
- [28] Xu, J. and W. Yao, Current distribution in reinforced concrete cathodic protection system with conductive mortar overlay anode. *Construction and Building Materials*, 2009. 23(6): p. 2220-2226.
- [29] Jing, X. and Y. Wu, Electrochemical studies on the performance of conductive overlay material in cathodic protection of reinforced concrete. *Construction and building materials*, 2011. 25(5): p. 2655-2662.
- [30] He, Y., L. Lu, S. Jin, and S. Hu, Conductive aggregate prepared using graphite and clay and its use in conductive mortar. *Construction and Building Materials*, 2014. 53: p. 131-137.
- [31] Anwar, M.S., B. Sujitha, and R. Vedalakshmi, Light-weight cementitious conductive anode for impressed current cathodic protection of steel reinforced concrete application. *Construction and Building Materials*, 2014. 71: p. 167-180.
- [32] Xie, N., X. Shi, D. Feng, B. Kuang, and H. Li, Percolation backbone structure analysis in electrically conductive carbon fiber reinforced cement composites. *Composites Part B: Engineering*, 2012. 43(8): p. 3270-3275.
- [33] Zhao, H., Z. Wu, S. Wang, J. Zheng, and G. Che, Concrete pavement deicing with carbon fiber heating wires. *Cold Regions Science and Technology*, 2011. 65(3): p. 413-420.
- [34] Wang, S., S. Wen, and D. Chung, Resistance heating using electrically conductive cements. *Advances in cement research*, 2004. 16(4): p. 161-166.
- [35] Yehia, S., C.Y. Tuan, D. Ferdon, and B. Chen, Conductive concrete overlay for bridge deck deicing: mixture proportioning, optimization, and properties. *Materials Journal*, 2000. 97(2): p. 172-181.

- [36] Tuan, C.Y. and S. Yehia, Evaluation of electrically conductive concrete containing carbon products for deicing. *Materials Journal*, 2004. 101(4): p. 287-293.
- [37] Liu, Q., E. Schlangen, Á. García, and M. van de Ven, Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 2010. 24(7): p. 1207-1213.
- [38] Tuan, C.Y., Electrical resistance heating of conductive concrete containing steel fibers and shavings. *Materials Journal*, 2004. 101(1): p. 65-71.
- [39] Galao, O., F.J. Baeza, E. Zornoza, and P. Garcés, Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture. *Cement and concrete composites*, 2014. 46: p. 90-98.
- [40] Materazzi, A.L., F. Ubertini, and A. D'Alessandro, Carbon nanotube cement-based transducers for dynamic sensing of strain. *Cement and Concrete Composites*, 2013. 37: p. 2-11.
- [41] Kim, H., I.W. Nam, and H.-K. Lee, Enhanced effect of carbon nanotube on mechanical and electrical properties of cement composites by incorporation of silica fume. *Composite Structures*, 2014. 107: p. 60-69.
- [42] Whiting, D.A. and M.A. Nagi, Electrical resistivity of concrete-a literature review. *R&D Serial*, 2003. 2457.
- [43] Shi, C., Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. *Cement and Concrete Research*, 2004. 34(3): p. 537-545.
- [44] Principallo, A., K. van Breugel, and G. Levita, Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes. *Cement and Concrete Research*, 2003. 33(11): p. 1755-1763.
- [45] Tumi, P., Electrical conductivity of Portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 1996. 26(4): p. 529-534.
- [46] Hou, Z., Z. Li, and J. Wang, Electrical conductivity of the carbon fiber conductive concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2007. 22(2): p. 346-349.
- [47] Salem, T.M., Electrical conductivity and rheological properties of ordinary Portland cement-silica fume and calcium hydroxide-silica fume pastes. *Cement and concrete research*, 2002. 32(9): p. 1473-1481.
- [48] Peyvandi, A., P. Soroushian, A.M. Balachandra, and K. Sobolev, Enhancement of the durability characteristics of concrete nanocomposite pipes with modified graphite nanoplatelets. *Construction and building materials*, 2013. 47: p. 111-117.

- [49] Cao, J. and D. Chung, Carbon fiber reinforced cement mortar improved by using acrylic dispersion as an admixture. *Cement and Concrete Research*, 2001. 31(11): p. 1633-1637.
- [50] Chen, B. and J. Liu, Effect of fibers on expansion of concrete with a large amount of high f-CaO fly ash. *Cement and concrete research*, 2003. 33(10): p. 1549-1552.
- [51] Xuli, F. and D. Chung, Effect of methylcellulose admixture on the mechanical properties of cement. *Cement and concrete research*, 1996. 26(4): p. 535-538.
- [52] Polder, R., C. Andrade, B. Elsener, Ø. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert, and M. Raupach, Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. *Materials and Structures*, 2000. 33(10): p. 603-611.
- [53] Layssi, H., P. Ghods, A.R. Alizadeh, and M. Salehi, Electrical resistivity of concrete. *Concrete International*, 2015. 37(5): p. 41-46.
- [54] Tian, X. and H. Hu, Test and study on electrical property of conductive concrete. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2012. 5: p. 83-87.
- [55] Chen, C.-T., J.-J. Chang, and W.-c. Yeih, The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. *Construction and Building Materials*, 2014. 71: p. 35-43.
- [56] Ghosh, P. and Q. Tran, Correlation between bulk and surface resistivity of concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2015. 9(1): p. 119-132.
- [57] Chung, D., Electrical conduction behavior of cement-matrix composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2002. 11(2): p. 194-204.
- [58] Wu, T., R. Huang, M. Chi, and T. Weng, A study on electrical and thermal properties of conductive concrete. *Computers and Concrete*, 2013. 12(3): p. 337-349.
- [59] Lavagna, L., Musso, S., Ferro, G., & Pavese, M. Cement-based composites containing functionalized carbon fibers. *Cement and Concrete Composites*, 2018. 88, 165-171.
- [60] TS-EN-197-1, TS EN-197-1- Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. 2002
- [61] Norouzi, M., Atık Lastiklerin Pirolizi İle Üretilen Nano Karbon Karasının Harçta Kullanımı Ve Harcin Özelliklerine Etkileri (Y.Lisans Tezi) Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum. 2016.

- [62] İpek, M., Reaktif pudra betonlarının mekanik davranışına katılma süresince uygulanan sıkıştırma basıncının etkileri. (Doktora Tezi) Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya. 2009.
- [63] Campbell, F.C., Structural composite materials. 2010: ASM international.
- [64] Consortium, i., Introduction to Conductive Polymer Composites. 2011: Smithers Rapra.
- [65] Ren, Z., Y. Lan, and Y. Wang, Aligned carbon nanotubes: physics, concepts, fabrication and devices. 2012: Springer Science & Business Media.
- [66] Long, C.M., M.A. Nascarella, and P.A. Valberg, Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: physical and chemical distinctions. Environmental pollution, 2013. 181: p. 271-286.
- [67] Novoselov, K.S., V. Fal, L. Colombo, P. Gellert, M. Schwab, and K. Kim, A roadmap for graphene. nature, 2012. 490(7419): p. 192.
- [68] Osmanoğlu, S., Carbon fiber reinforced composite sandwich panel design and optimization. (Y. Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş. 2018.
- [69] Turhan, E., Investigation of mechanical properties of composite materials made of carbon fibers with 1x1 Rib knitted structures. (Y. Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak Üniversitesi, Uşak. 2011.
- [70] Yaman, N., T. Öktem, and N. Seventekin, Karbon Liflerinin Özellikleri ve Kullanım Olanakları. Tekstil ve Konfeksiyon,(2), 2007: p. 90-95.
- [71] Madhavi, T.C. and S. Annamalai, Electrical Conductivity of Concrete. ARPN J. Eng. Appl. Sci, 2006. 11(9): p. 5979-5982.
- [72] ACI, ACI manual of concrete practice, ACI 544.3R-93. ASTM. (1998). "Standard test method for flexural toughness and firstcrack strength of fiber-reinforced concrete using beam with thirdpoint loading." Book of ASTM standards, Philadelphia, 04.02, 506– 513, 1993.
- [73] Zeynal, E., Effect of water/cement ratio and fiber content on mechanical properties and impact resistance of steel fiber reinforced concrete mixtures. (Y. Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi , İzmir. 2008.
- [74] Koç, A., Pamuklu Tekstil Atıklarından Selüloz Eldesi, Metil Selüloz Sentezi, Karakterizasyonu Ve Kullanım Alanlarının Araştırılması. (Y. Lisans) fen bilimleri enstitüsü, kahramanmaraş üniversitesi, kahramanmaraş. 2015.
- [75] Salarİfar, B., Karboksi metil selüloz üretimi ve üretimdeki gelişmeler. (Y. Lisans), Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara. 1992.

- [76] Chen, B., K. Wu, and W. Yao, Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 2004. 26(4): p. 291-297.
- [77] Dehghanpour, H., Synthesis and characterization of polypyrrole and different carbon structures based nanocomposites for supercapacitors, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk üniversitesi, Erzurum*. 2015.
- [78] Şat, F., *Yariiletkenlerde Iletkenlik Ölçümleri*. 2007.
- [79] Parlak, C.I., First Principles Investigation Of Lattice Dynamical Properties Of Cu-Based Chalcopyrite Semiconductors And High Dielectric Constant Materials, In *The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of The Abant Izzet Baysal University*. 2008.
- [80] Zerilli, F., Conductivity and resistance. *Physnet*, 2001: p. 1-20.
- [81] Khalid, T., L. Albasha, N. Qaddoumi, and S. Yehia, Feasibility study of using electrically conductive concrete for electromagnetic shielding applications as a substitute for carbon-laced polyurethane absorbers in anechoic chambers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017. 65(5): p. 2428-2435.
- [82] Alafogianni, P., P. Dalla, I. Tragazikis, N.-M. Barkoula, and T. Matikas. Rapid chloride permeability test for durability study of carbon nanoreinforced mortar. in *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration 2015*. 2015. International Society for Optics and Photonics.
- [83] Filho, J.H., M.d. Medeiros, E. Pereira, P. Helene, and G. Isaia, High-volume fly ash concrete with and without hydrated lime: chloride diffusion coefficient from accelerated test. *Journal of materials in civil engineering*, 2012. 25(3): p. 411-418.
- [84] Pilvar, A., A.A. Ramezaniapour, and H. Rajaie, Modified electrical conductivity test method for evaluation concrete permeability. *Computers and Concrete*, 2015. 16(6): p. 865-880.
- [85] Monfore, G., *The electrical resistivity of concrete*. 1968.
- [86] Choo, H. and S. Burns, Review of Archie's equation through theoretical derivation and experimental study on uncoated and hematite coated soils. *Journal of Applied Geophysics*, 2014. 105: p. 225-234.
- [87] Pfannkuch, H.O., On the correlation of electrical conductivity properties of porous systems with viscous flow transport coefficients, in *Developments in Soil Science*. 1972, Elsevier. p. 42-54.
- [88] Tuan, C.Y., Implementation of conductive concrete for deicing (Roca Bridge). 2008.

- [89] Chang, C., M. Ho, G. Song, Y.-L. Mo, and H. Li, A feasibility study of self-heating concrete utilizing carbon nanofiber heating elements. *Smart Materials and Structures*, 2009. 18(12): p. 127001.
- [90] Chuang, W., J. Geng-sheng, L. Bing-liang, P. Lei, F. Ying, G. Ni, and L. Ke-zhi, Dispersion of carbon fibers and conductivity of carbon fiber-reinforced cement-based composites. *Ceramics International*, 2017. 43(17): p. 15122-15132.
- [91] Wang, X.C., H.T. Liu, and L. Zhou. Experimental Research on Mechanical Behavior of Carbon Fiber Reinforced Concrete. in *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Trans Tech Publ.
- [92] Zhou, L., J.W. Wang, and H.T. Liu. Experimental Research on Mechanical Behavior of Carbon Fiber Reinforced Concrete Beam. in *Advanced Materials Research*. 2013. Trans Tech Publ.
- [93] Chang, C., G. Song, D. Gao, and Y. Mo, Temperature and mixing effects on electrical resistivity of carbon fiber enhanced concrete. *Smart materials and structures*, 2013. 22(3): p. 035021.
- [94] Tang, H., X. Chen, and Y. Luo, Electrical and dynamic mechanical behavior of carbon black filled polymer composites. *European polymer journal*, 1996. 32(8): p. 963-966.
- [95] Shi, L., Y. Lu, and Y. Bai, Mechanical and electrical characterisation of steel fiber and carbon black engineered cementitious composites. *Procedia Engineering*, 2017. 188: p. 325-332.
- [96] Rejon, L., A. Rosas-Zavala, J. Porcayo-Calderon, and V. Castano, Percolation phenomena in carbon black-filled polymeric concrete. *Polymer Engineering & Science*, 2000. 40(9): p. 2101-2104.
- [97] Ding, Y., Z. Chen, Z. Han, Y. Zhang, and F. Pacheco-Torgal, Nano-carbon black and carbon fiber as conductive materials for the diagnosing of the damage of concrete beam. *Construction and Building Materials*, 2013. 43: p. 233-241.
- [98] Mikulova, Z., I. Sedenkova, L. Matejova, M. Večeř, and V. Dombek, Study of carbon black obtained by pyrolysis of waste scrap tyres. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 2013. 111(2): p. 1475-1481.
- [99] Sassani, A., H. Ceylan, S. Kim, A. Arabzadeh, P.C. Taylor, and K. Gopalakrishnan, Development of carbon fiber-modified electrically conductive concrete for implementation in Des Moines International Airport. *Case studies in construction materials*, 2018. 8: p. 277-291.
- [100] Yahaghi, J., Z.C. Muda, and S.B. Beddu, Impact resistance of oil palm shells concrete reinforced with polypropylene fibre. *Construction and building materials*, 2016. 123: p. 394-403.

- [101] Shah, S.P., J.I. Daniel, S.H. Ahmad, M. Arockiasamy, P. Balaguru, C.G. Ball, H.P. Ball, G.B. Batson, A. Bentur, and R.J. Craig, Measurement of properties of fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 1988. 85(6): p. 583-593.
- [102] Nili, M. and V. Afrouhsabet, The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 2010. 24(6): p. 927-933.
- [103] Dehghanpour, H. and K. Yilmaz, Mechanical And Impact Behavior On Recycled Steel Fiber Reinforced Cementitious Mortars. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2018. 39(3): p. 67-84.
- [104] Ghosh, P. and Q. Tran, Influence of parameters on surface resistivity of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2015. 62: p. 134-145.



EKLER

EK A: Deney ve laboratuvar çalışmaları ile ilgili fotoğraflar



şekil A.1. Üretim sırasında malzemelerin hazırlanması.



şekil A.2. NKS katkılı beton karışım örneği.



Şekil A.3. Basınç numunelerin kırılma şekli.

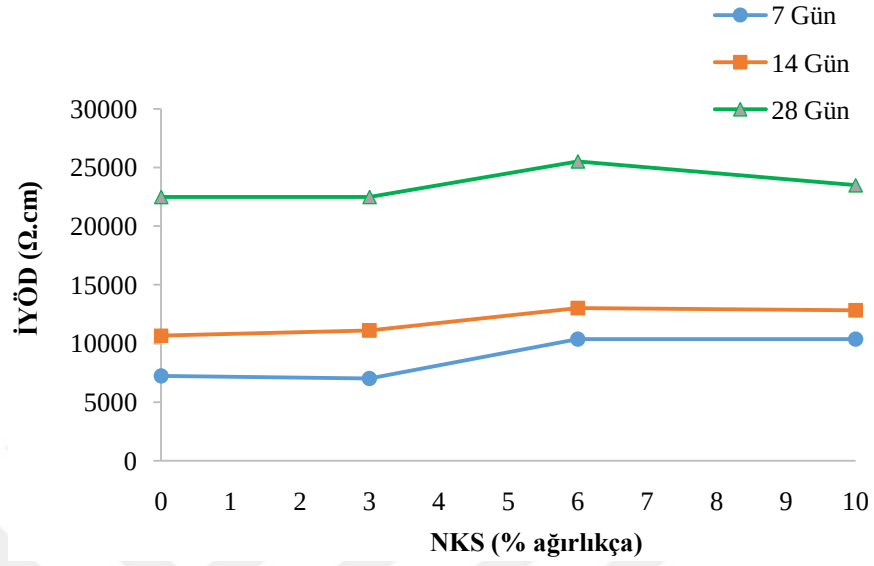


Şekil A.4. Eğme deney sonrası numunede meydana gelen kırılma.

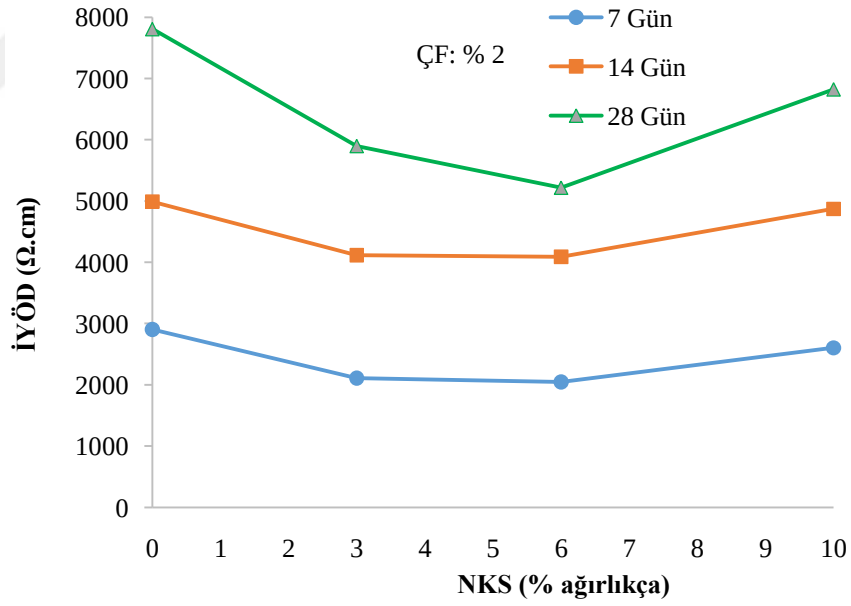


Şekil A.5. Çarpma deney sonrası plaka numunesinin arka yüzeyinden görünüş.

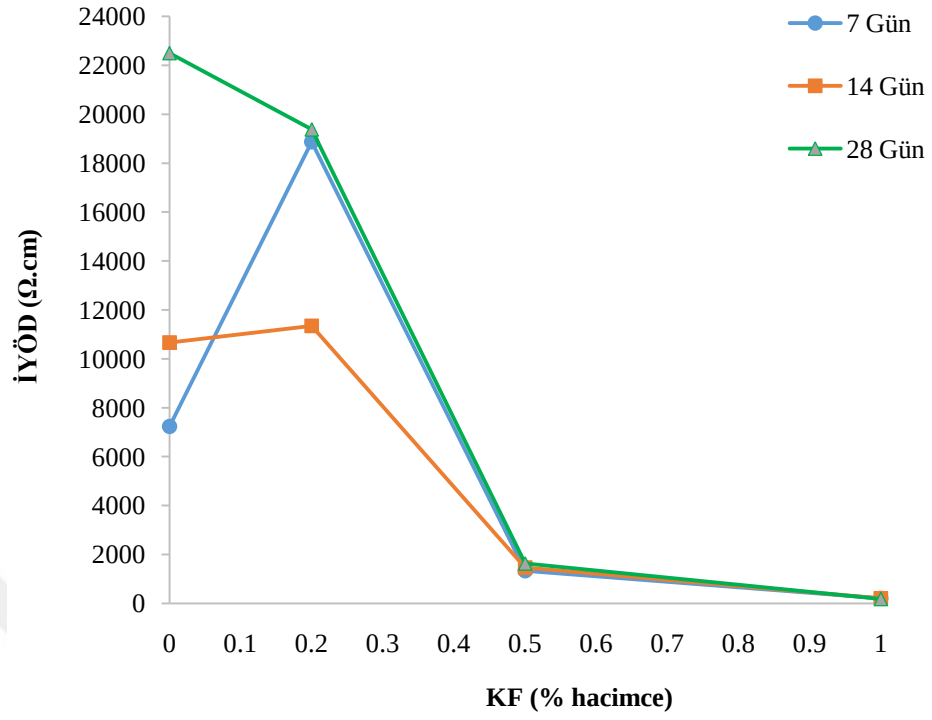
EK B: Deney Sonuçlarına Ait Ek Grafikler



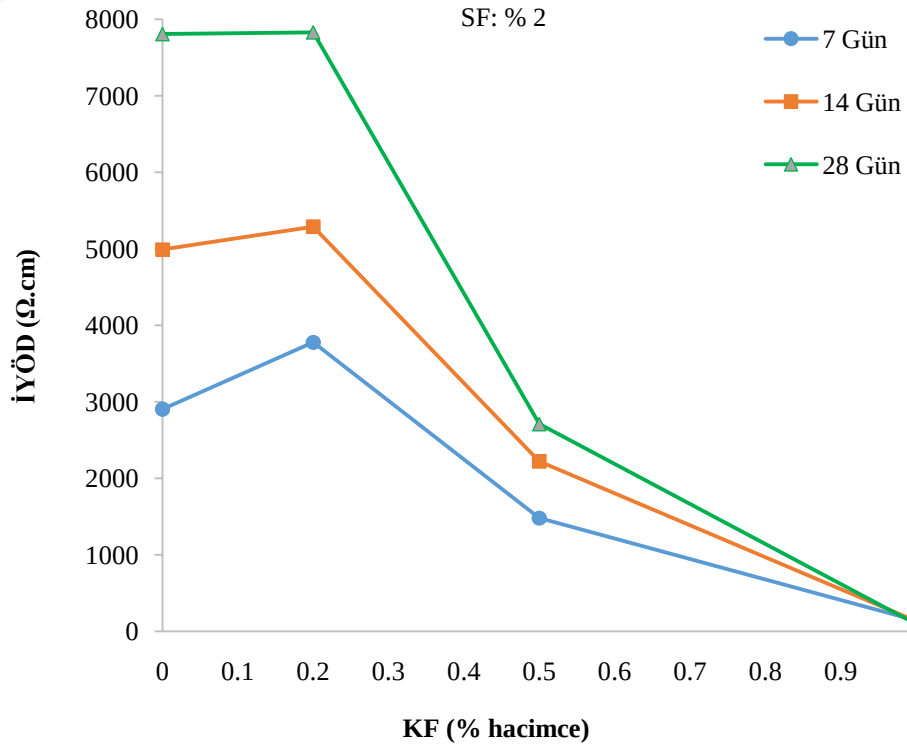
Şekil B.1. Farklı oranlarda NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



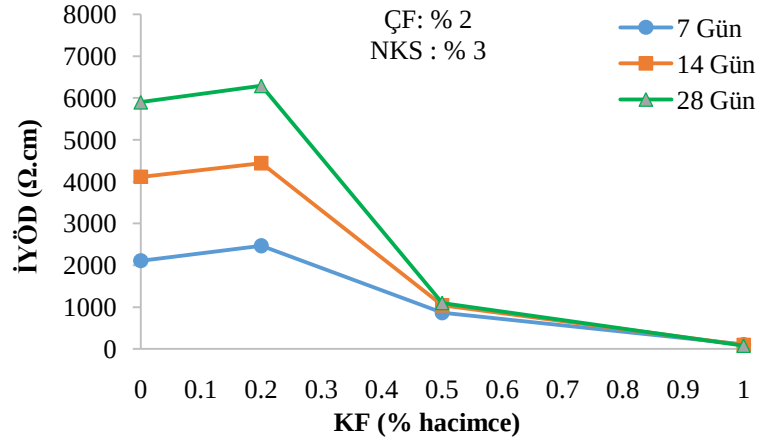
Şekil B.2. Farklı oranlarda NKS ve % 2 ÇF içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



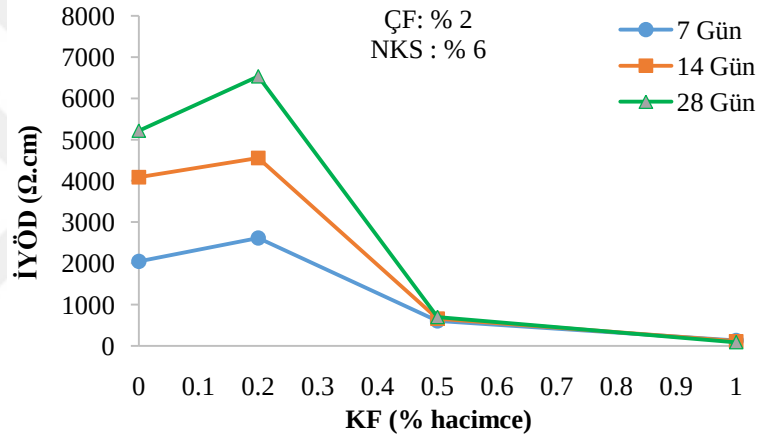
Şekil B.3. Farklı oranlarda KF içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



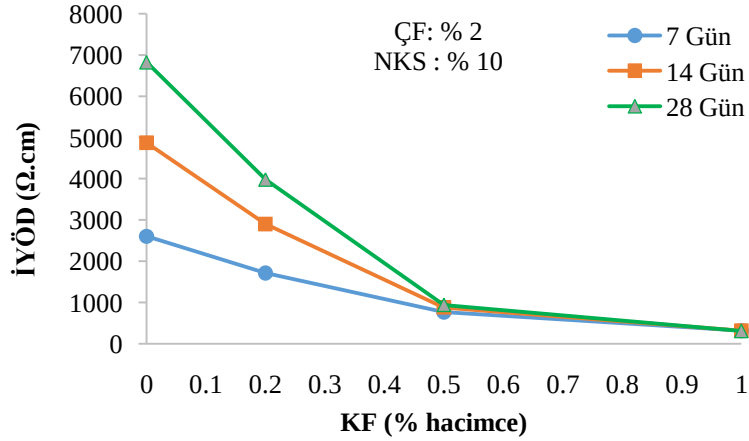
Şekil B.4. Farklı oranlarda KF ve % 2 ÇF içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



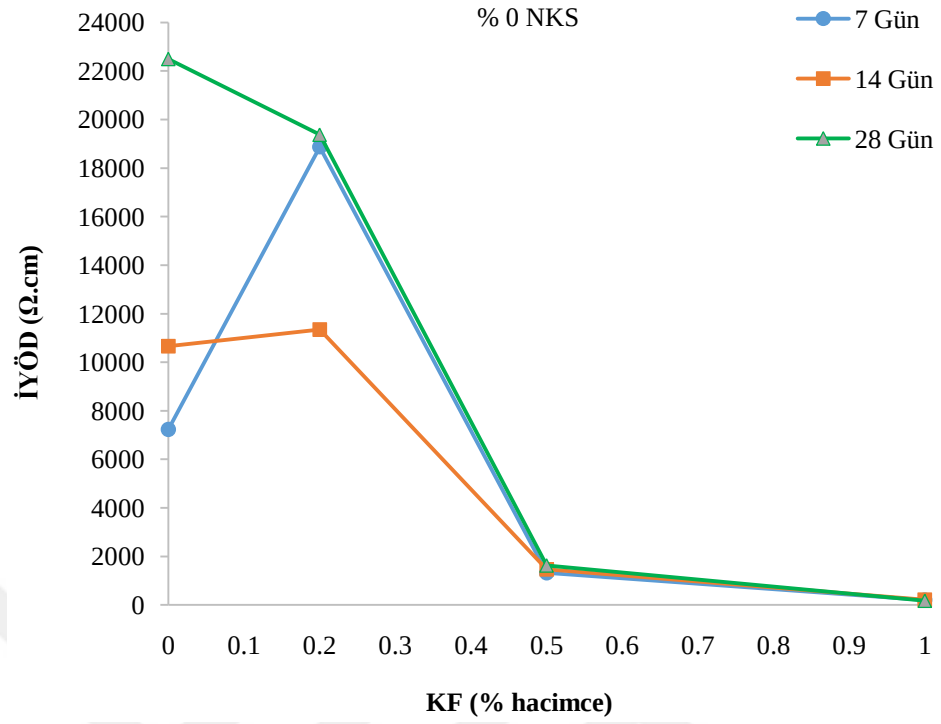
Şekil B.5. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 3 NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



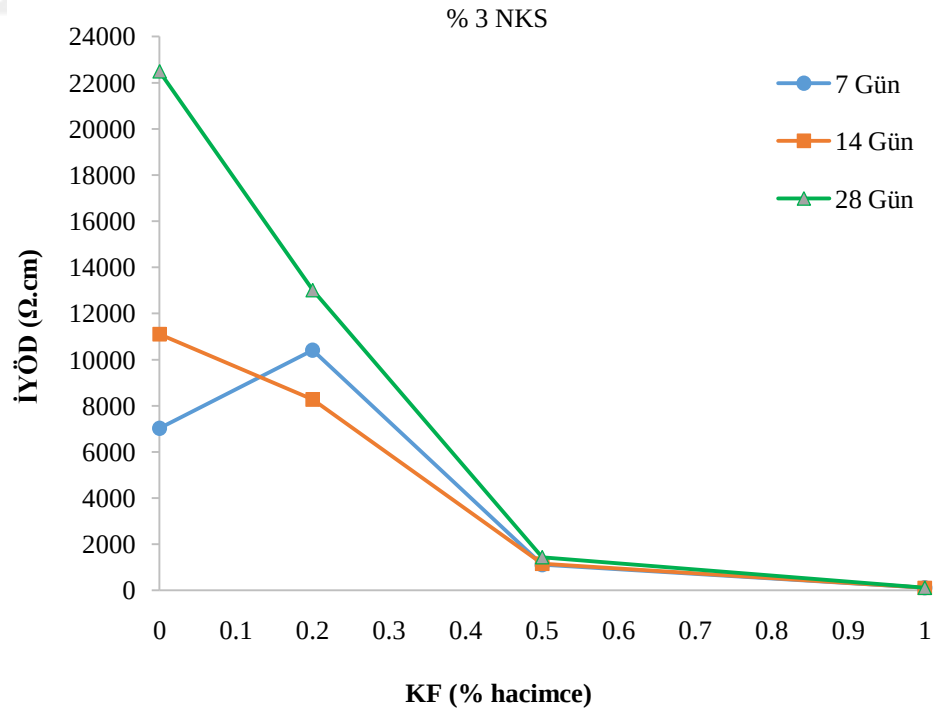
Şekil B.6. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 6 NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



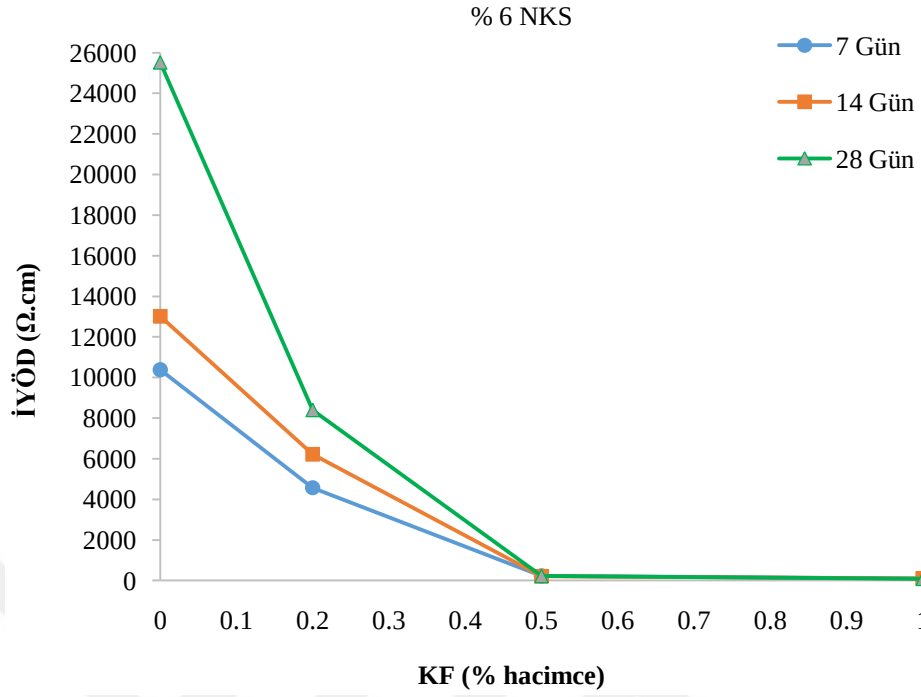
Şekil B.7. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 10 NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



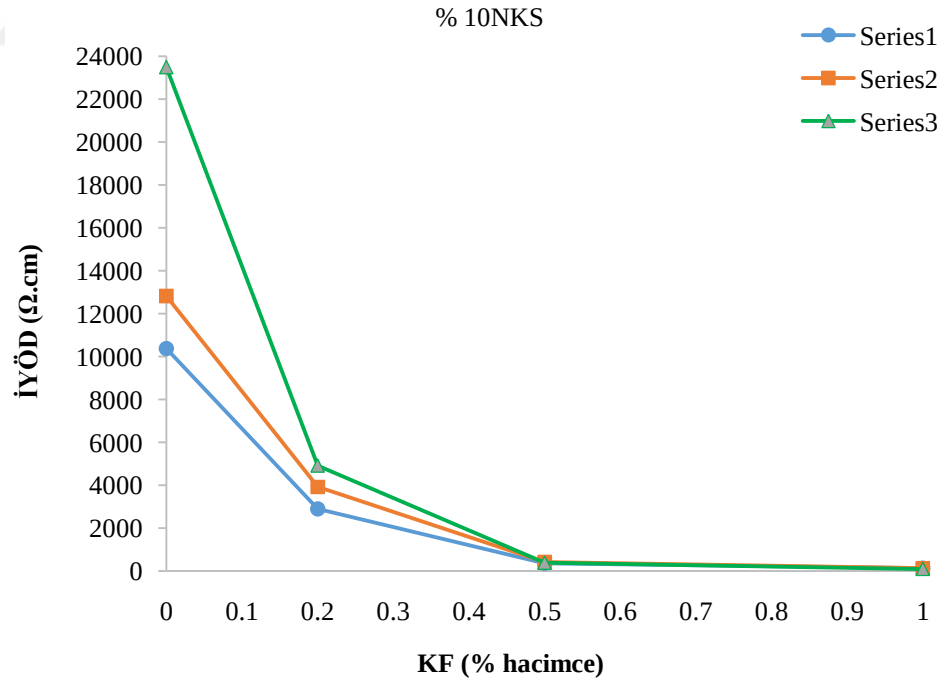
Şekil B.. Farklı oranlarda KF ve % 0 NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



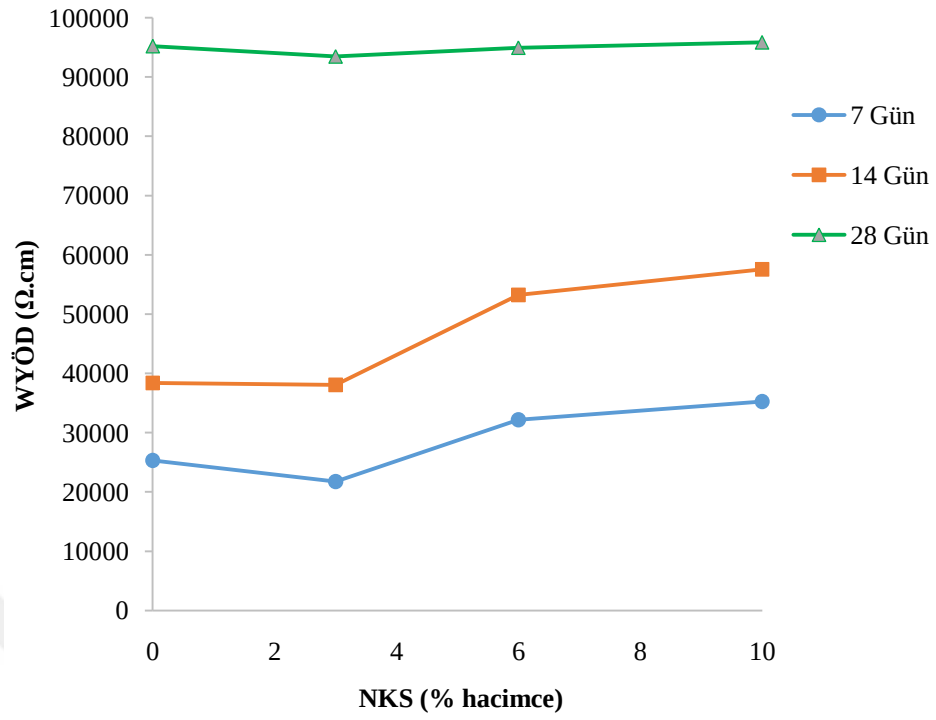
Şekil B.8. Farklı oranlarda KF ve % 3 NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



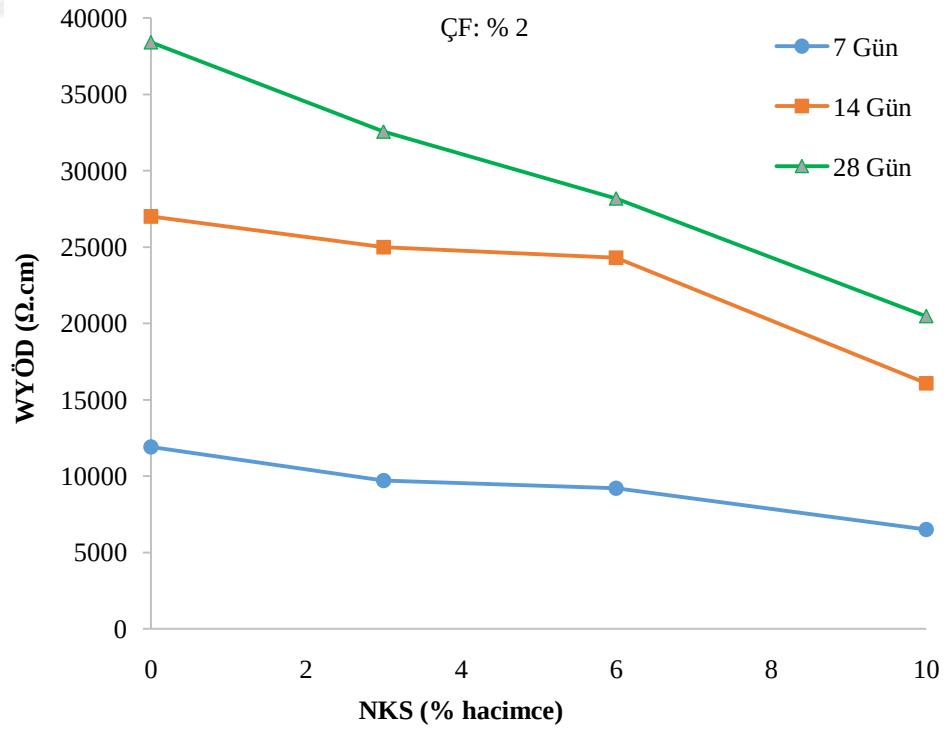
Şekil B.9. Farklı oranlarda KF ve % 6 NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



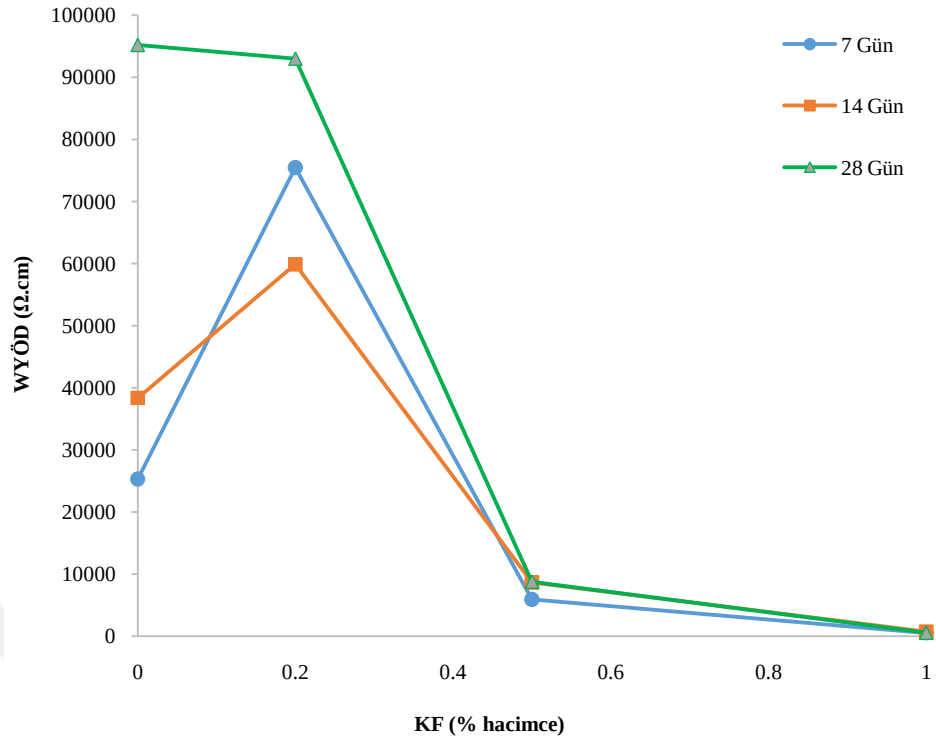
Şekil B.10. Farklı oranlarda KF ve % 10 NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



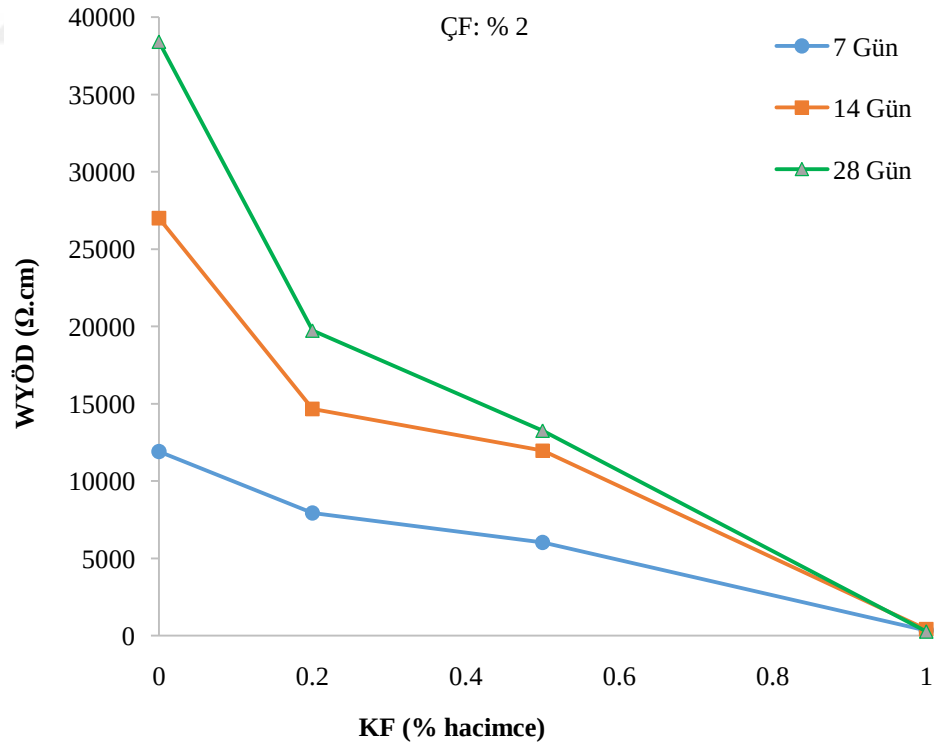
Şekil B.11 Farklı oranlarda NKS içeren karışımların wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



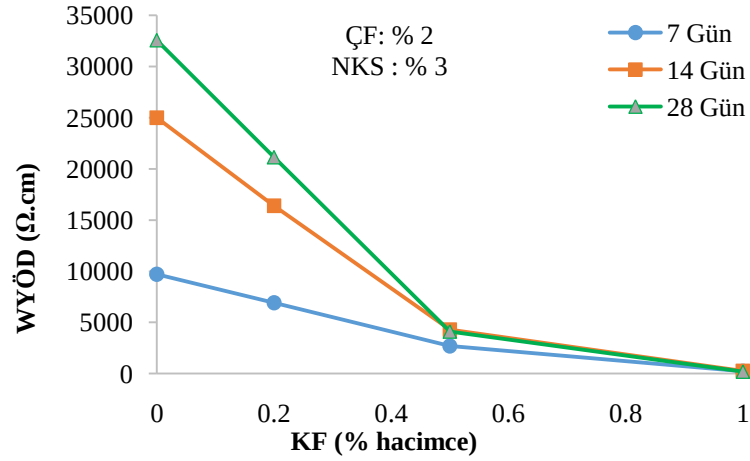
Şekil B.12. Farklı oranlarda NKS ve % 2 ÇF içeren karışımların wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri



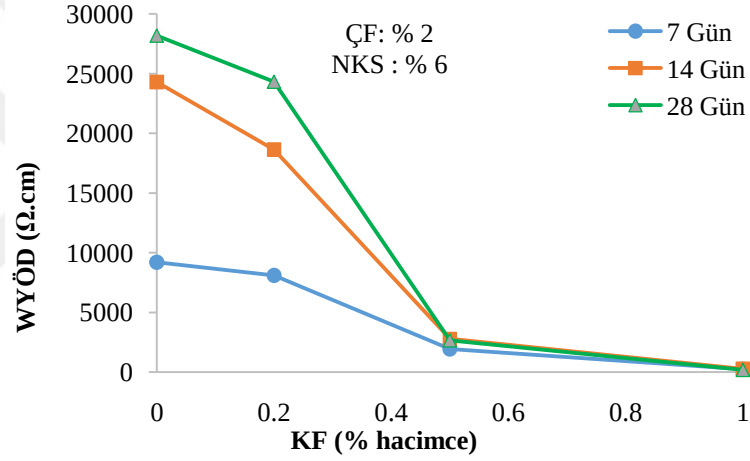
Şekil B.13. Farklı oranlarda KF içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



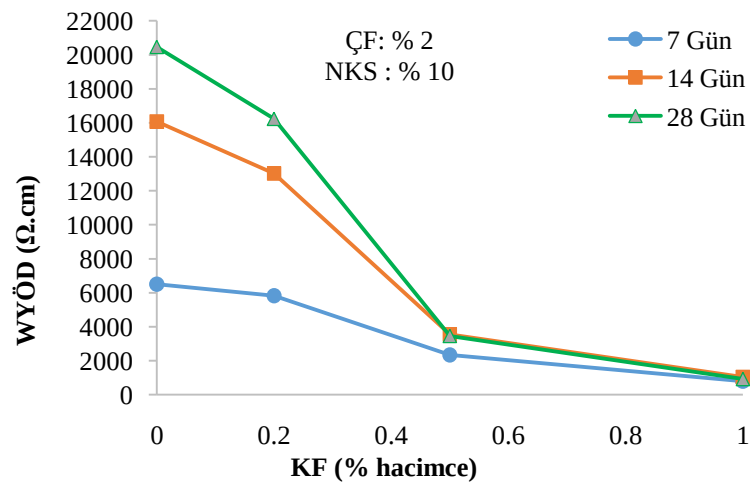
Şekil B.14. Farklı oranlarda KF ve % 2 ÇF içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



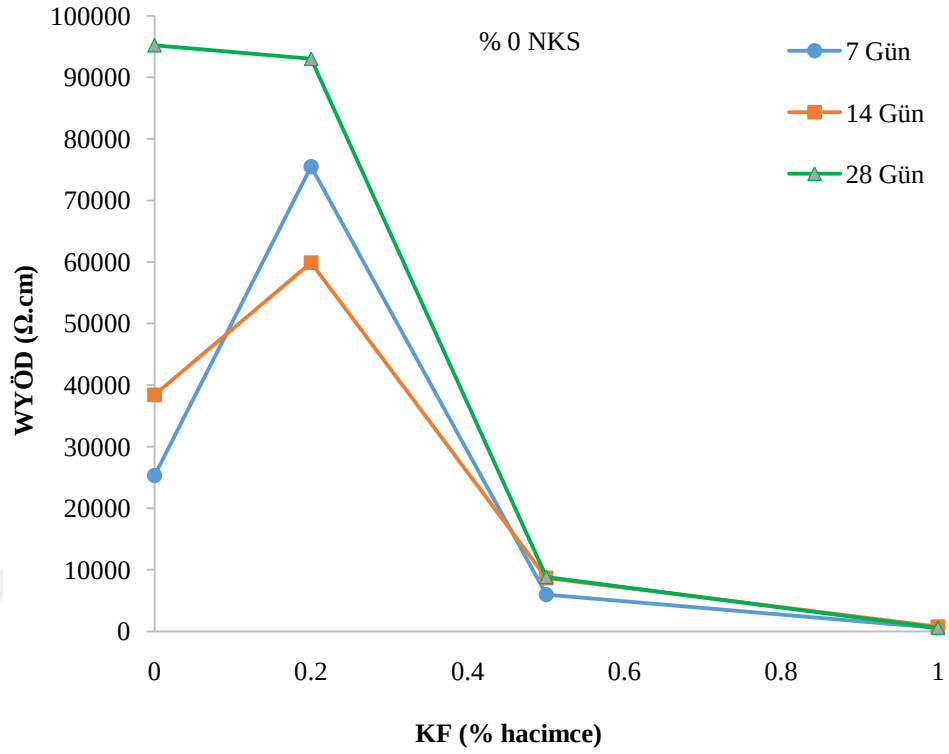
Şekil B.15. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 3 NKS içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



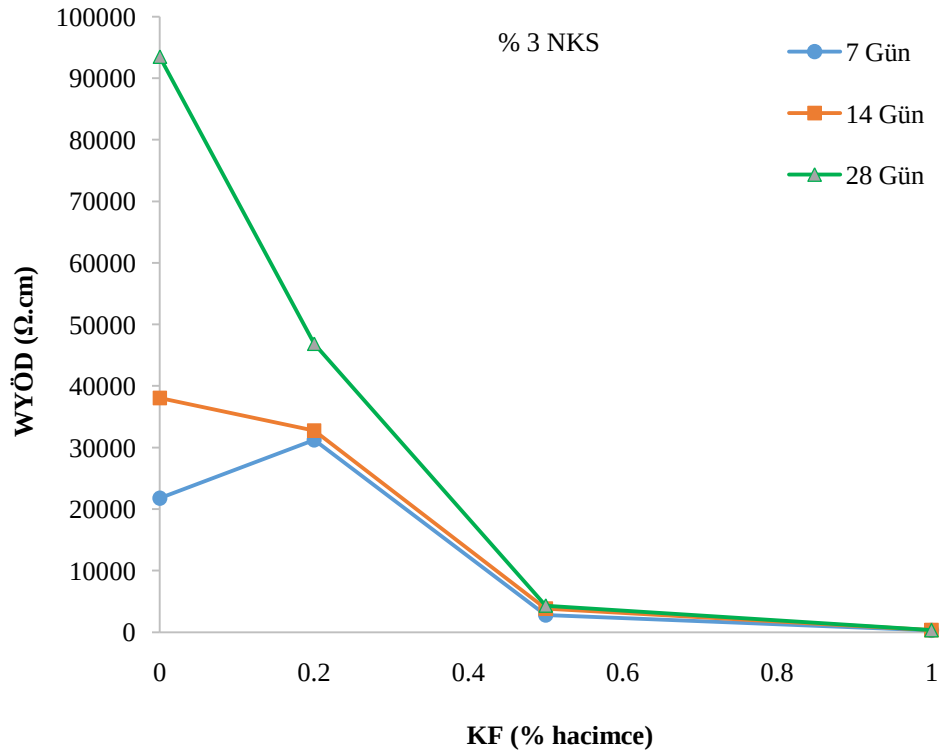
Şekil B.16. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 6 NKS içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



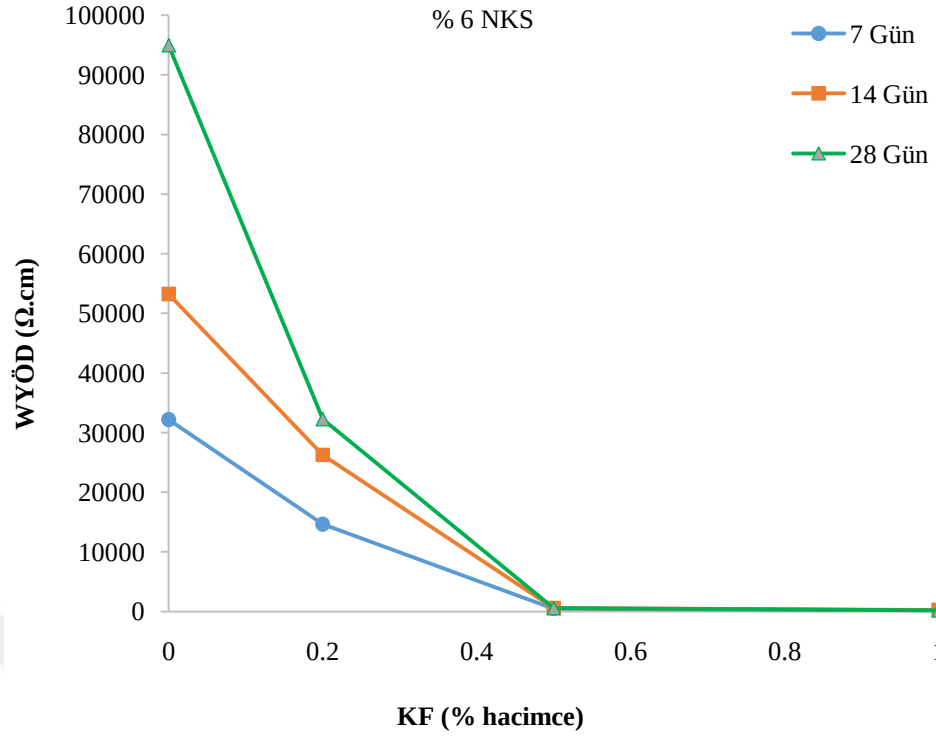
Şekil B.17. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 1 NKS içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



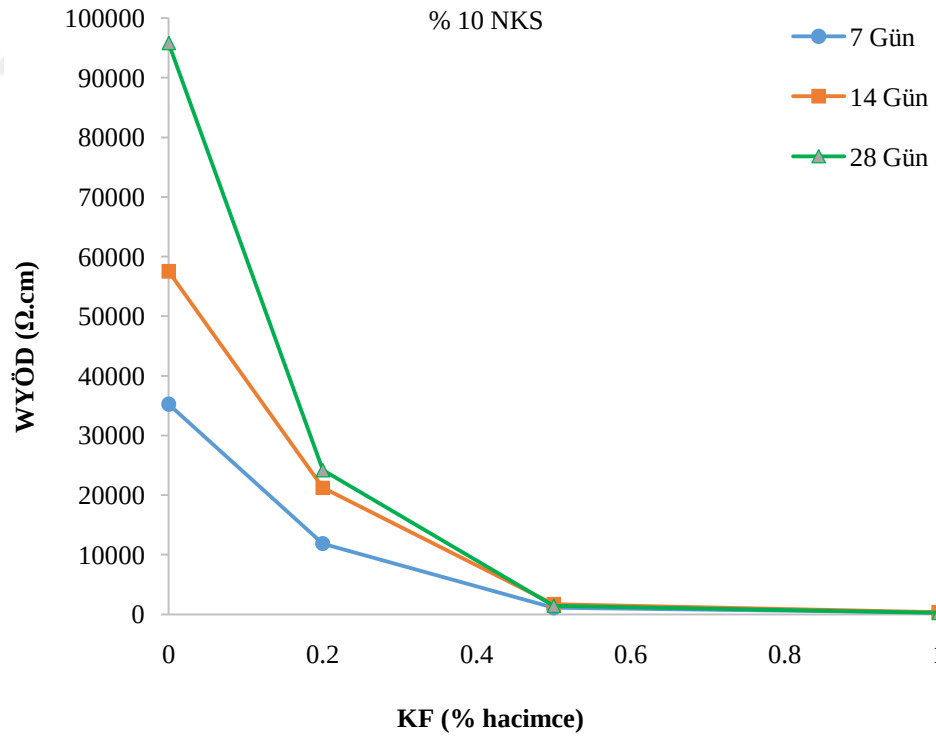
Şekil B.18. Farklı oranlarda KF ve % 0 NKS içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



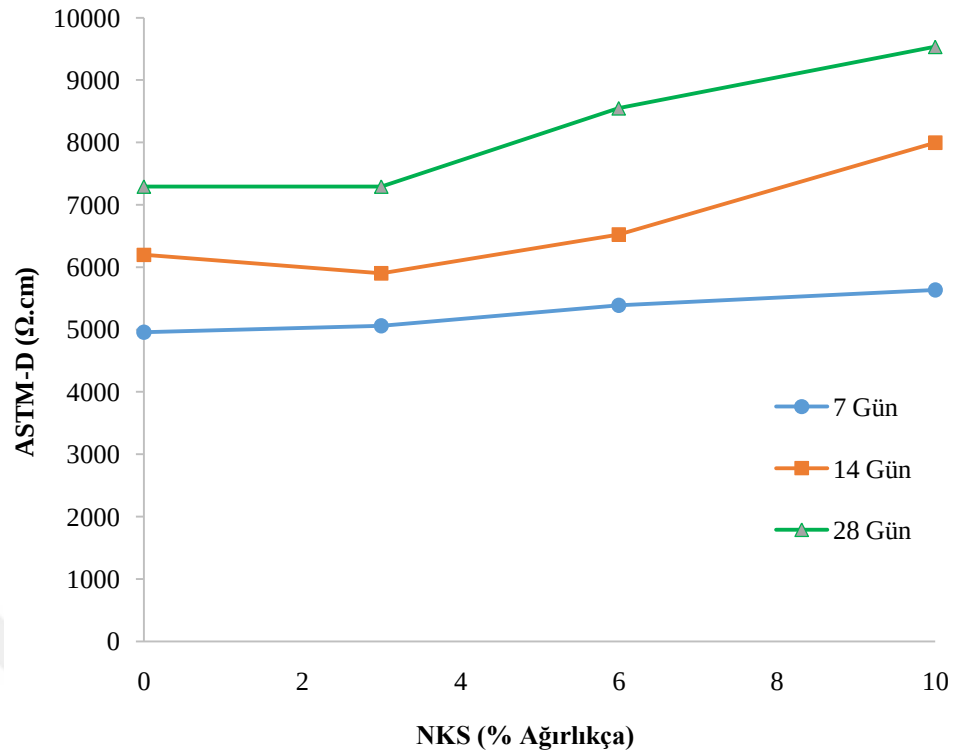
Şekil B.19. Farklı oranlarda KF ve % 3 NKS içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



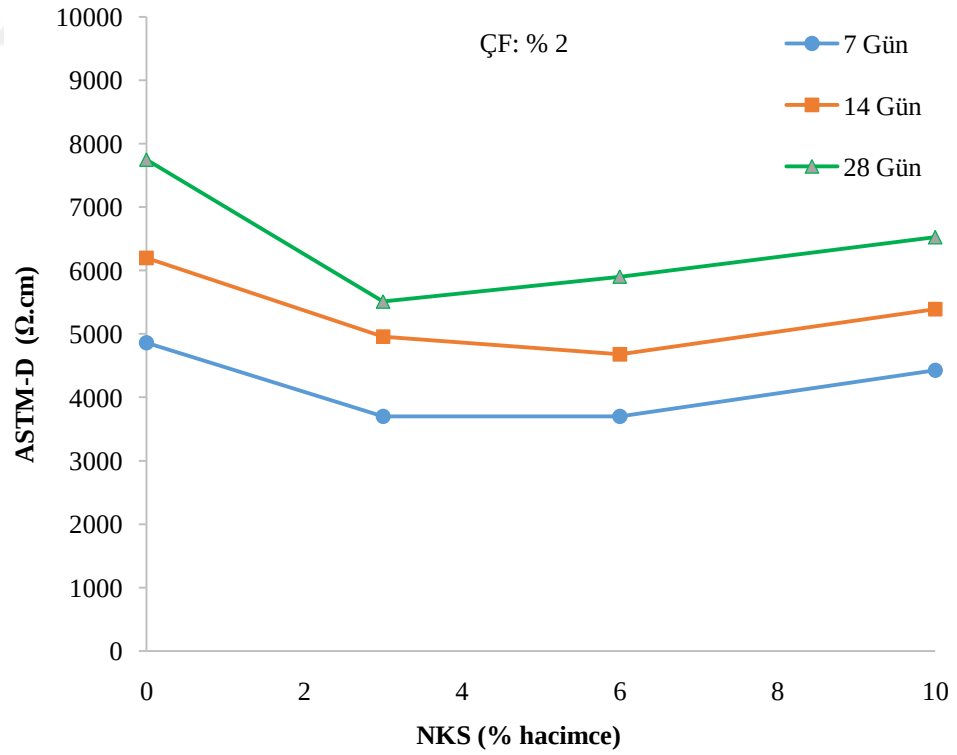
Şekil B.20. Farklı oranlarda KF ve % 6 NKS içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



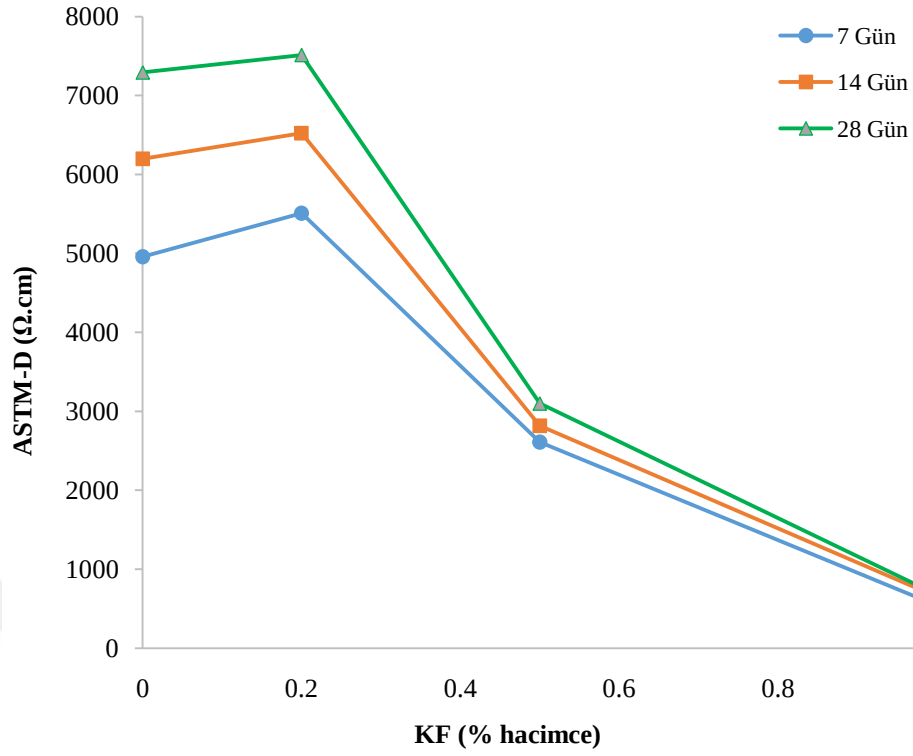
Şekil B.21. Farklı oranlarda KF ve % 10 NKS içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



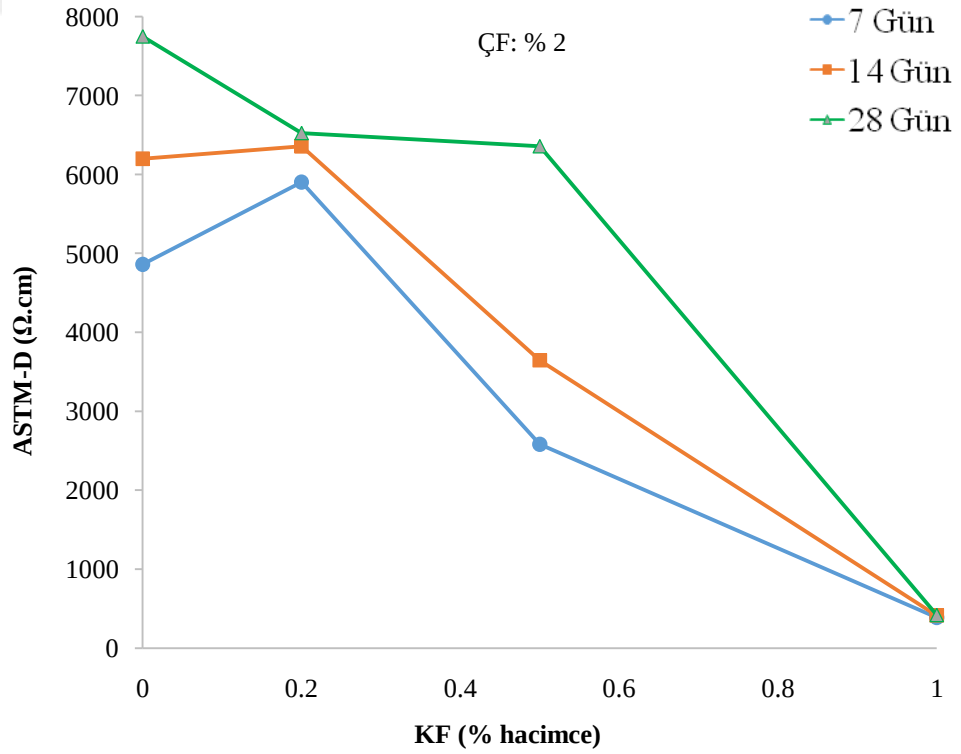
Şekil B.22. Farklı oranlarda NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



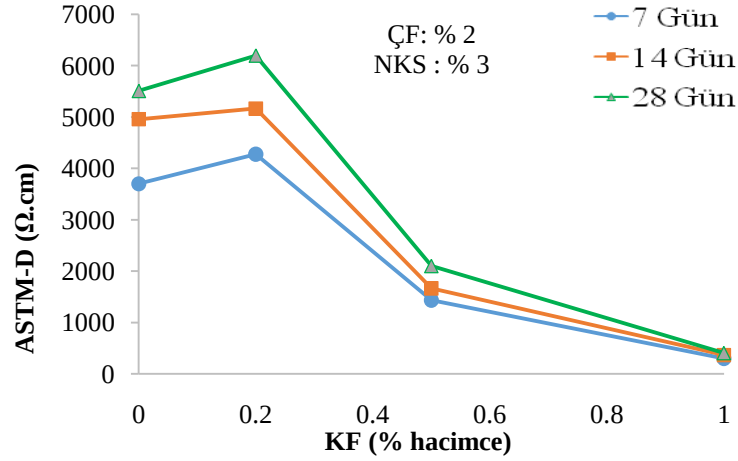
Şekil B.23. Farklı oranlarda NKS v % 2 ÇF içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



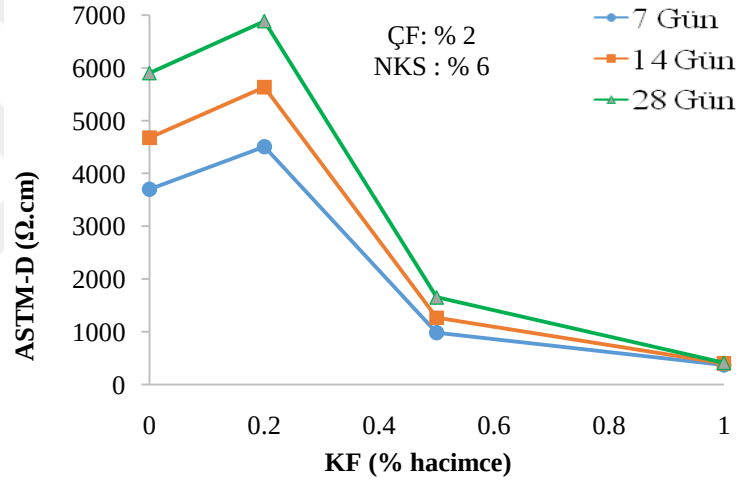
Şekil B.24. Farklı oranlarda KF içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



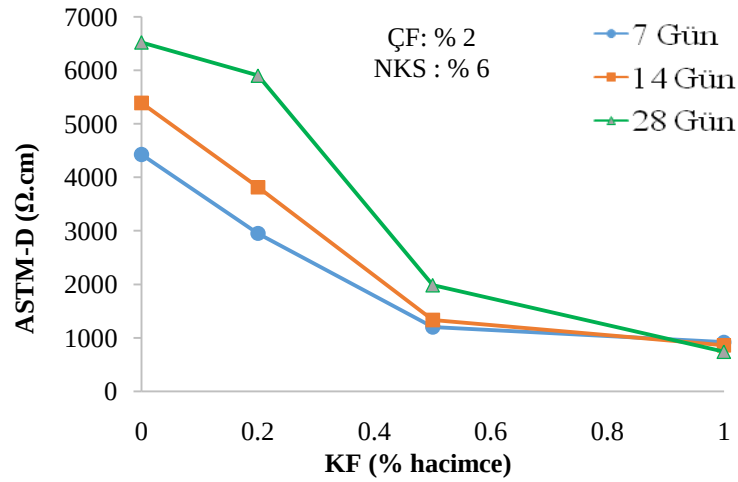
Şekil B.25. Farklı oranlarda KF ve % 2 ÇF içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



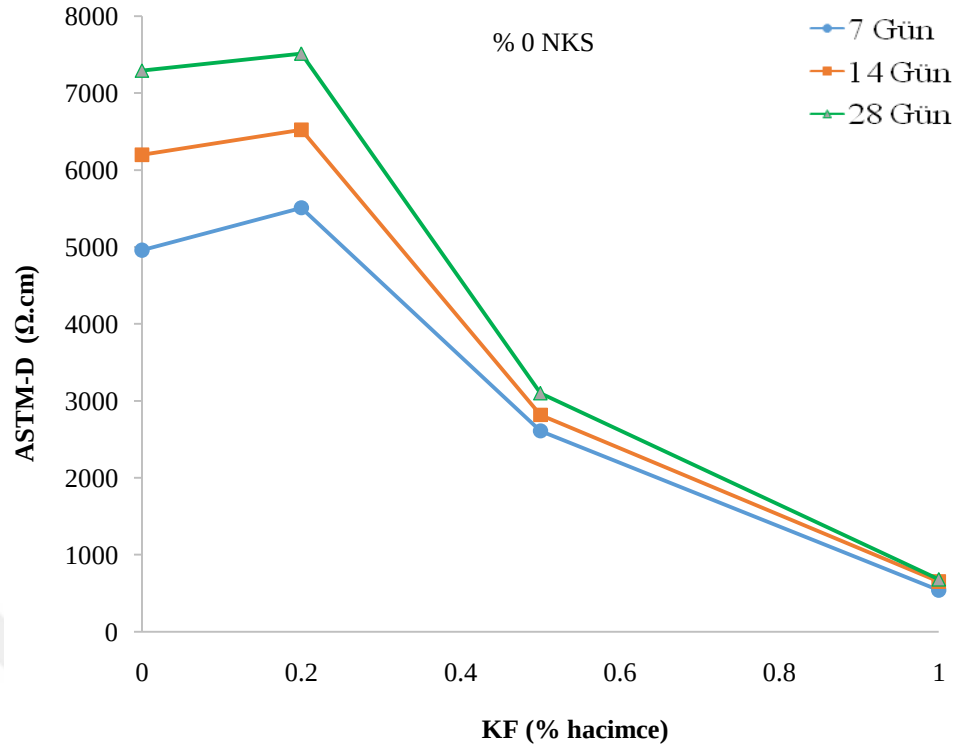
Şekil B.26. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 3 NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



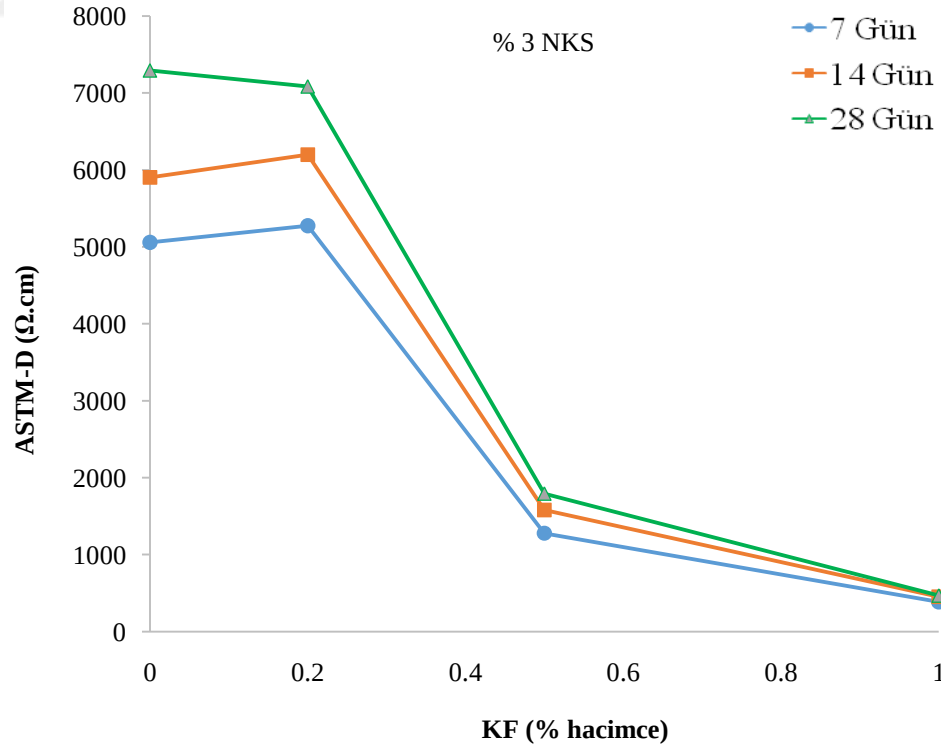
Şekil B.27. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 6 NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



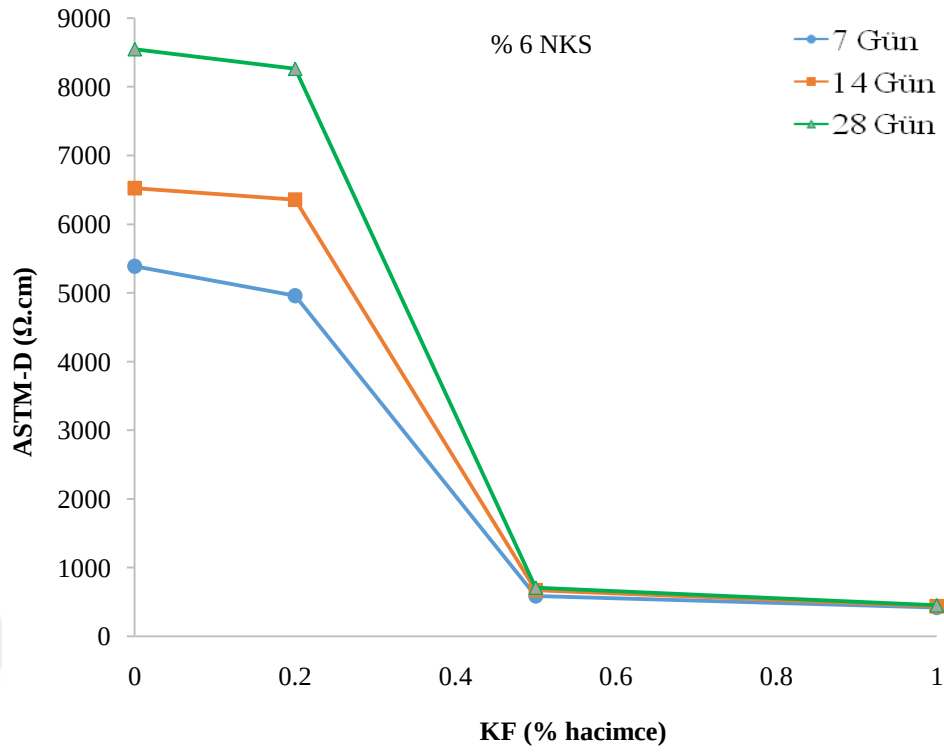
Şekil B.28. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 10 NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



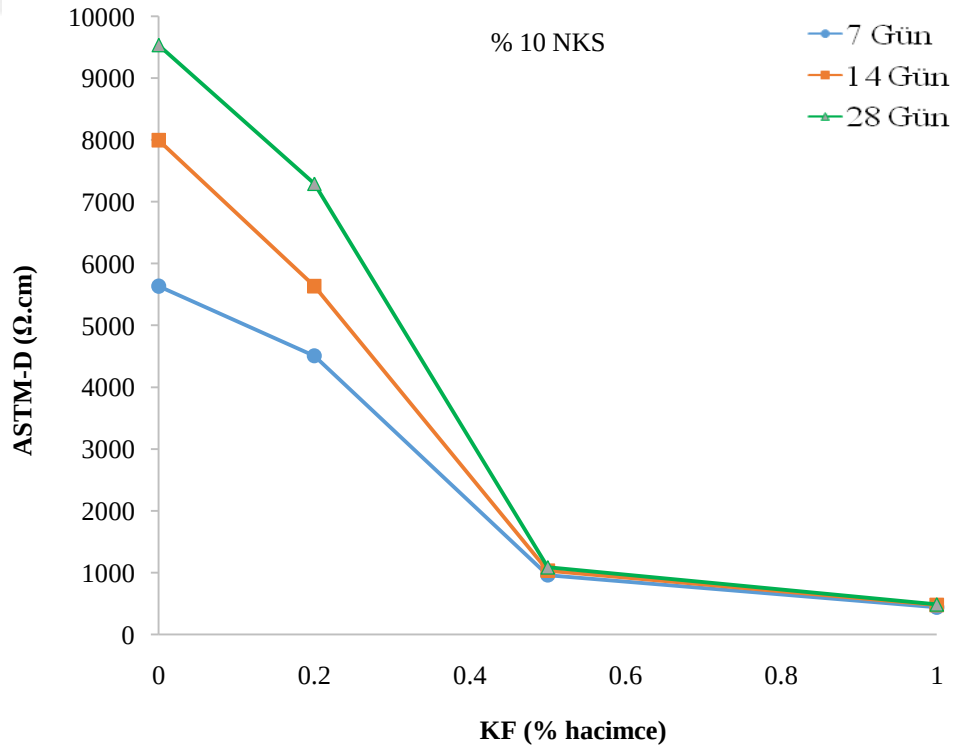
Şekil B.29. Farklı oranlarda KF ve % 0 NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



Şekil B.30. Farklı oranlarda KF ve % 3 NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



Şekil B.31. Farklı oranlarda KF ve % 6 NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



Şekil B.32. Farklı oranlarda KF ve % 10 NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.

ÖZGEÇMİŞ

Heydar DEHGHANPOUR, 1987 yılında İran'ın Doğu Azerbaycan ilinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini aynı ilde tamamladı. 2005 yılında girdiği Azad Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nden, 2009 yılında, İnşaat Mühendisi ünvanıyla mezun oldu. 2013 Yılında, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nanomühendislik Ana Bilim Dalı'nda başladığı Yüksek Lisansı 2015'de bitirdi. 2015'in birinci döneminde Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisi Bölümü'nde Doktora eğitimine başladı ve aynı eğitim öğretim yılının ikinci dönemi, Sakarya Üniversitesi aynı Enstitü be bölümde eş zamanlı ikinci yüksek lisans programına başladı. Halen Sakarya Ünivesitesi İnşaat Mühendisi Bölümünde Doktora eğitimine devam etmektedir.