

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

**HAVALİMANI PİSTLERİNDE DONMAYI ENGELLEMELİK  
AMACIYLA ELEKTROTERMAL ÖZELLİKLERE SAHİP  
BETONLARIN ÜRETİMİ VE İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Heydar DEHGHANPOUR**

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

**Eylül 2019**

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

**HAVALİMANI PİSTLERİNDE DONMAYI ENGELLEMEK**  
**AMACIYLA ELEKTROTERMAL ÖZELLİKLERE SAHİP**  
**BETONLARIN ÜRETİMİ VE İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Heydar DEHGHANPOUR**

**Enstitü Anabilim Dalı** : **İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı** : **YAPI MALZEMESİ**

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

**Prof. Dr.**  
**Kemalettin YILMAZ**  
**Jüri Başkanı**

**Prof. Dr.**  
**İsmail Ayhan ŞENGİL**  
**Üye**

**Prof. Dr.**  
**Metin İPEK**  
**Üye**

**Prof. Dr.**  
**Mensur SÜMER**  
**Üye**

**Prof. Dr.**  
**Mehmet BAYRAK**  
**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

1.09.2019

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen 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. Bu süreçte bilgi ve tecrübesinden istifade ettiğim değerli hocalarım Prof. Dr. İsmail Ayhan ŞENGÜL ve Prof. Dr. Mensur SÜMER'e 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.

Doktora çalışmalarımında maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2018-50-02-002) teşekkür ederim.

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



## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	ix
TABLolar LİSTESİ .....	xiv
ÖZET .....	xv
SUMMARY .....	xvi

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
1.1. Kaynak Araştırması .....	1
1.2. Literatür Özeti .....	4

### BÖLÜM 2.

KURAMSAL TEMELLER .....	15
2.1. Hidronik Isıtmalı Yol Kaplama Sistemleri (HIYKS) .....	15
2.2. Elektrikli Isıtmalı Yol Kaplama Sistemleri (EİYKS) .....	17
2.3. Piroлиз Yöntemi İle Atık Lastiklerden Karbon Siyahı Üretimi .....	18
2.4. Karbon Fiber .....	20
2.5. Çelik Fiber .....	20
2.6. Karboksi Metil Selüloz .....	22
2.7. Elektriksel İletkenlik .....	22
2.8. Bant Enerjileri .....	23
2.9. Ohm Yasası.....	24
2.10. Elektriksel İletken Beton .....	25
2.11. Betonun Elektriksel İletkenliği .....	26

### BÖLÜM 3.

MATERYAL VE TEMEL DENEY YÖNTEMLERİ .....	30
3.1. Materyal .....	30
3.1.1. Çimento .....	31
3.1.2. Agrega .....	33
3.1.3. Su .....	33
3.1.4. Karbon fiber (KF) .....	33
3.1.5. Nano karbon siyahı (NKS) .....	34
3.1.6. Çelik fiber (ÇF) .....	37
3.1.7. Kimyasal katkılar .....	37
3.2. Karışım Tasarımı .....	38
3.3. Karışımların Kalıplanması .....	39
3.4. Numunelerin Kür İşlemi .....	40
3.5. Test Yöntemleri .....	46
3.5.1. Mekaniksel test yöntemleri .....	46
3.5.2. Çarpma test yöntemi .....	47
3.5.3. Elektriksel direnç ölçme test yöntemleri .....	48

### BÖLÜM 4.

TEMEL DENEYLERDE ARAŞTIRMA BULGULARI .....	51
4.1. Elektriksel Direnç (ED) Deneyleri .....	51
4.1.1. NKS ve KF'in İYÖD değerleri üzerinde ayrı ayrı etkileri .....	54
4.1.2. NKS ile KF'in birlikte İYÖD değerleri üzerinde etkileri .....	55
4.1.3. NKS, KF ve ÇF'in üçü birlikte İYÖD değerleri üzerinde etkileri .....	56
4.1.4. ATE içeren karışımların İYÖD değerleri .....	57
4.1.5. NKS ve KF'in WYÖD değerleri üzerinde ayrı ayrı etkileri ..	57
4.1.6. NKS ile KF'in birlikte WYÖD değerleri üzerinde etkileri .....	58
4.1.7. NKS, KF ve ÇF'in üçü birlikte WYÖD değerleri üzerinde etkileri .....	59
4.1.8. ATE içeren karışımların WYÖD değerleri .....	60

4.1.9. NKS ve KF'in ASTM-D değerleri üzerinde ayrı ayrı etkileri ..	61
4.1.10. NKS ile KF'in birlikte ASTM-D değerleri üzerinde etkileri .	62
4.1.11. NKS, KF ve F'in üçü birlikte ASTM-D değerleri üzerinde etkileri .....	63
4.2. Basınç Deneyleri .....	64
4.2.1. NKS ve KF'in basınç dayanımı üzerinde ayrı ayrı etkileri ....	64
4.2.2. NKS ile KF'in birlikte basınç dayanımı üzerinde etkileri .....	65
4.2.3. NKS, KF ve F'in üçü birlikte basınç dayanımı üzerinde etkileri .....	67
4.2.4. ATE içeren iletken betonların basınç deney sonuçları .....	68
4.3. Eğilme Deneyleri .....	68
4.3.1. NKS ve KF'in eğilme dayanımı üzerinde ayrı ayrı etkileri .....	68
4.3.2. NKS ile KF'in birlikte eğilme dayanımı üzerinde etkileri .....	69
4.3.3. NKS, KF ve F'in üçü birlikte eğilme dayanımı üzerinde etkileri .....	70
4.3.4. ATE içeren iletken betonların eğilme deney sonuçları .....	71
4.4. Çarpma Deneyleri .....	72
4.4.1. NKS ve KF'in çarpma enerjisi üzerinde ayrı ayrı etkileri .....	72
4.4.2. NKS ile KF'in birlikte çarpma enerjisi üzerinde etkileri .....	73
4.4.3. NKS, KF ve F'in üçü birlikte çarpma enerjisi üzerinde etkileri .....	74
4.4.4. ATE içeren iletken betonların çarpma sonuçları .....	75

## BÖLÜM 5.

ELEKTRİKLİ ISITMALI YOL KAPLAMA SİSTEMLERİ .....	77
5.1. 3D Elektrotermal Modelleme .....	77
5.1.1. Abaqus Programında Teorik Bilgiler .....	78
5.1.2. Elektriksel Analiz Prosedürleri .....	80
5.1.3. Eşleşmiş Termal-Elektrik Analizi .....	81
5.1.4. EİB plakaların Abaqus programında 3-D Modellenmesi .....	90
5.2. Deneysel Yöntem .....	93

## BÖLÜM 6.

EIYKS BULGULARI .....	99
6.1. N6K0.2Ç0'ın Elektrotermal Sonuçları .....	99
6.2. N6K0.5Ç0'ın Elektrotermal Sonuçları .....	101
6.3. N6K1Ç0'ın Elektrotermal Sonuçları .....	103
6.4. N6K0.2Ç2'nin Elektrotermal Sonuçları .....	105
6.5. N6K0.5Ç2'nin Elektrotermal Sonuçları .....	106
6.6. N6K1Ç2'nin Elektrotermal Sonuçları .....	107
6.7. N6K0E0.5'in Elektrotermal Sonuçları .....	108
6.8. N6K0E1'in Elektrotermal Sonuçları .....	109
6.9. N6K0.2E1'in Elektrotermal Sonuçları .....	110
6.10. N6K0.2E1.5'in Elektrotermal Sonuçları .....	111
6.11. Tüm Numunelerin Sıcaklık-Zaman Davranışları .....	112
6.12. N6K0.5Ç0'da sıcaklık dağılımı ve güç miktarı .....	113
6.13. N6K1Ç0'da sıcaklık dağılımı ve güç miktarı .....	115
6.14. N6K1Ç2'de sıcaklık dağılımı ve güç miktarı .....	117
6.15. N6K0.2E1'de sıcaklık dağılımı ve güç miktarı .....	119
6.16. N6K0.2E1.5'de sıcaklık dağılımı ve güç miktarı .....	122
6.17. Sıcaklık ile Özdirenç Arasındaki İlişki .....	124
6.18. Numunelerin Karlı Havadaki Performansları .....	125
6.19. EİB'lerde Performans Değerlendirilmesi .....	127
6.20. Karışım Optimizasyonu ve Numune Seçimi .....	129

## BÖLÜM 7.

TARTIŞMA VE SONUÇ .....	132
7.1. Elektriksel direnç sonuçları .....	132
7.2. Basınç dayanım sonuçları .....	134
7.3. Eğilme dayanım sonuçları .....	135
7.4. Çarpma enerjisi sonuçları .....	135
7.5. İYÖD değerleri, basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve çarpma enerji değerleri arasındaki ilişkiler .....	136
7.6. Elektrotermal Sonuçları .....	136

7.7. Öneriler .....	137
KAYNAKLAR .....	139
EKLER .....	148
ÖZGEÇMİŞ .....	184

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Alan
AI	: İnce agrega
AII	: İri agrega
ASTM	: American society for testing and materials
ASTM-D	: ASTM yöntemi ile ölçülen direnç
ATE	: Atık tel erezyon
CNT	: Carbon nanotube
CEA	: Conductivity-enhancing agent
C/F	: Coarse / fine
ÇF	: Çelik fiber
DP	: Plimerizasyon derecesi
ED	: Elektriksel direnç
EİB	: Elektriksel iletken beton
EIYKS	: Elektrikli ısıtılmalı yol kaplama sistemleri
EDS	: Energy dispersive spectrometer
$E_U$	: Nihai çarpma enerjisi
FDA	: Fiber-dispersive agent
HIYKS	: Hidronik ısıtılmalı yol kaplama sistemleri
İYÖD	: İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen direnç
I	: Akım
IYKS	: Isıtılmalı yol kaplama sistemleri
KF	: Karbon Fiber
KMS	: Karboksi metil selüloz
KS	: Karbon siyahı
L	: Uzunluk

MKAA	: Monokloroasetik asit
NKS	: Nano karbon siyahi
R	: Direnç
R <sub>P</sub>	: Parçacıkların direnci
R <sub>S</sub>	: Parçacık ve su arasındaki direnç
R <sub>W</sub>	: Suyun direnci
SA	: Süper akışkanlaştırıcı
SEM	: Scanning electron microscope
TEM	: Tunneling electron microscope
V	: Voltaj
WYÖD	: Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç
$\rho$	: Elektriksel özdirenç
$\Omega$	: Elektriksel direnç birimi
$\sigma$	: Elektriksel iletkenlik
$\sigma_c$	: Basınç dayanımı
$\sigma_f$	: Eğilme dayanımı
$\eta$	: Viskozluk
$\phi$	: Akıcılık

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Elektriksel iletken betonun kesit görünümü [22] .....	5
Şekil 1.2. Roca köprüsünün karsız görüntüsü [61] .....	7
Şekil 1.3. İlk beton tabakası üzerine elektrot yerleştirilmesi ve güç kaynak kablolarına bağlantıları (a) ve elektrik iletken betonun dökülmesi (b) [1] .....	10
Şekil 1.4. Des Moines uluslararası havaalanında uygulanan elektrik iletken beton plakaların son hali [1] .....	10
Şekil 1.5. Farklı buz çözme sistemlerinin maliyet açısından karşılaştırılması [61] .....	12
Şekil 2.1. Jeotermal enerji kaynağı kullanarak HİYKS [1] .....	16
Şekil 2.2. HİYKS detayları [1] .....	17
Şekil 2.3. Farklı araştırmacılar tarafından çalışılan EİYKS'lerin karşılaştırılması [1] .....	18
Şekil 2.4. Piroliz yöntemi ile elde edilen ürünler .....	19
Şekil 2.5. Piroliz sonrası çıkan ortalama ürün miktarı [73] .....	19
Şekil 2.6.Çelik Fiberlerin Sınıflandırılması (TS 10513, 1992) [75] .....	21
Şekil 2.7. Şematik enerji bant görüntüleri [79] .....	23
Şekil 2.8. Farklı malzemelerin elektriksel ve termal özellikleri .....	25
Şekil 2.9. Gözenekli bir ortamda elektronik taşıma olaylarının modeli: (A = toplam alan; $A_w$ = su alanı; L = toplam uzunluk; $L_e$ = su için akış yolunun uzunluğu) .....	27
Şekil 2.10. Normal ve elektriksel iletken betonun iç yapısının şematik görüntüsü .....	29
Şekil 3.1. Deneyleerde kullanılan çimentonun SEM görüntüsü .....	32
Şekil 3.2. Deneyleerde kullanılan çimentoya ait EDS grafiği .....	32
Şekil 3.3. 0-4.5 mm (sol) ve 4.5-22 mm (sağ) Agrega tipi .....	33



Şekil 3.4. 7.0 µm Çapında 12 mm uzunluğunda KF .....	34
Şekil 3.5. Piroлиз 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 3.6. Atık tel erezyon .....	36
Şekil 3.7. Tez çalışmasında kullanılan çelik fiber .....	37
Şekil 3.8. Karboksi metil selüloz .....	38
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 .....	41
Şekil 3.11. Silindir numunelerin pürüzlü taraflarının kesilmesi .....	41
Şekil 3.12. Numunelerin oda sıcaklığında kurutulması .....	42
Şekil 3.13. Basınç (a) ve eğilme (b) test cihazları .....	46
Şekil 3.14. Çarpma test aleti .....	48
Şekil 3.15. İki noktalı tek eksenli iletkenlik ölçme düzeneği .....	50
Şekil 3.16. Wenner prop yöntemi ile iletkenlik ölçme düzeneği .....	50
Şekil 3.17. C1760-12 ASTM-D yöntemine göre iletkenlik ölçme ekipmanı .....	50
Şekil 4.1. KF ve NKS içeren iletken betonların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerleri .....	54
Şekil 4.2. İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması .....	55
Şekil 4.3. NKS, KF ve ÇF içeren betonların İYÖD değerlerinin kıyaslanması ...	56
Şekil 4.4. NKS, KF ve ATE içeren betonların İYÖD değerlerinin kıyaslanması	57
Şekil 4.5. KF ve NKS içeren iletken betonların Wenner prop yöntem ile ölçülen WYÖD değerleri .....	58
Şekil 4.6. Wenner prop yöntem ile ölçülen WYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması .....	59
Şekil 4.7. NKS, KF ve ÇF içeren betonların WYÖD değerlerinin kıyaslanması	60
Şekil 4.8. NKS, KF ve ATE içeren betonların WYÖD değerlerinin kıyaslanması .....	61
Şekil 4.9. KF ve NKS içeren iletken betonların C1760-12 ASTM standartına göre ölçülen ASTM-D değerleri .....	62

Şekil 4.10. İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması .....	63
Şekil 4.11. NKS, KF ve ÇF içeren iletken betonların ASTM-D değerlerinin kıyaslanması .....	64
Şekil 4.12. KF ve NKS içeren iletken betonların basınç dayanımları .....	65
Şekil 4.13. KF içeren iletken betonlarda NKS oranlarının basınç dayanımına etkisi .....	66
Şekil 4.14. Üç fazlı elektriksel iletken betonlarda basınç dayanımlarının karşılaştırılması .....	67
Şekil 4.15. ATE içeren betonlarda basınç dayanımlarının karşılaştırılması .....	68
Şekil 4.16. NKS ve KF içeren iletken betonların eğilme dayanımlarının kıyaslanması .....	69
Şekil 4.17. Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların eğilme dayanımlarına NKS'nin etkisi .....	70
Şekil 4.18. İletken betonlarda NKS, KF ve ÇF'in eğilme dayanımına etkisinin incelenmesi .....	71
Şekil 4.19. ATE içeren betonlarda basınç dayanımlarının karşılaştırılması .....	72
Şekil 4.20. NKS ve KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarlarının kıyaslanması .....	73
Şekil 4.21. Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarına NKS'nin etkisi .....	74
Şekil 4.22. İletken betonlarda NKS, KF ve ÇF'in çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarına etkisinin incelenmesi .....	75
Şekil 4.23. ATE içeren betonlarda Çarpmaya karşı dayanımlarının karşılaştırılması .....	76
Şekil 5.1. 3D olarak modellenen EİB plakalarının geometrisi .....	92
Şekil. 5.2. EİB plakasının 3-D ağ görünümü (a), büyütülmüş elektrot ve etrafındaki ağ görünümü (b) .....	93
Şekil.5.3. EİB plakaların elektrotermal deney düzeneği .....	97
Şekil 6.1. N6K0.2Ç0 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları .....	100

Şekil 6.2. N6K0.5Ç0 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları .....	102
Şekil 6.3. N6K1 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları .....	104
Şekil 6.4. N6K0.2Ç2 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları .....	105
Şekil 6.5. N6K0.5Ç2 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları .....	106
Şekil 6.6. N6K1Ç2 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları .....	107
Şekil 6.7. N6K0E0.5 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları .....	108
Şekil 6.8. N6K0E1 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları .....	109
Şekil 6.9. N6K0.2E1 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları .....	110
Şekil 6.10. N6K0.2E1.5 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları .....	111
Şekil 6.11. Tüm plaka numuneler için 100 volt'da gerçekleşen elektrotermal sonuçları .....	112
Şekil 6.12. N6K0.5Ç0 plaka numunesi için 180 ve 220 volt'da sıcaklık-zaman eğrileri .....	113
Şekil 6.13. N6K0.5Ç0 plaka numunesi için 180 ve 220 V'de tüketilen güç miktarı .....	113
Şekil 6.14. 180 V ile 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı .....	114
Şekil 6.15. N6K1Ç0 plaka numunesi için 60-120 V'de sıcaklık-zaman eğrileri .	115
Şekil 6.16. N6K1Ç0 plaka numunesi için 60-120 V'de tüketilen güç miktarı ....	115
Şekil 6.17. N6K1Ç0 için 60 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı .....	116
Şekil 6.18. N6K1Ç2 plaka numunesi için 80-120 V'de sıcaklık-zaman eğrileri .	117

Şekil 6.19. N6K1Ç2 plaka numunesi için 80-120 V'de tüketilen güç miktarı ....	117
Şekil 6.20. N6K1Ç2 için 80 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı .....	118
Şekil. 6.21. Farklı voltajlarda N6K0.5, N6K1 ve N6K1S2 numuneleri için elde edilen elektrotermal sonuçlar .....	119
Şekil 6.22. N6K0.2E1 plaka numunesi için 80-120 V'de tüketilen güç miktarı.	120
Şekil 6.23. N6K0.2E1 için 100 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı .....	121
Şekil 6.24. Farklı voltajlarda N6K0.2E1.5 numuneleri için elde edilen elektrotermal sonuçlar .....	122
Şekil 6.25. N6K0.2E1 plaka numunesi için 80-120 V'de tüketilen güç miktarı.	122
Şekil 6.26. N6K0.2E1.5 için 60 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı .....	123
Şekil 6.27. NKS, KF ve ÇF içeren plaka numunelerin farklı sıcaklıklardaki özdirenç değerleri .....	124
Şekil 6.28. NKS, ATE ve KF içeren plaka numunelerin farklı sıcaklıklardaki özdirenç değerleri .....	125
Şekil 6.29. NKS, KF ve ÇF içeren plaka numunelerin karlı havadaki performansları .....	126
Şekil 6.30. farklı karışımlara sahip EİB plaka numuneler için harcanan ısı enerjisi değerleri .....	129
Şekil 6.31. Farklı numuneler için hesaplanan verimlilik değerleri .....	132

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Farklı buz çözme sistemlerinin maliyet açısından karşılaştırılması [61] .....	8
Tablo 3.1. Çimentonun EDS analiz sonuçları .....	32
Tablo 3.2. Karışım kod açıklamaları .....	43
Tablo 3.3. Karışım detayları .....	44
Tablo 4.1. Elektriksel, mekaniksel ve çarpma deney sonuçları .....	52
Table 5.1. Karışım kod açıklamaları .....	94
Table 5.2. Plaka numunelerinde karışım detayları .....	95
Table 5.3. Plaka numunelerinde karışımların elektriksel ve mekaniksel özellikleri .....	98
Tablo 6.2. Sıcaklığın -10 °C'den +10 °C'ye yükselmesi için harcanan zaman ve enerji .....	128
Tablo 6.3. Optimizasyon için kullanılan ham değerler .....	131
Tablo 6.4. kriter değerlerini birinci numune sonuçlarına bölerek elde edilen değerler .....	131
Tablo 6.5. Farklı kriterlere göre numune seçimi .....	132

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Kar ve buz birikmesi, elektriksel iletken beton, nano karbon siyahı, karbon fiber, tel erezyon, direnç

Havalimanı pistlerinde kar ve buz birikmesi sonrası betonu tehdit eden faktör donma-çözülme olayıdır. Betonda hasara yol açan donma-çözülme etkisinin azaltılması için ya daha yoğun ve gözeneksiz yapıya sahip betonlar veya hava süreleyici kimyasal katkılarla kapalı gözenekliğe sahip betonların üretilmesi önerilmektedir. Bu klasik yöntemlerde amaç, kar ve buzun birikmesini kabul ederek, donma-çözülmeye karşı daha dayanıklı betonların üretilmesidir. Dolayısıyla bu yöntem donma çözülme döngülerinin artması durumunda meydana gelecek hasarı önleyen bir yöntem değildir. Son yıllarda havalimanı pistlerinde kar ve buz birikmesini önlemek için modern bir yöntem olarak elektriksel iletken betonların uygulanması önerilmektedir.

Mevcut çalışmada, havalimanı pistlerinde kullanılmak amacıyla üretilen elektriksel iletken betonlarda atık lastiklerden piroliz yöntemi ile elde edilen nano karbon siyahı ve kesme işlemlerinden elde edilen atık tel erezyonun değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için, 36 farklı karışım dizaynlarında elektriksel iletkenliğe sahip betonların öncelikle laboratuvar ortamında genel mekaniksel ve elektriksel iletkenlik özellikleri incelenmiştir. Genel özelliklerinin sonucu ortaya çıktıktan sonra, 3D modelleme yönteminden de faydalanarak 10 adet farklı karışıma sahip beton plakalar üretilmiştir. İletken beton plakaların elektrotermal deneyleri  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de bir soğutucu içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deney sonuçlarına göre farklı karışımlardaki nano karbon siyahı, karbon fiber ve tel erezyon içeren numunelerin mekaniksel ve elektriksel özellikleri gelişmiştir. Farklı karışımlardan elde edilen elektriksel iletken beton plakaların farklı sıcaklık/h hızıyla ısınabilmeleri için  $180-1315\text{ W/m}^2$  gücün gerekli olduğu anlaşılmıştır. Literatüre göre soğuk havalarda kar ve buzun erimesi için  $300-550\text{ W/m}^2$  gücün yeterli olduğu belirtilmiştir, bu çalışmada da tüketilen  $300-550\text{ W/m}^2$  arasında güç değerlerine göre karışım optimizasyonu yapılmıştır.

# **PRODUCTION AND INVESTIGATION OF CONCRETES WITH ELECTROTHERMAL PROPERTIES TO PREVENT FREEZING IN AIRPORT RUNWAYS**

## **SUMMARY**

Keywords: Snow and ice build-up, electrical conductive concrete, nano carbon black, carbon fiber, wire erosion, resistance

Freeze-thaw is the factor that threatens concrete after the accumulation of snow and ice on the airport runways. In order to reduce the freeze-thaw effect that causes damage to concrete, it is recommended to produce concrete with dense and non-porous structure. Or it is recommended to produce concrete with closed porosity by using air-continuous chemical additives. The aim of these classical methods is to produce concretes which are more resistant to freeze-thaw by accepting the accumulation of snow and ice. Therefore, these methods are not a method to prevent damage in case of increased freeze-thaw cycles. In recent years, the application of electrically conductive concretes has been proposed as a modern method to prevent the accumulation of snow and ice on airport runways.

In this study, it is aimed to evaluate the nano carbon black obtained by the pyrolysis method from the waste tires and the waste wire erosion obtained from the cutting processes, in the electrically conductive concrete produced for use in airport runways. For this purpose, firstly, general mechanical and electrical conductivity properties of electrical conductive concretes in 36 different mixtures were examined in laboratory environment. After the result of their general characteristics, 10 different concrete slabs were produced by using 3D modeling method. Electrothermal tests of conductive concrete slabs were performed in a freezer at -10 °C.

According to the results of the experiments, mechanical and electrical properties of the specimens containing nano carbon black, carbon fiber and wire erosion in different mixtures have improved. It is understood that 180-1315 W / m<sup>2</sup> power is required for the heating of electrically conductive concrete slabs obtained from different mixtures with different temperature / h speed. According to the literature, 300-550 W / m<sup>2</sup> power is sufficient for melting of snow and ice in cold weather. In this study, mixture optimization was made according to the power values between 300-550 W / m<sup>2</sup> consumed.

# BÖLÜM 1. GİRİŞ

## 1.1. Kaynak Araştırması

Soğuk bölgelerde, yol kaplamaları yüzeylerindeki kar ve buz, altyapı bozulmasına ve beton kaplamasına zarar vermektedir. Bu tür bir olayla karşılaşmamak için yol kaplama üzerine kimyasal maddelerin püskürtmesi ve geleneksel buz çözme yöntemlerinin kullanılması halinde olumsuz çevresel etkilere yol açacağından endişe edilmektedir [1, 2]. Isıtmalı yol kaplama sistemleri (IYKS) buz ve karı eritmek için önerilen alternatif seçeneklerden biridir. IYKS'ler hidrolik ısıtmalı yol kaplama sistemleri (HIYKS) ve elektrikli ısıtmalı yol kaplama sistemleri (EIIYKS) olarak iki genel gruba ayrılabilir. HIYKS, ısıtılmış akışkanı yol kaplama yapılarına gömülü borulardan geçirerek buz ve karı eritmektedir; soğutulan akışkan, her döngü sırasında yeniden ısıtan bir ısı kaynağında geri döner. Jeotermal su, kazanlar ve ısı eşanjörleri dahil olmak üzere farklı türlerde ısı kaynakları vardır. Jeotermal suyun, jeotermal potansiyeli iyi olan yerlerde verimli olduğu düşünülmektedir [1]. EIIYKS'lerde kar ve buzun erimesi normal betona gömülü olan direnç kabloları veya direnç olarak uygulanan elektrikli beton sayesinde gerçekleşmektedir. Normal beton yapıların içine gömülü direnç kabloların kullanımı, Oregon, Teksas ve Pennsylvania'da kar ve buzun eritilmesi için uygulanmıştır. Gereken yüksek güç yoğunluğundan dolayı elektrik kablosunun performansı bazen yetersiz kalmış ve buna bağlı olan cihaz ve sistemlerin hasar görmelerine neden olmuştur [1, 3, 4]. Son yıllarda, EİB-tabanlı IYKS'lerin, karayolları ve hava alanlarındaki buz ve kar birikmesine bağlı sorunların azaltılmasında kullanımı dikkat çekmektedir. EİB, buz ve karı eritmek için EİB döşemesine gömülü elektrotlara voltaj uygulayarak çalışmaktadır. EİB'lerde çelik fiber, karbon fiber ve diğer iletken katkı malzemelerin elektrikli iletkenlik özelliği ve mekaniksel özellikleri farklı çalışmalarda yeterince araştırılmıştır [5].



Elektriksel iletken betonun (EİB) keşf edilmesinden yani 1965 [6] 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 ısıtılmalı döşeme sistemlerinde direnç malzemesi olarak kullanılmaktadır [7-11]. Kendiliğinden ısıtılmalı döşeme sistemleri son zamanlarda yol ve hava limanı pistlerinde kar ve buzu eritmek ve birikmesini önlemek için uygulanmaktadır [12-16].

Betonun elektriksel öz direncinin yüksek seviyelerde olduğu farklı yazarlar tarafından teyit edilmiştir. Açık havada kurutulmuş betonun elektriksel öz direncini  $6.54 \times 10^5$  -  $11.4 \times 10^5$   $\Omega$ -cm olarak tesbit edilmiştir [11, 17]. Buna ek olarak farklı araştırmacılar tarafından yapılan araştırmalara göre doymuş beton ve kuru betonun elektriksel öz direnci sırasıyla  $10^6$   $\Omega$ -cm ve  $10^9$   $\Omega$ -cm olarak rapor edilmiştir [18, 19].

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 [20-26]. 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 [12, 24, 27-42]. 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 dayanımında azalma görülmüştür ve basınç dayanımının azalmasını en çok çelik talaşası

etkilemiştir. Bununla birlikte direncin azalmasında grafitin diğerlerine göre daha etkili olduğu belirlenmiştir [18]. Buna ek olarak iletken çimentolu malzemeler ve betonlarda çelik talaşası, çelik yünü, nano karbon fiber ve karbon nanotüp gibi diğer malzemeler de incelenmiştir [18, 41-45]. 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 [12].

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 [18, 31]. Bazı araştırmalar, bileşen tipleri, agrega içeriği, su-çimento oranı ve kum-çimento oranı, betonun elektriksel direncinde önemli etkileyici faktörler olduğunu ortaya koymuşlardır [46-51]. 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 fibere 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 ancak FDA'nın artmasıyla direncin değişmesinde önemli bir fark görülmemiştir [11].

KF, farklı amaçlar için elektriksel iletken çimentolu kompozitlerin üretiminde elektriksel iletken katkı malzemesi olarak kullanılmış ve test edilmiş bir malzemedir [11]. Ayrıca daha önceki çalışmalardan KF takviyeli betonların fiziksel ve

mekaniksel olarak dayanımlı olduğu tesbit edilmiştir [52-54]. 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 [11, 53, 55].

Bazı araştırma sonuçlarına göre çeşitli yöntemler ile ölçülen ED sonuçları arasında farklıklar rapor edilmiştir [56-60]. 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 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 değer in miktarı teorik hesaplamaya göre 0.38 olarak ifade edilmiştir [60].

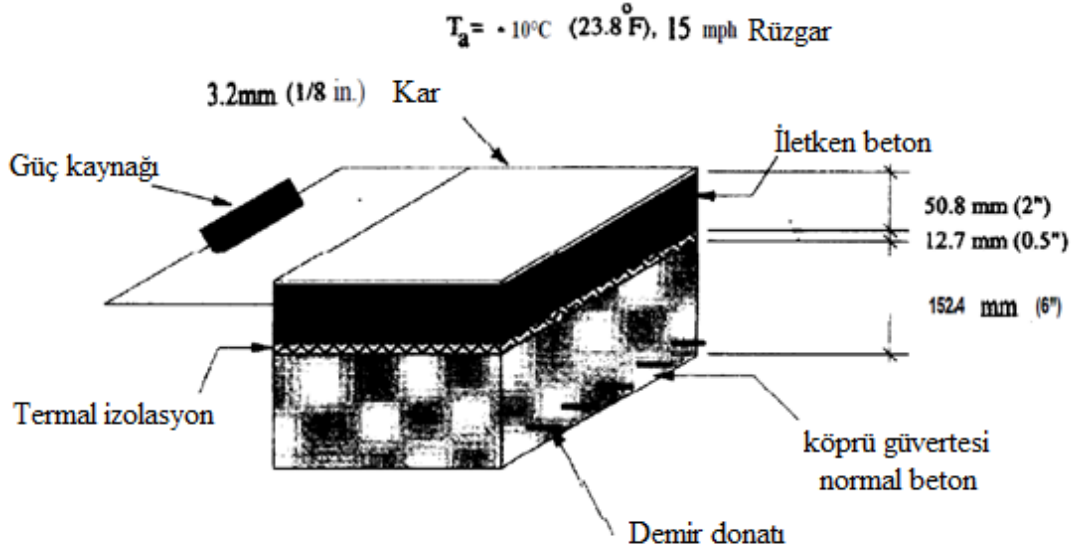
## **1.2. Literatür Özeti**

1999 yılında Yehia ve Tuan [22] köprü güvertesi ve oto yolları için elektriksel iletken betonların uygulamasını önermişlerdir. Proje önerilerindeki gerekçe şöyle ifade edilmiştir;

Bu çalışmada, yeni geliştirilen iletken betonu köprü güvertelerinde buz çözme ve buzlanmayı önlemek için kullanmaya odaklanmaktadır. Bu teknolojinin uygulanması, beton güverte hasarı ve takviye elemanlarının korozyonuna neden olan yollara serilen tuzu ve buz çözücü kimyasalların kullanımını ortadan kaldıracaktır. Ayrıca eyaletlerarası otoyolların köprülerinde kış seyahat güvenliğini de artıracaktır. Bu teknolojinin diğer potansiyel uygulamaları arasında yaya köprüleri, kaldırımlar ve araba yolları bulunmaktadır.

Yehia ve Tuan yaptıkları bu çalışmada elektriksel iletken betonun uygulaması için Şekil 1.1.'de verilen kesit örneğini önermişlerdir. Öncelikle 6 inç kalınlığında donatı

takviyeli normal betonarme uygulanır. Ardından 0.5 inç kalınlığında termal yalıtım malzemesi uygulanmaktadır. Yalıtım kat üzerine iki inç elektriksel iletkenliğe sahip beton dökülür. EİB'in ısınabilmesi için belirli voltajda potansiyel farkı uygulanmalıdır.



Şekil 1.1. Elektriksel iletken betonun kesit görünümü [22].

Yehia ve Tuan EİB'lerin elektriksel ve mekaniksel özelliklerinin incelenmesi için düşük (% 2 hacimce) yüksek (% 15-20 hacimce) oranlarda çelik fiber içeren iletken betonlar üretmişlerdir. Elektriksel direncin ölçülmesi için  $152 \times 38 \times 38$  &  $152 \times 152 \times 102$  mm prizmatik numuneler üretmişler ve hacimsel olarak % 15 - % 20 çelik fiber içeren karışımların elektriksel direncini 500-1000  $\Omega$ .Cm olarak elde etmişlerdir. Bu karışımlardan elde edilen numunelerin basınç dayanımları 35-40 MPa ölçülmüştür. Daha sonra aynı karışımlardan  $305 \times 305 \times 50$  mm plaka numuneler üretmişler ve 30 dk boyunca 48 volt DC voltaj uyguluyarak plaka numunelerinin sıcaklığını  $-1.1^\circ\text{C}$ ' den  $15.6^\circ\text{C}$ ' ye yükseldiğini farketmişlerdir [22].

Tuan 1999 yılından başlayan araştırmalarının devamında, EİB'lerin doğal ortamda performansını ölçmek amacıyla Nebraska'da bir köprü üzerini EİB ile kaplayarak geniş alanlı bir proje yürütmüştür [61]. Roca Spur Köprüsü'nün ısıtmalı projesi, dünyada buz çözme amaçlı iletken beton olarak kullanan ilk uygulamadır. Roca Spur

Köprüsü, 45.72 m uzunluğunda ve 10.98 m genişliğinde, ABD'nin Route 77 güney bölgesinde bulunan Nebraska'da üç açıklıklı bir otoyol köprüsüdür. Bu deneysel köprü güverte, 5 yıllık bir değerlendirmeden sonra, iletken betonun kullanılmasını çok uygun maliyetli bir buz çözme yöntemi olma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

Nebraska Karayolları Bakanlığı tarafından desteklenen daha önceki bir araştırmaya göre, çelik fiber ve çelik talaşı içeren bir beton karışımı geliştirilmiştir [22]. Çelik talaşı metal imalatlardan kaynaklanan endüstriyel atıklardır. İletken betonun geliştirilmesi sırasında çelik talaşlarının kullanılmasıyla ilgili bazı dezavantajlar kaydedilmiştir:

- 1) Çeşitli çelik talaş kaynaklarından gelen ebat ve bileşimlerin tutarlılığı eksikliği
- 2) Elde edilen çelik talaşları genellikle temizlik gerektiren yağ ile kirlenmiştir
- 3) Çelik talaşları, betonda eşit dağılım sağlamak için özel bir karıştırma prosedürü gerektiriyordu.

Bir takip çabası olarak, iletken beton karışımı tasarımında çelik talaşlarının yerini almak üzere karbon ve grafit ürünler kullanılmıştır [41].

Elektriksel iletkenlik ve beklenen ısıtma oranı, karbon ürünlerle geliştirilmiştir. Özellikle beton köprü güvertelerinde buz çözme işlemi için yüzde 1,5 oranında çelik fiber ve hacimce yüzde 15 karbon tozu içeren bir beton karışımı geliştirilmiştir. Karışımda maksimum 0,5 inç boyutunda kırmataş ve ince agrega olarak Nebraska 47B kullanılmıştır. Karışım yeterli dayanıma sahiptir ve donma sıcaklığı altında buz çözme için yeterli termal güç yoğunluğu sağlayabilmektedir [61].

Umut verici laboratuvar test sonuçlarına dayanarak, Nebraska Karayolları Bakanlığı, bahsi geçen projesini onaylamıştır. Roca Bridge projesi Aralık 2001'de kabul edilmiş ve inşaat işlemleri Kasım 2002'de tamamlanmıştır. Köprü güvertesi 35 m x 8.53 m, 10 cm (4 inç) kalınlığında iletken beton kaplamadan oluşmaktadır. Kış fırtınaları sırasında buzlanma operasyonlarını izlemek için veri sağlamak üzere iç kaplama

sıcaklık ve akım sensörleriyle donatılmıştır. Buz çözme performansı beş yıl boyunca tatmin edici ve tutarlı olmuştur. Kar fırtınası başına ortalama enerji maliyeti yaklaşık 250 dolar hesaplanmıştır. İletken beton, köprü güverteleri için diğer buz çözme teknolojilerine kıyasla çok düşük maliyetli bir buz çözme yöntemi olma potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir. Roca köprüsünün fırtınalı havadaki karsız görüntüsü Şekil 1.2.'de verilmiştir.



Şekil 1.2. Roca köprüsünün karsız görüntüsü [61].

İletken beton yarı iletken gibi davranır [40]. Uygulanan voltaj belirli bir değeri aştığında, yarı iletken beton elektriksel iletken hale gelir. İletken betonun elektriksel iletkenliği sıcaklığın bir işlevidir. Beton sıcaklığı arttıkça, betonun iletkenliği daha da artar. Betondan geçen akım miktarı arttıkça, ısınma hızı artar ve bununla birlikte beton sıcaklığı da artar. Bu nedenle, iletken betonun elektrik direnci (veya iletkenliği) sıcaklığa bağlıdır.

İletken beton karışımı tasarımında çelik liflerin kullanılması nedeniyle, iletken betondan yapılmış bir köprü güvertesinin dayanıklılığını sağlamak için beton örtüsü

gereklidir. İletken betonun elektriksel iletkenliği, beş yıllık bir süre boyunca çok kararlı olduğu anlaşılmıştır. Karışım tasarımında en zor görev elektriksel iletkenliğin uzun vadeli kararlılığını sağlamaktır. Roca Bridge buz çözme sisteminin işletme maliyeti, kar fırtınası başına yaklaşık 250 \$ olarak hesaplanmıştır. İletken beton teknolojisinin diğer buz çözücü teknolojilerle karşılaştırılması Tablo 1.1.'da verilmiştir.

Tablo 1.1. Farklı buz çözme sistemlerinin maliyet açısından karşılaştırılması [61].

Buz çözme sistemi	İlk maliyet	Yıllık işletme maliyeti	Güç tüketimi
Otomatik Püskürtme Sistemi	600 \$	12.000 \$	Uygulanamaz
Elektrikli ısıtma kablosu	54 \$/m <sup>2</sup>	4.8 \$/m <sup>2</sup>	323 - 430 W/m <sup>2</sup>
Sıcak su	161 \$/m <sup>2</sup>	250 \$/fırtına (76 mm kar)	473 W/m <sup>2</sup>
Isıtılmış gaz	378 \$/m <sup>2</sup>	2.1 \$/m <sup>2</sup>	Uygulanamaz
İletken beton	635 \$/m <sup>2</sup>	0.80 \$/m <sup>2</sup> /fırtına	350 W/m <sup>2</sup>

İletken bir beton döşeme üzerinde 1/16 inç bir epoksi veya 0.25 inç normal bir beton kullanılması, ısıtma hızında kayıp olmadan, elektrik çarpması potansiyelini önemli ölçüde azaltabilir.

Roca projesinden elde edilen sonuçlara göre buz çözme teknolojisi olarak EİB, kazalara açık yollarda, köprü güvertelerinde ve eyaletler arası çıkış rampalarında kolayca uygulanabilir.

Sistemi tamamen otomatikleştirmek için buzlanma sensörleri ve bir meteoroloji istasyonu kontrol devresine entegre edilebilir. Güvertedeki buzlanmanın donma ısısı altında sabahın erken saatlerinde meydana gelebileceği daha önceden bilinmektedir. Buzlanma meydana gelmeden önce iletken betonun ön ısıtılması daha verimli olduğundan, yerel ve bölgesel hava tahminlerine dayanarak köprü güvertesine verilen gücü otomatik olarak kontrol etmek için bir hava durumu izleme sistemi

geliştirilebilir. Gelişmiş otomasyon sistemi ile, “Yanlış alarm” nedeniyle enerji tüketimi maliyetleri ve tespit edilmeyen buzlanma olayları büyük ölçüde azaltılacaktır.

Literatür araştırmalarına göre Tuan' ın çalışmalarından sonra EİB' ler ile ilgili en geniş ve kapsamlı akademik çalışmalar Ceylan [5, 11, 13-15] ve ekibi tarafından yürütülmektedir. Çalışmalarında başarılı sonuçlara ulaşan bu ekip Amerikanın Iowa eyaletinde yer alan Des Moines havaalanında gerçek boyutlarda EİB proje uygulamasını ve araştırmasını yaklaşık 2016 yılında başlamışlardır.

Des Moines havaalanındaki ana pist kenarında inşa edilen 4.6 x 4.1 m ebatındaki iki adet beton plaka numuneler, iki ayrı tabakadan oluşmak üzere toplam 19 cm kalınlığa sahiptirler. Şekil 1.3.a.'da da görüldüğü gibi normal betondan oluşan alt tabakanın uygulamasından sonra elektrik akımı oluşturmak için belirli mesafelerde 6 adet elektrot yerleştirilmiştir ve kablo bağlantıları yapılmıştır daha sonra üzerinden ikinci tabaka olarak elektrik iletken beton dökülmüştür (Şekil 1.3.b).

Kırmızı bantlar ile işaretlenmiş, inşa edilen elektriksel iletken beton plakaların son hali Şekil 1.4.'te verilmiştir. Elektrotlara belirli bir voltaj uygulandığında elektrik akımı üst tabakadaki iletken betona aktarılır ve betondaki elektriksel direnç nedeniyle beton ısınmaya başlar. Oluşan ısı miktarı, beton yüzeyindeki buz ve karların eritilmesi için yeterlidir. Şekilde de görüldüğü gibi karlı ortamda yer alan numunelerin etrafı kar ile kaplanırken iletken beton numunelerin yüzeyinde kar görünmemektedir.





Şekil 1.3. İlk beton tabakası üzerine elektrot yerleştirilmesi ve güç kaynak kablolarına bağlantıları (a) ve elektrik ileten betonun dökülmesi (b) [1].



Şekil 1.4. Des Moines uluslararası havaalanında uygulanan elektrik ileten beton plakaların son hali [1].

Ceylan'ın bakışına göre, EİB uygulanması her ne kadar da pahalı olsa büyük avantajları da vardır. Örneğin sürekli kar kaldırma işlemlerine gerek kalmaz, kar ve buzları eritmek için kimyasal katkıların kullanılmasına gerek duyulmaz, aynı zamanda bu işlemlerin sonucu meydana gelen aşınma ve parçalanma gibi sakıncaları önlemek de diğer büyük bir avantajdır ve bu da elektrik ileten betonun uzun süre içerisinde ekonomikliğini göstermektedir. Ceylan ve çalışma grubu bu konuyla ilgili yoğun bir şekilde araştırmalarına devam etmektedirler. Ceylan'ın çalışma grubundan

olan [62] bu çalışmanın deneysel araştırmalarının pahalı ve yoğun kaynaklı olması nedeniyle, sonuçları onaylanmış deneysel numunelerin termal performanslarını değerlendirmek için, sonlu elemanlar yöntemi ile 3D olarak modellemesini yapmıştır. Sadati'nin FE çalışmasına göre modellerin termal sonuçlarıyla deneysel çalışmaların tutarlı olması nedeniyle, sonlu elemanlar yönteminin kontrol strateji geliştirmede umut verici bir yöntem olduğunu belirtmiştir.

Ceylan'ın çalışma grubundan olan diğer bir araştırmacısı ile [11] karışım tasarımını optimize etmek amacıyla karbon fiber ile modifiye edilmiş elektriksel iletken betonun üzerinde karışım tasarım değişkenlerinin mühendislik özelliklerinin etkisini araştırmışlardır. İletkenlik arttırıcı ve fiber-dağıtıcı katkı malzemesi olarak sırasıyla kalsiyum nitrit esaslı korozyon inhibitörü ve metilselüloz kullanılmıştır. Karbon fiber dozajı, fiber uzunluğu, iri / ince agrega hacim oranı, İletkenlik arttırıcı dozajı ve fiber-dağıtıcı dozajının değişmesi ile elde edilen beş farklı karışımlarında değişkeninin elektriksel iletkenliği üzerindeki etkileri incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, uygulanan İletkenlik arttırıcı katkı, elektriksel iletkenlik üzerinde olumlu etki oluşturmuştur. Bununla birlikte iletkenlik, fiber içeriği, iri / ince agrega oranı, fiber uzunluğu ve iletkenlik arttırıcı katkı miktarının değişmesiyle önemli ölçüde etkilenmiştir. Ayrıca, Fiber, iletkenlik arttırıcı ve fiber-dağıtıcı katkı dozajları basınç dayanımı üzerinde önemli etkiler yapmıştır. Agregada iri / ince oranı ve fiber-dağıtıcı dozajları eğilme mukavemetini etkileyen önemli değişkenler olarak belirtilmiştir.

Şekil 1.5.'de bu çalışmanın 2016-2017 yılları arasında, hafif kardan fırtınaya kadar değişen hava koşulları altında, oluşturulan EİB plakaların çalışma performans sonuçları özetlenmiştir. EİYKS işlemleri sırasındaki ortalama elektrik akımı ölçümleri, Şekil 1.5.'de listelenen ortalama güç yoğunluğunu ve enerji tüketim değerlerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Kar ve buz birikmesini önlemek amacıyla uygulanan 210 volt voltaj sonrası farklı hava koşulları için gerekli olan elektriksel güç miktarı  $33 \text{ W/ft}^2$  ( $355.21 \text{ W/m}^2$ ) ile  $39 \text{ W/ft}^2$  ( $419.80 \text{ W/m}^2$ ) arasında değişmektedir.

Tarih	Durum	Hava sıcaklığı (F)	Rüzgar (mph)	Kar kalmılığı (in)	Güç (W/ft <sup>2</sup> )	Zaman (hrs.)	Enerji (kW-h/ft <sup>2</sup> )
Dec. 10, 2016	buz önleyici	25	8	1.2	38	420 (7)	0.27
Dec. 18-19, 2016	buz çözücü	-11	16	1	39	1,286 (21.4)	0.84
Jan. 25, 2017	buz çözücü	14	14	0.5	38	90 (1.5)	0.06
Feb. 08, 2017	buz çözücü	14	13	1.5	35	210 (3.5)	0.12
Feb. 24, 2017	buz çözücü	22	17	0.8	37	150 (2.5)	0.09
Mar. 13, 2017	buz çözücü	21	13	1.3	33	120 (2)	0.07

Şekil 1.5. Farklı buz çözme sistemlerinin maliyet açısından karşılaştırılması [61].

Yukarıda açıklanan kapsamlı ve uzun süreli çalışmaların dışında, EİB'ler ile ilgili literatürde farklı amaçlarla çalışmalar mevcuttur. Aşağıda EİB'lerde farklı malzemelerin değerlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmaların özetleri verilmiştir.

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 kompozite ve minimum elektriksel direnç değeri % 1.0 çelik fiber, % 0.4 KF ve % 4 grafit içeren kompozite ait olduğu belirlenmiştir [12].

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 [18].

Sassani ve ark (2017), KF içeren elektriksel iletken betonlarda beş farklı değişkenin 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 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 [11].

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 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 değer miktarı teorik hesaplamaya göre 0.38 olarak ifade edilmiştir [60].

Wu ve ark (2013), farklı miktarlarda grafit içeren elektriksel iletken beton numunelerine belirli voltajlar uygulayarak betonun elektriksel iletkenlik ve termal özelliklerini incelemişler. Elde edilen değerlere göre voltaj arttıkça ED azalmıştır ve bununla birlikte betonun ısı 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 [63].

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 veya çözmek için uygulanan elektriksel iletken betonlarda kullanılan karbon fiberin minimum olarak kullanılmasının gerektiğini ifade etmişler [50].

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 [59].

Lavagna ve ark (2018), işlevsel hale getirilmiş (fonksiyonlaşmış) KF içeren çimento kompozitlerinin eğilme, tokluk ve basınç dayanımı ve elektriksel iletkenliğini incelemişlerdir. Bu özelliklerin sağlanması için karbon fiberin suda iyice dağılması ve KF ile çimento arasındaki etkileşimin önemli olduğu ifade edilmiştir [64].

## **BÖLÜM 2. KURAMSAL TEMELLER**

Bu bölümde yol üst yapılarında kar ve buz birikmesini önlemek için uygulanan sistemler incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmanın da konusunu oluşturan havaalanı pistlerinde kullanılan EİB'ler ve içeriği ile ilgili genel bilgiler sunulacaktır.

Isıtılmalı yol kaplama sistemleri (IYKS) buz ve karı eritmek için önerilen alternatif seçeneklerdir. IYKS'ler hidronik ısıtılmalı yol kaplama sistemleri (HIYKS) ve elektrikli ısıtılmalı yol kaplama sistemleri (EİYKS) olmak üzere iki genel gruba ayrılabilir [1]. Aşağıda özet olarak bu sistemler ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

### **2.1. Hidronik Isıtılmalı Yol Kaplama Sistemleri (HIYKS)**

Isıtılmış sıvıyı yol üst yapılarına gömülü borulardan geçirerek buz ve karı eritir. Soğutulan sıvı, her döngüde sıvıyı yeniden ısıtan bir ısı kaynağından geçer. Farklı türlerde ısı kaynakları vardır: jeotermal sular, kazan ve ısı eşanjörleri. Jeotermal suyun, jeotermal potansiyeli iyi olan yerlerde etkili olduğu düşünülmektedir [65]. Hidronik sistemlerin dezavantajları, inşaat kaçağı, yüksek montaj maliyeti ve sıvı kaçağı meydana gelirse onarım ile ilgili zorlukları oluşturur.

HIYKS, 1948'de Oregon'da bulunan Klamath Şelaleleri köprüsü'nde uygulanmıştır [65]. Buz ve karı eritmek ve kızak direncini arttırmak ve böylece araç kazalarını ortadan kaldırmak için köprü güverte yüzeyleri, bir ısı eşanjörü vasıtasıyla jeotermal kuyu kullanılarak ısıtılmıştır. Son zamanlarda, Binghamton'da bulunan (bkz. Şekil 2.1.). Greater Binghamton Havaalanı'ndaki apronlara bir ısı kaynağı olarak jeotermal kullanan HIYKS inşa edildi. Projenin toplam alanı 3.200 ft<sup>2</sup> (297 m<sup>2</sup>) idi.

HIYKS'nin bileşenleri arasında, Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi ısı transfer sıvısı, borular, sıvı ısıtıcısı, pompalar ve kontrol aletleri bulunur [1].

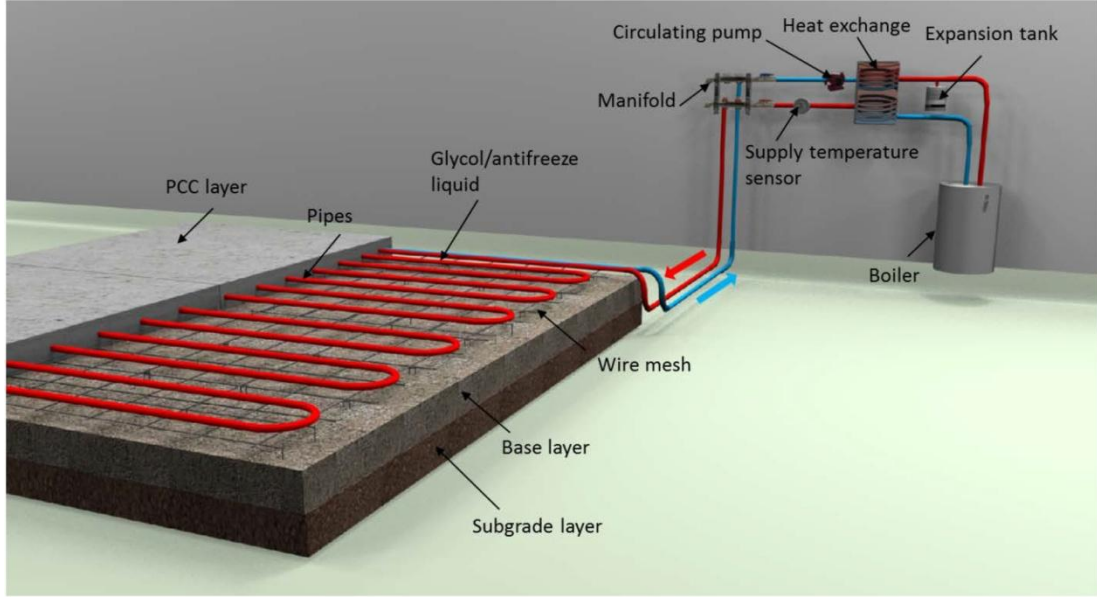


Şekil 2.1. Jeotermal enerji kaynağı kullanarak HIYKS [1].

HIYKS, ısıtılmış akışkanı beton yapıların içine gömülü borulardan geçirerek buzu ve karı eritir. Soğutulan sıvı, her bir döngü için sıvıyı yeniden ısıtan bir ısı kaynağından geçer. Yaygın bir uygulama olarak, propilen glikolün düşük maliyeti, yüksek özgül ısı ve düşük viskozitesi nedeniyle bir ısı transfer sıvısı olarak kullanılmasıdır. Borular metal, plastik veya kauçuktan yapılabilir. Çelik boru kullanmanın sakıncaları paslanmaya karşı hassas olmalarıdır, bu nedenle yol üst yapılarına gömülü çelik kullanımı yaygın bir uygulama değildir. Çelik boruya bir alternatif, polietilen veya çapraz bağlı polietilen gibi plastik borulardır, bu malzemeler hem düşük maliyetli ve hem de korozyona karşı dayanıklıdır [1].

Polietilen ve çapraz bağlı polietilen, sırasıyla 60°C ve 93°C'ye kadar sıvı sıcaklıklarına dayanabilir.





Şekil 2.2. HIYKS detayları [1].

HIYKS'nin buz ve kar erimesinde etkinliği, sıvı sıcaklığı, asfalt iletkenliği, boru derinliği ve boru aralığı dahil olmak üzere farklı faktörlere bağlıdır [66]. Portland çimento betonunun ısı iletkenliği, sıcak asfalta göre daha yüksektir, bu nedenle Portland çimento betonununun daha fazla ısı iletme potansiyeli vardır.

Hidronik bir plakanın boruları, buz ve kar birikmesini önlemek için hidronik plaka yüzeyinde homojen bir ısı sağlamak için farklı desenlerde düzenlenebilir. Yılanlı desen (Şekil 2.2.), asfalt yüzeylerde kar ve buz eritmede yaygın olarak kullanılır. Yılanlı desende, düz borular eşit merkezlere yerleştirilir ve U şeklindeki borular kullanılarak bir manifolda bağlanır [1].

## 2.2. Elektrikli Isıtmalı Yol Kaplama Sistemleri (EİYKS)

EİYKS, normal betona veya EİB'ye gömülü dirençli kablolar kullanarak buz ve kar eritilir. Son araştırmalar [1, 61, 67] EİB'nin bir güç kaynağına bağlandığında buz ve kar oluşumunun önlenmesini kolaylaştırmak için yeterli elektrik iletimi sağlayabildiğini göstermiştir. Literatürde bugüne kadar bildirilen EİYKS'ler Şekil 2.3.'de karşılaştırılmıştır.



Buz çözücü sistemler	Isıtmadan önce yüzey sıcaklığı (°C)	Isıtma sonrası sıcaklık (°C)	Zaman (h)	Güç (W/m <sup>2</sup> )	Kar kalınlığı (in)
Karbon fiber ağı (Lai et al. 2014)	-1.2 °C	3.4 °C	2 h	350 W/m <sup>2</sup>	27mm (1in)
Elektriksel iletken beton (Tuan 1998, 2004)	-1.1 °C (30 °F)	15.6 °C (60 °F)	30 min	516 W/m <sup>2</sup> (48 W/ft <sup>2</sup> )	NA
	NA	9 °C	3 days	500 W/m <sup>2</sup> (46 W/ft <sup>2</sup> )	6mm (0.24in)
Karbon fiber şentli (Yang et al. 2012)	-11.2 °C (12 °F)	0 °C (32 °F)	9.3 h	127 W/m <sup>2</sup>	15mm (0.6 in)

Şekil 2.3. Farklı araştırmacılar tarafından çalışılan EİYKS'lerin karşılaştırılması [1].

EİYKS'ler, geleneksel yöntemlere alternatif bir seçenek olarak kabul edilir, çünkü öngörülen zaman diliminde buz ve karı eritmek ve geleneksel buz çözme yöntemlerini kullanmanın sakıncalarını ortadan kaldırmak için potansiyeli olan bir yöntemdir [5, 68]. EİB konusundaki en eski patent 1965'te yayınlanmıştır [69]. O zamandan beri bir dizi EİB tarifleri (yani, karışım oranları, farklı iletken malzemelerin kombinasyonları, vb.) ve uygulamalar gelişmiştir [1, 61, 70-72].

EİYKS ve EİB'ler ile ilgili çeşitli literatür çalışmaları Giriş bölümünde detaylı olarak verilmiştir.

### 2.3. Piroliz Yöntemi İle 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.



Şekil 2.4. Piroliz yöntemi ile elde edilen ürünler.

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 siyahı olarak iki madde kalır. Karbon siyahı ve teller manyetik sistem bölümüne alınarak tellerden karbon siyahı ayrışımı yapılır ve iki ürün de satışa hazır olarak depolanır. Karbon siyahı genellikle lastik (vasıta) üretiminde kullanılır. Atık lastiklerin geri dönüşümü sırasında %20-%28 oranında karbon siyahı açığa çıkmaktadır [73]. Piroliz sonrası elde edilen karbon siyahı şekil 2.5.'de görüldüğü gibi, ASTM değerlendirmesine göre, N200-N330 sınıfında yer almaktadır. Bu sınıfta yer alan karbon siyahının tane boyutu 100 nm'nin altında belirlenmiştir.

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

Şekil 2.5. Piroliz sonrası çıkan ortalama ürün miktarı [73].

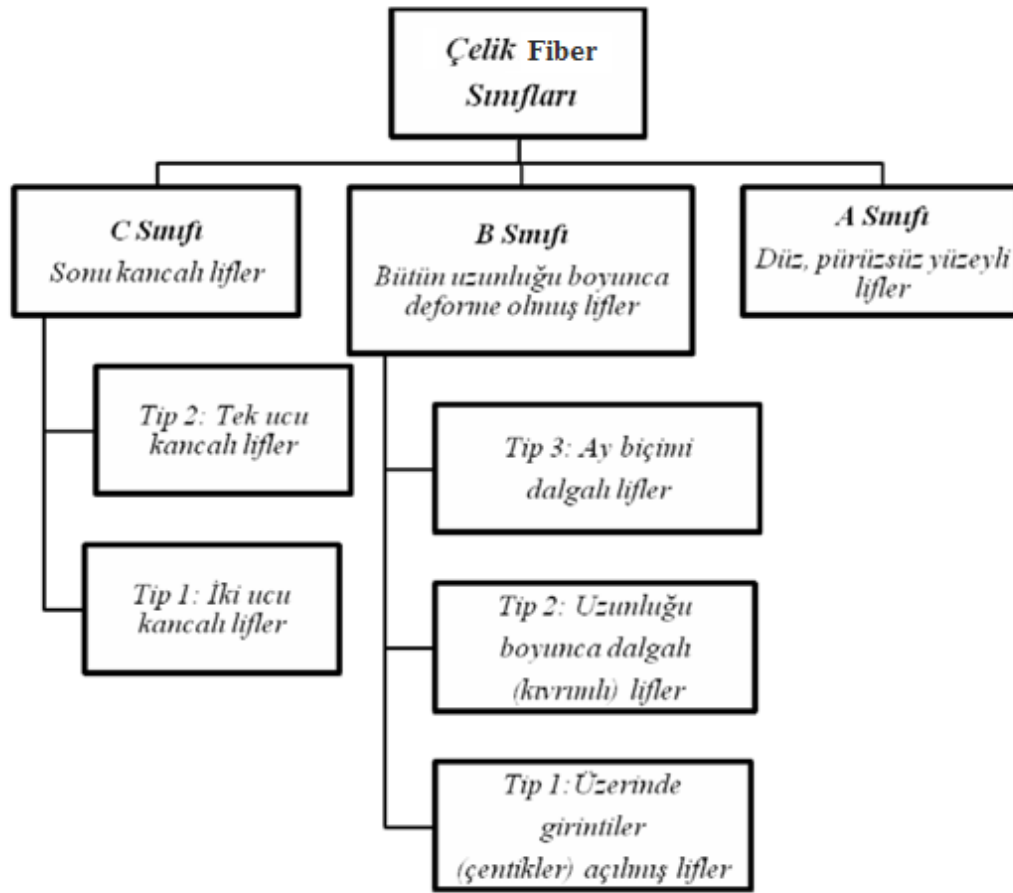
## 2.4. Karbon Fiber

Karbon fiberi pahalı olmasına karşın günümüzde endüstriden uzay alanına kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Karbon fiber 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 [74].

İnşaat alanında yapısal güçlendirme amacıyla uygulanmaktadırlar. Burada sargı, eğilme, darbe dayanımı, sehim amaçlı kontrol gibi nedenlerle karbon fiber ya da kompozitleri tercih edilmektedir. Karbon yünü ve keçeleri ısı izolasyon maddesi olarak kullanılmaktadırlar. Karbon fiber 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 [74].

## 2.5. Çelik Fiber

TS 10513, 1992'e [75] göre; çelik fiberler A, B ve C sınıfı olarak üç farklı sınıfa ayrılmıştır. Aşağıda Şekil 2.6.'de standartta tanımlanan fiberlerin gruplandırılması görülmektedir.



Şekil 2.6.Çelik Fiberlerin Sınıflandırılması (TS 10513, 1992) [75].

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 [76]. Kullanılan fiberlerin en kesitleri ise genelde dairesel, oval ve dikdörgendir. Çelik fiberlerin betonda ticari anlamda yaygın olarak kullanım oranları ise hacimce %0.25 ( $20 \text{ kg/m}^3$ ) ile %2 ( $157 \text{ kg/m}^3$ ) arasındadır. Çelik fiberlerin kullanım oranı betonun kullanım amacına uygun olarak bu alt ve üst limitler arasında seçilmektedir.

Çelik 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 [77].

## 2.6. Karboksi Metil Selüloz (KMS)

KMS üretiminde önemli faktörlerden biri ürünün çözünürlüğüdür. Çözünürlüğü artırmak için ürünlerin düşük ısıda ve hatta dondurulma 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 [78].

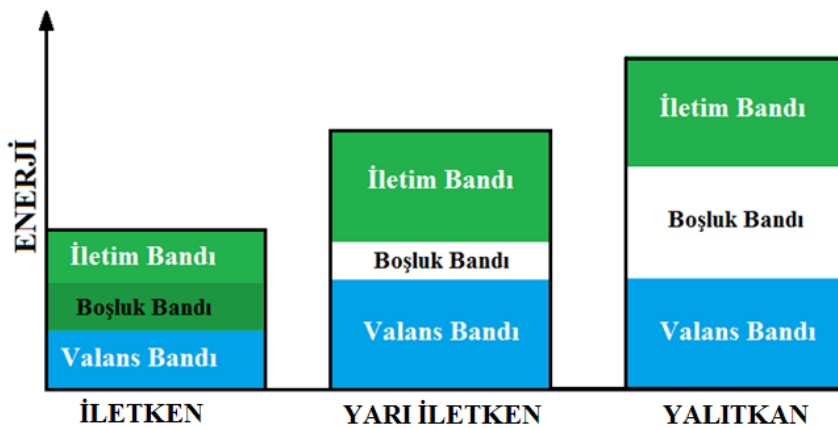
## 2.7. Elektriksel İletkenlik

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 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 bırakılmazsa, artık elektrik yükünün transferi için herhangi bir faktör söz konusu değil ve bu malzemeye iletken olmayan yani yalıtkan denir [79].

## 2.8. Bant Enerjileri

Malzemelerde atomların en dış yörüngesindeki valans elektronlarının bulunduğu banda valans bandı denir. İletkenlerde valans bandı ile iletim bandı arasında boşluk bandının olmaması 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. [7, 80, 81]. Elektriksel olarak üç'e ayrılan, iletken, yarıiletken ve yalıtkanların bant enerjileri şematik olarak Şekil 2.7.'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Şematik enerji bant görüntüleri [79].

## 2.9. 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  $\rho$  her malzeme için sabitidir. Öz direnç iletkenlik ( $\sigma$ ) ile ters orantılıdır (Denklem 2.3) ve ohm.metre ( $\Omega \cdot m$ ) birimi ile ifade edilir. Öz direnç malzemedeki malzemeye değişir ve her malzeme için özel bir faktör olarak sayılır. Örneğin, iyi bir iletken olarak kabul edilen gümüşün öz direnci,  $1.6 \times 10^{-8}$  ohm’dur ve güçlü bir yalıtkan olan camın elektriksel öz direnci,  $10^{10} \sim 10^{14}$  ohm’dur. Şekil 2.8.’de, bazı malzemelerin oda sıcaklığındaki elektriksel öz direnci 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 [82]:

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

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

Şekil 2.8. Farklı malzemelerin elektriksel ve termal özellikleri.

## 2.10. 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, karbon fiber ve karbon nanotüp gibi elektrik iletkenliğe sahip malzemelerin, yüksek elektrik 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 iletkenliği artırılabilir. [83].



### 2.11. Betonun Elektriksel İletkenliği

literatürdeki elektriksel iletkenliği ile ilgili çalışmaların çoğu biraz daha durabilite konusuna dayalıdır [84-86]. Çünkü durabilite problemleri genellikle betondaki boşluklar veya çatlaklardan kaynaklanmaktadır ve bu problemlerin incelenmesi için iletkenlik değerinin belirlenmesi önem arz eder [86]. 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 [1]. 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, inşaat yapı malzemeleri dalında ilgi çekici konulardan biridir [75].

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, özdirencin tersinden bulunur, özdirenç ise elektriğe maruz kalan beton numunesi tarafından sunulan dirençten elde edilir [75]. Çoğu araştırmada yarı iletken davranışı gösteren doymuş betonun direnci  $100 \Omega.m$  ve iyi yalıtkan olarak tanınan etüvde kurutulmuş betonun direnci  $10^9 \Omega.m$  olarak belirlenmiştir [75, 87].

Gözenekli bir ortamdaki elektrik alanında üç farklı direnç modellenebilir. Birincisi parçacıkların elektrik iletimdeki dirençtir,  $R_p$ , ikincisi gözenek suyu boyunca iyonik iletimdeki dirençtir,  $R_w$ , ve üçüncü direnç,  $R_s$ , parçacık-su ara yüzey arasındaki iyonik taşınmanın özel şeklidir. Karışımdaki toplam direnç değeri aşağıdaki bağlantıdan hesaplanabilir [88]:

$$\frac{1}{R_{mix}} = \frac{1}{R_P} + \frac{1}{R_W} + \frac{1}{R_S} \quad (2.5)$$

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 [89] göre, Şekil 2.9.'un geometrisi dikkate alınarak, öz (spesifik) iletkenlik açısından ifade edilebilir[88, 89]:

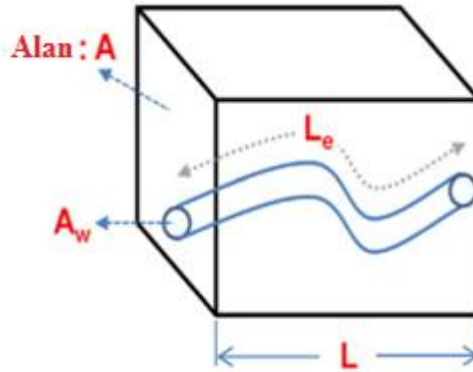
$$G_{mix} = \sigma_{mix} \cdot \frac{A}{L} \quad (2.7)$$

$$G_P = \sigma_P \cdot \frac{A_P}{L_P} \quad (2.8)$$

$$G_W = \sigma_W \cdot \frac{A_W}{L_e} \quad (2.9)$$

$$G_S = \sigma_S \cdot \frac{A_S}{L_e} \cdot S_P \quad (2.10)$$

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 2.9. Gözenekli bir ortamda elektronik taşıma olaylarının modeli: (A = toplam alan;  $A_w$  = su alanı; L = toplam uzunluk;  $L_e$  = su için akış yolunun uzunluğu).

Geometrinin analizi aşağıdaki ilişkilere yol açar:

$$\frac{A \cdot L}{V_T} = \frac{A_w \cdot L_e}{V_w} = \frac{A_P \cdot L_P}{V_P} = 1 \quad (2.11)$$

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,  $V_T$ : toplam hacim,  $V_w$ : su hacmi,  $V_p$ : parçacıkların hacmi,  $A$ : toplam alan,  $A_w$ : su alanı,  $A_p$ : parçacıkların alanı,  $L$ : toplam uzunluk,  $L_e$ : su için akış yolunun uzunluğu,  $L_p$ : parçacıkların uzunluğu ve eğrilik katsayısı.  $T$ , şöyle tanımlanabilir:

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

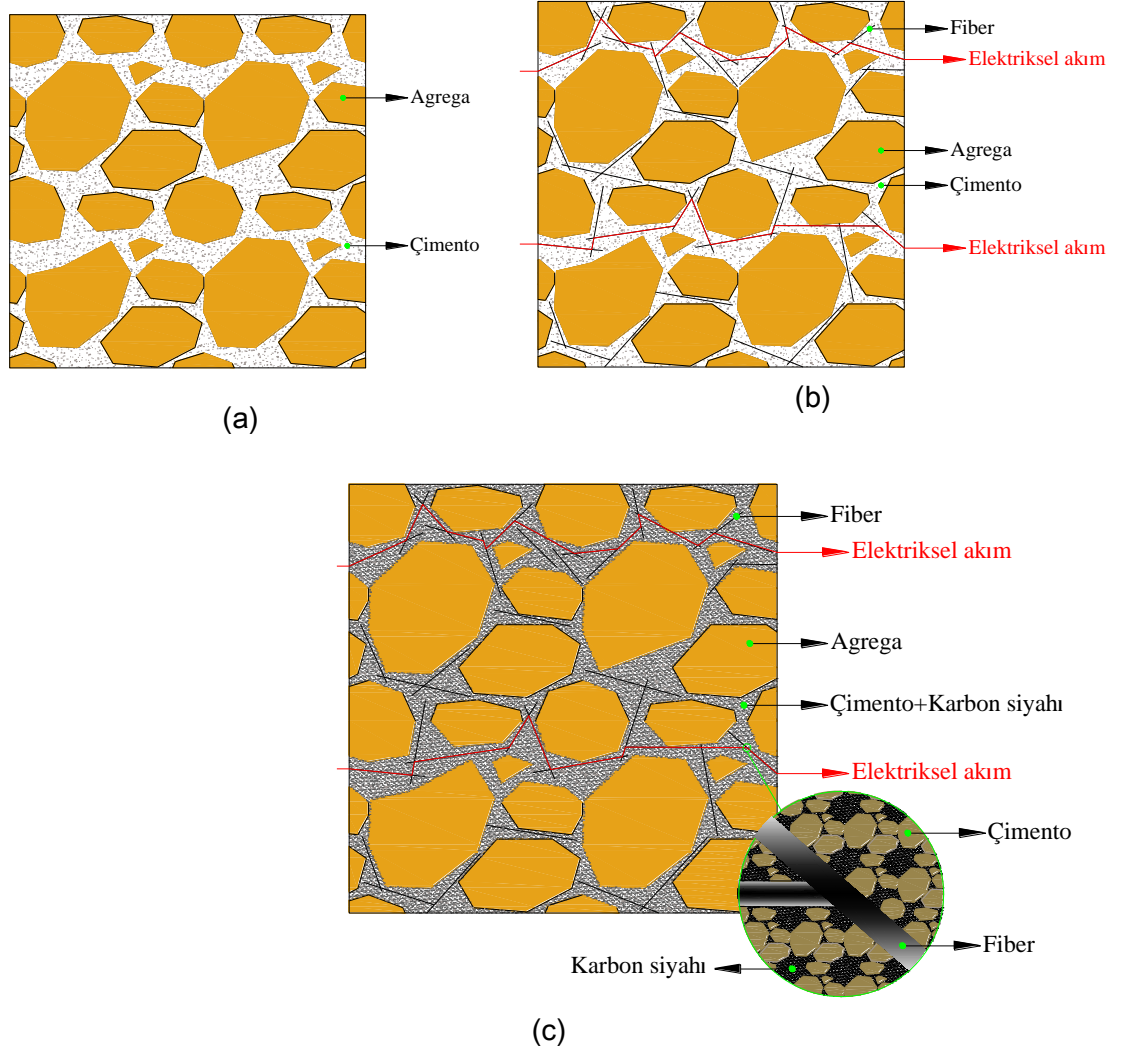
2.11, 2.13, 2.14 ve 2.15 denklemlerini denklem 2.6'da yerleştirip basitleştirerek karışımın öz iletkenlik değeri denklem 2.15'deki gibi özetlenebilir:

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

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

Şekil 2.15. normal ve elektriksel iletken betonun iç yapısının şematik görüntüsü göstermektedir. Sadece agrega (iri+ince) ve çimento içeren normal bir beton, bu malzemelerin yalıtkan olması nedeniyle, elektriksel akım iletme ihtimali yoktur. Önceki bölümlerde de detaylı olarak açıklandığı gibi çimento esaslı malzemelerin elektriksel iletkenliğini sağlamak için iletken metalik veya karbon esaslı fiber malzemeler kullanılmaktadır (Şekil 2.10.b). Fiber agregalar arasında rasgele yerleşerek karmaşık bir ağ oluşturmaktadır ve elektrik akımı için bir köprü görevi

yapmaktadır. Çimento hamuru agregalar arasında fiberler için bir matris elemanı olarak tanımlanmaktadır. Çimento hamuru toz halindeki iletken malzemeler ile birleştirilirse, fiberlerin elektrik akımı iletme görevinin artması beklenmektedir. Şekil 2.15.c.'de de görüldüğü gibi toz halindeki karbon siyahı çimento taneleri arası boşlukları doldurarak fiber ile matris arasındaki ara yüzey alanı artmaktadır.



Şekil 2.10. Normal ve elektriksel iletken betonun iç yapısının şematik görüntüsü.

## **BÖLÜM 3. MATERYAL VE TEMEL DENEY YÖNTEMLERİ**

Beton yüzeylerinde biriken kar ve buzun eritilmesinde kullanılan tuz ve benzeri maddeler betonda donma-çözülme döngüsü oluşturarak dayanıklılığını düşürmektedir. Havalimanı pistlerinde kar ve buz birikmesi uçuşların aksamasına yol açmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, soğuk bölgelerde bulunan havalimanı pistlerinde biriken buz ve karların hızlı bir şekilde çözümlerini sağlayacak iletken beton üretmektir. Üretimi yapılacak bu betonun, ekonomiklik faktörü ile birlikte malzemelerin mekaniksel, elektriksel ve termal özelliklerinden yararlanarak spesifik testleri gerçekleştirilecektir. Bu temel amaç çerçevesinde aşağıdaki hedeflere ulaşılmaya çalışılacaktır.

- 1) Havalimanı pistlerinde kar ve buz birikmesini önlemek için kullanılan geleneksel yöntemlere kıyasla daha uzun ömürlü beton üretimi,
- 2) Atık lastiklerin geri dönüşümü sağlanarak elde edilen nano karbon siyahının beton içerisinde kullanımını yaygınlaştırmak,
- 3) Türkiye'nin soğuk bölgelerinde yer alan havalimanlarının pist betonlarını, kış şartlarına daha uyumlu hale getirmek.

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan malzemeler ile ilgili detaylı açıklamalar sunulmuştur. Havaalanı pistlerinde kullanmak amacıyla üretilen iletken betonların karışım optimizasyonu yapılarak çalışmanın bir sonraki aşamasında üretilen plaka numunelerin sayısının azaltılması sağlanmıştır.

### **3.1. Materyal**

EİB karışımları için iri taneli ve ince taneli olmak üzere iki farklı agrega kullanılmıştır. Üretilen 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, 0-4.75 ve 4.75-22 mm

Su: Musluk suyu

Karbon fiber: 6 mm ve 12 mm kırılmış karbon fiber

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

Tel erezyon:

Çelik fiber: 0.75 mm çapında 30 mm uzunluğunda çelik telleri

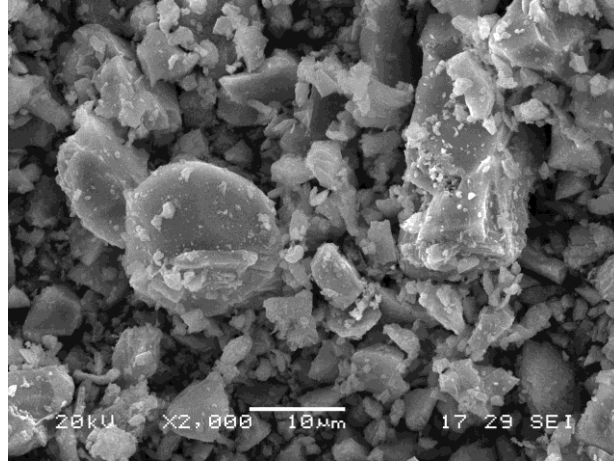
Kimyasal katkıları: Süper akışkanlaştırıcı – Karboksi metil selüloz

### 3.1.1. Çimento

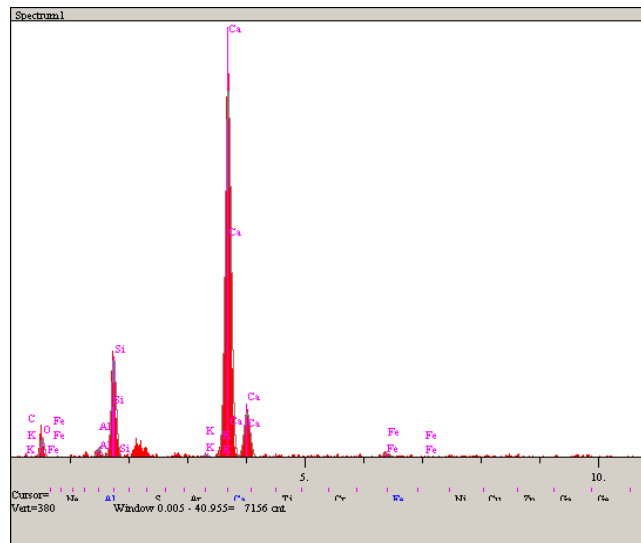
Elektriksel iletken betonlar inşaat sektöründe genellikle hava limanı pistleri ve köprü güverteleri gibi hassas alanlarda kullanıldığından dolayı beton sınıfını önem taşır. Daha önceki çalışmalara göre bu tip betonların sınıfı C35-C40 üzerinde tasarlanmıştır. Bunun için önceki çalışmalarda da belirlendiği gibi 1 m<sup>3</sup> beton için 400 kg'ın üzerinde yüksek dayanımlı çimentolar kullanılmalıdır [11, 61, 63]. 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. Agrega

Tez çalışmasında tane boyut aralıkları 0-4.75 ve 4.75-22 mm olan iki farklı kırma agrega tipi kullanılmıştır. Bütün karışımlarda iki farklı agrega oranı eşit ( $850 \text{ kg/m}^3$ ) olarak alınmıştır (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. 0-4.75 mm (sol) ve 4.75 -22 mm (sağ) Agrega tipi.

### 3.1.3. Su

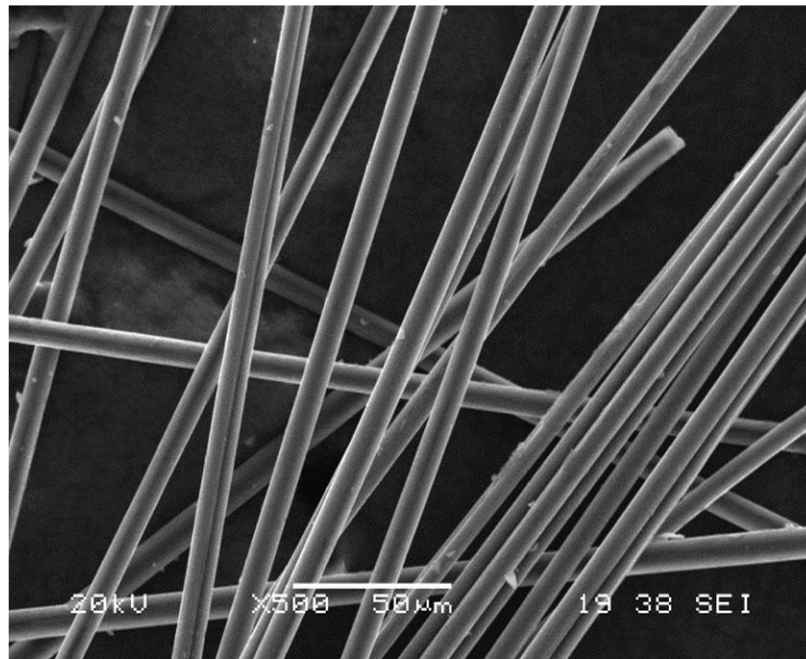
Deneylerde, içilebilir nitelikte olan Sakarya Büyük şehir Belediyesi şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

### 3.1.4. Karbon fiber (KF)

KF, farklı amaçlarla elektriksel iletken çimento bağlayıcı malzemelerde katkı malzemesi olarak kullanılan önemli maddelerdendir [90, 91]. Normal portland çimentolu betonun elektriksel direnci  $6.54 \times 10^5 - 11.4 \times 10^5 \text{ } \Omega\text{-cm}$  gibi yüksek seviyelerdeyken düşük oranlarda KF kullanarak bu değer 30-40  $\Omega\text{-cm}$ 'ye kadar indirilmesi mümkündür [11]. Ayrıca farklı yazarlar tarafından karbon fiberin, çimentolu malzemeler üzerinde mekaniksel özellikleri açısından da olumlu etkileri rapor edilmiştir [92, 93]. Bununla birlikte daha önceki araştırmalar, KF takviyeli



betonun donma-çözölmeye dayanıklılık, çekme dayanımı, yorulma, büzölme potansiyeli ve genleşme duyarlılığı açısından da daha iyi sonuçlar verdiği öne sürölmüştür [52-54]. 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 selölöz 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 [94]. 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 3.4.'de verilmiştir.



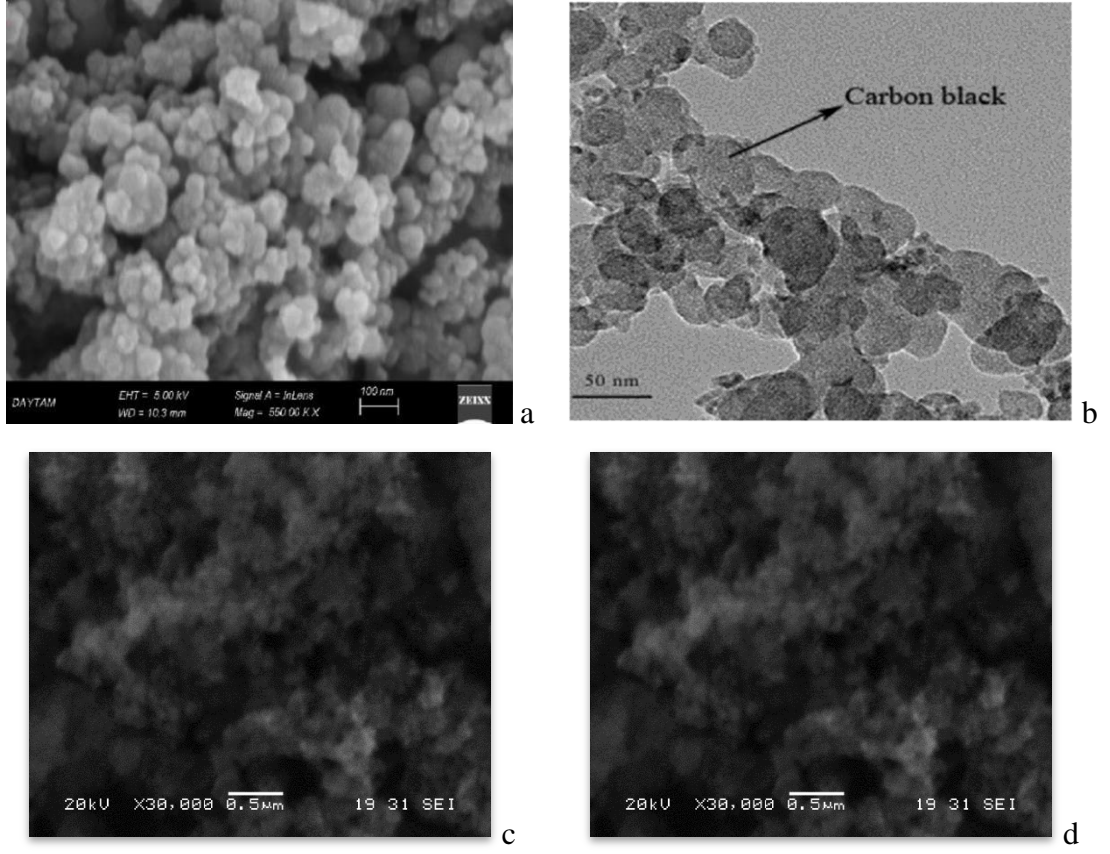
Şekil 3.4. 7.0 µm Çapında 12 mm uzunluğunda KF.

### 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 [79]. KF iyi elektriksel iletkenliğe sahip olduğundan dolayı genellikle elektrik ileten kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılır [95, 96]. Son yıllarda KF çimentolu malzemelerde de farklı amaçlarla

kullanılmaktadır [97, 98]. KF partikül boyutu ve bununla birlikte özgül yüzey alanının değişmesi ile, BP2000, Vulcan XC72 ve Regal gibi farklı ticari isimler olarak piyasada bulunmaktadır [79]. 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 düşünülmektedir. 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 m<sup>2</sup>/g'ye kadar artırılabilir [99]. Elde edilen KS ASTM isimlendirilmesine göre N200-N330 arasında yer almaktadır [73]. Piroliz yöntemi ile elde edilen NKS'nin SEM görüntüsü Şekil 3.5.'de verilmiştir.

Atık tel erezyon (ATE), elektrikli deşarj işleminde bir iş parçasını kesmek için kullanılan iletken bir teldir. Elektrik akımı tel erozyonu içinden geçirilerek iş parçası aşınarak kesme işlemi gerçekleşir. Tel, iş parçasına doğrudan dokunmadan yakın bir mesafede ileriye doğru hareket eder ve iletilen tel atık ürün olarak depolanır [100]. [101] Bu çalışmada, 0.25 mm çapında ve ortalama 25 mm uzunluğunda sarı renkli CuZn37 alaşımli atık tel erozyonu kullanılmıştır (Şekil 3.6.). ATE'nin elektrik direnci 0.00256 Ω-cm olarak ölçülmüştür.



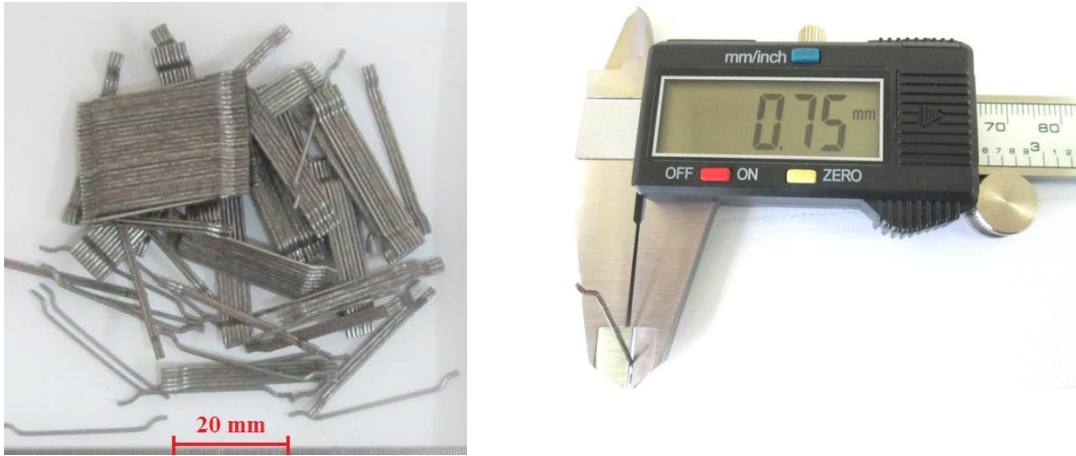
Şekil 3.5. Piroliz yöntemi ile elde edilmiş karbon siyahının a; SEM (Norouzi., 2016) ve b; TEM görüntüsü ve c-d; mevcut çalışmada kullanılan NCS'nin SEM görüntüleri.



Şekil 3.6. Atık tel erezyon.

### 3.1.6. Çelik fiber

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 [12, 22, 61]. 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 [12]. 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 [11, 53]. İnce toz halindeki metilselüloz karışım suyunda çözülerek betona ilave edilir [11]. Türkiyede 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 [11, 102]. 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 KS kullanarak optimum KF ve KS miktarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Bütün karışımlar 0 ve % 2 ( $47 \text{ kg/m}^3$ ) çelik fiber içerdiğine göre 2 gruptan oluşmaktadır. Karışım detayları Tablo 3.3.'de özetlenmiştir. Tablodaki karışım kodlarının açıklamaları Tablo 3.2.'de verilmiştir. NO 1-16 karışımları çelik fiber içermeyen karışım grubunu oluşturmaktadır ve No 16-32 karışım grupları % 2 çelik fiber içeren karışım grubunu oluşturmaktadır.

Tablo 3.3.'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 oranı 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 [102]. Ayrıca karışımlarda KF oranı arttıkça çimento macun oranının azalması görülmüştür, ancak aynı karışımlarda nano karbon siyahının artmasıyla bu problemin ortadan kalktığı anlaşılmıştır. Bu araştırmada, kontrol beton karışımı 80 mm ve KF eklenmesi ve miktarının artmasıyla bu değer yaklaşık 40 mm'ye düşmüştür. Sonuç olarak Tablo 3.3.'de özetlenen bütün karışımların işlenebilirliği, kalıpların doldurulması ve sıkıştırılması ile ilgili herhangi bir sorun yaşanmamıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında üretilen KF ve NKS içeren numunelerin sonuçları elde edildikten sonra, aynı boyutlardaki numunelerden dört farklı karışıma sahip atık tel erezyon (ATE) içeren numuneler üretilmiştir. Her dört karışımda da sabit olarak çimentonun ağırlığıca %6 geri dönüşümlü NKS ve farklı oranlarda KF ve ATE kullanılmıştır. ATE içeren karışımlar Tablo 3.3.'ün son 4 satırında verilmiştir.

### **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 numune kalıpları kullanılmıştır. Her bir beton karışımdan 3 adet silindir kalıplara yerleştirilerek 45 saniye boyunca sarsma tablası kullanarak sıkıştırılmıştır. Ayrıca bütün karışımlar için eğilme deneyi için 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 çıkartılmıştır. Silindir numunelerin baş kısımları 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 pürüzlü taraflarının kesilmesi.





Şekil 3.12. Numunelerin oda sıcaklığında kurutulması.

Tablo 3.2. Karışım kod açıklamaları.

No	Karışım Kodu	Kod açıklaması
1	N0K0Ç0	Nano karbon siyahı: % 0, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 0
2	N3K0Ç0	Nano karbon siyahı: % 3, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 0
3	N6K0Ç0	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 0
4	N10K0Ç0	Nano karbon siyahı: % 10, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 0
5	N0K0.2Ç0	Nano karbon siyahı: % 0, karbon fiber: % 0.2, çelik fiber: % 0
6	N3K0.2Ç0	Nano karbon siyahı: % 3, karbon fiber: % 0.2, çelik fiber: % 0
7	N6K0.2Ç0	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0.2, çelik fiber: % 0
8	N10K0.2Ç0	Nano karbon siyahı: % 10, karbon fiber: % 0.2, çelik fiber: % 0
9	N0K0.5Ç0	Nano karbon siyahı: % 0, karbon fiber: % 0.5, çelik fiber: % 0
10	N3K0.5Ç0	Nano karbon siyahı: % 3, karbon fiber: % 0.5, çelik fiber: % 0
11	N6K0.5Ç0	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0.5, çelik fiber: % 0
12	N10K0.5Ç0	Nano karbon siyahı: % 10, karbon fiber: % 0.5, çelik fiber: % 0
13	N0K1Ç0	Nano karbon siyahı: % 0, karbon fiber: % 1, çelik fiber: % 0
14	N3K1Ç0	Nano karbon siyahı: % 3, karbon fiber: % 1, çelik fiber: % 0
15	N6K1Ç0	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 1, çelik fiber: % 0
16	N10K1Ç0	Nano karbon siyahı: % 10, karbon fiber: % 1, çelik fiber: % 0
17	N0K0Ç2	Nano karbon siyahı: % 0, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
18	N3K0Ç2	Nano karbon siyahı: % 3, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
19	N6K0Ç2	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
20	N10K0Ç2	Nano karbon siyahı: % 10, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
21	N0K0.2Ç2	Nano karbon siyahı: % 0, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
22	N3K0.2Ç2	Nano karbon siyahı: % 3, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
23	N6K0.2Ç2	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
24	N10K0.2Ç2	Nano karbon siyahı: % 10, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
25	N0K0.5Ç2	Nano karbon siyahı: % 0, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
26	N3K0.5Ç2	Nano karbon siyahı: % 3, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
27	N6K0.5Ç2	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
28	N10K0.5Ç2	Nano karbon siyahı: % 10, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
29	N0K1Ç2	Nano karbon siyahı: % 0, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
30	N3K1Ç2	Nano karbon siyahı: % 3, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
31	N6K1Ç2	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
32	N10K1Ç2	Nano karbon siyahı: % 10, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
33	N6 K0E0.5	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0, tel erezyon: % 0.5
34	N6 K0E1.0	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0, tel erezyon: % 1.0
35	N6K0.2E1.0	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0.2, tel erezyon: % 1.0
36	N6K0.2E1.5	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0.2, tel erezyon: % 1.5

Tablo 3.3. Karışım detayları.

No	Karışım Kodu	AI (kg)	AII (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	ÇF (%)	ATE (kg)	NKS (kg)	KF (kg)	KMS (%)	SA(%)
1	N0K0Ç0	850.00	850.00	425.00	191.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50
2	N3K0Ç0	844.90	844.90	422.45	195.84	0.00	0.00	12.75	0.00	0.00	0.50
3	N6K0Ç0	839.80	839.80	419.90	200.43	0.00	0.00	25.5	0.00	0.00	0.50
4	N10K0Ç0	833.00	833.00	416.50	206.55	0.00	0.00	42.50	0.00	0.00	0.75
5	N0K0.2Ç0	848.53	848.53	424.26	190.92	0.00	0.00	0.00	3.60	0.20	0.75
6	N3K0.2Ç0	843.43	843.43	421.72	195.51	0.00	0.00	12.75	3.60	0.20	0.75
7	N6K0.2Ç0	838.33	838.33	419.17	200.10	0.00	0.00	25.5	3.60	0.20	0.75
8	N10K0.2Ç0	831.56	831.56	415.78	206.23	0.00	0.00	42.50	3.60	0.20	1.00
9	N0K0.5Ç0	846.43	846.43	423.22	190.45	0.00	0.00	0.00	9.00	0.20	1.25
10	N3K0.5Ç0	841.33	841.33	420.67	195.04	0.00	0.00	12.75	9.00	0.20	1.25
11	N6K0.5Ç0	836.23	836.23	418.12	199.63	0.00	0.00	25.5	9.00	0.20	1.50
12	N10K0.5Ç0	829.43	829.43	414.72	205.75	0.00	0.00	42.50	9.00	0.20	1.50
13	N0K1Ç0	842.78	842.78	421.39	189.63	0.00	0.00	0.00	18.00	0.00	1.75
14	N3K1Ç0	837.68	837.68	418.84	194.22	0.00	0.00	12.75	18.00	0.00	1.75
15	N6K1Ç0	832.58	832.58	416.29	198.81	0.00	0.00	25.5	18.00	0.00	1.75
16	N10K1Ç0	825.78	825.78	412.89	204.93	0.00	0.00	42.50	18.00	0.00	2.00
17	N0K0Ç2	831.22	831.22	415.61	187.02	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50
18	N3K0Ç2	826.12	826.12	413.06	191.61	0.60	0.00	12.75	0.00	0.00	0.50
19	N6K0Ç2	821.02	821.02	410.51	196.20	0.60	0.00	25.5	0.00	0.00	0.50
20	N10K0Ç2	814.22	814.22	407.11	202.32	0.60	0.00	42.50	0.00	0.00	0.75

Tablo 3.3. (Devamı)

21	N0K0.2Ç2	829.77	829.77	414.89	186.70	0.60	0.00	0.00	3.60	0.00	0.75
22	N3K0.2Ç2	824.67	826.12	412.34	191.29	0.60	0.00	12.75	3.60	0.00	0.75
23	N6K0.2Ç2	819.57	819.57	409.79	195.88	0.60	0.00	25.5	3.60	0.00	0.75
24	N10K0.2Ç2	812.77	812.77	406.39	202.00	0.60	0.00	42.50	3.60	0.00	1.00
25	N0K0.5Ç2	827.56	827.56	413.78	186.20	0.60	0.00	0.00	9.00	0.00	1.25
26	N3K0.5Ç2	822.46	822.46	411.23	190.79	0.60	0.00	12.75	9.00	0.00	1.25
27	N6K0.5Ç2	817.36	817.36	408.68	195.38	0.60	0.00	25.5	9.00	0.00	1.50
28	N10K0.5Ç2	810.56	810.56	405.28	201.50	0.60	0.00	42.50	9.00	0.00	1.50
29	N0K1Ç2	823.99	823.99	412.00	185.40	0.60	0.00	0.00	18.00	0.00	1.75
30	N3K1Ç2	818.89	818.89	409.44	189.99	0.60	0.00	12.75	18.00	0.00	1.75
31	N6K1Ç2	813.79	813.79	406.90	194.58	0.60	0.00	25.5	18.00	0.00	1.75
32	N10K1Ç2	806.99	806.99	403.50	200.70	0.60	0.00	42.50	18.00	0.00	2.00
33	N6 K0E0.5	822.80	822.80	411.40	196.61	0.00	42.50	25.5	0.00	0.20	0.75
34	N6 K0E1.0	805.80	805.80	402.90	192.78	0.00	85.00	25.5	0.00	0.20	0.75
35	N6K0.2E1.0	804.36	804.36	402.18	192.46	0.00	85.00	25.5	3.60	0.20	1.6
36	N6K0.2E1.5	787.36	787.36	393.68	188.63	0.00	127.5	25.5	3.60	0.20	1.6

AI: ince Agrega, AII: iri agrega, ÇF: çelik fiber, NKS: nano karbon siyahı, KF: karbon fiber, KMS: karboksi metil selüloz, SA: süper akışkanlaştırıcı.

### 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.a). Elde edilen bütün karışımlar için ayrıca 10 x 10 x 40 cm lik prizmatik eğilme numuneleri üretilmiştir. Eğilme deneyleri 5 ton kapasiteli laboratuvar test cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.13.b).



Şekil 3.13. Basınç (a) ve eğilme (b) test cihazları.

### 3.5.2. Çarpma test yöntemi

Darbe durumları iki sınıfa ayrılabilir, yüksek ve düşük hızlı darbesi [103]. ACI 544.2R-89 [104] standardında önerilen çarpma testi, çimentolu malzeme levhasının darbe dayanımını ölçmek için en uygun test yöntemidir [105]. 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 kütle'nin ağırlığı,  $g$  (yer çekimi) =  $9.81 \text{ m / s}^2$ ,  $h$  = kütle'nin 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 incelemişler [103].

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 düşerek çarpma testi gerçekleştirilir. Numunede nihai çatlak oluşuncaya kadar

Çarpma işlemine devam edilmiştir. Çarpma sayısını kullanarak denklem 3.2'den nihai enerji değeri hesaplanmıştır.



şekil 3.14. Çarpma test aleti.

### 3.5.3. Elektriksel direnç ölçme test yöntemleri

Üretilen betonun elektriksel direncini ölçmek için 10 cm çapında 20 cm yüksekliğinde standart silindir numuneler kullanılmıştır. Elektriksel iletken betonun direnci farklı yöntemler ile ölçülebilir. 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).

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

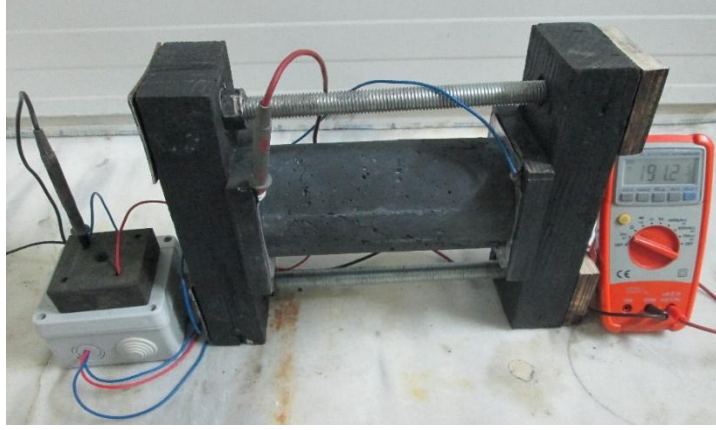
2. Dört proflu veya wanner prop yöntemi (WPY): bu yöntemde direnç ölçümü silindirik bir numunenin yüzeyine temas edilen dört proflu ekipmana voltaj uyguluyarak gerçekleştirilir. Bu çalışmada kullanılan dört proflu yüzeysel direnç ölçme düzeneği Şek 3.16.'da verilmiştir. İki iç prop arası belirli bir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

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

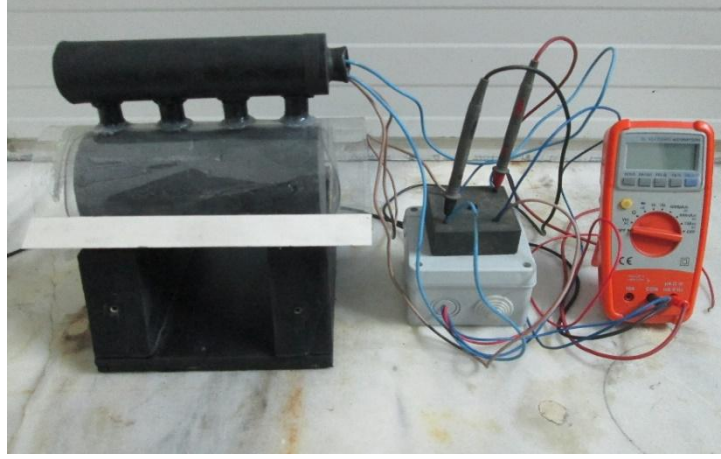
Burada  $\rho$  elektriksel öz direnç,  $a$  proflar arası mesafe ve  $R$  numunenin elektriksel direncidir.

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.

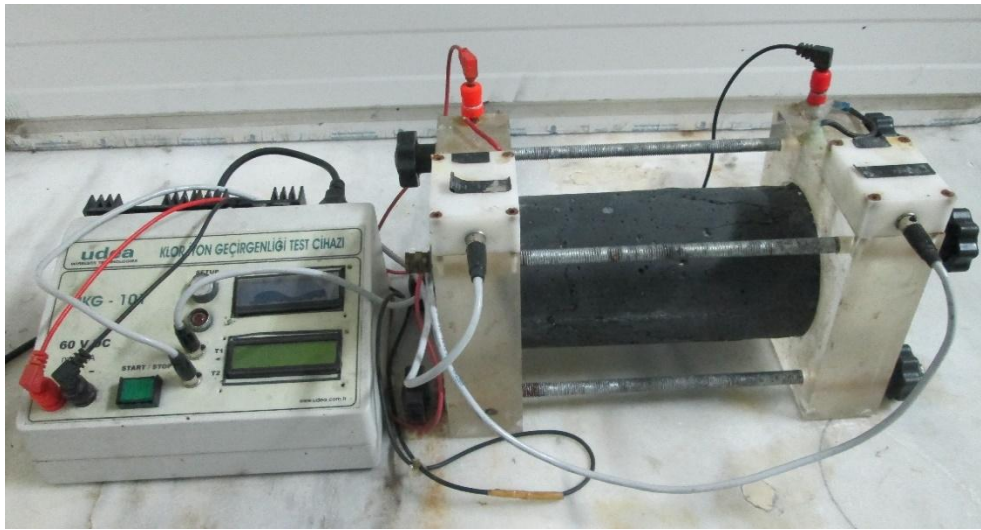




Şekil 3.15. İki noktalı tek eksenli iletkenlik ölçme düzeneği.



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 üretilen numunelerin elektriksel, mekaniksel ve çarpma özelliklerinin incelenmesi 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’da 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 ( $\Omega$ .cm)			WYÖD ( $\Omega$ .cm)	ASTM-D ( $\Omega$ .cm)	$\sigma_c$ (Mpa)	$\sigma_f$ (Mpa)	Eu (J)
		7 Gün	21 Gün	28 Gün					
1	N0K0Ç0	7233,08	10660,80	22496,10	95209.00	7291.02	44,15	4,98	22,66
2	N3K0Ç0	7022,59	11106,86	22496,10	93483.00	7291.02	44,45	6,33	27,52
3	N6K0Ç0	10379,29	13012,45	25524,42	94950.84	8548.09	49,28	6,88	24,28
4	N10K0Ç0	10369,29	12823,86	23491,50	95845.32	9534.41	52,26	6,42	24,28
5	N0K0.2Ç0	18871,13	11344,19	19376,20	93005.76	7511.96	51,85	5,69	29,14
6	N3K0.2Ç0	10409,96	8269,59	13012,45	46844.81	7082.71	54,20	6,59	59,89
7	N6K0.2Ç0	4568,91	6216,72	8400,44	32257.69	8263.16	53,71	7,08	58,27
8	N10K0.2Ç0	2894,81	3921,03	4915,81	24185.80	7291.02	51,04	7,75	79,31
9	N0K0.5Ç0	1325,28	1460,95	1629,55	8799.58	3098.68	48,15	8,17	76,08
10	N3K0.5Ç0	1108,83	1156,66	1438,77	4316.31	1792.83	45,56	7,71	90,64
11	N6K0.5Ç0	228,43	212,36	222,45	560.58	708.27	45,49	7,63	72,84
12	N10K0.5Ç0	352,90	418,04	385,78	1444.35	1087.26	42,16	8,13	66,36
13	N0K1Ç0	206,08	212,36	175,80	569.59	679.16	48,66	8,55	45,32
14	N3K1Ç0	115,92	111,30	113,03	321.46	467.73	48,86	9,30	46,94
15	N6K1Ç0	99,79	95,66	80,08	188.34	450.72	47,82	8,62	55,03
16	N10K1Ç0	132,07	130,44	97,24	246.20	487.98	53,37	8,74	53,42
17	N0K0Ç2	2904,31	4989,74	7807,47	38412.75	7746.71	48,51	6,53	132,73

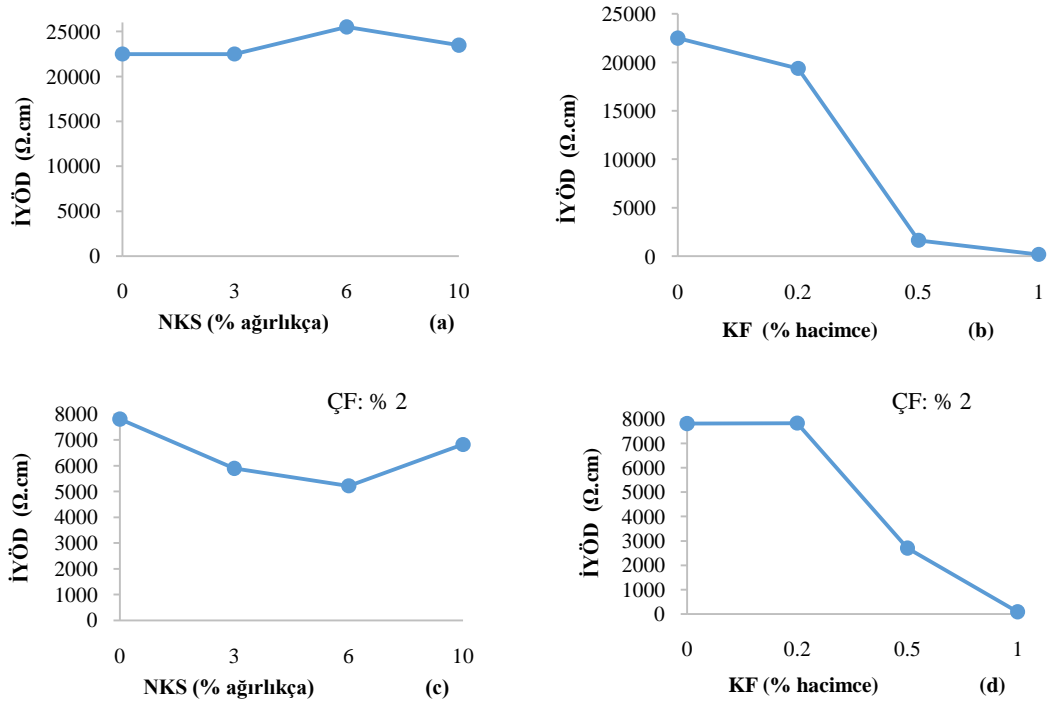
Tablo 4.1. (Devamı)

18	N3K0Ç2	2110,13	4115,57	5898,98	32562.35	5508.77	47,11	9,02	165,10
19	N6K0Ç2	2046,68	4090,20	5218,62	28180.55	5902.26	44,52	8,70	160,25
20	N10K0Ç2	2602,49	4870,71	6824,01	20472.03	6523.55	50,76	8,71	153,77
21	N0K0.2Ç2	3776,02	5287,93	7830,50	19732.86	6523.55	47,79	7,20	152,15
22	N3K0.2Ç2	2469,34	4439,03	6290,38	21135.67	6197.37	51,18	6,35	155,39
23	N6K0.2Ç2	2615,31	4553,24	6538,27	24322.38	6885.96	50,85	6,70	152,15
24	N10K0.2Ç2	1712,61	2901,14	3979,82	16237.66	5902.26	54,54	6,26	142,44
25	N0K0.5Ç2	1478,85	2221,37	2708,71	13261.86	6356.28	55,07	7,02	192,62
26	N3K0.5Ç2	864,67	1043,45	1098,73	4113.66	2100.80	56,33	8,15	186,14
27	N6K0.5Ç2	603,58	659,35	696,18	2673.34	1652.63	56,99	8,12	200,71
28	N10K0.5Ç2	764,78	878,11	940,33	3452.88	1983.16	55,15	7,62	203,95
29	N0K1Ç2	141,95	131,41	95,83	276.00	420.16	50,40	7,62	205,57
30	N3K1Ç2	107,47	97,95	77,39	195.03	406.38	52,84	7,91	218,52
31	N6K1Ç2	127,32	110,15	85,22	194.30	413.85	62,01	8,68	234,70
32	N10K1Ç2	317,15	316,02	305,47	916.41	739.98	62,23	9,31	249,27
33	N6 K0E0.5	478.06	553.92	702.40	1676.55	6352.45	52.24	7.09	192.62
34	N6 K0E1.0	392.14	489.30	645.34	1546.33	5720.20	57.87	7.68	236.32
35	N6K0.2E1.0	176.15	214.50	254.63	376.53	1097.12	41.82	7.58	265.46
36	N6K0.2E1.5	52.08	80.54	97.74	129.48	441.18	39.52	7.21	254.13

#### 4.1.1. 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 görülmemiştir, aksine 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.).

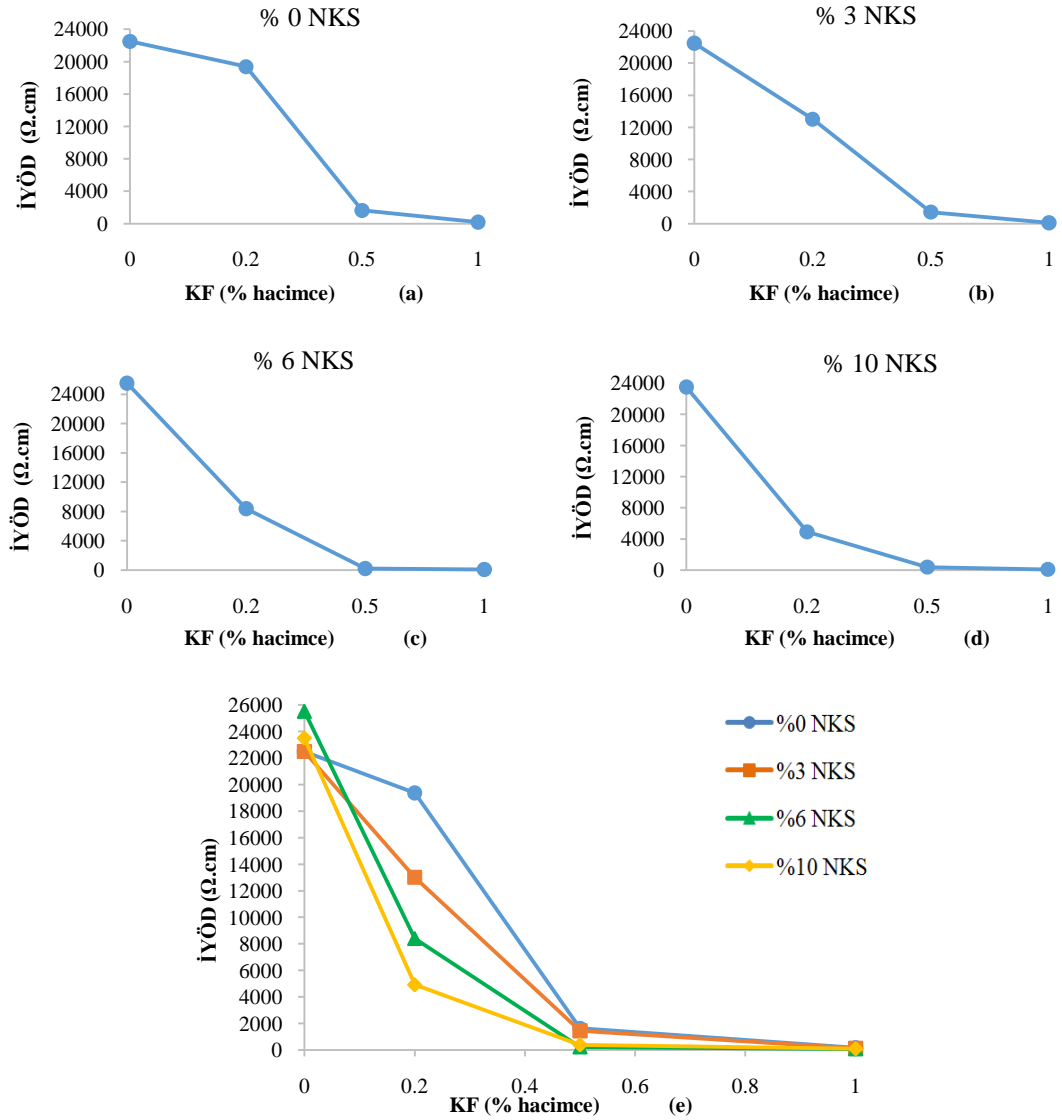
KF'in beton üzerinde vurguladığı etki düşük oranlarda kullanıldığı zaman da ortaya çıkmıştır, ancak Şekil 4.1.b'de de görüldüğü gibi KF içeriği % 0.5'in üzerine çıktığı zaman İYÖD değerleri yüksek hızla azalmıştır. KF ile % 2 ÇF ikisi bir arada kullanıldığı zaman İYÖD değerinin sadece KF içeren numune sonuçlarına göre yaklaşık 2 kat azaldığı görülmüştür. Diğer taraftan % 0.5 ve % 1 KF içeren karışımlarda ÇF'nin elektriksel iletkenlik üzerinde olumsuz etkisi gözlenmiştir. Bunun nedeni karışımdaki fiber oranının artmasıyla boşluk oranının artması olabilir.



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

#### 4.1.2. NKS ile KF'in birlikte İYÖD değerleri üzerinde etkileri

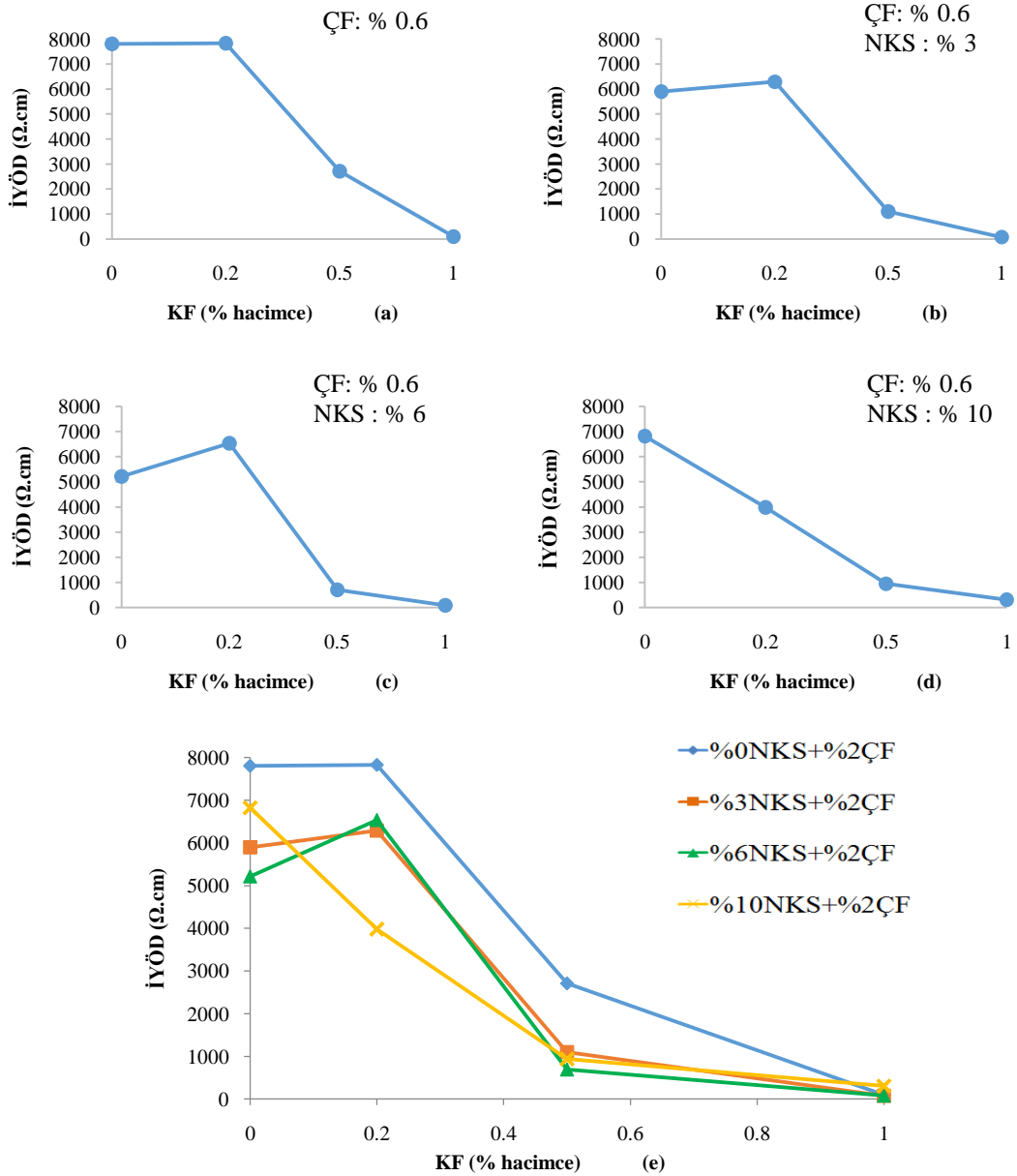
Şekil 4.2.'de farklı oranlarda KF içeren karışımlar üzerinde NKS oranının ED açısından etkisi araştırılmıştır. Grafiklerden anlaşıldığı gibi NKS içeriğinin artmasıyla KF'in direnç azaltma kabiliyeti, 2 ile 7 kat arasında artmıştır. Bu durum özellikle az miktarlarda KF içeren karışım sonuçlarında yani 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.

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

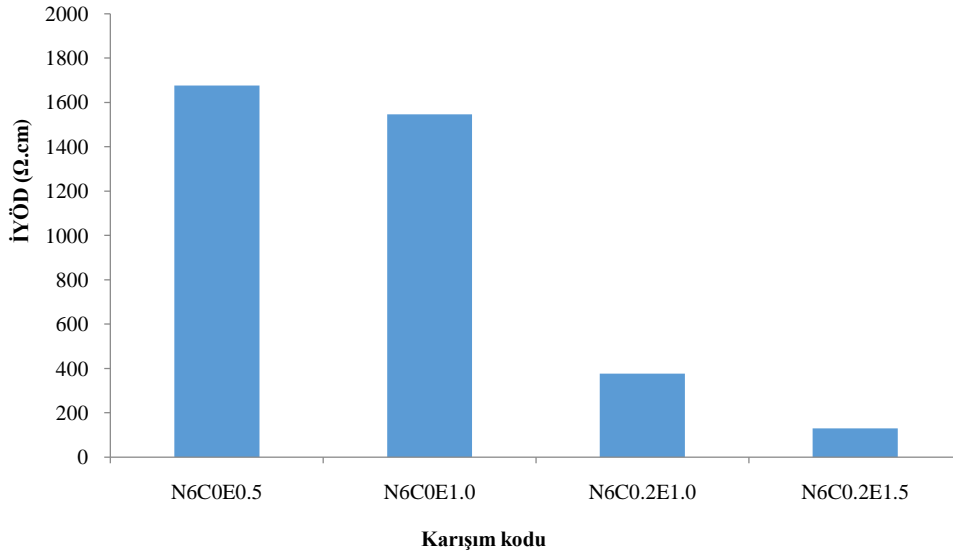
Üç fazlı elektriksel iletken betonların İYÖD değerleri Şekil 4. 3.'de grafikler halinde verilmiştir. Bütün grafiklerde İYÖD değerleri normal betona kıyasla yaklaşık 3 kat azalmıştır (Tablı 4.1.). Şekil 4.3.e.'de de görüldüğü gibi NKS her üç oranda da kullanıldığı halde İYÖD değerleri sadece ÇF içeren 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.

#### 4.1.4. ATE içeren karışımların İYÖD değerleri

ATE içeren dört karışımın elektriksel direnci, hem CF kullanıldığında hem de kullanılmadan 1700  $\Omega$ .cm'nin altında ölçülmüştür (Şekil 4.4.). Oysa kontrol örneğinin İYÖD'si 22000  $\Omega$ .cm'nin üzerinde rapor edilmiştir (Tablo 4.1.). Bu, ATE'nin elektrik direncini azaltmada ne kadar etkili olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, RNCB katkılı karışımlarında, ATE ve KF birlikte kullanıldığında İYÖD değerleri 100 ila 400  $\Omega$ .cm arasında ölçülmüştür. ATE içeren karışımlar arasında, en düşük İYÖD değeri, ağırlıkça% 6 RNCB, hacimce% 0.2 CF ve % 1.5 ATE içeren karışım için 129.49  $\Omega$ .cm olarak elde edilmiştir.



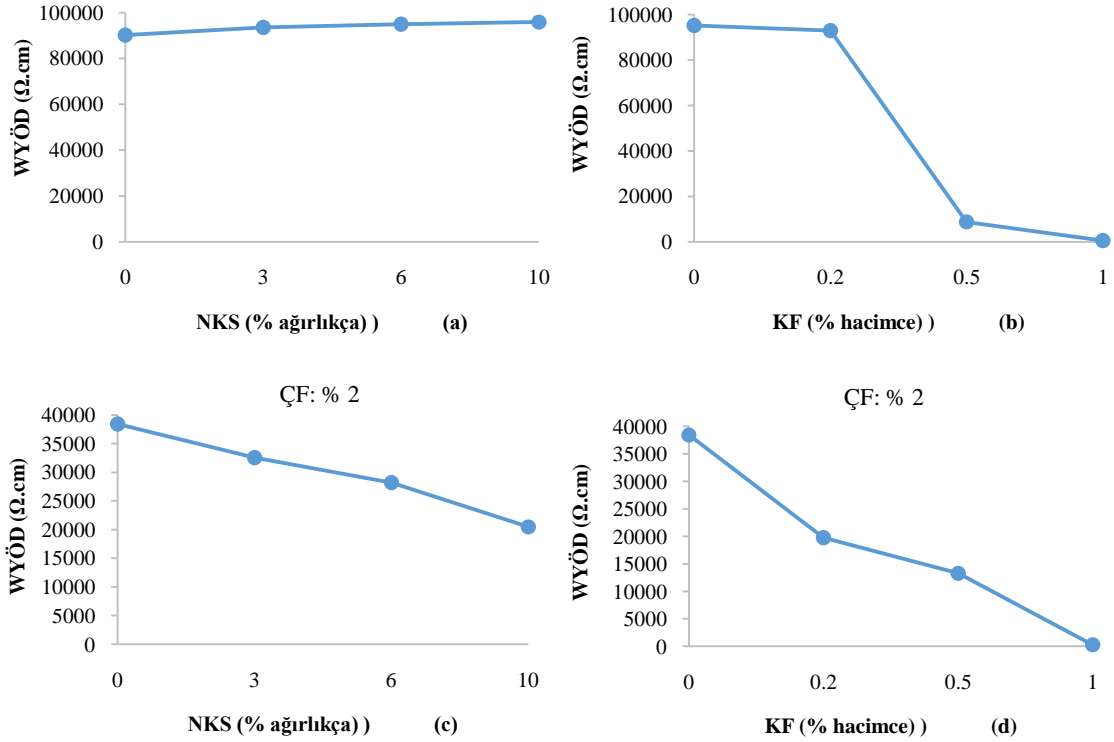
Şekil 4.4. NKS, KF ve ATE içeren betonların İYÖD değerlerinin kıyaslanması.

#### 4.1.5. NKS ve KF'in WYÖD değerleri üzerinde ayrı ayrı etkileri

Şekil 4.5.'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  $\Omega$ .cm olarak diğer karışım sonuçlarına göre oldukça düşük çıkmıştır.

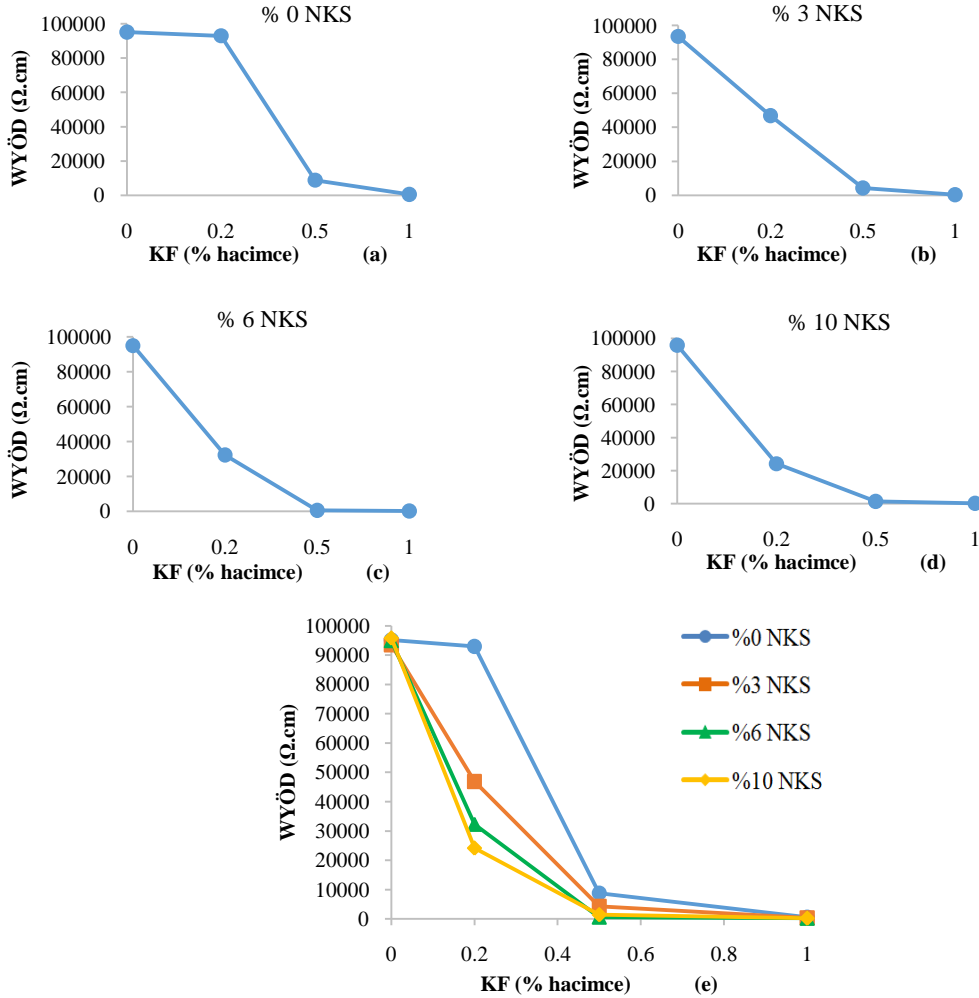


Şekil 4.5. KF ve NKS içeren iletken betonların Wenner prop yöntem ile ölçülen WYÖD değerleri.

#### 4.1.6. NKS ile KF'in birlikte WYÖD değerleri üzerinde etkileri

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

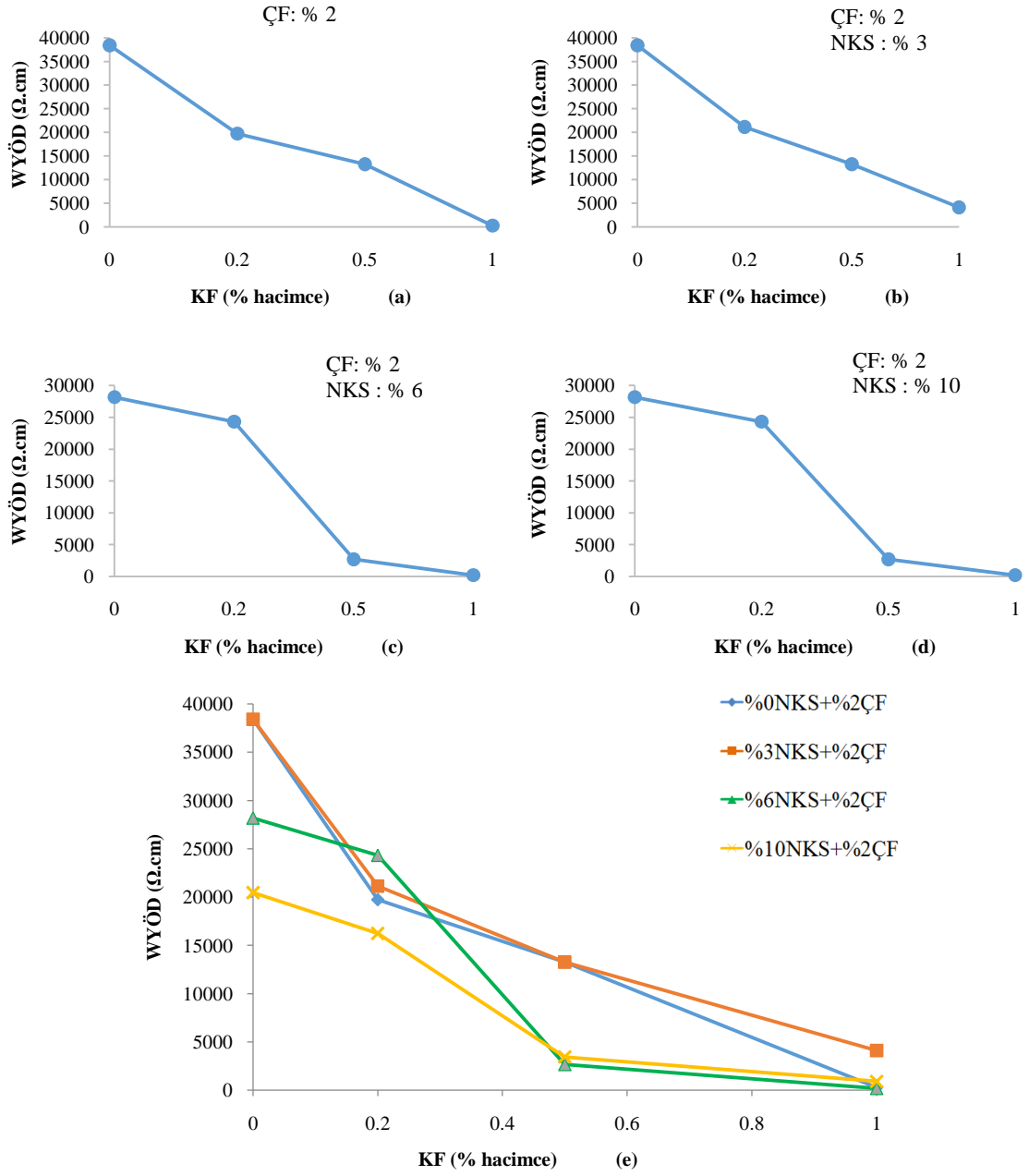
0.5 olduğu zaman NKS'nın daha etkili olduğu ve KF oranı % 0.5'in üzerine çıktığı zaman NKS'nın etkisinin azaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.6. Wenner prop yöntem ile ölçülen WYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması.

#### 4.1.7. 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 4.7.'den de anlaşıldığı gibi NKS içeriği yüksek olan karışımların WYÖD değerleri diğerlerine göre 1.5 ~ 5 kat daha düşük çıkmıştır.

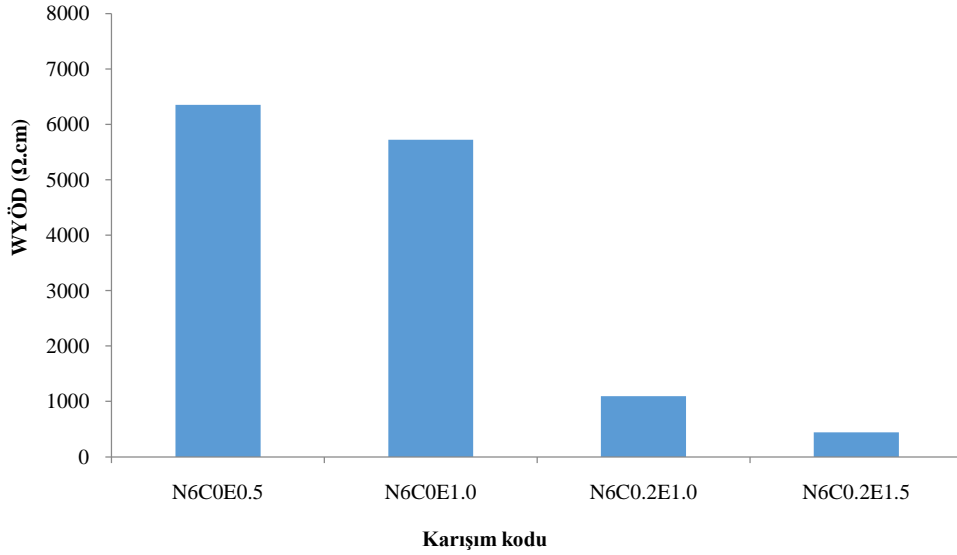


Şekil 4.7. NKS, KF ve ÇF içeren betonların WYÖD değerlerinin kıyaslanması.

#### 4.1.8. ATE içeren karışımların WYÖD değerleri

ATE içeren karışımların WYÖD'leri 6352,45 ve 441,18 Ω.cm arasında ölçülmüştür (Şekil 4.8.). 6352,45 Ω.cm, ağırlıkça% 6 NKS, hacimce % 0 KF ve % 0,5 ATE içeren karışım için ve 441,18 Ω.cm olan, ağırlık % 6 NKS, hacimce % 0,2 KF ve 1,5 ATE

içeren karışım için. İYÖD deney sonuçlarında da olduğu gibi, WYÖD, ATE oranının artmasıyla artmıştır.

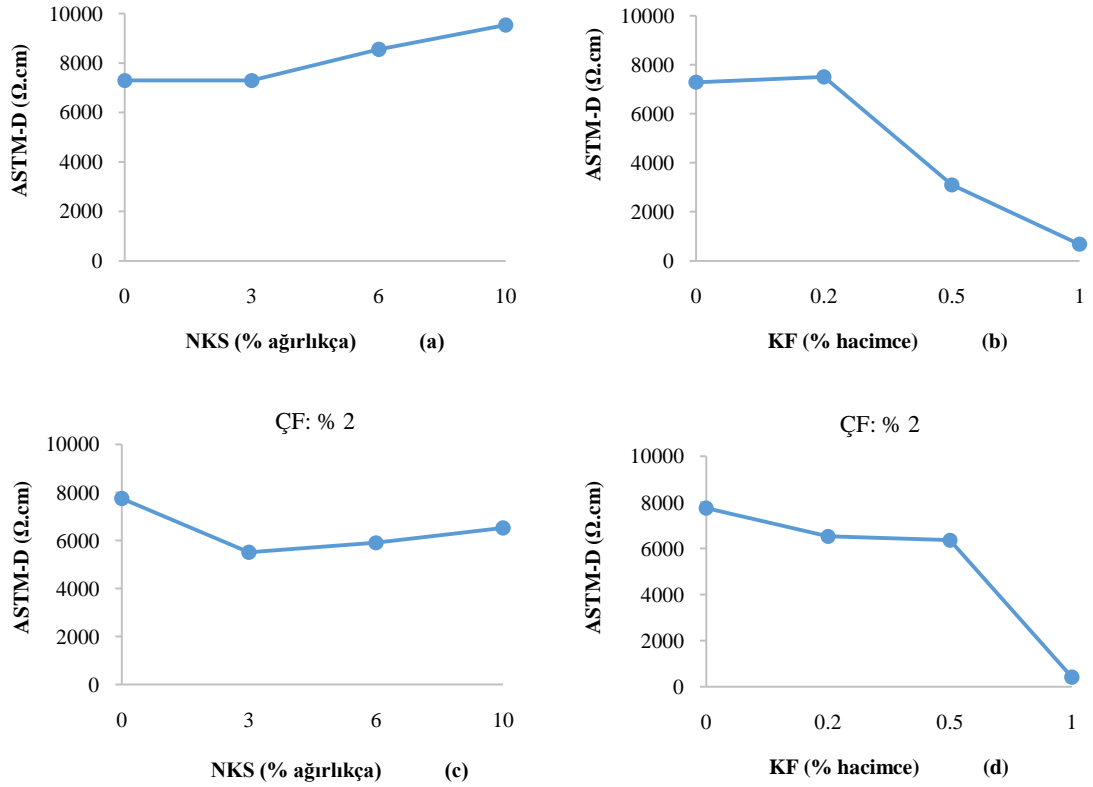


Şekil 4.8. NKS, KF ve ATE içeren betonların WYÖD değerlerinin kıyaslanması.

#### 4.1.9. 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.

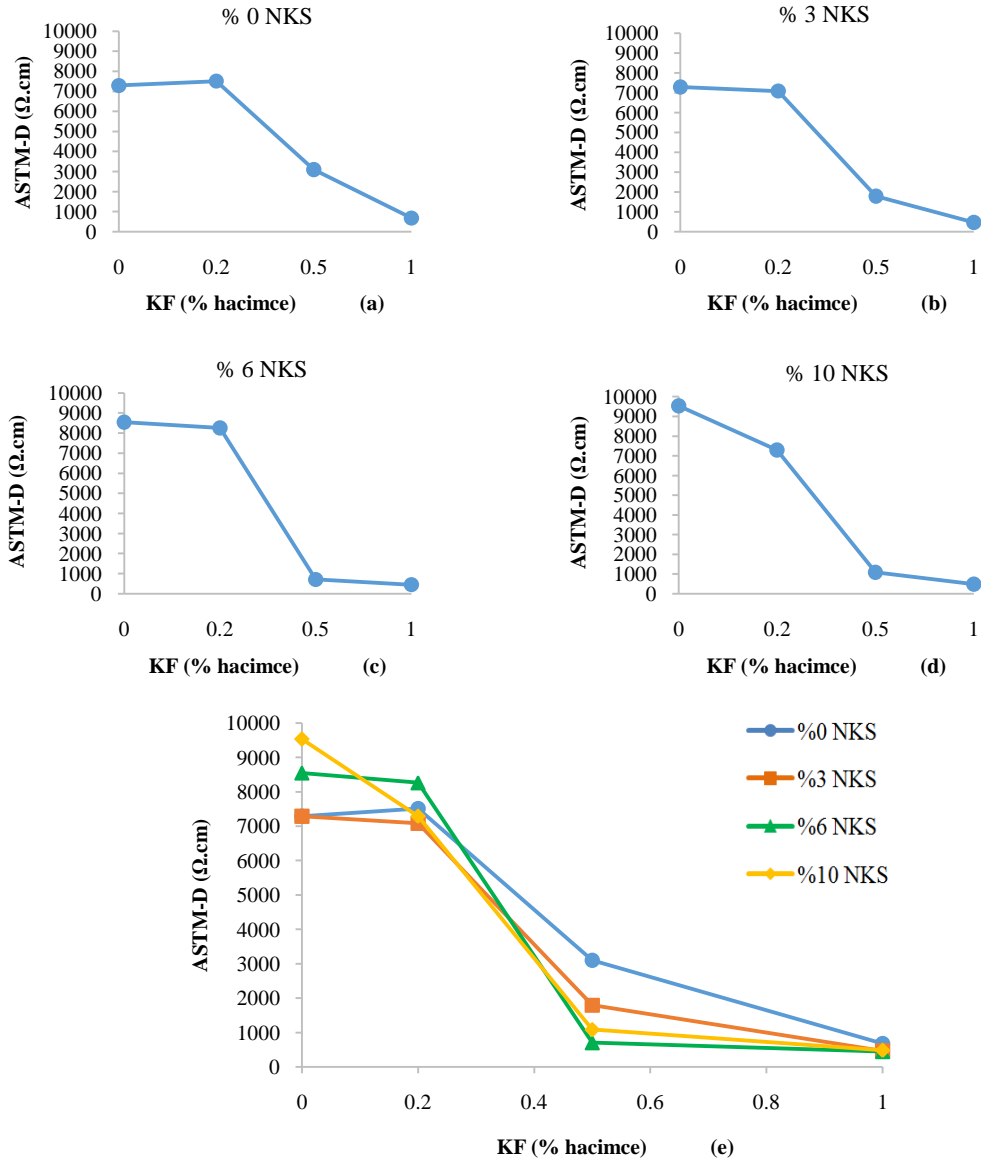
ASTM-D değerlerine göre sadece NKS içeren karışımlarda NKS'nin olumsuz etkisi ortaya çıkmıştır. Bunun yanısıra sadece ÇF içeren karışımlara NKS, özellikle % 3 eklendiği zaman, direncin azalmasında olumlu etkiler sergilemiştir (Şekil 4.9.c). KF-ÇF içeren karışımların ASTM-D değerleri sadece KF içeren karışımların sonuçlarıyla karşılaştırıldığında ÇF'in eklenmesi betonun direncinde kayda değer bir etkisi bulunmamıştır.



Şekil 4.9. KF ve NKS içeren iletken betonların C1760-12 ASTM standartına göre ölçülen ASTM-D değerleri.

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

Şekil 4.10.'da 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.

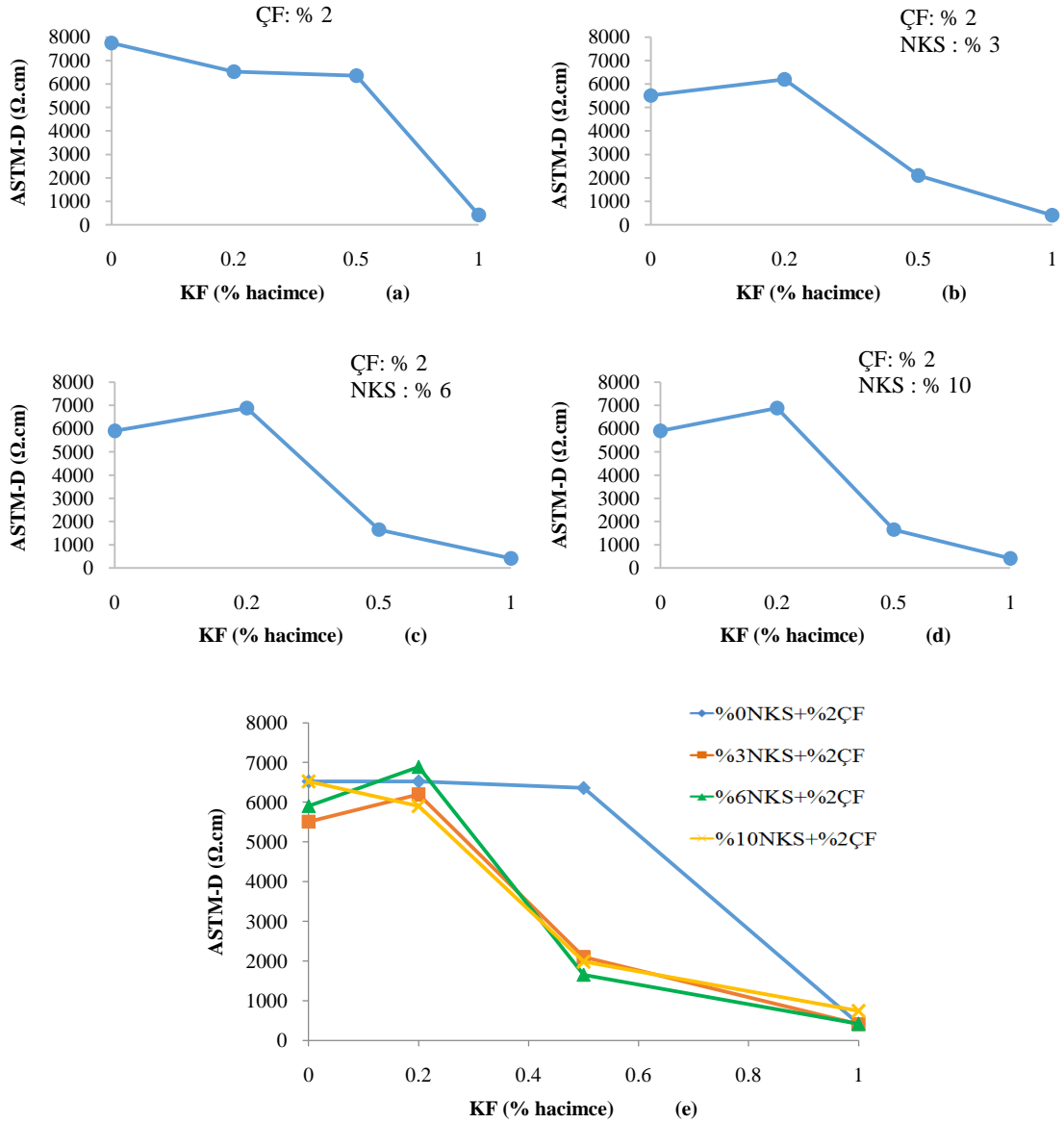


Şekil 4.10. İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması.

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

Şekil 4.11.'de üç fazlı elektriksel iletken betonların ASTM-D değerleri verilmiştir. Bütün grafiklerde ASTM-D değerlerinin normal betona kıyasla azaldığı görülmektedir. Şekil 4.11.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 atıldığı zaman ASTM-D değeri en düşük olarak kaydedilmiştir fakat NKS etkisiz hale gelmiştir.



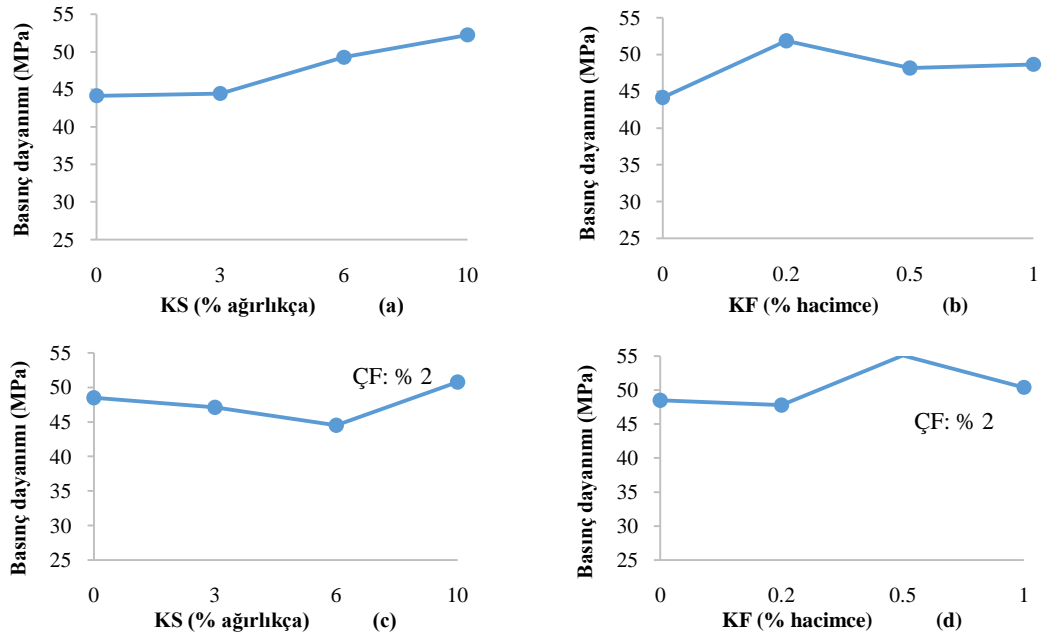
Şekil 4.11. NKS, KF ve ÇF içeren iletken betonların ASTM-D değerlerinin kıyaslanması.

## 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 4.12.'de grafiksel olarak özetlenmiştir. Şekil 4.12.'de 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 4.12.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 4.12.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 4.12.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.



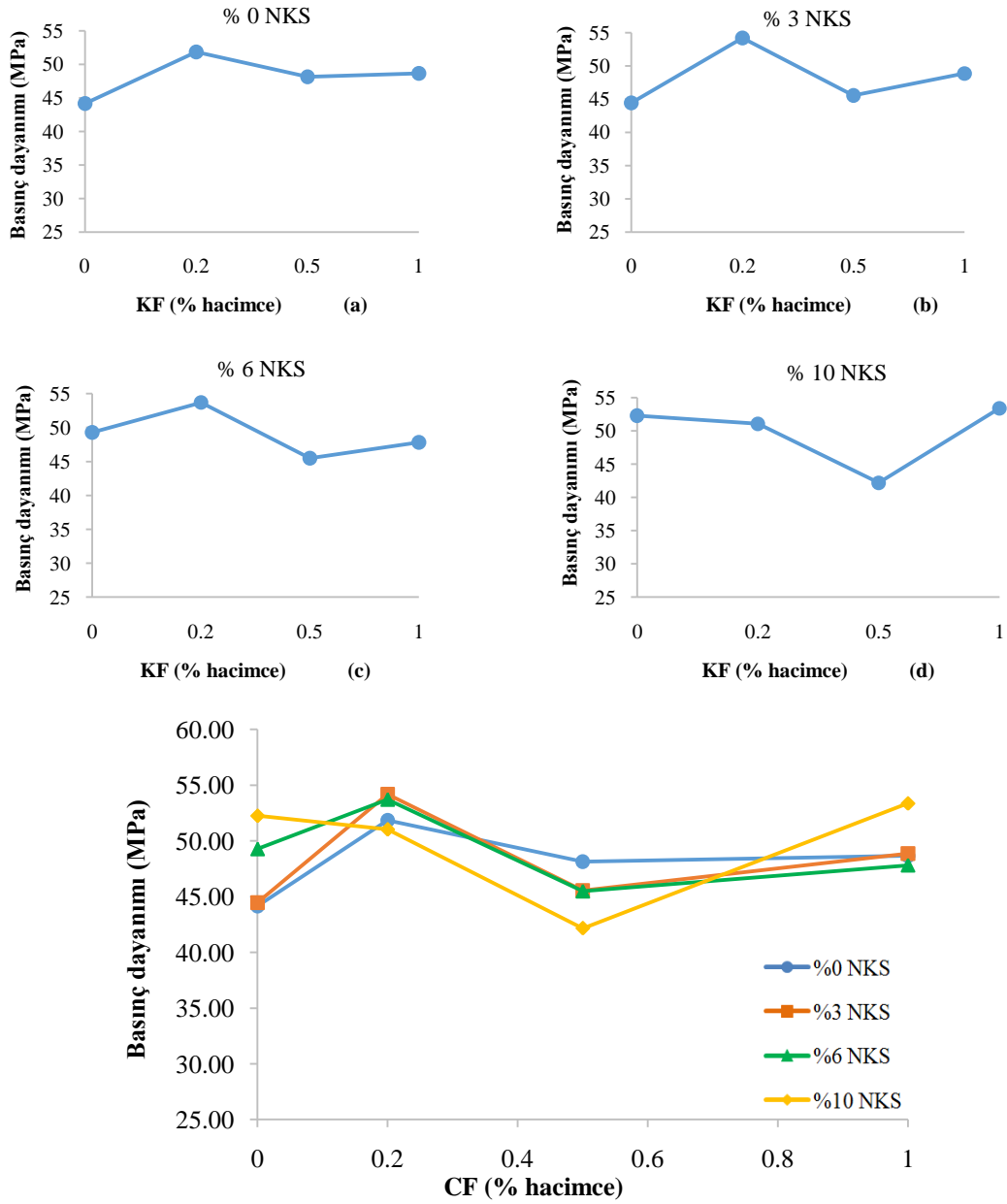
Şekil 4.12. KF ve NKS içeren iletken betonların basınç dayanımları.

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

Şekil 4.13.'de de görölmek üzere KF ile NKS birlikte kullanıldığı zaman basınç dayanımında kayda değer bir gelişme görölmemiştir. Bu karışım grubunda minimum



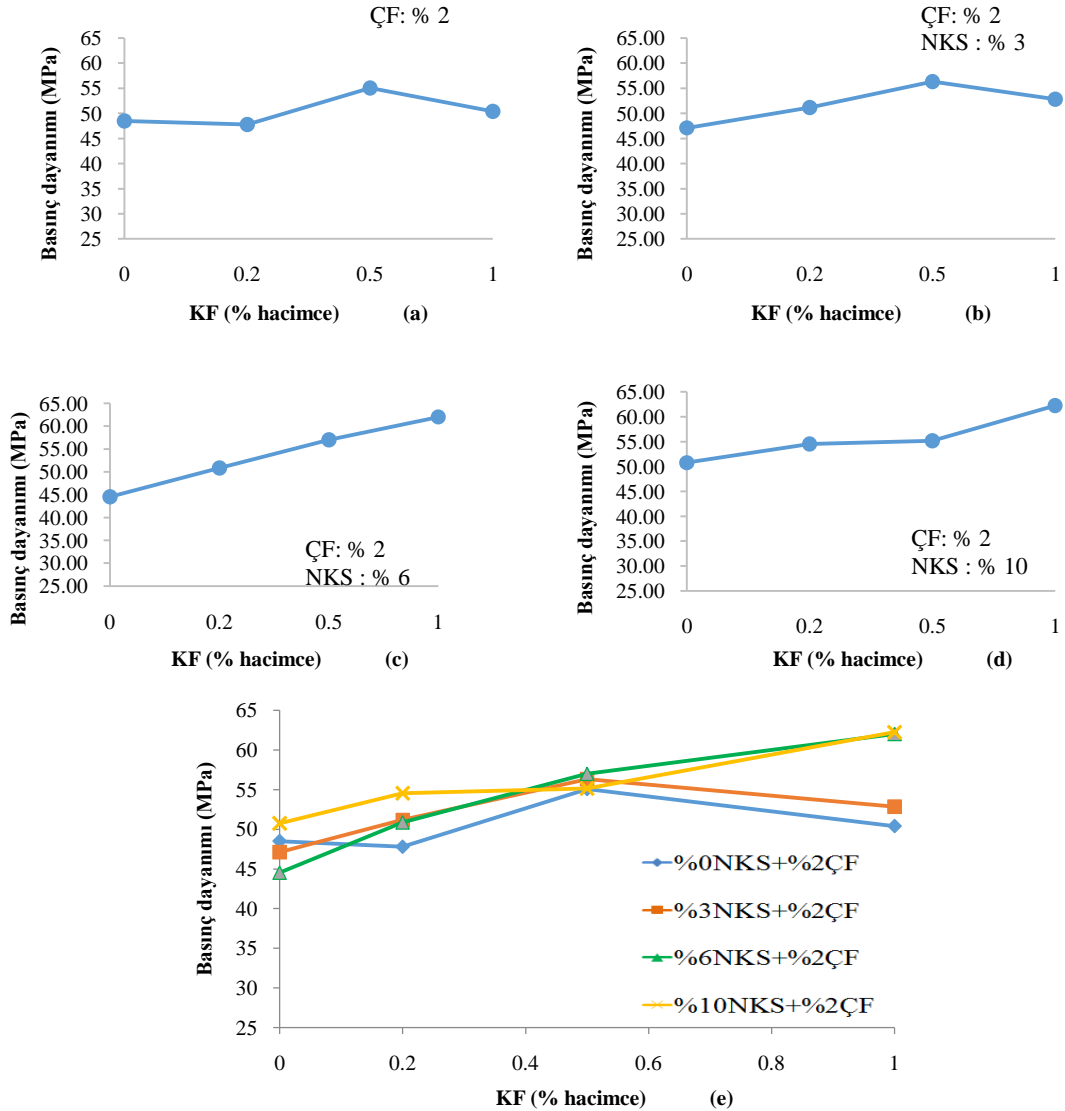
basınç dayanımını % 0.5 KF ve % 10 NKS içeren numuneye aittir (42.16 MPa) ve maksimum basınç dayanımının % 1 KF ve % 10 NKS içeren numuneye ait olduğu belirlenmiştir (53.37 MPa).



Şekil 4.13. KF içeren iletken betonlarda NKS oranlarının basınç dayanımına etkisi.

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

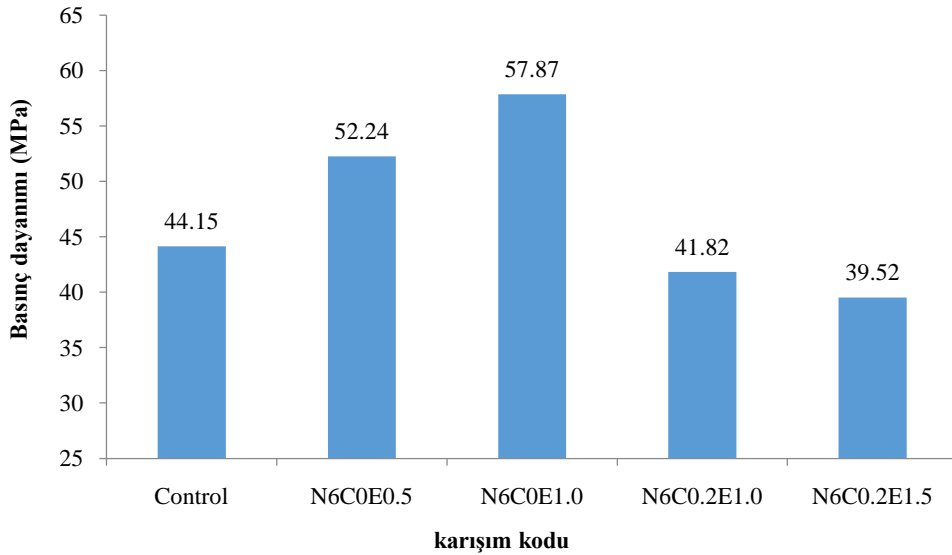
KF, NKS ve ÇF içeren elektriksel iletken betonların basınç dayanımları Şekil 4.14.'de sunulmuştur. NKS içermeyen numunelerde düzenli bir dayanım artışı görülmemiştir (Şekil 4.14.a), ancak NKS içeren KF takviyeli bütün karışımlarda KF miktarının artmasıyla basınç dayanımı da artmıştır (Şekil 4.14.b-d). KF içeren iletken betonlarda NKS oranlarının etkisi Şekil 4.14.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. Bunun nedeni NKS fiberler arası boşlukların doldurulmasından kaynaklanabilir.



Şekil 4.14. Üç fazlı elektriksel iletken betonlarda basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

#### 4.2.4. ATE içeren iletken betonların basınç deney sonuçları

NKS, KF ve ATE içeren iletken beton numunelerin basınç dayanımları Şekil 4.15.'de verilmiştir. KF olmadan, ATE oranının hacimce % 0.5'den %1'e artmasıyla basınç dayanımı %11 artmıştır. Aynı zamanda bu iki numunelerin basınç dayanımları kontrol numuneye kıyasla, sırasıyla %18 ve %32 gelişmiştir. Hacimce %1 ATE içeren karışıma, %0.2 KF'nin eklenmesi basınç dayanımının 57.87 MPa'dan 41.82 MPa'a düşmesine neden olmuştur. N6K0.2E1 numunenin basınç dayanımı ile N6K0.2E1.5 numunenin basınç dayanımı arasında önemli fark görülmemektedir. ATE içeren iletken betonların basınç sonuçları arasında minimum değer (39.52 MPa) N6K0.2E1.5 numuneye ait olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.15. ATE içeren betonlarda basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

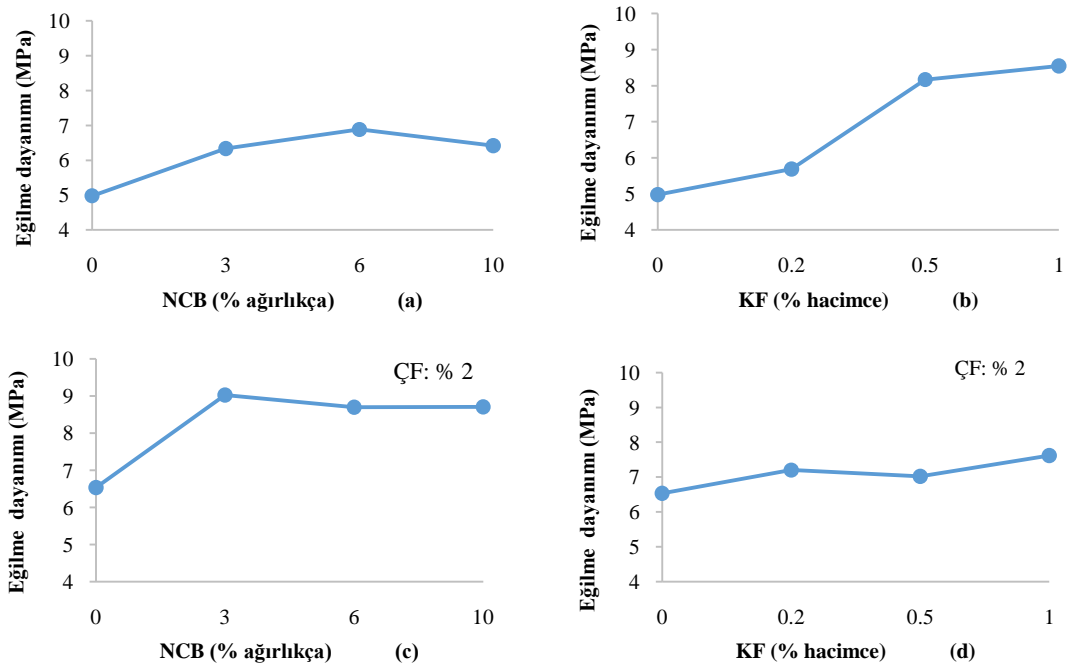
### 4.3. Eğilme Deneyleri

#### 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 incelenmiş ve aşağıda grafikler halinde özetlenmiştir. NKS'nın beton üzerinde eğilme dayanımı açısından olumlu etkisi Şekil 4.16.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 4.16.c). Bu durumda maksimum eğilme dayanımı % 3 NKS katkılı betonda 9.02 MPa olarak elde edilmiştir.

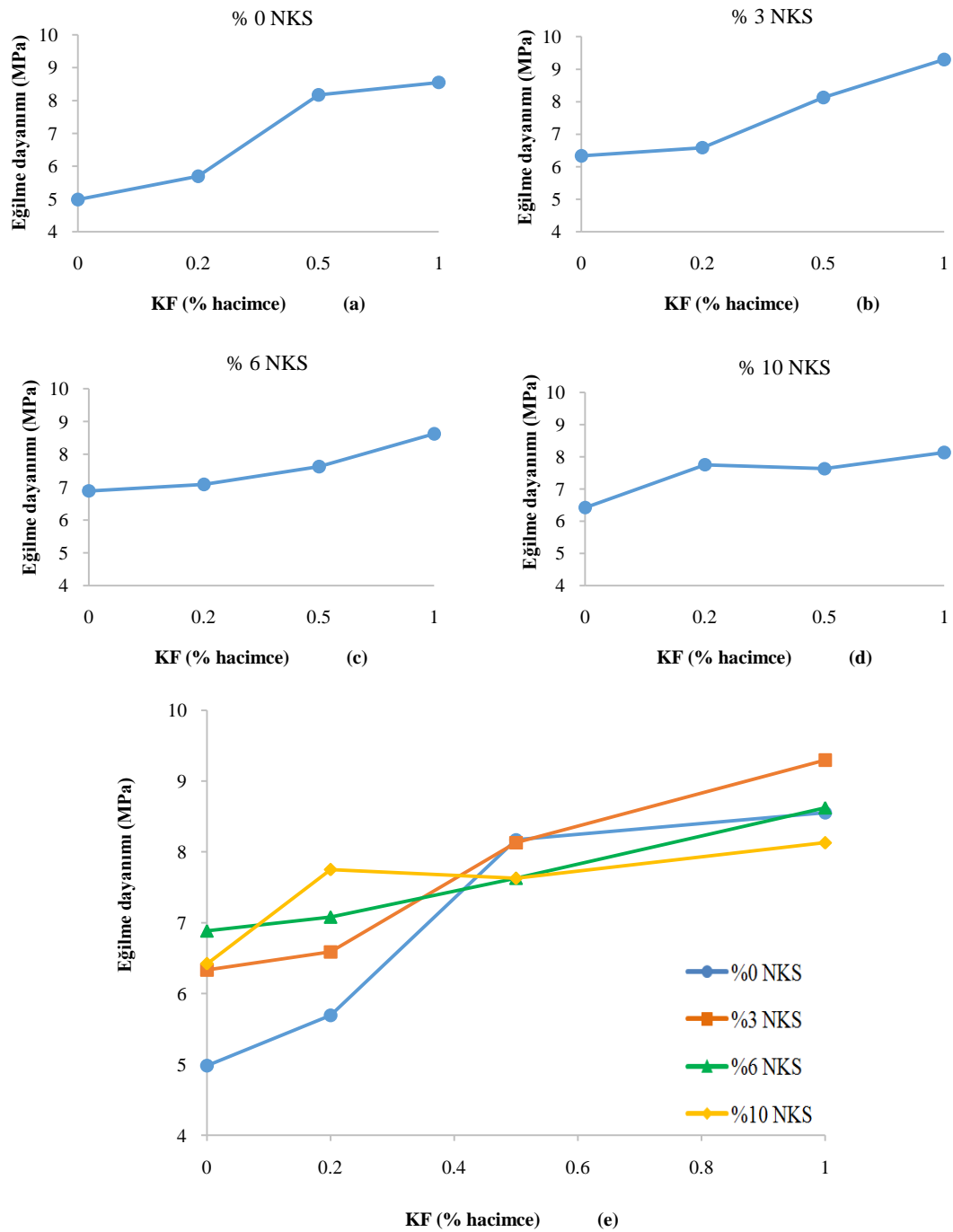
KF'in de önemli derecede olumlu etkisi Şekil 4.16.c.'den belirlenmiştir. Sadece KF içeren betonlarda KF oranının artmasıyla eğilme dayanımı artmıştır ve maksimum dayanım % 1 KF içeren beton için 8.55 MPa olarak elde edilmiştir. % 2 ÇF içeren beton numunesinin eğilme dayanımı 6.53 MPa ken, farklı oranlarda KF eklendiği zaman eğilme dayanımının hafif bir eğimle 7.62'ye kadar artış görülmüştür.



Şekil 4.16. NKS ve KF içeren iletken betonların eğilme dayanımlarının kıyaslanması.

#### 4.3.2. NKS ile KF'in birlikte eğilme dayanımı üzerindeki etkileri

Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların eğilme dayanımları NKS içeriğine göre incelenmiştir ve Şekil 4.17.'te kıyaslanarak verilmiştir. % 3, %6 ve %10 olarak her üçerinde de NKS eklendiğinde eğilme dayanımları, % 20 ~ % 80 artarak, 6 ile 9 MPa arasında elde edilmiştir ki sadece KF içeren karışımlara kıyasla önemli değişiklik bulunmamaktadır (Şekil 4.17.e).

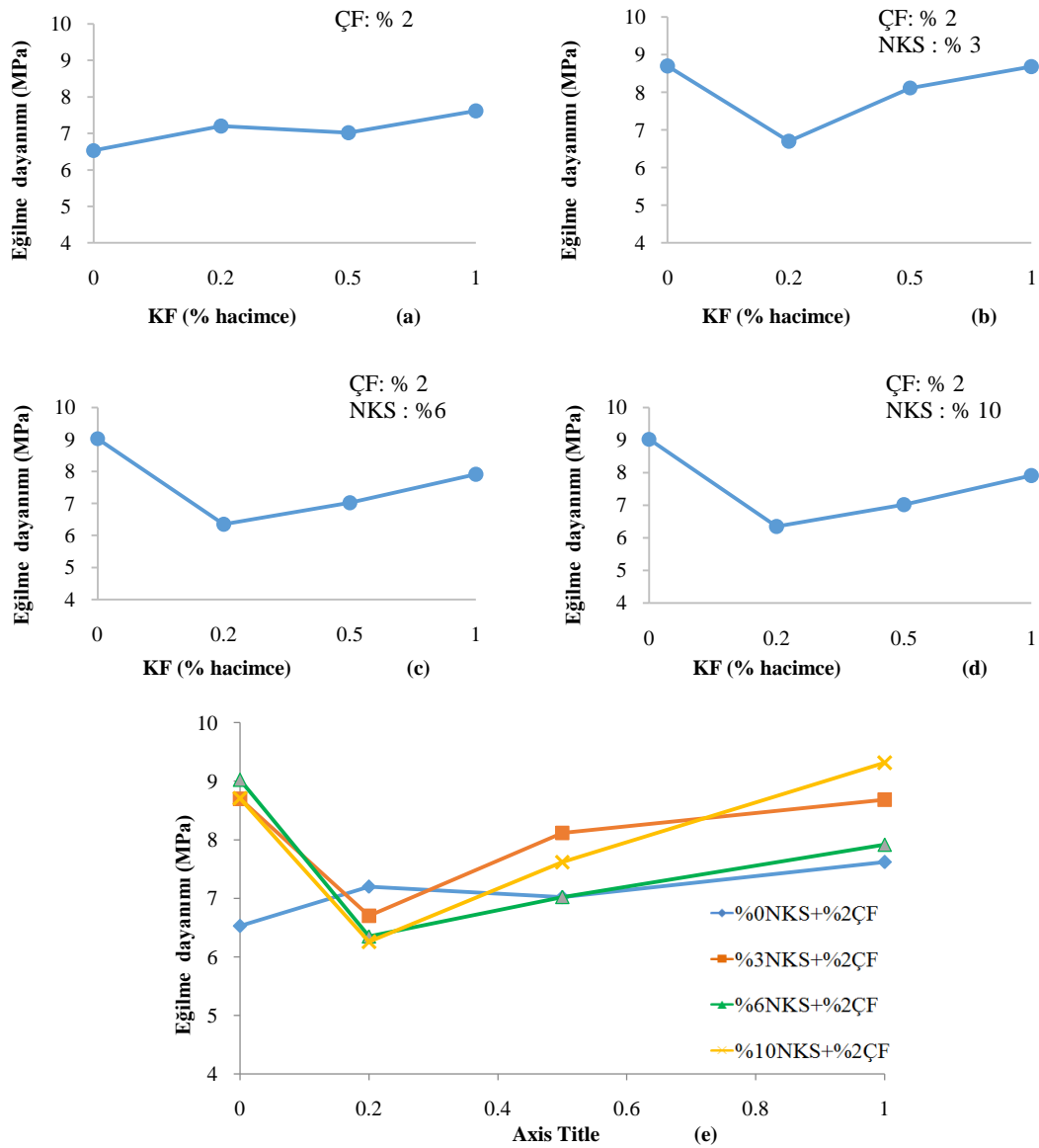


Şekil 4.17. Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların eğilme dayanımlarına NKS'nın etkisi.

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

Şekil 4.18.'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 4.18.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.

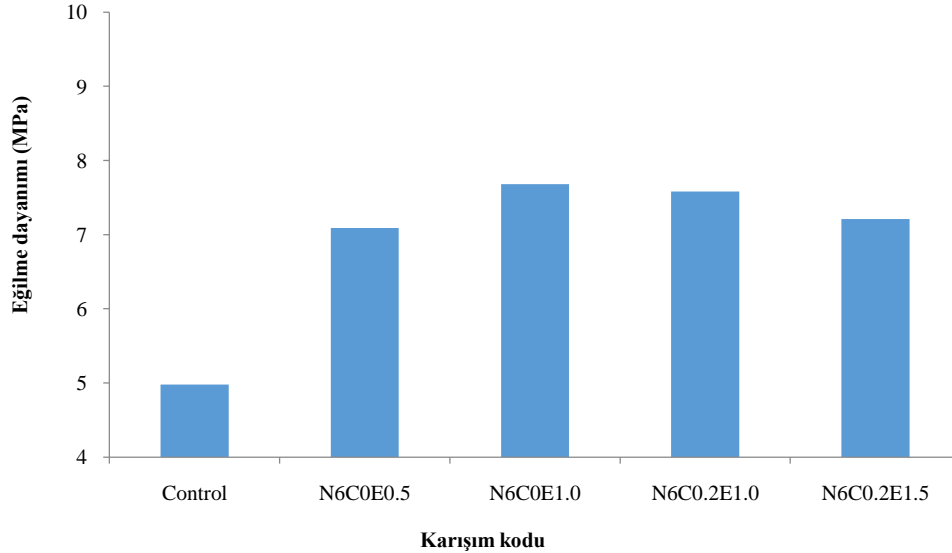


Şekil 4.18. İletken betonlarda NKS, KF ve ÇF'in eğilme dayanımına etkisinin incelenmesi.

#### 4.3.4. ATE içeren iletken betonların eğilme deney sonuçları

NKS, KF ve ATE içeren tüm iletken beton numunelerin eğilme dayanımları kontrol numunenin eğilme dayanımına kıyasla artmıştır (Şekil 4.19.). Bununla birlikte bu karışımlardan elde edilen numunelerin eğilme dayanımları arasında önemli fark

görülmemiştir. Bu karışım grubu için eğilme dayanımları 7.09 ile 7.68 MPa arasında elde edilmiştir.



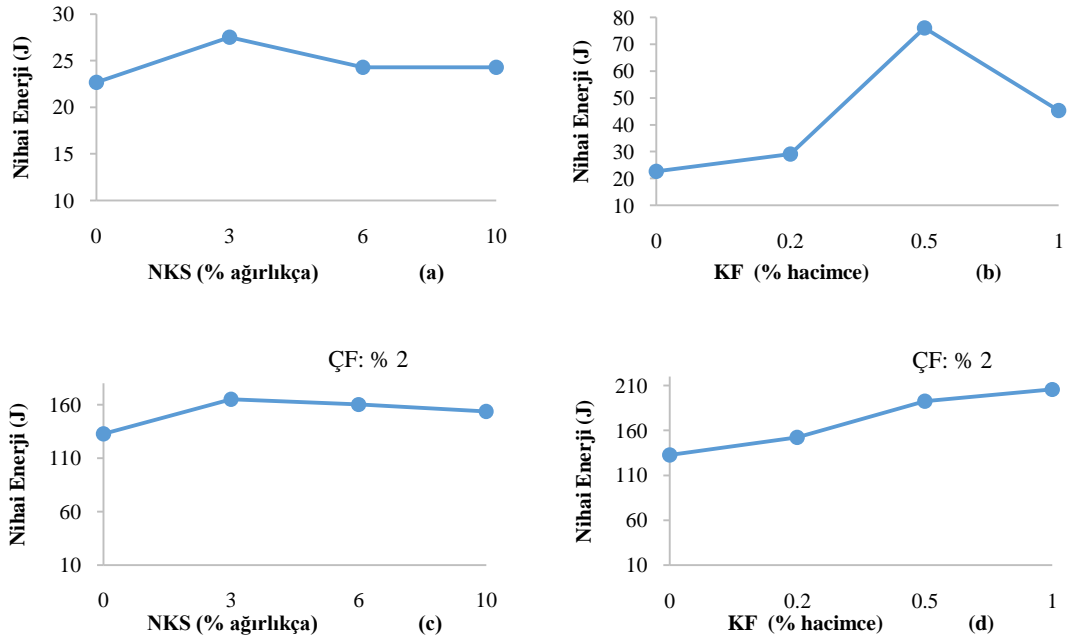
Şekil 4.19. ATE içeren betonlarda basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

#### 4.4. Çarpma Deneyleeri

##### 4.4.1. 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 4.20.a). % 2 ÇF katkılı aynı karışımların nihai enerji değerleri 6 kat artarak 132 ile 165 j arasında hesaplanmıştır. Bu grupta maksimum absorbe edilen enerji değeri % 3 NKS içeren karışım için 165.10 j olarak elde edilmiştir (Şekil 4.20.c).

Üç Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarı Şekil 4.20.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.

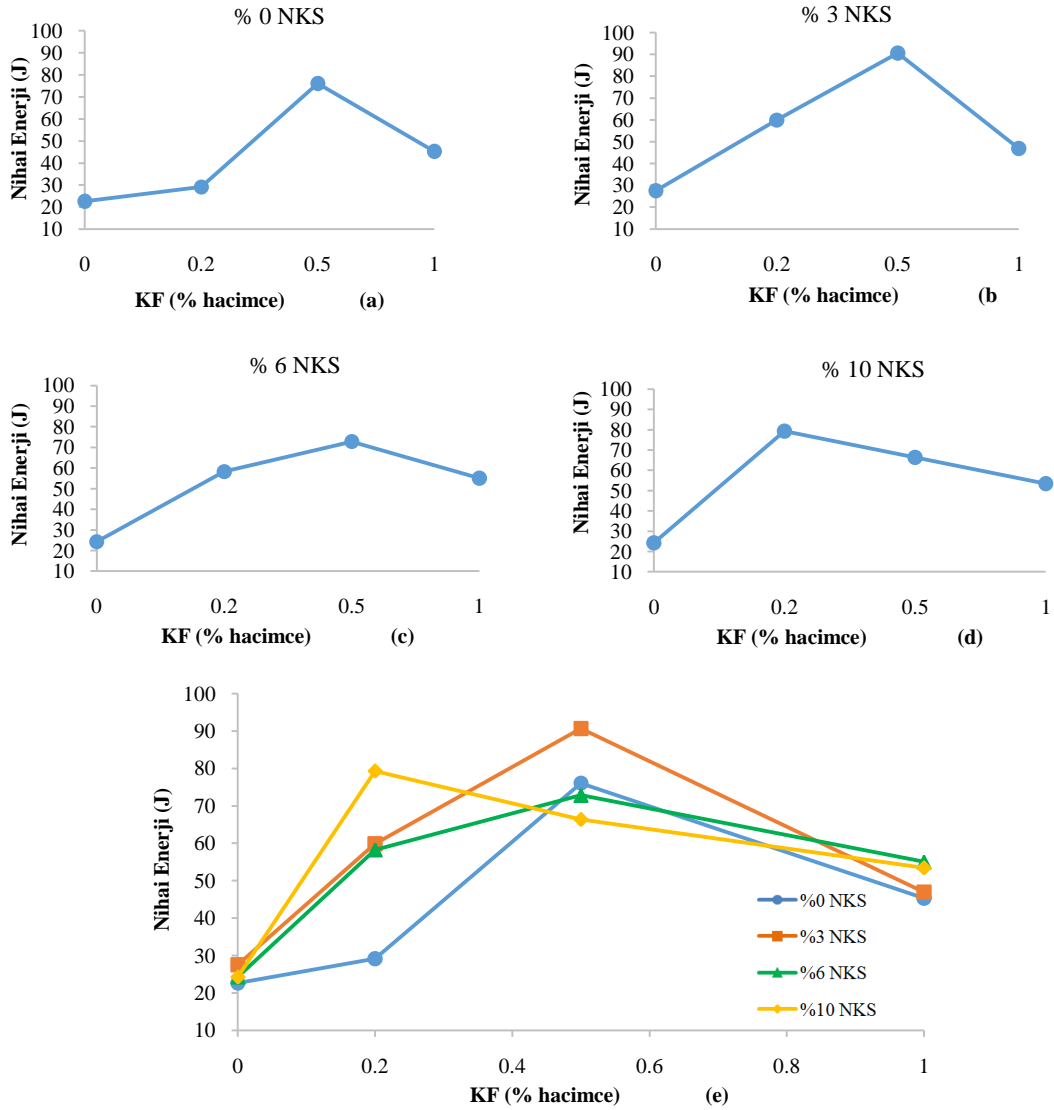


Şekil 4.20. NKS ve KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarlarının kıyaslanması.

#### 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 4.21.'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 4.21.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 4.21.d).

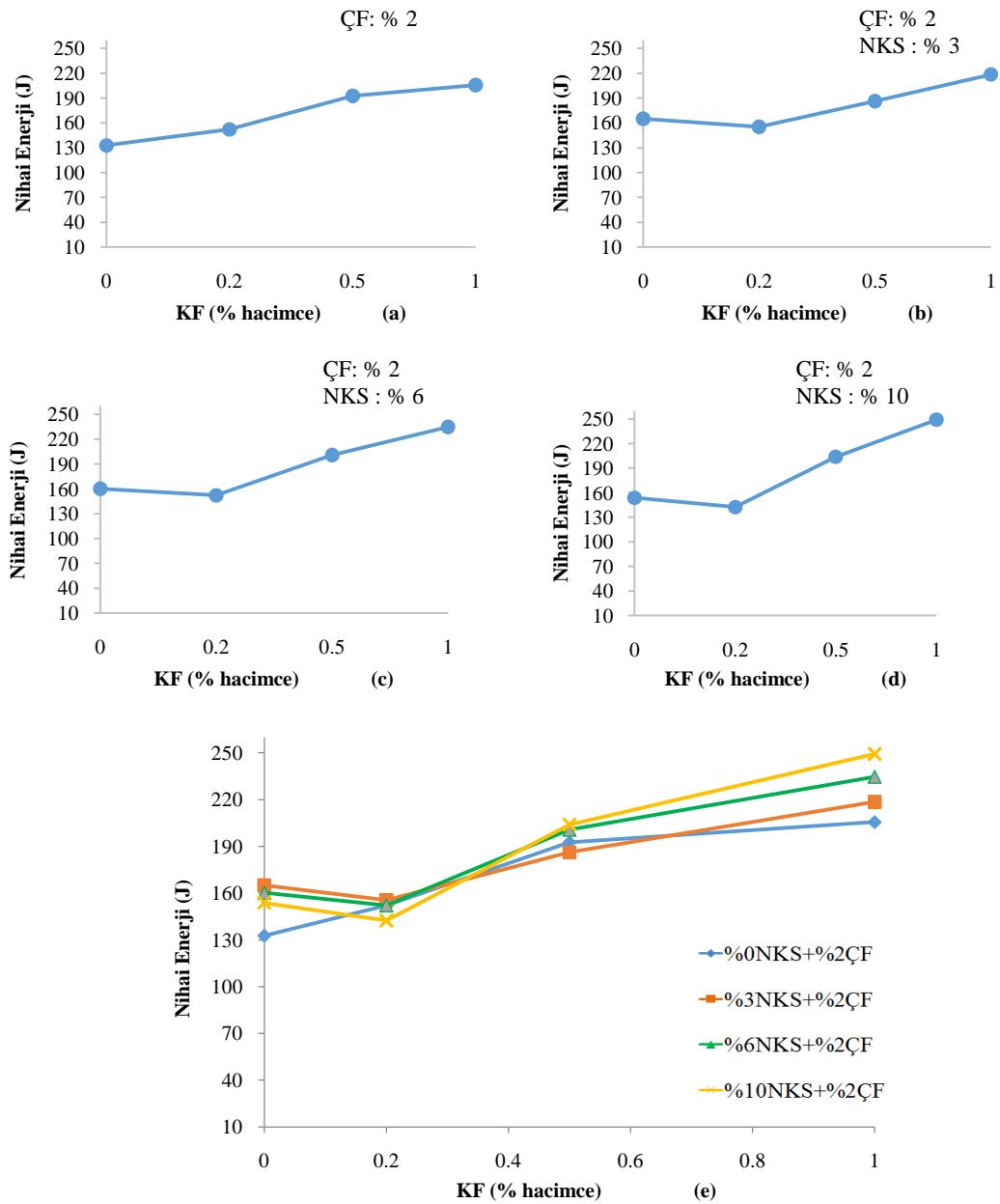




Şekil 4.21. Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarına NKS'nın etkisi.

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

Şekil 4.22.'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 kate kadar artmıştır. Şekil 4.22.e.'ye göre absorbe edilen maksimum enerji miktarı % 10 NKS ve % 1 KF içeren numune ile ilişkilidir.

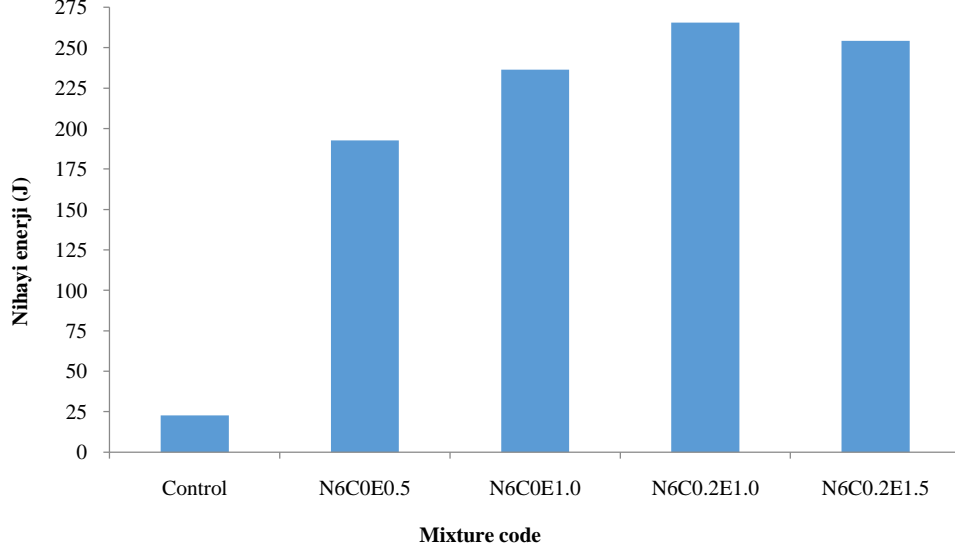


Şekil 4.22. İletken betonlarda NKS, KF ve ÇF'in çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarına etkisinin incelenmesi.

#### 4.4.4. ATE içeren iletken betonların çarpma sonuçları

ATE içeren tüm iletken betonların nihai enerji değerleri kontrol numuneye kıyasla ok kattan daha fazla artmıştır (Şekil 4.23). ATE içeriğinin artmasıyla, çarpma enerji değerleri tüm numunelerde artmıştır ancak N6K0.2E1.5 numunenin absorbe ettiği

enerji değerinde hafif bir azalma görülmüştür. Bu gupta maksimum çarpma enerjisi 265.46 J olarak N6K0.2E1 için elde edilmiştir.



Şekil 4.23. ATE içeren betonlarda çarpmaya karşı dayanımlarının karşılaştırılması.

## BÖLÜM 5. ELEKTRİKLİ ISITMALI YOL KAPLAMA SİSTEMLERİ

### 5.1. 3D ELEKTROTERMAL MODELLEME

Bu kısımdaki temel amac, EİYKS'lerde zamana bağlı ısıtma performansını değerlendirmek için alternatif bir yöntem olarak bir 3D sonlu eleman (FE) modelleme simülasyonu geliştirmek ve böylece deney esnasında tasarım optimizasyonu sağlamaktır. EİB slab için 3-D FE modeli, ABAQUS programı kullanılarak elektrotermal analiz yöntemi ile gerçekleştirilmiştir ve deneysel test sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Geliştirilen 3-D FE modellemede, çeşitli EİYKS tasarım değişkenlerinin ısı üretimi, ısınma süresi ve ısı dağılım performansları incelenmiş duyarlılıkları belirlenmiştir. Bu, tasarım optimizasyonu konusunda rehberlik sağlamak için faydalı olabilir.

EİYKS, iletken bir beton kaplaması gömülü elektrotlardan voltaj uygulanarak çalışır. İletken beton bir direnç olarak hareket ettiğinden Joule kanunu ısıtması yoluyla ısı enerjisi üretir. Üretilen bu enerji birleşik elektrik alan ve ısı transfer denklemleri kullanılarak sayısal olarak değerlendirilebilir [1].

Bir EİB plakasında zaman ve konumun bir fonksiyonu olarak sıcaklığın değişimini öngörmek için geçici bir ısı iletim modeli kullanılır. Katılarda geçici ısı iletimi için üç boyutlu matematiksel model Denklem 5.1.'de verilmiştir [1, 106]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (5.1)$$

$\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) cinsinden yoğunluk,  $C_p$  ( $\text{J} / (\text{kg}\cdot\text{K})$ ) cinsinden ısı kapasitesi,  $T$  ( $^\circ\text{C}$ ) cinsinden sıcaklık,  $t$  (s) cinsinden zaman,  $\nabla$  Laplace operatör,  $k$  ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) cinsinden ısı iletkenliği ve  $Q$  ( $\text{W}/\text{m}^3$ ) cinsinden ısı üretim hızıdır.

EİB kaplamada gerekli elektrik akımı, EİB kaplama içine gömülü elektrotlara elektrik potansiyeli uygulanarak üretilir. Bir katı malzemede elektrik alan için üç boyutlu matematiksel model [107]:

$$E = -\nabla V \quad (5.2)$$

Burada,  $E$  elektrik alanıdır,  $V$  elektriksel potansiyeldir ve  $\nabla$  gradyan operatörüdür.

Joule ısı enerjisi, bir iletken boyunca akan elektrik akımı tarafından dağıtılan elektrik enerjisi oranını tanımlar ve Denklem 5.3'te tarif edildiği gibi ısıya dönüştürülen elektrik enerjisi miktarı ile ilişkilidir:

$$Q = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = (\sigma \cdot \mathbf{E}) \cdot \mathbf{E} \quad (5.3)$$

Burada,  $J$  ( $\text{A}/\text{m}^2$ ) cinsinden elektrik akımı yoğunluğu,  $\sigma$  ( $\text{S}/\text{m}$ ) cinsinden elektriksel iletkenlik ve  $E$  ( $\text{V}/\text{m}$ ) cinsinden elektriksel alandır. Elektrik iletkenliğinin değeri, malzeme sıcaklığına bağlı olarak ( $\sigma$ )'dır.

### 5.1.1. Abaqus Programında Teorik Bilgiler

Abaqus programında bir analiz gerçekleştirmek için, analiz prosedürün, analiz adımları, elektrisel analizi ve eşleşmiş termal-elektriksel analiz prosedürlerini içeren teorik bilgiler aşağıda sunulmaktadır. Bu bilgiler, Abaqus Analysis User's Manual (6.10)'dan alınmıştır [108].

Bir analiz işelmi Abaqus'ta şöyle tanımlanır:

1. Sorun geçmişini adımlara bölmek;

2. Her adım için bir analiz prosedürünün belirlenmesi; ve
3. Yüklerin, sınır koşullarının, temel hareketlerin ve her adım için çıktı taleplerinin verilmesi.

Adımlar (Steps):

Problem geçmişinin adımlara bölünmesi Abaqus'ta temel bir kavramdır. Bir adım (step) geçmişin herhangi bir uygun aşamasıdır, termal, sürenme, dinamik vb. En basit haliyle, bir adım Abaqus / Standard'da statik bir analiz olabilir. Veri (.dat) dosyasında görünecek her adımın bir tanımını sağlanabilir.

Analiz prosedürünü tanımlama:

Her adım için bir analiz prosedürü seçilmelidir. Bu seçenek, aşama sırasında gerçekleştirilecek analiz tipini tanımlar: statik stres analizi, dinamik stres analizi, özdeğer burkulma, geçici ısı transferi analizi, vb. Mevcut analiz prosedürleri aşağıda listelenmiş ve aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır. Her adım için sadece bir prosedüre izin verilir. Abaqus / Standard veya Abaqus / Explicit içinde, mevcut prosedürlerin herhangi bir kombinasyonu adım adım kullanılabilir. Ancak, Abaqus / Standard ve Abaqus / Explicit prosedürleri aynı analizde kullanılamaz.

Analiz adım (step) türleri:

Abaqus'ta iki tür analiz adımı (step) vardır: doğrusal ve doğrusal olmayan adımlar. Genel analiz adımları bir Abaqus / Standard veya Abaqus / Explicit analizine dahil edilebilir; Doğrusal pertürbasyon analizi adımları yalnızca Abaqus / Standard'ta mevcuttur. Abaqus / Standard'ta lineer analiz her zaman lineer analiz prosedürünün uygulandığı tarihte durum hakkında lineer pertürbasyon analizi olarak kabul edilir. Bu lineer pertürbasyon yaklaşımı, lineer yanıtın önyüklemeye veya modelin lineer olmayan cevap geçmişine bağlı olduğu durumlarda genel olarak lineer analiz tekniklerinin uygulanmasına izin verir.

Multiple adımlarda, analiz prosedürü adım adım değiştirilebilir, bu nedenle analizler yaparken büyük esneklik vardır. Tüm genel analiz adımlarında güncellendiğinden, önceki tarihin etkileri her yeni analiz adımındaki cevaba her zaman dahil edilir. Örneğin, geometrik olarak doğrusal olmayan bir statik analiz adımından sonra doğal frekans ekstraksiyonu gerçekleştirilirse, ön yükleme sertliği dahil edilecektir. Doğrusal pertürbasyon adımlarının sonraki genel analiz adımlarında etkisi yoktur. Analizde birkaç adım kullanmanın en belirgin nedeni analiz prosedürü türünü değiştirmektir. Bazen bir analiz mevcut adım tanımının değiştirilmesi gereken bir noktaya ilerlemiş olabilir. Abaqus, bu acil durum için yeniden başlatma özelliğine sahiptir; bu sayede bir adım erken bitirilebilir ve problemin devamı için yeni bir adım tanımlanabilir.

Yüklemeyi, sınır koşullarını, çıkış kontrollerini ve yardımcı kontrolleri reçete eden isteğe bağlı geçmiş verileri, yeniden başlatma analizinde tanımlananlar dahil olmak üzere, değiştirilinceye veya sıfırlanana kadar izleyen tüm genel analiz adımları için geçerli kalacaktır. Abaqus, bir adımda belirtilen tüm yükleri ve sınır koşullarını, tutarlılığı ve sürekliliği sağlamak için önceki adımda geçerli olan yükleri ve sınır koşullarını karşılayacaktır. Bireysel olarak belirtilen yüklerin ve sınır koşullarının sayısı çok büyükse, bu karşılaştırma zorlaşır. Bu nedenle, tek tek belirtilen yüklerin ve sınır koşullarının sayısı asgariye indirilmelidir; bu, genellikle tek tek elementler ve düğümler yerine element ve düğüm setleri kullanılarak yapılabilir. Doğrusal pertürbasyon adımları için, ara genel analiz adımları yoksa ve çıkış kontrolleri yeniden tanımlanmadıysa, yalnızca bir lineer pertürbasyon adımından diğerine çıkış kontrolleri devam eder.

### **5.1.2. Elektriksel Analiz Prosedürleri**

Abaqus / Standard'ta elektriksel potansiyeli içeren iki tür analiz yapılabilir [108]:

1. Eşleşmiş termal-elektriksel analiz: Elektriksel potansiyel ve sıcaklık alanları, birleşik bir termal-elektriksel analiz yapılarak aynı anda çözülebilir. Bu problemlerde, bir iletken boyunca akan bir elektrik akımı ile harcanan enerji, termal

enerjiye dönüştürülür. Termal enerji elektriksel iletkenlik ve sıcaklığa bağlı olabilir. Bu analiz yönteminde Termal yükler uygulanabilir, ancak yapının deformasyonu dikkate alınmaz. Eşleşmiş ısıl-elektrik problemleri doğrusal veya doğrusal olmayabilir.

2. Piezoelektrik analizi: Piezoelektrik malzemesinde elektrik potansiyeli gradyanı gerilmeye, stres ise malzemedeki elektrik potansiyeline neden olur. Bu birleştirme, bir malzemenin piezoelektrik ve dielektrik katsayılarını tanımlayarak sağlanır ve doğal frekans ekstraksiyonunda, geçici dinamik analizde, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan statik stres analizinde ve sabit durum dinamiği analiz prosedürlerinde kullanılabilir. Doğrusal olmayan statik ve dinamikleri içeren tüm prosedürlerde, piezoelektrik davranışın her zaman doğrusal olduğu varsayılır.

### **5.1.3. Eşleşmiş Termal-Elektrik Analizi**

Eşleşmiş termal-elektrik problemleri:

- a) Elektrik potansiyeli ve sıcaklık alanları arasındaki bağlantının her iki alanı aynı anda çözmeyi gerekli kılanlardır;
- b) Modelde saf ısı transfer elemanları da kullanılabilse de, birleşik termal-elektrik elemanların kullanımını gerektirirler;
- c) Isı olarak serbest bırakılacak olan elektrik enerjisi kısmının bir spesifikasyonunu içerebilirler;
- d) boşluk radyasyonu, boşluk iletkenliği ve yüzeyler arasında ısı oluşumu gibi termal etkileşimleri içerebilirler;
- e) Tamamen kapalı veya boşluk radyasyon etkileri içerebilirler;
- f) yüzeyler arasında akan elektrik akımı gibi elektriksel etkileşimleri içerebilirler;



g) geçici veya sabit durumdaki termal çözümler ve sabit durumdaki elektrik çözümlere izin verebilirler;

h) Doğrusal veya doğrusal olmayan olabilirler.

Joule biriminde olan ısı enerjisi, bir iletken boyunca akan bir elektrik akımı ile harcanan enerji termal enerjiye dönüştürüldüğünde ortaya çıkar. Abaqus / Standard, bu tür bir problemi analiz etmek için tamamen birleşik bir elektriksel prosedür sağlar: eşleşmiş termal-elektriksel denklemler hem sıcaklık hem de düğümlerdeki elektriksel potansiyel için aynı anda çözülebilir.

Bu analiz yöntemindeki kapasite, elektrik probleminin, ısıl problemin ve iki problem arasındaki eşleşmenin analizini içerir. eşleşme iki kaynaktan oluşmaktadır: sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenlik ve elektrik akımı yoğunluğunun bir işlevi olan iç ısı üretimi. Sorunun termal kısmı, ısı iletimi ve ısı depolamanın yanı sıra tamamen kapalı veya yaklaşık boşluk radyasyon etkilerini içerebilir.

Termal-elektrik denklemleri simetrik değildir; bu nedenle, birleşik termal-elektriksel analiz talep edilirse, simetrik olmayan çözücü otomatik olarak çağrılır. Termal ve elektriksel çözümler arasındaki birleşmenin zayıf olduğu ya da tüm model için saf bir elektriksel iletim analizinin gerekli olduğu problemlerde, alanlar arası birleşmeden kaynaklanan simetrik olmayan terimler küçük ya da sıfır olabilir. Bu problemlerde termal ve elektriksel denklemleri ayrı ayrı çözerek daha uygun aolan simetrik depolama ve çözüm şeması çağırılabilir. Termal-elektrik çözüm şemaları aşağıda tartışılmaktadır.

Temel denklemler:

İletken bir malzemedeki elektrik alanı, Maxwell'in şarjdan korunma denklemi tarafından yönetilir. Kararlı durum doğru akımı varsayarak, denklem 5.4.'e indirgenir.

$$\int_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS = \int_V r_c dV, \quad (5.4)$$

V, yüzeyi S olan herhangi bir kontrol hacmidir, n, S için dışa doğru norm sayısıdır, J, elektrik akımı yoğunluğudur (birim alandaki akım), ve  $r_c$ , birim hacim başına iç hacimsel akım kaynağıdır.

Yüzey integralini bir hacim integraline dönüştürmek için diverjans teoremi kullanılır:

$$\int_V \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{J} - r_c \right] dV = 0, \quad (5.5)$$

ve hacim rastgele olduğundan, bu nokta yönünden diferansiyel denklemi sağlar:

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{J} - r_c = 0. \quad (5.6)$$

Hafif form denklemi rastgele ve değişken bir elektriksel potansiyel alan,  $\delta\varphi$ , tanımlanarak ve hacim üzerine bütünleştirilerek elde edilir:

$$\int_V \delta\varphi \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{J} - r_c \right] dV = 0. \quad (5.7)$$

Önce zincir kuralı, sonra diverjans teoremi kullanılarak bu ifade aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$-\int_V \frac{\partial \delta\varphi}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{J} dV = \int_S \delta\varphi J dS + \int_V \delta\varphi r_c dV, \quad (5.8)$$

Burada  $J \stackrel{\text{def}}{=} -\mathbf{J} \cdot \mathbf{n}$  S üzerinden kontrol hacmine giren akım yoğunluğu.

Bünye davranışı:

Elektrik akımının akışı Ohm yasası ile tanımlanmıştır:

$$\mathbf{J} = \boldsymbol{\sigma}^E \cdot \mathbf{E}, \quad (5.9)$$

burada  $\boldsymbol{\sigma}^E(\theta, f^\alpha)$ , elektriksel iletkenlik matrisidir;  $\theta$  sıcaklıktır; ve  $f^\alpha, \alpha = 1, 2, \dots$  önceden tanımlanmış herhangi bir alan değişkenidir. İletkenlik izotropik, ortotropik veya tamamen anizotropik olabilir.  $\mathbf{E}(\mathbf{x})$  olarak tanımlanan elektrik alan şiddeti aşağıdaki denklemden hesaplanır:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}} \quad (5.10)$$

Yüklü bir parçacık elektrik alana doğru hareket ettiğinde, potansiyel bir yükselme meydana geldiğinden, gradyanın yönü elektrik alanınıninkine terstir. Elektrik alanı bu tanımını kullanarak, Ohm yasası aşağıdaki denklem olarak yeniden yazılabilir:

$$\mathbf{J} = -\boldsymbol{\sigma}^E \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}} \quad (5.11)$$

Elektrik iletkenliğinin elektrik alanından bağımsız olduğu varsayılmaktadır (yani bağlantı doğrusaldır).

Ohm kanunu, şarjdan korunma denkleminde, değişken biçimde yazarak, sonlu elemanlar modelinin yönetim denklemi sağlanır:

$$\int_V \frac{\partial \delta \varphi}{\partial \mathbf{x}} \cdot \boldsymbol{\sigma}^E \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}} dV = \int_V \delta \varphi r_c dV + \int_S \delta \varphi J dS. \quad (5.12)$$

Termal enerji dengesi:

Isı iletimi davranışı, temel enerji dengesi ilişkisi ile tanımlanmaktadır.

$$\int_V \rho \dot{U} \delta \theta dV + \int_V \frac{\partial \delta \theta}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{x}} dV = \int_V \delta \theta r dV + \int_S \delta \theta q dS \quad (5.13)$$

$V$ , yüzey alanı  $S$  olan bir katı madde hacmidir;  $\rho$ , malzemenin yoğunluğu;  $U$ , iç enerjidir;  $K$ , termal iletkenlik matrisidir;  $q$  kütleye akan kütlelerin birim alandaki ısı akışıdır; ve  $r$ , kütlede üretilen ısıdır.

Denklem 5.12 ve 5.13.'de sırasıyla elektrik ve termal problemler açıklanmaktadır. eşleşme iki kaynaktan oluşmaktadır: elektrik problemindeki iletkenlik sıcaklığa bağlıdır,  $\sigma^E = \sigma^E(\theta)$  ve termal problemdeki iç ısı üretimi, elektrik akımının  $r = r_{ec}(\mathbf{J})$  aşağıda açıklandığı gibi bir fonksiyondur.

Elektrik akımı nedeniyle meydana gelen termal enerji:

Joule yasası, bir iletkenin akan akımın yaydığı elektrik enerjisi hızını,  $P_{ec}$ ,  $P_{ec} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}$  olarak tanımlamaktadır. Yukarıdaki denklemleri kullanarak  $P_{ec} = \mathbf{E} \cdot \sigma^E \cdot \mathbf{E}$  elde edilir.

Kararlı durum analizinde  $P_{ec}$ ,  $t+\Delta t$  zamanında değerlendirilir. Geçici bir analizde, artım üzerinden ortalama bir  $P_{ec}$  değeri elde edilir:

$$\begin{aligned} P_{ec} &= \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} P_{ec} dt \\ &= \mathbf{E} \cdot \sigma^E \cdot \mathbf{E} - \mathbf{E} \cdot \sigma^E \cdot \Delta \mathbf{E} + \frac{1}{3} \Delta \mathbf{E} \cdot \sigma^E \cdot \Delta \mathbf{E}, \end{aligned} \quad (5.14)$$

$E$  ve  $\sigma^E$   $t+\Delta t$  zamanındaki değerlerdir. İç ısı olarak salınan bu enerjinin miktarı  $r = \eta_v P_{ec}$ , 'dir. Burada  $\eta_v$ , bir enerji dönüşüm faktörüdür.

Kararlı durum analizi:

Kararlı durum analizi, kararlı durum çözümünü doğrudan sağlar. Bu termal analiz yönteminde, geçerli ısı transferi denklemindeki iç enerji teriminin (belirli ısı terimi)

ihmal edilmesi anlamına gelmektedir. Elektrik probleminde sadece doğru akım düşünülmemekte ve sistemin ihmal edilebilir kapasitansı olduğu varsayılmaktadır. Kararlı hal analizinde fiziksel olarak anlamlı bir zaman ölçeği yoktur. Yine de, çıkış tanımlaması için ve öngörülen sıcaklıkları, elektrik potansiyelini ve değişken büyüklükteki akıları (ısı akışı ve akım yoğunluğu) belirlemek için genellikle uygun olan analiz adımına bir "zaman" ölçeği tanımlanmalıdır. Dolayısıyla, kararlı durum analizi seçildiğinde, adım için bir "zaman" dönemi ve "zaman" artış parametreleri belirlenirse; Abaqus / Standard daha sonra adımlarını buna göre artar.

Geçici durum analizi:

Alternatif olarak, eşleşmiş termal-elektrik probleminin termal kısmı geçici olarak kabul edilebilir. Kararlı hal analizinde olduğu gibi, geçici elektriksel etkiler de ihmal edilir. Zaman artış büyüklüğü, bir  $\Delta\theta_{max}$  artışındaki kullanıcı tarafından belirlenmiş maksimum izin verilen düğüm sıcaklık değişimini temel alarak seçilebilir. Abaqus / Standard, analizin herhangi bir ilerleme sırasında bu değerlerin herhangi bir düğümde (sınır koşulları olan düğümler hariç) aşılmamasını sağlamak için zaman artışlarını sınırlamaktadır. Sabit zaman artışı seçilirse ve  $\Delta\theta_{max}$  belirtilmezse, kullanıcı tarafından belirlenen başlangıç zaman artışına eşit olan zaman artışları,  $\Delta t_0$ , analiz boyunca kullanılacaktır.

geçici ısı transferi analizinde, minimum kullanılabilir zaman artışı ile eleman boyutu arasında bir ilişki vardır:

$$\Delta t > \frac{\rho c}{6k} \Delta \ell^2, \quad (5.15)$$

burada  $\Delta t$  zaman artışıdır,  $\rho$  yoğunluktur,  $c$  özgül ısıdır,  $k$  termal iletkenliktir ve  $\Delta \ell$  tipik bir eleman boyutudur.

Bu değerden daha küçük zaman artışları, ikinci dereceden elemanların bir mesinde kullanılırsa, çözüm esnasında, özellikle hızlı sıcaklık değişimlerinin olduğu sınırların yakınında, hatalı salınımlar görünebilir. Birinci dereceden elemanları kullanan geçici

analizlerde, ısı kapasitesi terimleri toplanır, bu salınımları ortadan kaldırır, ancak küçük zaman artışları için yerel olarak yanlış çözümlere yol açabilir. Daha küçük zaman artışları gerekiyorsa, sıcaklığın hızla değiştiği bölgelerde daha ince bir meş kullanılmalıdır. Lineer olmayanlar yakınsama sorunlarına neden olmadıkça, zaman artırma boyutunda üst sınır yoktur (entegrasyon prosedürü şartsız olarak kararlıdır).

Tam eşleşmiş çözüm şemaları:

Abaqus / Standard, eşleşmiş termal-elektriksel analiz için Newton yönteminin benzeri bir uygulamasını, yanı sıra tam bir uygulama sunar. Newton yönteminin tam olarak uygulanması, eşleşmiş denklemlerin aşağıdaki matris temsili gösterildiği gibi, simetrik olmayan bir Jacobian matrisini içermektedir:

$$\begin{bmatrix} K_{\varphi\varphi} & K_{\varphi\theta} \\ K_{\theta\varphi} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varphi \\ \Delta\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_{\varphi} \\ R_{\theta} \end{Bmatrix}, \quad (5.16)$$

$\Delta\varphi$  ve  $\Delta\theta$ , artan elektrik potansiyeli ve sıcaklık için ilgili düzeltme katsayılarıdır,  $K_{ij}$ , tamamen eşleşmiş Jacobian matrisinin alt matrisleridir ve  $R_{\varphi}$  ve  $R_{\theta}$ , sırasıyla elektriksel ve termal artık vektörlerdir.

Bu denklem sistemini çözmek, simetrik olmayan matris işlemleri ve çözüm şemasının kullanılmasını gerektirir. Ayrıca, elektriksel ve termal denklemler aynı anda çözülmelidir. Bu problemler için, köşegen altı alt matrisleri sıfıra ayarlayarak daha az maliyetli bir çözüm elde edilebilir, böylece benzeri bir denklem kümesi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} K_{\varphi\varphi} & 0 \\ 0 & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varphi \\ \Delta\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_{\varphi} \\ R_{\theta} \end{Bmatrix}. \quad (5.17)$$

Sınır koşulları:

Elektrotermal modellemesinde, Sınır koşulları düğümlerdeki elektrik potansiyelini,  $\varphi = \varphi(\mathbf{x}, t)$ , ve ,  $\theta = \theta(\mathbf{x}, t)$ , sıcaklığı belirlemek için kullanılabilir.

Yüklerin tanımlanması:

Hem termal hem de elektriksel yükler, eşleşmiş bir termal-elektrik analizinde uygulanabilir. Aşağıdaki termal yük tipleri, eşleşmiş bir termal-elektrik analizinde tanımlanabilir:

1. Konsantre ısı akışları
2. kütle akışları ve dağılık yüzey akışları
3. Konvektif film koşulları ve radyasyon koşulları

Elektrik yük tipleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

1. Konsantre akım
2. Dağıtılmış akım yoğunlukları,  $J = J(\mathbf{x}, t)$

Konsantre akımlar ve dağıtılmış akım yoğunlukları eklenebilir, değiştirilebilir veya kaldırılabilir. Konsantre bir akımın veya dağıtılmış akım yoğunluğunun büyüklüğü, bir referans eğrisine bakarak kontrol edilebilir. Farklı akımlar için farklı büyüklük varyasyonlarına ihtiyaç duyulursa, mevcut tanımlar her biri kendi referans eğrisine atıfta bulunarak tekrarlanabilir.

Malzeme seçenekleri:

Hem termal hem de elektriksel özellikler, birleşik termal-elektrik analizinde aktiftir. Isıl özelliklerin ihmal edildiği, bağımsız elektriksel analiz yapılabilir. Tüm mekanik davranışları birleşik bir termal-elektrik analizinde göz ardı edilir. Analizin ısı transfer kısmı için, termal iletkenlik tanımlanmalıdır. Geçici ısı transfer problemleri için spesifik ısı da tanımlanmalıdır. Faz enerjisinden dolayı iç enerjideki değişiklikler önemliyse, gizli ısı tanımlanabilir.

Termal genişleme katsayıları, birleşik termal-elektrik analizinde, yapının deformasyonu dikkate alınmadığından, anlamlı değildir, bununla birlikte iç ısı üretimi belirtilebilir.

Analizin elektriksel kısmı için elektriksel iletkenlik tanımlanmalıdır. Elektriksel iletkenlik, sıcaklık vb değişkenlerinin bir fonksiyonu olabilir. Isı olarak dağıtılan elektrik enerjisinin oranı da yukarıda açıklandığı gibi tanımlanabilir.

Elemanlar:

Eşleşmiş termal-elektrik analizindeki eşzamanlı çözüm, hem sıcaklık hem de elektriksel potansiyel olan elementlerin düğümsel değişkenler olarak kullanılmasını gerektirir. Sonlu elemanlar modeli aynı zamanda saf ısı transfer elemanları ve ısı özelliği bulunmayan birleşik ısı-elektrik elemanlarını içerebilir. Eşleşmiş termal elektrik elemanları Abaqus / Standard'da bir boyutta, iki boyutta (düzlemsel ve eksenel simetrik) ve üç boyutta mevcuttur.

Model çıktıları:

Elektrik iletimi çözümü ile ilgili çıktı talep etmek için aşağıdaki çıkış değişkenleri kullanılabilir:

Eleman entegrasyon noktası değişkenleri:

EPG: Elektriksel potansiyel gradyan vektörünün büyüklüğü ve bileşenleri,  $-\partial\phi/\partial\mathbf{x}$ .

EPGM: Elektriksel potansiyel gradyan vektörünün büyüklüğü.

EPGn: Elektriksel potansiyel gradyan vektörünün n bileşeni (n = 1, 2, 3).

AKD: Elektrik akımı yoğunluk vektörünün büyüklüğü ve bileşenleri, J.

JENER: Akım nedeniyle harcanan elektrik enerjisi  $\int_t P_{ec} dt$ .

Tüm eleman değişkenleri:

ECURS: Uygulanan dağıtılmış elektrik akımı.

NCURS: Elektrik iletimi nedeniyle düğümlerdeki elektrik akımı.

ELJD: Akım akımı nedeniyle harcanan toplam elektrik enerjisi,  $\int_v \int_t P_{ec} dt dv$ .



Düğüm değişkenleri:

EPOT: Elektriksel potansiyel,  $\varphi$ .

RECUR: Reaktif elektrik akımı.

CECUR: Uygulanan konsantre elektrik akımı.

Tüm model değişkenleri:

ALLJD: Modeli üzerinden toplanan tüm elektrik enerjisi.

Yüzey etkileşimi değişkenleri:

ECD: Elektrik akımı yoğunluğu.

ECDA ECD: alana göre Elektrik akımı yoğunluğu.

ECDT: Zamanla entegre Elektrik akımı yoğunluğu.

ECDTA: Zamanla bütünleşmiş alana göre Elektrik akımı yoğunluğu.

SJD: Elektrik akımı tarafından üretilen birim alandaki ısı akışı.

SJDA SJD: Alana göre elektrik akımı tarafından üretilen birim alandaki ısı akışı.

SJDT: Zamanla entegre edilmiş elektrik akımı tarafından üretilen birim alandaki ısı akışı.

SJDTA: Zamanla entegre edilmiş alana göre elektrik akımı tarafından üretilen birim alandaki ısı akışı.

WEIGHT: Arayüz yüzeyleri arasındaki ısı dağılımı, f.

#### **5.1.4. EİB plakaların Abaqus programında 3-D Modellenmesi**

Bir FE modelleme programı olarak Abaqus 6.1'i kullanarak EİB plakalarının eşleşmiş termal-elektrik (elektrotermal) analizi gerçekleştirilmiştir. Modellenmesi amaçlanan EİB plakalarının elektriksel iletkenlik değerleri çalışmanın birinci aşamasında daha önceden laboratuvarında üretilen 10 X 20 slindir numunelerinden elde edilen değerlere göre tanımlanmıştır. Bu birinci aşamada yapılan modellerin analiz sonuçlarına göre 10 farklı karışıma sahip EİB numuneleri üretilmiştir. Bütün plaka numunelerinin deneysel olarak farklı voltajlarda -10 derece sıcaklık ortamında ısı üretimleri test edilmiştir. Deney esnasında bu numunelerin farklı voltaj ve farklı

sıcaklıklarda elektriksel akım değerleri de ölçülmüştür. Ölçülen akım değerlerini kullanarak, her aşamada iletkenlik miktarları elde edilmiştir. Bu değerleri her numune için gerçekleştirilen ikinci modelde kullanarak tekrar elektrotermal analizi yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. EİB plakalarında ısı üretimi ve dağılımının analizi için gerekli olan materyal ve geometri bilgileri aşağıda sunulmuştur.

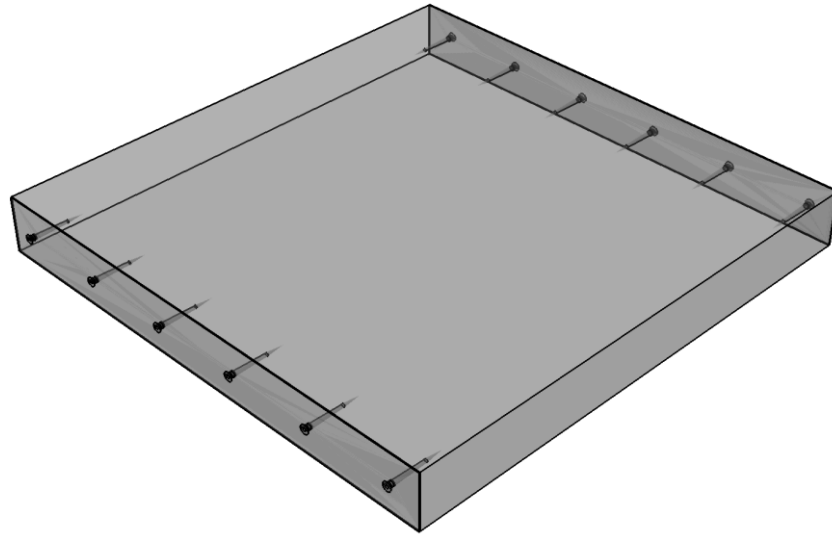
Modellenen EİB plakalarının geometrisi:

EİB plaka boyutları laboratuvarında mevcut olan soğutucu dolabın ebatlarına göre tasarlanmıştır. Her 10 farklı karışım için 45 x 45 x 5 cm plakalar modellenmiştir. Elektrot olarak 1 mm kalınlığında 45 x 5 cm paslanmaz galvaniz çelik sac tasarlanmıştır. Deneysel olarak üretilen plaka numunelerde plakalar ile beton arasındaki yapışmanı sağlamak için her 6 cm aralıklarında 5 cm uzunluklarında 3 mm çapında vidalar uygulanmıştır. 3D modellerde de geometri şartlarının deneysel yöntemi ile aynı olması için aynı şekilde civatalar tasarlanmıştır. Şekil 5.1.'de modellerdeki tasarlanan plaka ebatları ve beton ile elektrotlar arasındaki bağlantı görüntüsü verilmiştir.

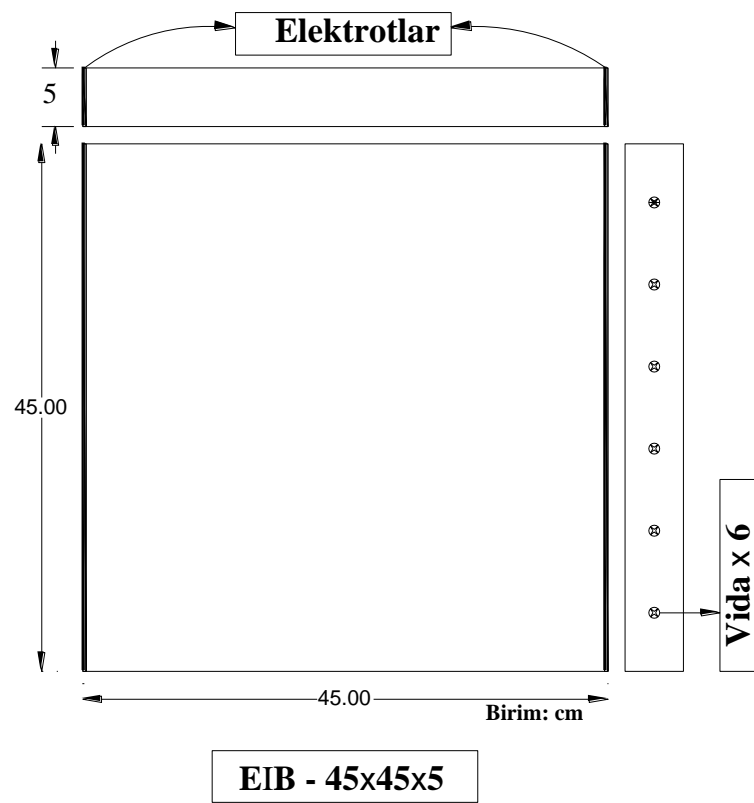
Sınır koşulları:

Bütün modellerde EİB plakaların ilk sıcaklıkları -10 °C olarak plakaların kütlesine tanımlanmıştır. Bu sıcaklık sınırı çalışmanın deneysel kısmında kullanılan soğutucu dolabın en soğuk (-10 °C) sıcaklık derecesine göre seçilmiştir. Elektrik yükü olarak, plakaların iki tarafına paralel olarak modellenen elektrotlar arasında farklı voltlarda potansiyel farkı uygulanmıştır (Şekil 5.1.c). Uygulanan voltajlar nununeden numuneye direnç değerlerinden dolayı değişmektedir.

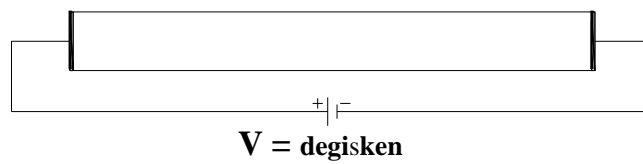
(a)



(b)



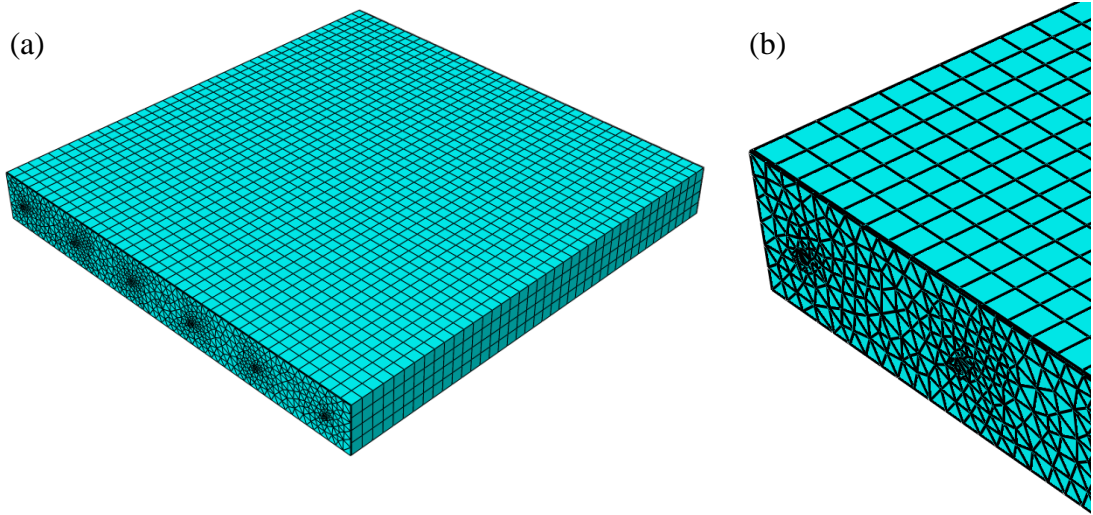
(c)



Şekil 5.1. 3D olarak modellenen EİB plakalarının geometrisi.

Ağ oluşturulması ve tanıtımı:

Geometri özelliklerini, sınır koşulları ve malzeme özelliklerini içeren gerekli değişkenleri tanımladıktan sonra, element tipi ve FE ağ (mesh) tanımlanmıştır. ECON plakasını küçük elemanlara ayırtırmak için standart küp eleman tipi ve elektrotlar için serbest eleman tipi kullanılmıştır. Farklı eleman boyutlarını deneyerek sonuçlar kıyaslanmıştır ve eleman sayısı 10000'in üzerine çıktığında sonuçlar arasında değişiklik az görülmüştür. Şekil. 5.2.'de EİB plakasının 3-D ağ görünümü verilmiştir.



Şekil. 5.2. EİB plakasının 3-D ağ görünümü (a), büyütülmüş elektrot ve etrafındaki ağ görünümü (b).

## 5.2. Deneysel Yöntem

Bölüm 3'te detaylı olarak açıklanan karışımlardan, elektrotermal deneyleri için 36 karışımdan 10 adet karışım, elektriksel iletkenlik değerleri ve bu bölümdeki simülasyon sonuçlarına göre, seçilmiştir ve Tablo 5.2.'de özetlenmiştir. Seçilen karışımlardan 10 adet 45 x 45 x 5 cm plak numuneler üretilmiştir. Elektrot olarak 1 mm kalınlığında 45 x 5 cm paslanmaz galvaniz çelik saç kullanılmıştır. Üretilen plaka numunelerde, plakalar ile beton arasındaki yapışmanı sağlamak için, her 6 cm aralıklarında 5 cm uzunluklarında 3 mm çapında vidalar uygulanmıştır. Üretilen EİB plaka numunelerin temel deney sonuçları Tablo 5.3.'de verilmiştir. Tabloda kullanılan karışım kodların açıklamaları Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Karışım kod açıklamaları.

No	Karışım Kodu	Kod açıklaması
1	N10K0.2Ç0	Nano karbon siyahı: % 10, karbon fiber: % 0.2, çelik fiber: % 0
2	N6K0.5Ç0	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0.5, çelik fiber: % 0
3	N6K1Ç0	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 1, çelik fiber: % 0
4	N10K0.2Ç2	Nano karbon siyahı: % 10, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
5	N6K0.5Ç2	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
6	N6K1Ç2	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0, çelik fiber: % 2
7	N6 K0E0.5	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0, tel erezyon: % 0.5
8	N6 K0E1.0	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0, tel erezyon: % 1.0
9	N6K0.2E1.0	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0.2, tel erezyon: % 1.0
10	N6K0.2E1.5	Nano karbon siyahı: % 6, karbon fiber: % 0.2, tel erezyon: % 1.5

Table 5.2. Plaka numunelerinde karışım detayları, N: Nano karbon siyahı, K: Karbon fiber, Ç: Çelik fiber, E: Atık tel erezyon.

No	Karışım Kodu	AI (0-5 mm) (kg)	AII (5-15 mm) (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	ÇF (%)	ATE (kg)	NKS (kg)	KF (kg)	KMS (%)	SA(%)
1	N10K0.2Ç0	831.56	831.56	415.78	206.23	0.00	0.00	42.50	3.60	0.20	1.00
2	N6K0.5Ç0	836.23	836.23	418.12	199.63	0.00	0.00	25.5	9.00	0.20	1.50
3	N6K1Ç0	832.58	832.58	416.29	198.81	0.00	0.00	25.5	18.00	0.00	1.75
4	N10K0.2Ç2	812.77	812.77	406.39	202.00	0.60	0.00	42.50	3.60	0.00	1.00
5	N6K0.5Ç2	817.36	817.36	408.68	195.38	0.60	0.00	25.5	9.00	0.00	1.50
6	N6K1Ç2	813.79	813.79	406.90	194.58	0.60	0.00	25.5	18.00	0.00	1.75
7	N6 K0E0.5	822.80	822.80	411.40	196.61	0.00	42.50	25.5	0.00	0.20	0.75
8	N6 K0E1.0	805.80	805.80	402.90	192.78	0.00	85.00	25.5	0.00	0.20	0.75
9	N6K0.2E1.0	804.36	804.36	402.18	192.46	0.00	85.00	25.5	3.60	0.20	1.6
10	N6K0.2E1.5	787.36	787.36	393.68	188.63	0.00	127.5	25.5	3.60	0.20	1.6

Üretilen on adet plaka numunenlerin deney esnasında soğutucunun dışında sıcaklık değişimini izlemek için, plaka yüzeylerinde eşit aralıklı 4 mm çapında (termometre ucu kalınlığı) 5 mm derinliğinde 9 adet delik açılmıştır (bkz Şekil 5.3.). Numuneleri birer birer soğutucuda ahşap üzerine yerleştirerek açılan deliklere termometrelerin uçlarındaki metal kısımları monte edilmiştir.

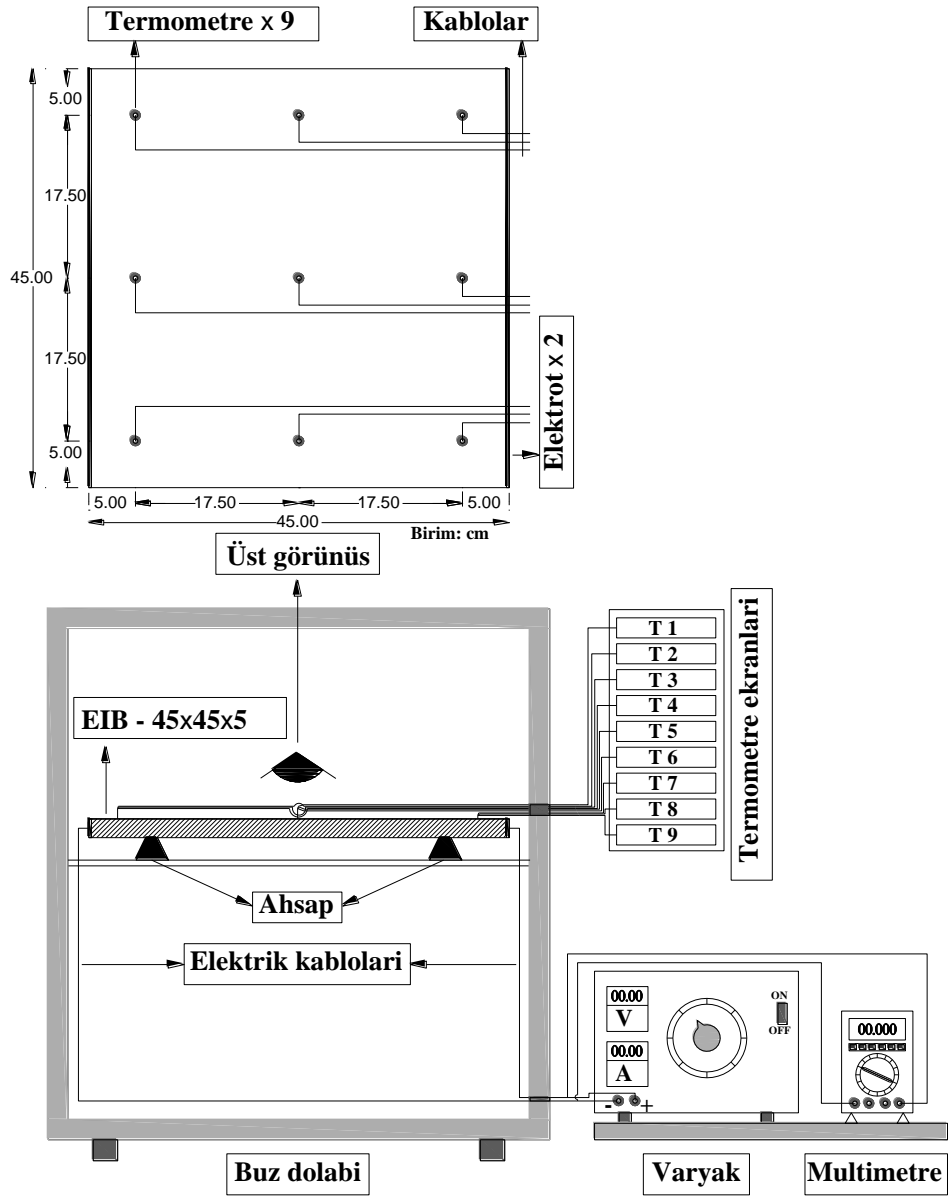
Şekil 5.3.'de de görüldüğü gibi plaka numunesinin iki tarafında yer alan paslanmaz çelik saçtan yapılmış elektrotlar arasında ayarlanabilir varyak vastasıyla farklı voltajlar uygulayarak elektrotermal testleri gerçekleştirilmiştir.

Deney sırasında voltajın uygulanması ile belirli zaman aralıklarında numunelerin farklı sıcaklıklarına göre gerçekleşen akım miktarları ölçülmüştür. Elde edilen akım değerleri hem ikinci model olarak plaka numunelerin elektrotermal analizlerinde kullanılmıştır hem de on farklı numune için sıcaklık-özdirenç eğrilerinde kullanılmıştır.

Deneylede plaka numunelerine uygulanan voltaj değerleri numunelerin özdirenci ve literatür çalışmalarına göre seçilmiştir. Diğer ifadeyle deney esnasında zaman kaybını önlemek için literatür çalışmaları, özdirenç değerleri ve ilk model sonuçlarını göz önüne alarak her numune için ön bir güç tüketimi hesabı yaparak uygun voltajlar seçilmiştir.

N10K0.2Ç0, N10K0.2Ç2, N6K0.5Ç0, N6K0.5Ç2, N6K0E0.5 ve N6K0E1plaka numuneleri için düşük özdirenç değerleri nedeniyle 100, 140, 180 ve 220 V olarak dört farklı voltaj uygulanmıştır. N6K1Ç0, N6K1Ç2, N6K0.2E1 ve N6K0.2E1.5 EİB plaka numunelere iyi özdirence sahip oldukları nedeniyle 60, 80, 100 ve 120 V dört farklı voltaj uygulayarak termal davranışları incelenmiştir. Aşağıdaki bulgular bölümünde elektrotermal sonuçlarının optimizasyonunda da uygulanan voltajların uygun oldukları tesbit edilmiştir.

Tüm numunelerin ilk sıcaklıkları, soğutucu dolabın kapasitesine göre, -10 °C'ye ayarlanmıştır ve deneyin başlanmasından sonlanmasına kadar soğutucu çalışmıştır.



Şekil.5.3. EİB plakaların elektrotermal deney düzeneği.



Table 5.3. Plaka numunelerinde karışımların elektriksel ve mekaniksel özellikleri, N: Nano karbon siyahı, K: Karbon fiber, Ç: Çelik fiber, E: Atık tel erezyon.

No	Numune kodu	İYÖD ( $\Omega$ .cm)				WYÖD ( $\Omega$ .cm)	ASTM-D ( $\Omega$ .cm)	$\sigma_c$ (Mpa)	$\sigma_f$ (Mpa)	Eu (J)
		Silindir		Plaka						
		7 Gün	21 Gün	28 Gün	28 Gün					
1	N10K0.2Ç0	2894,81	3921,03	4915,81	42553	24185.80	7291.02	51,04	7,75	79,31
2	N6K0.5Ç0	228,43	212,36	222,45	4444	560.58	708.27	45,49	7,63	72,84
3	N6K1Ç0	99,79	95,66	80,08	357	188.34	450.72	47,82	8,62	55,03
4	N10K0.2Ç2	1712,61	2901,14	3979,82	11710	16237.66	5902.26	54,54	6,26	142,44
5	N6K0.5Ç2	603,58	659,35	696,18	7693	2673.34	1652.63	56,99	8,12	200,71
6	N6K1Ç2	127,32	110,15	85,22	371	194.30	413.85	62,01	8,68	234,70
7	N6 K0E0.5	478.06	553.92	702.40	5000	1676.55	6352.45	52.24	7.09	192.62
8	N6 K0E1.0	392.14	489.30	645.34	2890	1546.33	5720.20	57.87	7.68	236.32
9	N6K0.2E1.0	176.15	214.50	254.63	552	376.53	1097.12	41.82	7.58	265.46
10	N6K0.2E1.5	52.08	80.54	97.74	270	129.48	441.18	39.52	7.21	254.13

## **BÖLÜM 6. ELEKTRİKSEL İLETKEN YOL KAPLAMA SİSTEMLERİ BULGULARI**

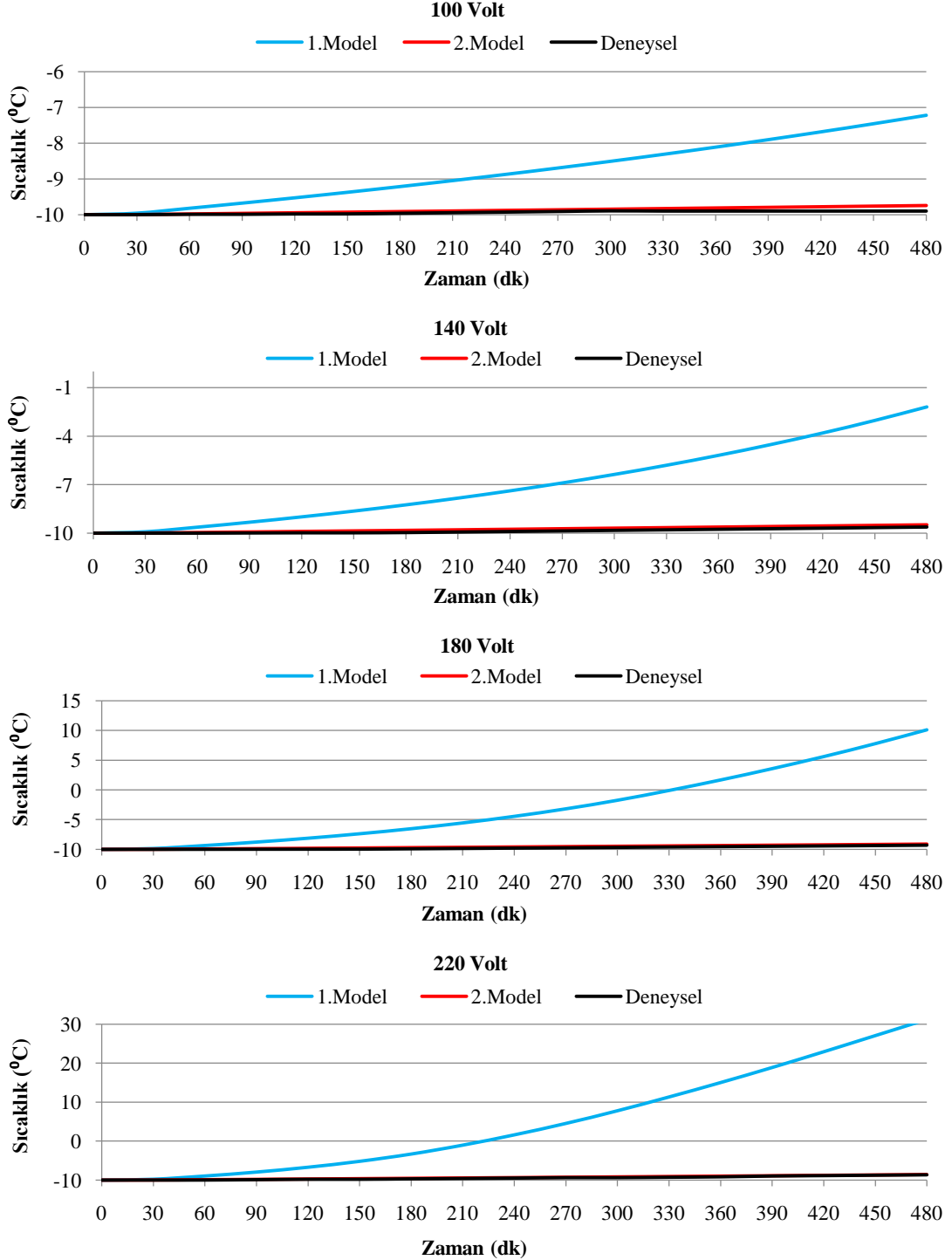
Bu bölümde farklı karışımlara sahip iletken betonlar arasından, elektriksel direnç değerleri ve 3D modelleme sonuçlarına göre, 10 farklı karışıma sahip EİB plakaların zamana bağlı olarak üretilen sıcaklık değerleri incelenmiştir. Karışım bilgileri ve temel özellikleri Bölüm 5.'de tablolar halinde verilmiştir. Hem simülasyon hem de deneysel yöntemi ile farklı voltajlar uygulayarak plakaların ısı enerji ve tüketilen güç miktarları karşılaştırılmıştır. Voltaj değerlerinin seçilmesinde herhangi bir kural kullanılmamıştır. Isı üretebilecek numune ve modellerde genellikle sıcaklık değerleri 30 °C'ye yükseldiğinde test-model tamamlanmıştır.

Bütün karışımlar için, silindir numunelerinde ölçülen özdirenç değerleri plaka numunelerin özdirenç değerlerinden daha düşük çıktığından, 3D elektrotermal sonuçlarında yanıtıcı bilgiler elde edilmiştir. Bu sorun Abdullah'ın [1] çalışmasında da belirtilmiştir. Yani laboratuvar ortamındaki üretilen küçük boyutlardaki direnç ölçme test numunelerinin özdirenç değerleri elektrotermal deneyleri için üretilen plaka numunelerinin özdirenç değerlerinden düşük çıkması belirtilmiş bir sonuçtur. Dolayısıyla bu çalışmada, ilk önce karışım seçimi için silindir numunelerin iletkenlik özelliklerine göre 3D modellemeler yapılmıştır. Bir sonraki aşamada üretilen plakaların termal sonuçlarını doğrulamak amacıyla, plaka numunelerin iletkenlik özelliklerine göre 3D modellemeler yapılmıştır.

### **6.1. N6K0.2Ç0'ın Elektrotermal Sonuçları**

%6NKS ve %0.2 KF içeren karışıma ait plaka numunesinin, uygulanan farklı voltajlar sonucu, elde edilen elektrotermal sonuçları Şekil 6.1.'de verilmiştir. Bu karışımın ölçülen elektriksel özdirenç değerleri (plaka numunelerinde) yüksek olması nedeniyle, hem 3D modellerde hem de deney sonuçlarında uygulanan farklı voltajlar

sonrası kayda değer ısı oluşmamıştır. Bu karışım için oda sıcaklığında ölçülen öz direnç değerleri silindir ve plaka numuneler için sırasıyla 4916 ve 42553  $\Omega.cm$ 'dir.



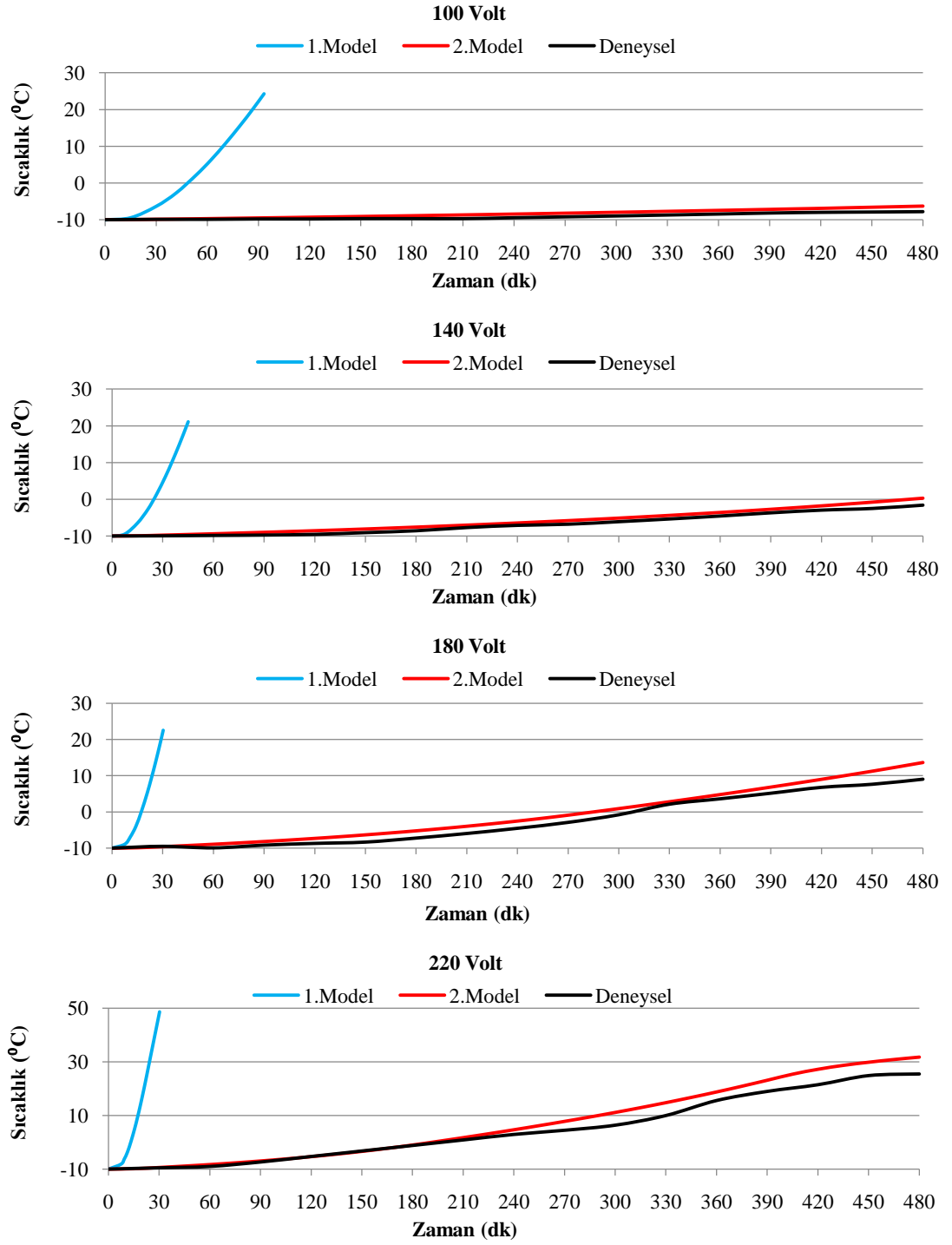
Şekil 6.1. N6K0.2Ç0 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları.

## 6.2. N6K0.5Ç0'ın Elektrotermal Sonuçları

%6 NKS ve %0.5 KF içeren karışıma ait silindir numunelerin, diğer karışımlarda da olduğu gibi, özdirenç değerleri plaka numunelerinin özdirenç değerlerinden daha düşük çıkmıştır. Diğer deyişle numunelerin silindir şeklindeki elektriksel iletkenlikleri plaka şeklindeki haline göre daha fazla ölçülmüştür. 1. modellerde silindir numunelerin iletkenlik özellikleri kullanıldığından Şekil 6.2.'de de görüldüğü gibi her dört voltaj uygulama sonrası, çok düşük sürelerde (30-90 dk) plaka numunelerinin sıcaklıkları 20 °C'nin üzerine çıkmıştır. Bu termal sonuçları bir elektriksel iletken beton için oldukça yeterlidir. Ancak üretilen plaka numunelerine aynı voltajlar uygulandığında termal sonuçları 1. modelleme sonuçlarına kıyasla oldukça yetersiz kalmıştır. Bunun nedeni plaka numunelerinde ölçülen özdirenç değerlerinin ilk modelde kullanılan özdirenç değerlerinden daha fazla çıkmasıdır. Bu karışım için oda sıcaklığında ölçülen öz direnç değerleri silindir ve plaka numuneler için sırasıyla 223 ve 4444  $\Omega.cm$ 'dir.

Bu numune için uygulanan potansiyel farkı arttıkça sıcaklık seğherleri de artmıştır. Uygulanan voltaj 140 V olduğunda sıcaklık -10 °C'den 0 °C'ye kadar yükselmiştir. Voltaj 180 V'a yükseldiğinde sıcaklık -10 °C'den 10 °C'ye kadar artmıştır. Uygulanan voltaj değeri 220 V seçildiğinde sıcaklık 25 °C'nin üzerine çıkmıştır. Şekil 6.2.'de, uygulanan her dört voltaj sonrası meydana gelen elektrotermal davranışı, deneysel ve 2. modelleme sonuçları arasında oldukça benzerlik görülmektedir.

2. Modelleme sonuçları ve deney sonuçlarında, uygulanan 220 V voltaj sonrası, belirli bir süre sonra sıcaklık artma hızı düşmüştür. Bunun nedeni, plaka numunesine voltaj uygulandıktan sonra, sıcaklığın ilk başta artmasıyla elektriksel akımının artma hızının artması ve daha sonra sıcaklık belirli bir dereceye vardıktan sonra akımın artma hızının düşmesidir. Deney esnasında da farklı sıcaklıklarda ölçülen akım değerlerine göre iletkenlik değerleri hesaplanmıştır ve Abaqus programında da aynı değerler kullanılmıştır. İlk modelleme sonuçlarında zamanın artmasıyla sıcaklık artma hızının düşmemesinin nedeni de silindir numunelerinin sadece oda sıcaklığındaki iletkenlik değerlerinin kullanılmasıdır.



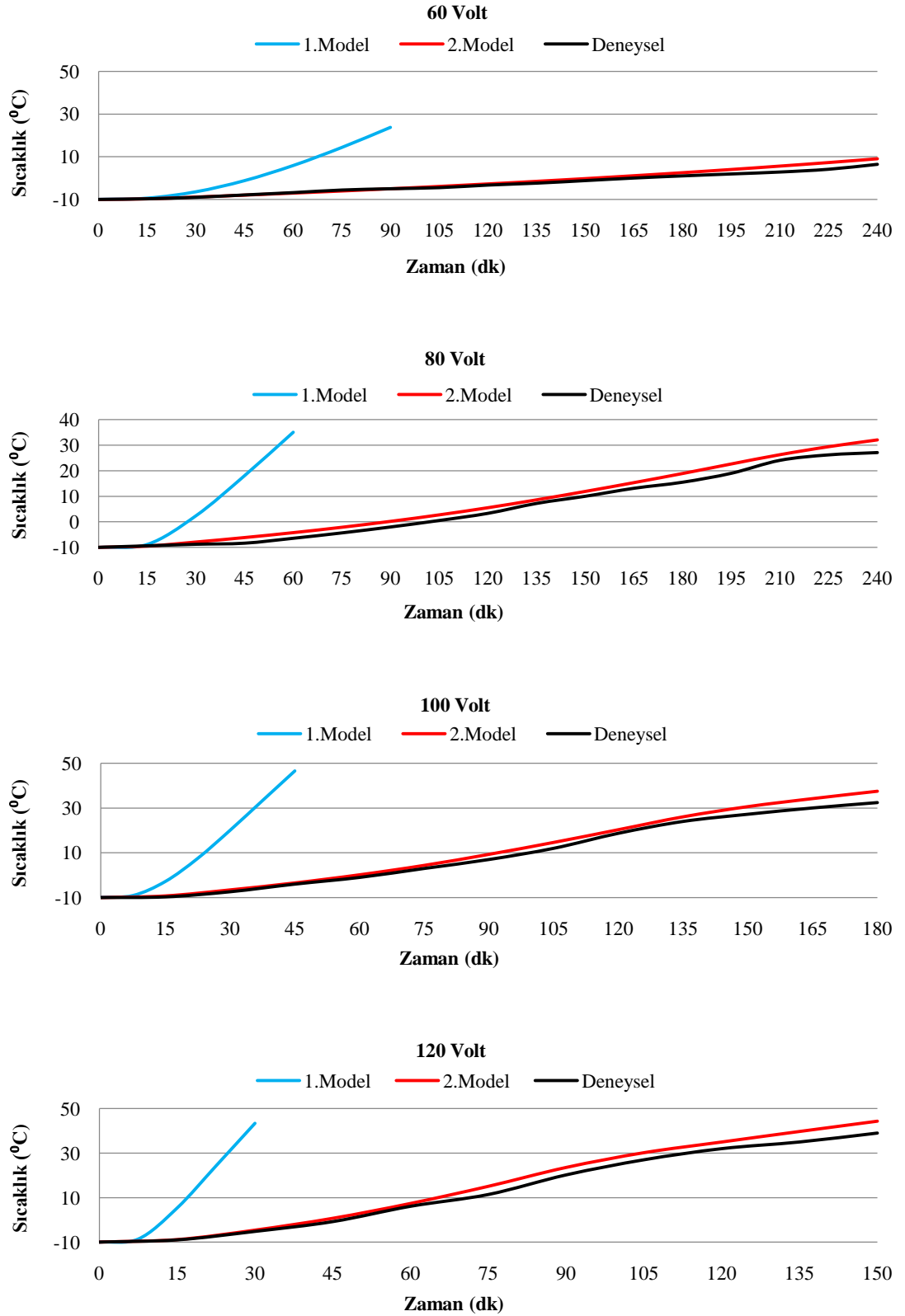
Şekil 6.2. N6K0.5Ç0 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları.

### 6.3. N6K1Ç0'ın Elektrotermal Sonuçları

%6 NKS ve %1 KF içeren plaka numunesinin elektrotermal sonuçları şekil 6.3.'de verilmiştir. Bu karışıma ait numunelerin hem silindir şeklinde hem de plaka şeklinde özdirenç değerleri diğer karışımlardan daha düşük çıktığından elektrotermal sonuçları da diğer karışımlara kıyasla daha olumlu çıkmıştır. Silindir numunelerinin oda sıcaklığındaki özdirenç değerleri ortalama 80  $\Omega$ .cm ve aynı karışıma sahip plaka numunesinin özdirenç değeri 357  $\Omega$ .cm olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla silindir numunelerinin iletkenlik özelliklerine göre modellenen elektro termal sonuçlarında sıcaklık artma hızı plaka numunelerinin sıcaklık artma hızından daha yüksek seviyelerde görülmektedir. Ayrıca tüm voltaj uygulamalarında her iki model sonuçları ve deneysel sonuçlarında sıcaklık hızının ilk zaman aralıklarında düşük olduğu ve belirli süreden sonra ısınma hızının artması görülmektedir. Bunun nedeni ilk başlarda betonun sıcaklığı düşük seviyelerde (-10 °C) olduğunda elektrik akımının da düşük olması ve dolayısıyla uygulanan voltaj sonrası betonun yavaş ısınabilirliğidir. Şekilde de görüldüğü gibi sıcaklı 20-25 °C'den fazla arttığında ısınma hızı azalmıştır. Bunun nedeni, belirli bir sıcaklık sonrası betonun elektriksel iletkenliğinin azalmasıdır ki ısınma hızının düşmesine sebep olmaktadır.

Uygulanan 60, 80, 100 ve 120 V voltaj değerleri sonucu kar ve buzun eritilmesi için yeterli ısı oluşmuştur. 60 V voltaj uygulama sonucu sıcaklık 4 saat içerisinde yaklaşık 16 derece artmıştır. Voltaj miktarı 80 V'ye artmasıyla ısınma hızı yükselerek aynı süre içerisinde sıcaklık 36 derece artmıştır. Voltaj değeri 100 ve 120 V'ye arttığında ısınma hızı daha da yükselerek ısınma süresi azalmıştır. 60, 80, 100 ve 120 V voltaj uygulama sonucu numunenin sıcaklığı 6 °C'nin üzerine çıkabilmesi için sırasıyla 240, 140, 90 ve 60 dk zaman almıştır.

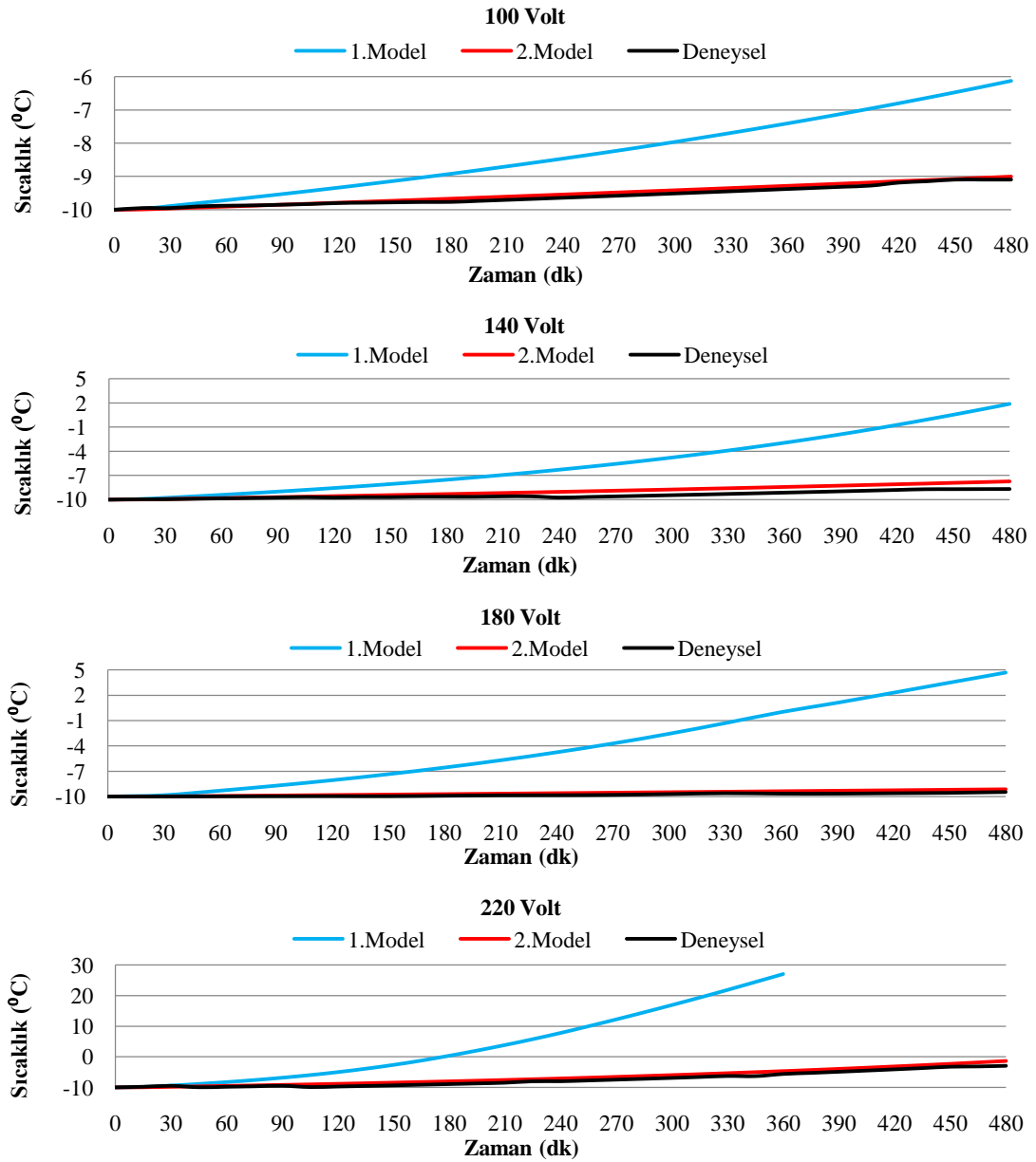
İkinci model ve deneysel sonuçları arasında iyi bir uyum görülmektedir. Ancak deney esnasında plaka numunelerine voltaj uygularken sıcaklığın değişmesi ile ölçülen akım değerlerinin sayısı daha da artmış olsaydı iki grafiğin birbirlerine yaklaşması beklenirdi. Diğer bir ifadeyle Abaqus programında tanımlanan bu verilerin artması sonuçları deneysel sonuçlara yaklaştırabilir.



Şekil 6.3. N6K1 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları.

#### 6.4. N6K0.2Ç2'nin Elektrotermal Sonuçları

N6K1Ç0 karışımı için ölçülen özdirenç değeri silindir ve plaka numunelerinde sırasıyla 3979  $\Omega$ .cm ve 11709  $\Omega$ .cm olarak ölçülmüştür. Özdirenç değeri yüksek olduğundan kayda değer elektrotermal sonuçları elde edilmemiştir (Şekil 6.4.). Ayrıca aynı karışıma sahip çelik fiber içermeyen karışım için de benzer sonuçlar kaydedilmiştir.

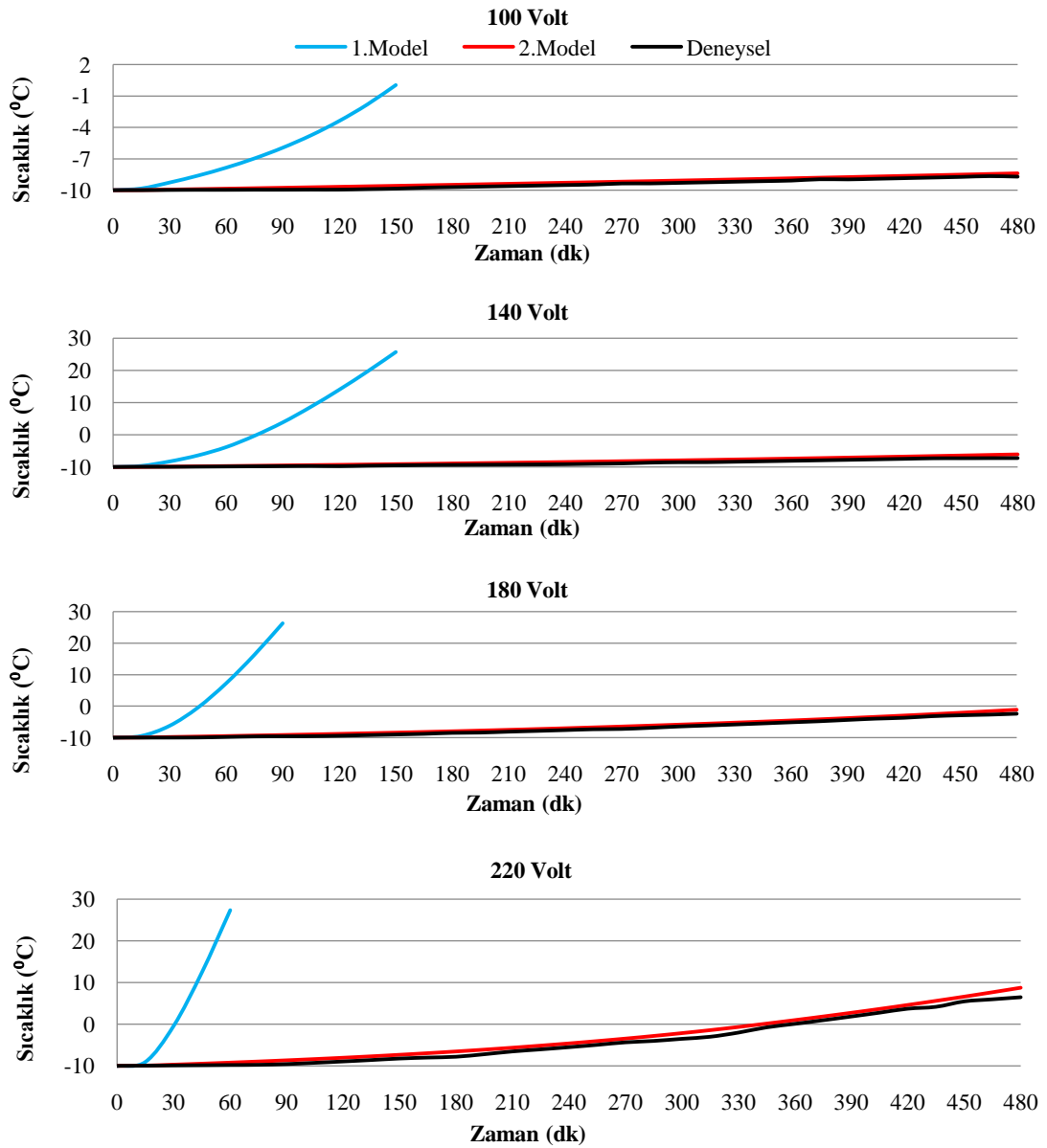


Şekil 6.4. N6K0.2Ç2 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları.



### 6.5. N6K0.5Ç2'nin Elektrotermal Sonuçları

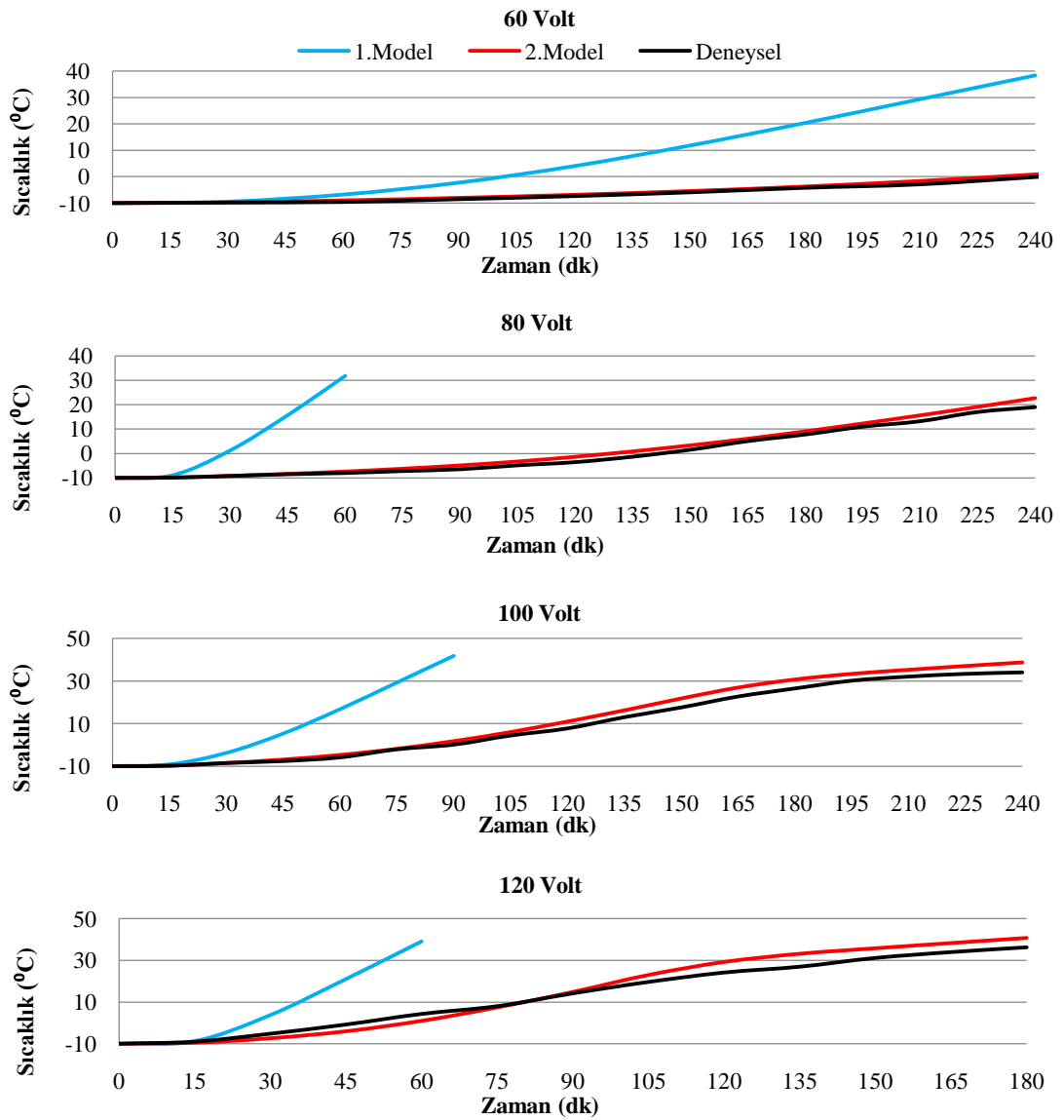
Şekil 6.5.'de N6K0.5Ç2'nin sıcaklık-zaman grafiği verilmiştir. Elektrotermal deney sonrası N6K0.5Ç2 karışımı için oluşan ısı değerleri N6K0.5Ç0 karışımı için elde edilen değerlere kıyasla azalmıştır. %2 ÇF kullanılmasının ısı enerjisine olumsuz etkisi olmuştur. Bunun nedeni KF ve ÇF'nin birlikte kullanılması ile işlenebilirliğin azalmasından dolayı karışımın heterojen olmasından kaynaklanan iletkenliğin azalması ile ilişkili olabilir.



Şekil 6.5. N6K0.5Ç2 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulanarak elde edilen elektrotermal sonuçları.

## 6.6. N6K1Ç2'nin Elektrotermal Sonuçları

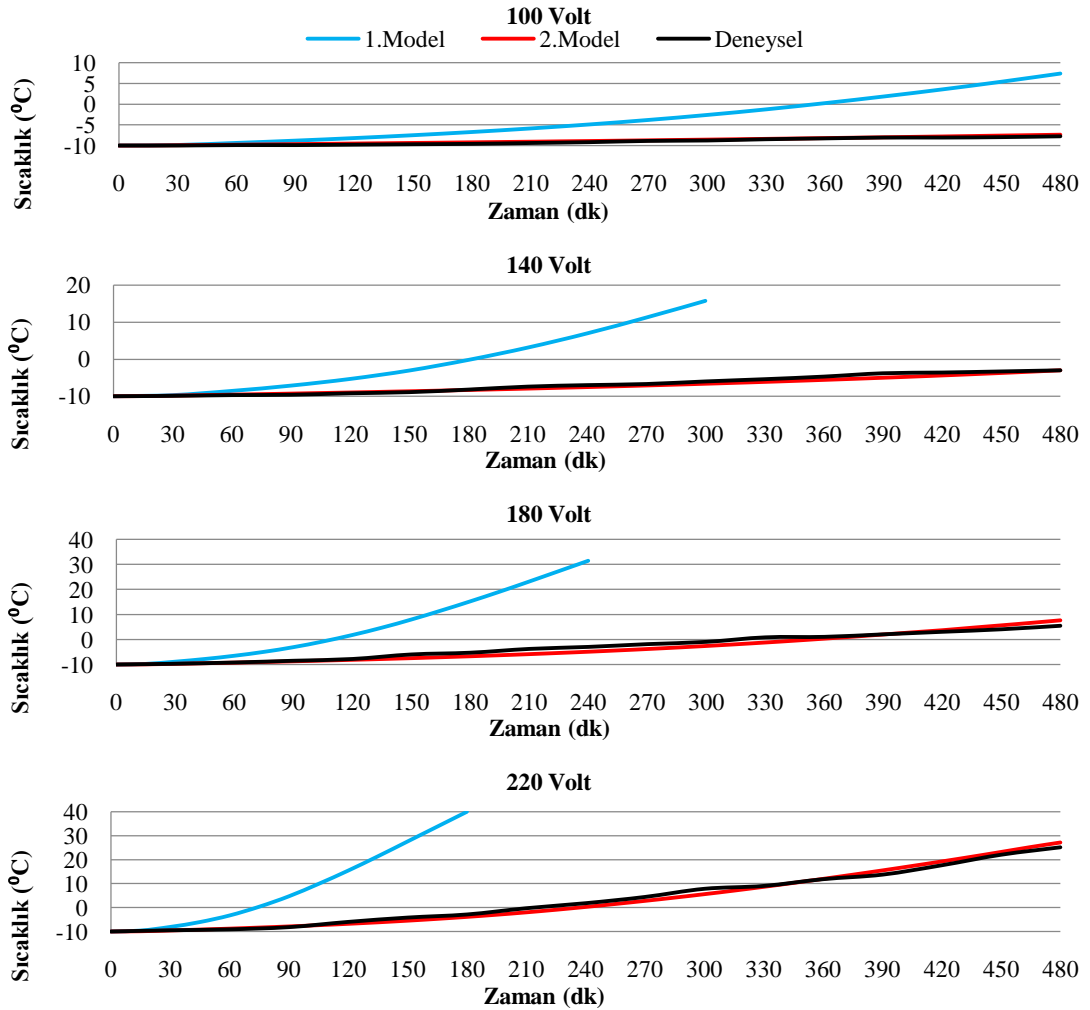
N6K1Ç2 karışımına sahip plaka numunesine uygulanan voltaj sonuçlarına göre 80 V'nin üzerinde olan voltajlar için 240 dk'nin altında yeterli ısı enerjisi elde etmek mümkün olmuştur (Şekil 6.6.). Ancak N6K1Ç0 karışımına kıyasla oluşan ısı enerjisinde önemli fark olmamasıyla birlikte, karışımda işlenebilirlik zorlukları ve gereksiz maliyet artma problemlerine yol açıldığından bu karışım önerilmemektedir. Ayrıca ÇF'nin zamanla paslanarak betondaki iletkenlik etkisi azalabilir [61].



Şekil 6.6. N6K1Ç2 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları.

### 6.7. N6K0E0.5'in Elektrotermal Sonuçları

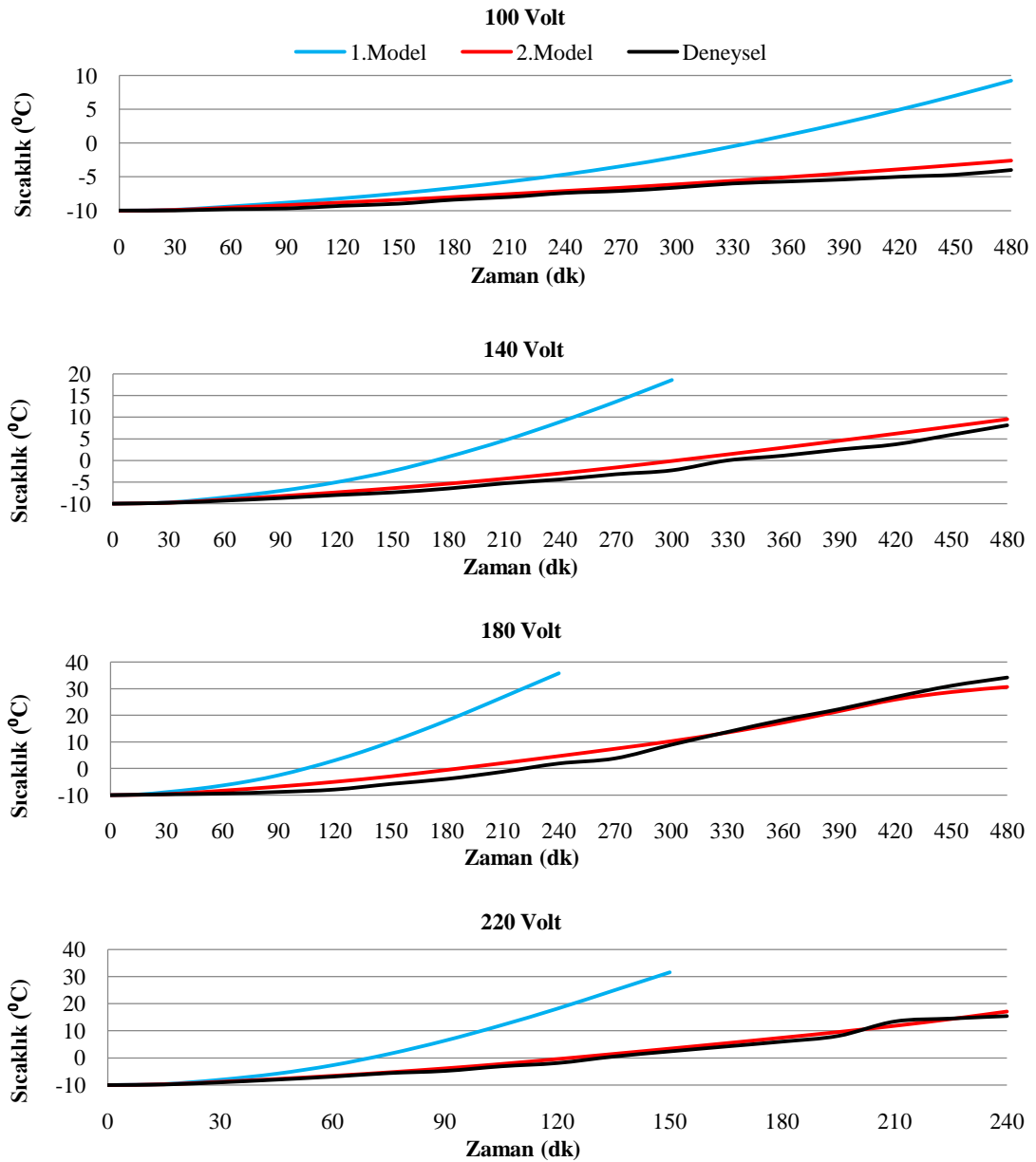
Elektriksel direnç sonuçlarından da anlaşıldığı gibi ATE'nin iyi elektriksel iletkenliğe sahip olduğundan dolayı elektrotermal deneylerinde de önemli rol oynadığı tesbit edilmiştir. KF içeren karışımlarda olduğu gibi ATE içeren karışımlarda da silindir numunelerin öz direnç değerleri plaka numunelerin öz direnç değerlerinden daha düşük çıkmıştır. N6K0E0.5 karışıma sahip silindir ve plaka numunelerinin öz direnç değerleri sırasıyla 1971 ve 7500  $\Omega$ .cm olarak ölçülmüştür. ATE içeriğinin artması ve karışımlara % 0.2 KF eklenmesi ile öz direnç değerleri azalmıştır. N6K0E0.5 plaka numunesine 100, 140, 180 ve 220 V voltaj uygulanmıştır. Ancak sıcaklığın -10 °C'den buz çözülmesi sıcaklığına yükselebilmesi için 300 dk sürenin üzerinde 220 V yeterli olmuştur (Şekil 6.7.).



Şekil 6.7. N6K0E0.5 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları.

## 6.8. N6K0E1'in Elektrotermal Sonuçları

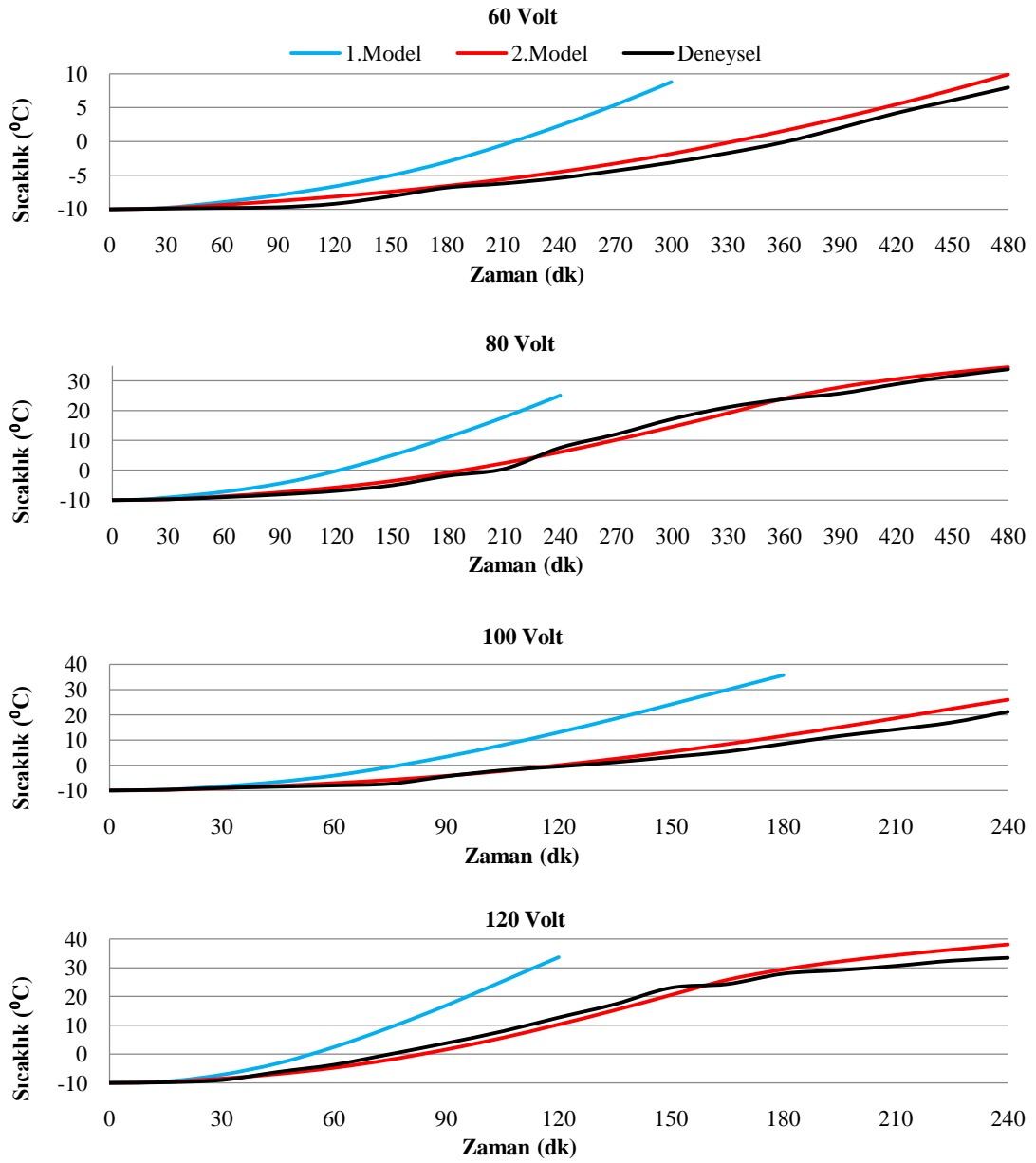
Ağırlıkça % 6 NKS içeren karışımlarda ATE içeriğinin hacimce % 0.5'den % 1'e çıkarılmasıyla üretilen plaka numunesinin, uygulanan farklı voltajlar sonucu, ısınma hızında gelişmeler görülmüştür. Şekil 6.8.'de uygulanan 100-220 V voltajlar arasında 100 V için kayda değer sonuç elde edilmemiştir, 140 V için 480 dk süre sonrası 20 °C sıcaklığın artması kaydedilmiştir. 180 ve 220 V uygulandığında aynı sıcaklığın elde edilmesi için sırasıyla 300 ve 200 dk zaman gerekmiştir.



Şekil 6.8. N6K0E1 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları.

### 6.9. N6K0.2E1'in Elektrotermal Sonuçları

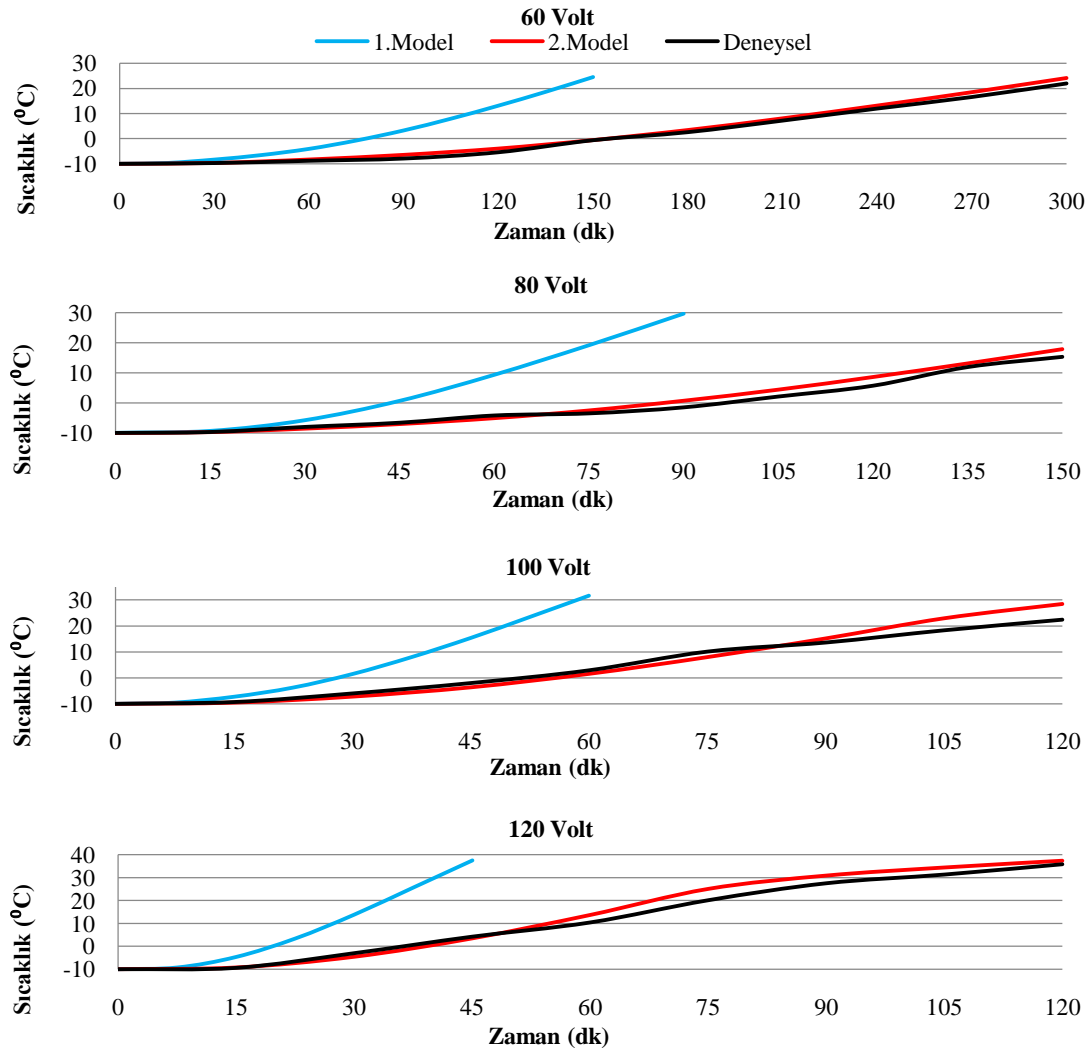
N6K0E1 karışımına 0.2 KF eklenmesinin etkisi, elektrotermal özellikleri üzerinde, Şekil 6.9.'da görülmektedir. N6K0.2E1 plaka numunesine 60, 80, 100 ve 120 V olarak dört farklı voltaj uygulama sonrası, ilk sıcaklığı  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  olan plakanın, sıcaklığı yaklaşık  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselebilmesi için sırasıyla 480, 240, 180 ve 120 dk zaman almıştır.



Şekil 6.9. N6K0.2E1 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları.

### 6.10. N6K0.2E1.5'in Elektrotermal Sonuçları

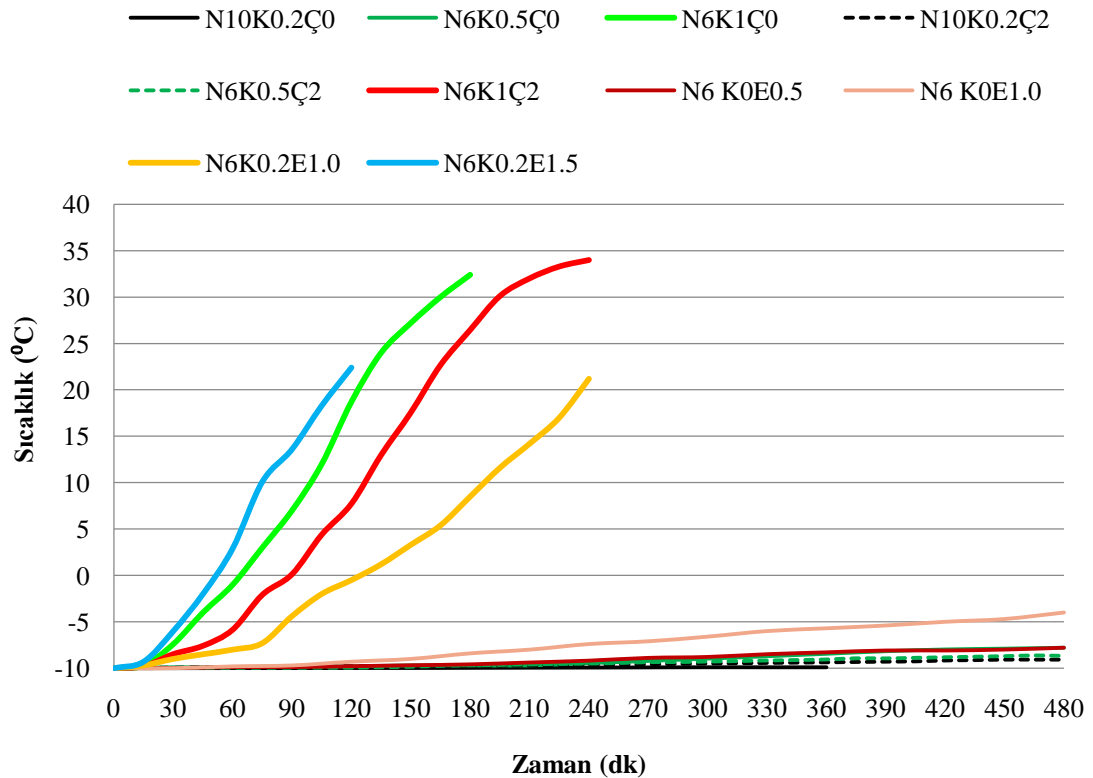
ATE içeren plaka numuneler arasında N6K0.2E1 ve N6K0.2E1.5 numuneleri düşük elektriksel iletkenliğe sahip olduklarından her ikisinin de, elektrotermal test sonuçlarına göre, düşük voltaj ve sürelerde yeterli miktarda ısı enerjisi üretim potansiyeline sahip oldukları tesbit edilmiştir. Ancak karışım esnasında N6K0.2E1.5 karışımının işlenebilirliği düşük olması nedeniyle karıştırma ve yerleştirmede sorunlarla karşılaşmıştır. Ayrıca bu karışımın basınç dayanımı da diğer karışımlara göre en alt seviyede çıkmıştır. İlk sıcaklığı  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  olan bu numunenin  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklığının artabilmesi için uygulanan 60, 80, 100 ve 120 V voltaj sonucu sırasıyla 230, 130, 75 ve 60 dk zaman sürmüştür (Şekil 6.10.).



Şekil 6.10. N6K0.2E1.5 plaka numunesi için farklı voltajlar uygulayarak elde edilen elektrotermal sonuçları.

### 6.11. Tüm Numunelerin Sıcaklık-Zaman Davranışları

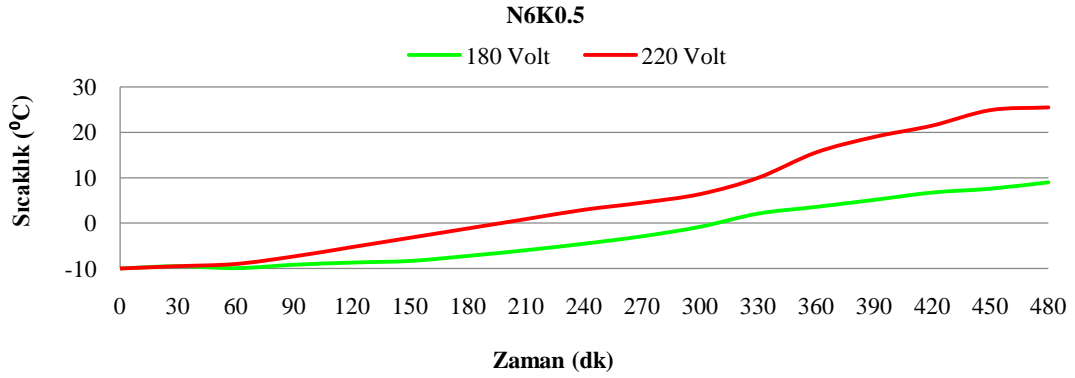
Yukarıda on farklı karışımdan elde edilen plaka numunelerinin bir arada karşılaştırılması, farklı özdirenç değerlerinden kaynaklanan termal davranışlarından dolayı çok uygun görülmemektedir. Farklı numuneler için farklı voltajlar uygulanmıştır. Ancak tüm numunelerde ortak voltaj uygulanması 100 V olarak görülmektedir. Dolayısıyla Şekil 6.11.'de kıyaslamak amacıyla uygulanan bu voltaj sonucu meydana gelen termal davranışları incelenmiştir. Yukarıdaki bölümlerde de detaylı olarak açıklandığı gibi, 100 V, N6K0.2E1.5, N6K1Ç0 ve N6K1Ç2 numuneleri için yüksek bir voltajdır, bu numunelerin daha uygun ısınabilmeleri için 80 V önerilmiştir. N6K0.2E1 numunesinin 180 dk içerisinde 10 °C'ye kadar ısınabilmesi için 100 V uygun görülmektedir. Diğer karışımlardan, N10K0.2Ç0 ve N10K0.2Ç2 numunelerin yalıtkan olduklarından her hangi bir voltajla ısınabilmemeleri tesbit edilmiştir. N6K0E1'in sıcaklığı 220 V'de 200 dk süre içerisinde -10 °C'den +10 °C'nin üzerine yükselebilmektedir. N6K0.5Ç0 numunesi ise uygulanan 220 V sonrası 330 dk sürede aynı sıcaklık farkını göstermiştir.



Şekil 6.11. Tüm plaka numuneler için 100 volt'da gerçekleşen elektrotermal sonuçları.

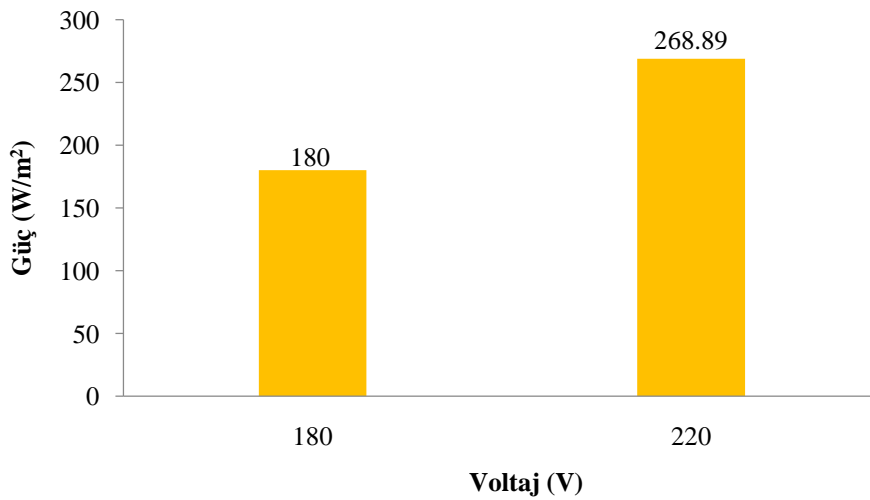
### 6.12. N6K0.5Ç0'da sıcaklık dağılımı ve güç miktarı

N6K0.5Ç0 numunesi için 180 ve 220 V voltaj uygulandığında kaydedeğer ısı enerjisi ortaya çıkmıştır. Bu voltajlar sonrası sıcaklık-zaman değişimi Şekil 6.12.'de karşılaştırılmıştır. Uygulanan voltajın 180'den 220 V'ye artmasıyla ısınma hızında 2.5 kat artma görülmüştür.



Şekil 6.12. N6K0.5Ç0 plaka numunesi için 180 ve 220 volt'da sıcaklık-zaman eğrileri.

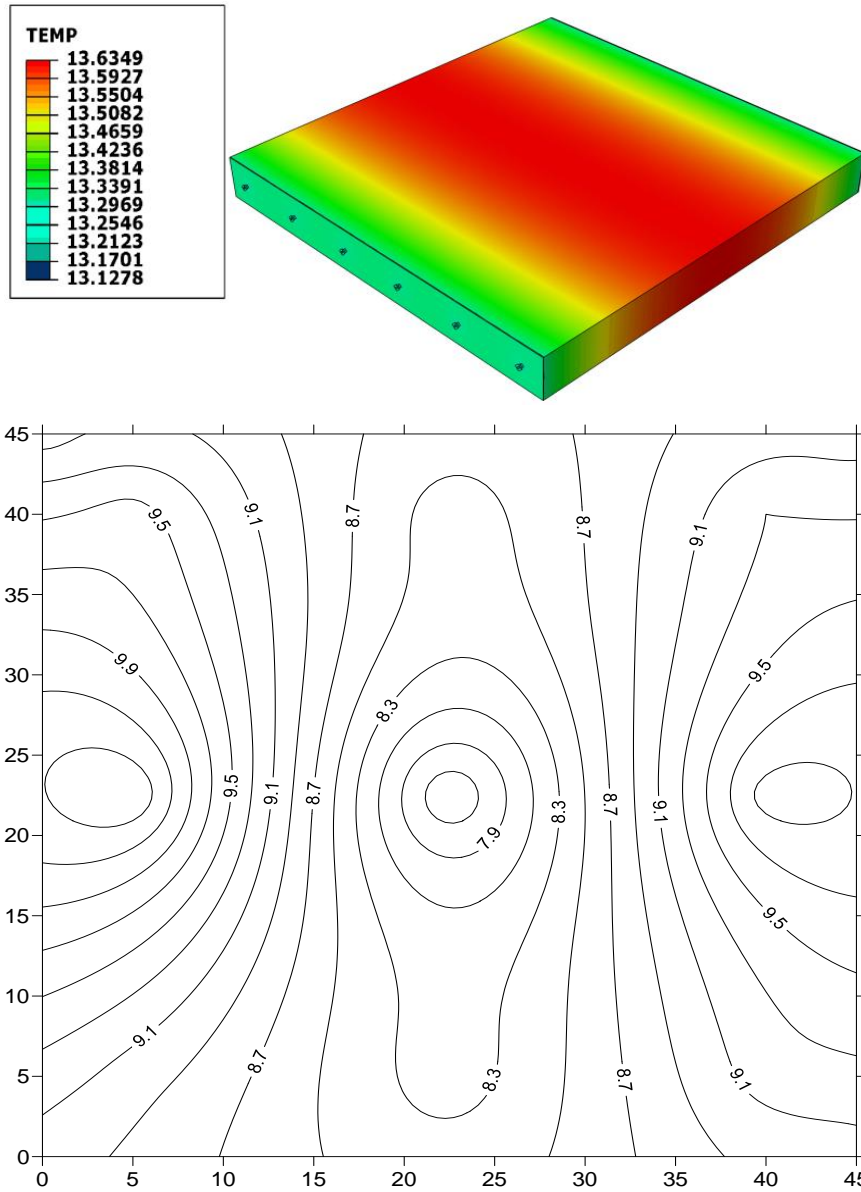
N6K0.5Ç0 için 180 ve 220 V Voltaj uygulanması sonucu tüketilen elektriksel güç (P) miktarı sırasıyla 180 ve 268 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.13.). Çuç miktarının 1.5 kat artması nedeni, uygulanan voltajla birlikte akım miktarının 0.2025'den 0.2475 A'ye çıkmasıdır.



Şekil 6.13. N6K0.5Ç0 plaka numunesi için 180 ve 220 V'de tüketilen güç miktarı.

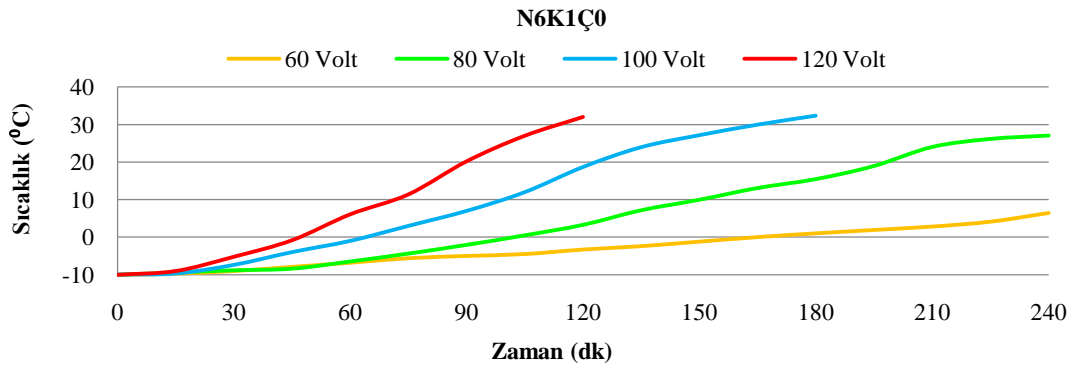


N6K0.5Ç0 karışımına sahip EİB plakasına 180 V voltaj uygulama sonrası 480 dk süre içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımı modelleme ve deneysel olarak Şekil 6.14.'de görüntülenmiştir. 3D modelden elde edilen termal kantona göre plakanın sıcaklığı  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerine yükselmiştir. Aynı şartlarla yapılan deney sonucuna göre sıcaklık  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar artmıştır. 3D modellerde EİB plakalarının homojen olarak tanımlanmasından dolayı, kantonlarda sıcaklık dağılımı da homojen olarak görüntülenmektedir. 220 V için elde edilen termal kantor ve sıcaklık dağılımı Ek C'de verilmiştir.



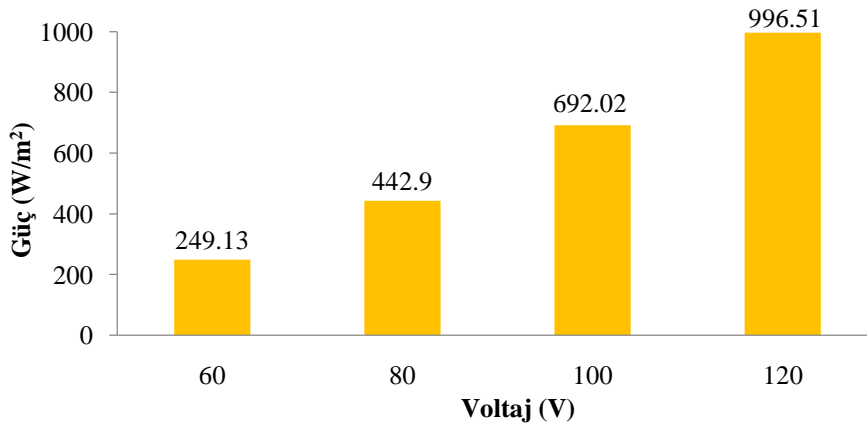
### 6.13. N6K1Ç0'da sıcaklık dağılımı ve güç miktarı

Uygulanan 60, 80, 100 ve 120 V voltaj sonrası N6K1Ç0 numunesinin termal davranışları Şekil 6.15.'de verilmiştir. Voltajın 60'dan 120'ye kadar artmasıyla ısınma hızı sırasıyla 2.6, 4 ve 5.7 kat artmıştır. 60 V uygulandığında plaka sıcaklığının  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselebilmesi için 240 dk'nin üzerinde süre gerektiği anlaşılmıştır, bununla birlikte 80, 100 ve 120 V'de aynı sıcaklığın elde edilmesi için sırasıyla 150, 100 ve 75 dk'nin yeterli olduğu belirlenmiştir.



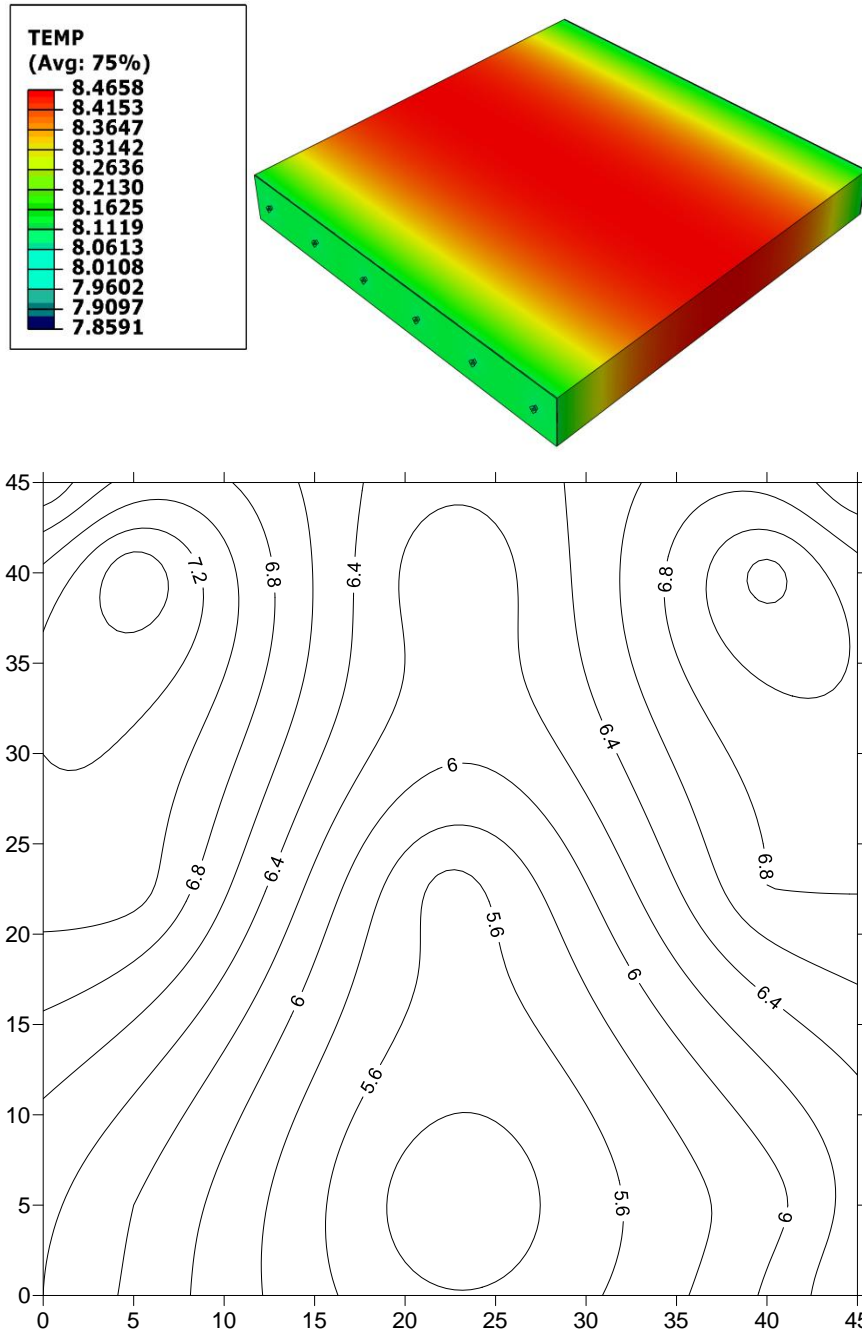
Şekil 6.15. N6K1Ç0 plaka numunesi için 60-120 V'de sıcaklık-zaman eğrileri.

N6K1Ç0 plaka numunesi için 60 V'nin üzerinde uygulanan her voltajda tüketilen elektrik gücü buz çözme için yeterli olduğu tesbit edilmiştir. Harcanan zaman ve maliyet açısından soğuk havalarda kar ve buzun birikmesini önlemek için  $300\text{-}550\text{ W/m}^2$  gücün yeterli olduğu literatürdeki önceki çalışmalarda belirtilmiştir. Bu plaka için uygulanan 80 V sonucu tüketilen  $442.9\text{ W/m}^2$  güç değeri uygun görülmektedir.



Şekil 6.16. N6K1Ç0 plaka numunesi için 60-120 V'de tüketilen güç miktarı.

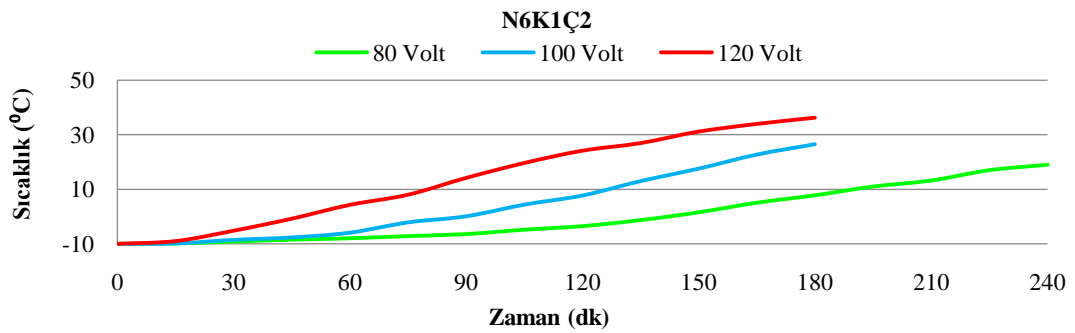
N6K1Ç0 plaka numunesine 60 V voltaj uyguladıktan sonra 240 dk sonra hem modelleme hem deneysel olarak gösterdiği termal davranışı ve sıcaklık dağılımı Şekil 6.17.'de verilmiştir. Plakanın bu sürede sıcaklığı  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den modelde 8'in üzerine ve deneyde ise 7'nin üzerine çıkmıştır. Deney sonuçlarındaki numunenin alt tarafı ile üst tarafındaki yaklaşık  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklık farkı KF dozajının yüksek olması dolayısıyla KF'nin üniform dağılmamasından kaynaklanabilir.



Şekil 6.17. N6K1Ç0 için 60 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı.

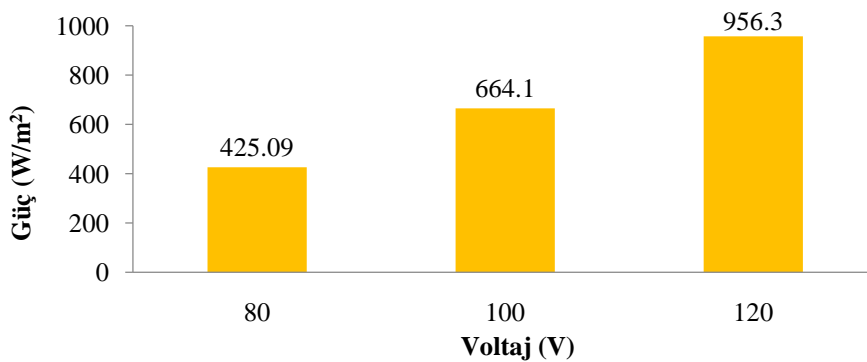
#### 6.14. N6K1Ç2’de sıcaklık dağılımı ve güç miktarı

N6K1Ç0 karışımına ağırlıkça % 2 ÇF’nin eklenmesi elektrotermal özelliği açısından karışım üzerinde olumlu etkisi olmamıştır. N6K1Ç2 karışımından geçen elektriksel akım miktarı N6K1Ç0 karışıma kıyasla % 4 azalmıştır. Her iki numune için 80 V voltaj uygulandığında numunelerin sıcaklığının 20 °C artması için N6K1Ç0 150 dk ve N6K1Ç2 190 dk zaman almıştır. N6K1Ç2 numunesi için uygulanan 80, 100 ve 120 V voltaj sonucu termal davranışları Şekil 6.18.’de verilmiştir.



Şekil 6.18. N6K1Ç2 plaka numunesi için 80-120 V’de sıcaklık-zaman eğrileri.

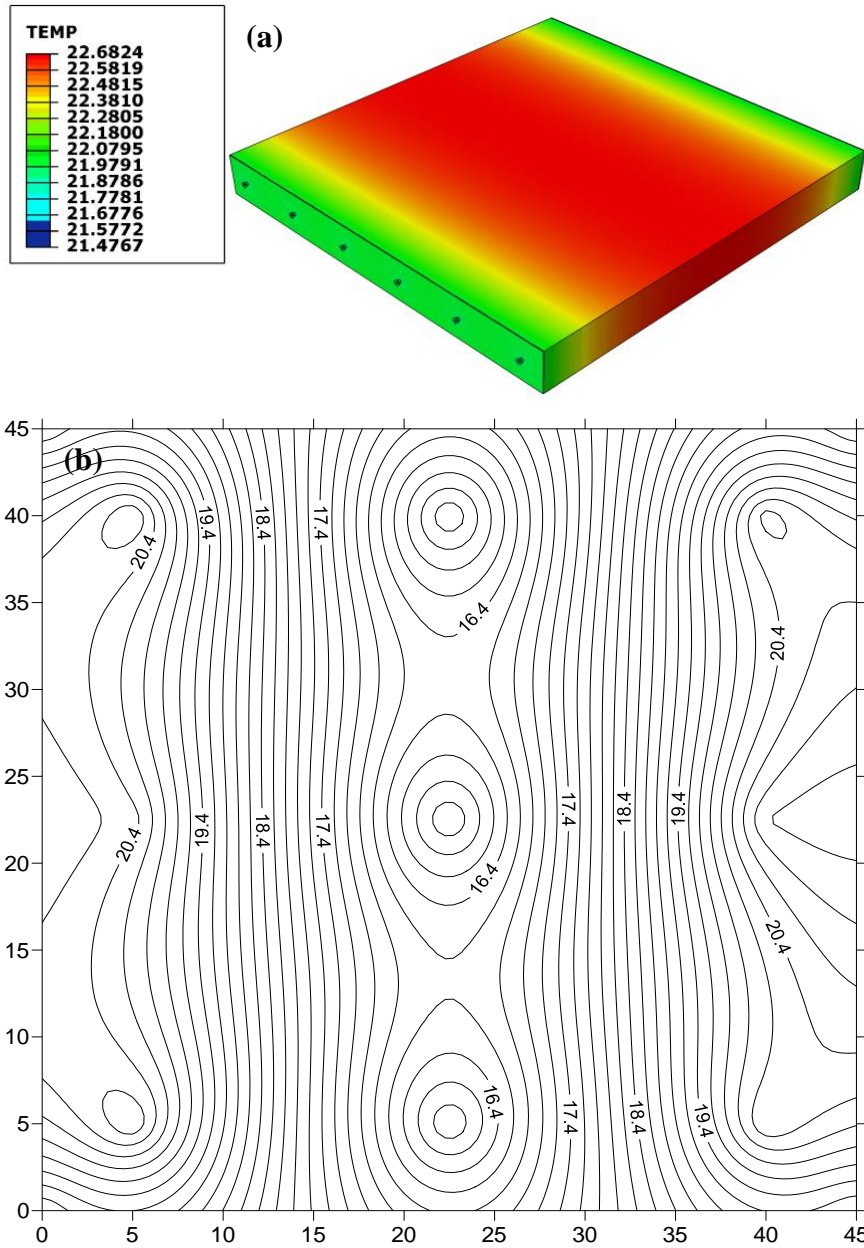
N6K1Ç2 plaka numunesinin 80 V’de ortalama 5 °C/h hızla ısınabilmesi için 425 W/m<sup>2</sup> gücün yeterli olduğu tesbit edilmiştir. Voltaj değerinin 100 ve 120 V’ye yükselmesi ile sırasıyla ısınma hızı 8.8 ve 12 °C/h’ artmasıyla birlikte tüketilen güç miktarı 0.56 ve 1.25 kat artmıştır (Şekil 6.19.).



Şekil 6.19. N6K1Ç2 plaka numunesi için 80-120 V’de tüketilen güç miktarı.

N6K1Ç2 karışıma sahip plaka numunesine 80 V voltaj uygulandığında 3D termal kantoruна göre sıcaklık 21 ile 22 °C arasında kenarlardan içeriye doğru ısınarak

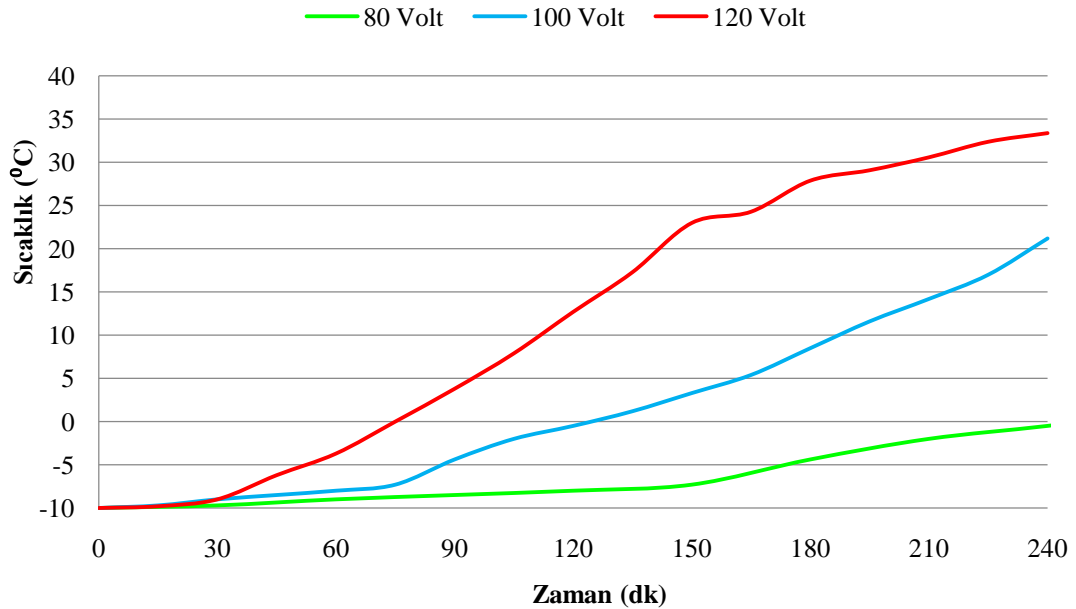
dağılmıştır (Şekil 6.20.a). Aynı plaka numunesinin sıcaklık dağılımı deney sonuçlarına göre içeriden kenarlara 16'dan 20'ye ısınarak elde edilmiştir (Şekil 6.20.b). Model sonuçlarına göre kenarlardan içeriye, deney sonuçlarına göre içeriden kenarlara sıcaklığın artması malzemenin homojen-heterojen ve porsuz-porluluğu ile ilişkili olabilir ki bütün deneylerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Homojen ve porsuz bir malzemeye voltaj uygulandığında, malzeme ortadan ısınarak, sıcaklık kenarlara dağılır. Abaqus programında beton plakaları homojen ve porsuz olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6.20. N6K1Ç2 için 80 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı.

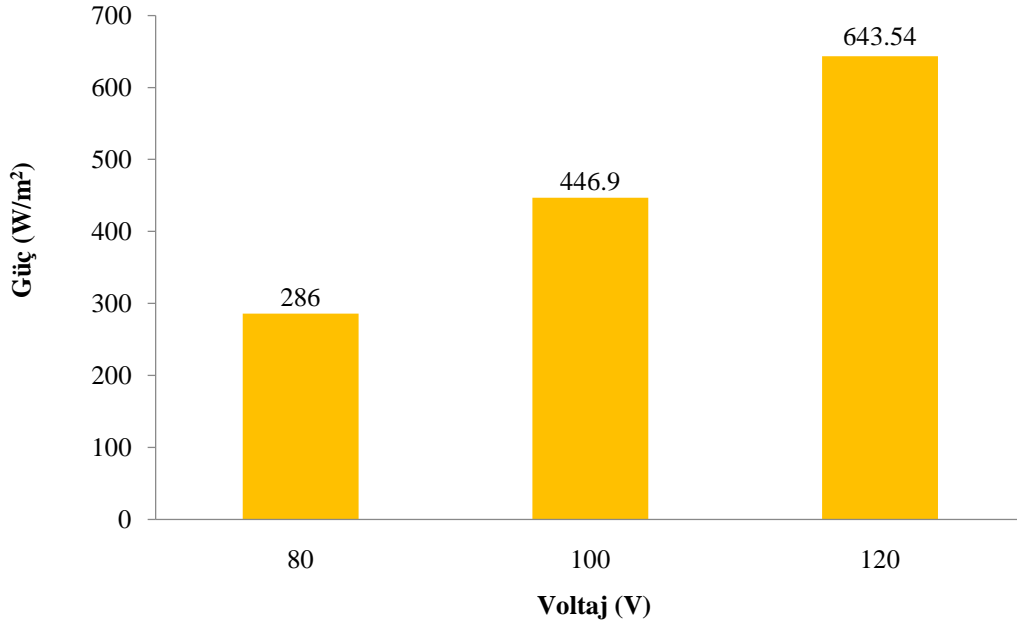
### 6.15. N6K0.2E1’de sıcaklık dağılımı ve güç miktarı

ATE’nin, elektriksel direnç sonuçlarında da belirlendiği gibi, plaka numunelerinde elektrotermal özelliği üzerinde önemli etkisi vardır. Ağırlıkça % 6 NKS, hacimce % 0.2 KF ve % 1 ATE içeren EİB numunesine uygulanan 80 V voltaj sonucu ortalama ısınma hızı 2.5 °C/h hesaplanmıştır. 100 ve 120 V uygulandığında sıcaklığın -10 °C’den +10 °C’ye kadar yükselmesi için sırasıyla 3.15 ve 6 °C/h hızla, 190 ve 110 dk zaman sürmüştür. N6K0.2E1 numunesi için farklı voltajlarda zaman-sıcaklık eğrileri Şekil. 21.’de verilmiştir.



Şekil. 6.21. Farklı voltajlarda N6K0.5, N6K1 ve N6K1S2 numuneleri için elde edilen elektrotermal sonuçlar.

% 1 ATE içeren N6K0.2E1 numunesi için elde edilen güç değerleri beton plakasının kısa bir süre içerisinde ısınabilmesi için literatürdeki çalışma sonuçlarına kıyasla uygun değerler olarak görülmektedir. Üç farklı voltaj uygulama sonucu harcanan güç miktarları Şekil 6.22.’de karşılaştırılmıştır. 80 V sonucu 286 W/m<sup>2</sup> güç ile betonun ısınması süre açısından uygun değildir. Bununla birlikte 100 V uygulama sonucu harcanan 447 W/m<sup>2</sup> hem süre açısından hem enerji tüketim açısından uygun görülmektedir. 643 W/m<sup>2</sup> ısınma hızını artır ancak fazla enerji tüketimine yol açarak işletme maliyetin artmasına neden olur.

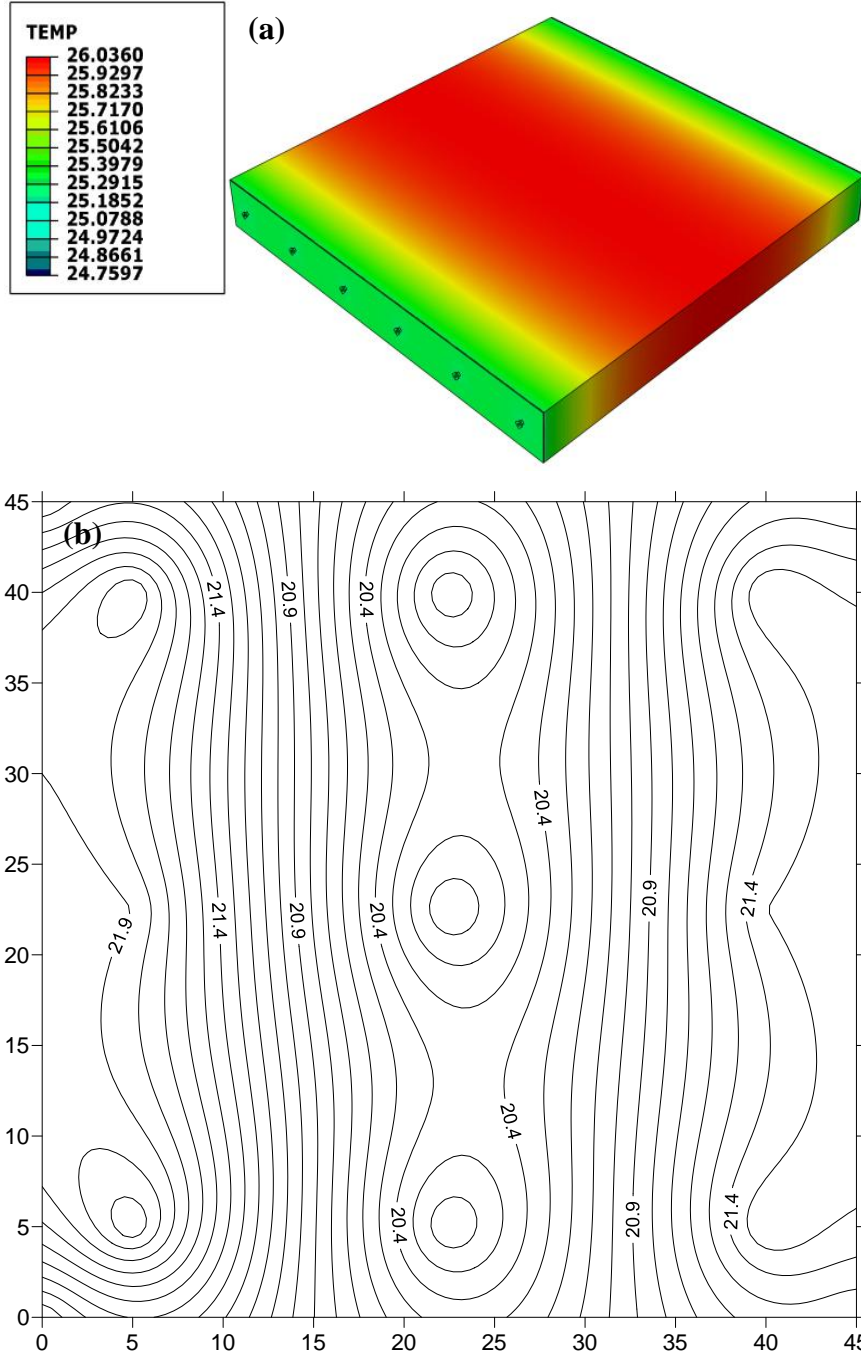


Şekil 6.22. N6K0.2E1 plaka numunesi için 80-120 V'de tüketilen güç miktarı.

Yukarıdaki plaka numunelerin ısı deney sonuçlarında da belirlendiği gibi EİB'lerde ısı dağılımının üniform olması için kullanılan fiberlerin homojen dağılması önemlidir. Genellikle tüm karışımlarda hem KF hem ATE düşük oranlarda kullanıldığı zaman yeterli ısı enerjisi oluşmasa da, fiberlerin iyi dağılmasından dolayı plaka numunelerinde sıcaklığın üniform olarak dağılması gözlenmiştir.

N6K0.2E1 plaka numunesinin 3D modelleme sonucu 100 V ile oluşan termal kantoru ve deney sonuçlarına göre çizilen termal harita Şekil 6.23.'de verilmiştir. Model sonuçlarına göre sıcaklık 24 ile 26 °C ve deney sonuçlarına göre ise 20 ile 22 °C arasında değişmektedir. Bu numunede ATE orta miktarda (% 1) kullanıldığına göre, karışım esnasında da homojen karışılması görülmüştür. Homojen karışılmasının etkisi Şekil 6.23.b'de sıcaklığın üniform dağılmasında görülebilir.

Modeldeki termal kantorida maksimum sıcaklık orta bölgelerde minimum sıcaklık kenarlarda görülmektedir, deney sonuçlarında ise bunun tersi sıcaklık kenarlarda yükselerek ortaya doğru hareket etmektedir. Bunun sebebi modellerde beton plakası homojen ve pürüzsüz olarak tanımlandığından kaynaklanabilir. Gerçekte de metal gibi malzemeler direnç görevi yaptığında ortadan ısınırlar.

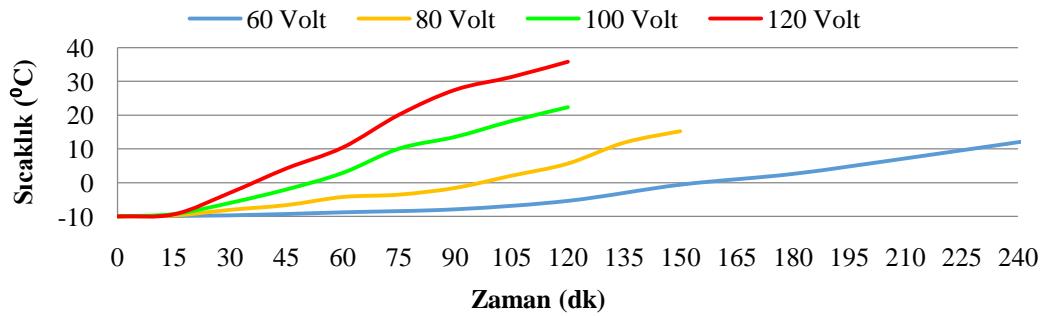


Şekil 6.23. N6K0.2E1 için 100 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı.



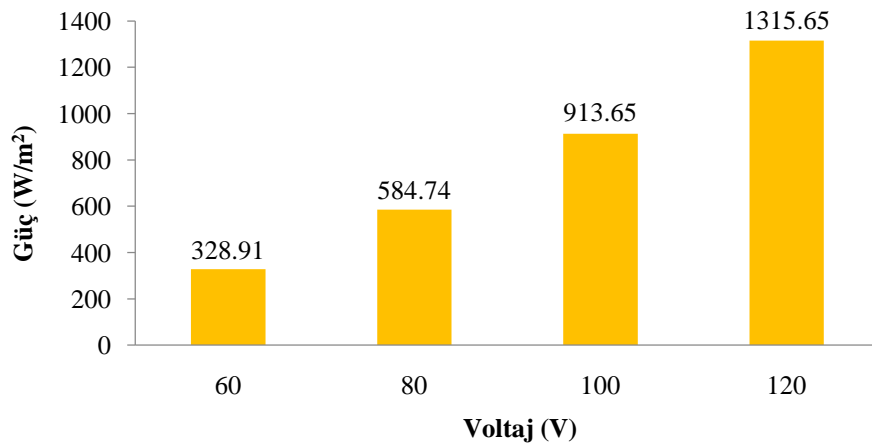
### 6.16. N6K0.2E1.5’de sıcaklık dağılımı ve güç miktarı

ATE içeren plaka numunelerinde ATE içeriğinin % 1’den % 1.5’e artması elektrotermal sonuçları üzerinde olumlu etkiler göstermiştir. Uygulanan dört farklı voltaj sonucu, voltaj miktarı 60 V olduğunda numune sıcaklığının 20 °C artması için yaklaşık 230 dk zamanın gerekli olduğu belirtilmiştir (Şekil 6.24.). Voltaj miktarının 80, 100 ve 120 V’ye artmasıyla aynı sıcaklığın elde edilmesi için süre sırasıyla 135, 75 ve 60’a düşmüştür.



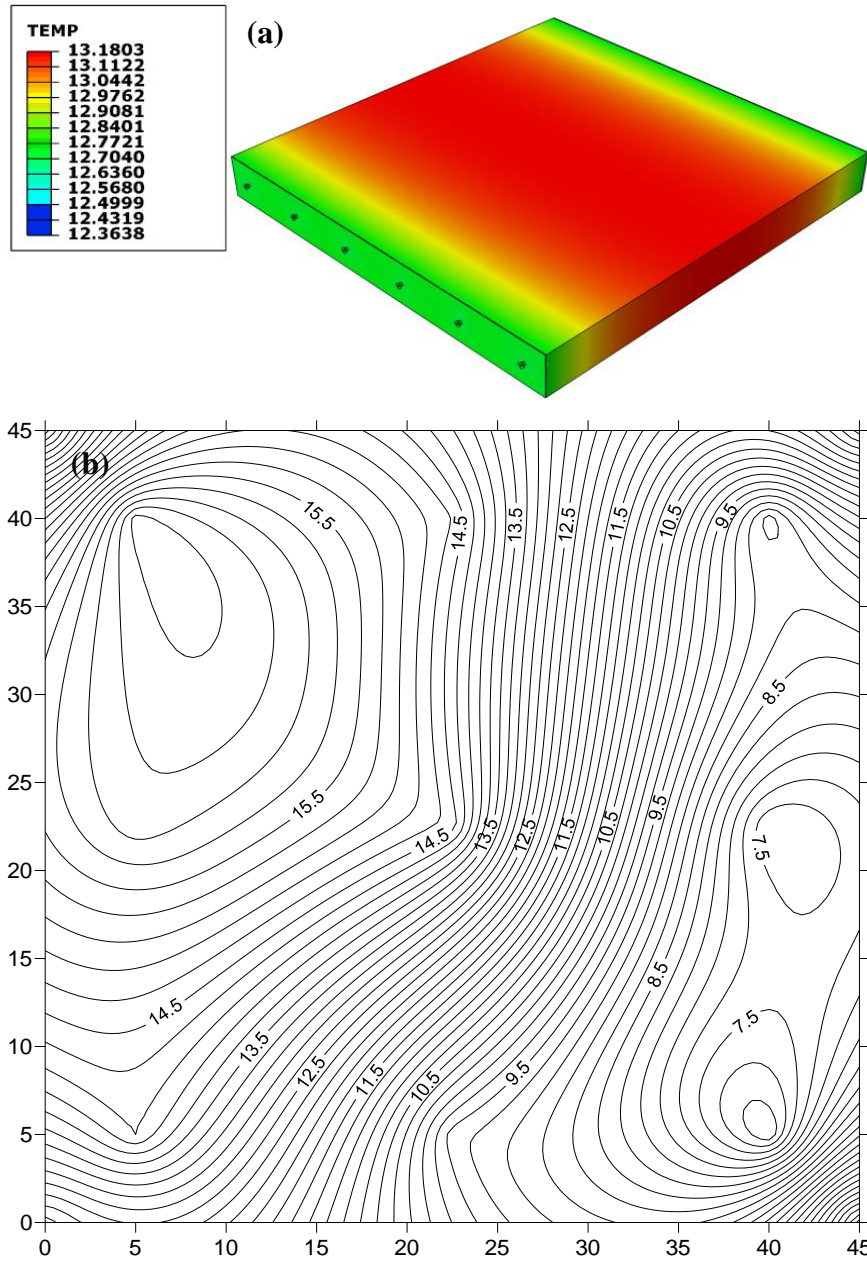
Şekil 6.24. Farklı voltajlarda N6K0.2E1.5 numuneleri için elde edilen elektrotermal sonuçlar.

N6K0.2E1.5 numunesi için 60 V’nin üzerinde uygulanan tüm voltajlar sonucu betonun istenilen sürede ısınabilmesi için yeterli güç değerleri elde edilmiştir (Şekil 6.25.). Literatürde uygun güç değerlerinin 300-550 W/m<sup>2</sup> olduğu belirlendiği için bu numunede de 60 V uygulama sonucu harcanan 329 W/m<sup>2</sup> uygun görülmektedir. Isınma hızının artırılması istenilirse 80 V uygulama sonucu 589 W/m<sup>2</sup> önerilir.



Şekil 6.25. N6K0.2E1 plaka numunesi için 80-120 V’de tüketilen güç miktarı.

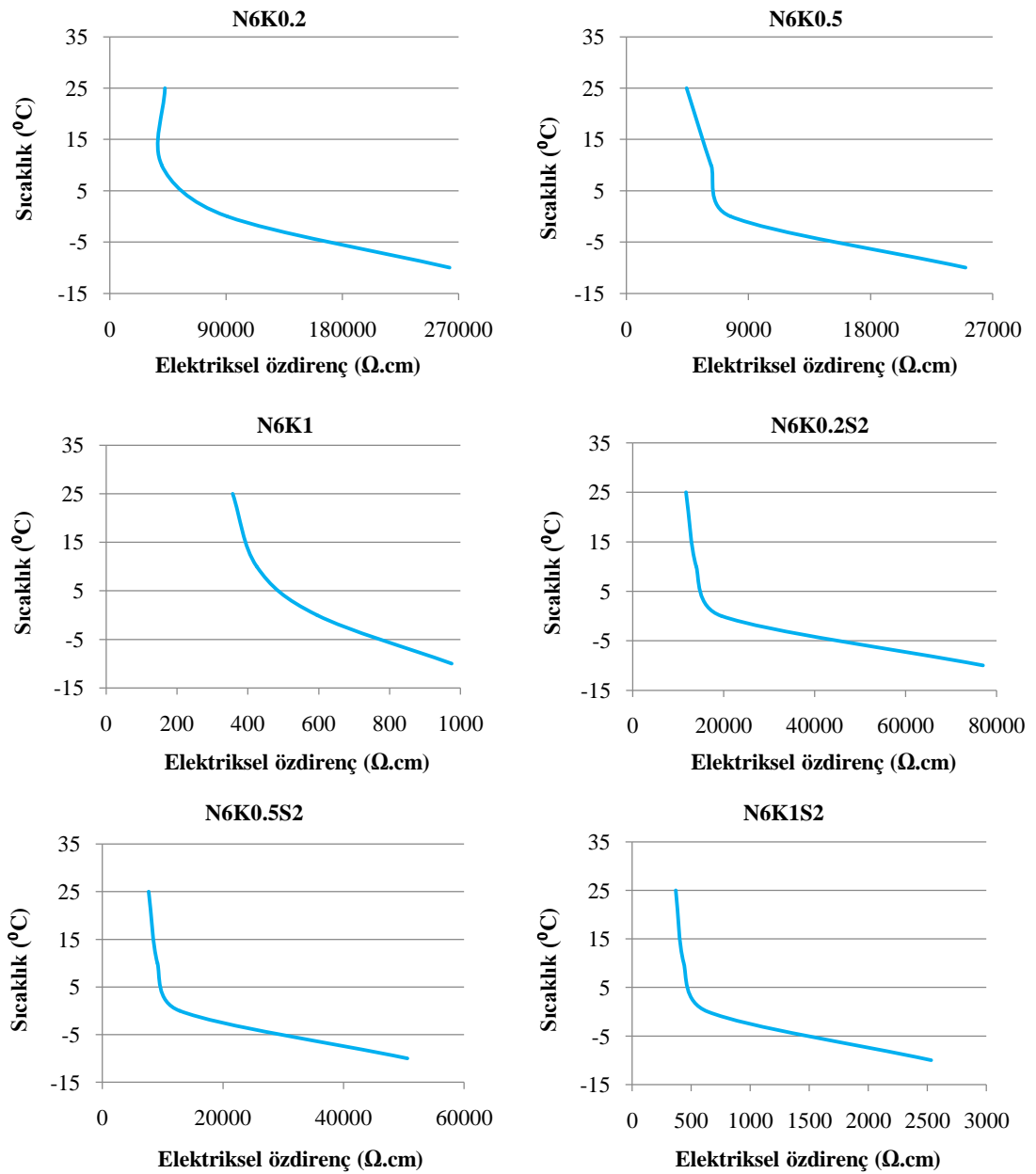
Karışım esnasında da anlaşıldığı gibi % 1.5 ATE içeren karışımın işlenebilirliğinin düşmesi nedeniyle üretilen plaka numunenin homojenliği azalmıştır. Diğer bir ifadeyle fiber dozajının artmasıyla topaklanma oluşarak fiberlerin üniform dağılımı engellenmiştir. Bu problemin sonucu Şekil 6.26.b.'de 60 V ile 240 dk süre içerisinde meydana gelen termal haritada görülmektedir. Numunenin bir köşesindeki sıcaklık yaklaşık 7.5 °C ve onun çaprazındaki köşede 15 °C'ye yakın ölçülmüştür. Diğer voltajlar için elde edilen termal kantoları Ekler bölümünde verilmiştir.



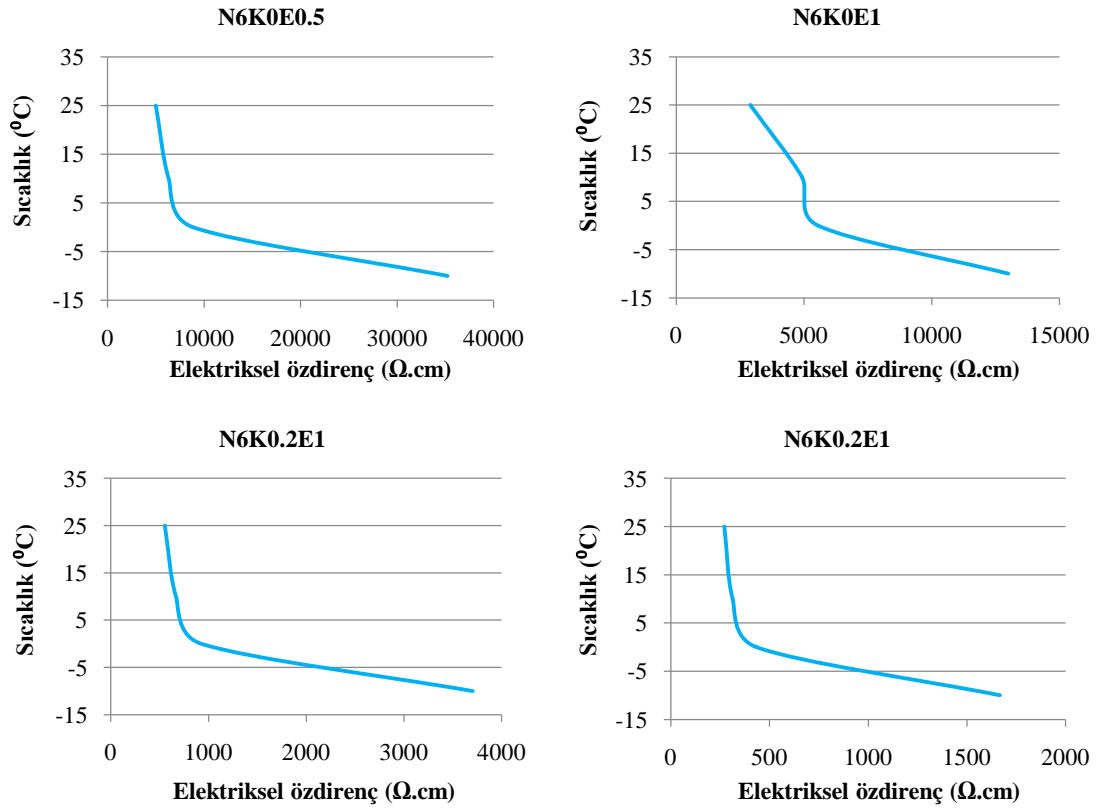
Şekil 6.26. N6K0.2E1.5 için 60 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı.

### 6.17. Sıcaklık ile Özdirenç Arasındaki İlişki

Literatüre göre EİB'nin elektriksel direnci sıcaklığın artmasıyla azalır [1]. İlk sıcaklığı  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  olan beton plaka numunelerin sıcaklığı  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselmesiyle elektriksel özdirençin değişmesi Şekil 6.27.'de NKS, KF, ve ÇF içeren numuneler için ve Şekil 6.28.'de NKS, KF ve ATE içeren numuneler için verilmiştir. Şekillerden her on numunede de sıcaklığın artmasıyla özdirenç değerlerin yaklaşık üç kat daha arttığı görülmektedir.



Şekil 6.27. NKS, KF ve ÇF içeren plaka numunelerin farklı sıcaklıklardaki özdirenç değerleri.

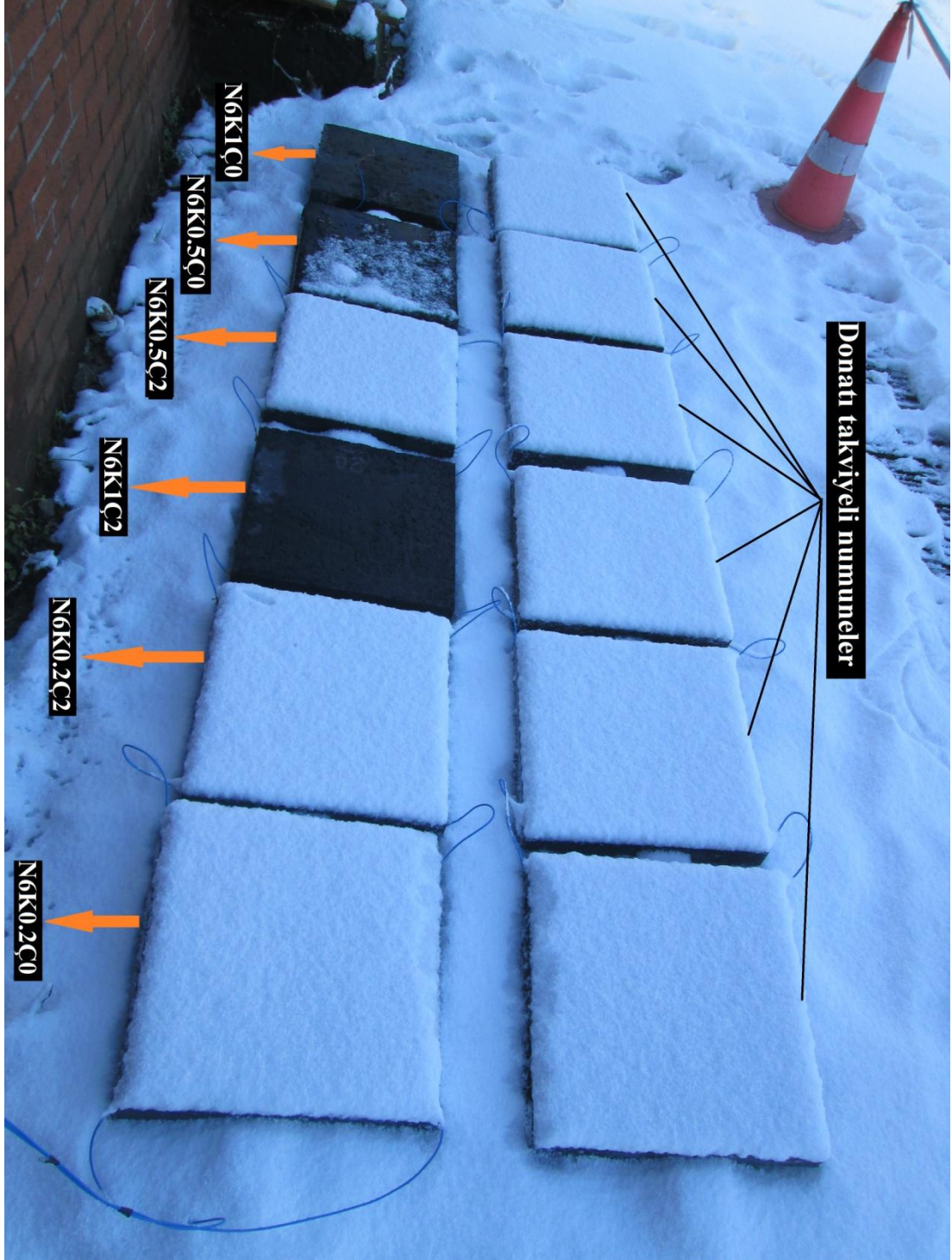


Şekil 6.28. NKS, ATE ve KF içeren plaka numunelerin farklı sıcaklıklardaki özdirenç değerleri.

### 6.18. Numunelerin Karlı Havadaki Performansları

Daha önceki bölümlerde de açıklandığı gibi bu çalışmada üretilen EİB'lerin uygulanması Türkiye'nin genellikle doğu bölgelerinde yer alan havalimanları pistleri için amaçlanmıştır. Deneyin yapılması Sakarya'da kış mevsimine denk gelmesine rağmen doğu illeri gibi zor kış koşullarının olmaması nedeniyle numunelerin doğal ortamda kar-buz eritme ve kar birikmesi önleme gibi deneylerin yapılması gerçekleştirilemedi. Ocak ayında  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  hava sıcaklığında numunelerin üzerine yaklaşık 35 mm kar birikme sonrası, uygulanan 100 V sonucu ısı performansları Şekil 6.29.'da verilmiştir. N6K1Ç0 numunesi üzerindeki biriken kar, 45 dk içerisinde tamamen erimiştir. N6K1Ç2 numunesinin üzerindeki karın tamamen erimesi için 60 dk zaman harcanmıştır. Aynı koşullarda N6K1Ç0 numunesi için 270 dk boyunca uygulanan 100 V voltaj sonucu biriken karın % 95'i eriyerek şekildeki görüntü elde edilmiştir. Fotoğrafın sağ tarafında yer alan altı adet numune donatı takviyeli numunelerdir ki soğutucuda yapılan deney sonuçlarına göre EİB'lerde yan etkisi

olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle donatı takviyeli EİB'lerin incelenmesi tez çalışmasından kaldırılmıştır. Ayrıca ATE içeren dört adet EİB plakalar ikinci aşamada üretildiğinden karlı havada incelenmeleri için hazırlanmamıştır.



Şekil 6.29. NKS, KF ve ÇF içeren plaka numunelerin karlı havadaki performansları.

### 6.19. EİB'lerde Performans Değerlendirilmesi

Üretilen on farklı karışıma sahip plaka numunelerin arasından seçilen 6 adet EİB plakaların performans özeti Tablo 6.2.'de verilmiştir. Bu tabloda yer alan numuneler, uygulanan farklı voltajlar sonucu, 6 saatin altında  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktan  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ısınma kapasiteleri olan numunelerdir. N6K0.5Ç0'a 220V voltaj uygulama sonucu 5.5 saat süreyle  $268.89\text{ W/m}^2$  güç harcanarak sıcaklıkta  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  artma görülmüştür. N6K1Ç0 plaka numunesinde aynı sıcaklık değişmesini izlemek için 2.5 saat boyunca 80 V voltaj uygulanmıştır, sıcaklığın  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselmesi için  $442.9\text{ W/m}^2$  gücün yeterli olduğu belirtilmiştir. Bu numunenin üretim maliyeti bir önceki numuneye kıyasla % 84 artmıştır, bununla birlikte işletme maliyeti % 25 azalmıştır.

N6K1Ç2 numunesinin maliyeti N6K1Ç0'a göre artmasına rağmen süre açısından da olumlu sonuçlar göstermemiştir. Dolayısıyla tüketilen enerji miktarının artmasıyla işletme maliyetinin de % 23 artmasına neden olmuştur.

Sadece NCS ile ATE içeren N6K0E1 numunesine 3.4 saat boyunca 220 V voltaj uygulandığında  $406.48\text{ W/m}^2$  güç harcanmıştır. N6K1Ç0 numunesine kıyasla ısınma süresi % 36 artmış, üretim maliyeti 3.19 azalmış ve işletme maliyeti ise % 25 artmıştır.

N6K0.2E1'e 100 V voltaj uygulama sonucu  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklığın artması için  $446.9\text{ W/m}^2$  gücün harcanmasıyla 4 saat zaman almıştır. Bu numune bir önceki numuneye kıyasla hem süre, hemde üretim-işletme maliyetleri açısından uygun görülmemektedir.

% 1.5 ATE içeren N6K0.2E1.5 numunesinin sıcaklığının  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  artabilmesi için, 80 V ile 2.2 saat süreyle,  $584.74\text{ W/m}^2$  gücün gerekli olduğu belirtilmiştir. Bu numunenin üretim maliyeti diğer ATE içeren numunelere kıyasla maksimum seviyededir, aynı zamanda işletme maliyeti diğerlerinden düşük seviyededir. N6K1Ç0 numune ile karşılaştırıldığında süre açısından önemli fark görülmemektedir, üretim maliyeti % 39 azalmış ve işletme maliyetinde % 16 artma görülmüştür.

Literatüre göre  $350 \text{ W/m}^2$  güç ile EİB sisteminin ilk maliyeti  $635 \text{ \$/m}^2$  ( $3620 \text{ TL/ m}^2$ ) ve işletme maliyeti ise  $0.80 \text{ \$/m}^2$  ( $4.56 \text{ TL/ m}^2$ ) olarak belirlenmiştir [61]. Bu maliyet değerleri Amerika'daki şartlarla hesaplanmış değerlerdir. Dolayısıyla Türkiye'de yapılan EİB maliyeti ile kıyaslanması mantıklı olmayabilir.

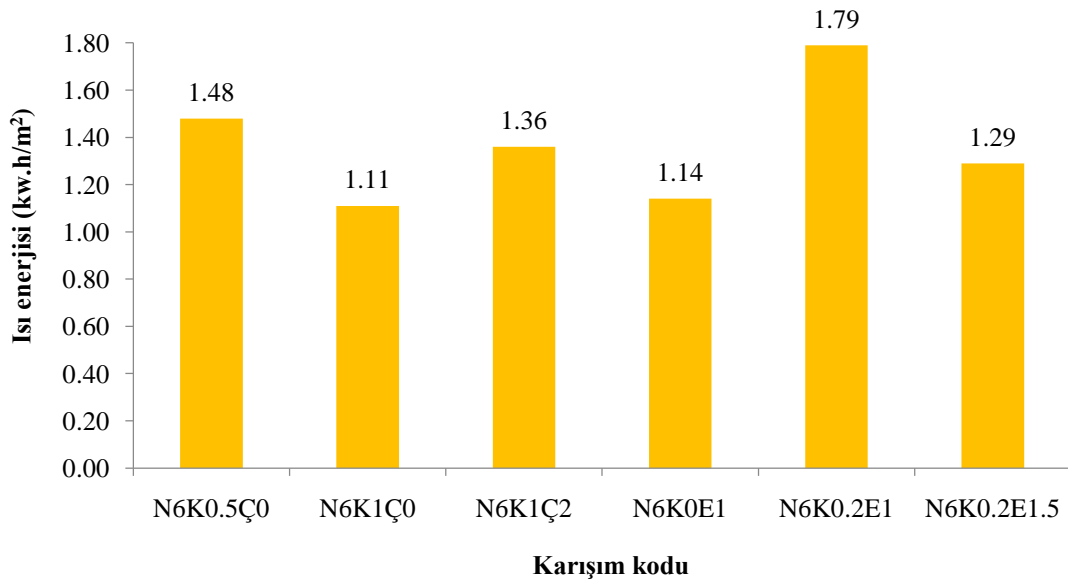
Tablo 6.2. Sıcaklığın  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye yükselmesi için harcanan zaman ve enerji.

NO	Numune kodu	Voltaj (V)	Zaman (h)	Güç ( $\text{W/m}^2$ )	Enerji ( $\text{kw.h/m}^2$ )	Ü.Maliyeti ( $\text{TL/m}^2$ )	İş.Maliyeti ( $\text{TL/m}^2$ )
1	N6K0.5Ç0	220	5.5	268.89	1.48	149.90	1.22
2	N6K1Ç0	80	2.5	442.9	1.11	275.30	0.91
3	N6K1Ç2	80	3.2	425.09	1.36	291.70	1.12
4	N6K0E1	220	3.4	406.48	1.38	86.38	1.14
5	N6K0.2E1	100	4	446.9	1.79	136.50	1.47
6	N6K0.2E1.5	80	2.2	584.74	1.29	167.30	1.06

Not: Değerler 5 cm kalınlığındaki beton plakası için hesaplanmıştır.

Tablo 6.2.'de verilen ısı enerjisi değerleri Şekil 6.30.'da karşılaştırılmıştır. Enerji değerleri harcanan güç değerlerinin ısınma süresine çarpılmasıyla elde edilmiştir. En düşük enerji değeri N6K1Ç0 numunesi için tüketilmiştir. Dolayısıyla minimum işletme maliyeti de bu numune ile ilgilidir. Ancak üretim maliyeti açısından, N6K1Ç2 hariç, en yüksek maliyetli numune olduğu belirlenmiştir. Şekilde maksimum tüketilen enerji miktarı ( $1.79 \text{ kW.h/m}^2$ ) N6K0.2E1 numunesine ait olduğu görülmektedir.





Şekil 6.30. farklı karışımlara sahip EİB plaka numuneler için harcanan ısı enerjisi değerleri.

## 6.20. Karışım Optimizasyonu ve Numune Seçimi

Çalışmanın bu kısmında elde edilen tüm sonuçlara göre farklı kriterleri göz önüne alarak en uygun numunenin seçilmesi amaçlanmıştır. Numune seçiminde önemli olan kriterler aşağıda açıklanmıştır.

1. Üretim maliyeti: Üretim maliyeti EİB’de kullanılan tüm malzemeleri ve işçilik maliyetini kapsamaktadır. Farklı malzemeler içeren EİB’lerin üretim maliyeti açısından, üretim ve kullanım süresi boyunca bir kerelik masraf türü olduğundan işletme maliyetine göre katsayısı az olabilir. Optimizasyon esnasında üretim maliyeti katsayısı % 5 olarak kabul edilmiştir.
2. İşletme maliyeti: İşletme maliyeti uygulanan EİB’nin kullanım süresi tüketilen elektriksel enerji maliyetini kapsamaktadır ve uzun süreli bir maliyet türü olduğundan önem arz etmektedir. Optimizasyon sürecinde bu kriterin katsayısı % 10 olarak hesaba alınmıştır.
3. Özdirenç: EİB’lerde performansı etkileyen en önemli faktör betonun özdirencidir. Sonuçlara göre en düşük özdirenç olan numuneler en iyi performansı göstermiştir. Özdirenç faktörünün katsayısı % 35 olarak alınmıştır.



4. Basınç dayanımı: Bulgulara göre tüm numunelerin basınç dayanımları 40 MPa'nın üzerinde test edildiğine göre optimizasyon işleminde bu faktörün etkisi az görülmektedir. Hesaplarda basınç dayanımının katsayısı % 10 uygulanmıştır.

5. Isınma süresi: EİB'lerin uygulamasından amaç kısa sürede betonun ısınmasıdır. Dolayısıyla önemli bir faktör olduğundan katsayısı % 25 kabul edilmiştir.

6. Betonun işlenebilirliği: Karışım esnasında betonun işlenebilirliği ile ilgili olan zorunluklar hem betonun dayanımını hem de boşluk oluşarak öz direncini etkileyebilir. Bu faktörün katsayısı % 10 olarak hesaba alınmıştır.

7. Yerlilik: EİB'lerde amacın önemli olması nedeniyle kullanılan malzemelerin nerden temin edildiği tartışılmaz. Ancak çalışmada atık ürünlerin de yer alması nedeniyle bu kriterin de optimizasyon hesabında katkıda bulunması uygun görülmüştür. Yerlilik katsayısı optimizasyon analizinde % 2 olarak alınmıştır.

8. Süreklilik: Kullanılan malzemelerin gerek yerli gerekse yurtdışından ithal şeklinde sürekli olarak bulunabilirliği önemli bir faktörlerdendir. Numune seçimindeki hesaplarda süreklilik katsayısı % 3 olarak alınmıştır.

Tablo 6.3.'de optimizasyon için kullanılan ham değerler verilmiştir. Üretim maliyeti, işletme maliyeti, öz direnç, basınç dayanımı ve ısınma süresi kriterlerin değerleri elde edilen sonuçlardan alınmıştır. Betonun işlenebilirliği kriteri için farklı karışımlara göre 2 ile 7.5 arasında bir değer belirlenmiştir. Yerlilik ve süreklilik kriterleri için farklı karışımlara göre 10'un altında bir değer kabul edilmiştir.

Tablo 6.3.'de tüm numunelerin üretim maliyeti, işletme maliyeti, öz direnç, basınç dayanımı ve ısınma süresi değerlerini birinci numunenin değerlerine bölerek Tablo 6.4.'te özetlenen değerler elde edilmiştir. Örnek olarak, tüm numunelerin üretim maliyetini 149.9'a yani birinci numunenin üretim maliyetine bölerek bu kriter için ilgili değerler elde edilmiştir. Tablo 6.4.'teki değerleri yukarıdaki 8 maddede verilen önem katsayıları ile çarparak Tablo 6.5.'deki nihai değerler ortaya çıkmıştır.

Tablo 6.3. Optimizasyon için kullanılan ham değerler.

No	Üretim maliyeti	İşletme maliyeti	Özdirenç	Basınç dayanımı	Isınma süresi	Betonun işlenebilirliği	Yerlilik	Süreklilik
1	149.9	1.22	4444	45.49	5.5	7.5	5	10
2	275.3	0.91	357	47.82	2.5	5	2.5	10
3	291.7	1.12	371	62.01	3.2	3	2.5	10
4	86.38	1.14	2890	57.87	3.4	6	10	5
5	136.5	1.47	552	41.82	4	4	8	5
6	167.3	1.06	270	39.52	2.2	2	8	3.5

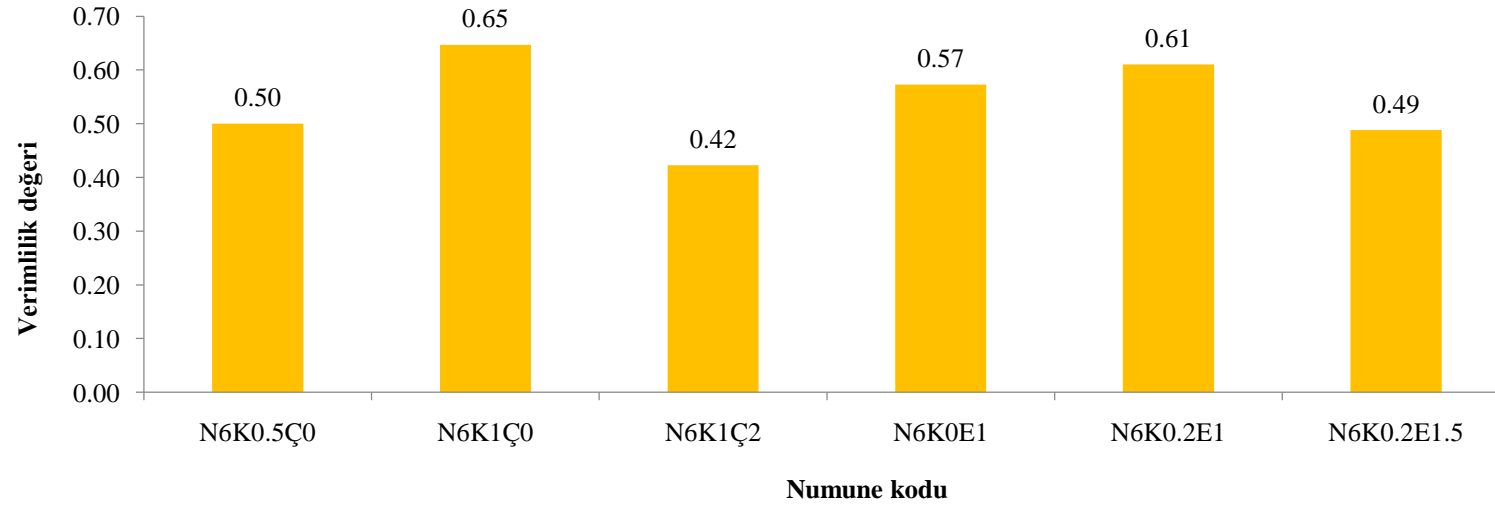
Tablo 6.4. kriter değerlerini birinci numune sonuçlarına bölerek elde edilen değerler.

No	Üretim maliyeti	İşletme maliyeti	Özdirenç	Basınç dayanımı	Isınma süresi	Betonun işlenebilirliği	Yerlilik	Süreklilik
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	7.5	5	10
2	1.84	0.75	0.08	1.05	0.45	5	2.5	10
3	1.95	0.92	0.08	1.36	0.58	3	2.5	10
4	0.58	0.93	0.65	1.27	0.62	6	10	5
5	0.91	1.20	0.12	0.92	0.73	6	8	5
6	1.12	0.87	0.06	0.87	0.40	4	8	3.5

Yukarıda açıklanan kriterlere göre Tablo 6.5.'de farklı numuneler için optimizasyon analizi yapılmıştır ve her numune için bir verimlilik değeri hesaplanmıştır. Verimlilik değeri her numune için tüm kriter değerlerini toplayarak elde edilmiştir. Tablodaki eksi ve artı işaretleri kriterlerin numune için sırasıyla dezavantaj ve avantaj olması ile ilgilidir. Maksimum verimlilik değerinin N6K1Ç0 numunesine ait olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.31.'de de verimlilik değerlerini karşılaştırarak numuneler arasındaki sıralamalar incelenebilir.

Tablo 6.5. Farklı kriterlere göre numune seçimi.

No	Numune kodu	Üretim maliyeti	İşletme maliyeti	Özdirenç	Basınç dayanımı	Isınma süresi	Betonun işlenebilirliği	Yerlilik	Süreklilik	Verimlilik değeri
1	N6K0.5Ç0	-0.05	-0.10	-0.35	0.10	-0.25	0.75	0.10	0.30	0.50
2	N6K1Ç0	-0.09	-0.07	-0.03	0.11	-0.11	0.50	0.05	0.30	0.65
3	N6K1Ç2	-0.10	-0.09	-0.03	0.14	-0.15	0.30	0.05	0.30	0.42
4	N6K0E1	-0.03	-0.09	-0.23	0.13	-0.15	0.60	0.20	0.15	0.57
5	N6K0.2E1	-0.05	-0.12	-0.04	0.09	-0.18	0.60	0.16	0.15	0.61
6	N6K0.2E1.5	-0.06	-0.09	-0.02	0.09	-0.10	0.40	0.16	0.11	0.49



Şekil 6.31. Farklı numuneler için hesaplanan verimlilik değerleri.

## **BÖLÜM 7. TARTIŞMA VE SONUÇ**

Bu çalışmada farklı miktarlarda NKS, KF, ÇF ve ATE 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, ÇF ve ATE içeren numunelerin hem basınç ve hem eğilme dayanımları artmıştır. Bütün KF katkılı iletken beton numunelerin elektriksel dirençleri kontrol numuneye kıyasla azalmıştır ve KF-ATE 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 öz direnç değerleri 2 ile 7 kat arasında azalmıştır. Sonuçlara göre fiberler arasında birinci sırada KF ve ikinci sırada ATE betonun elektriksel direncini etkileyen en önemli malzemelerdir. KF, ÇF ve ATE, üretilen iletken beton numunelerin çarpmaya karşı absorbe edilen nihai enerji miktarının artmasında da olumlu etkiler sergilemişlerdir. Elektrotermal sonuçlarına göre kullanılan atık malzemeler içeren numunelerin 20 oC sıcaklığının artırılması için 300 W/m<sup>2</sup> gücün yeterli olduğu anlaşılmıştır. Aşağıda mekaniksel, elektriksel, çarpma ve elektrotermal deney sonuçlarıyla ilgili açıklamalar madde madde sunulmuştur:

### **7.1. 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:

Buradaki 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 direnci  $1629 \Omega \cdot \text{cm}$  ölçülürken bu karışıma % 6 NKS eklendiğinde direnç değeri  $222 \Omega \cdot \text{cm}$  olarak ölçülmüştür.

ÇF miktarı betonda maksimum kullanılabilen oranını geçmemesi nedeniyle tek oranda % 2 kullanılmıştır. Bu oran bir iletken betonda iletkenlik artırıcı olarak ÇF için düşük bir oran olarak kabul edilmektedir. Genellikle iletken betonlarda iletkenlik artırıcı olarak % 15-20 arasında ÇF kullanılır [22]. Dolayısıyla bu çalışmada % 2 ÇF içeren karışımlardan önemli bir direnç azalması göstermemiş 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 direnç  $5.2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$  olarak ölçülmüştür. Bu değerler elektriksel iletken betonlarda beklenen değerden oldukça fazla olduğu için, iletkenlik artırma amacıyla düşük miktarlarda ÇF kullanılması önerilmemektedir.

Hem KF'li hem KF'siz ATE içeren silindir numunelerin İYÖD değerleri  $1700 \Omega \cdot \text{cm}$ 'nin altında ölçülmüş ve minimum öz direnç değeri  $129.49 \Omega \cdot \text{cm}$  olarak N6K0.2E1.5 numuneye ait olduğu belirlenmiştir. ATE içeren silindir numunelerin WYÖD değerleri de 441 ile  $6352 \Omega \cdot \text{cm}$  olarak elde edilmiştir. Bu karışım grubu için WYÖD/ İYÖD oranı yaklaşık 3.5 olarak elde edilmiştir.

İki noktali tek eksenli yöntem ile ölçme yöntemi beton direncini ölçmek için en yaygın yöntemdir [11, 18, 22]. Bu yöntem ile elde edilen değerler literatür çalışmaları ile kıyaslanarak sonuçlar arasındaki benzerlikler tesbit edilmiştir [11, 50]. 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  $\Omega$ .Cm arasında belirtmişlerdir [109]. Ghosh ve ark (2015) diğer bir çalışmalarında farklı malzemeler içeren numunelerin ED değerlerini ölçerek WYÖD/İYÖD oranını 2-5 olarak hesaplamışlardır [60]. Dolayısıyla literatür çalışmalarında iletken beton için elde edilen WYÖD/İYÖD oranı 2-5 olduğuna göre bu çalışmada, farklı karışımlara sahip iletken betonların, bulunan WYÖD/İYÖD değeri ortalama 4 olarak doğrulanabilir. ASTM standartına göre ölçülen direnç değerleri, iki noktalı yöntem ile ölçülen değerlerin 0.37 katı olarak elde edilmiştir. Literatürde ASTM standartına göre ölçülen direnç değerleri ve iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen direnç değeri arasında yapılan kıyaslamalara 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-KF ve NKS-KF-ATE içeren numuneler için elde edilmiştir.

## 7.2. 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 artmış 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 % 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 olmamış, 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 dayanım sonuçları ortaya çıkmıştır. Burada maksimum basınç dayanımının 62.23 MPa olarak N10K1D0Ç2 karışıma ait olduğu anlaşılmıştır.

ATE tek başına kullanıldığı zaman basınç dayanımı üzerinde % 32'ye kadar olumlu etkisi olmuştur, ancak % 0.2 KF'nin eklenmesi ile basınç dayanımında az miktarda olumsuz etkiler görülmüştür.

### 7.3. Eğilme Dayanım Sonuçları

Tüm üretilen iletken betonların eğilme dayanım sonuçları kontrol numunesinin eğilme dayanımına ( $\sim 5$  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 artmış, 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 görülmemiştir. ATE içeren EİB numunelerin eğilme dayanımları kontrol numuneye kıyasla % 54'e kadar artmıştır.

### 7.4. 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 bu grup için % 10 NKS ve % 1 KF içeren numuneye ait olarak 249 J elde edilmiştir.

Ayrıca ATE içeren numunelerde ATE içeriğinin artmasıyla absorbe edilen nihai enerji miktarı artmıştır ve bu grup için maksimum enerji miktarı N6K0.2E1 numunesi için elde edilmiştir.

### **7.5. 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. Ancak bu özellikler arasında bir korelasyon oluşturmak için doğrusal eğriler tanımlandığında iki değişken arasındaki verilerin dağınıklığından dolayı doğrusal bir ilişki ortaya çıkmamıştır.

### **7.6. Elektrotermal Sonuçları**

Tüm silindir numunelerin özdirenç değerleri aynı karışımlardan üretilen plaka numunelerin özdirenç değerlerinden daha düşük çıkmıştır. Direnç ölçümü için üretilen küp veya silindir numunelerin direnç değerleri ile plaka şeklinde üretilen numunelerin direnç değerleri arasında farklılık önceki çalışmalarda tesbit edilmiştir [1].

Plaka numunelerin iletkenlik özelliklerine göre yapılan modellerin elektrotermal davranışları ile deney sonuçları arasında uyumluluk tesbit edilmiştir.

N6K1Ç0, N6K0.2E1.5 ve N6K1Ç2 EİB numuneleri için uygulanan 80 V ve N6K0.2E1 için 100 V voltaj değerleri uygun görülmüştür. Bununla birlikte



N6K0.5Ç0, N6K0E1 numunelerin sıcaklık değişmeleri için 220 V voltajın gerekli olduğu belirlenmiştir.

Farklı karışımlardan elde edilen EİB plakaların farklı sıcaklık/h hızıyla ısınabilmeleri için 180-1315 W/m<sup>2</sup> gücün gerekli olduğu anlaşılmıştır. Tuan [61] ve Hashim'in [1] çalışmasında soğuk havalarda kar ve buzun erimesi için 300-550 W/m<sup>2</sup> gücün yeterli olduğu belirtilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada da tüketilen 300-550 W/m<sup>2</sup> arasında güç değerlerine göre voltaj seçimi yapılmıştır.

Bu çalışmada sekiz farklı önemli kritere göre optimizasyon analizi yapılmıştır. Kriterler, üretim maliyeti, işletme maliyeti, özdirenç, basınç dayanımı, ısınma süresi, betonun işlenebilirliği, yerlilik ve süreklilik olarak tanımlanmıştır. Optimizasyon sonucuna göre N6K1Ç0 EİB plaka numunesinin diğer numunelere göre uygun olduğu görülmüştür.

## 7.7. 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. 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.

ATE içeren karışımların en olumsuz yönü fiberlerin karışım içerisinde topaklanması ve homojenliğin engellenmesidir. Daha kısa boyutlarda ATE kullanarak karışım içerisinde topaklanma problemi incelenebilir.

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.

Genellikle uygulamada EİB'ler 10 cm kalınlıklarında uygulanmaktadır. Ayrıca bu çalışmadaki silindir ve 5 cm kalınlığındaki plaka numunelerin direnç değerleri arasında önemli miktarda fark görüldüğü için aynı karışım ve deney şartlarında 10 cm kalınlığında plaka numunelerin deneysel olarak incelenmesi önerilir.

Plaka numunelerin deneysel ve model sonuçları arasındaki olan uyumluluk, plaka numunelerin elektriksel özelliklerini kullanarak, daha geniş alanlar için Abaqus programı ile 3D simülasyonlar geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Abdulla, H., Design, construction, and performance of heated concrete pavements system. 2018.
- [2] Xi, Y. and P.J. Olsgard, Effects of Deicing Agents (magnesium Chloride and Sodium Chloride) on Corrosion of Truck Components. 2000: Colorado Department of Transportation, Research Branch.
- [3] Zenewitz, J.A., Survey of alternatives to the use of chlorides for highway deicing. 1977.
- [4] Joerger, M. and F. Martinez, Electrical Heating of I-84 in Land Canyon, Oregon. 2006, Report No. FHWA-OR-RD06-17. Oregon Department of Transportation, Salem, OR.
- [5] Gopalakrishnan, K., H. Ceylan, S. Kim, S. Yang, and H. Abdulla, Electrically conductive mortar characterization for self-heating airfield concrete pavement mix design. International Journal of Pavement Research and Technology, 2015. 8(5): p. 315-324.
- [6] Barnard, E., Electrically Conductive Cement and Concrete. US3166518 A, 1965.
- [7] ÇAVAS, M., Nano Yapılı Metal Oks T Yarı Letkenler Kullanılarak Foto D Yotların Üret Lmes in Fırat Üniversitesi, Metalurji Egitimi Anabilim Dalı. 2011.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

- [12] Wu, J., J. Liu, and F. Yang, Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing. *Construction and Building Materials*, 2015. 75: p. 129-135.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Whittington, H., J. McCarter, and M. Forde, The conduction of electricity through concrete. *Magazine of concrete research*, 1981. 33(114): p. 48-60.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Tuan, C.Y., *Conductive concrete for bridge deck deicing and anti-icing*. 2004, Department of Civil Engineering, University of Nebraska-Lincoln.
- [21] 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.
- [22] Yehia, S. and C.Y. Tuan, Conductive concrete overlay for bridge deck deicing. *Materials Journal*, 1999. 96(3): p. 382-390.
- [23] 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.

- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Bantia, 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Wen, S. and D. Chung, Strain-sensing characteristics of carbon fiber-reinforced cement. *ACI materials journal*, 2005. 102(4): p. 244.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.

- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Wang, S., S. Wen, and D. Chung, Resistance heating using electrically conductive cements. *Advances in cement research*, 2004. 16(4): p. 161-166.
- [40] 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.
- [41] Tuan, C.Y. and S. Yehia, Evaluation of electrically conductive concrete containing carbon products for deicing. *Materials Journal*, 2004. 101(4): p. 287-293.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] Whiting, D.A. and M.A. Nagi, Electrical resistivity of concrete-a literature review. *R&D Serial*, 2003. 2457.
- [47] 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.
- [48] Princigallo, 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.

- [49] Tumi, P., Electrical conductivity of Portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 1996. 26(4): p. 529-534.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] Layssi, H., P. Ghods, A.R. Alizadeh, and M. Salehi, Electrical resistivity of concrete. *Concrete International*, 2015. 37(5): p. 41-46.
- [58] Tian, X. and H. Hu, Test and study on electrical property of conductive concrete. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2012. 5: p. 83-87.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] Tuan, C.Y., Implementation of conductive concrete for deicing (Roca Bridge). 2008.

- [62] Sadati, S.S., K. Cetin, and H. Ceylan. Numerical modeling of electrically conductive pavement systems. in Congress on Technical Advancement. 2017.
- [63] 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.
- [64] Lavagna, L., Musso, S., Ferro, G., & Pavese, M. Cement-based composites containing functionalized carbon fibers. *Cement and Concrete Composites*, 2018. 88, 165-171.
- [65] Lund, J.W., Pavement snow melting. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 2000. 21(2): p. 12-19.
- [66] Ceylan, H., K. Gopalakrishnan, S. Kim, and W. Cord, Heated Transportation Infrastructure Systems: Existing and Emerging Technologies. 2014.
- [67] Heymsfield, E., A.B. Osweiler, R.P. Selvam, and M. Kuss, Feasibility of anti-icing airfield pavements using conductive concrete and renewable solar energy. 2013.
- [68] Abdualla, H., H. Ceylan, S. Kim, K. Gopalakrishnan, P.C. Taylor, and Y. Turkan, System requirements for electrically conductive concrete heated pavements. *Transportation Research Record*, 2016. 2569(1): p. 70-79.
- [69] Barnard, E., Electrically Conductive Cement and Concrete. US3166518 A, 1965. 576.
- [70] Freeman, A. and W. Hymers, Electrically conducting concrete. 1976, Google Patents.
- [71] Xie, P., P. Gu, and J.J. Beaudoin, Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres. *Journal of Materials Science*, 1996. 31(15): p. 4093-4097.
- [72] Ramme, B.W., Electrically conductive concrete and controlled low strength materials having spent carbon sorbent. 2009, Google Patents.
- [73] Norouzi, M., Atık Lastiklerin Pirolyzi İle Üretilen Nano Karbon Karasının Harçta Kullanımı Ve Harcın Özelliklerine Etkileri (Y.Lisans Tezi) Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum. 2016.
- [74] 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.
- [75] Madhavi, T.C. and S. Annamalai, Electrical Conductivity of Concrete. *ARNP J. Eng. Appl. Sci*, 2006. 11(9): p. 5979-5982.



- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] Salarifar, B., Karboksi metil selüloz üretimi ve üretimdeki gelişmeler. (Y. Lisans), Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara. 1992.
- [79] Dehghanpour, H., Synthesis and characterization of polypyrrole and different carbon structures based nanocomposites for supercapacitors, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk üniversitesi, Erzurum. 2015.
- [80] ŞAT, F., Yarıiletkenlerde iletkenlik ölçümleri. 2007.
- [81] 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 İzzet Baysal University. 2008.
- [82] Zerilli, F., Conductivity and resistance. Physnet, 2001: p. 1-20.
- [83] 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.
- [84] 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.
- [85] 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.
- [86] 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.
- [87] Monfore, G., The electrical resistivity of concrete. 1968.
- [88] 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.

- [89] 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.
- [90] 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.
- [91] 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.
- [92] 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.
- [93] 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.
- [94] 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.
- [95] 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.
- [96] 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.
- [97] 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.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] Dehghanpour, H., K. Yilmaz, and M. Ipek, Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes. *Construction and Building Materials*, 2019. 221: p. 109-121.

- [101] Ipek, M., Analysis of Usability of Waste Erosion Wires as Fiber in Reactive Powder Concrete. *JOURNAL OF POLYTECHNIC-POLITEKNIK DERGISI*, 2017. 20(2): p. 451-457.
- [102] 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.
- [103] 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.
- [104] 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.
- [105] Nili, M. and V. Afroughsabet, 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.
- [106] Cengel, Y.A., S. Klein, and W. Beckman, *Heat transfer: a practical approach*. Vol. 141. 1998: McGraw-Hill New York.
- [107] Tungjitkusolmun, S., E. Woo, H. Cao, J. Tsai, V. Vorperian, and J. Webster, Thermal—electrical finite element modelling for radio frequency cardiac ablation: effects of changes in myocardial properties. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 2000. 38(5): p. 562-568.
- [108] Systèmes, D., *Abaqus 6.10: Analysis user's manual*. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2010.
- [109] Ghosh, P. and Q. Tran, Influence of parameters on surface resistivity of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2015. 62: p. 134-145.
- [110] Dehghanpour, H. and K. Yılmaz, Mechanical And Impact Behavior On Recycled Steel Fiber Reinforced Cementitious Mortars. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2018. 39(3): p. 67-84.

## EKLER

### EK A: Denev 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.



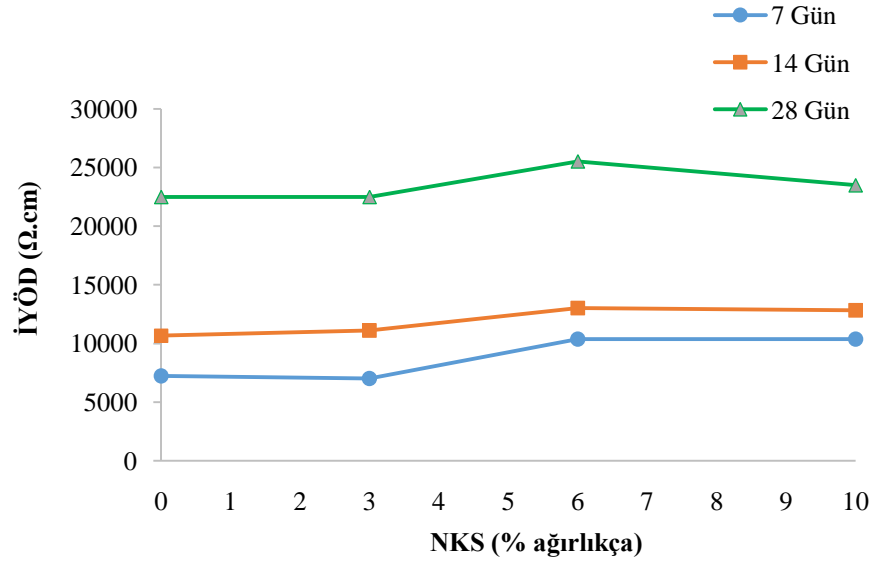


Şekil A.5. Çarpma deney sonrası plaka numunesinin arka yüzeyinden görünüş.

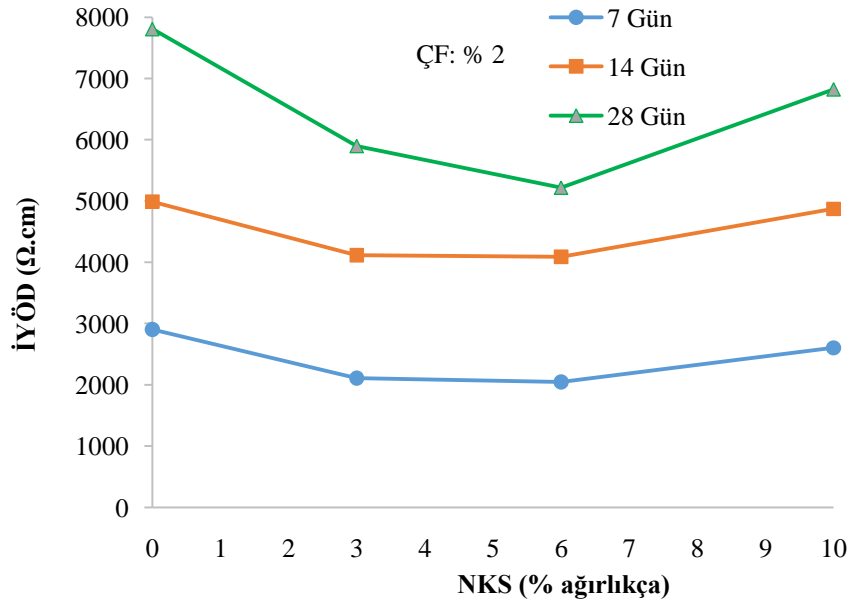


Şekil A.6. Eğilme deney sonrası stoklanan prizmatik numuneler.

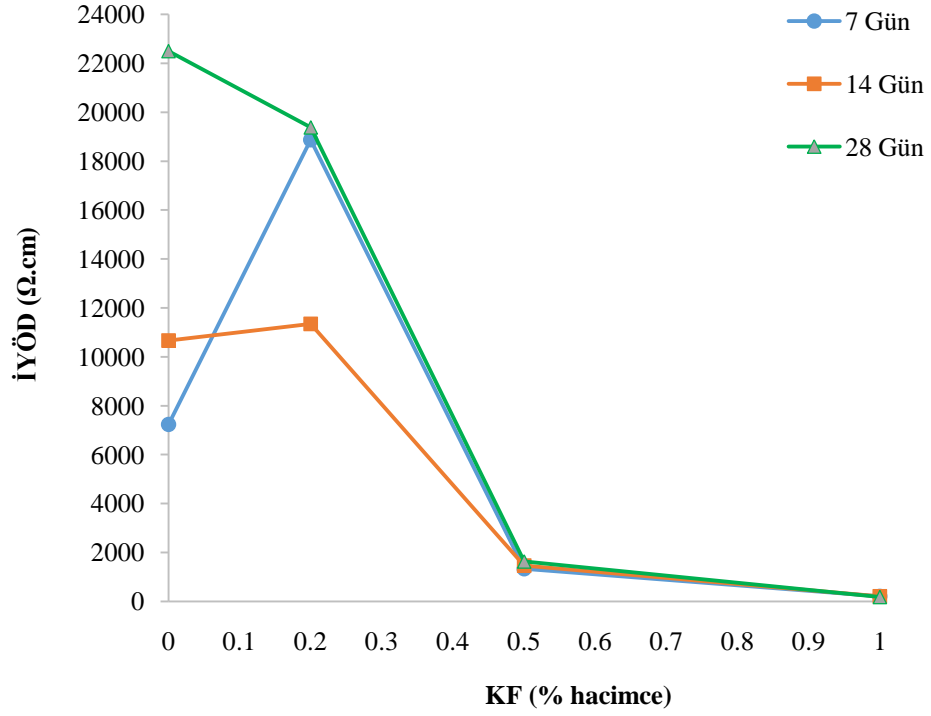
## EK B: Temel Deney Sonuçlarına Ait Ek Grafikler



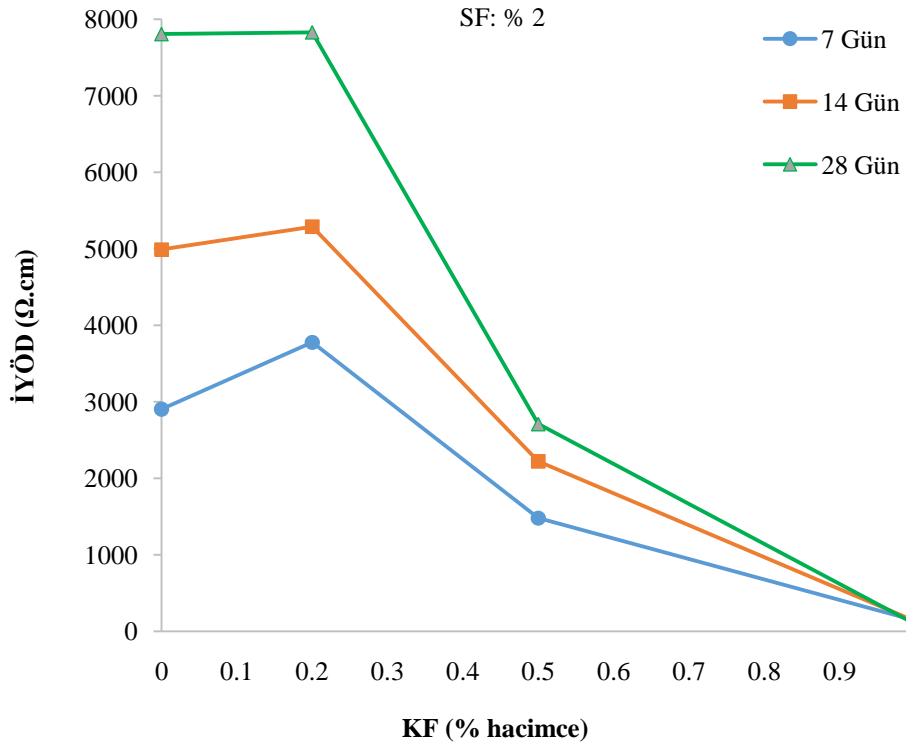
Şekil B.1. Farklı oranlarda NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



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

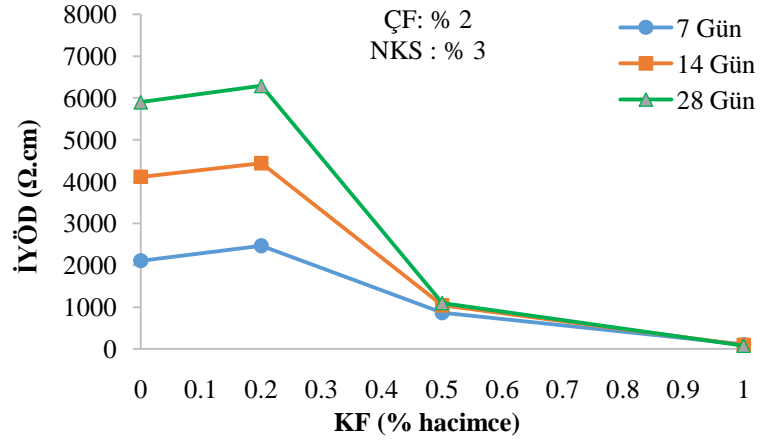


Şekil B.3. Farklı oranlarda KF içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.

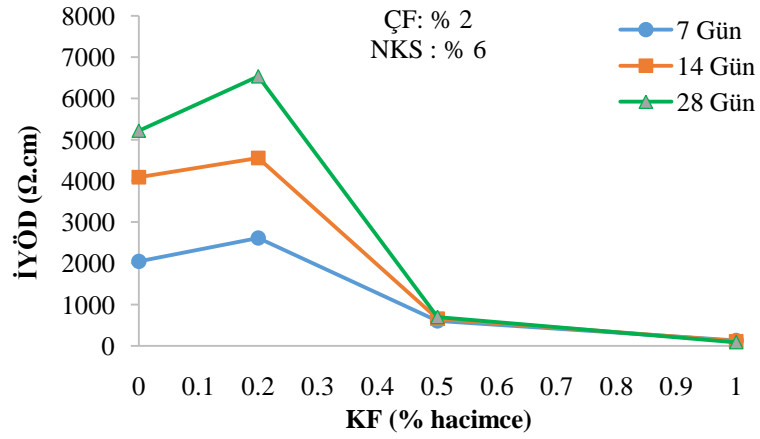


Şekil B.4. Farklı oranlarda KF ve % 2 ÇF içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.

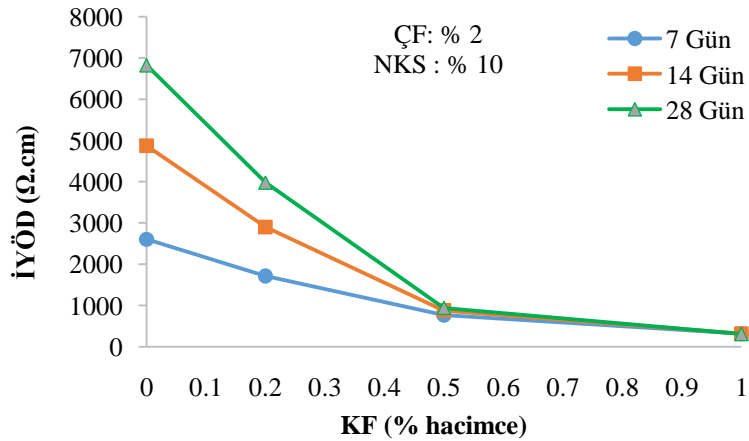




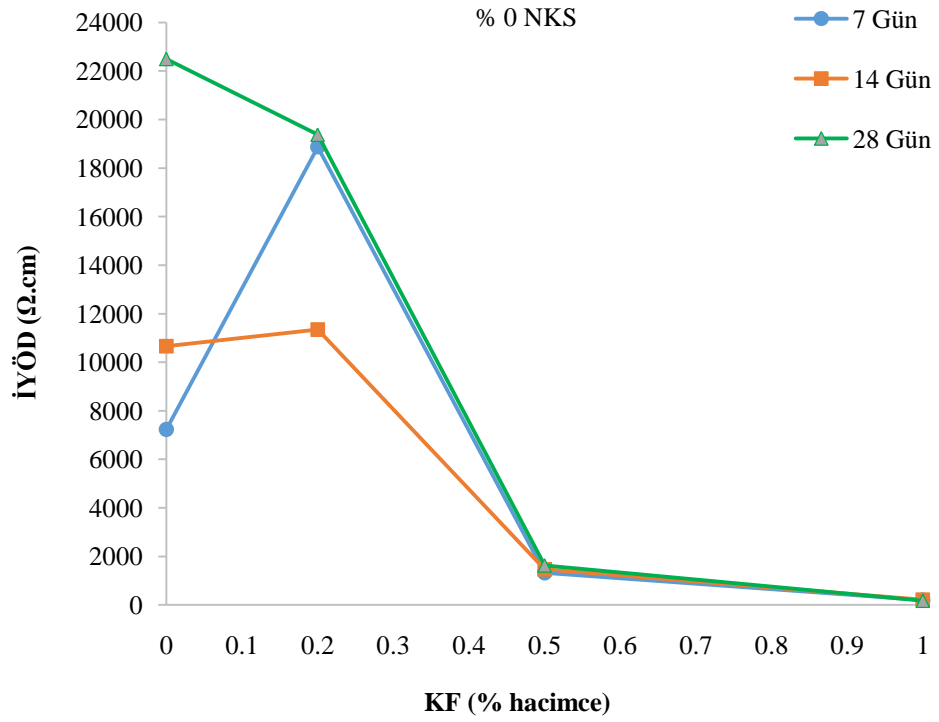
Şekil B.5. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 3 NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



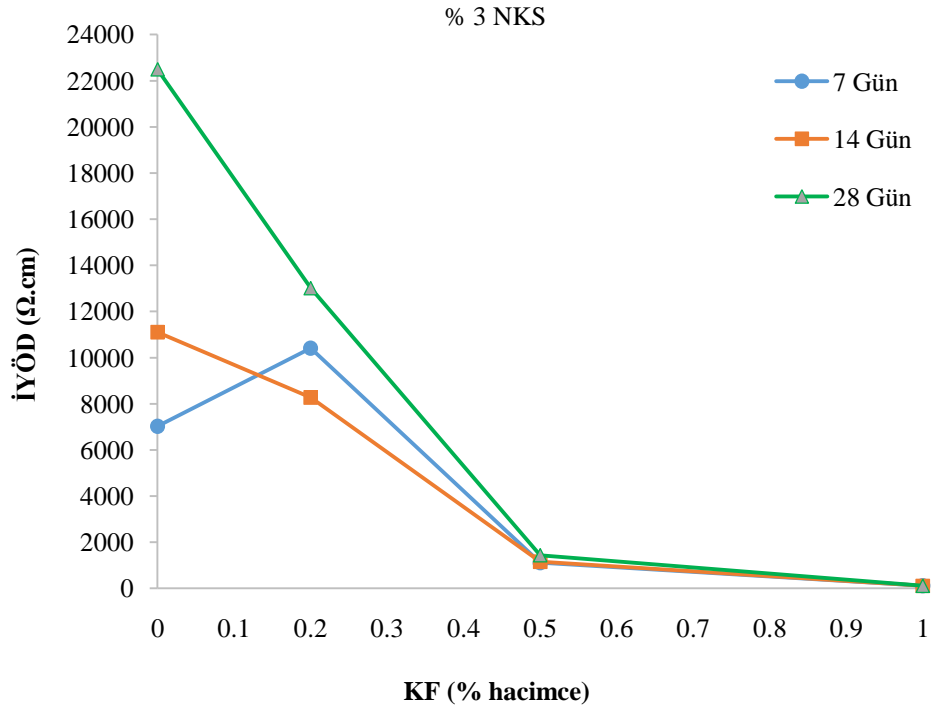
Şekil B.6. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 6 NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



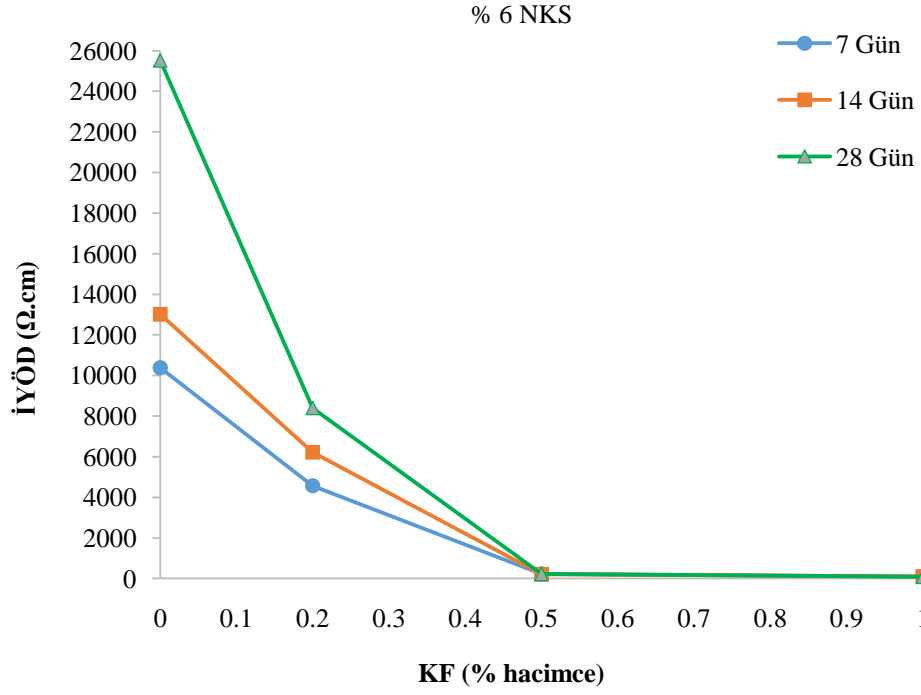
Şekil B.7. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 10 NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



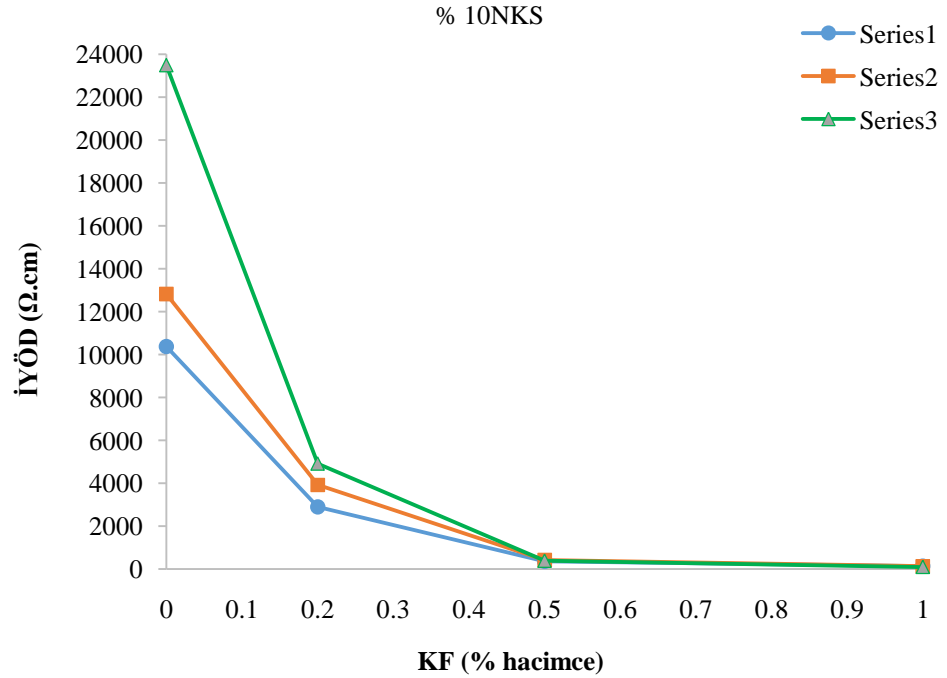
Şekil B.. Farklı oranlarda KF ve % 0 NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



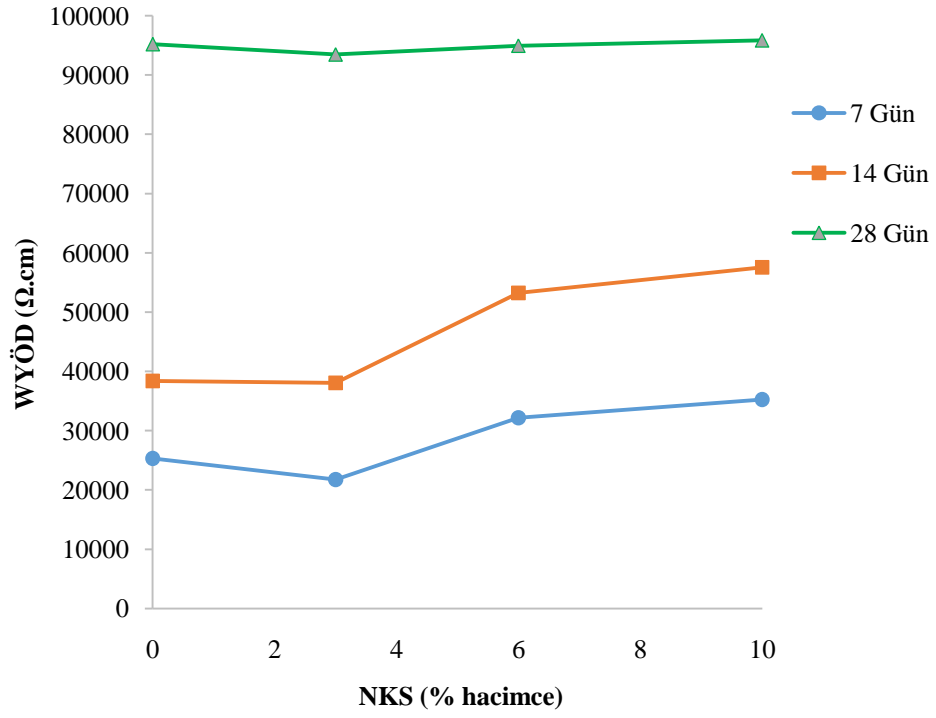
Şekil B.8. Farklı oranlarda KF ve % 3 NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



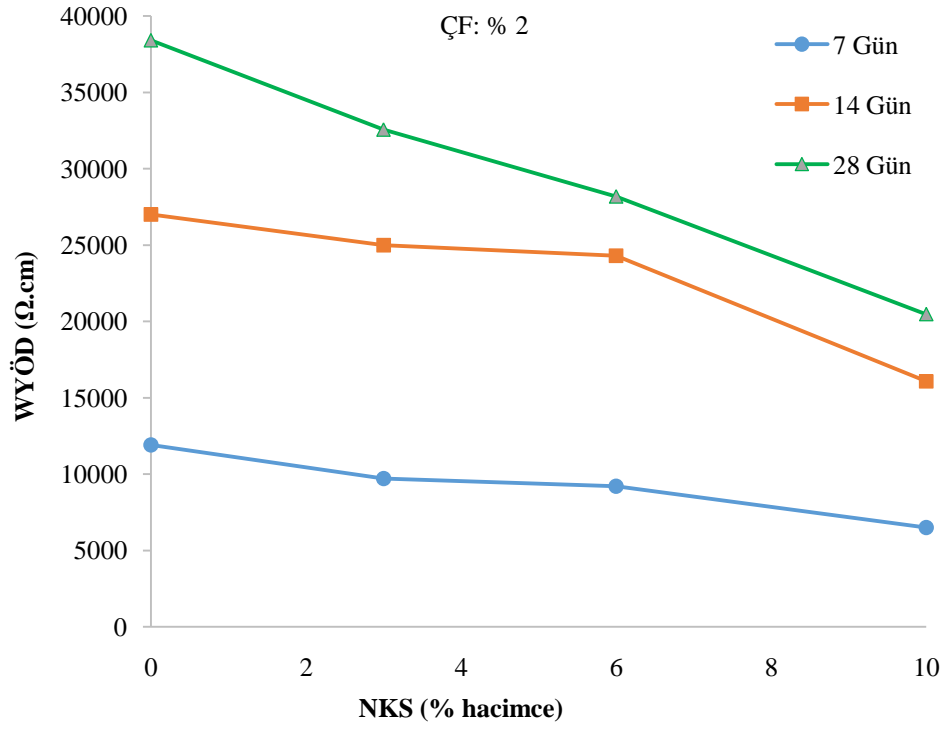
Şekil B.9. Farklı oranlarda KF ve % 6 NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



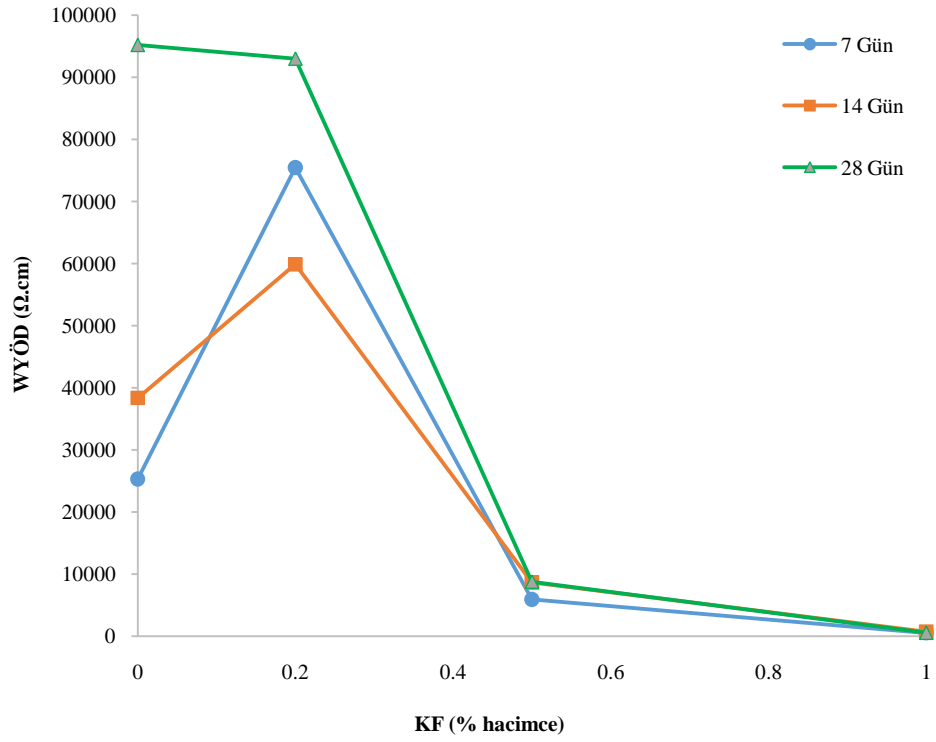
Şekil B.10. Farklı oranlarda KF ve % 10 NKS içeren karışımların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



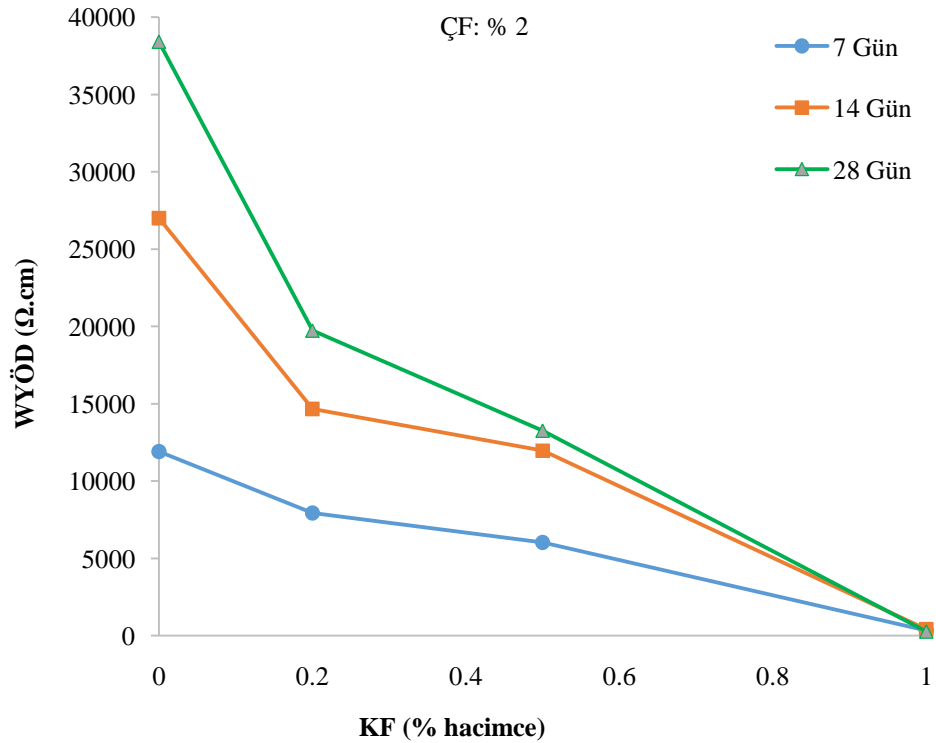
Şekil B.11 Farklı oranlarda NKS içeren karışımların wanner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



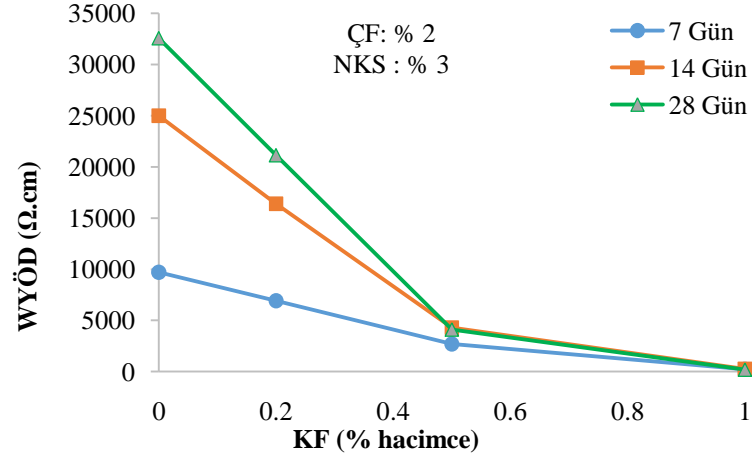
Şekil B.12. Farklı oranlarda NKS ve % 2 ÇF içeren karışımların wanner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri



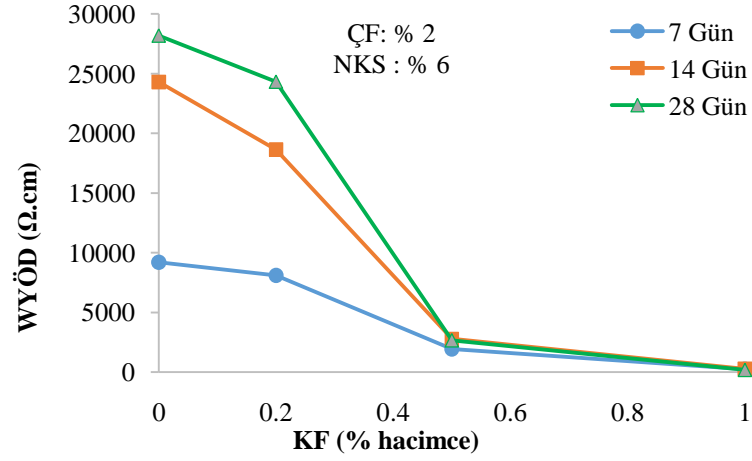
Şekil B.13. Farklı oranlarda KF içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



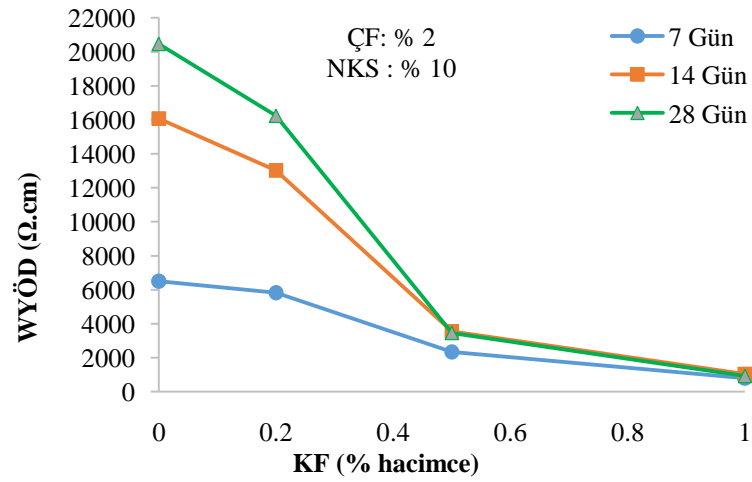
Şekil B.14. Farklı oranlarda KF ve % 2 ÇF içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



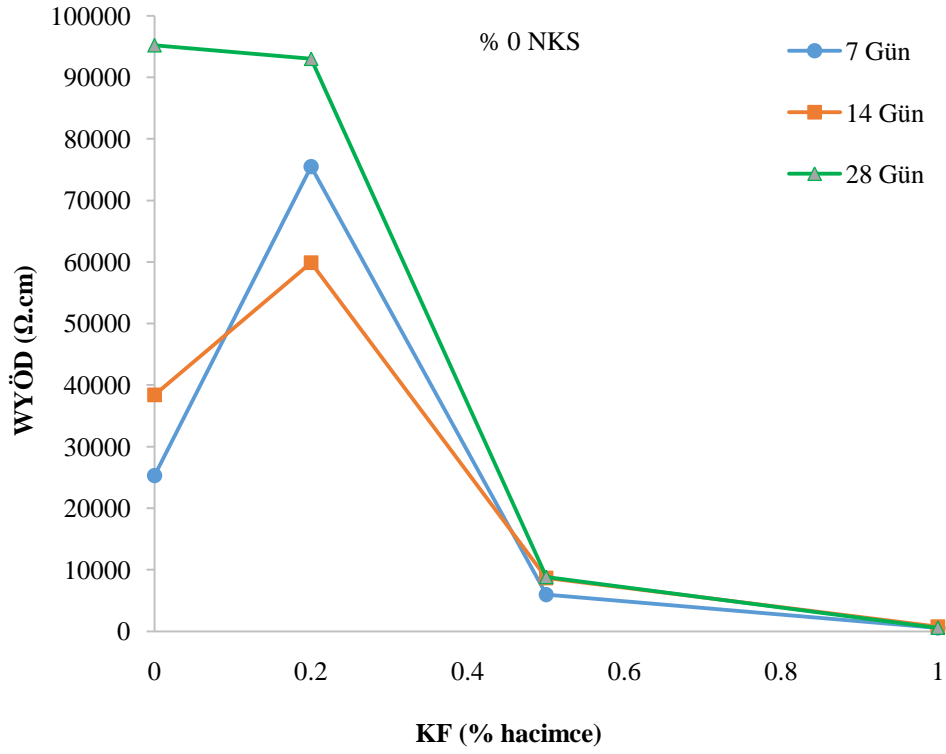
Şekil B.15. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 3 NKS içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



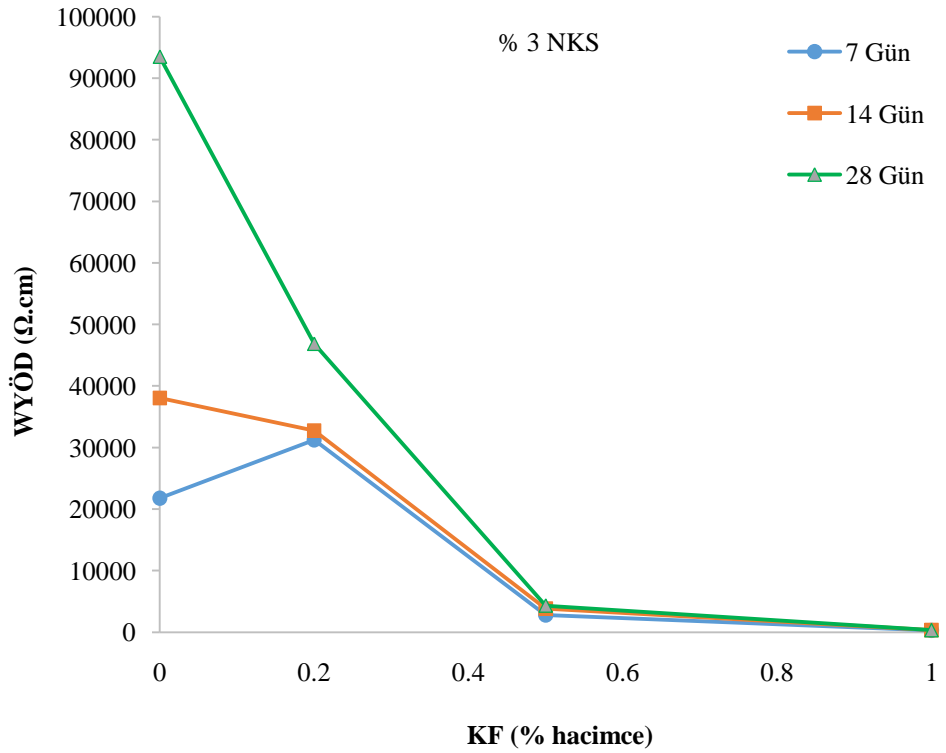
Şekil B.16. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 6 NKS içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



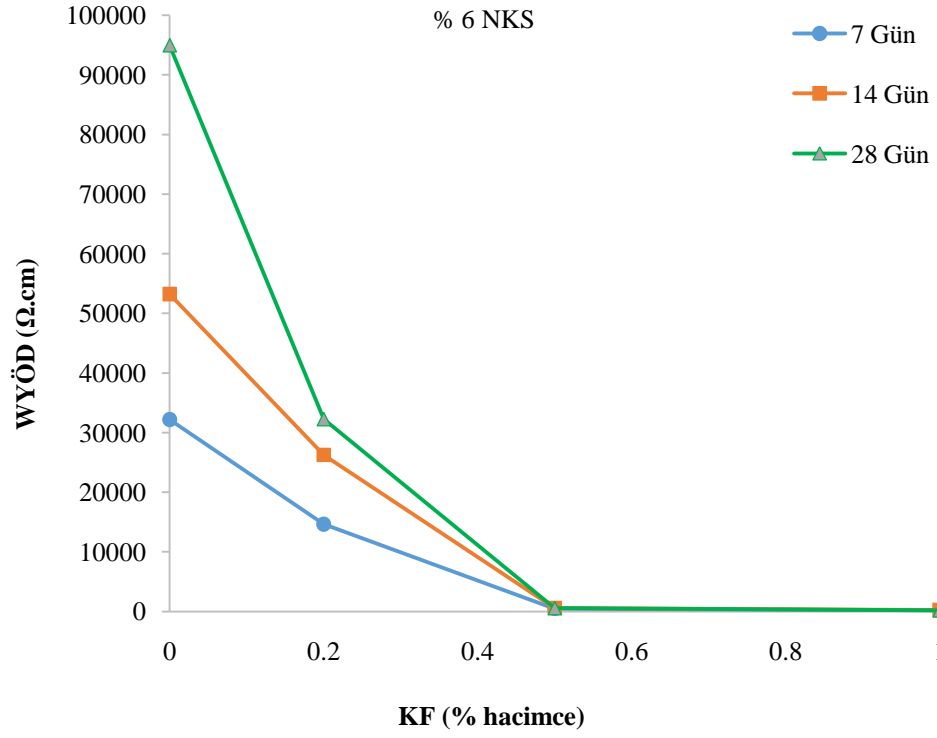
Şekil B.17. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 10 NKS içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



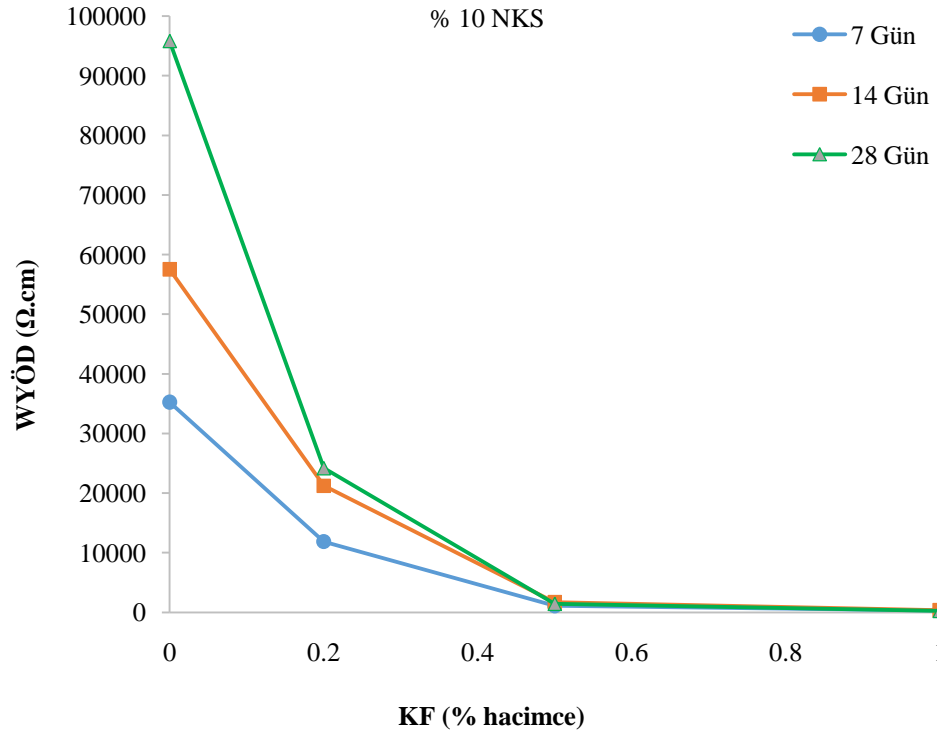
Şekil B.18. Farklı oranlarda KF ve % 0 NKS içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.



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

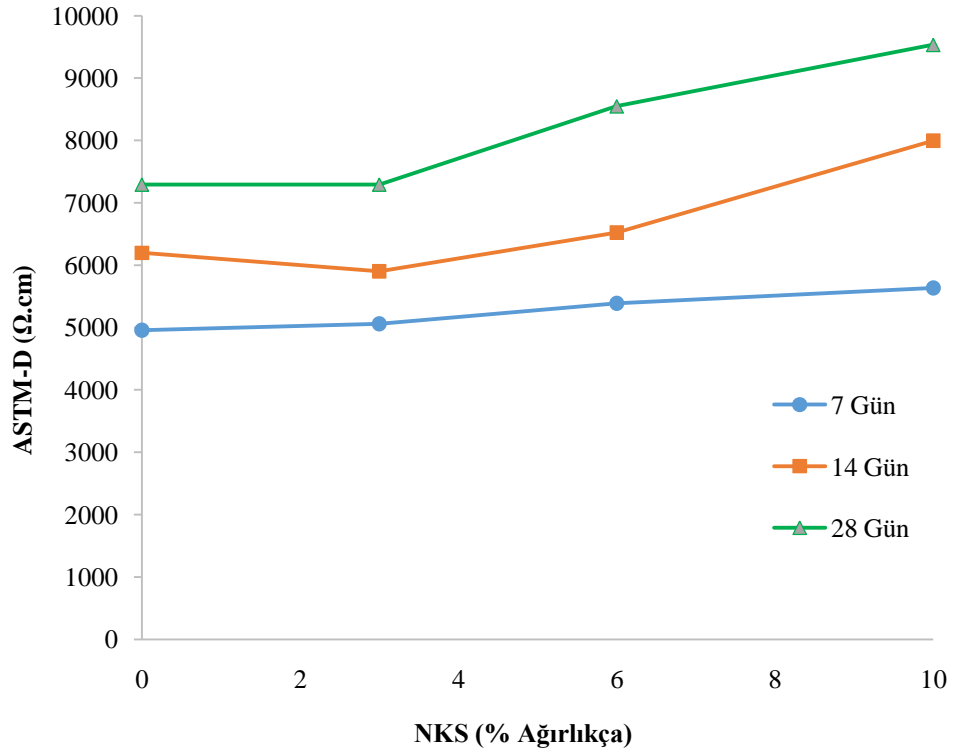


Şekil B.20. Farklı oranlarda KF ve % 6 NKS içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.

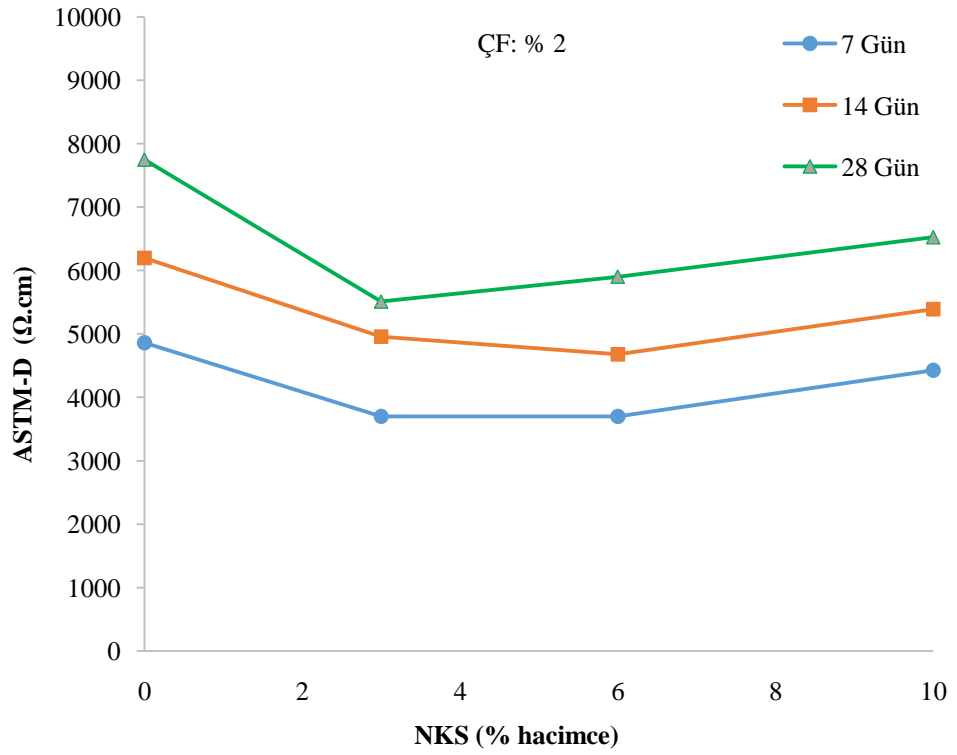


Şekil B.21. Farklı oranlarda KF ve % 10 NKS içeren karışımların Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç değerleri.

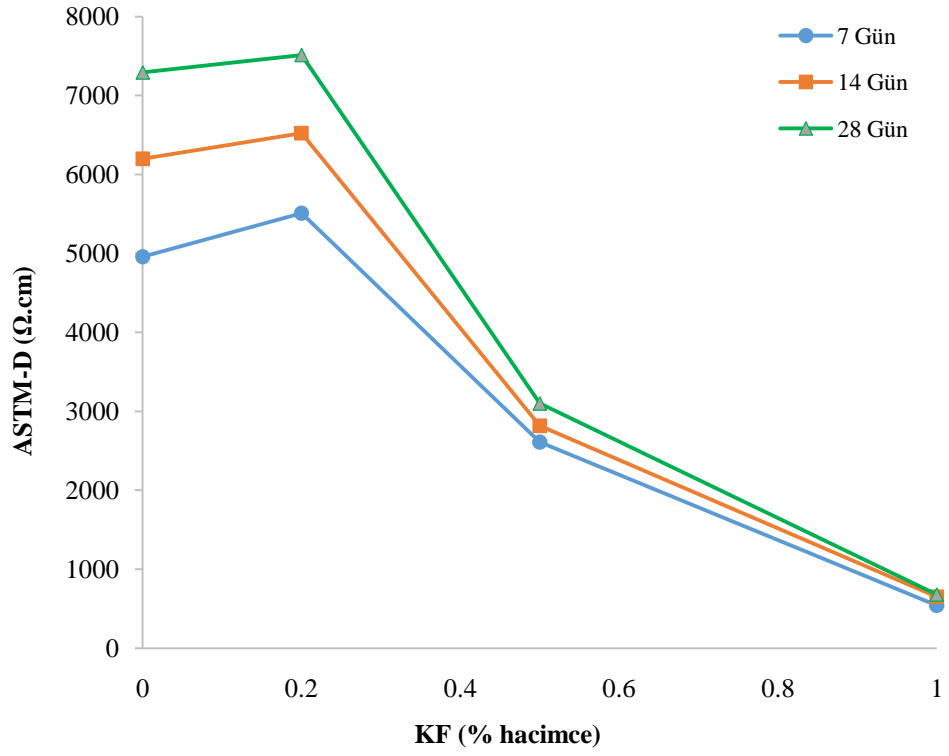




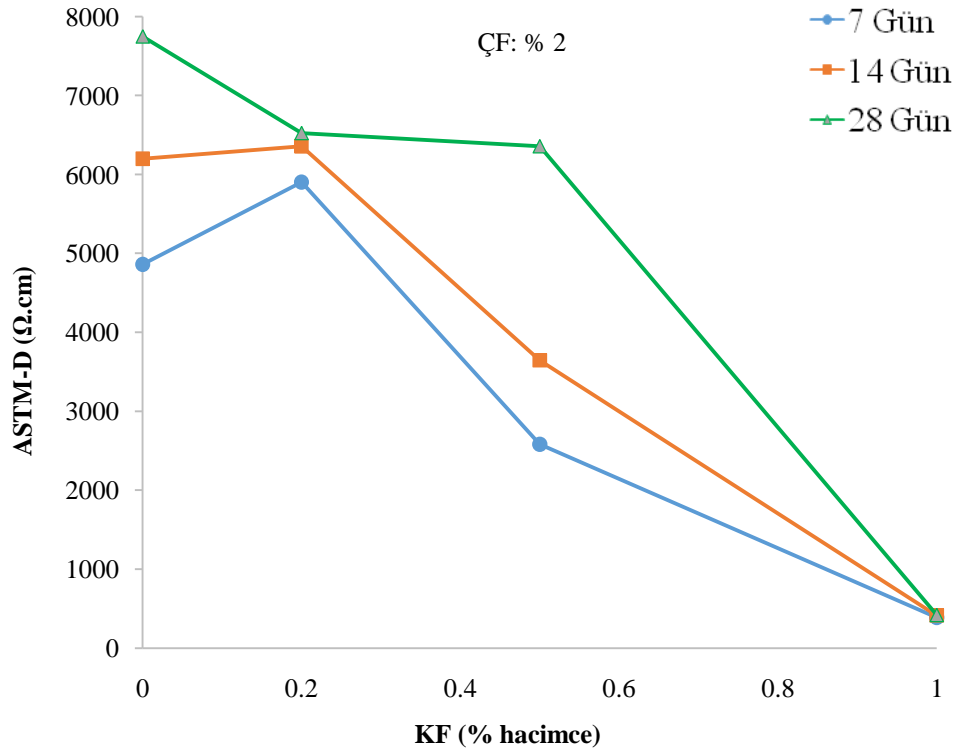
Şekil B.22. Farklı oranlarda NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



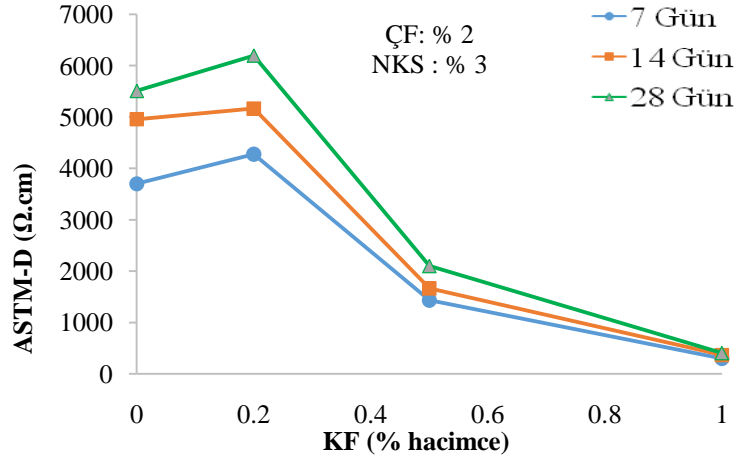
Şekil B.23. Farklı oranlarda NKS v % 2 ÇF içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



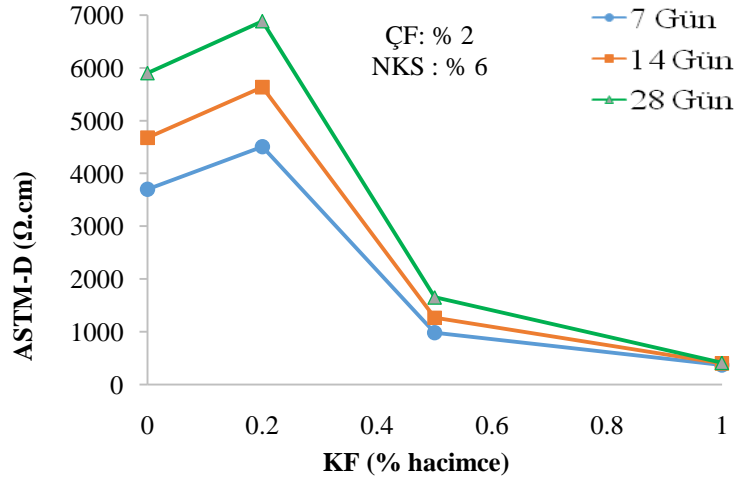
Şekil B.24. Farklı oranlarda KF içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



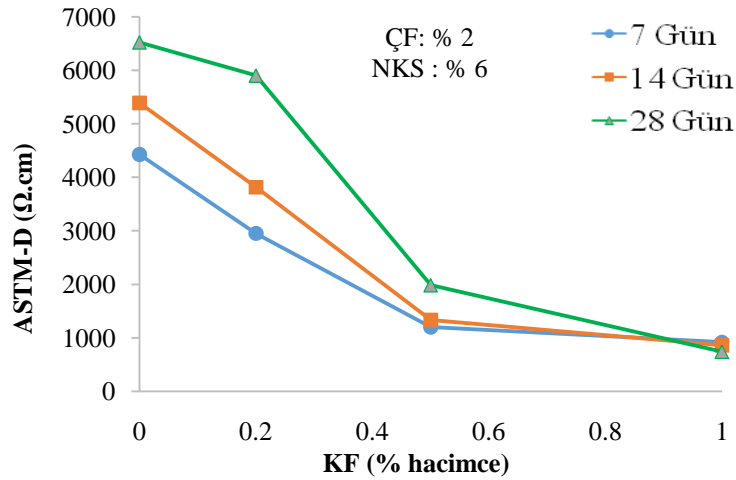
Şekil B.25. Farklı oranlarda KF ve % 2 ÇF içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



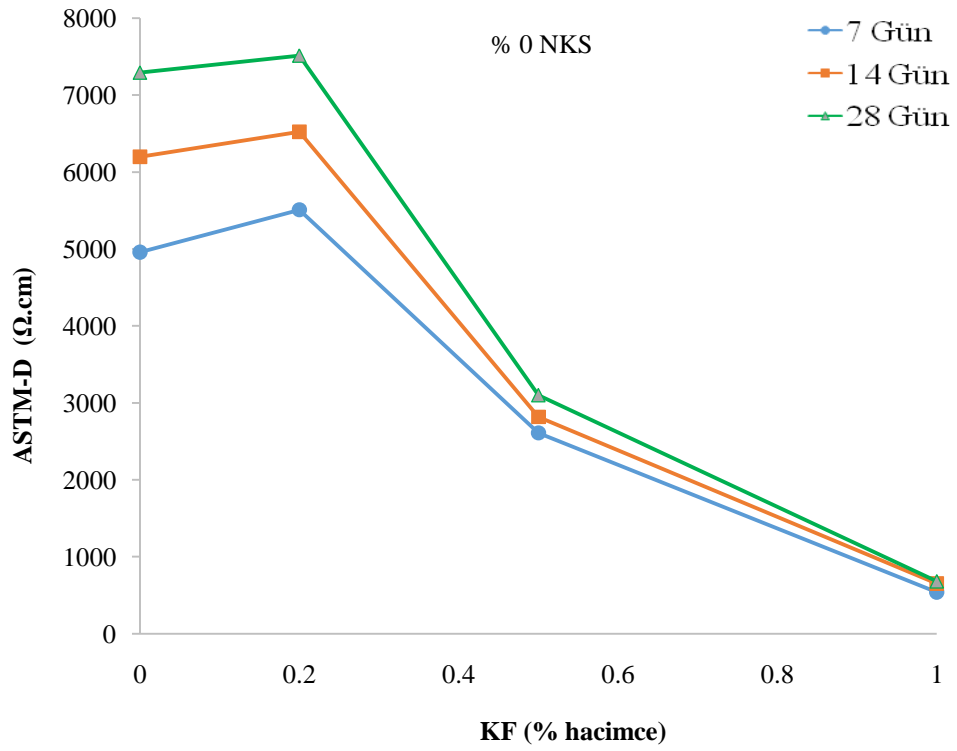
Şekil B.26. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 3 NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



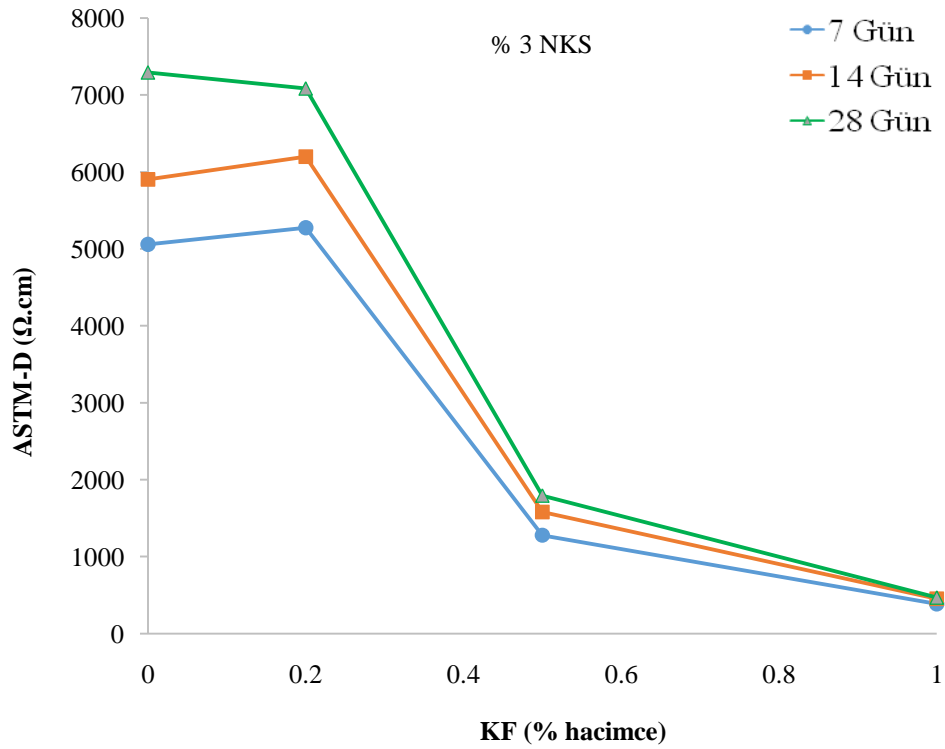
Şekil B.27. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 6 NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



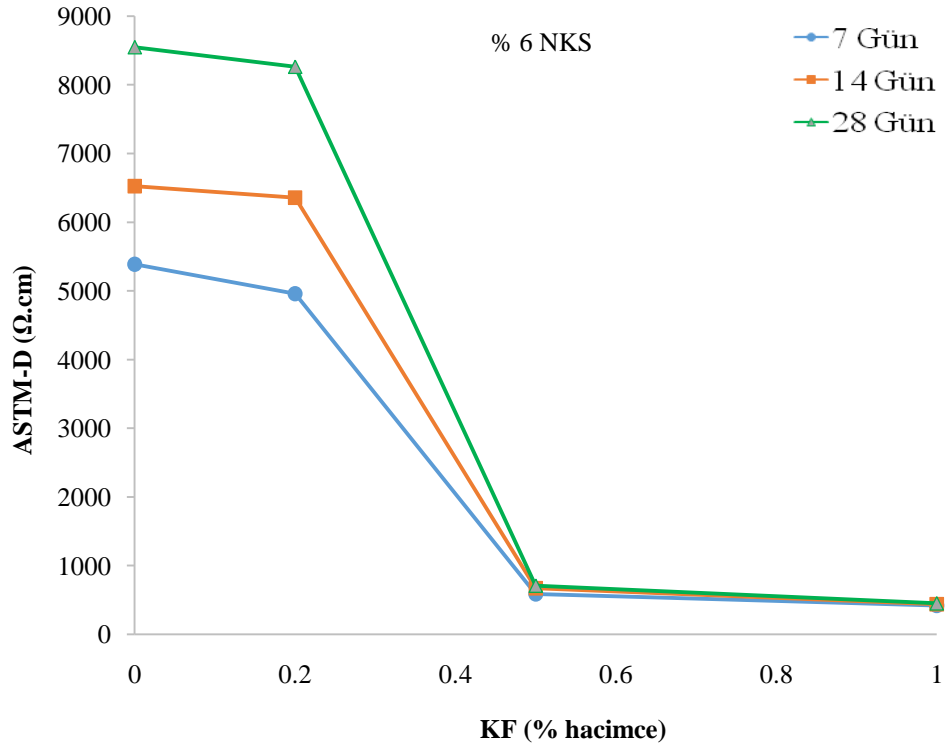
Şekil B.28. Farklı oranlarda KF, % 2 ÇF ve % 10 NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



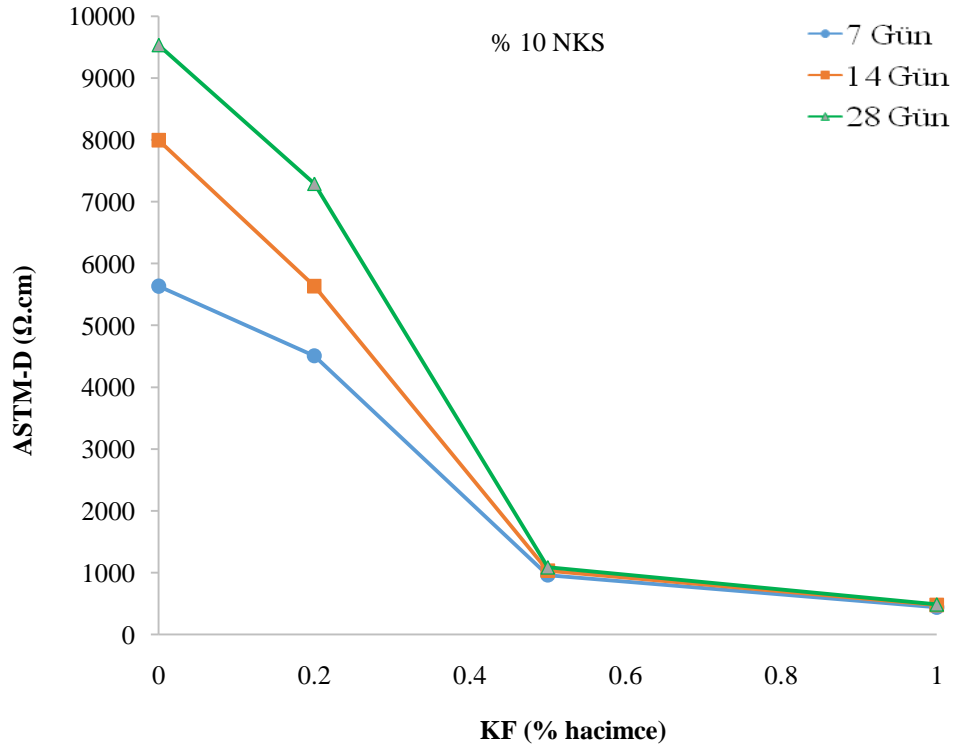
Şekil B.29. Farklı oranlarda KF ve % 0 NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.



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

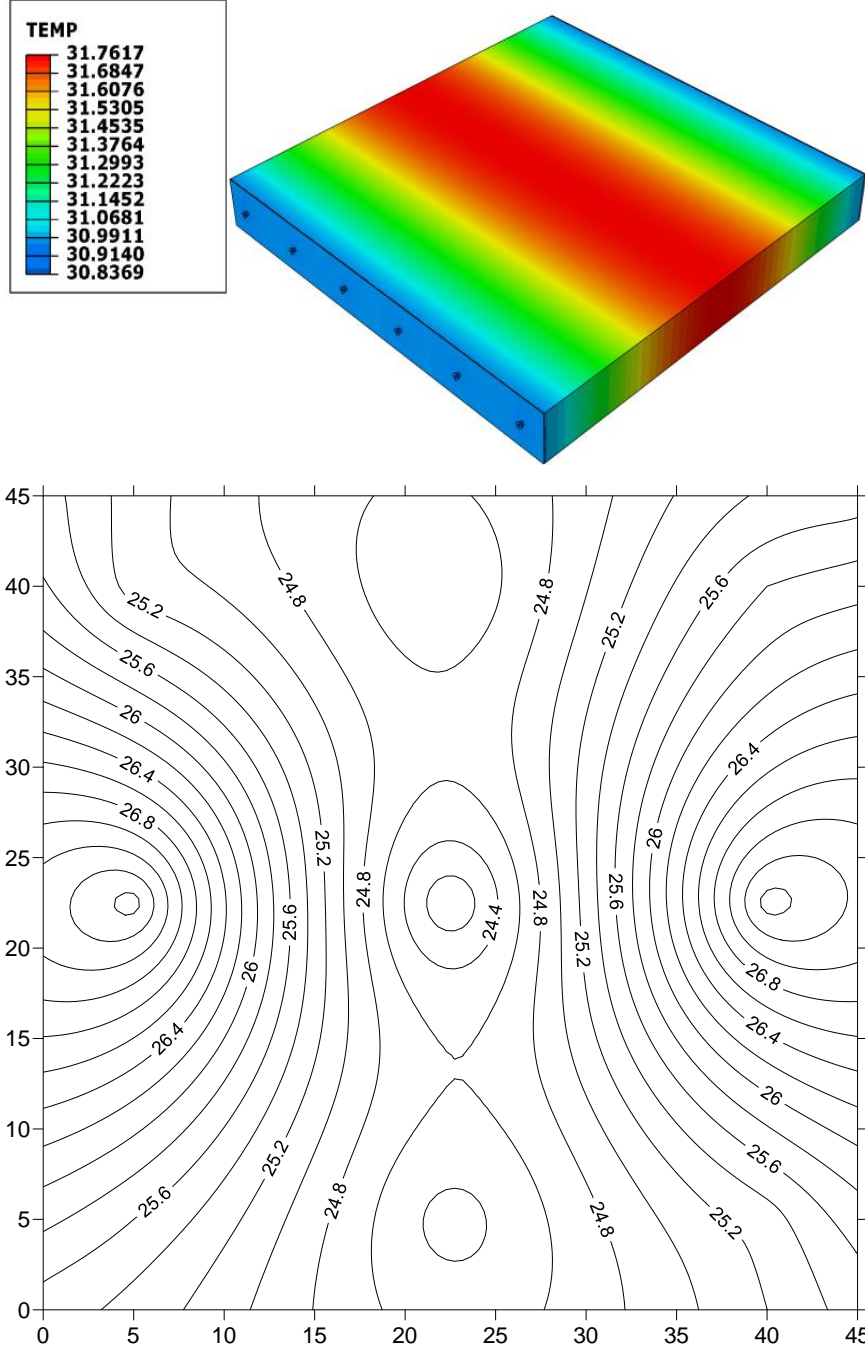


Şekil B.31. Farklı oranlarda KF ve % 6 NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.

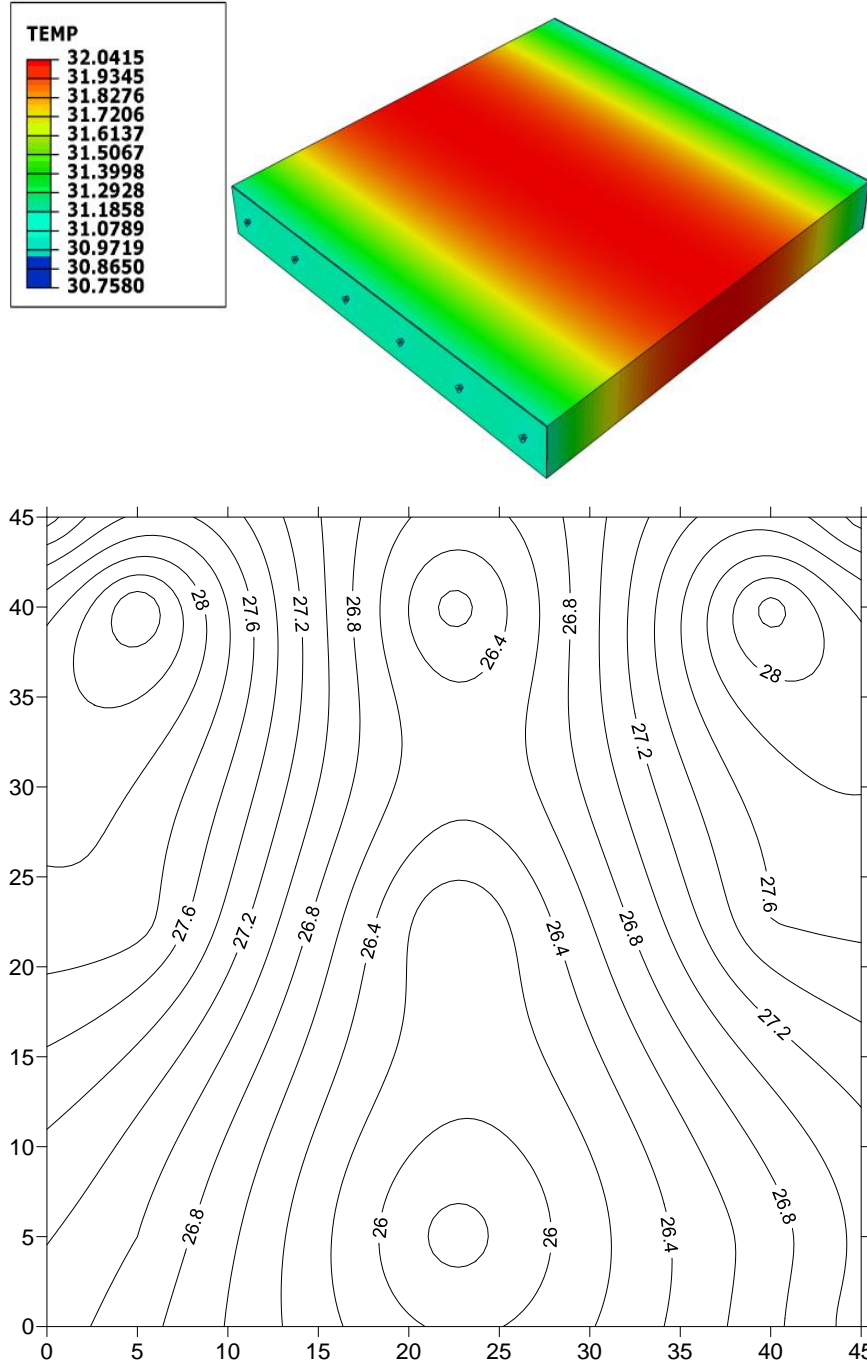


Şekil B.32. Farklı oranlarda KF ve % 10 NKS içeren karışımların ASTM yöntemi ile ölçülen elektriksel direnç değerleri.

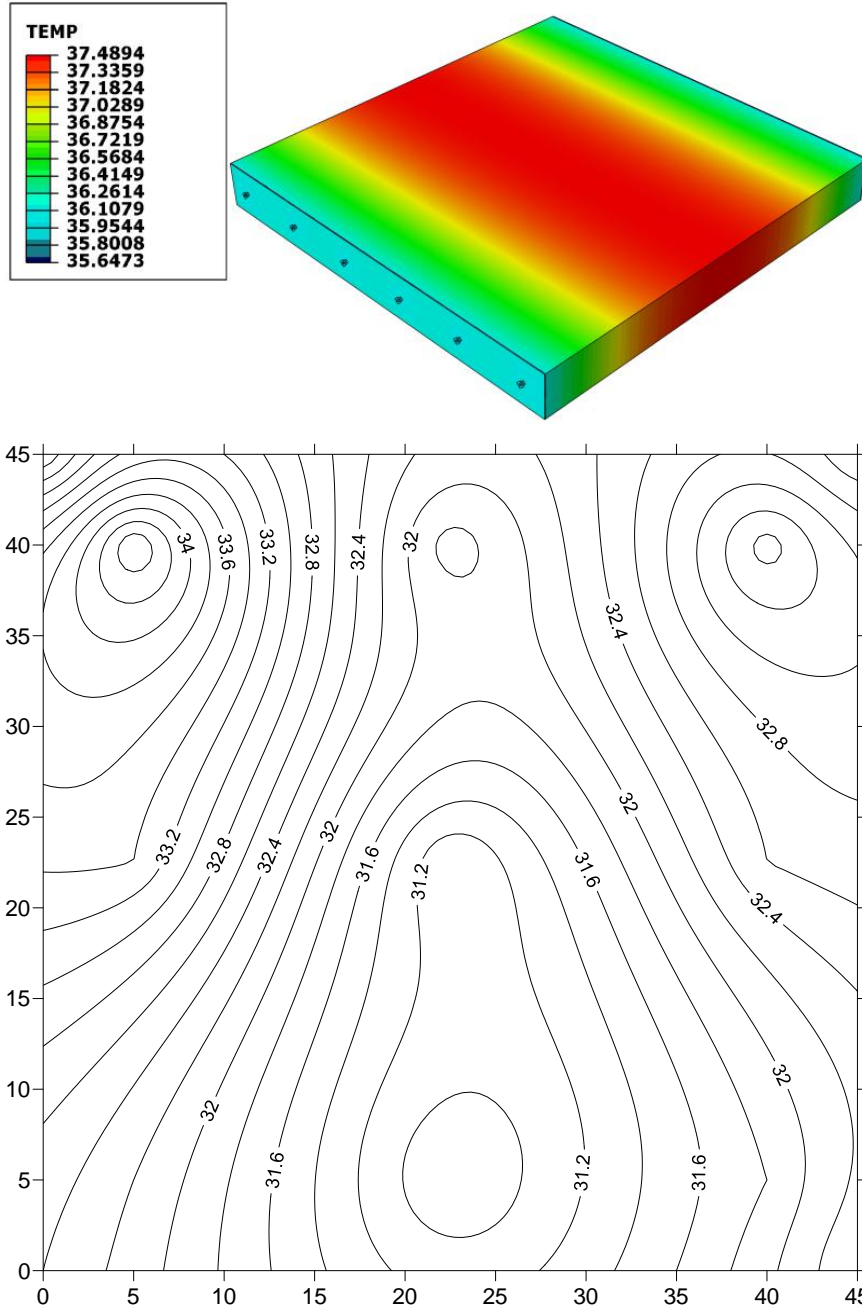
### EK C: 3D Model Sonuçlarına Ait Ek Fotoğraflar



Şekil C.1. 220 V ile, 3D modelleme (üst) ve deneysel sonuçlarından (alt) elde edilen sıcaklık dağılımı.

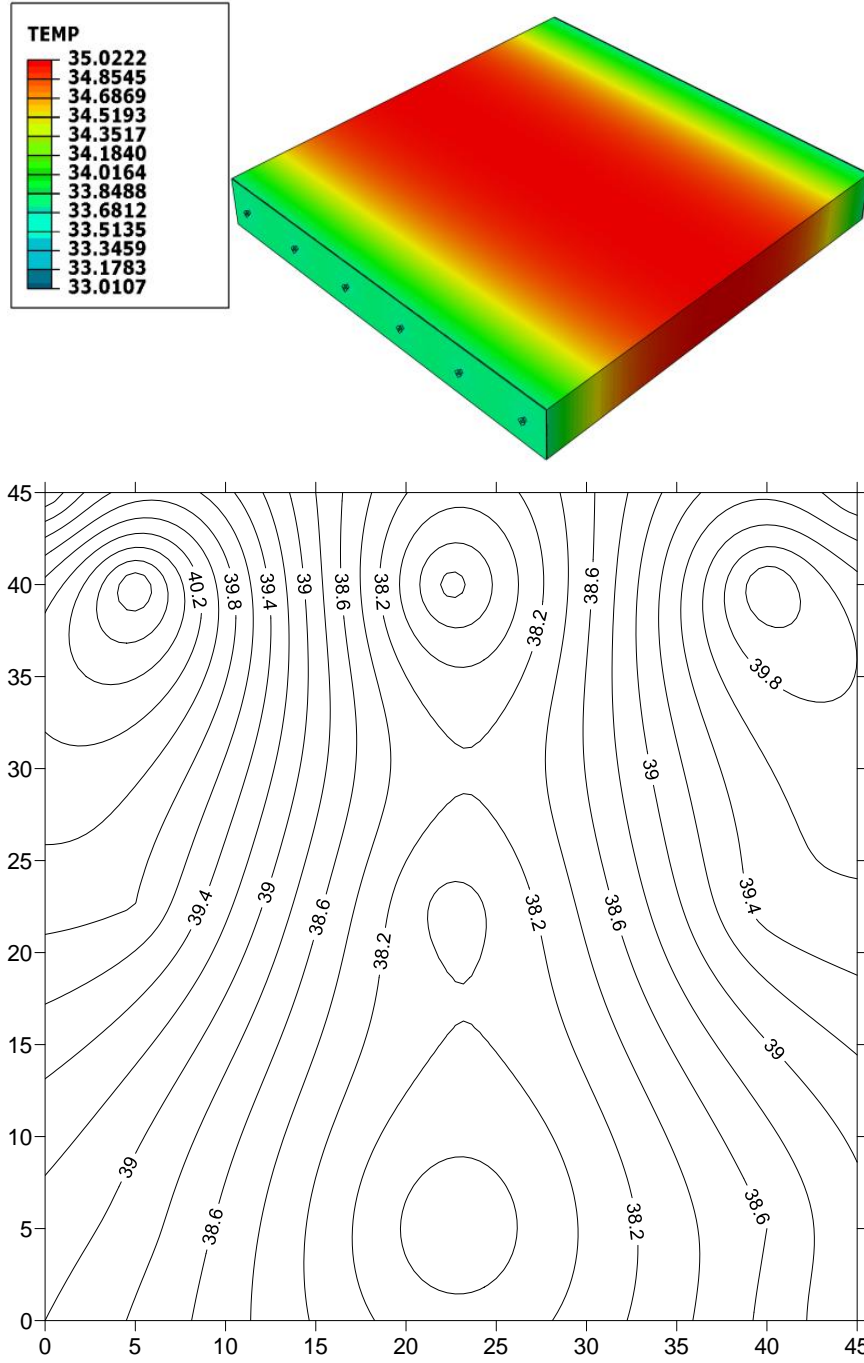


Şekil C.2. N6K1Ç0 için 80 V'de 3D modelleme (üst) ve deneysel sonuçlarından (alt) elde edilen sıcaklık dağılımı.

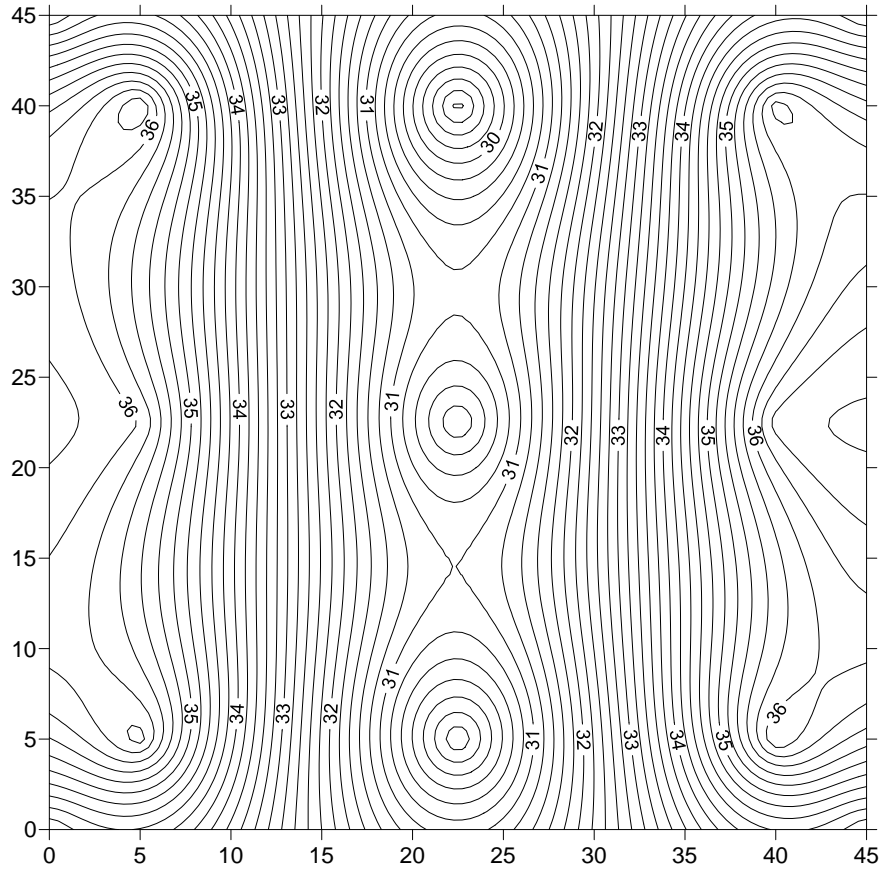
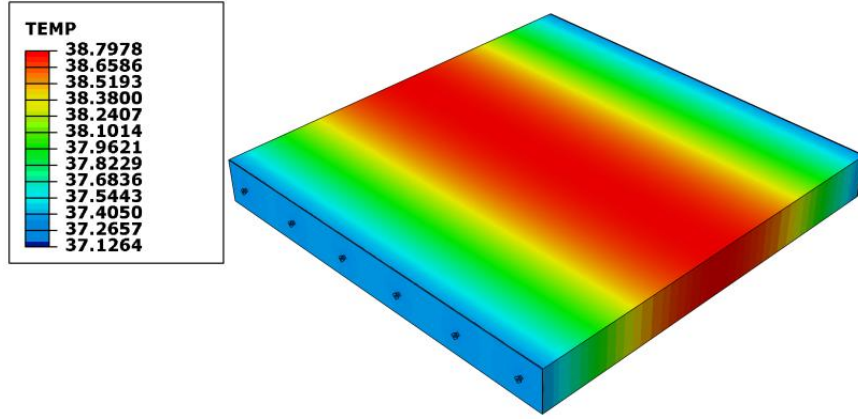


Şekil C.3. N6K1Ç0 için 100 V’de 3D modelleme (üst) ve deneysel sonuçlarından (alt) elde edilen sıcaklık dağılımı.

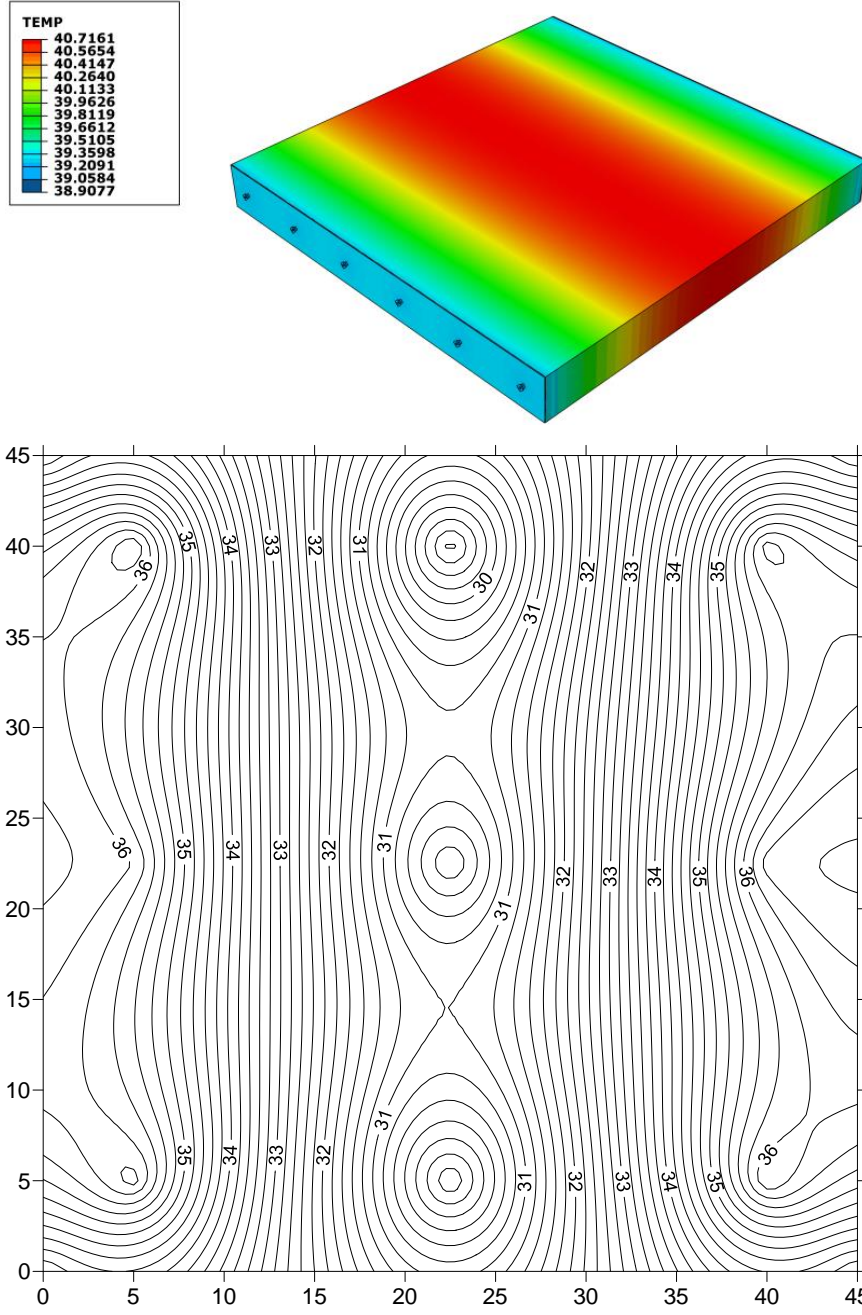




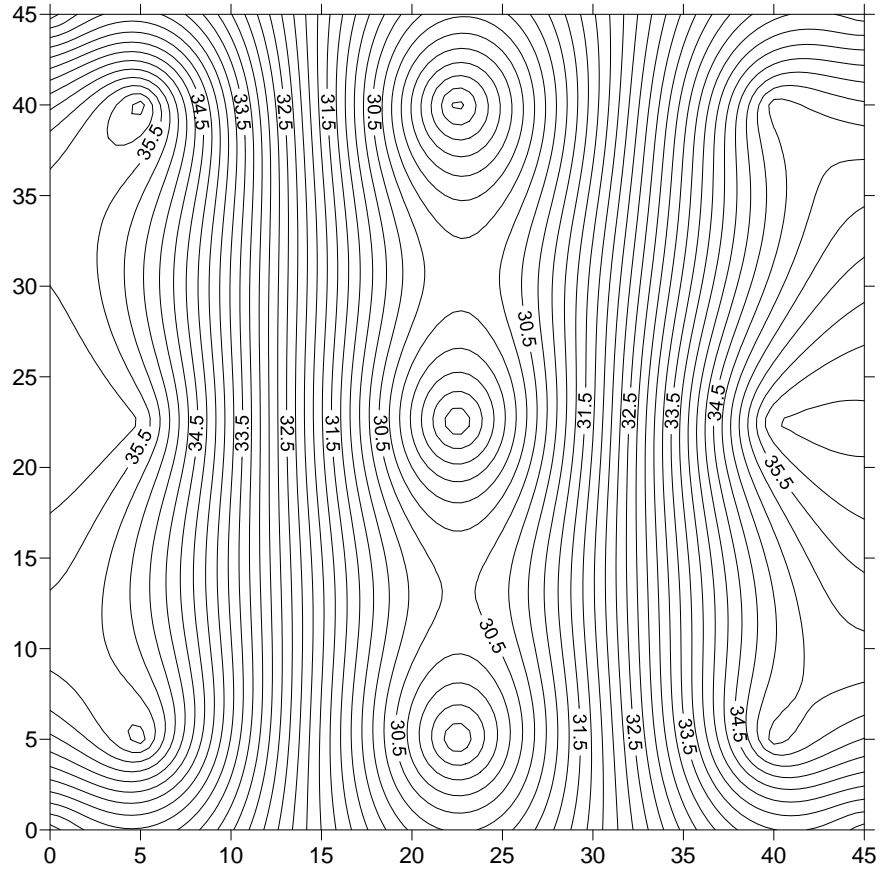
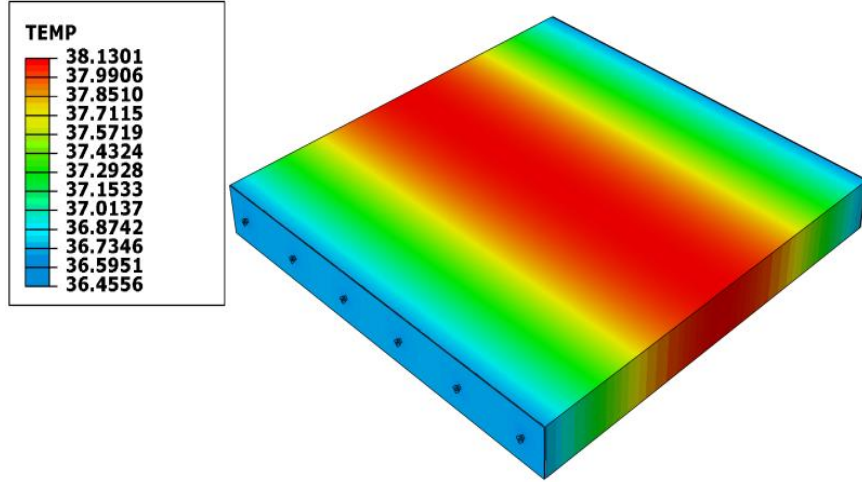
Şekil C.4. N6K1Ç0 için 120 V'de 3D modelleme (üst) ve deneysel sonuçlarından (alt) elde edilen sıcaklık dağılımı.



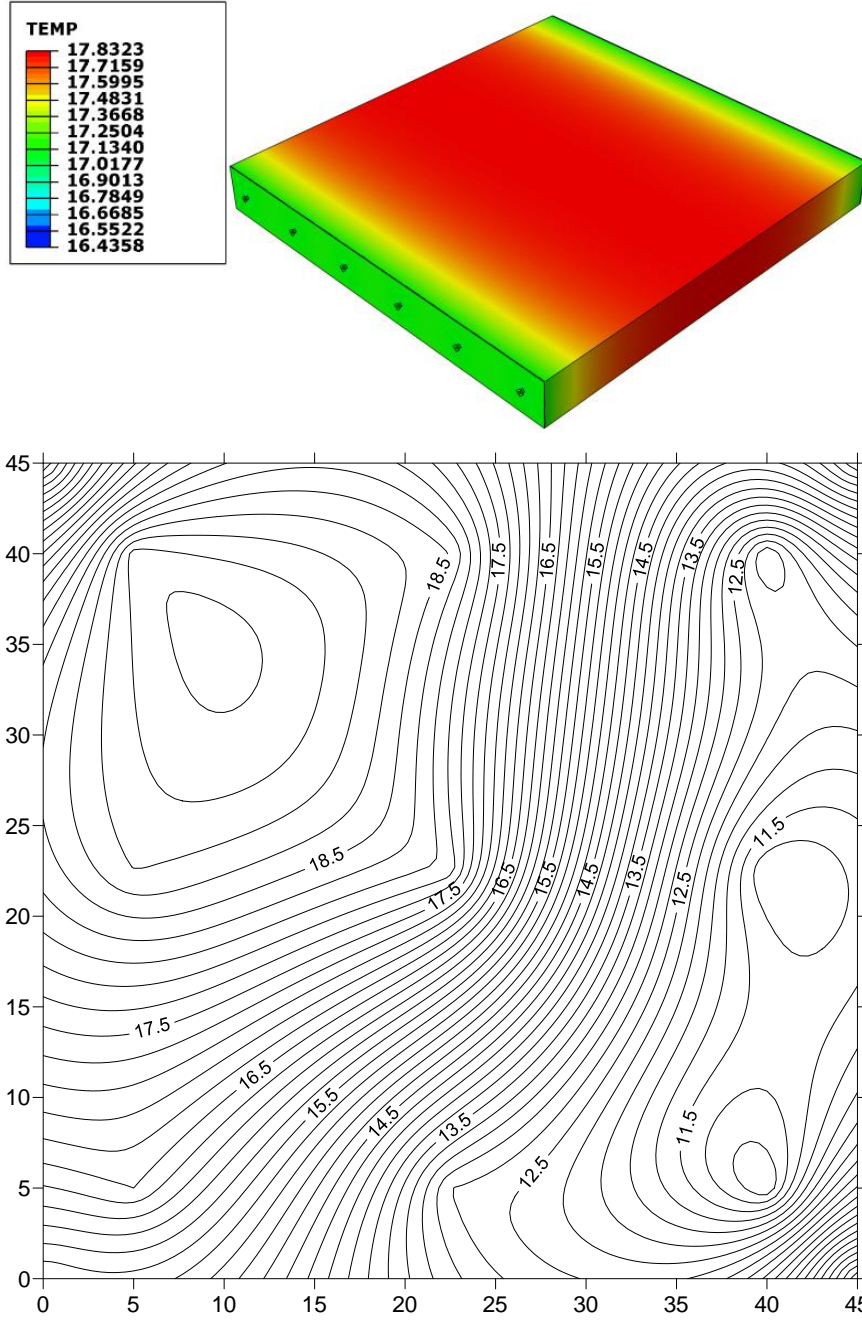
Şekil C.5. N6K1Ç2 için 100 V'de 3D modelleme (üst) ve deneysel sonuçlarından (alt) elde edilen sıcaklık dağılımı.



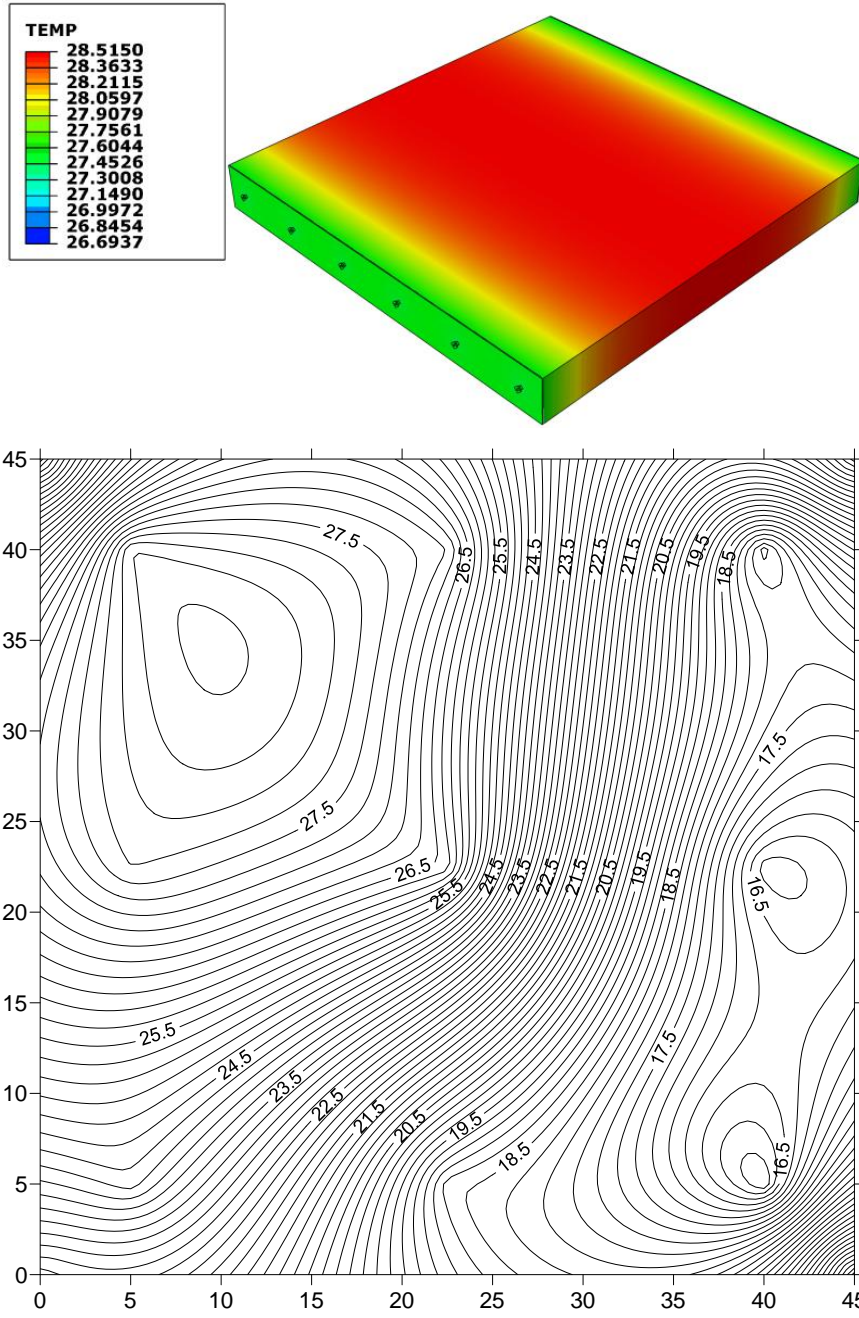
Şekil C.6. N6K1Ç2 için 120 V'de 3D modelleme (üst) ve deneysel sonuçlarından (alt) elde edilen sıcaklık dağılımı.



Şekil C.7. N6K0.2E1 için 120 V'de 3D modelleme (üst) ve deneysel sonuçlarından (alt) elde edilen sıcaklık dağılımı.

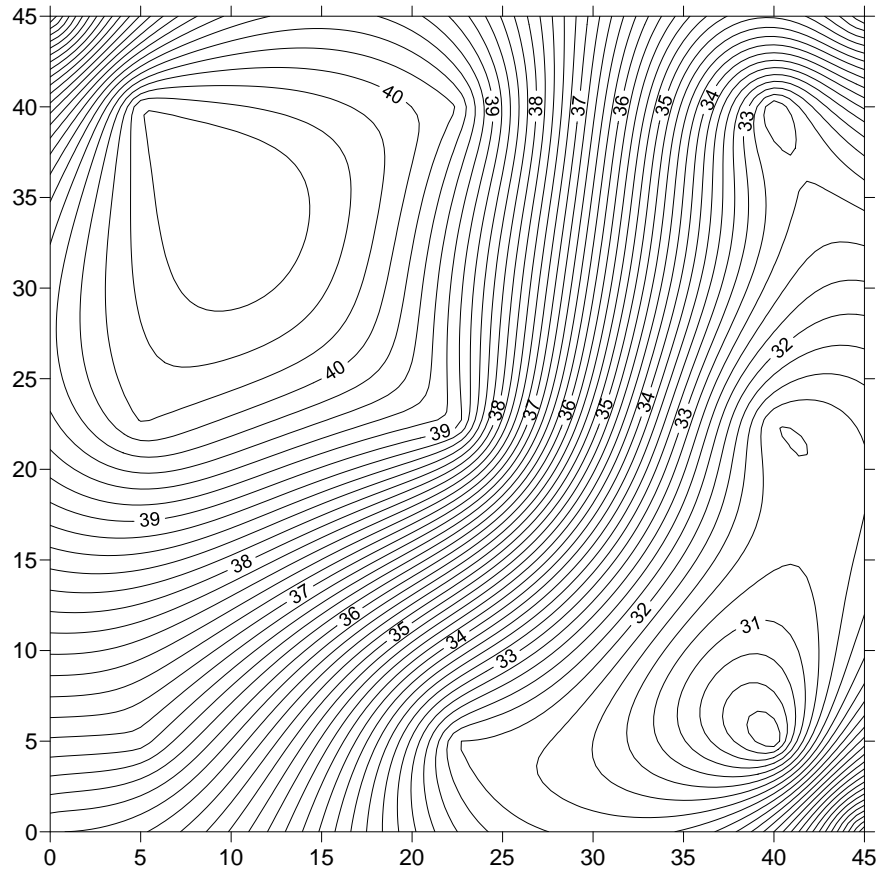
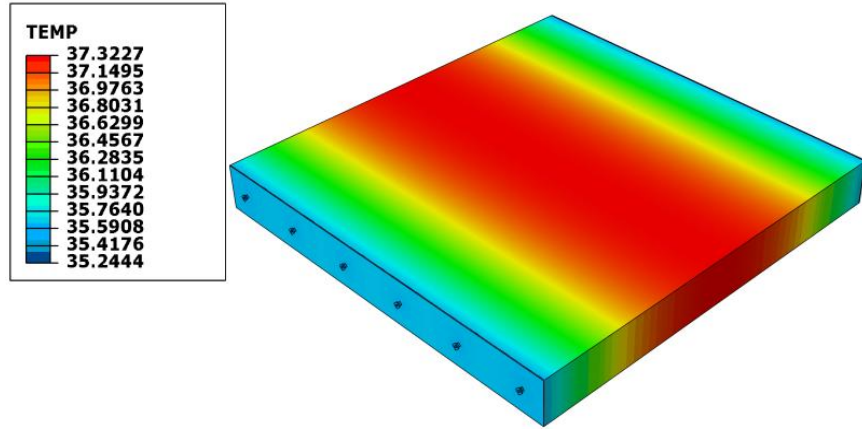


Şekil C.8. N6K0.2E1.5 için 80 V'de 3D modelleme (üst) ve deneysel sonuçlarından (alt) elde edilen sıcaklık dağılımı.

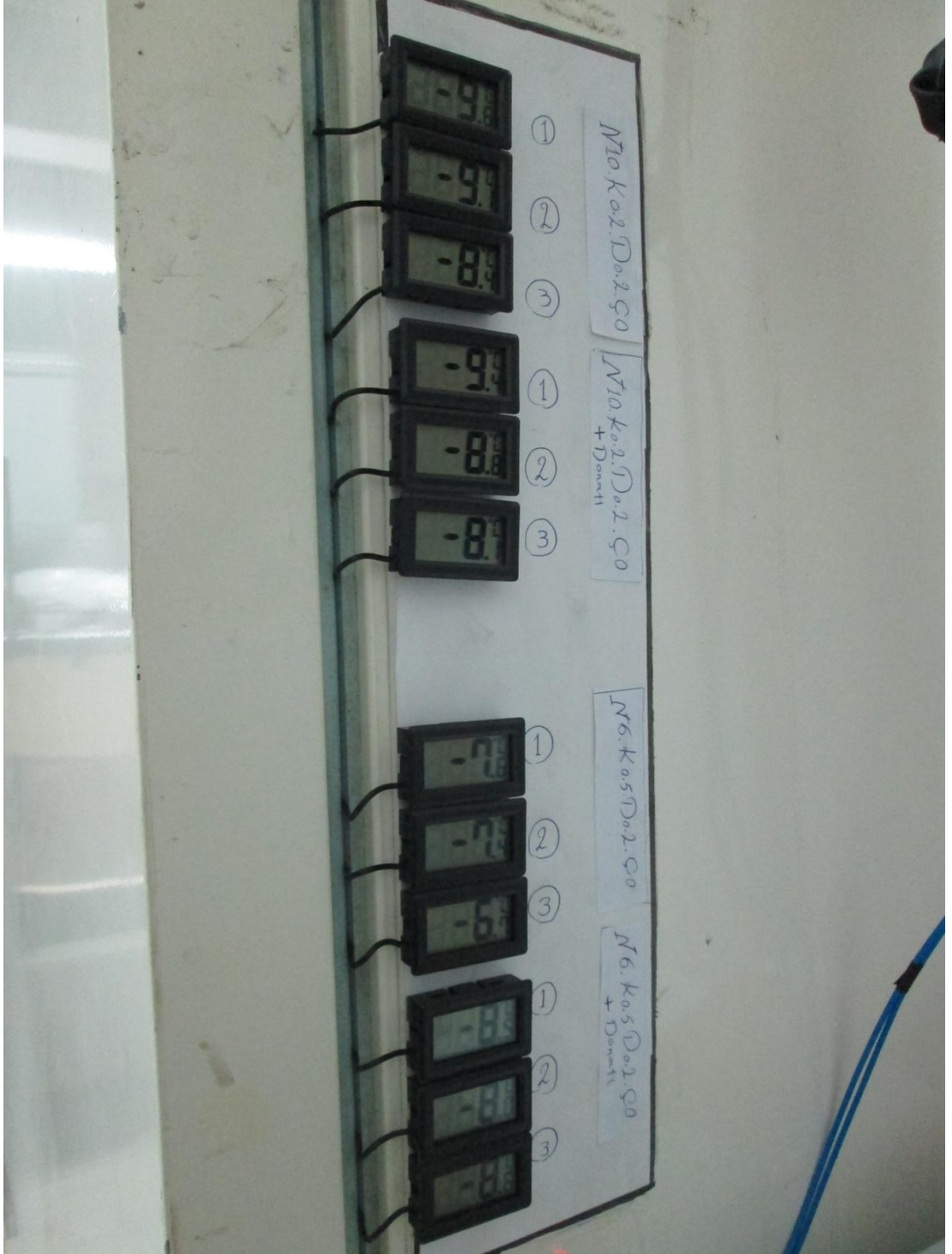


Şekil C.9. N6K0.2E1.5 için 100 V'de 3D modelleme (üst) ve deneysel sonuçlarından (alt) elde edilen sıcaklık dağılımı.



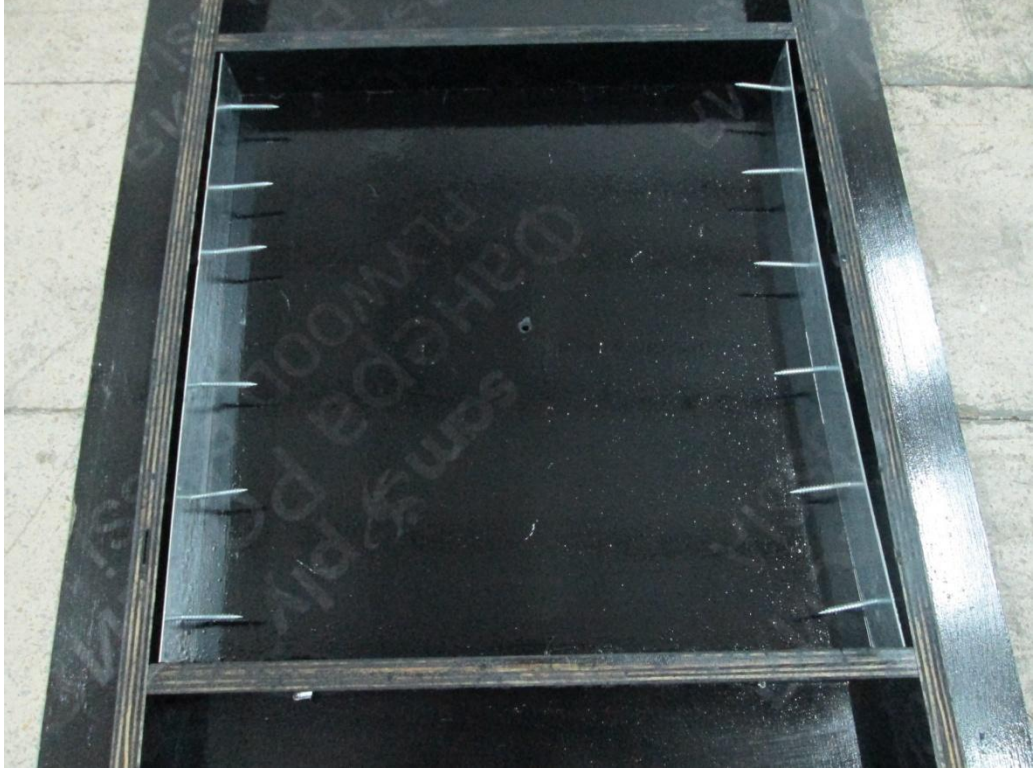


Şekil C.10. N6K0.2E1.5 için 120 V'de 3D modelleme (üst) ve deneysel sonuçlarından (alt) elde edilen sıcaklık dağılımı.

**EK D:** Elektrotermal Deneylerine ait Ek Fotoğraflar

Şekil D.1. soğutucunun içersindeki plaka numunenin sıcak ölçülmesi için termometreler.





Şekil D.2. 45 x 45 x 5 cm plaka numunelerin üretiminde elektrotların yerleştirilmesi.



Şekil D.3. ATE içeren numune gruplarının kalıplanması.

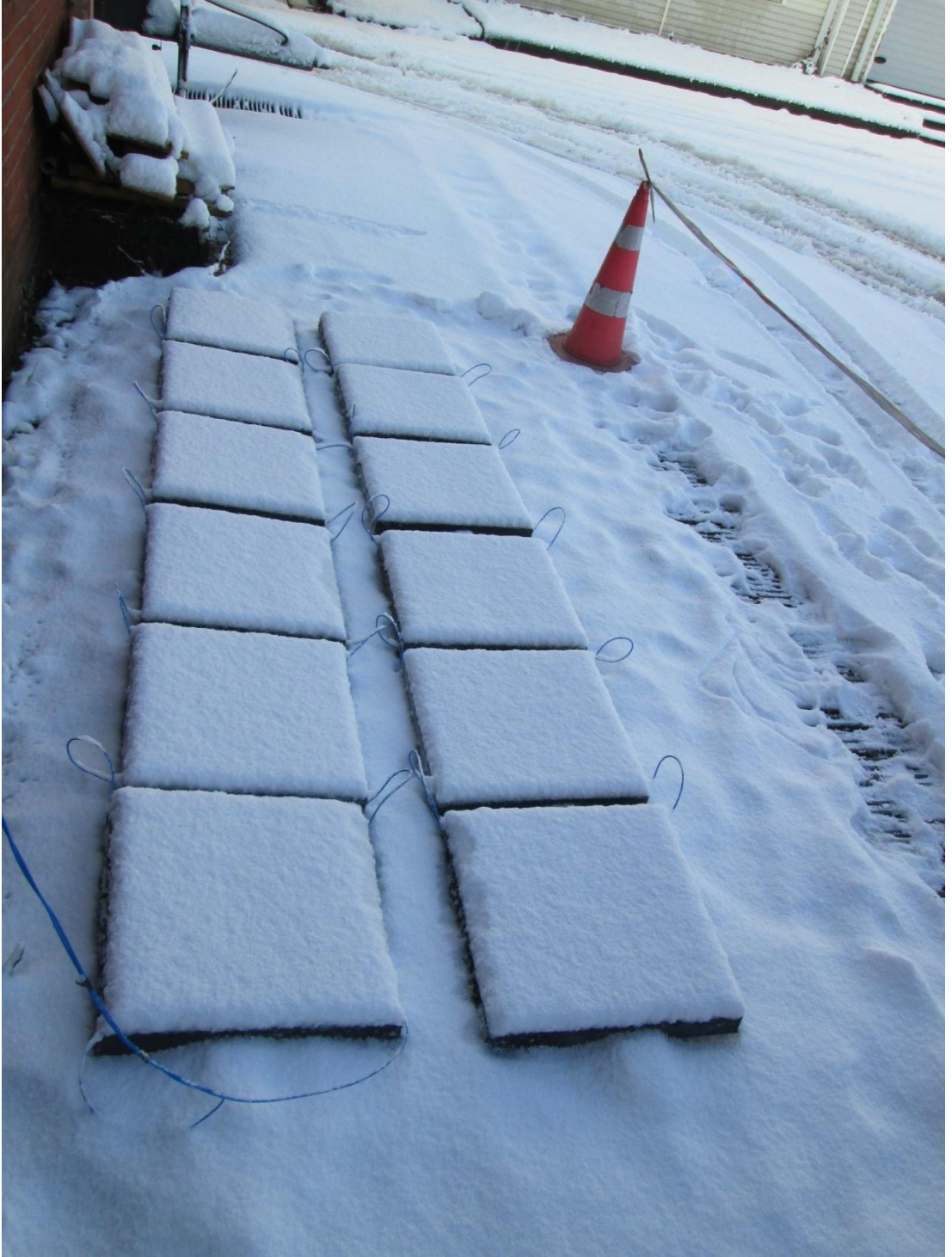


Şekil D.4. 0 ile 220 V arasında ayarlanabilir varyak.



Şekil D.5. Soğutucu dolabın sıcaklık ekranı.



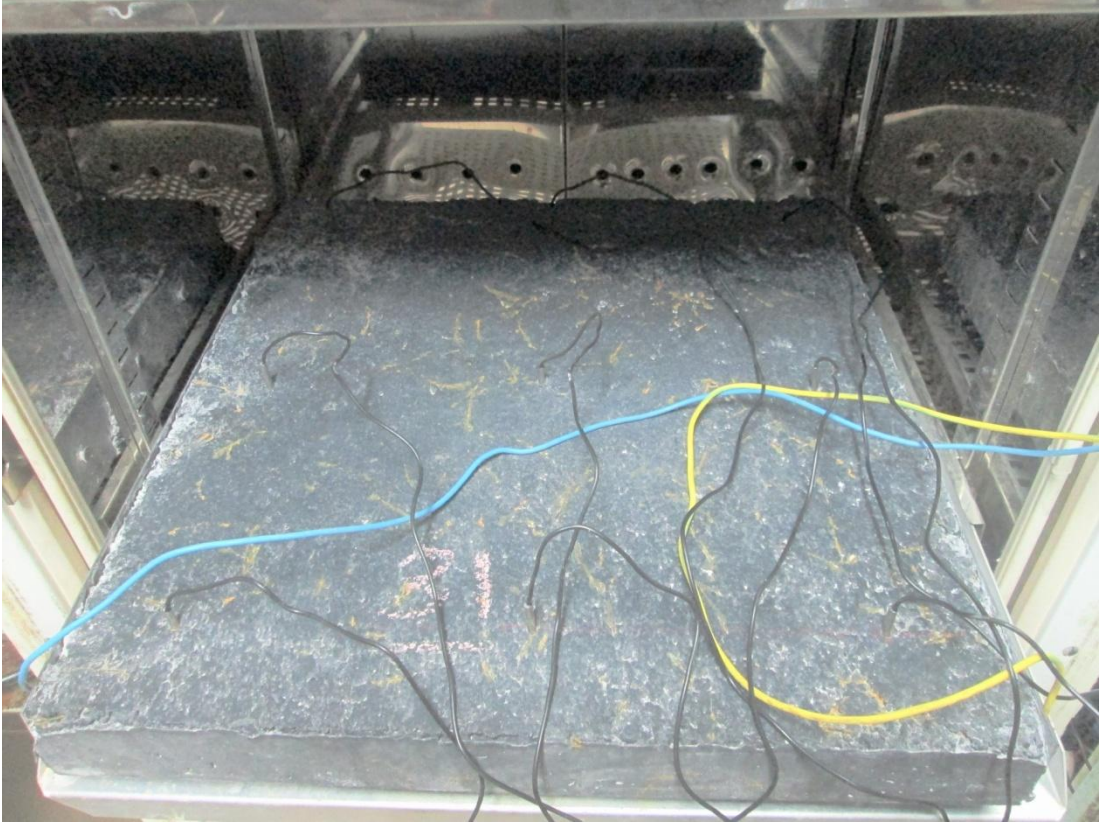


Şekil D.6. plaka numunelerin karlı havadaki görüntüleri.

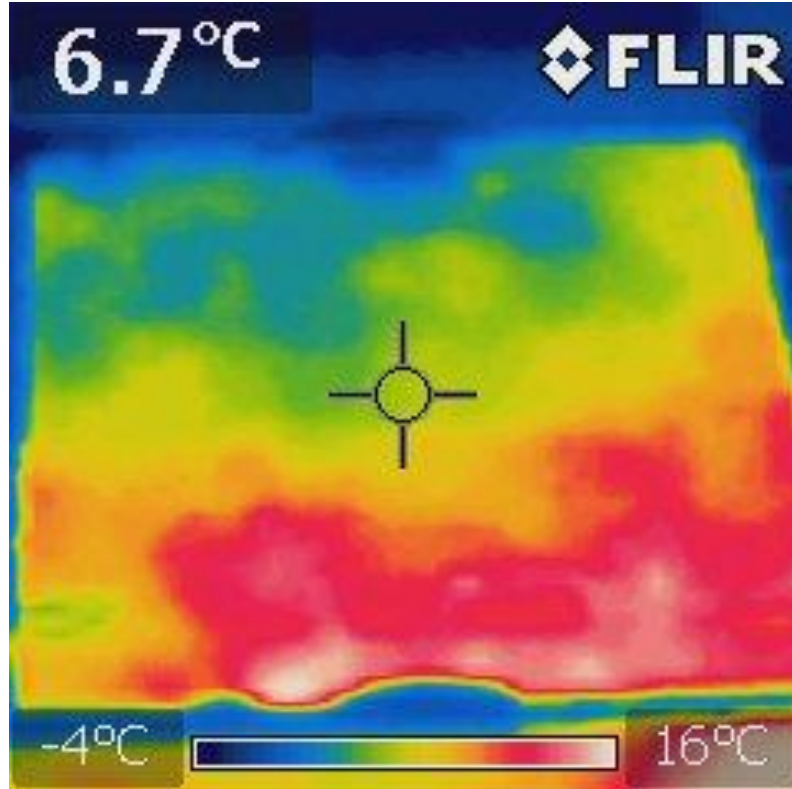


Şekil D.7. karlı havada plaka numunelerin voltaj uygulama sonrası.

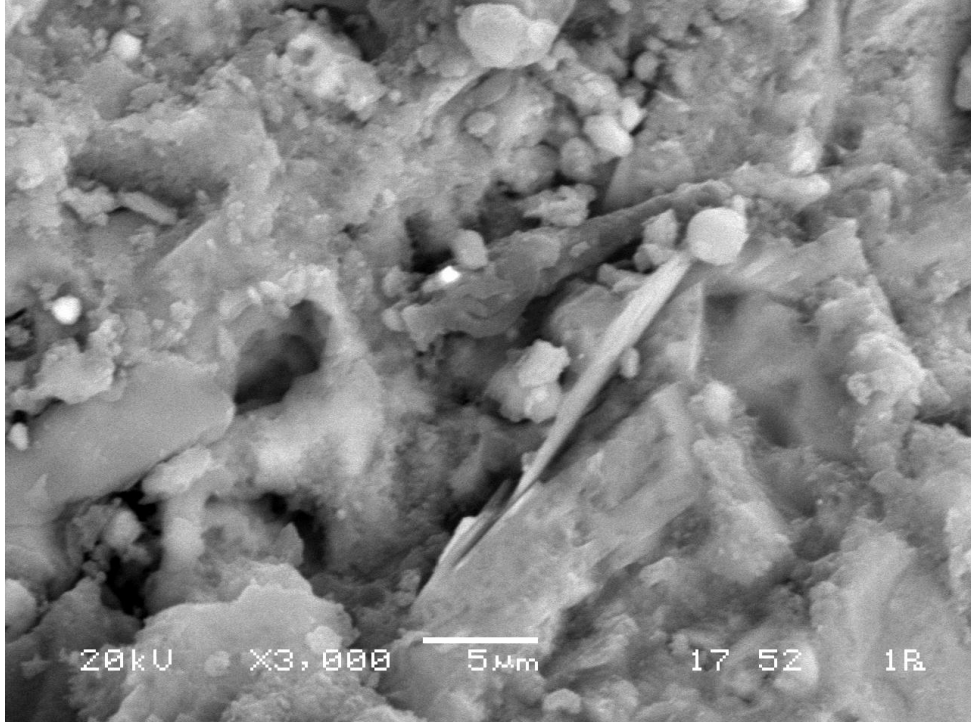




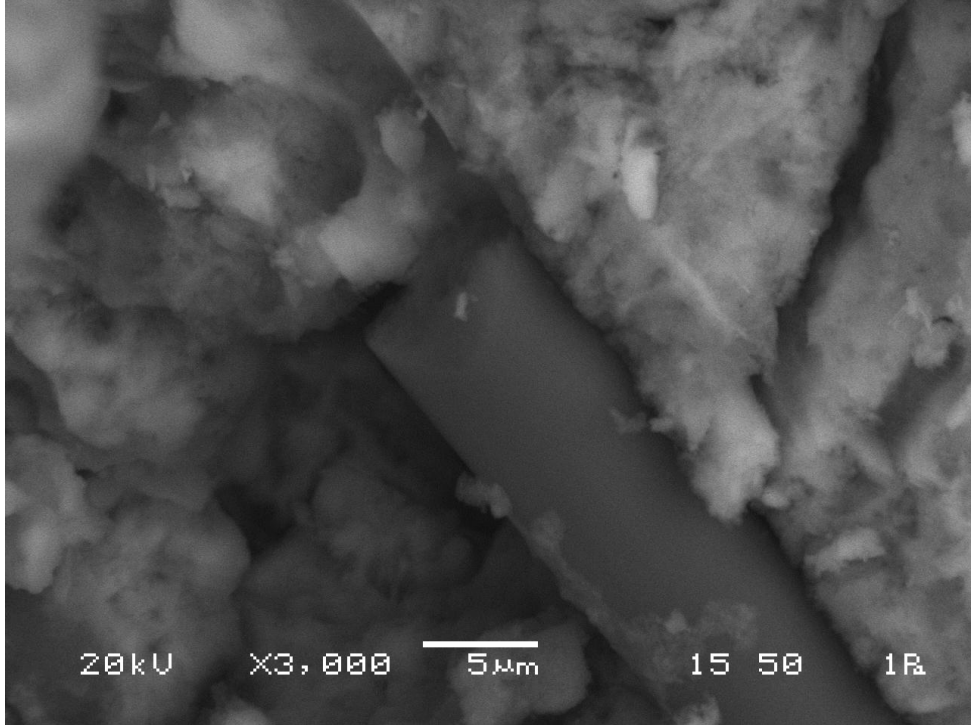
Şekil D.8. Soğutucunun içersinde plaka numunesinin yüzeyinde termometre bağlantıları.



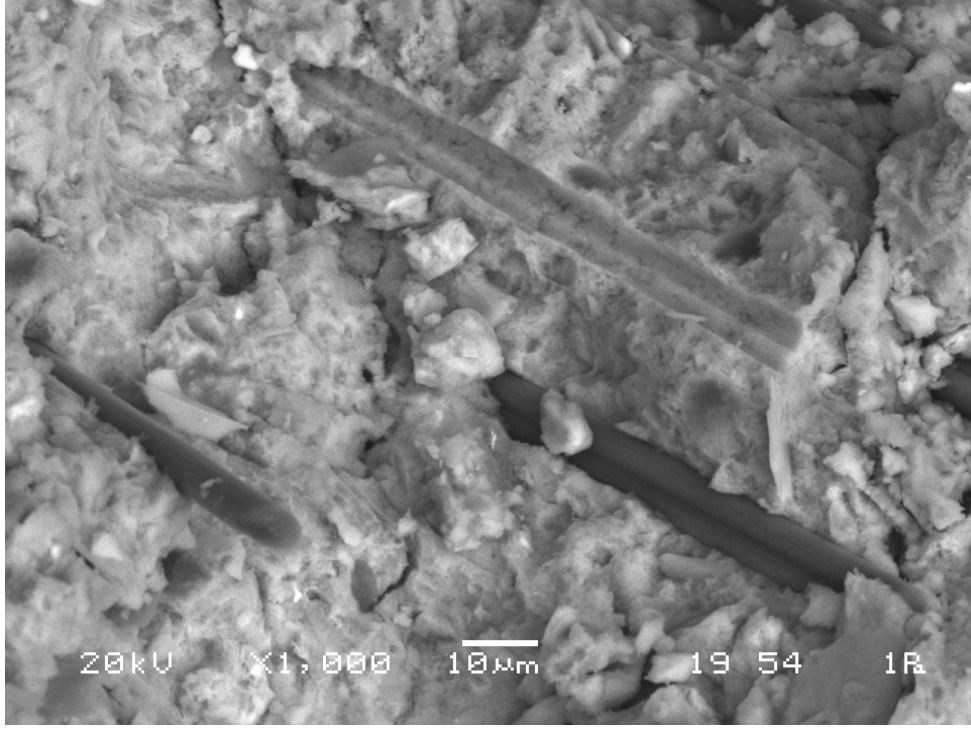
Şekil D.9. N6K0.2E1.5 numuneninin elektrotermal test esnasında çekilmiş termal fotoğraf.

**EK E: Üretilen EİB numunelerin İç Yapılarından SEM Görüntüleri**

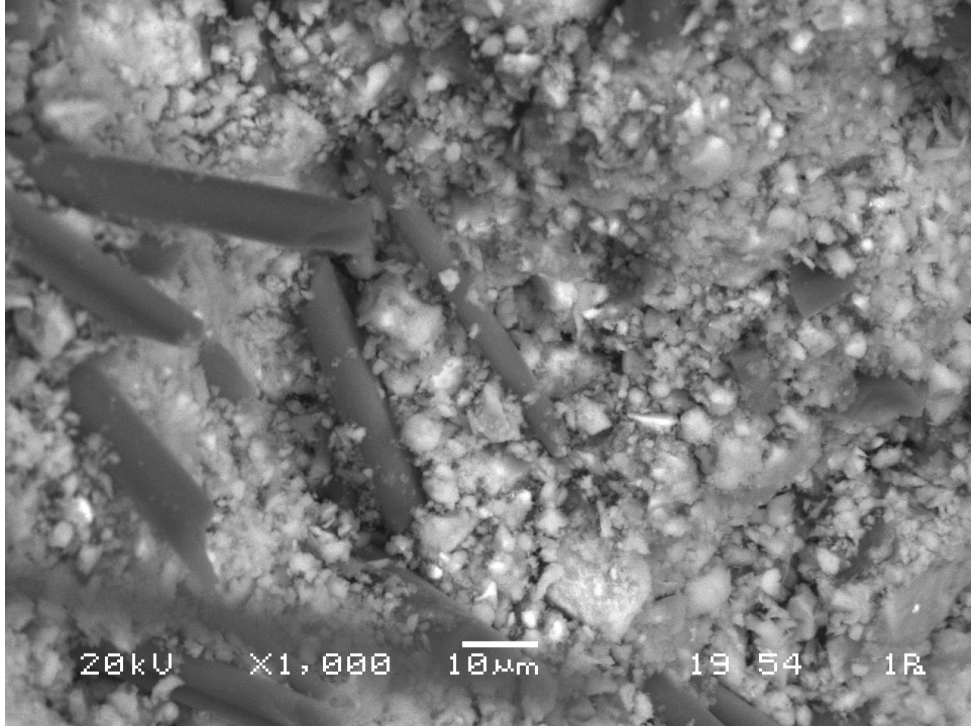
E.1. Kontrol Beton Numunesinin İç Yapısının SEM Görüntüsü.



E.2. N6K0.2Ç0 Numunesinin İç Yapısının SEM Görüntüsü.



E.3. N6K0.5Ç0 Numunesinin İç Yapısının SEM Görüntüsü.



E.4. N6K1Ç0 Numunesinin İç Yapısının SEM Görüntüsü.

## 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 yılına kadar Çelik yapı, yol ve baraj projelerinde tecrübe kazanan Heydar DEHGHANPOUR 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 ve bölümde eş zamanlı, başladığı ikinci yüksek lisans programını 2019-Mayıs'da tamamladı.