

**Havalimanı Pistlerinde Donmayı Engellemek Amacıyla Elektriksel
İletken Beton Üretiminin Araştırılması**

Program Kodu: 1002

Proje No: 119M164

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ

Araştırmacı:

DR. Öğr. Üyesi Faraz AFSHARI

Bursiyer:

Dr. Heydar DEHGHANPOUR

Önsöz

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 yapılan bu betonun, ekonomiklik faktörü ile birlikte malzemelerin mekaniksel, elektriksel ve termal özelliklerinden yararlanarak spesifik testleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, Proje numarası: 119M164 olan TÜBİTAK birimi tarafından desteklenmiştir. Çalışmaya verdiği destek için TÜBİTAK yönetmenine teşekkür ederiz. Elde edilen olumlu sonuçlar ile SCI indeksli dergilerde ve uluslararası kongere kitapçıklarında makaleler yayımlanmıştır. Optimizasyon sonuçlarına göre projenin, soğuk bölgelerde gerçek boyutlarda numuneler üretilerek, yeni proje kapasitesine sahip olduğu anlaşılmıştır.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	İv
ŞEKİLLER LİSTESİ	Vi
TABLolar LİSTESİ	İx
ÖZET	X
ABSTRACT	Xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Kaynak Araştırması	1
1.2. Literatür Özeti	2
2. MATERYAL VE TEMEL DENEY YÖNTEMLERİ	9
2.1. Materyal	9
2.2. Karışım Tasarımı	12
2.3. Karışımların Kalıplanması	13
2.4. Temel Test Yöntemleri	18
2.4.1. Mekaniksel test yöntemleri	18
2.4.2. Elektriksel direnç ölçme test yöntemleri	20
3. ARAŞTIRMA BULGULARI	22
3.1. Elektriksel Direnç (ED) Deneyleri	22
3.1.1. NKS ve KF'in İYÖD değerleri üzerinde ayrı ayrı etkileri	25
3.2. Basınç Deneyleri	31
3.3. Eğilme Deneyleri	33
3.4. Çarpma Deneyleri	35
4. ELEKTRİKLİ ISITMALI YOL KAPLAMA SİSTEMLERİ	38
4.1. 3D ELEKTROTERMAL MODELLEME	38
4.1.1. Abaqus Programında Teorik Bilgiler	39
4.1.2. Elektriksel Analiz Prosedürleri	40
4.1.3. EİB plakaların Abaqus programında 3-D Modellenmesi	41
4.2. Deneysel Yöntem	43
5. ELEKTRİKSEL İLETKEN YOL KAPLAMA SİSTEMLERİ BULGULARI	48
5.1. Elektrotermal Sonuçları	48
5.2. Tüm Numunelerin Sıcaklık-Zaman Davranışları	52
5.3. N6K0.5Ç0'da sıcaklık dağılımı ve güç miktarı	52

5.4.	N6K1Ç0'da sıcaklık dağılımı ve güç miktarı	54
5.5.	N6K1Ç2'de sıcaklık dağılımı ve güç miktarı	55
5.6.	N6K0.2E1'de sıcaklık dağılımı ve güç miktarı	57
5.7.	N6K0.2E1.5'de sıcaklık dağılımı ve güç miktarı	59
5.8.	Sıcaklık ile Özdirenç Arasındaki İlişki	60
5.9.	Numunelerin Karlı Havadaki Performansları	62
5.10.	EİB'lerde Performans Değerlendirilmesi	63
5.11.	Karışım Optimizasyonu ve Numune Seçimi	65
6.	SONUÇ ve ÖNERİLER	69
6.1.	Sonuç	69
6.2.	Öneriler	71
	KAYNAKLAR	72
	EKLER	75

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 siyahı
R	: Direnç
R_p	: Parçacıkların direnci
R_s	: Parçacık ve su arasındaki direnç
R_w	: Suyun direnci
SA	: Süper akışkanlaştırıcı
SEM	: Scanning electron microscope
TEM	: Tunneling electron microscope

V	: Voltaj
WYÖD	: Wenner prop yöntemi ile ölçülen direnç
ρ	: Elektriksel öz direnç
Ω	: Elektriksel direnç birimi
σ	: Elektriksel iletkenlik
σ_c	: Basınç dayanımı
σ_f	: Eğilme dayanımı
η	: Viskozluk
ϕ	: Akıcılık

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Farklı buz çözme sistemlerinin maliyet açısından karşılaştırılması.	6
Şekil 1.2. Normal ve elektriksel iletken betonun iç yapısının şematik görüntüsü.	8
Şekil 2.1. Deneylerde kullanılan çimentonun SEM görüntüsü (a) ve EDS grafiği.	9
Şekil 2.2. 7.0 µm Çapında 12 mm uzunluğunda KF.	10
Şekil 2.3. 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.	11
Şekil 2.4. Atık tel erezyon.	12
Şekil 2.5. Projede kullanılan çelik fiber.	12
Şekil 2.7. Kalıplanmış numune örnekleri; a) basınç ve ED, b) eğilme deneyi ve c) çarpma deney numuneleri.	14
Şekil 2.8. Numunelerin kür havuzunda yerleştirilmesi.	14
Şekil 2.9. Silindir numunelerin pürüzlü taraflarının kesilmesi.	15
Şekil 2.10. Numunelerin oda sıcaklığında kurutulması.	15
Şekil 2.11. Basınç (a) ve eğilme (b) test cihazları.	18
Şekil 2.12. Çarpma test aleti.	20
Şekil 2.13. İki noktalı tek eksenli (a), Wenner prop yöntemi (b) ve C1760-12 WYÖD (c) yöntemine göre iletkenlik ölçme ekipmanları.	21
Şekil 3.1. KF ve NKS içeren iletken betonların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerleri.	25
Şekil 3.2. İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması.	26
Şekil 3.3. NKS, KF ve ÇF içeren betonların İYÖD değerlerinin kıyaslanması.	26
Şekil 3.4. NKS, KF ve ATE içeren betonların İYÖD değerlerinin kıyaslanması.	27
Şekil 3.5. KF ve NKS içeren iletken betonların Wenner prop yöntem ile ölçülen WYÖD değerleri.	27
Şekil 3.6. Wenner prop yöntem ile ölçülen WYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması.	28
Şekil 3.7. NKS, KF ve ÇF içeren betonların WYÖD değerlerinin kıyaslanması.	28
Şekil 3.8. NKS, KF ve ATE içeren betonların WYÖD değerlerinin kıyaslanması.	29
Şekil 3.9. KF ve NKS içeren iletken betonların C1760-12 ASTM standartına göre ölçülen ASTM-D değerleri.	29
Şekil 3.10. İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması.	30
Şekil 3.11. NKS, KF ve ÇF içeren iletken betonların ASTM-D değerlerinin	

kıyaslanması.	30
Şekil 3.12. KF ve NKS içeren iletken betonların basınç dayanımları.	31
Şekil 3.13. KF içeren iletken betonlarda NKS oranlarının basınç dayanımına etkisi. ...	32
Şekil 3.14. Üç fazlı elektriksel iletken betonlarda basınç dayanımlarının karşılaştırılması.	32
Şekil 3.15. ATE içeren betonlarda basınç dayanımlarının karşılaştırılması.	33
Şekil 3.16. NKS ve KF içeren iletken betonların eğilme dayanımlarının kıyaslanması.	33
Şekil 3.17. Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların eğilme dayanımlarına NKS'nin etkisi.	34
Şekil 3.18. İletken betonlarda NKS, KF ve ÇF'in eğilme dayanımına etkisinin incelenmesi.	34
Şekil 3.19. ATE içeren betonlarda basınç dayanımlarının karşılaştırılması.	35
Şekil 3.20. NKS ve KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarlarının kıyaslanması.	35
Şekil 3.21. Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarına NKS'nin etkisi.	36
Şekil 3.22. İletken betonlarda NKS, KF ve ÇF'in çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarına etkisinin incelenmesi.	36
Şekil 3.23. ATE içeren betonlarda Çarpmaya karşı dayanımlarının karşılaştırılması. ...	37
Şekil 4.1. 3D olarak modellenen EİB plakalarının geometrisi.	42
Şekil. 4.2. EİB plakasının 3-D ağ görünümü (a), büyütülmüş elektrot ve etrafındaki ağ görünümü (b).	42
Şekil.4.3. EİB plakaların elektrotermal deney düzeneği.	46
Şekil 5.1. Tüm plaka numuneler için 100 volt'da gerçekleşen elektrotermal sonuçları.	52
Şekil 5.2. N6K0.5Ç0 plaka numunesi için 180 ve 220 volt'da sıcaklık-zaman eğrileri. .	53
Şekil 5.3. N6K0.5Ç0 plaka numunesi için 180 ve 220 V'de tüketilen güç miktarı.	53
Şekil 5.4. 180 V ile 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı.	54
Şekil 5.5. N6K1Ç0 plaka numunesi için 60-120 V'de sıcaklık-zaman eğrileri.	54
Şekil 5.6. N6K1Ç0 plaka numunesi için 60-120 V'de tüketilen güç miktarı.	55
Şekil 5.7. N6K1Ç0 için 60 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı.	55
Şekil 5.8. N6K1Ç2 plaka numunesi için 80-120 V'de sıcaklık-zaman eğrileri.	56
Şekil 5.9. N6K1Ç2 plaka numunesi için 80-120 V'de tüketilen güç miktarı.	56
Şekil 5.10. N6K1Ç2 için 80 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı.	57

Şekil 5.11. Farklı voltajlarda N6K0.5, N6K1 ve N6K1S2 numuneleri için elde edilen elektrotermal sonuçlar.	57
Şekil 5.12. N6K0.2E1 plaka numunesi için 80-120 V'de tüketilen güç miktarı.	58
Şekil 5.13. N6K0.2E1 için 100 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı.	59
Şekil 5.14. Farklı voltajlarda N6K0.2E1.5 numuneleri için elde edilen elektrotermal sonuçlar.	59
Şekil 5.15. N6K0.2E1 plaka numunesi için 80-120 V'de tüketilen güç miktarı.	60
Şekil 5.16. N6K0.2E1.5 için 60 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı.	60
Şekil 5.17. NKS, KF ve ÇF içeren plaka numunelerin farklı sıcaklıklardaki özdirenç değerleri.	61
Şekil 5.18. NKS, ATE ve KF içeren plaka numunelerin farklı sıcaklıklardaki özdirenç değerleri.	61
Şekil 5.19. NKS, KF ve ÇF içeren plaka numunelerin karlı havadaki performansları. ...	62
Şekil 5.20. farklı karışımlara sahip EİB plaka numuneler için harcanan ısı enerjisi değerleri.	64
Şekil 5.21. Farklı numuneler için hesaplanan verimlilik değerleri.	68

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Farklı buz çözme sistemlerinin maliyet açısından karşılaştırılması.	4
Tablo 2.1. Çimentonun EDS analiz sonuçları.	9
Tablo 2.2. Karışım detayları.	16
Tablo 3.1. Elektriksel, mekaniksel ve çarpma deney sonuçları.	23
Tablo 4.1. Plaka numunelerinde karışım detayları, N: Nano karbon siyahı K: Karbon fiber, Ç: Çelik fiber, E: Atık tel erezyon.	44
Tablo 4.2. Plaka numunelerinde karışımların elektriksel ve mekaniksel özellikleri, N: Nano karbon siyahı, K: Karbon fiber, Ç: Çelik fiber, E: Atık tel erezyon.	47
Tablo 5.1. Elektrotermal test sonuçları, N:Nano karbon siyahı, C:Karbon fiber, S:Çelik fiber, E:Atık tel erozyonu.	50
Tablo 5.1. Sıcaklığın -10 °C'den +10 °C'ye yükselmesi için harcanan zaman ve enerji.	64
Tablo 5.2. Optimizasyon için kullanılan ham değerler.	66
Tablo 5.3. kriter değerlerini birinci numune sonuçlarına bölerek elde edilen değerler. ..	66
Tablo 5.4. Farklı kriterlere göre numune seçimi.	68

ÖZET

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

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 hızıyla ısınabilmeleri için $180\text{-}1315\text{ W/m}^2$ gücün gerekli olduğu anlaşılmıştır. Literatüre göre soğuk havalarda kar ve buzun erimesi için $300\text{-}550\text{ W/m}^2$ gücün yeterli olduğu belirtilmiştir, bu çalışmada da tüketilen $300\text{-}550\text{ W/m}^2$ arasında güç değerlerine göre karışım optimizasyonu yapılmıştır.

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

ABSTRACT

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

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 / m² 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 / m² 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 / m² consumed.

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 (Xi and Olsgard 2000; Abdulla 2018). 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 (EİYKS) 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 dolaşır. Jeotermal su, kazanlar ve ısı eşanjörleri dahil olmak üzere farklı türlerde ısı kaynakları vardır. Jeotermal suyun, jeotermal potansiyeli iyi olan yerlerde verimli olduğu düşünülmektedir (Abdulla 2018). EİYKS'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 (Zenewitz 1977; Joerger and Martinez 2006; Abdulla 2018). 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 (Gopalakrishnan et al. 2015).

Elektrikli iletken betonun (EİB) keşf edilmesinden, yani 1965 (Barnard 1965) yılından günümüze kadar çimentolu harç ve betonların iletkenliği ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. EİB'ler yapıların sağlığını izlemeye kendi kendine algılama malzemesi olarak, elektromanyetik girişim koruyucu için elektromanyetik radyasyon reflektörü olarak ve kendiliğinden ısıtmalı döşeme sistemlerinde direnç malzemesi olarak kullanılmaktadır (Wen and Chung 2004; ÇAVAS ; Howser et al. 2011; Gomis et al. 2015; Sassani et al. 2017). Kendiliğinden ısıtmalı döşeme sistemleri son zamanlarda yol ve hava limanı pistlerinde kar

ve buzu eritmek ve birikmesini önlemek için uygulanmaktadır (Wu et al. 2015; Arabzadeh et al. 2016; Ceylan et al. 2016; Arabzadeh et al. 2017; Arabzadeh et al. 2017).

Betonun elektriksel öz direncinin yüksek seviyelerde olduğu farklı yazarlar tarafından teyit edilmiştir. Açık havada kurutulmuş betonun elektriksel öz direncini 6.54×10^5 - 11.4×10^5 Ω -cm olarak tesbit edilmiştir (Whittington et al. 1981; Sassani et al. 2017). Buna ek olarak farklı araştırmacılar tarafından yapılan araştırmalara göre doymuş beton ve kuru betonun elektriksel öz direnci sırasıyla 10^6 Ω -cm ve 10^9 Ω -cm olarak rapor edilmiştir (Tang et al. 2005; El-Dieb et al. 2018).

1.2. Literatür Özeti

1999 yılında Yehia ve Tuan (Yehia and Tuan 1999) köprü güvertesi ve oto yolları için elektriksel iletken betonların uygulamasını önermişlerdir. Proje önerilerindeki gerekçe şöyle ifade edilmiştir; Bu araştırmada, 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. Bu sistemde 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. 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 Ω .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 üretmiş ve 30 dk boyunca 48 volt DC voltaj uyguluyarak plaka numunelerinin sıcaklığını -1.1 °C' den 15.6 °C' ye yükseldiğini farketmişlerdir (Yehia and Tuan 1999). 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 (Tuan 2008). Roca Spur Köprüsü'nün ısıtılmalı 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 potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Nebraska Karayolları Bakanlığı tarafından desteklenen daha önceki bir araştırmaya göre, çelik fiber ve çelik talaşı içeren bir beton karışımı geliştirilmiştir (Yehia and Tuan 1999). 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 gerektiriyor.

Bir takip çabası olarak, iletken beton karışımı tasarımında çelik talaşlarının yerini almak üzere karbon ve grafit ürünler kullanılmıştır (Tuan and Yehia 2004).

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 (Tuan 2008). 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.

İletken beton yarı iletken gibi davranır (Yehia et al. 2000). 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 (Tuan 2008).

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

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 (Gopalakrishnan et al. 2015; Arabzadeh et al. 2016;

Ceylan et al. 2016; Arabzadeh et al. 2017; Sassani et al. 2017) 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. 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. Ceylan'ın bakışına göre, EİB uygulanması her ne kadar da pahalı olsa da 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 (Sadati et al. 2017) 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 (Sassani et al. 2017) karışım tasarımını optimize etmek amacıyla karbon fiber ile modifiye edilmiş elektriksel ileten betonun üzerinde karışım tasarım değişkenlerinin mühendislik özelliklerinin etkisini araştırmışlardır. İletkenlik artırıcı 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 artırıcı dozajı ve fiber-dağıtıcı dozajının değişmesi ile elde edilen beş farklı karışımlarında değişkeninin elektriksel iletkenliği üzerindeki etkileri incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, uygulanan İletkenlik artırıcı katkı, elektriksel iletkenlik üzerinde olumlu etki oluşturmuştur. Bununla birlikte iletkenlik, fiber içeriği, iri / ince agrega oranı, fiber uzunluğu ve iletkenlik artırıcı katkı miktarının değişmesiyle önemli ölçüde etkilenmiştir. Ayrıca, Fiber, iletkenlik artırıcı 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 1.1.'de bu çalışmanın 2016-2017 yılları arasında, hafif kardan fırtınaya kadar değişen hava koşulları altında, oluşturulan EİB plakaların çalışma performans sonuçları özetlenmiştir.

EIYKS işlemleri sırasındaki ortalama elektrik akımı ölçümleri, Şekil 1.1.'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 W/ft^2 (355.21 W/m^2) ile 39 W/ft^2 (419.80 W/m^2) arasında değişmektedir.

Tarih	Durum	Hava sıcaklığı (F)	Rüzgar (mph)	Kar kalınlığı (in)	Güç (W/ft^2)	Zaman (hrs.)	Enerji (kW-h/ft^2)
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 1.1. Farklı buz çözme sistemlerinin maliyet açısından karşılaştırılması (Tuan 2008).

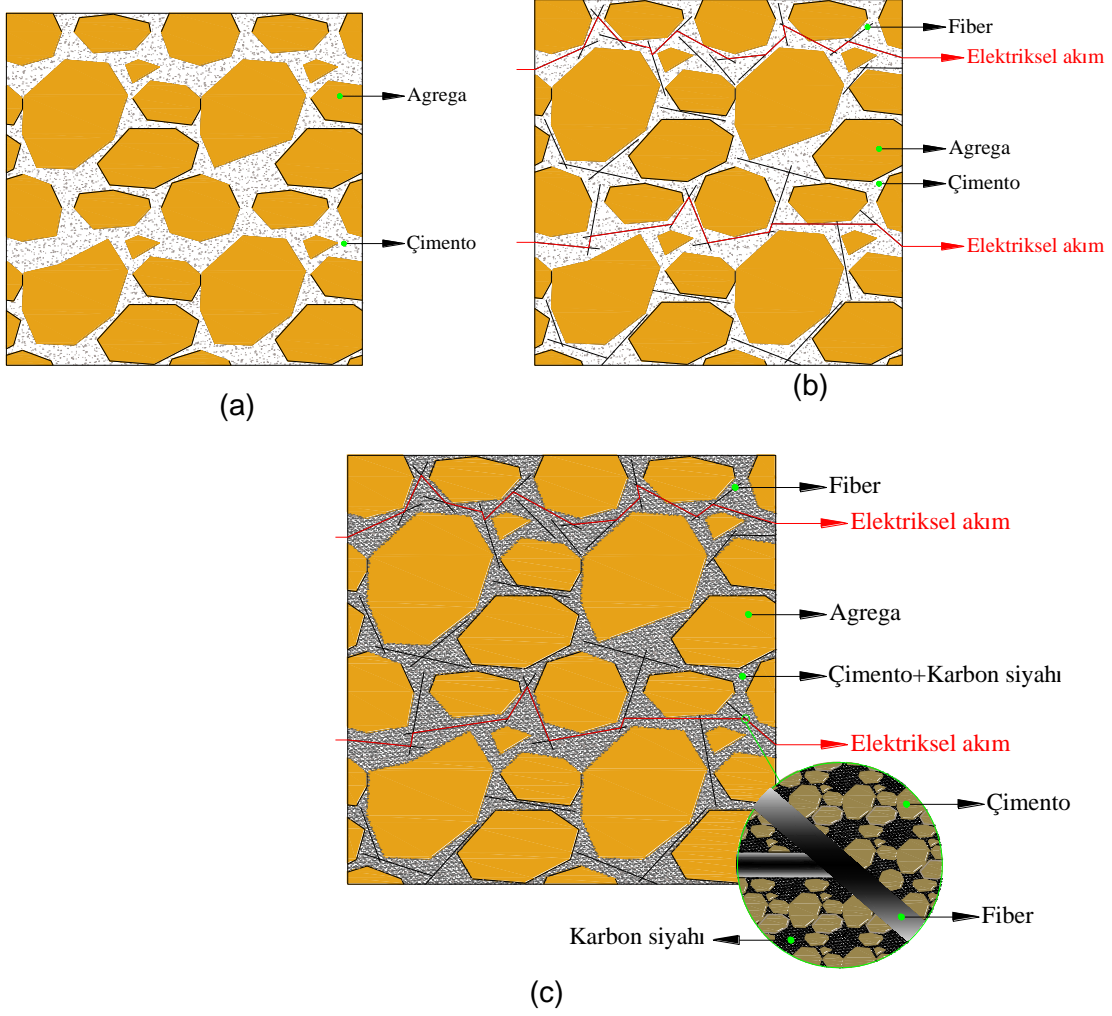
Wu ve ark (2014), yol üst yapılarında donmayı engellemek amacıyla üretilen üç fazlı elektriksel iletken betonun özelliklerini incelemiştir. İletken karışımlarda iletken katkı malzemesi olarak grafit, çelik fiber ve KF kullanılmıştır. Sonuçlara göre çelik fiber ve grafit içeren kompozit betonlarda grafit 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 (Wu et al. 2015).

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 (El-Dieb et al. 2018).

Sassani ve ark (2017), KF içeren elektriksel iletken betonlarda beş farklı değişkenin mühendislik özelliklerinde etkisini incelemiştir. 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 (Sassani et al. 2017).

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 1.2. 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 1.2.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 1.2.c.'de de görüldüğü gibi toz halindeki karbon siyahı çimento taneleri arası boşlukları doldurarak fiber ile matris arasındaki ara yüzey alanı artmaktadır.



Şekil 1.2. Normal ve elektriksel iletken betonun iç yapısının şematik görüntüsü.

2. MATERYAL VE TEMEL DENEY YÖNTEMLERİ

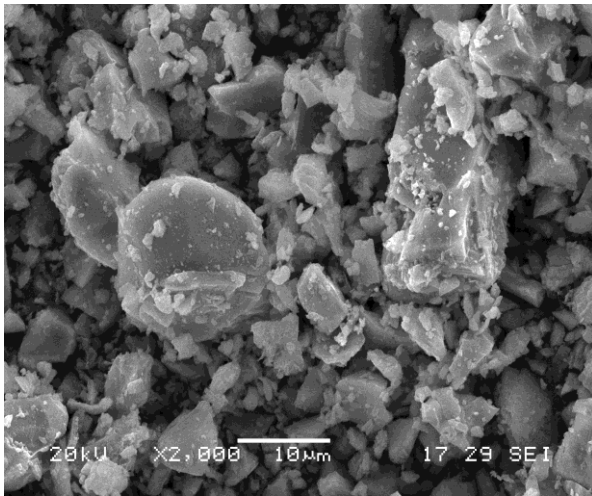
Bu bölümde, Projede kullanılan malzemeler ile ilgili detaylı açıklamalar sunulmuştur. Havaalanı pistlerinde kullanılmak amacıyla üretilen iletken betonların karışım optimizasyonu yapılarak çalışmanın bir sonraki aşamasında üretilen plaka numunelerin sayısının azaltılması sağlanmıştır.

2.1. Materyal

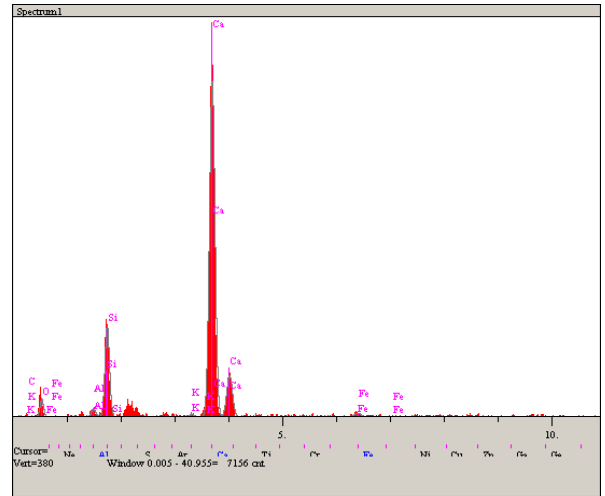
Projede bağlayıcı olarak 42.5 CEM I R tipi yüksek dayanımlı çimento tercih edilmiştir. Kullanılan çimentonun EDS analiz sonucu kimyasal elementleri Tablo 2.1'de özetlenmiştir. Ayrıca çimentonun SEM ve EDS analizleri yapılarak Şekil 2.1. de verilmiştir.

Tablo 2.1. 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



(a)

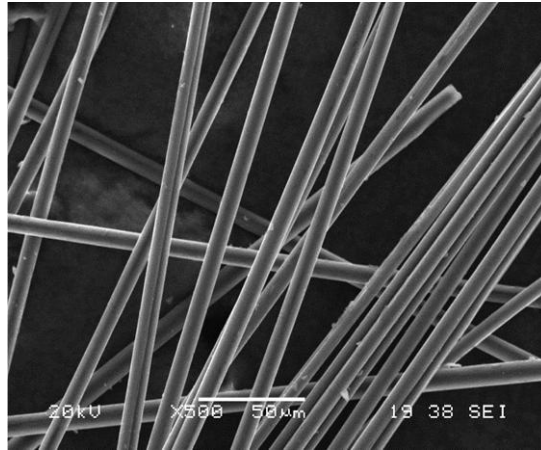


(b)

Şekil 2.1. Deneylerde kullanılan çimentonun SEM görüntüsü (a) ve EDS grafiği.

Çalışmada 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 kg/m^3) olarak alınmıştır. Deneyleerde, içilebilir nitelikte olan Sakarya Büyük şehir Belediyesi şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

Bu çalışmada toplam karışım ağırlığına oranla %0.2, %0.5 ve %1 olmak üzere üç farklı oranlarda, en etkin elektriksel katkı malzemesi olarak karbon fiber (KF) kullanılmıştır. Fiberlerin beton karışımında dağılımını kolaylaştırmak için dağıtıcı katkı malzemesi olarak karboksi metil selüloz 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 (Chang et al. 2013). Kullanılan karbon fiberin filament çapı $7.2 \mu\text{m}$ ve uzunluğu ise eşit oranlarında ki 6mm ve 12 mm'ye sahiptir. $7.2 \mu\text{m}$ Çapındaki karbon fiberin görüntüsü Şekil 2.2.'de verilmiştir.

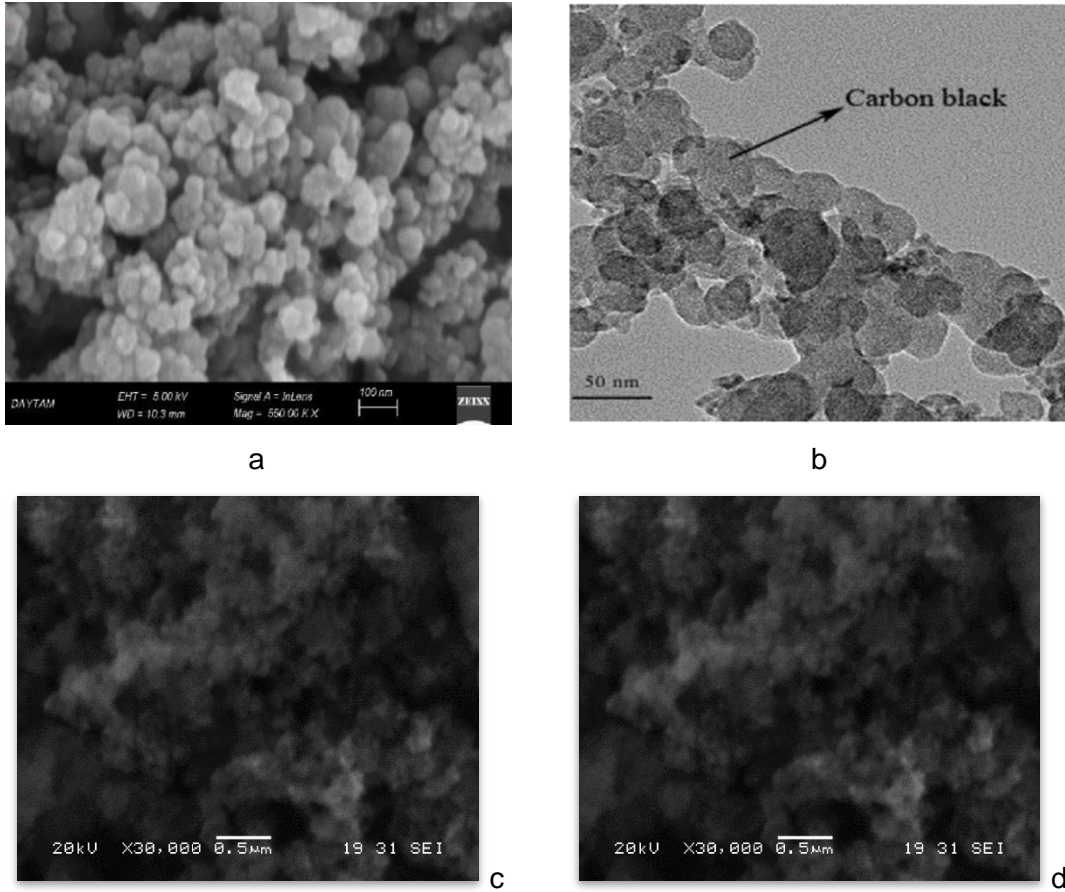


Şekil 2.2. $7.0 \mu\text{m}$ Çapında 12 mm uzunluğunda KF.

Piroliz yöntemi ile elde edilen nano karbon siyahı (NKS)'nin beton üzerindeki dayanım açısından etkileri Noruzi (2016) tarafından araştırılmış, farklı oranlarda bu nano malzemenin kullanılması sonuçlarına göre %4 nano karbon içeren beton numuneler maksimum basınç dayanımı sergilemiştir. Dolayısıyla bu malzemenin elektriksel iletkenlik artırılması amacıyla betonda kullanılması halde dayanım açısından problem olacağı düşünülmemektedir. Bu çalışmada bağlayıcının ağırlığına oranla 0, %3, %6 ve %10 olmak üzere 4 farklı oranlarda piroliz yöntemi ile elde edilmiş nano karbon siyahının değerlendirilmesi planlanmıştır. Piroliz yöntemi ile elde edilen nano karbon siyahının özgül yüzey alanı, üretim esnasında uygulanan sıcaklığın 600 C 'ye yükselmesi ile $88 \text{ m}^2/\text{g}$ 'ye kadar artırılabilir (Mikulova et al. 2013). Elde

edilen KS ASTM isimlendirilmesine göre N200-N330 arasında yer almaktadır (Norouzi 2016). Piroлиз yöntemi ile elde edilen NKS'nin SEM görüntüsü Şekil 2.3.'de verilmiştir.

Atık tel erzyon (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 (Dehghanpour et al. 2019). (Ipek 2017) Bu çalışmada, 0.25 mm çapında ve ortalama 25 mm uzunluğunda sarı renkli CuZn37 alaşımli atık tel erozyonu kullanılmıştır (Şekil 2.4.). ATE'nin elektrik direnci 0.00256 Ω -cm olarak ölçülmüştür.

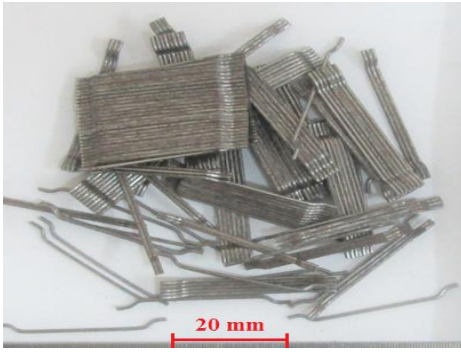


Şekil 2.3. Piroлиз yöntemi ile elde edilmiş karbon siyahının a; SEM (Norouzi., 2016) ve b; TEM görüntüsü ve c-d; mevcut çalışmada kullanılan NCS'nin SEM görüntüleri.



Şekil 2.4. Atık tel erezyon.

Bu çalışmada uzunluğu 30 mm, çapı 0.75 mm ve 1400 MPa çekme dayanımı olan çelik fiber kullanılmıştır (Şekil 2.5.). Çelik fiber içeren karışımların hepsinde çelik fiber oranı % 2 olarak seçilmiştir.



Şekil 2.5. Projede kullanılan çelik fiber.

Beton karışımında ince çaplı KF ve ince taneli KS 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 karboksil metil selüloz kullanılmıştır.

2.2. Karışım Tasarımı

Elektriksel iletken betonlarda kullanılan karbon fiberin optimum miktarı literatürdeki çalışmalara göre 0.75-1% olarak bulunmuştur (Sassani et al. 2017; Sassani et al. 2018). 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 kg/m^3) çelik fiber içerdiğine göre 2 gruptan oluşmaktadır. Karışım detayları Tablo 2.2.'de özetlenmiştir. NO 1-16 karışımları çelik fiber içermeyen karışım grubunu oluşturmaktadır ve No 16-32 karışım grupları % 2 çelik fiber içeren karışım grubunu oluşturmaktadır. Tablo 3.2.'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 (Sassani et al. 2018). Ayrıca karışımlarda KF oranı arttıkça çimento macun oranının azalması görünmüştür, 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 2.2.'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 2.2.'nin son 4 satırında verilmiştir.

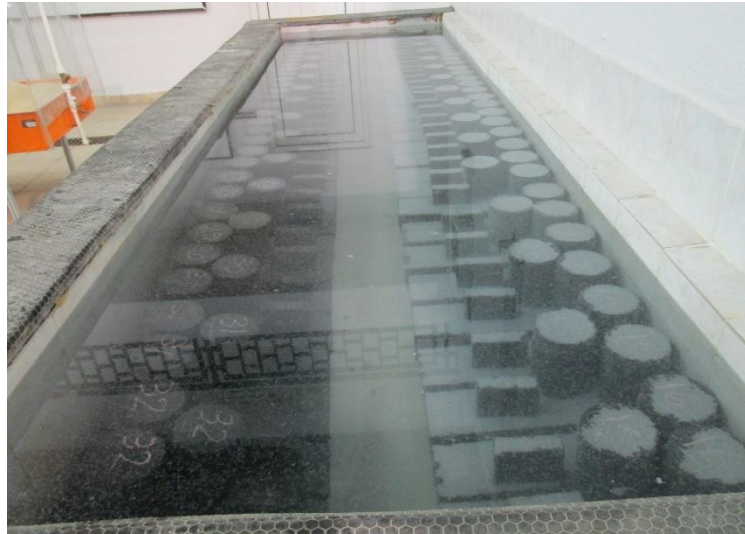
2.3. Karışımların Kalıplanması

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 2.7.'de verilmiştir. 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 2.8.). Numuneler 7 Gün boyunca kür için bekletildikten sonra çıkartılmıştır. Silindir numunelerin baş kısımları pürüzlü olduğu için 1 cm kesilmiştir (Şekil 2.9.). Bütün numuneler kurutulmaları için laboratuvar ortamında bekletilmiştir (Şekil 2.10.).



Şekil 2.7. Kalıplanmış numune örnekleri; a) basınç ve ED, b) eğilme deneyi ve c) çarpma deney numuneleri.



Şekil 2.8. Numunelerin kür havuzunda yerleştirilmesi.



Şekil 2.9. Silindir numunelerin pürüzlü taraflarının kesilmesi.



Şekil 2.10. Numunelerin oda sıcaklığında kurutulması.

Tablo 2.2. Karışım detayları.

No	Karışım Kodu	AI (kg)	All (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
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

Al: ince Agregası, All: iri agregası, ÇF: çelik fiber, NKS: nano karbon siyahı, KF: karbon fiber, KMS: karboksil metil selüloz, SA: süper akışkanlaştırıcı.

2.4. Temel Test Yöntemleri

2.4.1. 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 2.11.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 2.11.b).



Şekil 2.11. Basınç (a) ve eğilme (b) test cihazları.

Darbe durumları iki sınıfa ayrılabilir, yüksek ve düşük hızlı darbesi (Yahaghi et al. 2016). ACI 544.2R-89 (Shah et al. 1988) standardında önerilen çarpma testi, çimentolu malzeme

levhasının darbe dayanımını ölçmek için en uygun test yöntemidir (Nili and Afroughsabet 2010). 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 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 incelemiştirler (Yahaghi et al. 2016).

Bu çalışmada çarpma testi için 10 x 10 x 3 cm plaka numuneler üretilmiştir. Deneyin gerçekleşmesi için laboratuvarında tasarlanan çarpma aleti kullanılmıştır (Şekil 2.12.). 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 2.12. Çarpma test aleti.

2.4.2. 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 (Şekil 2.13). Uygulanan voltaj sonucu numunenin iki yüzey arasındaki gerçekleşen elektriksel akım ölçülür. Ohm kanununu kullanarak numunenin elektriksel direnci hesaplanır (Denklem 3.3).

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

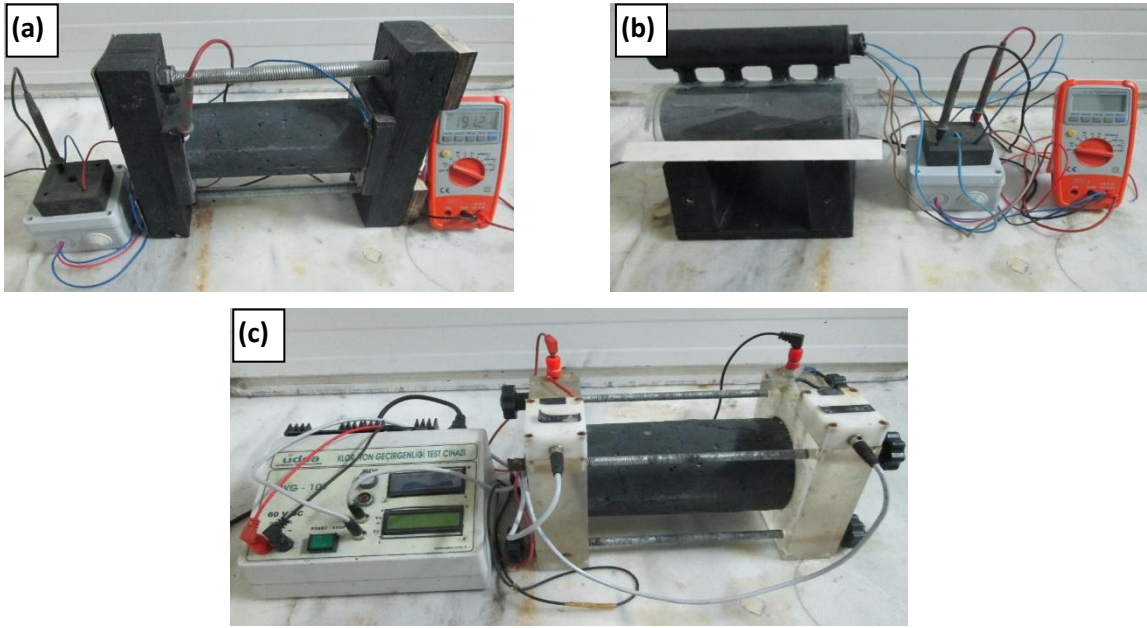
2. Dört proplu veya wenner prop yöntemi (WPY): bu yöntemde direnç ölçümü silindir bir numunenin yüzeyine temas edilen dört proplu ekipmana voltaj uyguluyarak gerçekleştirilir. Bu çalışmada kullanılan dört proplu yüzeysel direnç ölçme düzeneği Şek 2.13.'de verilmiştir. İki iç prop arası belirli bir potansiyel farkı uyguluyarak iki dış proplar arası gerçekleşen akım miktarı ölçülür. Ohm kanunundan direnç hesaplanır ve denklem 3.4'ü kullanarak numunenin yüzeysel öz direnci elde edilir.

$$\rho=2.\pi.a.R$$

(3.4)

Burada ρ elektriksel özdirenç, a proplar 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 2.13.) 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 2.13. İki noktalı tek eksenli (a), Wenner prop yöntemi (b) ve C1760-12 WYÖD (c) yöntemine göre iletkenlik ölçme ekipmanları.

3. 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 3.1'de özet olarak verilmiştir.

3.1. 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.

Tablo 3.1'de de 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 3.1. Elektriksel, mekaniksel ve çarpma deney sonuçları.

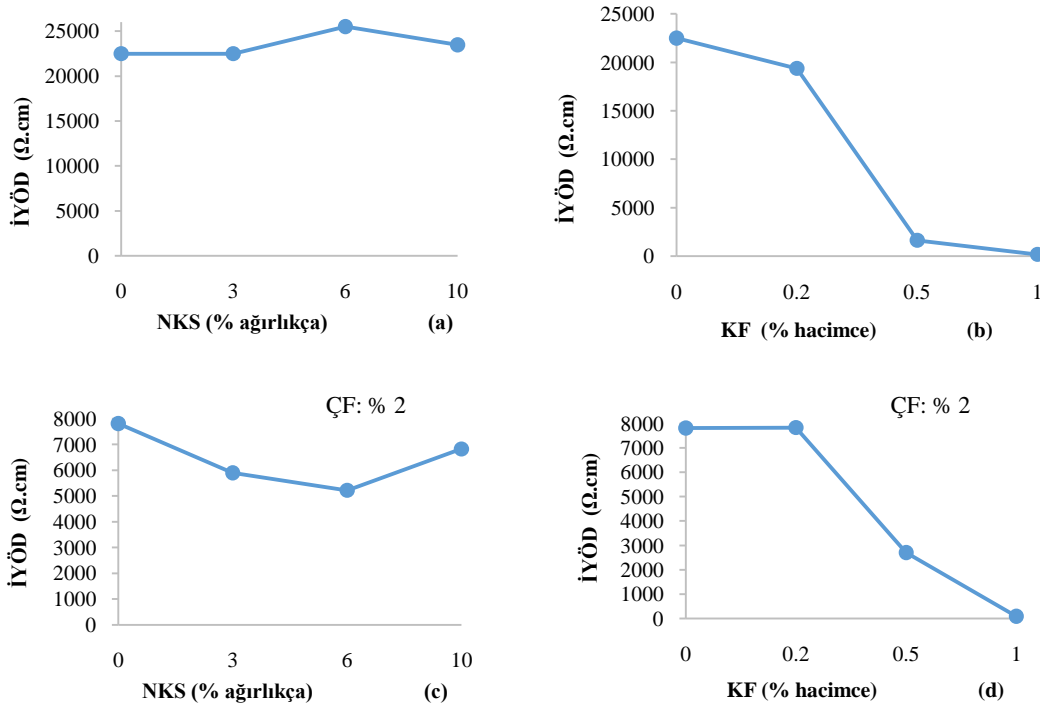
No	Numune kodu	İYÖD (Ω .cm)			WYÖD (Ω .cm)	ASTM-D (Ω .cm)	σ_c (Mpa)	σ_f (Mpa)	Eu (J)
		7 Gün	21 Gün	28 Gün					
1	N0K0Ç0	7233,08	10660,80	22496,10	95209.00	7291.02	44,15	4,98	22,66
2	N3K0Ç0	7022,59	11106,86	22496,10	93483.00	7291.02	44,45	6,33	27,52
3	N6K0Ç0	10379,29	13012,45	25524,42	94950.84	8548.09	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

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

3.1.1. 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 3.1.a). Bu karışımlara % 2 ÇF ilave edildiği zaman İYÖD değerlerinin 3 kattan daha fazla azaldığı gözlenmiştir (Şekil 3.1.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 3.1.).

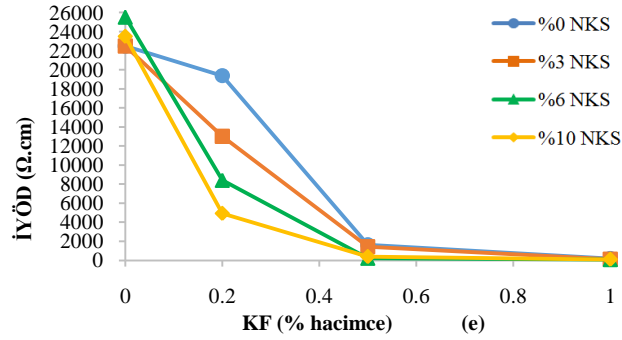
KF'in beton üzerinde vurguladığı etki düşük oranlarda kullanıldığı zaman da ortaya çıkmıştır, ancak Şekil 3.1.b'de de görüldüğü gibi KF içeriği % 0.5'in üzerine çıktığı zaman İYÖD değerleri yüksek hızla azalmıştır. KF ile % 2 ÇF ikisi bir arada kullanıldığı zaman İYÖD değerinin sadece KF içeren numune 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 3.1. KF ve NKS içeren iletken betonların iki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerleri.

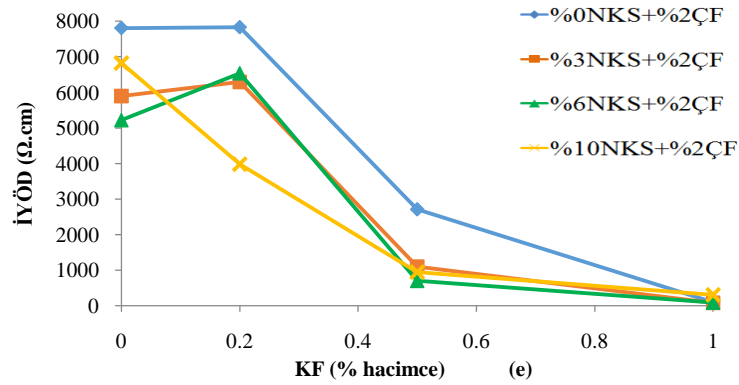
Şekil 3.2.'de farklı oranlarda KF içeren karışımlar üzerinde NKS oranının ED açısından etkisi araştırılmıştır. NKS içeriğinin artmasıyla KF'in direnç azaltma kabiliyeti, 2 ile 7 kat arasında artmıştır. Bu durum özellikle az miktarlarda KF içeren karışım sonuçlarında yani birinci

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.



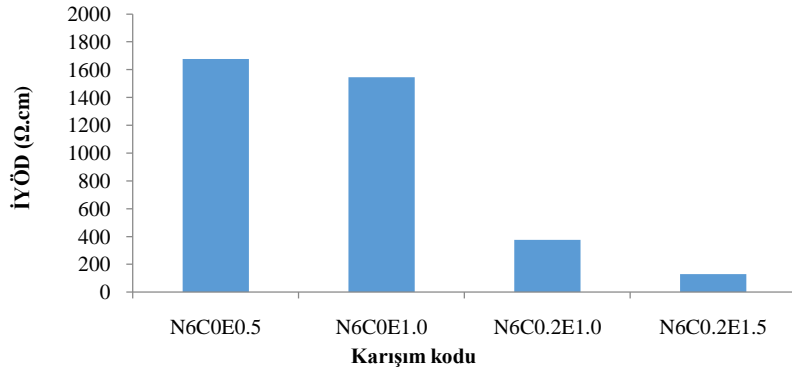
Şekil 3.2. İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması.

Üç fazlı elektriksel iletken betonların İYÖD değerleri Şekil 3. 3.'de grafikler halinde verilmiştir. Bütün grafiklerde İYÖD değerleri normal betona kıyasla yaklaşık 3 kat azalmıştır ve NKS her üç oranda da kullanıldığı halde İYÖD değerleri sadece ÇF içeren numuneye kıyasla 2 ile 4 kat arasında azalmıştır.



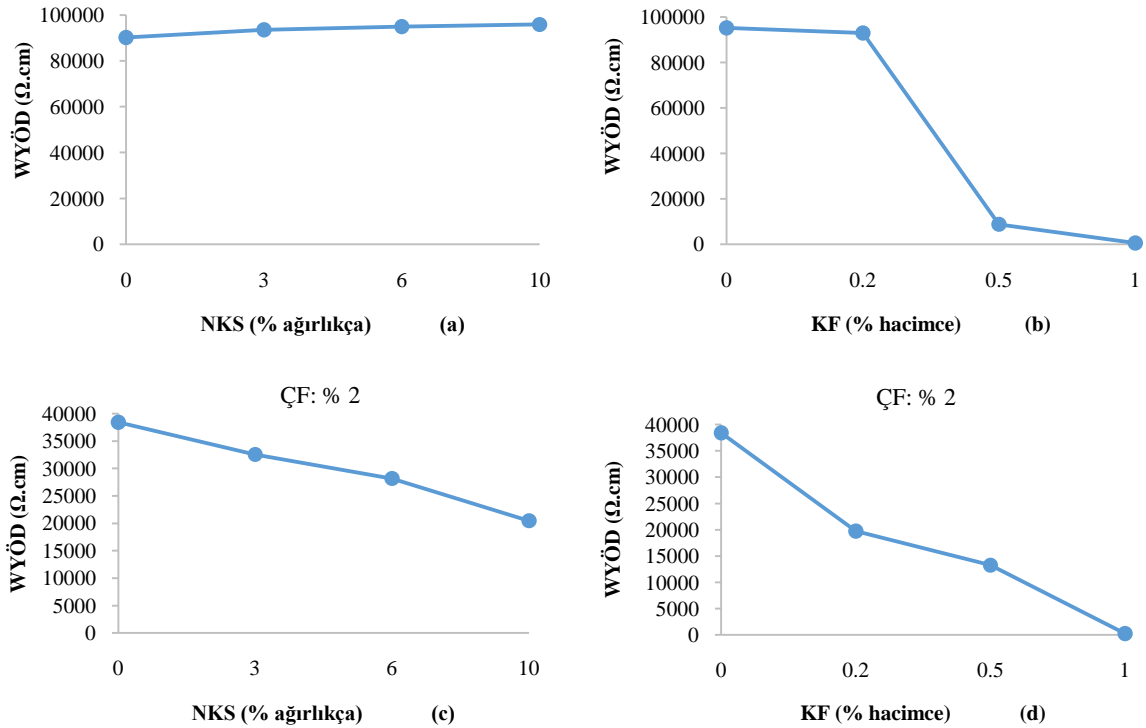
Şekil 3.3. NKS, KF ve ÇF içeren betonların İYÖD değerlerinin kıyaslanması.

ATE içeren dört karışımın elektriksel direnci, hem CF kullanıldığında hem de kullanılmadan 1700 Ω.cm'nin altında ölçülmüştür (Şekil 3.4.). Oysa kontrol örneğinin İYÖD'si 22000 Ω.cm'nin üzerinde rapor edilmiştir (Tablo 3.1.). 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 Ω.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 Ω.cm olarak elde edilmiştir.



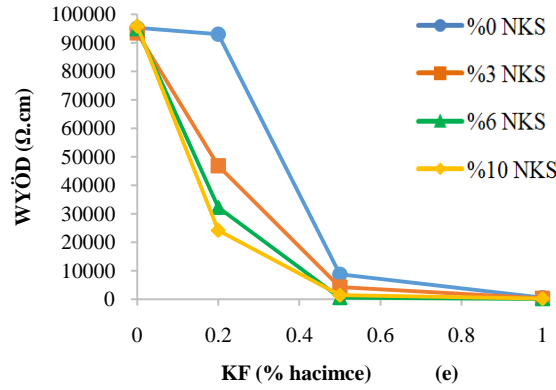
Şekil 3.4. NKS, KF ve ATE içeren betonların İYÖD değerlerinin kıyaslanması.

Şekil 3.5.'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 Ω.cm olarak diğer karışım sonuçlarına göre oldukça düşük çıkmıştır.



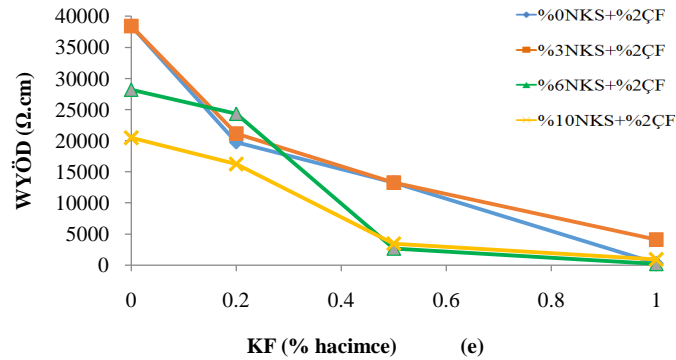
Şekil 3.5. KF ve NKS içeren iletken betonların Wenner prop yöntemi ile ölçülen WYÖD değerleri.

Farklı oranlarda KF içeren elektriksel iletken betonların WYÖD değerleri KF içeriğinin artmasıyla artmıştır (Şekil 3. 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 Ω .cm ken % 3 NKS eklenerek bu değer 10 kat azalarak 8995 Ω .cm düşmüştür. % 0.5 KF ve % 6 NKS içeren WYÖD değeri sadece % 0.5 KF içeren numuneye kıyasla 15 kat azalarak 560 Ω .cm olarak ölçülmüştür. Maksimum (% 1) KF içeren numunenin WYÖD değeri 3 kat azalarak 569 Ω .cm'den 188 Ω .cm'ye düşmüştür. Bu durum Şekilde 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 3.6. Wenner prop yöntemi ile ölçülen WYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması.

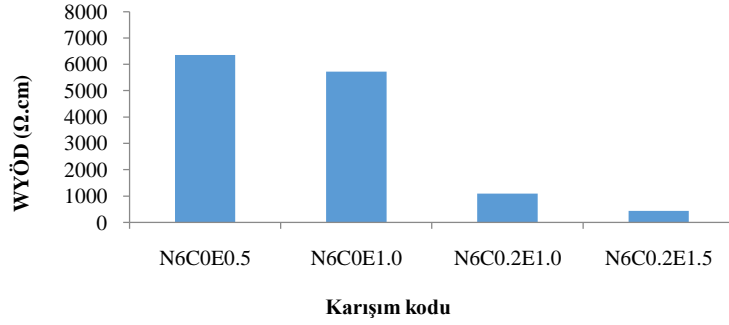
Üç fazlı elektriksel iletken betonların WYÖD değerleri Şekil 3.7.'de grafikler halinde verilmiştir. KF, NKS ve ÇF üçü bir arada kullanıldığı zaman en iyi WYÖD sonuçları % 3 ve 6 NKS, %1 KF ve % 2 ÇF içeren karışımlar ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Şekil 3.7.'den de anlaşıldığı gibi NKS içeriği yüksek olan karışımların WYÖD değerleri diğerlerine göre 1.5 ~ 5 kat daha düşük çıkmıştır.



Şekil 3.7. NKS, KF ve ÇF içeren betonların WYÖD değerlerinin kıyaslanması.

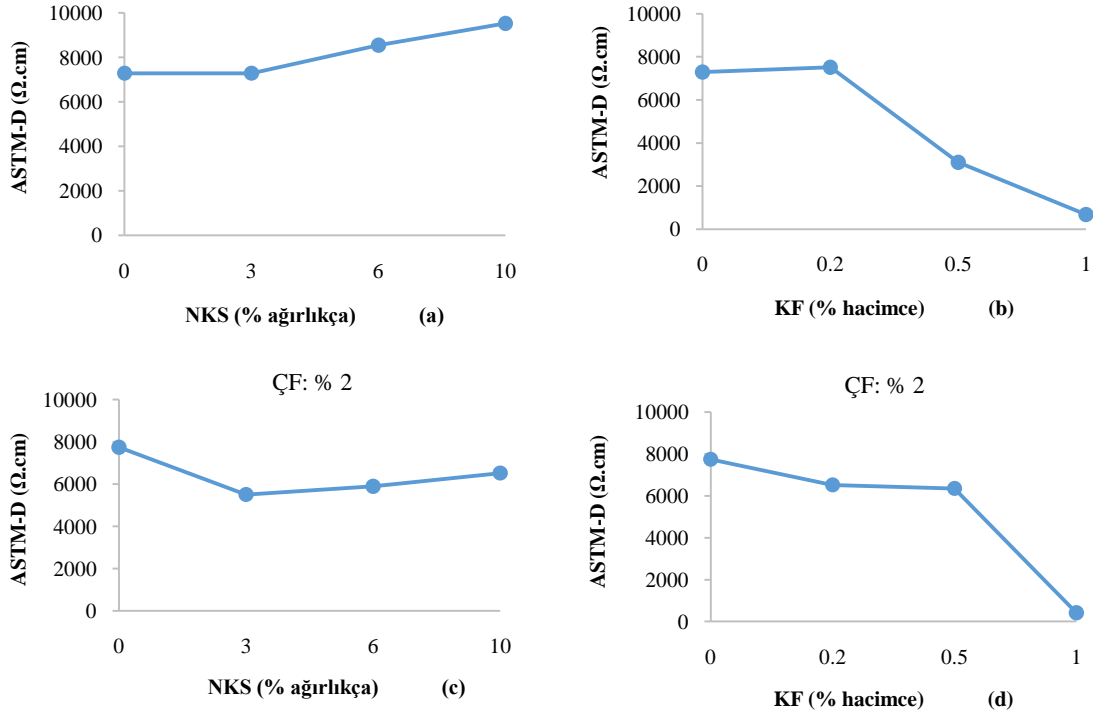
ATE içeren karışımların WYÖD'leri 6352,45 ve 441.18 Ω .cm arasında ölçülmüştür (Şekil 3.8.). 6352,45 Ω .cm, ağırlıkça % 6 NKS, hacimce % 0 KF ve % 0,5 ATE içeren karışım için ve

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.



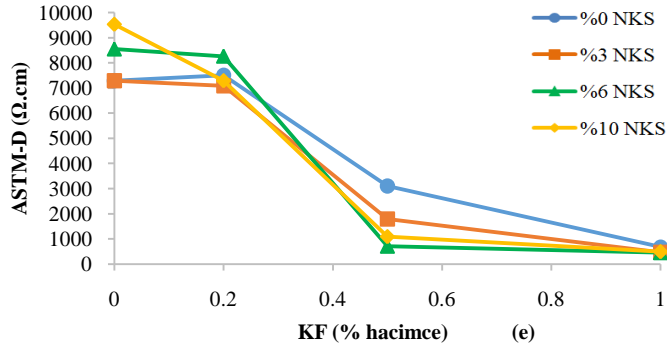
Şekil 3.8. NKS, KF ve ATE içeren betonların WYÖD değerlerinin kıyaslanması.

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 3.9.c). KF-ÇF içeren karışımların ASTM-D değerleri sadece KF içeren karışımların sonuçlarıyla karşılaştırıldığında ÇF'in eklenmesi betonun direncinde kayda değer bir etkisi bulunmamıştır.



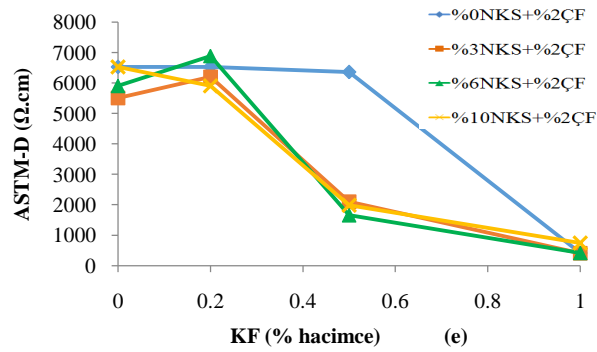
Şekil 3.9. KF ve NKS içeren iletken betonların C1760-12 ASTM standartına göre ölçülen ASTM-D değerleri.

Şekil 3.10.'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 3.10. İki noktalı tek eksenli yöntem ile ölçülen İYÖD değerlerinin NKS içeriğine göre kıyaslanması.

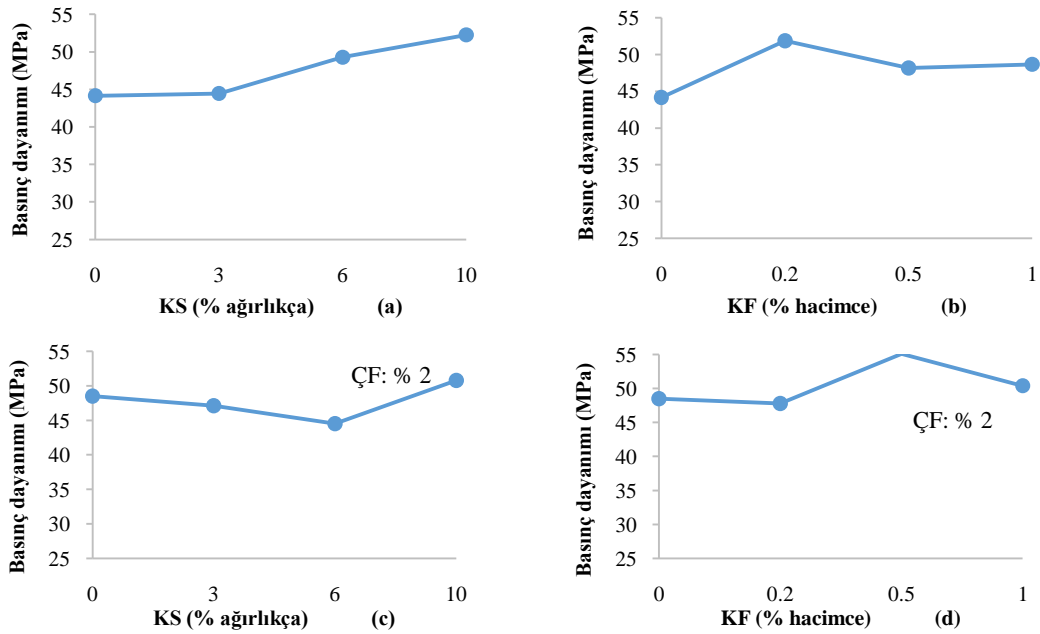
Şekil 3.11.'de üç fazlı elektriksel iletken betonların ASTM-D değerleri verilmiştir. Bütün grafiklerde ASTM-D değerlerinin normal betona kıyasla azaldığı görülmektedir. NKS her üç oranda da kullanıldığı zaman ASTM-D değerleri sadece ÇF içeren numuneye kıyasla azalmıştır. Özellikle % 0.5 NKS içeren üç fazlı iletken betonlarda önemli bir direnç azalması görülmüştür (yaklaşık 4 kat). Ancak KF oranının %1'e kadar arttığı zaman ASTM-D değeri en düşük olarak kaydedilmiştir fakat NKS etkisiz hale gelmiştir.



Şekil 3.11. NKS, KF ve ÇF içeren iletken betonların ASTM-D değerlerinin kıyaslanması.

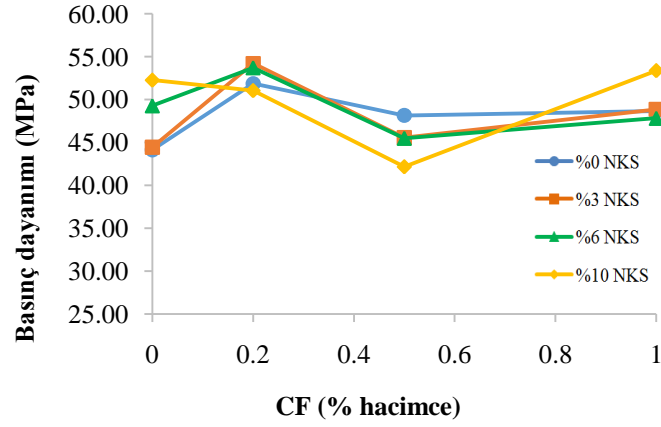
3.2. Basınç Deneyleri

Üretilen elektriksel iletken betonların basınç değerleri farklı faktörlere göre kıyaslanarak Şekil 3.12.'de grafiksel olarak özetlenmiştir. Şekil 3.12.'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 3.12.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 3.12.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 3.12.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.



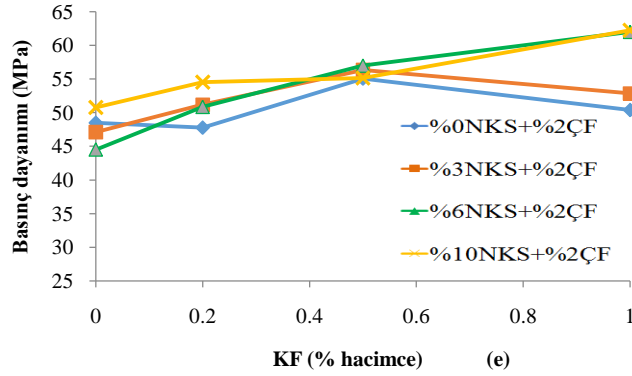
Şekil 3.12. KF ve NKS içeren iletken betonların basınç dayanımları.

Şekil 3.13.'de de görülmek üzere KF ile NKS birlikte kullanıldığı zaman basınç dayanımında kayda değer bir gelişme görülmemiştir. Bu karışım grubunda minimum basınç dayanımını % 0.5 KF ve % 10 NKS içeren numuneye aittir (42.16 MPa) ve maksimum basınç dayanımının % 1 KF ve % 10 NKS içeren numuneye ait olduğu belirlenmiştir (53.37 MPa).



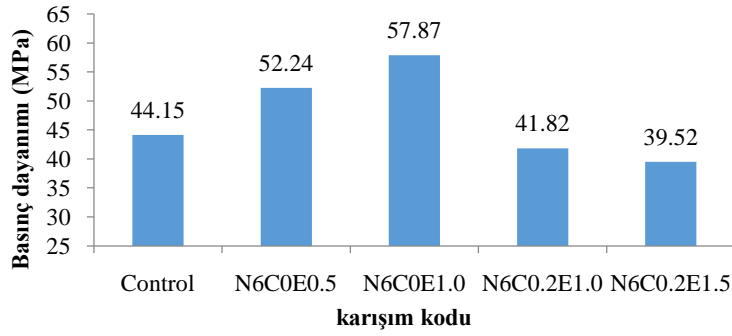
Şekil 3.13. KF içeren iletken betonlarda NKS oranlarının basınç dayanımına etkisi.

KF, NKS ve ÇF içeren elektriksel iletken betonların basınç dayanımları Şekil 3.14.'de sunulmuştur. NKS içermeyen numunelerde düzenli bir dayanım artışı görülmemiştir, ancak NKS içeren KF takviyeli bütün karışımlarda KF miktarının artmasıyla basınç dayanımı da artmıştır. %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 3.14. Üç fazlı elektriksel iletken betonlarda basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

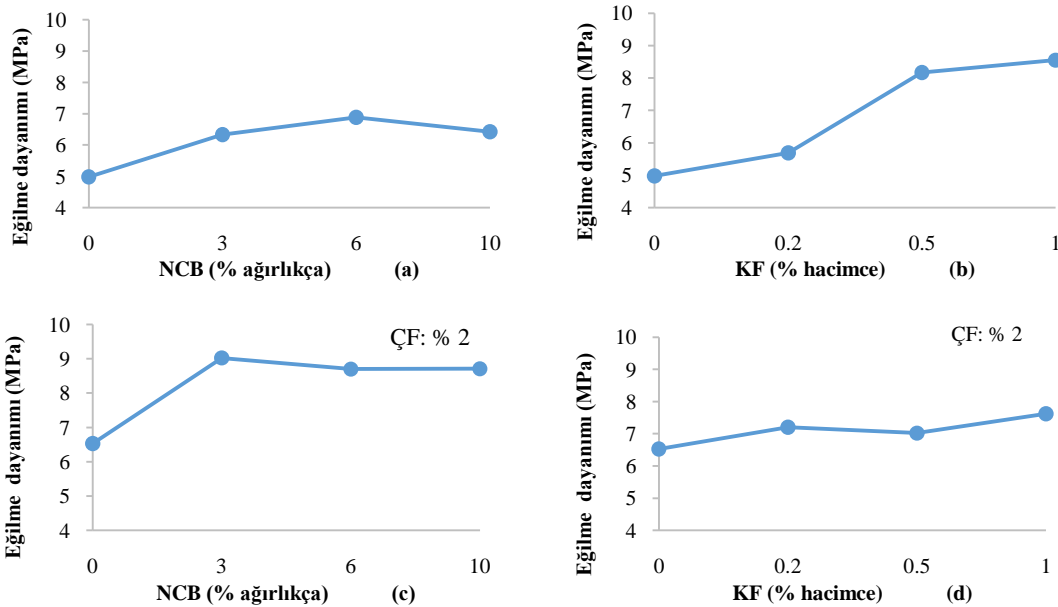
NKS, KF ve ATE içeren iletken beton numunelerin basınç dayanımları Şekil 3.15.'de verilmiştir. KF olmadan, ATE oranının hacimce % 0.5'den %1'e artmasıyla basınç dayanımı %11 artmıştır. Aynı zamanda bu iki numunelerin basınç dayanımları kontrol numuneye kıyasla, sırasıyla %18 ve %32 gelişmiştir. Hacimce %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 3.15. ATE içeren betonlarda basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

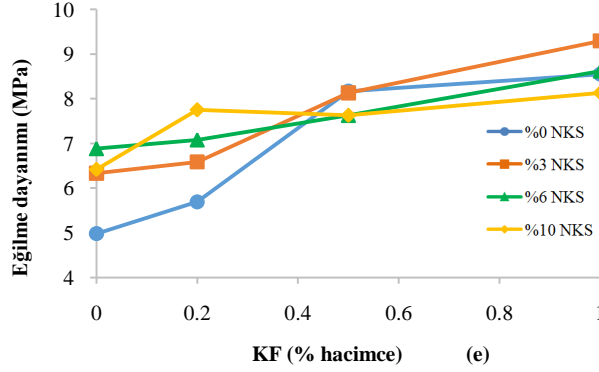
3.3. Eğilme Deneyleri

Üretilen bütün elektriksel iletken betonların NKS, KF ve ÇF içeriğine göre eğilme özelliği incelenmiş ve aşağıda grafikler halinde özetlenmiştir. NKS'nin beton üzerinde eğilme dayanımı açısından olumlu etkisi Şekil 3.16.a.'dan görülebilir. Kontrol beton numunesinin 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 3.16.c). Bu durumda maksimum eğilme dayanımı % 3 NKS katkılı betonda 9.02 MPa olarak elde edilmiştir. KF'in de önemli derecede olumlu etkisi Şekil 3.16.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.



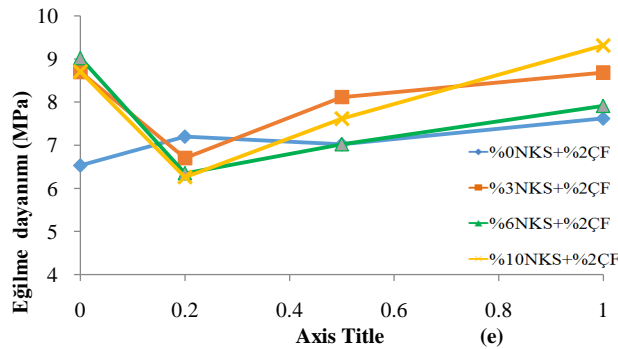
Şekil 3.16. NKS ve KF içeren iletken betonların eğilme dayanımlarının kıyaslanması.

Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların eğilme dayanımları NKS içeriğine göre incelenmiştir ve Şekil 3.17.'te kıyaslanarak verilmiştir. %3, %6 ve %10 olarak her üç oranda da NKS eklendiğinde eğilme dayanımları, % 20 ~ % 80 artarak, 6 ile 9 MPa arasında elde edilmiştir ki sadece KF içeren karışımlara kıyasla önemli değişiklik bulunmamaktadır.



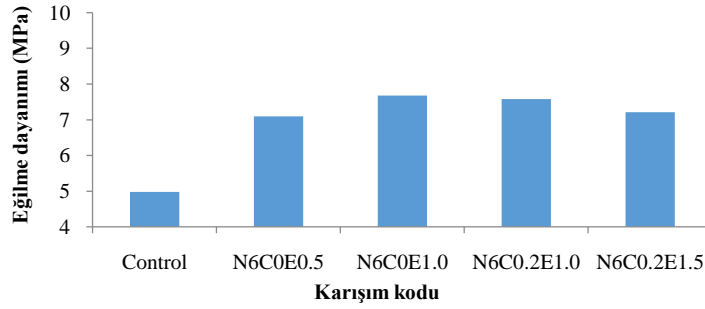
Şekil 3.17. Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların eğilme dayanımlarına NKS'nin etkisi.

Şekil 3.18.'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. %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 3.18. İletken betonlarda NKS, KF ve ÇF'in eğilme dayanımına etkisinin incelenmesi.

NKS, KF ve ATE içeren tüm iletken beton numunelerin eğilme dayanımları kontrol numunenin eğilme dayanımına kıyasla artmıştır (Şekil 3.19.). 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.

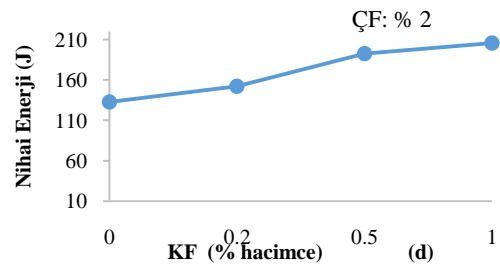
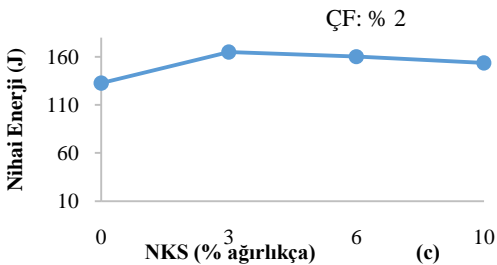
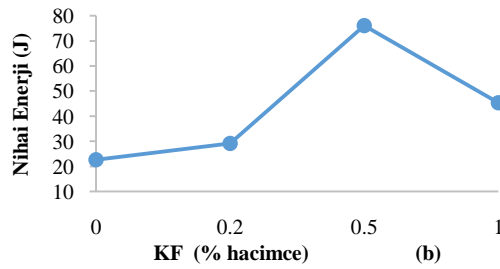
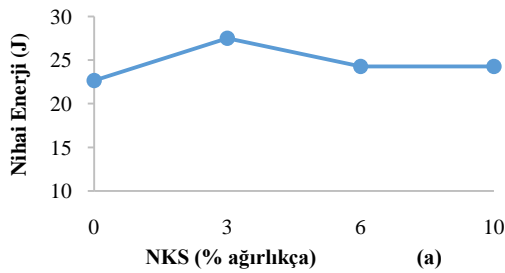


Şekil 3.19. ATE içeren betonlarda basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

3.4. Çarpma DeneYleri

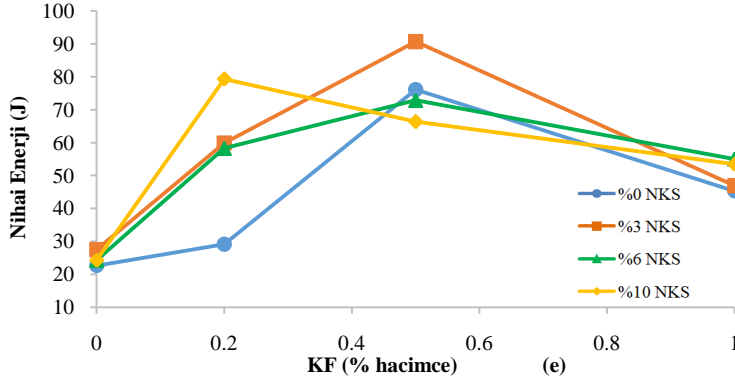
Bölüm 3.5.2'de açıklanan çarpma test yöntemi ile farklı karışımlardaki iletken betonların darbeye karşı absorbe ettiği enerji miktarı hesaplanmış ve aşağıdaki şekillerde grafikler halinde sunulmuştur. Üç farklı oranlarda NKS içeren betonlar ile kontrol numune arasında çarpma enerjisi açısından anlamlı bir fark bulunmamıştır ve nihai enerji değerleri 22 ile 27 J arasında hesaplanmıştır (Şekil 3.20.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 3.20.c).

Üç Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarı Şekil 3.20.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.



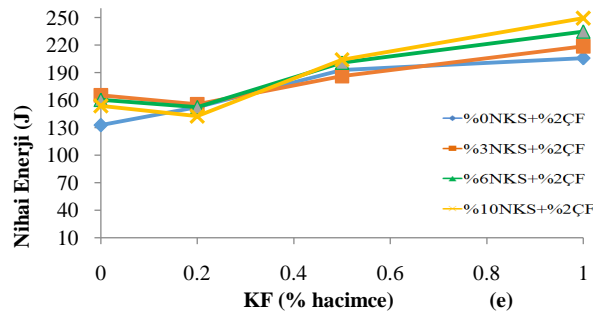
Şekil 3.20. NKS ve KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarlarının kıyaslanması.

Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarına NKS'nin etkisi Şekil 3.21.'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. % 10 NKS kullanıldığında maksimum enerji miktarı %0.2 KF içeren numune ile ilişkili olduğu anlaşılmıştır ve KF oranının artmasıyla enerji miktarı azalmağa başlamıştır.



Şekil 3.21. Farklı oranlarda KF içeren iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarına NKS'nin etkisi.

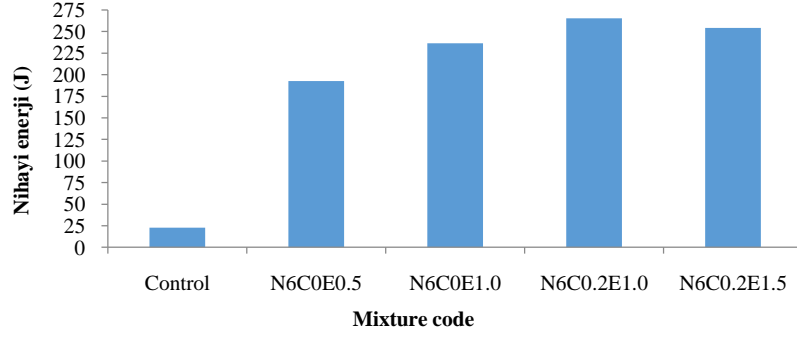
Şekil 3.22.'de üç fazlı elektriksel iletken betonların çarpmaya karşı absorbe ettikleri nihai enerji miktarları grafiklerde karşılaştırılmıştır. Hem ÇF ve hem NKS katkılı iletken betonlarda KF oranının artmasıyla nihai enerji miktarı 11 kata kadar artmıştır.



Şekil 3.22. İletken betonlarda NKS, KF ve ÇF'in çarpmaya karşı absorbe ettiği enerji miktarına etkisinin incelenmesi.

ATE içeren tüm iletken betonların nihai enerji değerleri kontrol numuneye kıyasla ok kattan daha fazla artmıştır (Şekil 3.23). ATE içeriğinin artmasıyla, çarpma enerji değerleri tüm numunelerde artmıştır ancak N6K0.2E1.5 numunenin absorbe ettiği enerji değerinde hafif bir

azalma görülmüştür. Bu grupta maksimum çarpma enerjisi 265.46 J olarak N6K0.2E1 için elde edilmiştir.



Şekil 3.23. ATE içeren betonlarda Çarpmaya karşı dayanımlarının karşılaştırılması.

4. ELEKTRİKLİ ISITMALI YOL KAPLAMA SİSTEMLERİ

4.1. 3D ELEKTROTHERMAL MODELLEME

Bu kısımdaki temel amaç, 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 (Abdualla 2018). 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 (Cengel et al. 1998; Abdualla 2018):

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

ρ (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, ∇ Laplace operatör, k ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) cinsinden ısı iletkenliği ve Q (W/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 (Tungjtkusolmun et al. 2000):

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

Burada, E elektrik alanıdır, V elektriksel potansiyeldir ve ∇ 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:

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

Burada, J (A/m²) cinsinden elektrik akımı yoğunluğu, σ (S/m) cinsinden elektriksel iletkenliktir ve E (V/m) cinsinden elektriksel alandır. Elektrik iletkenliğinin değeri, malzeme sıcaklığına bağlı olarak (σ)'dır.

4.1.1. 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 (Système 2010). Bir analiz işlemi Abaqus'ta şöyle tanımlanır:

1. Sorun geçmişini adımlara bölmek;
2. Her adım için bir analiz prosedürünün belirlenmesi
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, sürünme, 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 karşılaştıracaktır. 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.

4.1.2. Elektriksel Analiz Prosedürleri

Abaqus / Standard'ta elektriksel potansiyeli içeren iki tür analiz yapılabilir (Systemes 2010):

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 ısı-elektrik problemleri doğrusal veya doğrusal olmayabilir.

2. Piezoelektrik analizi: Piezoelektrik malzemesinde elektrik potansiyeli gradyanı gerilmeye, stres ise malzemede 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.

4.1.3. EİB plakaların Abaqus programında 3-D Modellenmesi

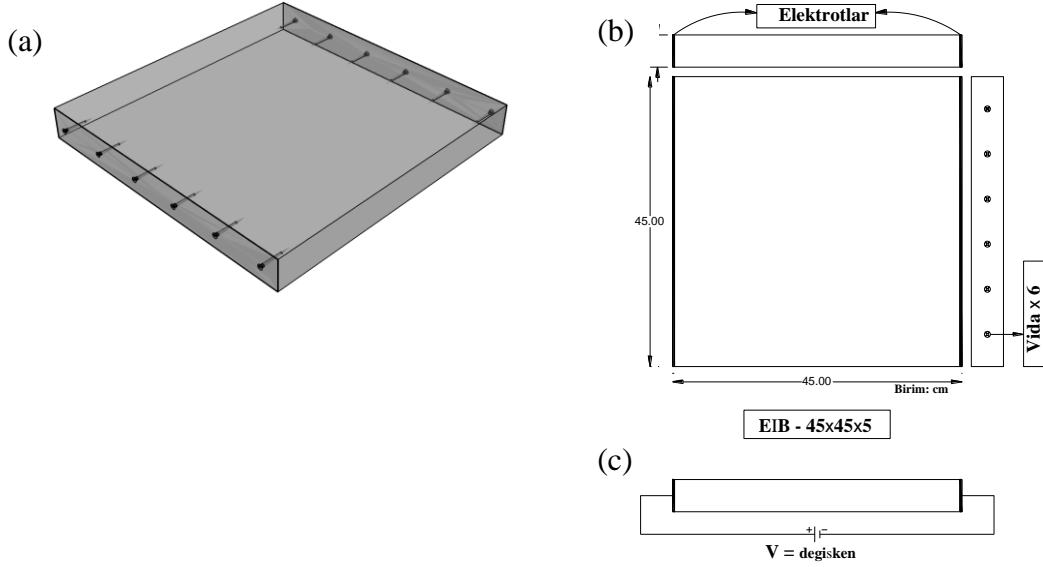
Bir FE modelleme programı olarak Abaqus 6.1'i kullanarak EİB plakalarının eşleşmiş termal-elektrik (elektrotermal) analizi gerçekleştirilmiştir. Modellenmesi amaçlanan EİB plakalarının elektriksel iletkenlik değerleri çalışmanın birinci aşamasında daha önceden laboratuvarında üretilen 10 X 20 silindir 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 °C 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 saç 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 4.1.'de modellerdeki tasarlanan plaka ebatları ve beton ile elektrotlar arasındaki bağlantı görüntüsü verilmiştir.

Sınır koşulları:

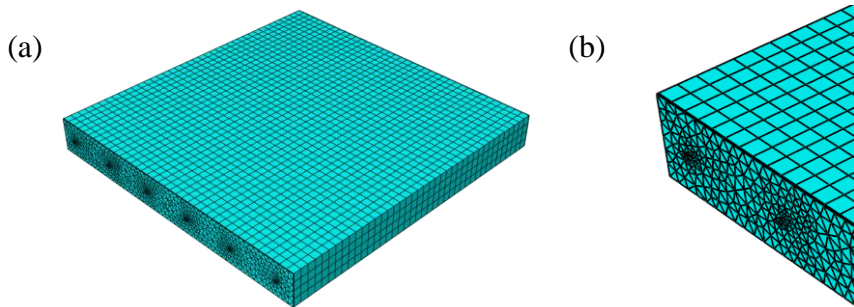
Bütün modellerde EİB plakaların ilk sıcaklıkları $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak plakaların kütlesine tanımlanmıştır. Bu sıcaklık sınırı çalışmanın deneysel kısmında kullanılan soğutucu dolabın en soğuk ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) sıcaklık derecesine göre seçilmiştir. Elektrik yükü olarak, plakaların iki tarafına paralel olarak modellenen elektrotlar arasında farklı voltlarda potansiyel farkı uygulanmıştır Şekil 4.1.c. Uygulanan voltajlar numuneden numuneye direnç değerlerinden dolayı değişmektedir.



Şekil 4.1. 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. 4.2.'de EİB plakasının 3-D ağ görünümü verilmiştir.



Şekil. 4.2. EİB plakasının 3-D ağ görünümü (a), büyütülmüş elektrot ve etrafındaki ağ görünümü (b).

4.2. 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 4.1.'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 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. 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)	AIİ (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 numunelerin 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 4.3.). Numuneleri birer birer soğutucuda ahşap üzerine yerleştirerek açılan deliklere termometrelerin uçlarındaki metal kısımları monte edilmiştir.

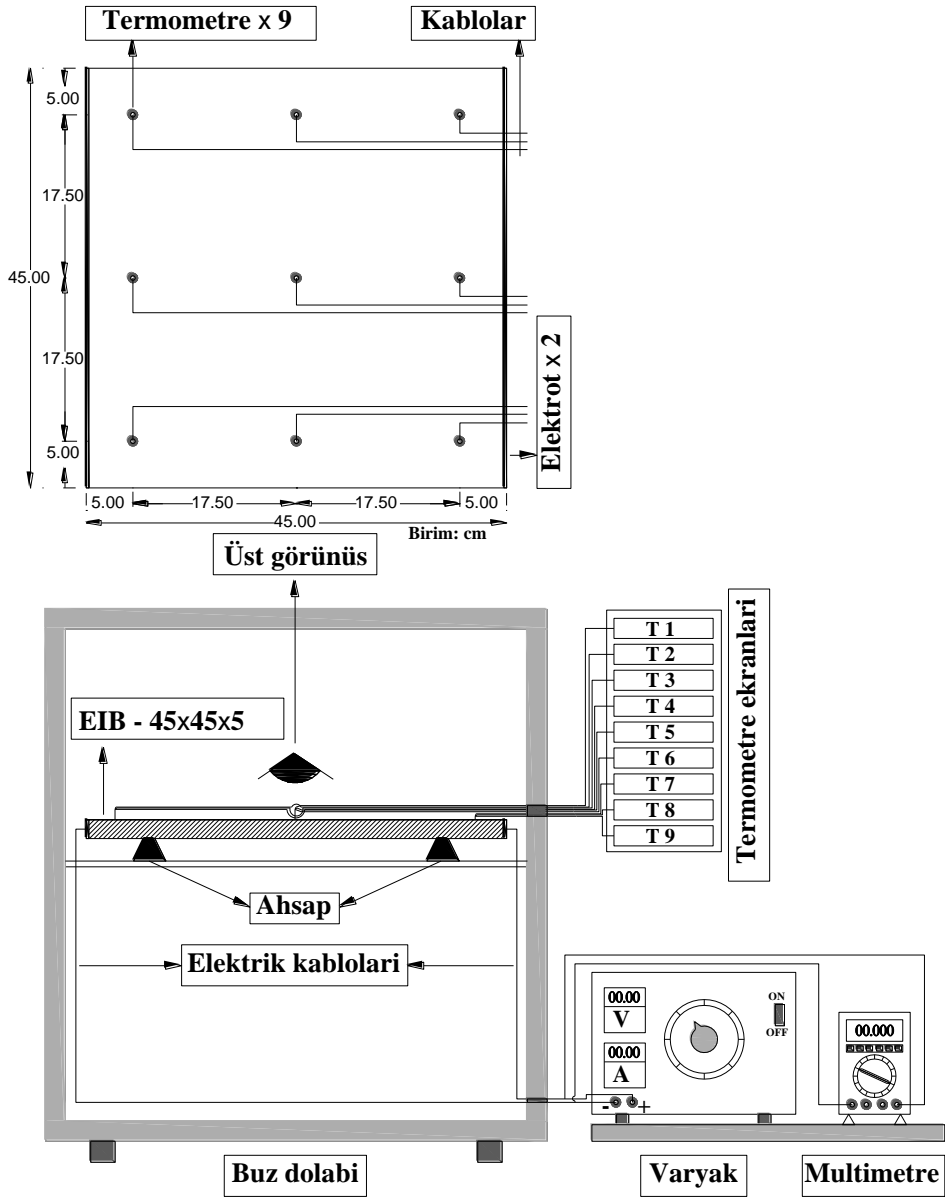
Şekil 4.3.'de de görüldüğü gibi plaka numunesinin iki tarafında yer alan paslanmaz çelik saçtan yapılmış elektrotlar arasında ayarlanabilir varyak vasıtasıyla farklı voltajlar uygulayarak elektrotermal testleri gerçekleştirilmiştir.

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.

Deneylerde 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 N6K0E1 plaka 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 özdirenç 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 tespit edilmiştir.

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



Şekil.4.3. EİB plakaların elektrotermal deney düzeneği.

Tablo 4.2. 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 (Ω .cm)				WYÖD (Ω .cm)	ASTM-D (Ω .cm)	σ_c (MPa)	σ_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

5. ELEKTRİKSEL İLETKEN YOL KAPLAMA SİSTEMLERİ BULGULARI

Bu bölümde farklı karışımlara sahip iletken betonlar arasında, 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 yanıltıcı bilgiler elde edilmiştir. Bu sorun Abdulla'nın (Abdulla 2018) 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.

5.1. Elektrotermal Sonuçları

ECON plakalarının zamana bağlı sıcaklık değerleri ölçülmüştür ve ayrıca ısı ve güç tüketimi, hem simülasyon hem de deneysel yöntemlerde farklı voltajlar uygulanarak karşılaştırılmıştır. Test süreleri numunelerin sıcaklığına bağlı olarak seçilmiştir. Hızlı ısınan örnekler için, deney erken sonlandırılmış ve uzun süre ısınanlar için daha geç sonlandırılmıştır. Tüm karışımlar için, silindir numunelerindeki ölçülen direnç değerleri, plaka örneklerinin direnç değerlerinden daha düşüktü ki buda 3D elektrotermal sonuçlarda yanıltıcı bilgi verebilir.

Bu nedenle, ilk olarak, silindir örneklerinin iletkenlik özelliklerine göre 3D modelleme yapılmıştır. Bir sonraki adımda üretilen levhaların termal sonuçlarını doğrulamak için levha örneklerinin iletkenlik özelliklerine göre 3D modelleme yapılmıştır.

Ağırlıkça% 6 NCB ve hacimce% 0.2 CF içeren karışımın farklı voltajlarda levha örneğinin elektrotermal sonuçları Tablo 5.1'de verilmiştir.

Bu karışımın ölçülen elektriksel direnç değerleri yüksek olduğundan, hem 3D simülasyonda hem de deneysel sonuçlarda uygulanan farklı voltajlarda önemli bir sıcaklık artışı

gözenmemiştir. Deney sonuçları, deneylerde çeşitli gerilimler uygulanarak 480 dakika boyunca kaydedilmiştir. Bu karışım için oda sıcaklığında ölçülen direnç değerleri, silindir ve levha örnekleri için sırasıyla 4916 ve 42553 Ω .cm 'dir.

Ağırlıkça %6 NCB ve hacimce %0.5 CF içeren karışımın silindir numunelerinin öz direnç değerleri de slab örneklerinin öz direnç değerlerinden daha düşüktü. Bu karışım için oda sıcaklığında ölçülen direnç değerleri, silindir ve levha örnekleri için sırasıyla 223 ve 4444 Ω .cm 'dir. Bu örnek için, uygulanan voltaj farkı ne kadar yüksek olursa, sıcaklık değerleri de o kadar yüksek kaydedilmiştir.

Tabloda elde edilen sonuçlara göre, dört farklı voltaj uygulayan elektrotermal davranışın deneysel ve modelleme sonuçları arasındaki benzerliklerini göstermektedir. Modelleme ve deneysel sonuçlarda, 220V voltaj uygulayarak, sıcaklık artış oranı belirli bir süre sonra azalmaktadır. Bunun nedeni, levha örneğine voltaj uygulandıktan sonra, elektrik akımının hızının başlangıçtaki sıcaklık artışıyla artması ve daha sonra sıcaklık belirli bir dereceye ulaştıktan sonra akımın artış hızının azalmasıdır. İletkenlik değerleri deney sırasında farklı sıcaklıklarda ölçülen akım değerlerine göre hesaplanmış ve aynı değerler Abaqus programında kullanılmıştır. Yapılan deneylere göre farklı karışımlar için elde edilen sonuçlar Tablo 5.1'de verilmiştir.

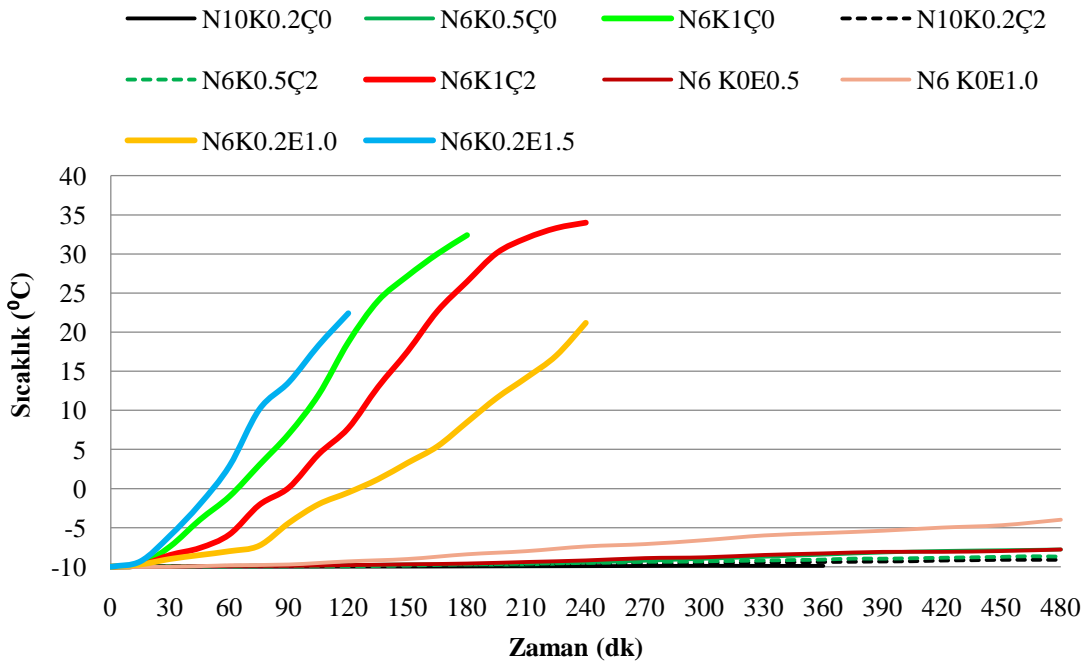
Tablo 5.1. Elektrotermal test sonuçları, N:Nano karbon siyahı, C:Karbon fiber, S:Çelik fiber, E:Atık tel erozyonu

Specimen code	voltage	Time (min)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	480		
N10C0.2S0	100 V	Exp	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	
		Model	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.7
	140 V	Exp	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-9.9	-9.9	-9.9	-9.8	-9.8	-9.8	-9.7	-9.7	-9.7	-9.6	-9.6
		Model	-10.0	-10.0	-10.0	-9.9	-9.9	-9.9	-9.8	-9.8	-9.8	-9.7	-9.7	-9.7	-9.7	-9.6	-9.6	-9.6	-9.5	-9.5	-9.5
	180 V	Exp	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-9.9	-9.8	-9.8	-9.8	-9.7	-9.7	-9.6	-9.6	-9.5	-9.4	-9.4	-9.3	-9.2
		Model	-10.0	-10.0	-9.9	-9.9	-9.8	-9.8	-9.7	-9.7	-9.6	-9.6	-9.5	-9.5	-9.4	-9.4	-9.3	-9.2	-9.2	-9.1	-9.1
	220 V	Exp	-10.0	-10.0	-10.0	-9.9	-9.8	-9.8	-9.8	-9.7	-9.6	-9.5	-9.4	-9.4	-9.3	-9.2	-9.1	-9.0	-8.9	-8.8	-8.7
		Model	-10.0	-10.0	-9.9	-9.8	-9.7	-9.6	-9.6	-9.5	-9.4	-9.3	-9.2	-9.1	-9.0	-8.9	-8.8	-8.7	-8.6	-8.6	-8.6
N6C0.5S0	100 V	Exp	-10.0	-9.9	-9.9	-9.8	-9.8	-9.7	-9.7	-9.7	-9.5	-9.2	-9.0	-8.7	-8.5	-8.2	-8.0	-7.9	-7.8	-7.8	
		Model	-10.0	-9.9	-9.7	-9.5	-9.3	-9.1	-8.9	-8.7	-8.5	-8.2	-8.0	-7.7	-7.5	-7.2	-6.9	-6.6	-6.3	-6.3	
	140 V	Exp	-10.0	-10.0	-9.9	-9.8	-9.5	-9.1	-8.6	-7.7	-7.1	-6.8	-6.1	-5.4	-4.6	-3.7	-3.0	-2.5	-1.6	-1.6	
		Model	-10.0	-9.8	-9.4	-9.0	-8.5	-8.1	-7.6	-7.0	-6.4	-5.8	-5.1	-4.4	-3.6	-2.7	-1.8	-0.7	0.3	0.3	
	180 V	Exp	-10.0	-9.5	-9.9	-9.2	-8.7	-8.3	-7.2	-6.0	-4.5	-2.9	-0.8	2.1	3.6	5.1	6.8	7.6	9.0	9.0	
		Model	-10.0	-9.6	-8.9	-8.2	-7.3	-6.3	-5.2	-4.0	-2.5	-0.9	0.9	2.8	4.8	6.8	9.0	11.2	13.6	13.6	
	220 V	Exp	-10.0	-9.5	-9.0	-7.3	-5.3	-3.2	-1.2	0.9	2.9	4.5	6.4	10.0	15.6	19.0	21.5	24.9	25.5	25.5	
		Model	-10.0	-9.4	-8.3	-7.0	-5.3	-3.4	-1.0	1.7	4.7	7.8	11.1	14.8	18.8	23.1	27.2	29.9	31.8	31.8	
N6C1S0	60 V	Exp	-10.0	-9.0	-6.8	-5.0	-3.3	-1.2	1.0	2.8	6.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Model	-10.0	-8.9	-7.0	-5.0	-2.8	-0.3	2.5	5.6	9.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	80 V	Exp	-10.0	-8.8	-6.4	-2.0	3.3	10.0	15.5	24.1	27.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Model	-10.0	-7.9	-4.2	0.2	5.5	11.9	18.9	26.3	32.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	100 V	Exp	-10.0	-7.4	-1.0	7.0	18.7	27.2	32.4	37.9	43.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Model	-10.0	-6.5	0.2	9.3	20.3	30.6	37.5	43.9	50.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	120 V	Exp	-10.0	-5.2	6.1	20.2	32.0	39.0	47.0	53.0	57.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Model	-10.0	-4.6	7.4	23.6	35.0	44.4	53.6	62.8	72.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
N10C0.2S2	100 V	Exp	-10.0	-10.0	-9.9	-9.9	-9.8	-9.8	-9.8	-9.7	-9.6	-9.6	-9.5	-9.4	-9.4	-9.3	-9.2	-9.1	-9.1	-9.1	
		Model	-10.0	-10.0	-9.9	-9.8	-9.8	-9.7	-9.7	-9.6	-9.6	-9.5	-9.5	-9.4	-9.3	-9.3	-9.2	-9.1	-9.1	-9.0	
	140 V	Exp	-10.0	-10.0	-9.9	-9.8	-9.8	-9.7	-9.7	-9.6	-9.6	-9.6	-9.5	-9.3	-9.1	-9.0	-8.8	-8.7	-8.7	-8.7	
		Model	-10.0	-9.9	-9.8	-9.7	-9.6	-9.4	-9.3	-9.2	-9.0	-8.9	-8.8	-8.6	-8.4	-8.3	-8.1	-7.9	-7.8	-7.8	
	180 V	Exp	-10.0	-10.0	-9.9	-9.9	-9.8	-9.7	-9.5	-9.3	-9.0	-8.7	-8.2	-7.7	-7.5	-7.2	-7.1	-6.1	-5.7	-5.7	
		Model	-10.0	-10.0	-9.9	-9.7	-9.6	-9.5	-9.1	-8.8	-8.4	-8.0	-7.6	-7.3	-6.9	-6.5	-6.1	-5.8	-5.4	-5.4	
	220 V	Exp	-10.0	-9.5	-9.8	-9.5	-9.7	-9.3	-8.9	-8.5	-8.0	-7.5	-6.9	-6.3	-5.6	-4.9	-4.1	-3.2	-2.9	-2.9	
		Model	-10.0	-9.8	-9.5	-9.2	-8.8	-8.4	-8.0	-7.6	-7.1	-6.6	-6.0	-5.4	-4.7	-4.0	-3.2	-2.3	-1.4	-1.4	
N6C0.5S2	100 V	Exp	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-9.9	-9.7	-9.6	-9.5	-9.4	-9.3	-9.2	-9.1	-9.0	-8.8	-8.7	-8.7		
		Model	-10.0	-9.9	-9.9	-9.8	-9.7	-9.6	-9.5	-9.4	-9.3	-9.2	-9.1	-9.0	-8.8	-8.7	-8.6	-8.5	-8.4		
	140 V	Exp	-10.0	-10.0	-9.9	-9.8	-9.8	-9.5	-9.4	-9.3	-9.1	-8.9	-8.5	-8.3	-8.1	-7.8	-7.4	-7.3	-7.2		
		Model	-10.0	-9.9	-9.7	-9.5	-9.3	-9.1	-8.9	-8.7	-8.4	-8.2	-7.9	-7.6	-7.4	-7.1	-6.7	-6.4	-6.0		
	180 V	Exp	-10.0	-10.0	-9.8	-9.6	-9.4	-9.0	-8.5	-8.1	-7.6	-7.3	-6.5	-5.8	-5.1	-4.4	-3.7	-2.9	-2.4		
		Model	-10.0	-9.8	-9.5	-9.2	-8.8	-8.4	-8.0	-7.5	-7.0	-6.5	-5.9	-5.2	-4.5	-3.8	-3.0	-2.1	-1.1		
	220 V	Exp	-10.0	-9.9	-9.8	-9.6	-8.9	-8.2	-7.8	-6.5	-5.5	-4.3	-3.5	-2.0	0.1	1.9	3.7	5.5	6.5		

		Model	-10.0	-9.7	-9.2	-8.7	-8.0	-7.3	-6.5	-5.6	-4.6	-3.4	-2.1	-0.6	1.0	2.8	4.6	6.6	8.8
	60 V	Exp	-10.0	-9.8	-9.6	-8.5	-7.4	-5.9	-4.2	-2.9	-0.1	2.7	4.8	-	-	-	-	-	-
		Model	-10.0	-9.8	-9.0	-8.0	-6.9	-5.4	-3.7	-1.6	0.9	3.7	6.8	-	-	-	-	-	-
N6C1S2	80 V	Exp	-10.0	-9.2	-8.0	-6.5	-3.5	1.5	7.8	13.2	19.0	-	-	-	-	-	-	-	-
		Model	-10.0	-9.1	-7.4	-4.9	-1.3	3.3	9.1	15.6	22.7	-	-	-	-	-	-	-	-
	100 V	Exp	-10.0	-8.5	-5.9	0.1	7.7	17.6	26.5	32.0	34.0	-	-	-	-	-	-	-	-
		Model	-10.0	-8.5	-4.7	1.8	11.0	21.9	30.8	35.3	38.8	-	-	-	-	-	-	-	-
	120 V	Exp	-10.0	-5.2	4.3	14.1	24.1	31.1	36.2	38.1	40.6	-	-	-	-	-	-	-	-
		Model	-10.0	-7.4	1.0	14.8	29.2	35.8	40.7	45.6	50.5	-	-	-	-	-	-	-	-
	100 V	Exp	-10.0	-10.0	-9.9	-9.9	-9.8	-9.7	-9.6	-9.4	-9.2	-8.9	-8.8	-8.5	-8.3	-8.1	-8.1	-8.0	-7.8
		Model	-10.0	-9.9	-9.8	-9.7	-9.5	-9.4	-9.2	-9.1	-8.9	-8.7	-8.6	-8.4	-8.2	-8.0	-7.8	-7.6	-7.4
N6C0E0.5	140 V	Exp	-10.0	-9.9	-9.7	-9.6	-9.2	-8.9	-8.2	-7.4	-7.0	-6.7	-6.0	-5.4	-4.7	-3.8	-3.6	-3.3	-3.0
		Model	-10.0	-9.8	-9.6	-9.3	-9.0	-8.7	-8.3	-7.9	-7.5	-7.1	-6.6	-6.1	-5.6	-5.0	-4.4	-3.7	-3.0
	180 V	Exp	-10.0	-9.7	-9.2	-8.5	-7.8	-6.0	-5.3	-3.8	-3.0	-1.9	-1.0	0.8	1.0	2.0	3.0	4.0	5.4
		Model	-10.0	-9.7	-9.3	-8.7	-8.1	-7.5	-6.7	-5.9	-4.9	-3.8	-2.6	-1.2	0.3	2.0	3.7	5.6	7.7
	220 V	Exp	-10.0	-9.5	-9.1	-8.2	-6.0	-4.2	-2.9	-0.3	1.8	4.4	7.8	9.0	11.8	13.7	17.6	22.0	25.1
		Model	-10.0	-9.6	-8.8	-7.9	-6.8	-5.5	-3.9	-2.0	0.3	2.8	5.6	8.7	12.0	15.5	19.3	23.2	27.2
	100 V	Exp	-10.0	-10.0	-9.8	-9.7	-9.3	-9.0	-8.4	-8.0	-7.4	-7.1	-6.6	-6.0	-5.7	-5.4	-5.0	-4.7	-4.0
		Model	-10.0	-9.9	-9.5	-9.2	-8.8	-8.4	-8.0	-7.5	-7.1	-6.6	-6.1	-5.6	-5.0	-4.5	-3.9	-3.2	-2.6
N6C0E1	140 V	Exp	-10.0	-9.8	-9.3	-8.7	-8.0	-7.4	-6.5	-5.3	-4.4	-3.2	-2.3	0.0	1.1	2.5	3.7	5.9	8.1
		Model	-10.0	-9.8	-9.0	-8.2	-7.4	-6.4	-5.4	-4.2	-3.0	-1.6	-0.1	1.4	3.0	4.6	6.2	7.8	9.5
	180 V	Exp	-10.0	-9.7	-9.4	-8.8	-7.9	-5.8	-3.9	-1.2	1.9	3.8	8.9	13.7	18.3	22.3	26.9	31.1	34.2
		Model	-10.0	-9.6	-8.3	-6.8	-5.0	-2.9	-0.5	2.0	4.7	7.4	10.2	13.5	17.2	21.5	25.9	28.7	30.6
	220 V	Exp	-10.0	-9.0	-6.9	-4.8	-1.9	2.4	6.0	13.4	15.4	19.0	22.5	26.0	28.5	32.2	35.9	39.4	41.1
		Model	-10.0	-8.8	-6.6	-3.8	-0.4	3.4	7.5	11.8	17.1	21.5	26.0	29.8	33.6	36.4	39.1	41.5	43.5
	60 V	Exp	-10.0	-9.9	-9.8	-9.7	-9.2	-8.1	-6.8	-6.2	-5.4	-4.3	-3.1	-1.7	-0.1	2.0	4.2	6.1	8.0
		Model	-10.0	-9.9	-9.4	-8.8	-8.1	-7.4	-6.6	-5.6	-4.5	-3.3	-1.8	-0.2	1.6	3.4	5.5	7.6	9.9
N6C0.2E1	80 V	Exp	-10.0	-9.7	-9.0	-8.1	-6.9	-5.0	-1.8	0.5	7.6	12.1	17.2	21.2	23.9	25.8	28.9	31.6	33.9
		Model	-10.0	-9.7	-8.7	-7.4	-5.7	-3.5	-0.8	2.5	6.1	10.2	14.6	19.2	24.1	27.9	30.6	32.8	34.6
	100 V	Exp	-10.0	-9.0	-8.0	-4.4	-0.5	3.3	8.5	14.2	21.2	-	-	-	-	-	-	-	
		Model	-10.0	-9.1	-7.1	-4.2	0.0	5.4	11.7	18.7	26.0	-	-	-	-	-	-	-	
	120 V	Exp	-10.0	-9.0	-3.7	3.8	12.7	23.0	27.9	30.6	33.4	-	-	-	-	-	-	-	
		Model	-10.0	-8.5	-4.7	1.6	10.3	20.6	29.4	34.4	38.1	-	-	-	-	-	-	-	
	60 V	Exp	-10.0	-9.7	-8.8	-7.9	-5.4	-0.6	2.6	7.2	12.0	-	-	-	-	-	-	-	
		Model	-10.0	-9.7	-8.3	-6.4	-3.9	-0.6	3.5	8.1	13.2	-	-	-	-	-	-	-	
N6C0.2E1. 5	80 V	Exp	-10.0	-8.0	-4.2	-1.5	5.7	15.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Model	-10.0	-8.5	-5.1	0.7	8.6	17.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	100 V	Exp	-10.0	-6.0	2.9	13.6	22.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Model	-10.0	-7.2	1.6	15.2	28.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	120 V	Exp	-10.0	-3.0	10.4	27.5	35.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Model	-10.0	-4.6	13.7	30.8	37.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

5.2. Tüm Numunelerin Sıcaklık-Zaman Davranışları

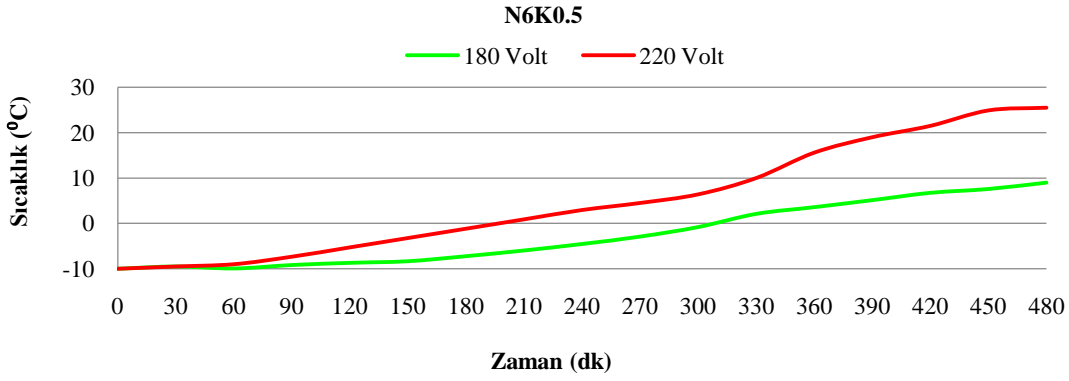
Yukarıda on farklı karışımdan elde edilen plaka numunelerinin bir arada karşılaştırılması, farklı öz direnç değerlerinden kaynaklanan termal davranışlarından dolayı çok uygun görülmemektedir. Farklı numuneler için farklı voltajlar uygulanmıştır. Ancak tüm numunelerde ortak voltaj uygulanması 100 V olarak görülmektedir. Dolayısıyla Şekil 5.1.'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 tespit 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 5.1. Tüm plaka numuneler için 100 volt'da gerçekleşen elektrotermal sonuçları.

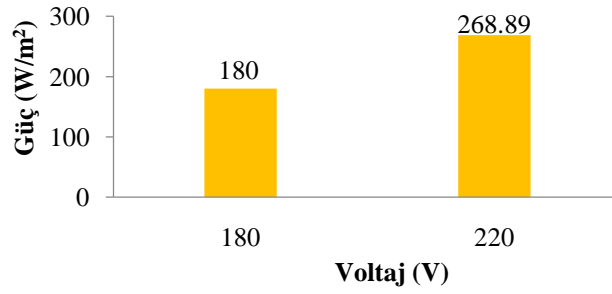
5.3. N6K0.5Ç0'da sıcaklık dağılımı ve güç miktarı

N6K0.5Ç0 numunesi için 180 ve 220 V voltaj uygulandığında kaydedeğer ısı enerjisi ortaya çıkmıştır. Bu voltajlar sonrası sıcaklık-zaman değişimi Şekil 5.2.'de karşılaştırılmıştır. Uygulanan voltajın 180'den 220 V'ye artmasıyla ısınma hızında 2.5 kat artma görülmüştür.



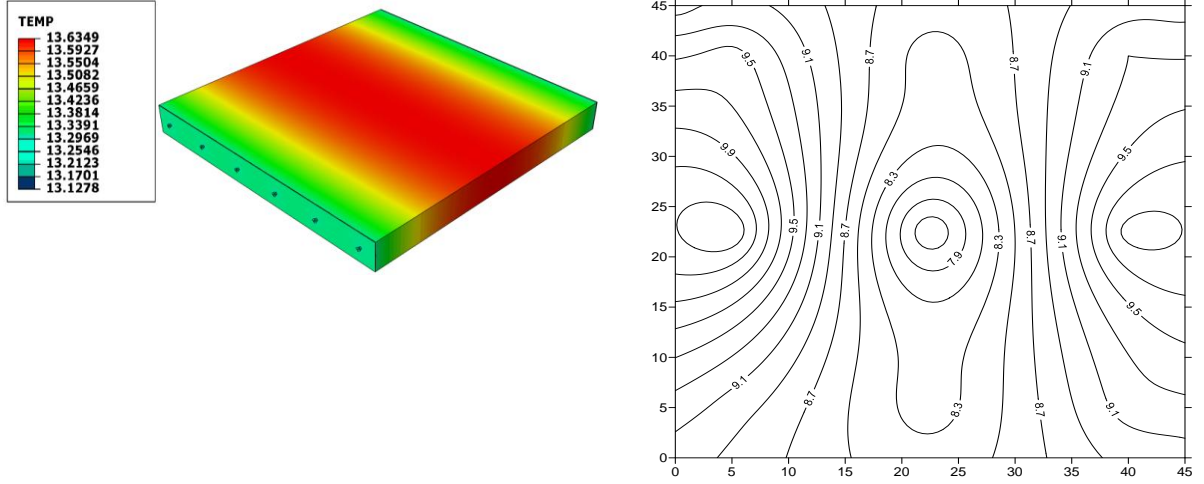
Şekil 5.2. N6K0.5Ç0 plaka numunesi için 180 ve 220 volt'da sıcaklık-zaman eğrileri.

N6K0.5Ç0 için 180 ve 220 V Voltaj uygulanması sonucu tüketilen elektriksel güç (P) miktarı sırasıyla 180 ve 268 W/m² olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.3.). Güç miktarının 1.5 kat artması nedeni, uygulanan voltajla birlikte akım miktarının 0.2025'den 0.2475 A'e çıkmasıdır.



Şekil 5.3. N6K0.5Ç0 plaka numunesi için 180 ve 220 V'de tüketilen güç miktarı.

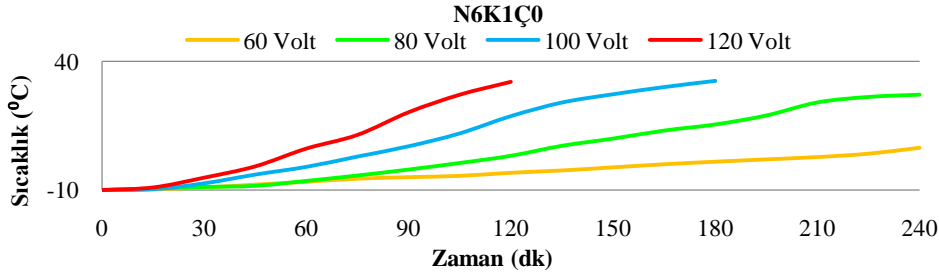
N6K0.5Ç0 karışımına sahip EİP plakasına 180 V voltaj uygulama sonrası 480 dk süre içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımı modelleme ve deneysel olarak Şekil 5.4.'de görüntülenmiştir. 3D modelden elde edilen termal kantoruна göre plakanın sıcaklığı -10 °C'den 13 °C'nin üzerine yükselmiştir. Aynı şartlarla yapılan deney sonucuna göre sıcaklık 10 °C'ye kadar artmıştır. 3D modellerde EİB plakalarının homojen olarak tanımlanmasından dolayı, kantorlarda sıcaklık dağılımı da homojen olarak görüntülenmektedir. 220 V için elde edilen termal kantor ve sıcaklık dağılımı Ek C'de verilmiştir.



Şekil 5.4. 180 V ile 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı.

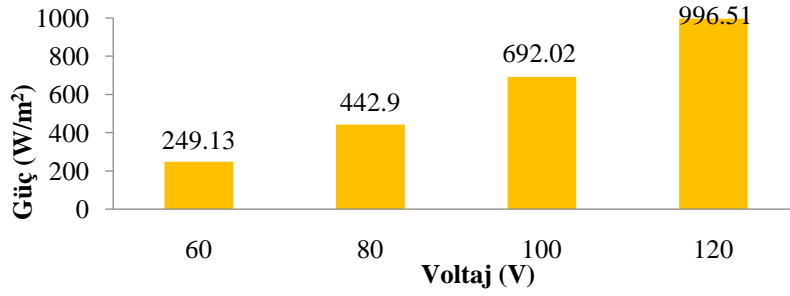
5.4. N6K1Ç0'da sıcaklık dağılımı ve güç miktarı

Uygulanan 60, 80, 100 ve 120 V voltaj sonrası N6K1Ç0 numunesinin termal davranışları Şekil 5.5.'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 °C'den +10 °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.



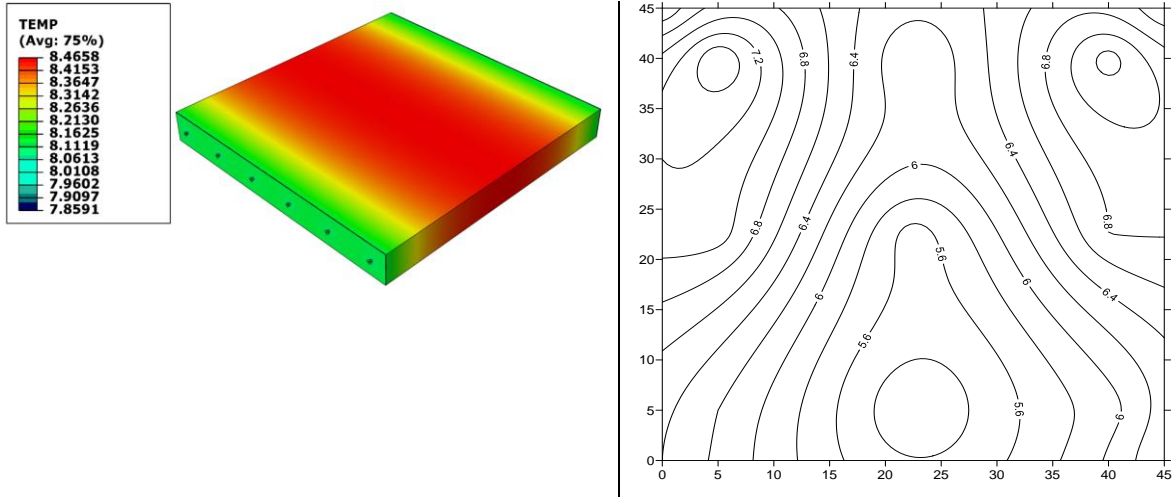
Şekil 5.5. N6K1Ç0 plaka numunesi için 60-120 V'de sıcaklık-zaman eğrileri.

N6K1Ç0 plaka numunesi için 60 V'nin üzerinde uygulanan her voltajda tüketilen elektrik gücü buz çözme için yeterli olduğu tespit edilmiştir. Harcanan zaman ve maliyet açısından soğuk havalarda kar ve buzun birikmesini önlemek için 300-550 W/m² gücün yeterli olduğu literatürdeki önceki çalışmalarda belirtilmiştir. Bu plaka için uygulanan 80 V sonucu tüketilen 442.9 W/m² güç değeri uygun görülmektedir.



Şekil 5.6. N6K1Ç0 plaka numunesi için 60-120 V'de tüketilen güç miktarı.

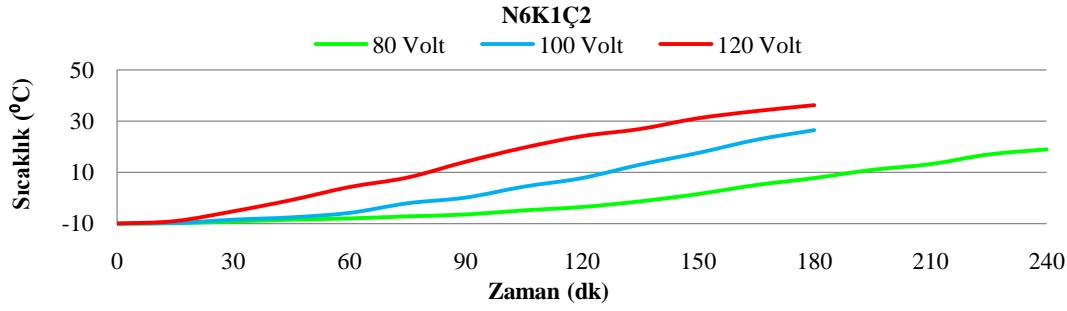
N6K1Ç0 plaka numunesine 60 V voltaj uyguladıktan sonra 240 dk sonra hem modelleme hem deneysel olarak gösterdiği termal davranışı ve sıcaklık dağılımı Şekil 5.7.'de verilmiştir. Plakanın bu sürede sıcaklığı -10 °C'den modelde 8'in üzerine ve deneyde ise 7'nin üzerine çıkmıştır. Deney sonuçlarındaki numunenin alt tarafı ile üst tarafındaki yaklaşık 1 °C sıcaklık farkı KF dozajının yüksek olması dolayısıyla KF'nin üniform dağılmamasından kaynaklanabilir.



Şekil 5.7. N6K1Ç0 için 60 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı.

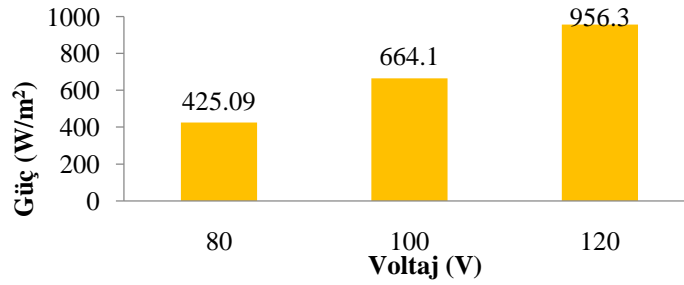
5.5. N6K1Ç2'de sıcaklık dağılımı ve güç miktarı

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 5.8.'de verilmiştir.



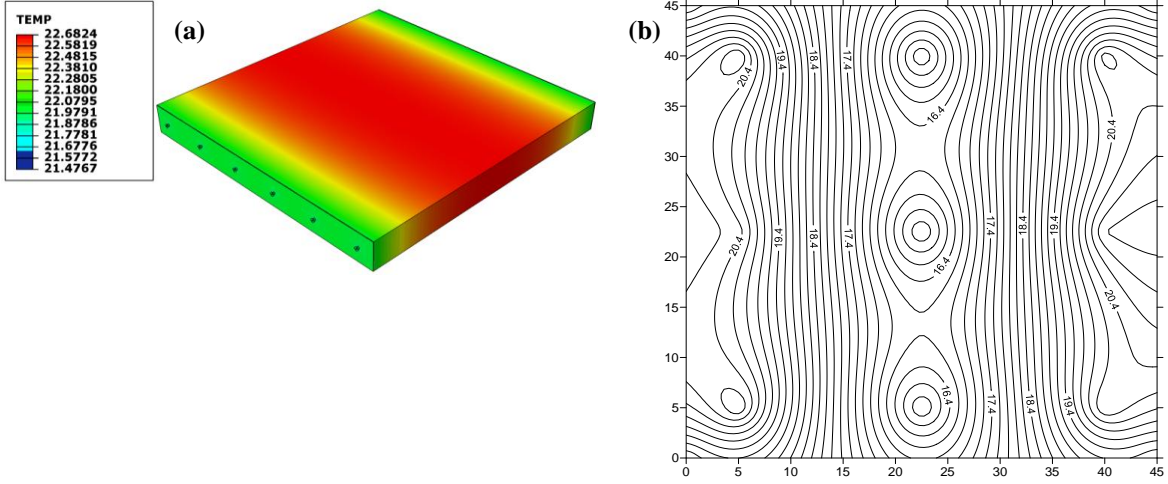
Şekil 5.8. N6K1Ç2 plaka numunesi için 80-120 V'de sıcaklık-zaman eğrileri.

N6K1Ç2 plaka numunesinin 80 V'de ortalama 5 °C/h hızla ısınabilmesi için 425 W/m² 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 5.9.).



Şekil 5.9. N6K1Ç2 plaka numunesi için 80-120 V'de tüketilen güç miktarı.

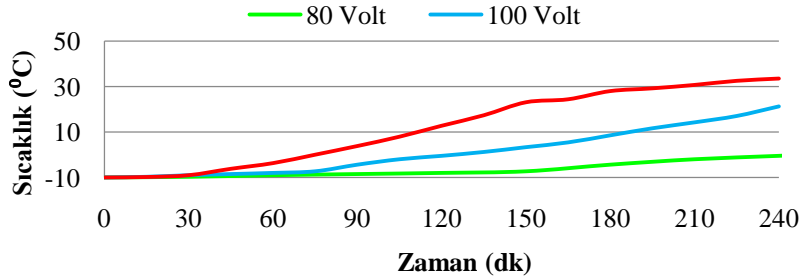
N6K1Ç2 karışıma sahip plaka numunesine 80 V voltaj uygulandığında 3D termal kantoruна göre sıcaklık 21 ile 22 °C arasında kenarlardan içeriye doğru ısınarak dağılmıştır (Şekil 5.10.a). Aynı plaka numunesinin sıcaklık dağılımı deney sonuçlarına göre içeriden kenarlara 16'dan 20'ye ısınarak elde edilmiştir (Şekil 5.10.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 pürüzsüz bir malzemeye voltaj uygulandığında, malzeme ortadan ısınarak, sıcaklık kenarlara dağılır. Abaqus programında beton plakaları homojen ve porsuz olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.10. N6K1Ç2 için 80 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı.

5.6. N6K0.2E1'de sıcaklık dağılımı ve güç miktarı

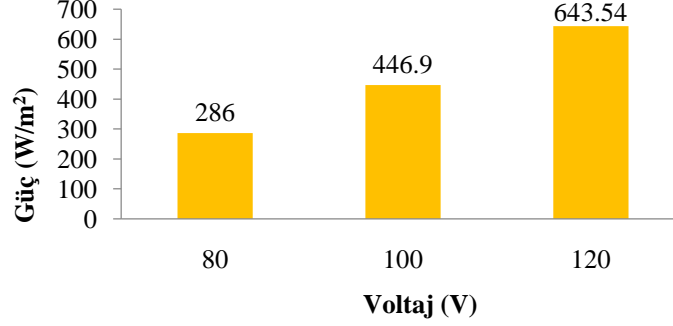
ATE'nin, elektriksel direnç sonuçlarında da belirlendiği gibi, plaka numunelerinde elektrotermal özelliği üzerinde önemli etkisi vardır. Ağırlıkça % 6 NKS, hacimce % 0.2 KF ve % 1 ATE içeren EİB numunesine uygulanan 80 V voltaj sonucu ortalama ısınma hızı 2.5 °C/h hesaplanmıştır. 100 ve 120 V uygulandığında 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. 5.11.'de verilmiştir.



Şekil. 5.11. 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 5.12.'de karşılaştırılmıştır. 80 V sonucu 286 W/m² güç ile betonun ısınması süre açısından uygun değildir. Bununla birlikte 100 V uygulama sonucu harcanan 447 W/m² hem süre açısından

hem enerji tüketim açısından uygun görülmektedir. 643 W/m^2 ısınma hızını artar ancak fazla enerji tüketimine yol açarak işletme maliyetin artmasına neden olur.

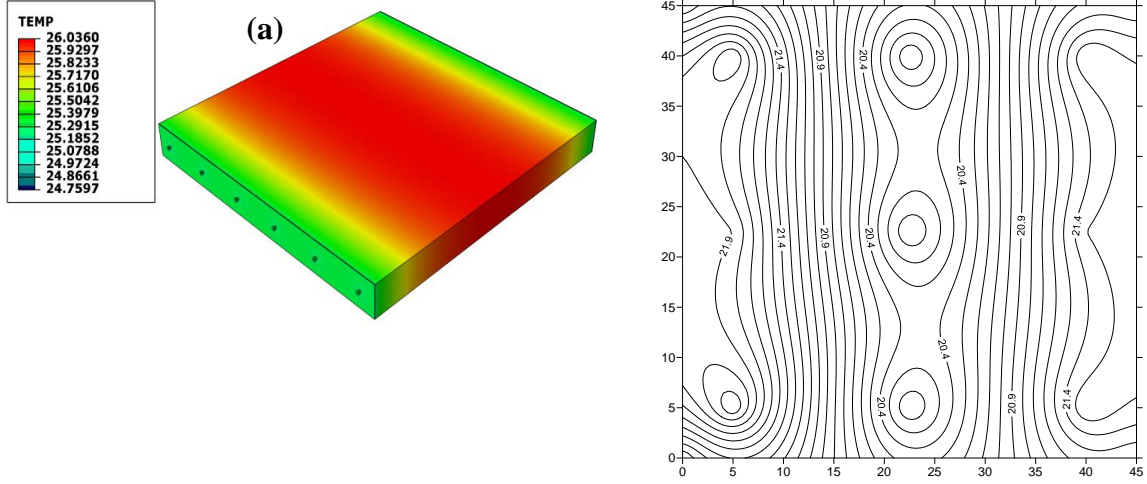


Şekil 5.12. N6K0.2E1 plaka numunesi için 80-120 V'de tüketilen güç miktarı.

Yukarıdaki plaka numunelerin ısı deney sonuçlarında da belirtildiği 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 kantonu ve deney sonuçlarına göre çizilen termal harita Şekil 5.13.'de verilmiştir. Model sonuçlarına göre sıcaklık 24 ile $26 \text{ }^\circ\text{C}$ ve deney sonuçlarına göre ise 20 ile $22 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında değişmektedir. Bu numunede ATE orta miktarda (% 1) kullanıldığına göre, karışım esnasında da homojen karışılması görülmüştür. Homojen karışılmasının etkisi Şekil 5.13.b'de sıcaklığın üniform dağılmasında görülebilir.

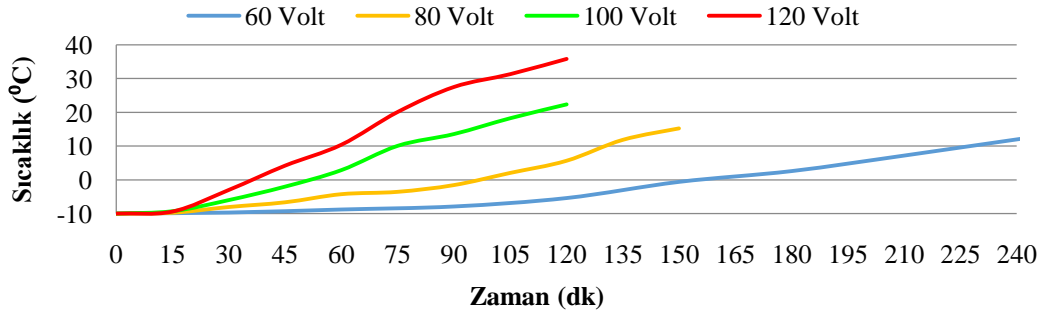
Modeldeki termal kantonunda maksimum sıcaklık orta bölgelerde minimum sıcaklık kenarlarda görülmektedir, deney sonuçlarında ise bunun tersi sıcaklık kenarlarda yükselerek ortaya doğru hareket etmektedir. Bunun sebebi modellerde beton plakası homojen ve pürüzsüz olarak tanımlandığından kaynaklanabilir.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



Şekil 5.13. N6K0.2E1 için 100 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı.

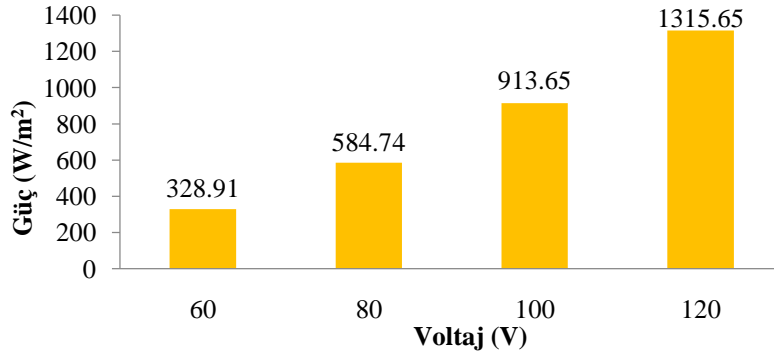
5.7. N6K0.2E1.5'de sıcaklık dağılımı ve güç miktarı

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 5.14.). Voltaj miktarının 80, 100 ve 120 V'ye artmasıyla aynı sıcaklığın elde edilmesi için süre sırasıyla 135, 75 ve 60'a düşmüştür.



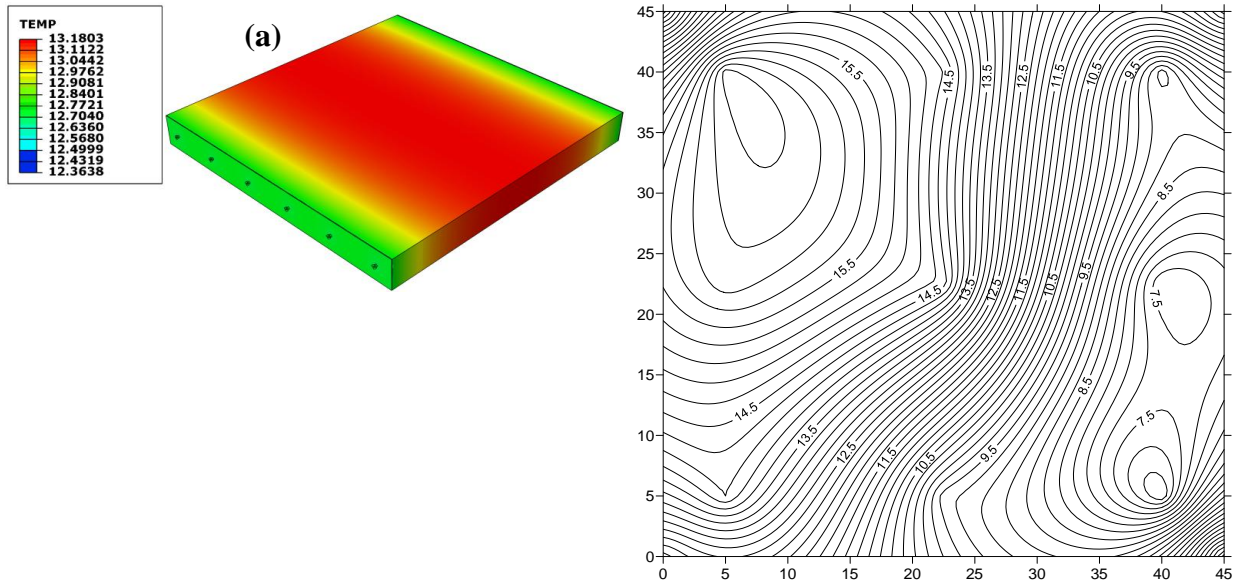
Şekil 5.14. Farklı voltajlarda N6K0.2E1.5 numuneleri için elde edilen elektrotermal sonuçlar.

N6K0.2E1.5 numunesi için 60 V'nin üzerinde uygulanan tüm voltajlar sonucu betonun istenilen sürede ısınabilmesi için yeterli güç değerleri elde edilmiştir (Şekil 5.15.). Literatürde uygun güç değerlerinin 300-550 W/m² olduğu belirlendiği için bu numunede de 60 V uygulama sonucu harcanan 329 W/m² uygun görülmektedir. Isınma hızının artırılması istenilirse 80 V uygulama sonucu 589 W/m² önerilir.



Şekil 5.15. 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 5.16.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 haritaları Ekler bölümünde verilmiştir.

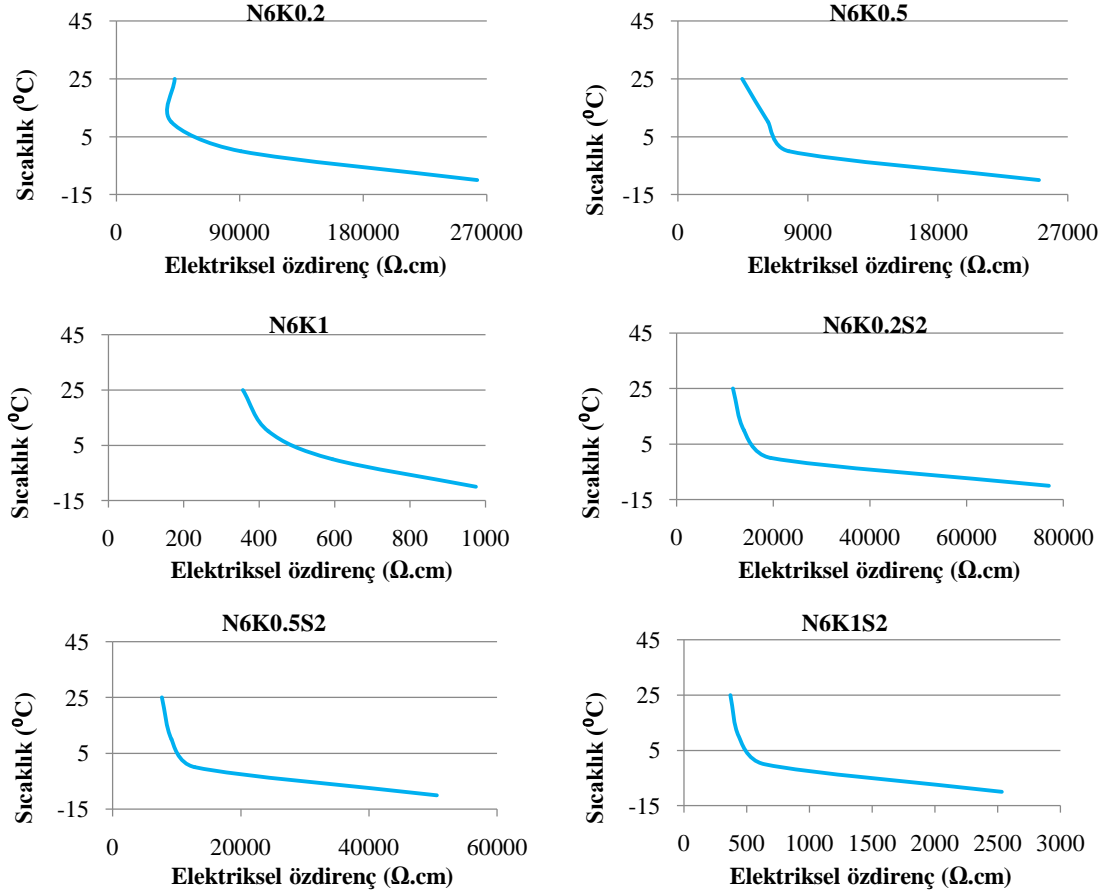


Şekil 5.16. N6K0.2E1.5 için 60 V'de 3D modelleme (a) ve deneysel sonuçlarından (b) elde edilen sıcaklık dağılımı.

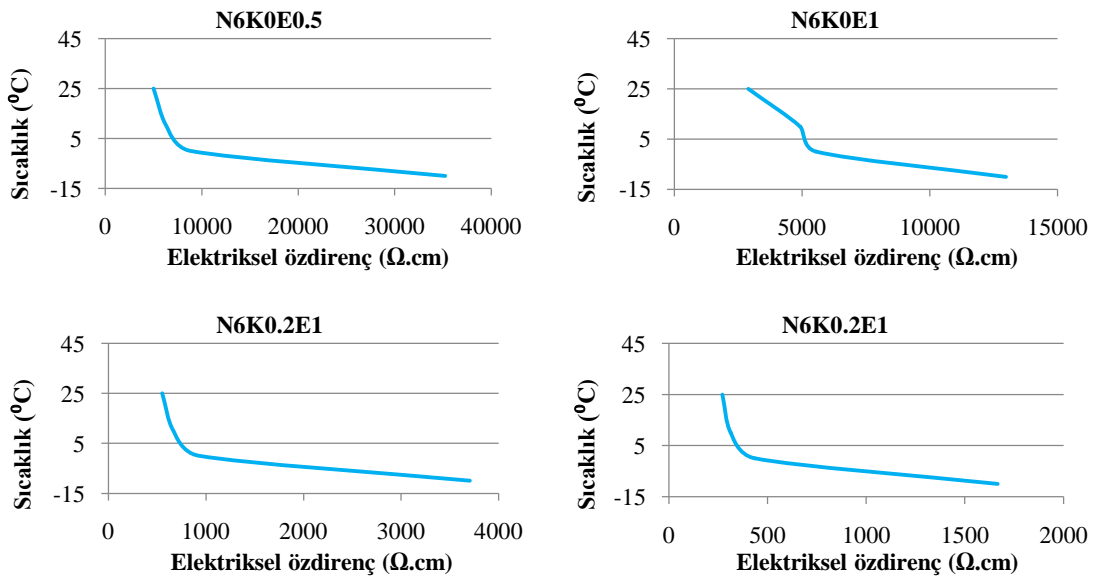
5.8. Sıcaklık ile Özdirenç Arasındaki İlişki

Literatüre göre EİB'nin elektriksel direnci sıcaklığın artmasıyla azalır (Abdualla 2018). İlk sıcaklığı -10 °C olan beton plaka numunelerin sıcaklığı +25 °C'ye yükselmesiyle elektriksel

özdirençin değışmesi Şekil 5.17.'de NKS, KF, ve ÇF içeren numuneler için ve Şekil 5.18.'de NKS, KF ve ATE içeren numuneler için verilmiştir. Şekillerden her on numunede de sıcaklığın artmasıyla özdirenç değeri yaklaşık üç kat daha arttığı görülmektedir.



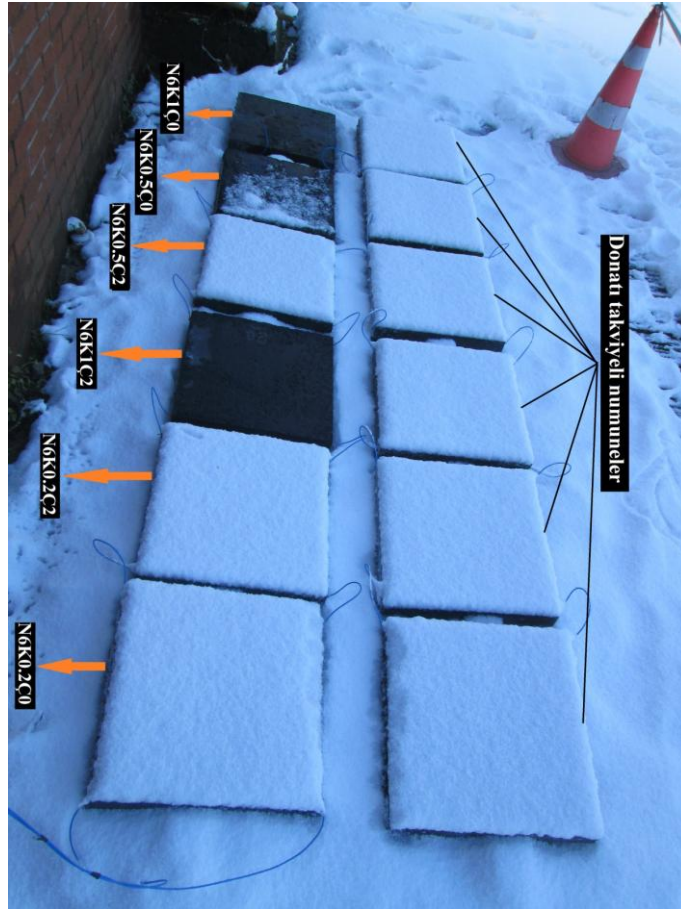
Şekil 5.17. NKS, KF ve ÇF içeren plaka numunelerinin farklı sıcaklıklardaki özdirenç değeri.



Şekil 5.18. NKS, ATE ve KF içeren plaka numunelerinin farklı sıcaklıklardaki özdirenç değeri.

5.9. 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 5.19.'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 projeden kaldırılmıştır. Ayrıca ATE içeren dört adet EİB plakalar ikinci aşamada üretildiğinden karlı havada incelenmeleri için hazırlanmamıştır.



Şekil 5.19. NKS, KF ve ÇF içeren plaka numunelerin karlı havadaki performansları.

5.10. EİB'lerde Performans Değerlendirilmesi

Üretilen on farklı karışıma sahip plaka numunelerin arasından seçilen 6 adet EİB plakaların performans özeti Tablo 5.2.'de verilmiştir. Bu tabloda yer alan numuneler, uygulanan farklı voltajlar sonucu, 6 saat'in altında -10 °C sıcaklıktan +10 °C'ye kadar ısınma kapasiteleri olan numunelerdir. N6K0.5Ç0'a 220V voltaj uygulama sonucu 5.5 saat süreyle 268.89 W/m² güç harcanarak sıcaklıkta 20 °C artma görülmüştür. N6K1Ç0 plaka numunesinde aynı sıcaklık değişmesini izlemek için 2.5 saat boyunca 80 V voltaj uygulanmıştır, sıcaklığın 10 °C'ye yükselmesi için 442.9 W/m² 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 W/m² 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 °C sıcaklığın artması için 446.9 W/m² 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 °C artabilmesi için, 80 V ile 2.2 saat süreyle, 584.74 W/m² 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.

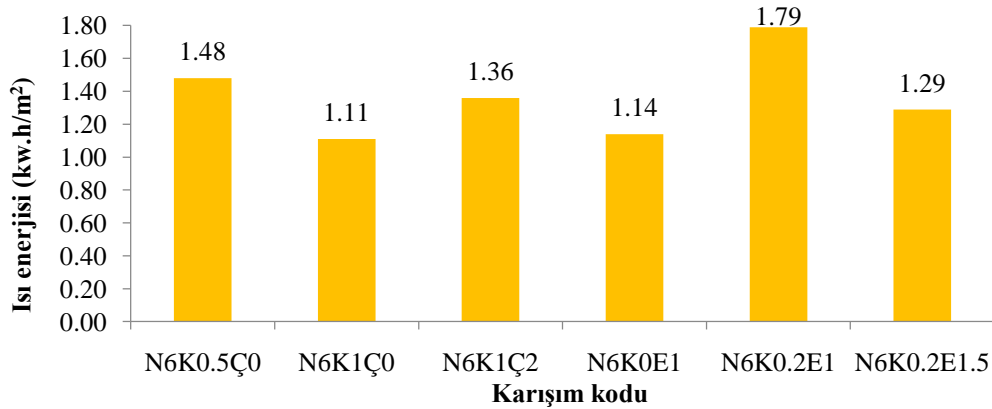
Literatüre göre 350 W/m² güç ile EİB sisteminin ilk maliyeti 635 \$/m² (3620 TL/ m²) ve işletme maliyeti ise 0.80 \$/m² (4.56 TL/ m²) olarak belirlenmiştir (Tuan 2008). Bu maliyet değerleri Amerika'daki şartlarla hesaplanmış değerlerdir. Dolayısıyla Türkiye'de yapılan EİB maliyeti ile kıyaslanması mantıklı olmayabilir.

Tablo 5.2. Sıcaklığın -10 °C'den +10 °C'ye yükselmesi için harcanan zaman ve enerji.

NO	Numune kodu	Voltaj (V)	Zaman (h)	Güç (W/m ²)	Enerji (kw.h/m ²)	Ü.Maliyeti (TL/m ²)	İş.Maliyeti (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 5.2.'de verilen ısı enerjisi değerleri Şekil 5.20.'de 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 kW.h/m²) N6K0.2E1 numunesine ait olduğu görülmektedir.



Şekil 5.20. farklı karışımlara sahip EİB plaka numuneler için harcanan ısı enerjisi değerleri.

5.11. 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 özdirenci 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 özdirencini 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 5.3.'de optimizasyon için kullanılan ham değerler verilmiştir. Üretim maliyeti, işletme maliyeti, özdirenç, 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 5.3.'de tüm numunelerin üretim maliyeti, işletme maliyeti, özdirenç, basınç dayanımı ve ısınma süresi değerlerini birinci numunenin değerlerine bölerek Tablo 5.4.'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 5.3.'teki değerleri yukarıdaki 8 maddede verilen önem katsayıları ile çarparak Tablo 5.4.'deki nihai değerler ortaya çıkmıştır.

Tablo 5.3. 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

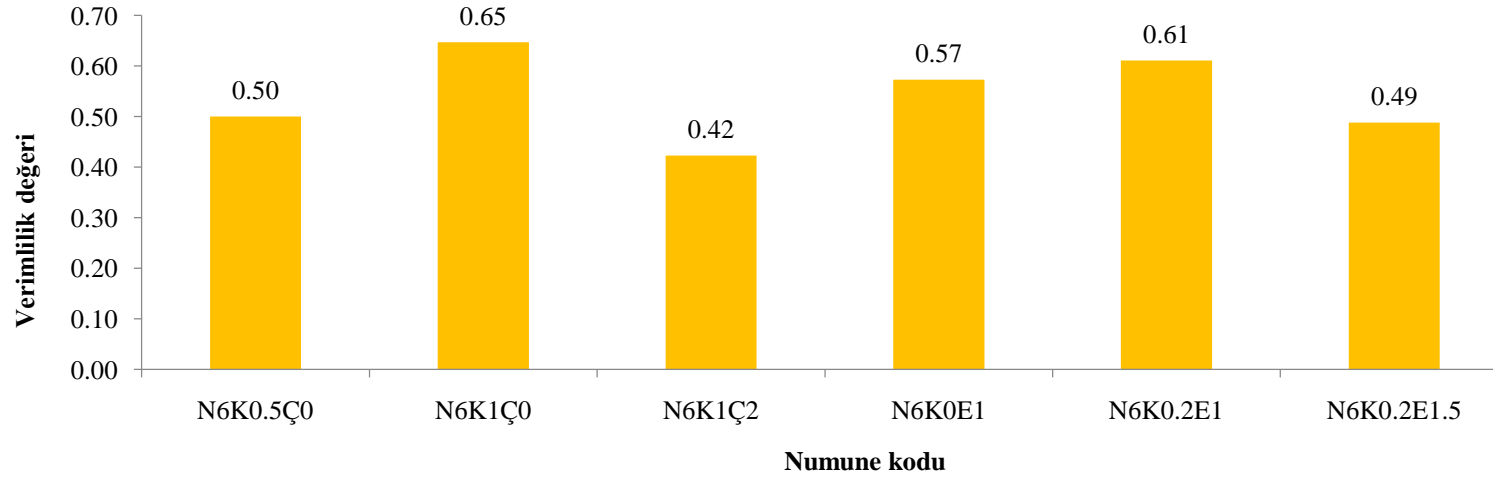
Tablo 5.4. kriter değerlerini birinci numune sonuçlarına bölerek elde edilen değerler.

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 5.5.'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 5.21.'de de verimlilik değerlerini karşılaştırarak numuneler arasındaki sıralamalar incelenebilir.

Tablo 5.5. 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 5.21. Farklı numuneler için hesaplanan verimlilik değerleri.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

6.1. 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 azalmış 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/m² gücün yeterli olduğu anlaşılmıştır.

Buradaki sonuçlara göre KF betonun elektriksel direncini etkileyen en önemli malzemedir. Örneğin bu çalışmada KF % 1 tek başına kullanıldığı durumda betonun direnci 2.2 x 10⁴ Ω.Cm'nin üzerinden 175 Ω.Cm'ye kadar azalmıştır. Aynı karışıma ek olarak % 6 NKS ekleyerek bu değer 2 kattan fazla azalarak 80 Ω.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 Ω.Cm ölçülürken bu karışıma % 6 NKS eklendiğinde direnç değeri 222 Ω.Cm olarak ölçülmüştür. 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.

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'nın üzerinde elde edilmiştir oysa kontrol numunenin basınç dayanımı 44 MPa olarak ölçülmüştür. 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 olmuş, ancak % 0.2 KF'nin eklenmesi ile basınç dayanımında az miktarda olumsuz etkiler görülmüştür.

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

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.

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 değişimleri için 220 V voltajın gerekli olduğu belirlenmiştir. Farklı karışımlardan elde edilen EİB plakaların farklı sıcaklık/h hızıyla ısınabilmeleri için 180-1315 W/m² gücün gerekli olduğu anlaşılmıştır. Tuan (Tuan 2008) ve Abdulla'nın (Abdulla 2018) çalışmasında soğuk havalarda kar ve buzun erimesi için 300-550 W/m² gücün yeterli olduğu belirtilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada da tüketilen 300-550 W/m² 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.

6.2. 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

- Abdualla, H. (2018). "Design, construction, and performance of heated concrete pavements system."
- Arabzadeh, A., Ceylan, H., Kim, S., Gopalakrishnan, K. and Sassani, A. (2016). Fabrication of polytetrafluoroethylene-coated asphalt concrete biomimetic surfaces: a nanomaterials-based pavement winter maintenance approach. International Conference on Transportation and Development 2016.
- Arabzadeh, A., Ceylan, H., Kim, S., Gopalakrishnan, K., Sassani, A., Sundararajan, S. and Taylor, P. C. (2017). "Superhydrophobic coatings on Portland cement concrete surfaces." Construction and Building Materials 141: 393-401.
- Arabzadeh, A., Ceylan, H., Kim, S., Gopalakrishnan, K., Sassani, A., Sundararajan, S., Taylor, P. C. and Abdullah, A. (2017). Influence of deicing salts on the water-repellency of Portland cement concrete coated with polytetrafluoroethylene and polyetheretherketone. Airfield and Highway Pavements 2017: 217-227.
- Barnard, E. (1965). "Electrically Conductive Cement and Concrete." US3166518 A.
- ÇAVAS, M. (2011). NANO YAPILI METAL OKS T YARI LETKENLER KULLANILARAK FOTO D YOTLARIN ÜRET LMES Doktora Tezi.
- Cengel, Y. A., Klein, S. and Beckman, W. (1998). Heat transfer: a practical approach, McGraw-Hill New York.
- Ceylan, H., Arabzadeh, A., Sassani, A., Kim, S. and Gopalakrishnan, K. (2016). Innovative nano-engineered asphalt concrete for ice and snow controls in pavement systems. Proc., 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress.
- Chang, C., Song, G., Gao, D. and Mo, Y. (2013). "Temperature and mixing effects on electrical resistivity of carbon fiber enhanced concrete." Smart materials and structures 22(3): 035021.
- Dehghanpour, H., Yilmaz, K. and Ipek, M. (2019). "Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes." Construction and Building Materials 221: 109-121.
- El-Dieb, A. S., El-Ghareeb, M. A., Abdel-Rahman, M. A. and El Sayed, A. N. (2018). "Multifunctional electrically conductive concrete using different fillers." Journal of Building Engineering 15: 61-69.
- Gomis, J., Galao, O., Gomis, V., Zornoza, E. and Garcés, P. (2015). "Self-heating and deicing conductive cement. Experimental study and modeling." Construction and Building Materials 75: 442-449.
- Gopalakrishnan, K., Ceylan, H., Kim, S., Yang, S. and Abdualla, H. (2015). "Electrically conductive mortar characterization for self-heating airfield concrete pavement mix design." International Journal of Pavement Research and Technology 8(5): 315-324.
- Howser, R., Dhonde, H. and Mo, Y. (2011). "Self-sensing of carbon nanofiber concrete columns subjected to reversed cyclic loading." Smart materials and structures 20(8): 085031.
- Ipek, M. (2017). "Analysis of Usability of Waste Erosion Wires as Fiber in Reactive Powder Concrete." JOURNAL OF POLYTECHNIC-POLITEKNIK DERGISI 20(2): 451-457.

- Joerger, M. and Martinez, F. (2006). Electrical Heating of I-84 in Land Canyon, Oregon, Report No. FHWA-OR-RD06-17. Oregon Department of Transportation, Salem, OR.
- Mikulova, Z., Sedenkova, I., Matejova, L., Večeř, M. and Dombek, V. (2013). "Study of carbon black obtained by pyrolysis of waste scrap tyres." *Journal of thermal analysis and calorimetry* 111(2): 1475-1481.
- Nili, M. and Afroughsabet, V. (2010). "The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete." *Construction and Building Materials* 24(6): 927-933.
- Norouzi, M. (2016). ATIK LASTİKLERİN PİROLİZİ İLE ÜRETİLEN NANO KARBON KARASININ HARÇTA KULLANIMI VE HARCIN ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ (Y.Lisans Tezi) Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Sadati, S. S., Cetin, K. and Ceylan, H. (2017). Numerical modeling of electrically conductive pavement systems. Congress on Technical Advancement.
- Sassani, A., Ceylan, H., Kim, S., Arabzadeh, A., Taylor, P. C. and Gopalakrishnan, K. (2018). "Development of carbon fiber-modified electrically conductive concrete for implementation in Des Moines International Airport." *Case studies in construction materials* 8: 277-291.
- Sassani, A., Ceylan, H., Kim, S., Gopalakrishnan, K., Arabzadeh, A. and Taylor, P. C. (2017). "Influence of mix design variables on engineering properties of carbon fiber-modified electrically conductive concrete." *Construction and Building Materials* 152: 168-181.
- Shah, S. P., Daniel, J. I., Ahmad, S. H., Arockiasamy, M., Balaguru, P., Ball, C. G., Ball, H. P., Batson, G. B., Bentur, A. and Craig, R. J. (1988). "Measurement of properties of fiber reinforced concrete." *ACI Materials Journal* 85(6): 583-593.
- Systèmes, D. (2010). "Abaqus 6.10: Analysis user's manual." Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Tang, Z., Li, Z., Qian, J. and Wang, K. (2005). "Experimental study on deicing performance of carbon fiber reinforced conductive concrete." *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY* 21(1): 113-117.
- Tuan, C. Y. (2008). "Implementation of conductive concrete for deicing (Roca Bridge)."
- Tuan, C. Y. and Yehia, S. (2004). "Evaluation of electrically conductive concrete containing carbon products for deicing." *Materials Journal* 101(4): 287-293.
- Tungjitkusolmun, S., Woo, E., Cao, H., Tsai, J., Vorperian, V. and Webster, J. (2000). "Thermal—electrical finite element modelling for radio frequency cardiac ablation: effects of changes in myocardial properties." *Medical and Biological Engineering and Computing* 38(5): 562-568.
- Wen, S. and Chung, D. (2004). "Electromagnetic interference shielding reaching 70 dB in steel fiber cement." *Cement and Concrete Research* 34(2): 329-332.
- Whittington, H., McCarter, J. and Forde, M. (1981). "The conduction of electricity through concrete." *Magazine of concrete research* 33(114): 48-60.
- Wu, J., Liu, J. and Yang, F. (2015). "Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing." *Construction and Building Materials* 75: 129-135.
- Xi, Y. and Olsgard, P. J. (2000). Effects of Deicing Agents (magnesium Chloride and Sodium Chloride) on Corrosion of Truck Components, Colorado Department of Transportation, Research Branch.

Yahaghi, J., Muda, Z. C. and Beddu, S. B. (2016). "Impact resistance of oil palm shells concrete reinforced with polypropylene fibre." *Construction and building materials* 123: 394-403.

Yehia, S. and Tuan, C. Y. (1999). "Conductive concrete overlay for bridge deck deicing." *Materials Journal* 96(3): 382-390.

Yehia, S., Tuan, C. Y., Ferdon, D. and Chen, B. (2000). "Conductive concrete overlay for bridge deck deicing: mixture proportioning, optimization, and properties." *Materials Journal* 97(2): 172-181.

Zenewitz, J. A. (1977). Survey of alternatives to the use of chlorides for highway deicing.

EKLER

EK A: Deney ve laboratuvar çalışmaları ile ilgili görüntüler;



EK B: Elektrotermal DeneYlerine ait Ek Görüntüler



45 x 45 x 5 cm plaka numunelerin
retiminde elektrotların yerleştirilmesi.



ATE içeren numune gruplarının
kalıplanması.



termometreler.



0 ile 220 V arasında ayarlanabilir varyak.



Soğutucu dolabın sıcaklık ekranı.



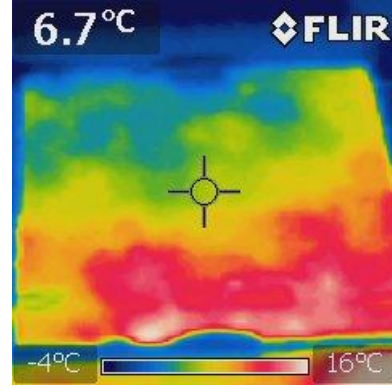
plaka numunelerin karlı havadaki görüntüleri.



plaka numunelerin voltaj uygulama sonrası.

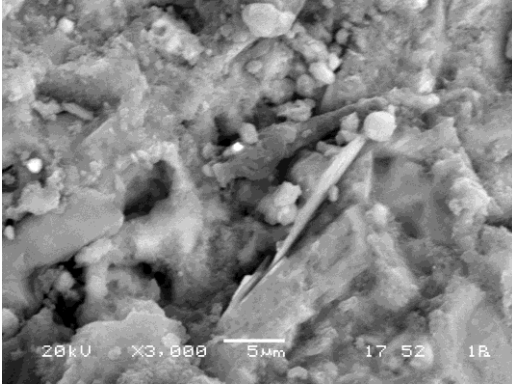


Soğutucunun içerisinde plaka numunesinin yüzeyinde termometre bağlantıları.

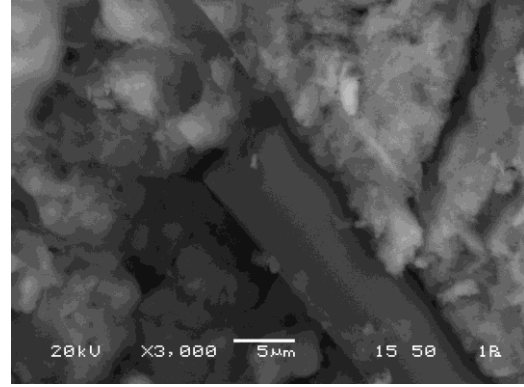


N6K0.2E1.5 numunesinin elektrotermal test esnasında çekilmiş termal fotoğraf.

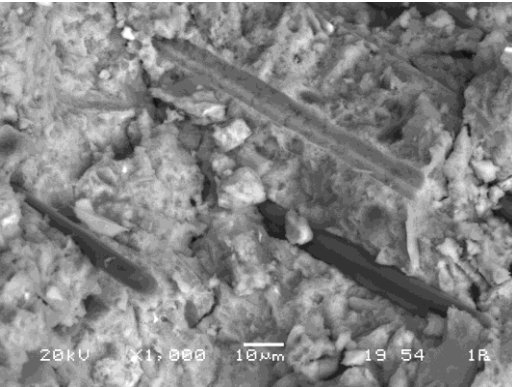
EK C: Üretilen EİB numunelerin İç Yapılarından SEM Görüntüleri



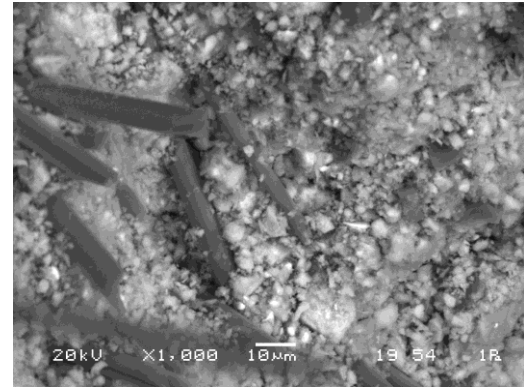
Kontrol Beton Numunesinin İç Yapısının SEM Görüntüsü.



N6K0.2Ç0 Numunesinin İç Yapısının SEM Görüntüsü.



N6K0.5Ç0 Numunesinin İç Yapısının SEM Görüntüsü.



N6K1Ç0 Numunesinin İç Yapısının SEM Görüntüsü.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. KEMALETTİN YILMAZ
Proje No:	119M164
Proje Başlığı:	Havalimanı Pistlerinde Donmayı Engellemek Amacıyla Elektriksel İletken Beton Üretiminin Araştırılması
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	10
Araştırmacılar:	FARAZ AFSHARI
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	SAKARYA Ü. MÜHENDİSLİK F. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/09/2019 - 15/07/2020
Onaylanan Bütçe:	45000.0
Harcanan Bütçe:	31500.0
Öz:	<p>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.</p> <p>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 oC'de bir soğutucu içerisinde gerçekleştirilmiştir.</p> <p>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 W/m2 gücün gerekli olduğu anlaşılmıştır. Literatüre göre soğuk havalarda kar ve buzun erimesi için 300-550 W/m2 gücün yeterli olduğu belirtilmiştir, bu çalışmada da tüketilen 300-550 W/m2 arasında güç değerlerine göre karışım optimizasyonu yapılmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Kar ve buz birikmesi, elektriksel iletken beton, nano karbon siyahı, karbon fiber
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Evet