DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPI SAĞLIĞININ İZLENMESİ İÇİN BETONDA ELEKTRİKSEL DİRENÇ – BİRİM UZAMA İLİŞKİSİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Özkan Ayberk KOLATAR

Haziran, 2016
İZMİR

YAPI SAĞLIĞININ İZLENMESİ İÇİN BETONDA ELEKTRİKSEL DİRENÇ – BİRİM UZAMA İLİŞKİSİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı

Özkan Ayberk KOLATAR

Haziran, 2016
İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ÖZKAN AYBERK KOLATAR, tarafından **DOÇ. DR. EGEMEN TEOMETE** yönetiminde hazırlanan **"YAPI SAĞLIĞININ İZLENMESİ İÇİN BETONDA ELEKTRİKSEL DİRENÇ – BİRİM UZAMA İLİŞKİSİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Egemen TEOMETE

Yönetici

Prof.Dr. Serap KAHRAMAN

Jüri Üyesi

Doç.Dr. Tahir Kemal ERDEM

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının başından sonuna kadar her aşamasında, konu seçiminden içeriğin belirlenmesine kadar benden yardımlarını esirgemeyen, beni yönlendiren ve motive eden değerli hocam ve danışmanım Doç.Dr.Egemen TEOMETE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Batıbeton, Batıçim, Sika Yapı Kimyasalları, Bekaert, Basf ,DowAksa firmalarına verdikleri desteklerden dolayı teşekkür ederim.

TÜBİTAK'a 213M452 "Akıllı Beton Üretimi" başlıklı proje kapsamında verdikleri destek için teşekkür ederim.

Özkan Ayberk KOLATAR

YAPI SAĞLIĞININ İZLENMESİ İÇİN BETONDA ELEKTRİKSEL DİRENÇ – BİRİM UZAMA İLİŞKİSİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Depremler, malzeme bozulmaları ve diğer çevresel etkiler yapıların performansını tehdit eder. Yapı sağlığının izlenmesi, can ve mal güvenliği açısından önemlidir. Yapı sağlığının izlenmesi için kullanılan gerinim pulları, düşük dayanıklılığa, düşük duyarlılığa ve yüksek maliyete sahiptirler. Bu çalışmada, basınç yükü altında farklı hacimsel oranlarda bakır, karbon, alüminyum, kömür, pirinç ve tufal iletkenlerini içeren beton karışımlarının birim şekil değiştirme – elektriksel direnç ilişkileri deneysel olarak incelendi. Çalışma kapsamında, 1 adet lifsiz, 7 adet bakır lifli, 6 adet bakır tozlu, 5 adet 3mm karbon lifli, 5 adet 6mm karbon lifli, 5 adet 13mm karbon lifli, 6 adet alüminyum tozlu, 6 adet alüminyum lifli, 6 adet pirinç tozlu, 6 adet kömür tozlu, 6 adet tufal iletkenli toplamda 59 adet karışım grubu oluşturuldu. Beton karışım tasarımı, TS802 "BETON KARIŞIM TASARIMI HESAP ESASLARI" standartı esas alınarak yapıldı. Her bir karışım grubu için üç adet 75mm boyutlu küp örnek döküldü ve örneklere basınç testi uygulandı. Toplamda 177 örnek döküldü, test edildi ve analizleri yapılıp grafiklere işlendi. Basınç testlerinde örneklerin elektriksel dirençlerindeki değişim, örneklere uygulanan basınç kuvveti, basınç birim şekil değiştirmeleri eş zamanlı olarak ölçüldü. Test sonuçlarından elde edilen sensör parametreleri ile her bir örnek için puanlar hesaplandı. Örneklerin sensör parametreleri ve puanları karşılaştırıldı. Test edilen karışımlarda birim şekil değiştirme – elektriksel direnç arasında çok güçlü doğrusal ilişki tespit edildi. Elde edilen sonuçlar, kendi hasarını ve birim şekil değiştirmesini ölçen akıllı betonun geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır.

Anahtar kelimeler: Akıllı beton, basınç testi, birim şekil değiştirme, elektriksel direnç, lifli beton

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ELECTRICAL RESISTANCE - STRAIN RELATIONSHIP OF CONCRETE FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING

ABSTRACT

Earthquakes, material deteriorations and other environmental factors challenge the structural safety. In order to protect the lives, structural health monitoring is crucial. The metal foil strain gages have low durability, low sensitivity and high cost. In this study, concrete mixes containing different volumetric ratios of conductive materials were casted. Copper, carbon, aluminum, coal, oxidized layer and brass were used as conductors. The relationship between strain and electrical resistance has been investigated, experimentally. In this study, 1 fiber free, 7 copper fiber, 6 copper powder, 5 carbon fiber that is 3mm lenght, 5 carbon fiber that is 6mm lenght, 5 carbon fiber that is 13mm lenght, 6 aluminum powder, 6 aluminum fiber, 6 brass powder, 6 coal dust, 6 oxidized layer mix groups were formed. A total of 59 mix groups were formed. In concrete mixture design, TS802 "BETON KARIŞIM TASARIMI HESAP ESASLARI" was used. Three 75mm cubes were casted and pressure test made for each of the groups. In total 177 mixture was casted and tested. All mixtures were analyzed and treated in the graphics. In pressure tests changes in electrical resistance of the mixtures, pressure force change that was applied to the mixtures and compression strains were measured simultaneously. With sensor parameters obtained from the test results, scores were calculated for each sample. The mixture group's average scores and the average sensor parameters results were compared. A strong linear relationship between strain and electrical resistance change was obtained for tested mixtures. The results are contribution to the development of smart concrete which can sense its strain and damage.

Keywords: Smart concrete, compression test, strain, electrical resistance, fiber concrete

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT v
ŞEKİLLER LİSTESİ ix
TABLOLAR LİSTESİ xviii

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

BÖLÜM İKİ - KULLANILAN MALZEMELER VE METOTLAR 3

2.1 Kullanılan Malzemeler 3
2.1.1 Çimento 3
2.1.2 İnce Agrega(Kum) 3
2.1.3 İri Agrega 5
2.1.4 Silika Dumanı 6
2.1.5 Su 6
2.1.6 Akışkanlaştırıcı 6
2.1.7 Bakır Elektrot 6
2.1.8 Döküm Kalıbı 7
2.1.9 Kullanılan İletkenler 8
2.1.9.1 Bakır Lif ve Toz 8
2.1.9.2 Karbon Lif 9
2.1.9.3 Alüminyum Lif ve Toz 9
2.1.9.4 Pirinç Tozu 10
2.1.9.5 Tufal 11
2.1.9.6 Kömür Tozu 11
2.2 Beton Karışımlarının Tasarımı 12
2.3 Beton Karışımlarının Hazırlanması 14
2.4 Kullanılan Ekipmanlar 18

2.4.1 Shimadzu Mekanik Test Cihazı 18
2.4.2 National Instruments (NI) cDAQ 9178 Veri Toplama Cihazı 18
2.5 Basınç Testi ve Teste Hazırlık 20
2.5.1 Örneklerin Teste Hazırlanması 20
2.5.2 Basınç Testi 20
2.6 Karışım Performans Parametreleri ve Puanlama Sistemi 24
2.6.1 Duyarlılık (K) 24
2.6.2 Doğrusallık (%LE) 25
2.6.3 Limit Değer (SL) 26
2.6.4 Puanlama Sistemi 26

BÖLÜM ÜÇ – BULGULAR VE TARTIŞMA 27

3.1 Bakır Katkılı Karışımların Analiz Sonuçları 27
3.1.1 Bakır Tozlu Karışımların Analiz Sonuçları 27
3.1.2 Bakır Lifli Karışımların Analiz Sonuçları 40
3.2 Karbon Katkılı Karışımların Analiz Sonuçları 49
3.2.1 3mm Uzunluktaki Karbon Lifli Karışımların Analiz Sonuçları 49
3.2.2 6mm Uzunluktaki Karbon Lifli Karışımların Analiz Sonuçları 57
3.2.3 13mm Uzunluktaki Karbon Lifli Karışımların Analiz Sonuçları 64
3.3 Alüminyum Katkılı Karışımların Analiz Sonuçları 72
3.3.1 Alüminyum Tozlu Karışımların Analiz Sonuçları 74
3.3.2 Alüminyum Lifli Karışımların Analiz Sonuçları 82
3.4 Pirinç Katkılı Karışımların Analiz Sonuçları 91
3.5 Kömür Katkılı Karışımların Analiz Sonuçları 99
3.6 Tufal Katkılı Karışımların Analiz Sonuçları 107
3.7 En İyi Üç Karışımın Değerlendirilmesi 116

BÖLÜM DÖRT – SONUÇLAR..... 119

KAYNAKLAR 122

EKLER..... 122

EK-1: Karışımların Performans ve Puan Değerleri..... **124**

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 İnce agrega elek analizi sonuçları 4
Şekil 2.2 İri agrega elek analizi sonuçları 4
Şekil 2.3 Silika dumanı 235 kez büyütülmüş mikroskop görüntüsü..... 5
Şekil 2.4 Bakır elektrot 7
Şekil 2.5 Döküm kalıbı 7
Şekil 2.6 (a) Bakır lif..... 8
Şekil 2.6 (b) Bakır toz 8
Şekil 2.7 6 mm uzunluğundaki karbon lif..... 9
Şekil 2.8 Alüminyum lif..... 10
Şekil 2.9 Alüminyum toz 10
Şekil 2.10 Pirinç toz..... 11
Şekil 2.11 Tufal..... 12
Şekil 2.12 Kömür 12
Şekil 2.13 Granülometri eğrileri(Karışım, ideal, incelik sınırı, kalınlık sınırı)..... 13
Şekil 2.14 Döküme hazır beton kalıbı..... 15
Şekil 2.15 Dökümü tamamlanmış beton örnekleri..... 16
Şekil 2.16 Kür tankı 16
Şekil 2.17 Kür tankı içindeki örnekler 17
Şekil 2.18 Shimadzu marka AGS-X 300kN model elektromekanik test cihazı 19
Şekil 2.19 NI cDAQ 9178..... 19
Şekil 2.20 C5 isimli örnek ve gerinim pulları 21
Şekil 2.21 Kompozit plakalar..... 21
Şekil 2.22 Deneylerde kullanılan devrenin şeması 22
Şekil 2.23 Deneylerde kullanılan devre 23
Şekil 2.24 Brp2 isimli örnek test edilirken 24
Şekil 2.25 ΔMax'ın grafik üzerinde gösterimi 25
Şekil 3.1 M0 lifsiz karışımın yük – zaman grafiği..... 27
Şekil 3.2 M0 lifsiz karışımın %R - zaman grafiği 28

Şekil 3.3 M0 lifsiz karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=21 LE=15, R^2=0,93, SL=0,0021)..... 28
Şekil 3.4 Cop4 (%0,2) isimli karışımın yük - zaman grafiği 30
Şekil 3.5 Cop4 (%0,2) isimli karışımın %R - zaman grafiği 30
Şekil 3.6 Cop4 (%0,2) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=40, LE=5, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0015)..... 31
Şekil 3.7 Cop5 (%0,35) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=53 LE=5, $R^2 = 0{,}99$,SL=0,0013)..... 31
Şekil 3.8 Cop1 (%0,5) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=32 LE=10, $R^2 = 0{,}99$,SL=0,0020)..... 32
Şekil 3.9 Cop6 (%0,8) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=19 LE=10, $R^2 = 0{,}97$,SL=0,0025)..... 33
Şekil 3.10 Cop2 (%1) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=19 LE=28, $R^2 = 0{,}90$,SL=0,0034)..... 33
Şekil 3.11 Cop3 (%2) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=14 LE=9, $R^2 = 0{,}98$,SL=0,0017)..... 34
Şekil 3.12 Cop3 (%2) isimli karışımın yük - zaman grafiği 35
Şekil 3.13 Cop3 (%2) isimli karışımın %R- zaman grafiği 35
Şekil 3.14 Cop3 (%2) isimli karışımın birim şekil değiştirme grafiği – zaman 35
Şekil 3.15 Bakır tozlu karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği..... 36
Şekil 3.16 Bakır tozlu karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 37
Şekil 3.17 Bakır tozlu karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği..... 38
Şekil 3.18 Bakır tozlu karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği..... 38
Şekil 3.19 Bakır tozlu karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 39
Şekil 3.20 Co7 (%0,2) isimli karışımın yük - zaman grafiği 40
Şekil 3.21 Co7 (%0,2) isimli karışımın %R - zaman grafiği 41
Şekil 3.22 Co7 (%0,2) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=37 LE=5, $R^2 = 0{,}99$,SL=0,0016)..... 41
Şekil 3.23 Co8 (%0,35) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=40, LE=5, $R^2 = 0{,}99$,SL=0,0011) 42

Şekil 3.24 Co1 (%0,5) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=28, LE=15, $R^2 = 0{,}96$,SL=0,0016) 43
Şekil 3.25 Co9 (%0,8) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=30, LE=7, $R^2 = 0{,}99$,SL=0,0017) 43
Şekil 3.26 Co2 (%1) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=20, LE=14, $R^2 = 0{,}97$,SL=0,0018) 44
Şekil 3.27 Co10 (%1,5) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=28, LE=7, $R^2 = 0{,}99$,SL=0,0016) 45
Şekil 3.28 Co3 (%2) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=20, LE=19, $R^2 = 0{,}92$,SL=0,0014) 45
Şekil 3.29 Bakır lifli karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 46
Şekil 3.30 Bakır lifli karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 47
Şekil 3.31 Bakır lifli karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 47
Şekil 3.32 Bakır lifli karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği 48
Şekil 3.33 Bakır lifli karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 49
Şekil 3.34 C11 (%0,35) isimli karışımın yük - zaman grafiği 50
Şekil 3.35 C11 (%0,35) isimli karışımın %R - zaman grafiği 50
Şekil 3.36 C11 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=31, LE=5, $R^2 = 0{,}99$,SL=0,0017) 51
Şekil 3.37 C12 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=35, LE=7, $R^2 = 0{,}99$,SL=0,0016) 51
Şekil 3.38 C13 (%0,8) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=27, LE=17, $R^2 = 0{,}97$, SL=0,0018) 52
Şekil 3.39 C14 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=26, LE=11, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0018) 53
Şekil 3.40 C15 (%1,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=28, LE=21, $R^2 = 0{,}96$, SL=0,0020) 53
Şekil 3.41 3mm karbon lifli karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 54
Şekil 3.42 3mm karbon lifli karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 55

Şekil 3.43 3mm karbon lifli karışımlarda R^2 Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 55
Şekil 3.44 3mm karbon lifli karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği..... 56
Şekil 3.45 3mm karbon lifli karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 56
Şekil 3.46 C1 (%0,35) isimli karışımın yük - zaman grafiği 57
Şekil 3.47 C1 (%0,35) isimli karışımın %R - zaman grafiği 58
Şekil 3.48 C1 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=25, LE=6, $R^2 = 0{,}99$,SL=0,0021) 58
Şekil 3.49 C2 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=15, LE=16, $R^2 = 0{,}96$,SL=0,0020) 59
Şekil 3.50 C3 (%0,8) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=21, LE=17, $R^2 = 0{,}95$, SL=0,0020) 60
Şekil 3.51 C4 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=27, LE=8, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0020) 60
Şekil 3.52 C5 (%1,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=28, LE=22, $R^2 = 0{,}95$, SL=0,0018) 61
Şekil 3.53 6mm karbon lifli karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 62
Şekil 3.54 6mm karbon lifli karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 62
Şekil 3.55 6mm karbon lifli karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 63
Şekil 3.56 6mm karbon lifli karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği..... 63
Şekil 3.57 6mm karbon lifli karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 64
Şekil 3.58 C6 (%0,35) isimli karışımın yük - zaman grafiği 65
Şekil 3.59 C6 (%0,35) isimli karışımın %R - zaman grafiği 65
Şekil 3.60 C6 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=26, LE=6, $R^2 = 0{,}99$,SL=0,0016) 66
Şekil 3.61 C7 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=20, LE=12, $R^2 = 0{,}97$,SL=0,0020) 67

Şekil 3.62 C8 (%0,8) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=25, LE=9, $R^2 = 0{,}98$, SL=0,0020) 67
Şekil 3.63 C9 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=31, LE=10, $R^2 = 0{,}98$, L=0,0017)..... 68
Şekil 3.64 C10 (%1,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=32, LE=24, $R^2 = 0{,}91$, SL=0,0013) 69
Şekil 3.65 13mm karbon lifli karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 70
Şekil 3.66 13mm karbon lifli karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 70
Şekil 3.67 13mm karbon lifli karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 71
Şekil 3.68 13mm karbon lifli karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği..... 71
Şekil 3.69 13mm karbon lifli karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 72
Şekil 3.70 Alüminyum tozu katkılı örnekler kalıptan alınmış 73
Şekil 3.71 Alüminyum tozu katkılı örnekler kalıpta..... 73
Şekil 3.72 Alüminyum tozu katkılı karışımlarda Dayanım – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği..... 74
Şekil 3.73 Ap1 (%0,35) isimli karışımın yük - zaman grafiği..... 75
Şekil 3.74 Ap1 (%0,35) isimli karışımın %R - zaman grafiği..... 75
Şekil 3.75 Ap1 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=43, LE=22, $R^2 = 0{,}97$,SL=0,0011) 76
Şekil 3.76 Ap2 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=21, LE=13, $R^2 = 0{,}98$, SL=0,0012) 76
Şekil 3.77 Ap3 (%0,8) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=31, LE=21, $R^2 = 0{,}92$, SL=0,0008) 77
Şekil 3.78 Ap4 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=6, LE=20, $R^2 = 0{,}96$, SL=0,0020) 77
Şekil 3.79 Ap5 (%1,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=23, LE=17, $R^2 = 0{,}91$, SL=0,001) 78

Şekil 3.80 Ap6 (%2) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=23, LE=27, $R^2 = 0{,}95$, SL=0,0010) 78
Şekil 3.81 Alüminyum tozlu karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 79
Şekil 3.82 Alüminyum tozlu karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 80
Şekil 3.83 Alüminyum tozlu karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 80
Şekil 3.84 Alüminyum tozlu karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği 81
Şekil 3.85 Alüminyum tozlu karışımlarda Puan – Hacimsel iletken oranı grafiği ... 82
Şekil 3.86 A1 (%0,35) isimli karışımın yük - zaman grafiği 83
Şekil 3.87 A1 (%0,35) isimli karışımın %R - zaman grafiği 83
Şekil 3.88 A1 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=39, LE=21, $R^2 = 0{,}97$, SL=0,0015) 84
Şekil 3.89 A2 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=27, LE=5, $R^2 = 0{,}98$, SL=0,0016)..... 84
Şekil 3.90 A3 (%0,8) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=32, LE=16, $R^2 = 0{,}96$, SL=0,0010) 85
Şekil 3.91 Ap4 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=22, LE=29, $R^2 = 0{,}84$, SL=0,0022) 86
Şekil 3.92 Ap5 (%1,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=41, LE=35, $R^2 = 0{,}84$, SL=0,002) 86
Şekil 3.93 A6 (%2) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=39, LE=24, $R^2 = 0{,}86$, SL=0,0013) 87
Şekil 3.94 Alüminyum lifli karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 88
Şekil 3.95 Alüminyum lifli karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 88
Şekil 3.96 Alüminyum lifli karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 89
Şekil 3.97 Alüminyum lifli karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği..... 90
Şekil 3.98 Alüminyum lifli karışımlarda Puan – Hacimsel iletken oranı grafiği 90
Şekil 3.99 Brp1 (%0,35) isimli karışımın yük - zaman grafiği..... 91

Şekil 3.100 Brp1 (%0,35) isimli karışımın %R - zaman grafiği 92
Şekil 3.101 Brp1 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=33, LE=11, $R^2 = 0{,}97$,SL=0,0014) 92
Şekil 3.102 Brp2 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=39, LE=11, $R^2 = 0{,}99$,SL=0,0011) 93
Şekil 3.103 Brp3 (%0,8) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=36, LE=6, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0012) 93
Şekil 3.104 Brp4 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=41, LE=7, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0011) 94
Şekil 3.105 Brp5 (%1,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=41, LE=9, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0013) 95
Şekil 3.106 Brp6 (%2) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=43, LE=4, $R^2 = 0{,}99$, L=0,0012) 95
Şekil 3.107 Pirinç tozlu karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği ... 96
Şekil 3.108 Pirinç tozlu karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 97
Şekil 3.109 Pirinç tozlu karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 97
Şekil 3.110 Pirinç tozlu karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği 98
Şekil 3.111 Pirinç tozlu karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği . 98
Şekil 3.112 K1 (%0,35) isimli karışımın yük - zaman grafiği 99
Şekil 3.113 K1 (%0,35) isimli karışımın %R - zaman grafiği 100
Şekil 3.114 K1 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=27, LE=4, $R^2 = 0{,}99$,SL=0,0016) 100
Şekil 3.115 K2 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=38, LE=8, $R^2 = 0{,}99$,SL=0,0012) 101
Şekil 3.116 K3 (%0,8) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=43, LE=5, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0012) 102
Şekil 3.117 K4 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=39, LE=11, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0011) 102
Şekil 3.118 K5 (%1,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=25, LE=15, $R^2 = 0{,}97$, SL=0,0015) 103

Şekil 3.119 K6 (%2) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=33, LE=10, $R^2 = 0{,}98$, SL=0,0015) 104
Şekil 3.120 Kömür tozlu karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 104
Şekil 3.121 Kömür tozlu karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 105
Şekil 3.122 Kömür tozlu karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği . 106
Şekil 3.123 Kömür tozlu karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği 106
Şekil 3.124 Kömür tozlu karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 107
Şekil 3.125 T1 (%0,2) isimli karışımın yük - zaman grafiği 108
Şekil 3.126 T1 (%0,2) isimli karışımın %R - zaman grafiği 108
Şekil 3.127 T1 (%0,2) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=28, LE=8, $R^2 = 0{,}99$,SL=0,0015) 109
Şekil 3.128 T2 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=34, LE=14, $R^2 = 0{,}92$,SL=0,0014) 109
Şekil 3.129 T3 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=32, LE=5, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0016) 110
Şekil 3.130 T4 (%0,8) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=33, LE=6, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0017) 111
Şekil 3.131 T5 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=46, LE=6, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0011) 111
Şekil 3.132 T6 (%1,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=25, LE=9, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0015) 112
Şekil 3.133 Tufalli karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 113
Şekil 3.134 Tufalli karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği..... 113
Şekil 3.135 Tufalli karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği..... 114
Şekil 3.136 Tufalli karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği 115
Şekil 3.137 Tufalli karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 115

Şekil 3.138 Tufalli, kömür tozlu ,pirinç tozlu ve lifsiz karışımların duyarlılık – hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 116
Şekil 3.139 Tufalli, kömür tozlu ,pirinç tozlu ve lifsiz karışımların doğrusallık hatası – hacimsel yüzde iletken oranı grafiği 117
Şekil 3.140 Tufalli, kömür tozlu ,pirinç tozlu ve lifsiz karışımların puan – hacimsel yüzde iletken oranı grafiği..... 118

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Silika dumanı teknik özellikleri (Üretici bilgileri) 5
Tablo 2.2 Akışkanlaştırıcının teknik özellikleri (Üretici bilgileri) 6
Tablo 2.3 M0 lifsiz karışımın 1m3'teki kullanılan malzemelerin kilogram cinsinden miktarı..... 14
Tablo 2.4 Karışım isimleri ve karışımlardaki iletken oranları 14

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

Dünyadaki yapıların büyük bir kısmı beton kullanılarak inşa edilmiştir. Ancak, beton malzemesinin çevreyle etkileşimi ve dejenerasyonu sonucu bir çok yapı bakıma muhtaç ve kullanılamaz hale gelmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan köprülerin %30'u yapısal olarak güvensizken, malzeme bozulmaları nedeniyle betondan yapılmış alt yapılar, tasarım ömürleri dolmadan yıpranmıştır (Reza ve diğer., 2003). Yapıların performansı, depremler, malzeme bozulmaları ve diğer çevresel etkiler nedeniyle olumsuz etkilenir. Yapıları geri hizmete sunmak ve güvenli bir duruma getirmek için önemli bir çaba gösterilmesi gerekir. Yapı sağlığını izlemek, yapı servis ömrününü uzatmakta yardımcı ve önemli bir faktördür (Ou, 2010; Banthia, 2009). Yapı sağlığının izlenmesi, can ve mal güvenliğinin sağlanması için çok önemlidir. Yapı sağlığının izlenmesinde kullanılan metal gerinim pulları, düşük dayanıklılığa, düşük hassasiyete ve yüksek maliyete sahipler. Bu nedenlerle, metal gerinim pulları kısa süreler için, yüksek maliyetlerle kullanılabilinirler (Chung, 2001). Akıllı beton bu sorunun ele alınması için ideal bir mühendislik malzemesidir.

Çimentolu malzemelerin elektriksel dirençleri 2 ve 4 elektrot metoduyla ölçülebilmektedir. İki elektrot metodunda, akım verilmesi ve voltaj okuması aynı elektrotlardan yapılırken, dört elektrot metodunda akım verilmesi ve voltaj okuması farklı elektrot çiftleri ile yapılır (Han ve diğer., 2007; Chiarello ve Zinno, 2005). Ayrıca çimentolu malzemelerin elektriksel direnç ölçümünde çevresel ve batırılmış elektrot metotları kullanılmıştır. Çevresel elektrot metodunda, iletken bant veya boya, malzemenin etrafına sarılır. Batırılmış elektrot metodunda, iletken ağ, tel veya çubuk, malzemeye batırılır. Döküm sırasında beton kompoziti içine dağıtılan lifler beton matrisi içinde kapsamlı bir iletken ağ oluşturur (Chen ve Liu, 2008; Teomete ve Erdem, 2011; Li ve diğer., 2006, 2008). Beton kompoziti deformasyona, dışarıdan gelen bir kuvvete veya çevresel bir etkiye maruz kaldığında içindeki iletken ağ düzeni değişerek betonun elektriksel özelliklerini etkiler. Statik veya dinamik koşullar altında şekil değiştirme, yük, çatlak veya hasar kompozitin elektriksel özelliklerine etki eder. Beton kompozitine yük uygulanması ile elektriksel direnci değişir, buna piezo-resistiv

etki denir (Ou ve Han, 2009). Teomete ve Kocyigit (2013), yarmada çekme testi ile çelik lifli çimentolu malzemelerin çekme birim şekil değiştirmesine duyarlılığını test etmişlerdir; yüksek duyarlılık tespit etmişlerdir. Teomete (2013), çimentolu kompozitlerin çatlak boyu - elektriksel direnç ilişkisinin güçlü doğrusal ilişki olduğunu sunmuştur. Teomete (2014), çelik lifli çimentolu kompozite birim şekil değiştirmenin elektrik akımına dik yönde uygulanması durumunda elektriksel dirence etkisini basınç ve yarmada çekme testleri ile test etmiştir ve "çapraz etki mekanizmasını" sunmuştur. Basınç yükü altında elektriksel direnç azalır. Yükün boşalmasıyla, lifler ilk boylarına dönerler ve elektriksel direnç artar (Teomete ve Kocyigit, 2015). Malzemede oluşan hasar da elektriksel direnci değiştirir (Chung, 2000, 2001; Teomete ve Erdem, 2011).

Literatürde, çimentolu kompozitlerin birim şekil değiştirme - elektriksel direnç etkisi çimento harcı ve hamuru üzerinde çalışılmış, beton üzerinde deneysel olarak ilk defa çalışılmaktadır. Bu çalışmada, farklı hacimsel oranlarda bakır, karbon, alüminyum, kömür, pirinç, tufal iletkenlerini içeren betonların birim şekil değiştirme – elektriksel direnç ilişkileri deneysel olarak incelendi. Çalışma kapsamında, 1 adet lifsiz, 7 adet bakır lifli, 6 adet bakır tozlu, 5 adet 3mm karbon lifli, 5 adet 6mm karbon lifli, 5 adet 13mm karbon lifli, 6 adet alüminyum tozlu, 6 adet alüminyum lifli, 6 adet pirinç tozlu, 6 adet kömür tozlu, 6 adet tufalli toplamda 59 adet karışım grubu oluşturuldu. Beton karışım tasarımı, TS802 "BETON KARIŞIM TASARIMI HESAP ESASLARI" standartı esas alınarak yapıldı. Her bir karışım grubu için 3 adet 75mm boyutlu küp örnek döküldü ve örneklere basınç testi uygulandı. Toplamda 177 örnek döküldü, test edildi ve analizleri yapılıp grafiklere işlendi. Yapılan basınç testleri ile elektriksel direncin birim şekil değiştirme etkisiyle oluşan değişimi incelendi. Karışımların duyarlılık, doğrusallık hatası, limit birim şekil değiştirme gibi sensör özellikleri belirlendi. İletkenli betonun basınç birim şekil değiştirme - elektriksel direnç ilişkisi güçlü doğrusal ilişki göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, kendi hasarını ve birim şekil değiştirmesini ölçen akıllı betonun geliştirilmesi için önemlidir.

BÖLÜM İKİ
KULLANILAN MALZEMELER VE METOTLAR

Betonun tasarımında kullanılan malzemeler, örneklerin hazırlanma yöntemleri, deneylerde kullanılan ekipmanlar, basınç testinde izlenilen adımlar ve basınç deneyi ile ilgili detaylar bu başlık altında incelenmiştir.

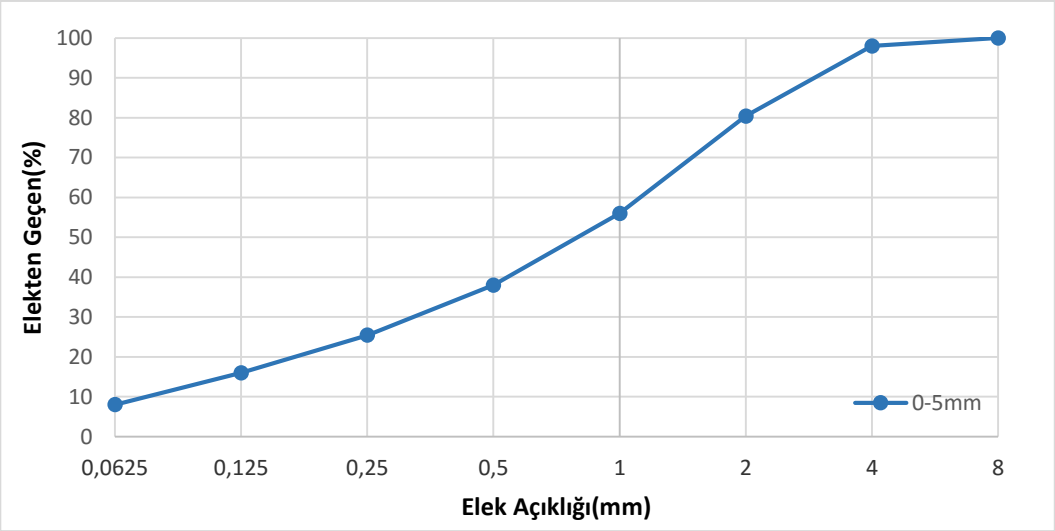
2.1 Kullanılan Malzemeler

2.1.1 Çimento

Tüm karışımlarda kullanılan çimento aynı olup, çimento tipi BATIÇİM CEM II/B-M(L-W) 42,5 R'dir. Çimento Batıçim Batı Anadolu Çimento Sanayii A.Ş. tarafından hibe edilmiştir. Kullanılan çimentonun fiziksel özellikeri şu şekildedir. Özgül ağırlığı 2,97, özgül yüzeyi 4607 gr/cm^2'dir. Çimento havadaki nemden etkilenmemesi amacıyla plastik bidonlarda saklanmaktadır.

2.1.2 İnce Agrega(Kum)

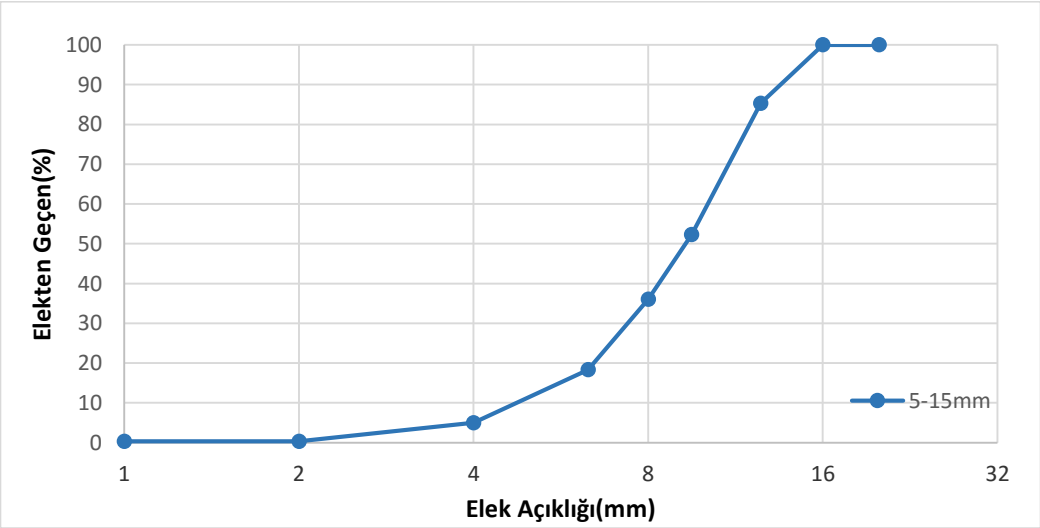
Tüm karışımlarda kullanılan ince agrega kireçtaşından elde edilmiş olup BATIBETON firmasından temin edilmiştir. Dane boyutu 0-5 mm aralığındadır. Elek analizi sonuçları Şekil 2.1'de sunulmuştur. Kum "TS3526 Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini" standartına göre malzeme laboratuarında test edilmiştir. Kumun nem içeriği %0,14, su emme oranı %1,99 ve kuru yüzey doygun özgül ağırlığı 2,62 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 2.1 İnce agrega elek analizi sonuçları

2.1.3 İri Agrega

Tüm karışımlarda kullanılan iri agrega kireçtaşından elde edilmiş olup BATIBETON firmasından temin edilmiştir. Dane boyutu 5-15 mm aralığındadır. Elek analizi sonuçları Şekil 2.2'de sunulmuştur. İri agrega "TS3526 Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini" standartına göre malzeme laboratuarında test edilmiştir. İri agreganın nem içeriği %0,1, su emme oranı %0,52 ve kuru yüzey doygun özgül ağırlığı 2,71 olarak tespit edilmiştir.



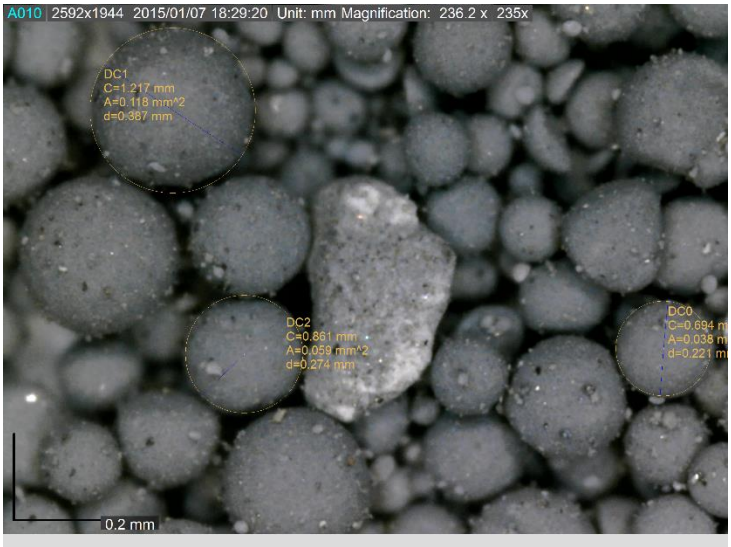
Şekil 2.2 İri agrega elek analizi sonuçları

2.1.4 Silika Dumanı

Karışımlarda kullanılan silika dumanı tipi MasterROC MS610 olup, BASF Türk Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. Silika dumanının dane boyutunun 200 ile 300 nm arasında değişmekte olduğu mikroskop görüntüleriyle tespit edilmiştir. Ürünün teknik özellikleri Tablo 2.1'de, 235 kez büyütülmüş mikroskop resimleri ise Şekil 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.1 Silika dumanı teknik özellikleri (Üretici bilgileri)

Malzemenin Yapısı	Yoğunlaştırılmış Mikro-silika
Yoğunluk	0,55-0,70 kg/lt
Klor miktarı (EN 480-10)	<0,1%
Blain (İncelik)	>15000 m2/kg
SiO2 oranı	>%85
CaO oranı	<%1
SO3 oranı	<%2
0,045 mm'den <Partikül oranı	<%40
Aktivite Endeksi	>%95
Özgül ağırlık	2,3



Şekil 2.3 Silika dumanı 235 kez büyütülmüş mikroskop görüntüsü

2.1.5 Su

Şebeke suyundaki klor, elektrotları korozyona uğrattığı için karışım ve kür işlemlerinde içilebilir özellikte olan hazır su kullanılmıştır.

2.1.6 Akışkanlaştırıcı

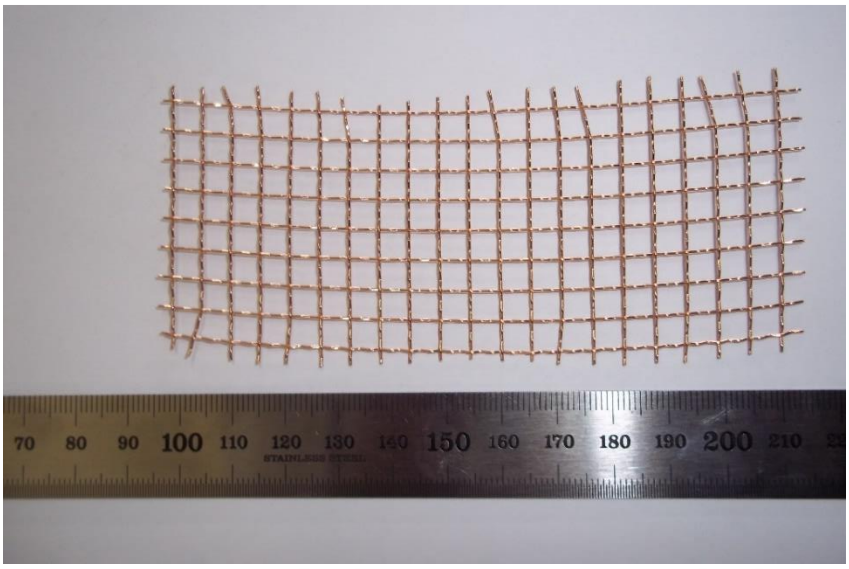
Karışımlarda Sika Viscocrete Hi-Tech30 süper akışkanlaştırıcı kullanıldı. Yoğunluğu 1,07-1,11 kg/lt'dir ve klor iyonu içermez. Ürünün teknik özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2 Akışkanlaştırıcının teknik özellikleri (Üretici bilgileri)

Kimyasal yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Yoğunluk	1,07 – 1,11kg/l , 20 C°'de
pH değeri	3 - 7
Donma noktası	-9 C°
Suda çözünebilir klorür yüzdesi	En fazla %0,1 klorür içermez
Alkali miktarı(%Na2O Eşdeğeri olarak)	En fazla % 4

2.1.7 Bakır Elektrot

Deney örneklerine verilecek olan elektrik akımının daha iyi iletilebilmesi için, elektrot olarak saf bakır malzemeden üretilen hasır şeklinde örülü ağ kullanılmıştır. Bu bakır ağın göz açıklığı 5 mm ve ağdaki bakır tellerin çapları 0,6 mm'dir. Malzeme Çin Halk Cumhuriyetinde özel olarak üretilip ithal edilmiştir. Kullanılan bakır elektrotların görüntüsü Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 Bakır elektrot

2.1.8 Döküm Kalıbı

Beton kalıpları çelikten imal edilmiştir. Kalıp gözleri 7,5*7,5*7,5 cm ebatlarında olup yan duvarlarına 2 mm genişliğinde ve 55 mm yüksekliğinde dörder boşluk açılmıştır. Bu boşluklara geçirilen bakır elektrotlar kalıbın yan duvarlarından, her iki taraftan çıkacak şekilde yerleştirilir. Kullanılan döküm kalıbının görüntüsü Şekil 2.5'te verilmiştir.



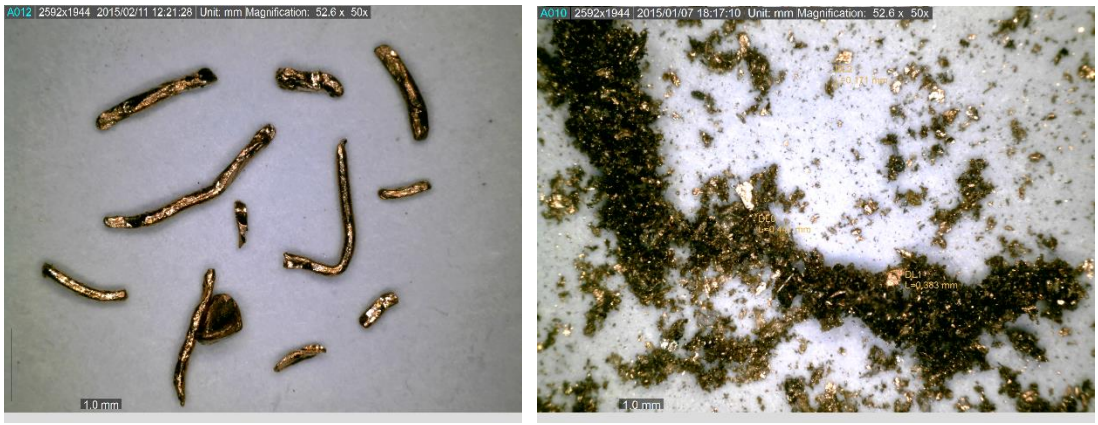
Şekil 2.5 Döküm kalıbı

2.1.9 Kullanılan İletkenler

Aşağıda, karışımlarda kullanılan iletkenlerin özellikleri anlatılmıştır. Bakır, alüminyum iletkenlerinde iki farklı boy, karbon lifte ise üç farklı boy kullanılmıştır. Boyutları 0-400 μm'den küçük olan malzemeler toz, büyük olanlar ise lif olarak adlandırılmıştır.

2.1.9.1 Bakır Lif ve Toz

Malzeme BMS Metal Sanayi'den temin edilmiştir. Deneylerde iki farklı boyda bakır iletkeni kullanılmıştır. Malzemenin özgül ağırlığı 8,93'tür. Bakır iletkenleri mikroskop altında incelenmiştir ve boy ölçümleri yapılmıştır. Bu incelemelere göre daha iri taneli olan bakır liflerin hakim şekli daha çok uzun silindirler olarak belirlenmiştir. Uzunlukları ortalama 1.5 mm, çapları ise ortalama 280 μm olarak tespit edilmiştir. Daha ince taneli olan bakır tozun ise 300 μm'dan küçük dairesel parçalardan oluştuğu görülmüştür. Bu iki malzemenin 50 kere büyütülmüş mikroskop görüntüsü Şekil 2.6 (a)'da ve Şekil 2.6 (b)'de verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 2.6 (a) Bakır lif, (b) Bakır toz

2.1.9.2 Karbon Lif

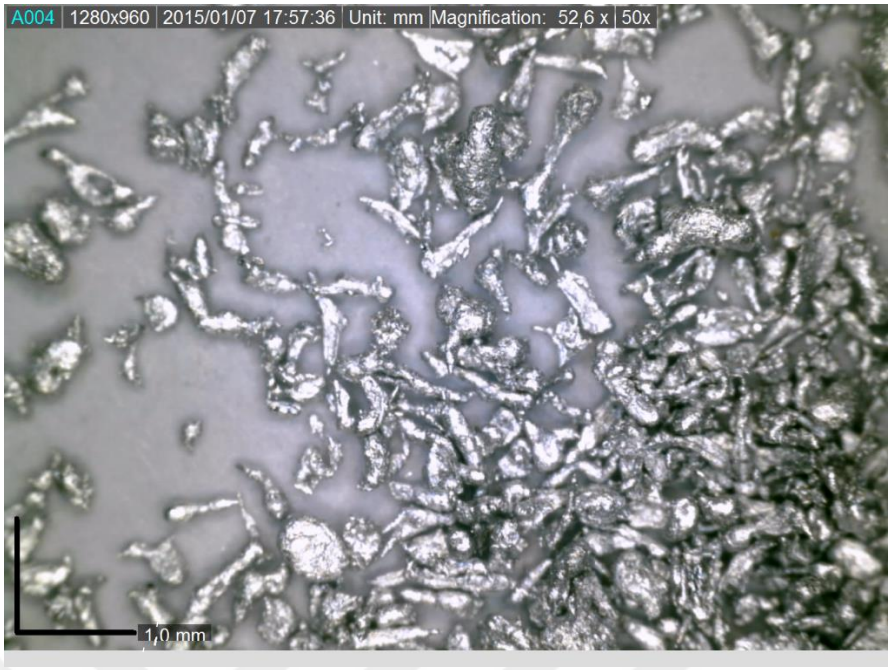
Karbon lifler (pellet) DowAksa A.Ş.'den temin edilmiştir. Pellet, 7 μm çapında karbon liflerin epoksi ile yapıştırılıp, daha kalın bir lif elde edilmesi ile üretilir. Bundan sonra pelletlere karbon lif, 7 μm kalınlığında karbon life ince lif denilecektir. Deneylerde üç farklı boyda karbon lif kullanılmıştır. Bunlar 3 mm, 6 mm, 13 mm uzunluğundadır. 6 mm uzunluğundaki karbon lifin 50 kere büyütülmüş mikropskop görüntüsü Şekil 2.7'de verilmiştir.



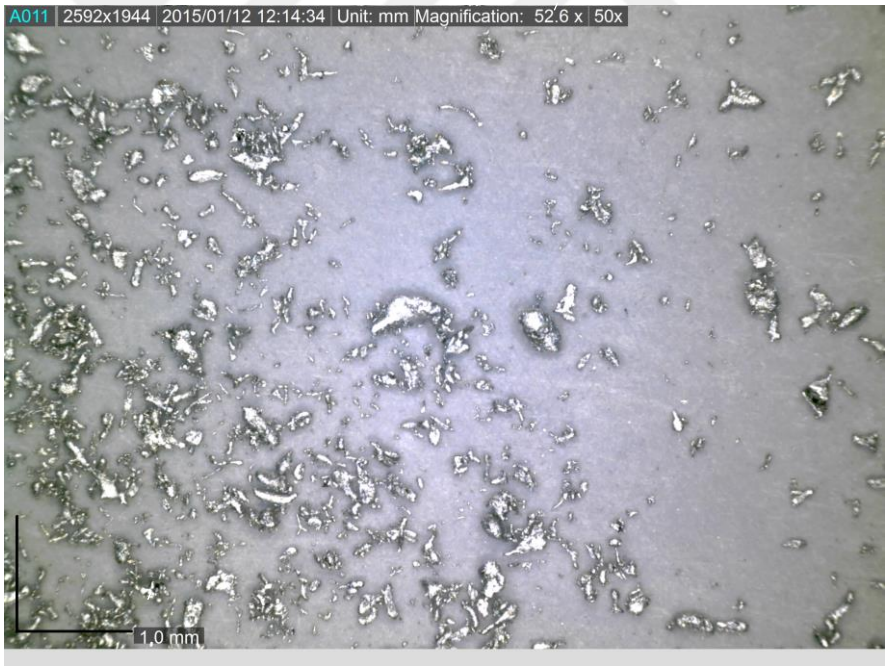
Şekil 2.7 6 mm uzunluğundaki karbon lif

2.1.9.3 Alüminyum Lif ve Toz

Malzeme BMS Metal Sanayi'den temin edilmiştir. Deneylerde iki farklı boyda alüminyum iletkeni kullanılmıştır. Malzemenin özgül ağırlığı 2,7'dir. Alüminyum iletkenleri mikroskop altında incelenmiş ve boy ölçümleri yapılmıştır. Bu incelemelere göre daha iri taneli olan alüminyum liflerin hakim şekli daha çok silindirler ve küresel parçalar olarak belirlenmiştir. Silindirik parçaların uzunlukları ortalama 900 μm, çapları ise ortalama 240 μm olarak tespit edilmiştir. Küresel parçaların çapları ise ortalama olarak 400 μm olarak tespit edilmiştir. Daha ince taneli olan alüminyum tozun boyutları 300 μm'den küçük olarak tespit edilmiştir. Bu iki malzemenin 50 kere büyütülmüş mikropskop görüntüsü Şekil 2.8'de ve Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.8 Alüminyum lif



Şekil 2.9 Alüminyum toz

2.1.9.4 Pirinç Tozu

Malzeme BMS Metal Sanayi'den temin edilmiştir. Özgül ağırlığı 8,73'tür. Pirinç iletkenleri mikroskop altnda incelenmiştir ve boy ölçümleri yapılmıştır. Bu

incelemelere göre pirinç danelerinin hakim şekli pul ve silindiriktir. Pirinç tozun uzunlukları ortalama 380 μm, genişlikleri ise ortalama 110 μm olarak tespit edilmiştir. Bu malzemenin 50 kere büyütülmüş mikropskop görüntüsü Şekil 2.10'da verilmiştir.



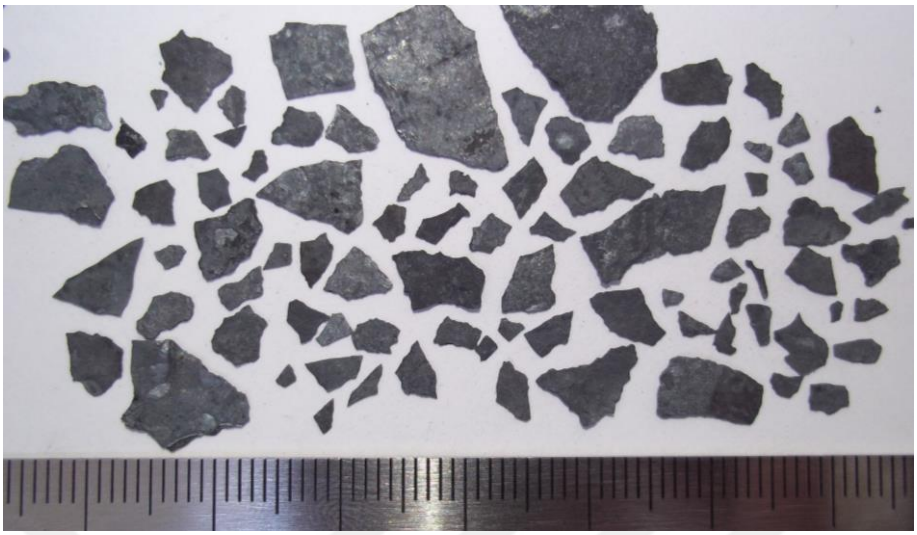
Şekil 2.10 Pirinç tozu

2.1.9.5 Tufal

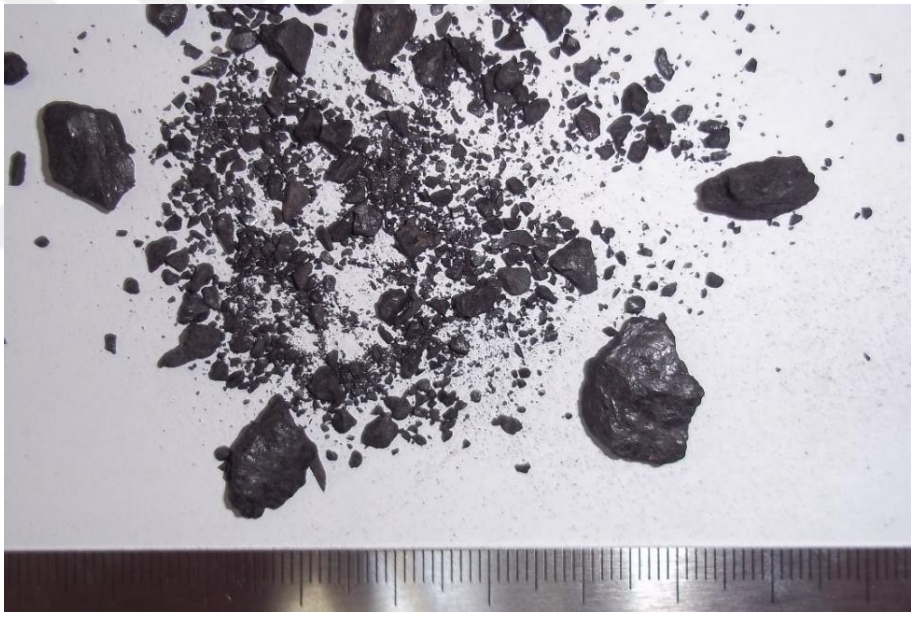
Tufal İzmir Demir Çelik Sanayi firmasından temin edilmiştir. Malzemenin özgül ağırlığı 5,14'tür. Malzemenin hakim şekli plakadır. Boyutları 1 cm ile 1-2 mm arası değişmektedir. Kalınlıkları ise ortalama 320 μm olarak tespit edilmiştir. Bu malzemenin görüntüsü Şekil 2.11'de verilmiştir.

2.1.9.6 Kömür Tozu

Kömür tozu, Türkiye Taş Kömürü Kurumu'ndan temin edilmiştir. Kömür Armutcuk üretimi kömür olmakla birlikte boyutları 0 – 10 mm arası değişmektedir. Malzemenin özgül ağırlığı 1,29'dur. Bu malzemenin görüntüsü Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.11 Tufal

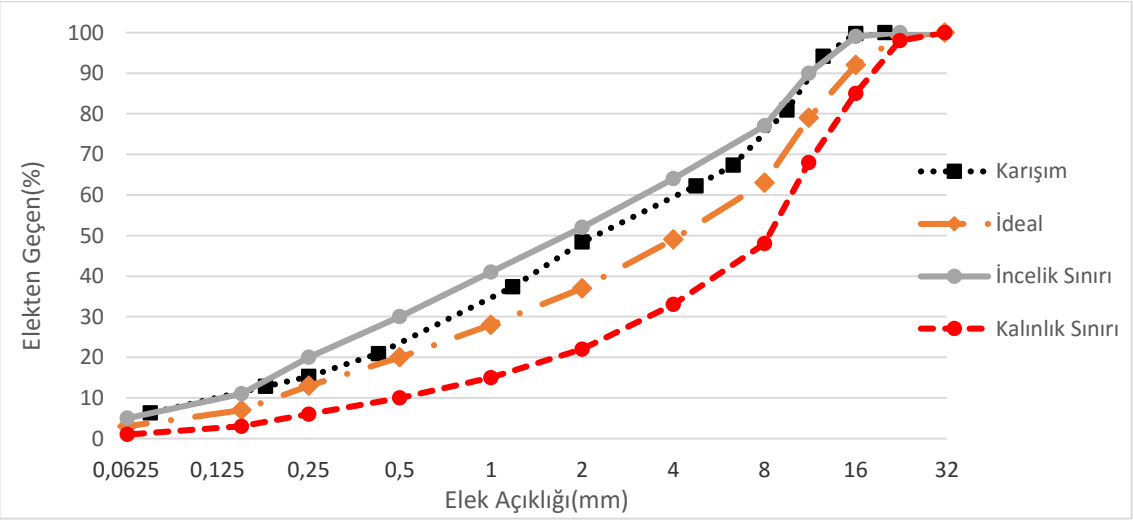


Şekil 2.12 Kömür

2.2 Beton Karışımlarının Tasarımı

Elektriksel direnç – birim şekil değiştirme ilişkisinin tayinininde, betonun elektriksel iletkenliğini artırmak ve etkisini görmek amacıyla farklı iletkenlere sahip karışımlar tasarlanmıştır. Beton karışım tasarımı TS802 "BETON KARIŞIM TASARIMI HESAP ESASLARI" standartı esas alınarak yapılmıştır. Beton karışım tasarımı yapılırken aşağıdaki adımlar uygulanmıştır.

- Hava sürüklenmemiş betonda hedef basınç dayanımı 45 MPa seçilmiştir.
- Hava sürüklenmemiş 45 MPa dayanımlı beton için Su/Bağlayıcı oranı 0,37 bulunmuştur.
- Betonun çökme miktarı 8 – 10 cm seçilerek, su içeriği 228 kg/m^3 bulunmuştur.
- Agrega en büyük tane büyüklüğüne (15 mm) ve iklim şartlarına bağlı olarak beton karışım hesaplarında kullanılacak uygun hava içeriği hava sürüklenmemiş beton için %2,2 bulunmuştur.
- Akışkanlaştırıcıyı üreten firmanın kataloğundan yararlanılarak Akışkanlaştırıcı/Bağlayıcı oranı %1 alınmıştır.
- Akışkanlaştırıcıyı üreten firmanın kataloğundan yararlanılarak akışkanlaştırıcının su kesme oranı %10 alınmıştır.
- Silika dumanı üreten firmanın kataloğundan yararlanılarak Silika dumanı/Toplam bağlayıcı oranı %10 alınmıştır.
- Karışımlardaki iri agrega ve ince agreganın dağılımı %60 ince agrega, %40 iri agrega şeklindedir. Bu değerler karışımı standartta verilen incelik sınırı ve kalınlık sınırının arasında bırakacak şekilde seçilmiştir. Şekil 2.13'te karışım, incelik sınırı, kalınlık sınırı ve ideal granülometri eğrileri verilmiştir. Laboratuarda agregaların su emme ve nem oranı deneyleri yapılıp karışımlardaki su miktarı da buna göre dengelenmiştir.



Şekil 2.13 Granülometri eğrileri(Karışım, ideal, incelik sınırı, kalınlık sınırı)

Tablo 2.3 M0 lifsiz karışımın 1m^3'teki kullanılan malzemelerin kilogram cinsinden miktarı

	Çimento (kg/m^3)	İri Agrega (kg/m^3)	İnce Agrega (kg/m^3)	Silika Dumanı (kg/m^3)	Su (kg/m^3)	Akışkanlaştırıcı (kg/m^3)
M0	499	543	804	55	208	5,6

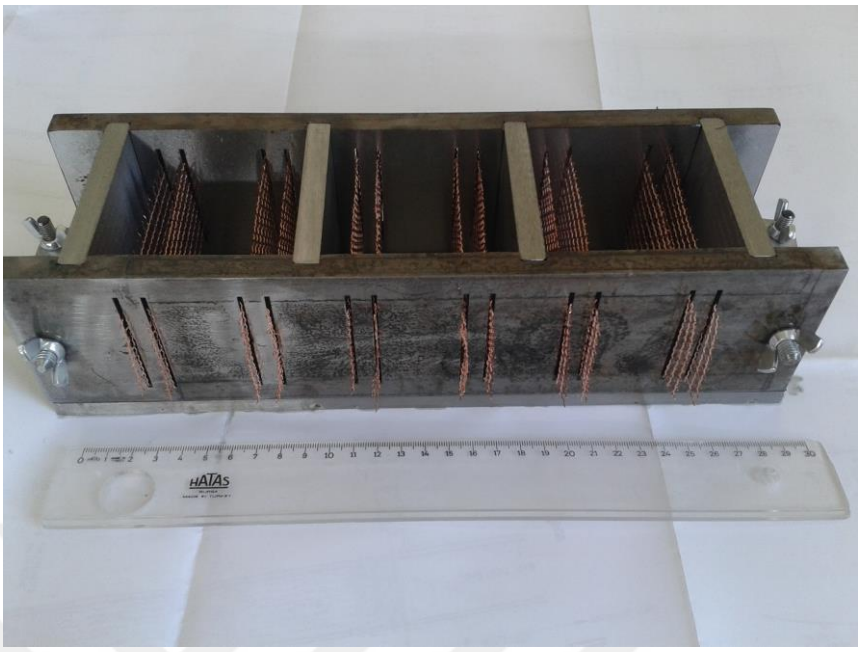
Bu karışımlarda farklı boy ve oranlarda bakır lifler, karbon lifler, alüminyum lifler, pirinç toz, tufal ve kömür tozu kullanılmıştır. Çalışma kapasamında lifsiz 1 adet, bakır lifli 7, bakır tozlu 6, 3mm karbon lifli 5, 6mm karbon lifli 5, 13mm karbon lifli 5, alüminyum tozlu 6, alüminyum lifli 6, pirinç tozlu 6, kömür tozlu 6, tufalli 6 toplamda 59 adet karışım tasarlandı. Her bir karışım için 3 adet 75mm boyutlu küp örnek döküldü. Toplamda 177 örnek döküldü. Bu karışımların içinde bulunan iletken oranları ve karışım isimleri aşağıdaki Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.4 Karışım isimleri ve karışımlardaki iletken oranları

Kullanılan İletkenler	**Hacim Oranları (%) ve Karışım İsimleri**						
	0,2	0,35	0,5	0,8	1	1,5	2
Bakır Lif	Co7	Co8	Co1	Co9	Co2	Co10	Co3
Bakır Toz	Cop4	Cop5	Cop1	Cop6	Cop2	-	Cop3
Pirinç Toz	-	Brp1	Brp2	Brp3	Brp4	Brp5	Brp6
Karbon Lif L=3mm	-	C11	C12	C13	C14	C15	-
Karbon Lif L=6mm	-	C1	C2	C3	C4	C5	-
Karbon Lif L=13mm	-	C6	C7	C8	C9	C10	-
Alüminyum Lif	-	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Alüminyum Toz	-	Ap1	Ap2	Ap3	Ap4	Ap5	Ap6
Kömür	-	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Tufal	T1	T2	T3	T4	T5	T6	-

2.3 Beton Karışımlarının Hazırlanması

Karışıma girecek malzemeler hazırlanmadan önce ilk işlem olarak döküm kalıbı hazırlanır. Kalıplar, ince bir film tabakası kalacak şekilde kalıp yağı ile yağlanır. Daha sonra bakır elektrotlar kalıplardaki boşluklardan geçirilerek Şekil 2.14'te görüldüğü gibi kalıp döküme hazır hale getirilir.



Şekil 2.14 Döküme hazır beton kalıbı

Karışıma girecek malzemeler, TS802 ile oluşturulan reçeteye göre hassas terazi yardımıyla tartılır. 125lt'lik eğik eksenli portatif beton mikserine sırasıyla iri agrega, ince agrega, çimento ve silika dumanı boşaltılır. Bu işlem sırasında mikser kabına eklenen malzemeler her seferde tahta kaşık yardımıyla karıştırılır.

Kuru karışımda homojenlik sağlandıktan sonra akışkanlaştırıcı ve su ayrı bir kapta birbirine karıştırılır. Birbirlerine iyice karıştıklarına emin olunduktan sonra akışkanlaştırıcı - su karışımı her seferinde toplam suyun 1/3'ü oranında olmak üzere kuru karışımın üzerine ilave edilir. Beton kıvamını alana kadar mikserde karıştırılır.

Beton kıvamını aldıktan sonra istenilen iletken malzeme, karışımın içinde topaklanma oluşturmayacak şekilde yavaş yavaş ilave edilir ve karıştırılır. Bu işlem iletken malzeme bitene kadar tekrarlanır. Karışım daha sonra küp kalıplarına kalıbın her bir gözü iki seferde dolacak şekilde elle yerleştirilir ve şişlenir. Kalıplara yerleştirilen beton daha sonra sarsma tablasında 10 saniye süresince sarsılır ve beton içinde oluşan boşlukların doldurulması amaçlanır. Sarsma sonrası kalıbın açıkta kalan yüzeyi spatula yardımı ile düzeltilir ve Şekil 2.15'teki gibi beton küplerin düzgün bir yüzeye sahip olması hedeflenir.



Şekil 2.15 Dökümü tamamlanmış beton örnekleri



Şekil 2.16 Kür tankı



Şekil 2.17 Kür tankı içindeki örnekler

Beton örnekleri kalıpta 24 saat geçirdikten ve prizini aldıktan sonra örneklere zarar vermeden kalıptan alınır. Örnekler kalıptan alındıktan sonra, mekanik testler sırasında herhangi eğik yüklemeye maruz kalmaması amacıyla örneklerin test yüzeyleri düzeltilir. Kalıp yüzeyi sebebiyle oluşan pürüzler temizlenir. Betondan dışarı çıkan bakır tellerin fazla kısmı yan keski yardımıyla kesilir. Örnek isimleri yazılarak Şekil 2.16 ve Şekil 2.17'de görülen içme suyu ile doldurulmuş kür tankına bırakılır. Kür tankının su sıcaklığı sabit 20 C˚ olarak tutulmuştur. 28 günlük kür süresi tamamlandıktan sonra kürden çıkarılan örnekler, 36. gün olan kırım tarihine kadar basınç testine hazırlanır ve oda ortamında bekletilir. Basınç testine hazırlık, basınç testi ve teste hazırlık bölümünde anlatılmıştır.

2.4 Kullanılan Ekipmanlar

2.4.1 Shimadzu Mekanik Test Cihazı

Basınç testlerinde, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilimdalı Laboratuarında bulunan Shimadzu marka AGS-X 300kN model elektromekanik test cihazı kullanılmıştır. Şekil 2.18'de kullanılan test cihazı görülmektedir.

Başlıca özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Yük hücreleri kapasitesinin 1/500'ü ile 1/1'i arasındaki tüm yüklerde aynı hassasiyette okumayı sağlar.
- Yüksek data gönderim frekansına sahiptir. Saniyede 1000 data (1kHz) hızı gönderme kapasitesine sahiptir.
- TRAPEZIUMX® bilgisayar yazılımı ile istediğiniz test metodunu kolayca oluşturma ve detaylı bir şekilde analiz etme imkanı verir.
- ISO 178, ISO 527, ISO 37, ISO 6892, ASTM D412, ASTM D638, ASTM D695 gibi standartlarda test yapabilir.
- AGS-X, yük ve deplasman kontrollü test yapabilir.

2.4.2 National Instruments (NI) cDAQ 9178 Veri Toplama Cihazı

National Instruments(NI) cDAQ 9178, 8 yuvaya sahip, karma ölçümler alabilen küçük ve taşınabilir bir test ekipmanıdır. Şekil 2.19'da NI cDAQ 9178 görülmektedir. Mevcut 8 yuvaya, NI'dan satın alınan çeşitli modüller takılıp karma ölçümler alınabilir. Bu modüller ivme, akım, voltaj, birim şekil değiştirme, sıcaklık ölçmek ve ses kaydetmek gibi çeşitli amaçlara özel olarak üretilip kullanılmaktadır. NI cDAQ 9178 sayesinde bu karma ölçümler tek bir usb kablosuyla masaüstü bilgisayarına veya dizüstü bilgisayarına kaydedip analiz edilebilir. Bu tez kapsamında NI cDaq 9178 ile hassas bir şekilde birim şekil değiştirme değerleri, voltaj değerleri ve akım değerleri eş zamanlı olarak kaydedilip analiz edilmiştir.



Şekil 2.18 Shimadzu marka AGS-X 300kN model elektromekanik test cihazı



Şekil 2.19 NI cDAQ 9178

NI cDAQ 9178 veritoplama cihazı LabVIEW programı ile programlanır. LabVIEW, Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench kelimelerinin kısaltılmasından elde edilen bir isimdir ve bir programlama ortamını tanımlar. LabVIEW, işlerinin bir parçası olarak bir programa ihtiyaç duyan bilim insanları ve mühendisler gibi kişiler için tasarlanmış, interaktif bir program geliştirme ve uygulama sistemidir. Bu programda, içinden veri akan hatlar yardımıyla fonksiyonel

noktaları birbirine bağlayarak bir grafik gösterim üzerinden program üretilir. Geleneksel programlama dilleri ile haftalar veya aylar içerisinde yazılabilecek olan programlar, LabVIEW kullanılarak saatler içerisinde tamamlanır. Çünkü LabVIEW, verileri analiz etmek, ölçümlerini almak ve sonuçlarını kullanıcıya sunmak için özel olarak geliştirilmiştir.

2.5 Basınç Testi ve Teste Hazırlık

2.5.1 Örneklerin Teste Hazırlanması

Örnekler 28. gün kür havuzundan alınır. Takriben bir haftadan kısa sürede örnekler teste hazır hale gelir ve 36. günde örnekler test edilir.

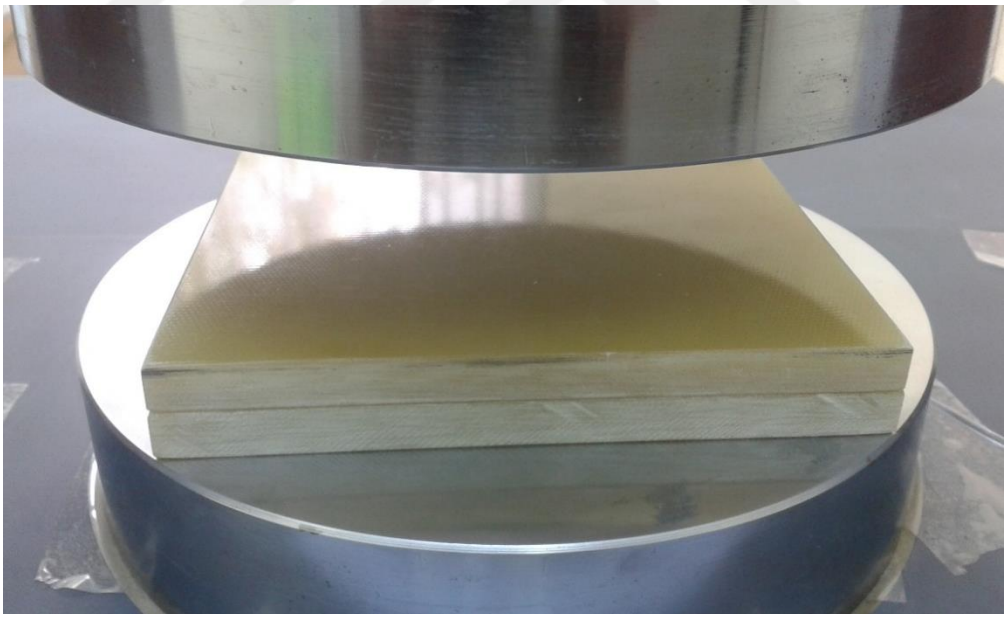
Örnekler kürden alındıktan sonraki 24 saat içinde oda sıcaklığında kurumaya bırakılırlar. Tamamen kuruduktan sonra deney esnasında ekstra elektriksel direnç oluşumunu önlemek amacıyla örneklerin bakır elektrotlarının üstünde oluşan korozyon bir törpü yardımıyla temizlenir. Sonraki aşama örneklere gerinim pullarını yapıştırmaktır. Gerinim pullarının yapışacağı yüzeyler dış fırçasıyla temizlendi ve gerinim pullarının yerleri belirlendi. Gerinim pulları yük doğrultusuna paralel ölçüm alacak şekilde yapıştırıldı. Gerinim pulları yapıştırıldıktan sonra boşta kalan kablolar toparlanıp örneklerin üstüne bantlandı ve örnekler deney gününe kadar oda sıcaklığında bekletildi.

2.5.2 Basınç Testi

Dökümden sonraki 36. gün örneklere basınç testi uygulanmıştır. Deneyden önce elektriksel izolasyonu sağlamak amacıyla örnekler ile basınç başlıkları arasına cam lif – epoksi kompozit plakalar konuldu. Bu plakalar ayrıca örnek yüzeylerinde oluşan kayma gerilmelerini azalttı. Şekil 2.21'de kompozit plakalar görülmektedir.



Şekil 2.20 C5 isimli örnek ve gerinim pulları

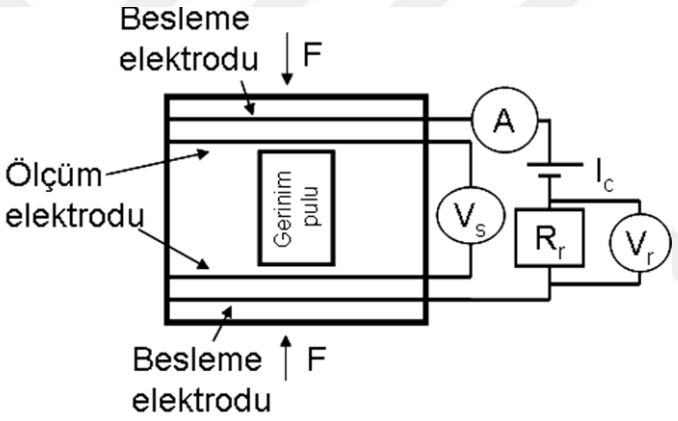


Şekil 2.21 Kompozit plakalar

Testten önce bütün örnekler 20 volt doğru akım altında 15 dakika polarize edilmiştir. Burda polarize etmek demek örnekleri sabit akım altında belirli bir süre tutmaktır. Bunun amacı polarizasyondan oluşan direnç değişiminin, deney yapılırken basınç yüklemesinden oluşan direnç değişimine karışmasının önüne geçmektir.

Test deplasman kontrollü sabit 0,5 mm/dakika test hızı ile yapıldı. Tüm örneklere 100N ön yük verilmiştir. Bu uygulamanın amacı betonun yüzeyinde var olan pürüzleri ezip, test başlangıcında cihazın başlığı ile örnekler arasında boşluksuz bir ortam elde etmektir.

Basınç testi sırasında, Gw Instek GPS 4303 doğru akım kaynağı ile örneğe dış iki elektrottan 20 volt değerinde doğru akım verildi. Örneklerin elektriksel direncini ölçmek için iç iki elektrottan örnek potansiyel farkı (V_S) ölçüldü. Eş zamanlı olarak örneğe seri bağlı referans direncin (R_R =1000 Ohm) potansiyel farkı (V_R) ölçülmüştür. Devre şeması Şekil 2.22'de verilmiştir.



Şekil 2.22 Deneylerde kullanılan devrenin şeması

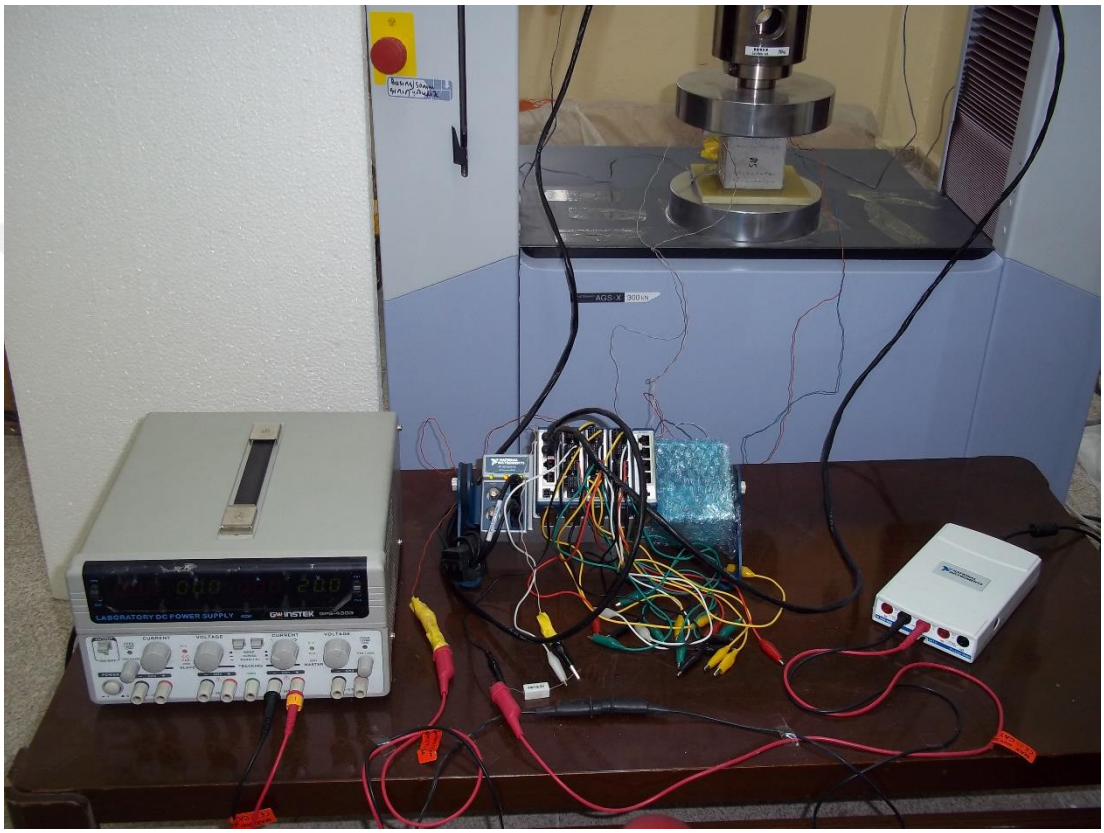
Deney sırasında herhangi bir anda devreden geçen akım (I_C) Ohm Kanunu kullanılarak Formül 2.1'de bulunmuştur. Örneğin anlık elektriksel direnci (R_S) devreden geçen akım (I_C) ve örnek potansiyel farkı (V_S) sayesinde Formül 2.2'den hesaplandı. Daha sonra deney boyunca örnekte meydana gelen elektriksel direnç değişimi (%R) Formül 2.3'den hesaplanmıştır. Formül 2.3'de (R_{S0}) örneğin deney öncesi elektriksel direncidir.

$$I_C = \frac{V_R}{R_R} \tag{2.1}$$

$$R_S = \frac{V_S}{I_C} \tag{2.2}$$

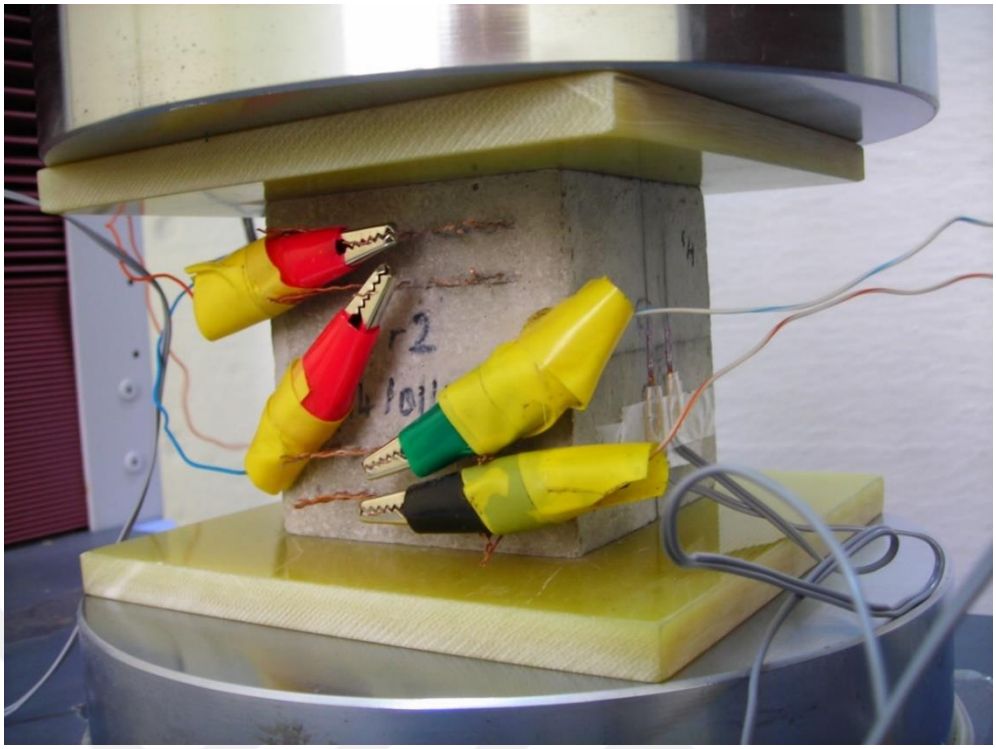
$$\%R = \left(\frac{R_S}{R_{S0}} - 1\right) \times 100 \quad (2.3)$$

Ayrıca NI DMM multimetre ile de anlık olarak devreden geçen akım ölçülüp kaydedilmiştir. Deney esnasında kullanılan devre aşağıda Şekil 2.23'te verilmiştir.



Şekil 2.23 Deneylerde kullanılan devre

Test, 290kN maksimum yüke ulaşana veya örnekler dayanımı yitirip kırılana kadar devam ettirildi. Şekil 2.24'de test anındaki bir örnek görülmektedir. Deney süresince, uygulanan mekanik yük, başlık yer değiştirmesi, birim şekil değiştirme, potansiyel farklar (Vs, Vr), devreden geçen akım saniyede 10 defa bilgisayara kaydedilmiştir.



Şekil 2.24 Brp2 isimli örnek test edilirken

2.6 Karışım Performans Parametreleri Ve Puanlama Sistemi

Karışımların ve klasik metal gerinim pullarının performansı genelde 3 parametre ile belirtilir. Bu parametreler *Duyarlılık (K), Doğrusallık (LE), Limit Değer(SL)'dir*.

2.6.1 Duyarlılık (K)

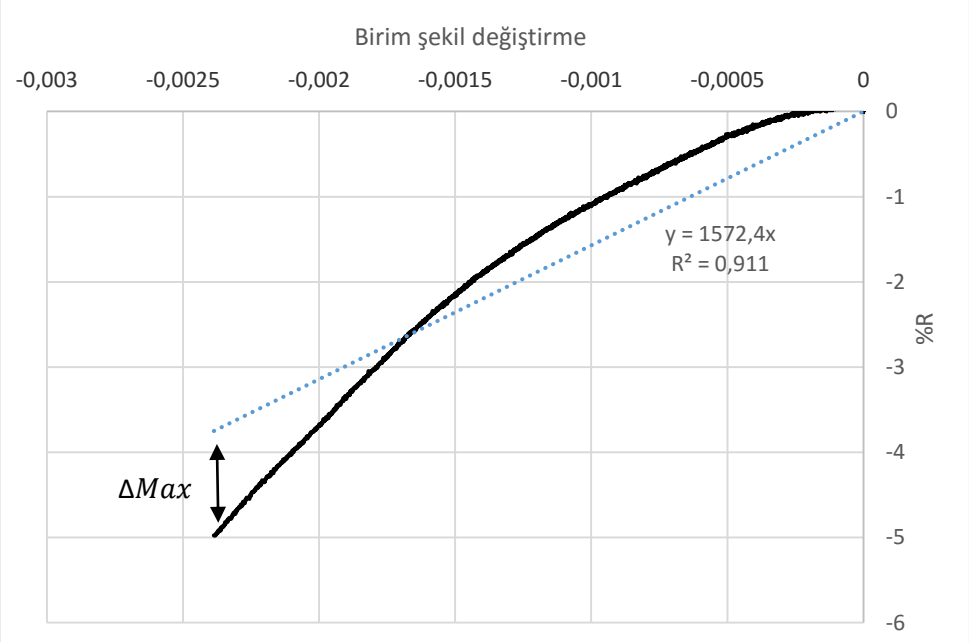
Duyarlılık, (Gage factor) bir birim şekil değiştirme ile elektriksel dirençteki değişimdir. Algılayıcı ne kadar yüksek duyarlılık değerine sahipse o kadar hassastır. Duyarlılığın yüksek olması istenilen bir durumdur. Klasik metal gerinim pullarında (strain gage) duyarlılık genelde 2'dir. Duyarlılık Formül 2.4 yardımıyla hesaplanabilir. Formül 2.4'te $\Delta\varepsilon$ deneyde gerçekleşen maksimum birim şekil değiştirmeyi temsil eder.

$$K = \frac{(R_S - R_{S0})/R_{S0}}{\Delta\varepsilon} \tag{2.4}$$

2.6.2 Doğrusallık Hatası (%LE)

Doğrusallık hatası; elektriksel direnç değişimi - birim şekil değiştirme eğrisinin kendisine en küçük kareler metodu ile uydurulmuş doğrudan sapma miktarını temsil eder. Doğrusallığın düşük olması istenilen bir durumdur. Doğrusallık hatasının düşük olması; algılayıcı ile ölçülen birim şekil değiştirme hatasının küçük olduğunu gösterir. Doğrusallık hatası Formül 2.5 yardımıyla hesaplanabilir. Formül 2.5'te, ΔMax deneyden elde edilen veri ile en küçük kareler yöntemi ile oluşturulan doğru arasındaki en büyük sapmayı temsil eder. Şekil 2.25'te ΔMax grafikte gösterilmiştir.

$$\%LE = \left(\frac{\Delta Max}{\%R}\right) x100 \tag{2.5}$$



Şekil 2.25 ΔMax'ın grafik üzerinde gösterimi

2.6.3 Limit Değer (SL)

Limit değer (SL), algılayıcının kabul edilebilinir bir hata ile ölçüm yapabileceği en büyük birim şekil değiştirme değerine denir. Elektriksel direnç - birim şekil değiştirme grafiğinin doğrusal ilişki içinde olduğu en büyük birim şekil değiştirmedir. Tipik metal gerinim pullarının limit değerleri %0.5-%3 arasındadır.

2.6.4 Puanlama Sistemi

Bütün karışımlar için yük – deplasman grafikleri, birim şekil değiştirme – zaman, %R – zaman, birim şekil değiştirme – elektriksel direnç değişimi grafikleri çizdirilmiştir. İlgili analiz yöntemleri uygulanıp her karışım için performans parametreleri bulunmuştur. Değişkenlerin çokluğu sebebiyle karışımları iyiden kötüye sıralamak için bir puanlama sistemi geliştirilmiştir. Puanlama sistemi Formül 2.6'da verilmektedir. Duyarlılık ve limit değer, yüksek olması istenen parametreler olduğu için toplanmıştır. LE ise düşük olması istenildiği için çıkarılmıştır. Formül 2.6'da R^2 korelasyon katsayısıdır ve yapısı gereği 1 ile -1 arasında olması gerekir. R^2 basınç deneylerinde daha çok 1 ile 0,9 arasında değişen değerler vermektedir. R^2'nin yüksek olması sinyal kalitesi açısından istenilen bir durumdur. R^2'nin puanlamaya etkisi olması için, R^2 1'den çıkarılıp 200 ile çarpılmış daha sonra ise toplam puandan çıkarılmıştır. R^2 ne kadar yüksek olursa puana olan negatif etkisi o kadar düşük kalacaktır.

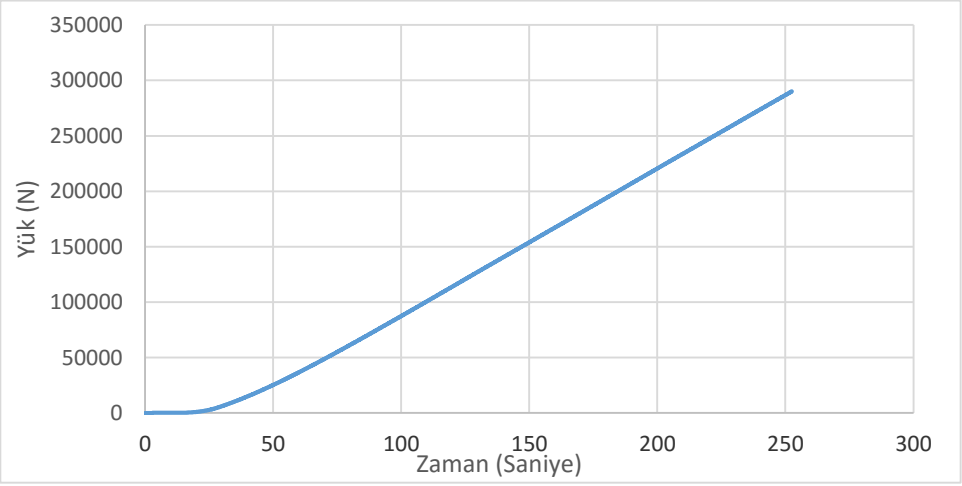
$$Puan = 1000 * \mathrm{SL} + K - LE - (1 - R^2) * 200 \tag{2.6}$$

BÖLÜM ÜÇ
BULGULAR VE TARTIŞMA

Karışımların analiz sonuçları, grup içinde karşılaştırılması bu bölüm altında incelenmiştir. Bir iletken ile oluşturulan farklı hacim oranına sahip karışımlar grup olarak tanımlanmıştır.

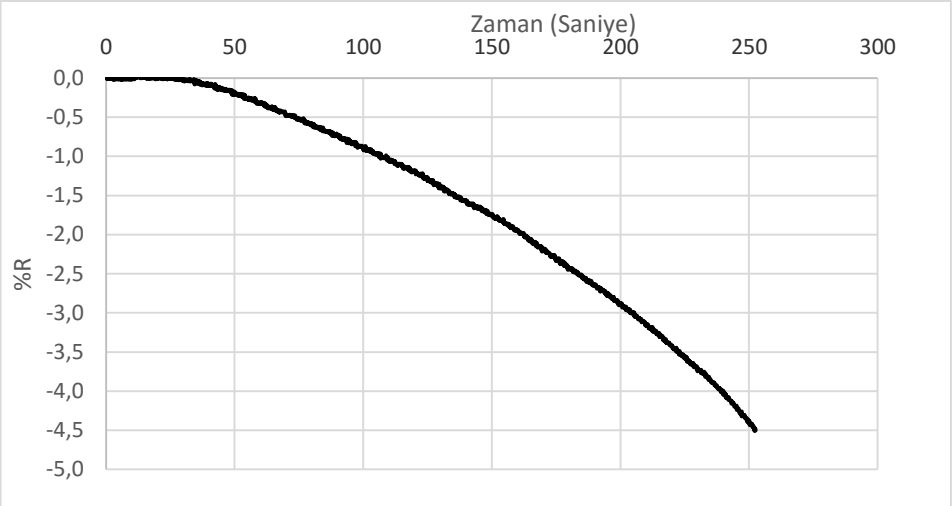
İletkenli karışımlarla karşılaştırılmak üzere 3 adet 75mm küp M0 lifsiz referans karışım dökülmüştür. M0 isimli örneğin hacimsel yüzde iletken oranı %0'dır Bir adet örneğin yük – zaman, %R – zaman, %R – birim şekil değiştirme grafiği verilip incelenecektir.

Şekil 3.1'de M0 lifsiz karışımın yük – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde örneğin 20. saniyeden sonra yük almaya başladığı görülmektedir. Bu zaman sürecinde örnek ile başlık arasında kalan pürüzler ve kusurlar ezilmektedir. Deney 290 kN olan maksimum yüke kadar devam etmiştir. Dökülen üç örnekte 290kN olan maksimum yükte dayanımını yitirmemiştir.



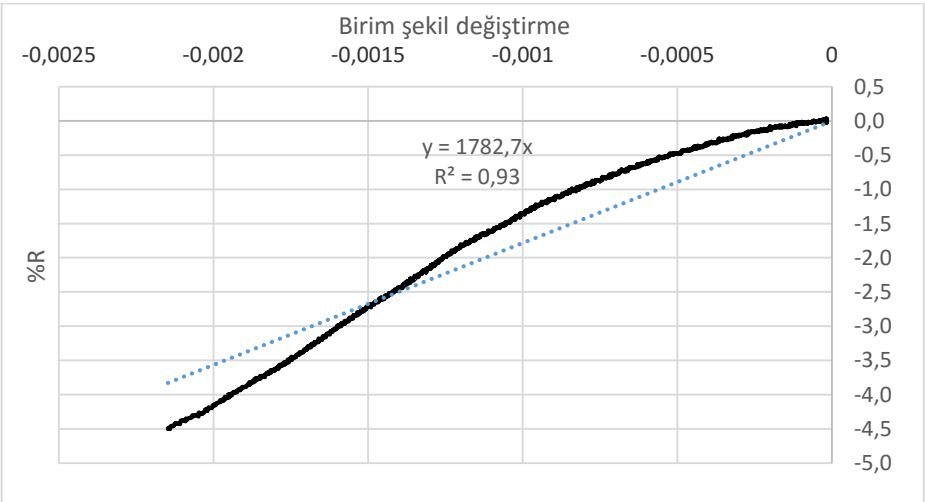
Şekil 3.1 M0 lifsiz karışımın yük – zaman grafiği

Şekil 3.2'de M0 lifsiz karışımın %R – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde deney süresince artan basınç yükü etkisiyle elektriksel dirençte düşme meydana gelmiştir.



Şekil 3.2 M0 lifsiz karışımın %R - zaman grafiği

Şekil 3.3'te M0 lifsiz karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. M0 lifsiz karışıma ait duyarlılık değeri K=21 olarak ölçülmüştür. M0 lifsiz karışım metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 10 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %5, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0021 ve korelasyon katsayısı R^2=0,93 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında doğrusala yakın bir ilişki görülmektedir.



Şekil 3.3 M0 lifsiz karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=21 LE=15, $R^2 = 0{,}93$, SL=0,0021)

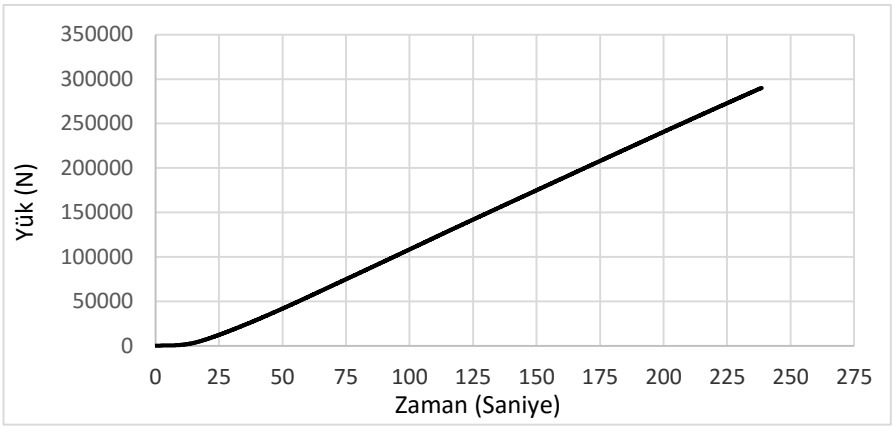
İletkenli karışımlar için grup içinden bir karışımın yük – zaman, %R – zaman, %R – birim şekil değiştirme grafiği verilip incelenecektir. Diğer karışımlar için sadece %R – birim şekil değiştirme grafiği verilip incelenecektir. Grup için K, R^2, LE, Rso ve puan grafiği verilip incelenecektir. Her karışım içim dökülen 3 adet küp örneğin deney sonuçlarına göre elde edilen verilerinin ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanmış ve o karışıma ait nihai veriler elde edilip grafiklerle sunulmuştur. Test edilen tüm karışımların ortalama performans değerleri ve puan değerleri hesaplanıp Ekler'de sunulmuştur.

3.1 Bakır Katkılı Karışımların Analiz Sonuçları

3.1.1 Bakır Tozlu Karışımların Analiz Sonuçları

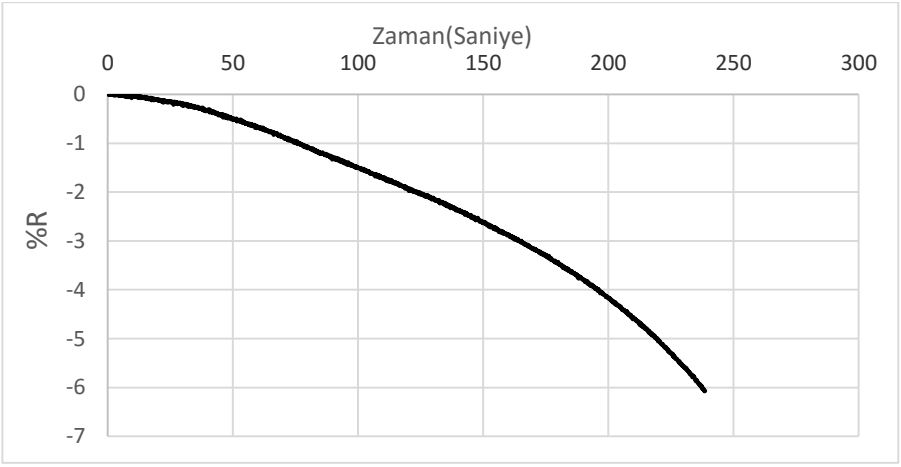
Bakır tozu kullanılarak, farklı hacimsel oranlara sahip 6 farklı karışım oluşturulmuştur. Her karışımdan 3'er adet 75mm küp dökülmüştür ve test edilmiştir. Bu grup için toplamda 18 adet beton küp örneği test edilip analiz edilmiştir. Oluşturulan karışımların isimleri ve sahip olduğu bakır tozu miktarları Tablo 2.4'te sunulmuştur.

Şekil 3.4'te hacimce %0,2 oranında bakır toz içeren Cop4 isimli karışımın yük – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde örneğin 13. saniyeden sonra yük almaya başladığı görülmektedir. Bu zaman sürecinde örnek ile başlık arasında kalan pürüzler ve kusurlar ezilmektedir. Deney 290 kN olan maksimum yüke kadar devam etmiştir. Grupta bulunan Cop2 ve Cop3 harici tüm örnekler 290 kN yük altında dayanımını yitirmemiştir. Cop2 karışımından 1 örnek 285 kN'da kırılmıştır. Dayanımı 50 MPa olarak hesaplanmıştır. Cop3 karışımındaki örnekler ise ortalama 235 kN yük altında kırılmışlardır. Dayanımları ortalama 41 MPa olarak hesaplanmışlardır.



Şekil 3.4 Cop4 (%0,2) isimli karışımın yük - zaman grafiği

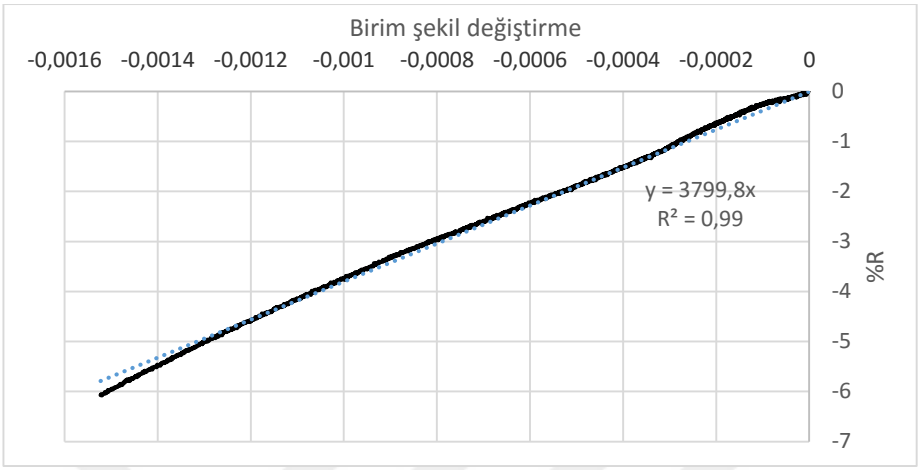
Şekil 3.5'te hacimce %0,2 oranında bakır toz içeren Cop4 isimli karışımın %R – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde deney süresince artan basınç yükü etkisiyle elektriksel dirençte düşme meydana gelmiştir. Artan basınç yükü etkisiyle numune matrisinde sıkışmalar başlamış, matris - iletken ve iletken - iletken ara yüzeylerindeki etkileşimler artmıştır (Teomete ve Erdem, 2013). Artan basınç sayesinde örneğin içinde bulunan mikro boşluklar kapanır ve örneğin elektriksel direnci düşer.



Şekil 3.5 Cop4 (%0,2) isimli karışımın %R - zaman grafiği

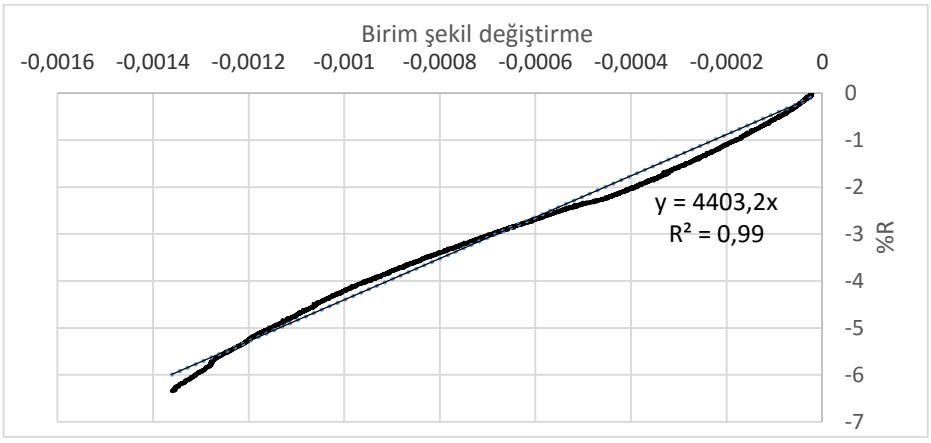
Şekil 3.6'da hacimce %0,2 oranında bakır toz içeren Cop4 isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Cop4 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K=40 olarak ölçülmüştür. Cop4 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 20 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %5, limit birim şekil

değiştirmesi (SL) 0,0015 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



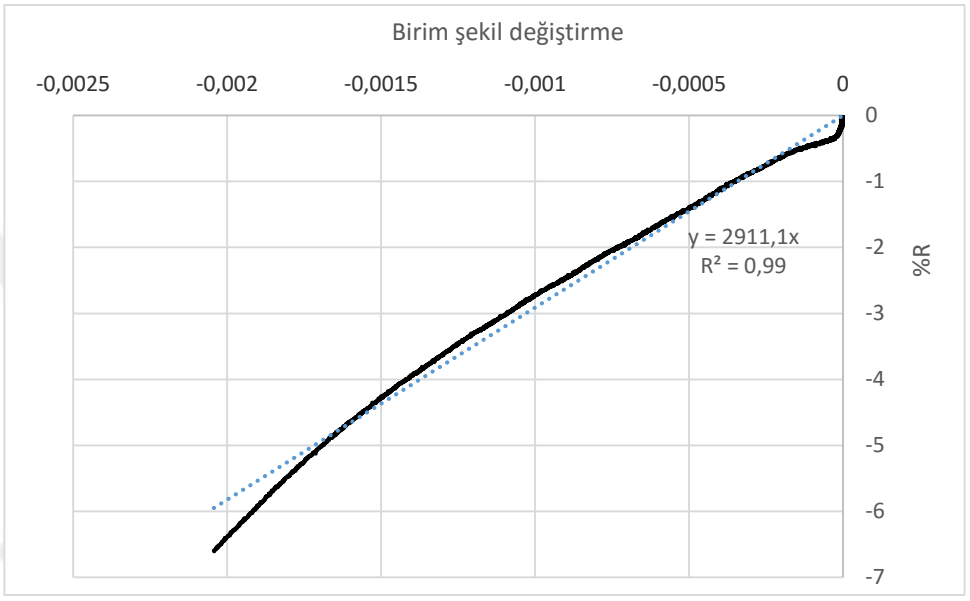
Şekil 3.6 Cop4 (%0,2) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=40 LE=5, R^2 = 0,99, SL=0,0015)

Şekil 3.7'de hacimce %0,35 oranında bakır toz içeren Cop5 isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Cop5 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K=53 olarak ölçülmüştür. Cop5 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 26 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %5, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0013 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



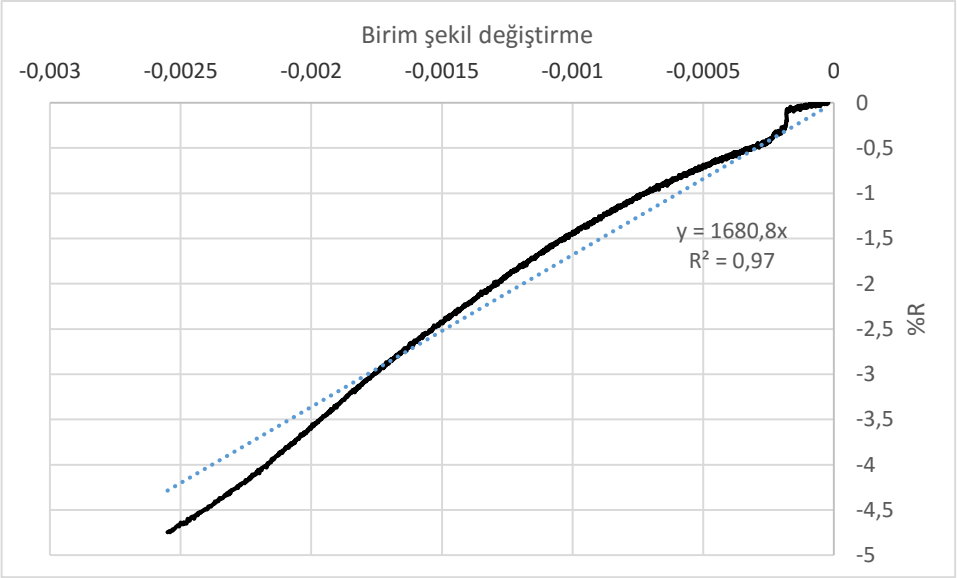
Şekil 3.7 Cop5 (%0,35) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=53 LE=5, R^2 = 0,99, SL=0,0013)

Şekil 3.8‘de hacimce %0,5 oranında bakır toz içeren Cop1 isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Cop1 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K=32 olarak ölçülmüştür. Cop1 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 16 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %10, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0020 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



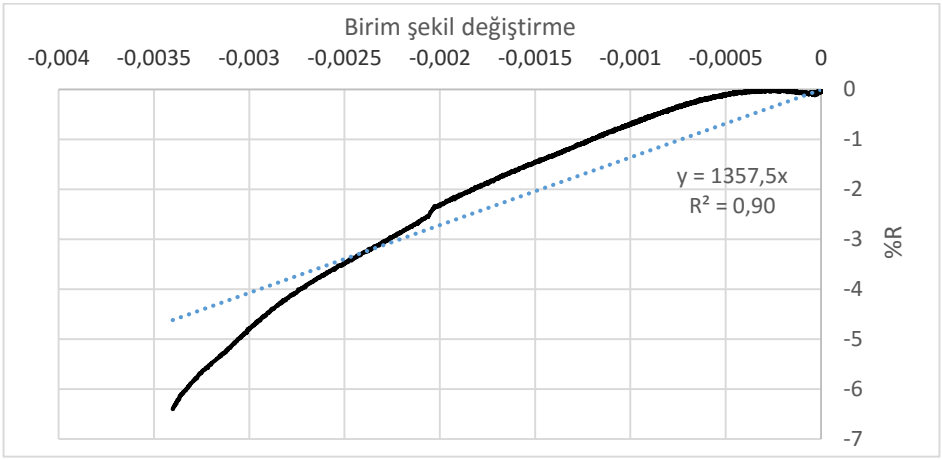
Şekil 3.8 Cop1 (%0,5) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=32 LE=10, R^2 = 0,99, SL=0,0020)

Şekil 3.9‘da hacimce %0,8 oranında bakır toz içeren Cop6 isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Cop6 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K=19 olarak ölçülmüştür. Cop6 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 9 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %10, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0025 ve korelasyon katsayısı R^2=0,97 olarak bulunmuştur.



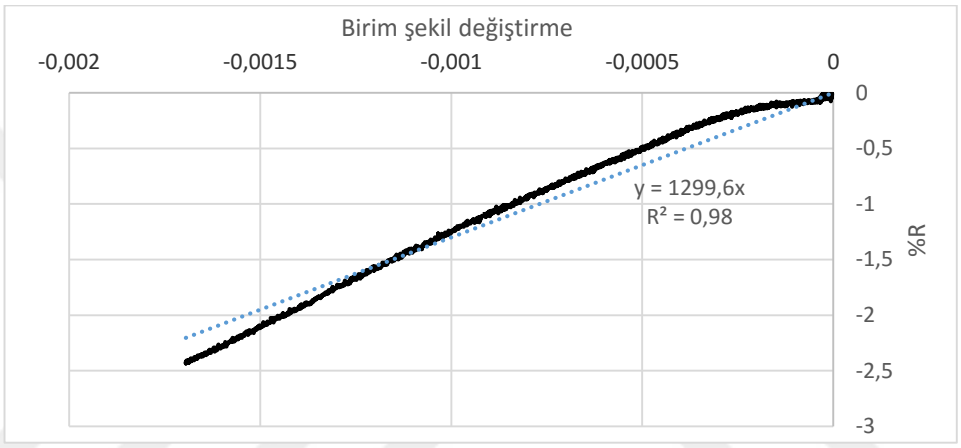
Şekil 3.9 Cop6 (%0,8) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=19 LE=10, $R^2 = 0,97$, SL=0,0025)

Şekil 3.10'da hacimce %1 oranında bakır toz içeren Cop2 isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Cop2 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K=19 olarak ölçülmüştür. Cop2 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 9 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %28, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0034 ve korelasyon katsayısı R^2=0,90 olarak bulunmuştur. Grup içinden sadece bir adet örnek 285 kN yükte kırılmıştır.



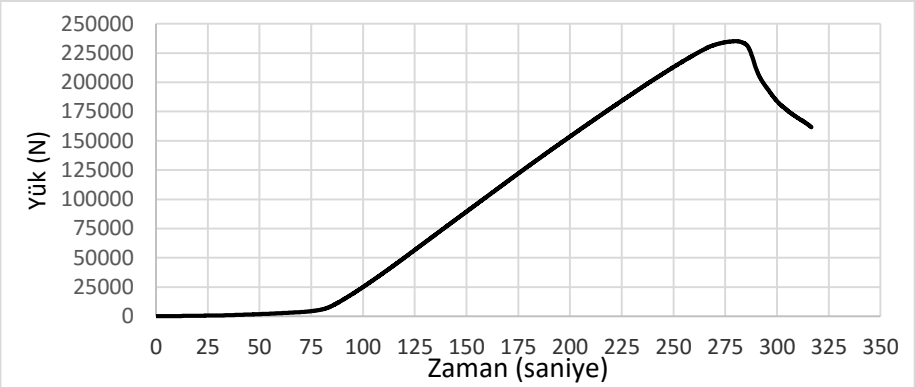
Şekil 3.10 Cop2 (%1) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=19 LE=28, $R^2 = 0,90$, SL=0,0034)

Şekil 3.11‘de hacimce %2 oranında bakır toz içeren Cop3 isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Cop3 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K=14 olarak ölçülmüştür. Cop3 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 7 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %9, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0017 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur. Örnekler ortalama 235 kN yükte kırılmıştır. Ortalama karışım dayanımı 42 MPa olarak hesaplanmıştır. Toz oranının artmasıyla örnek içinde mikro boşluklar olma ihtimali artar bu durum dayanımın azalmasıyla sonuçlanır.

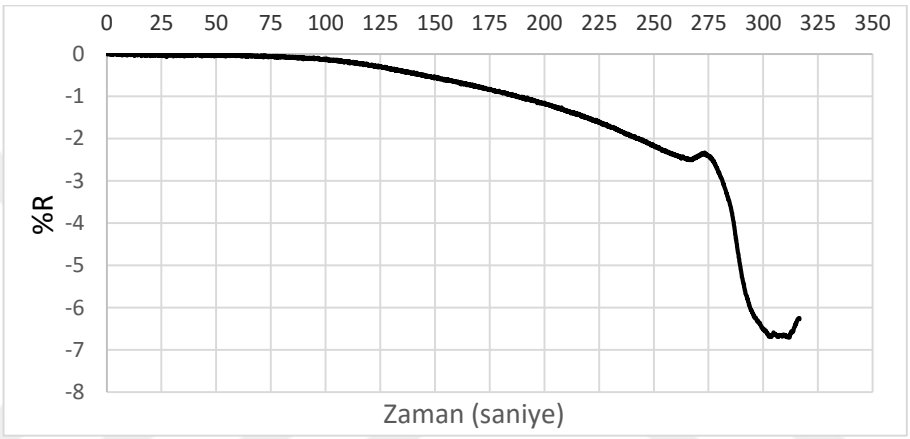


Şekil 3.11 Cop3 (%2) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=14 LE=9,R^2 = 0,98, SL=0,0017)

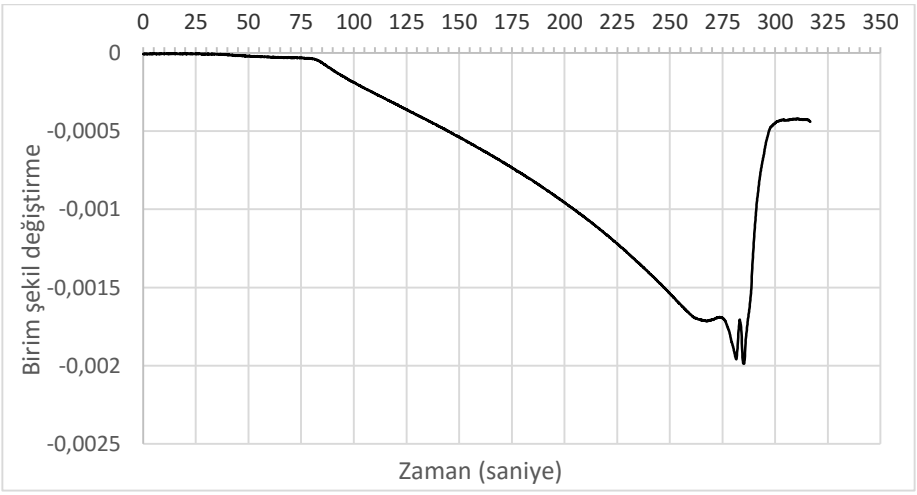
Cop3 isimli karışımın Şekil 3.12’de yük – zaman grafiği, Şekil 3.13’te %R – zaman grafiği, Şekil 3.14’te birim şekil değiştirme – zaman grafiği verilmiştir. 85. saniyede artan yük ile örnekte elektriksel direnç değişimi ve birim şekil değiştirme başlamıştır. Yük – zaman grafiğinde 275. saniye 236 kN yük değerinde, örneğin dayanımını kaybetmeye başladığı görülmektedir. Bu dayanım kaybı %R – zaman grafiğine elektriksel dirençteki ani değişim olarak yansımıştır. Aynı değişim birim şekil değiştirme - zaman grafiğinde de görülmektedir.



Şekil 3.12 Cop3 (%2) isimli karışımın yük - zaman grafiği



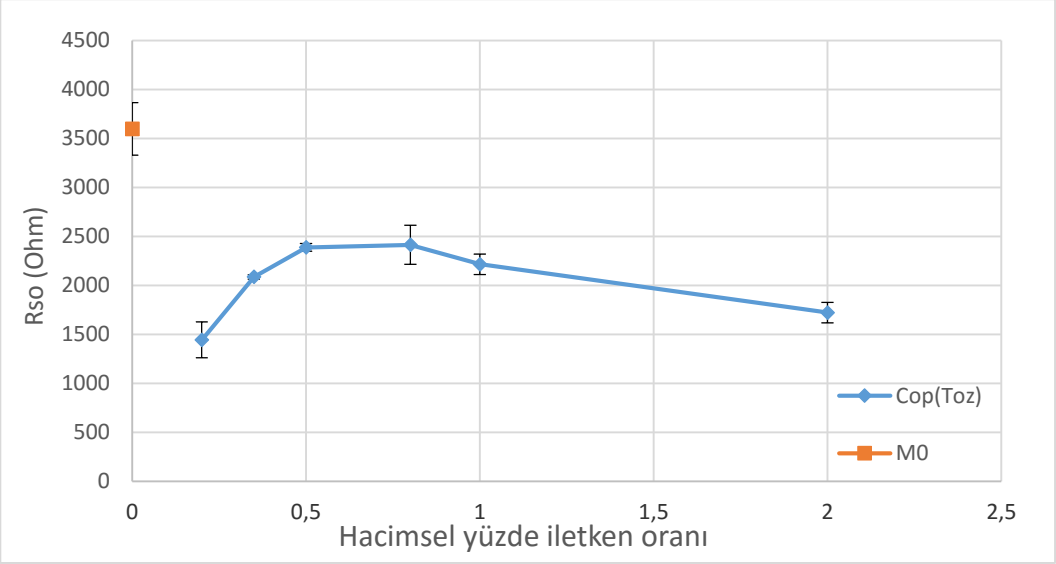
Şekil 3.13 Cop3 (%2) isimli karışımın %R- zaman grafiği (b)



Şekil 3.14 Cop3 (%2) isimli karışımın birim şekil değiştirme grafiği – zaman

Verilecek grafiklerde her hacim oranı için dökülen 3 karışımın ortalama değerleri görülmektedir. Referans örnek olan M0 ile bakır tozlu karışımların analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

Bakır tozlu karışımlar için Rso - Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği Şekil 3.15'te verilmiştir. Rso, örneklerin deney öncesi direncidir. Bakır tozlu örnekler M0 iletkensiz karışıma göre daha düşük elektriksel dirence sahiptirler. Örneklere bakır toz katmak elektriksel direnci düşürmüştür. Lifli örneklerde ortalama Rso, hacimsel %0,8 iletken oranına kadar artış göstermektedir. Hacimsel %0,8 iletken oranından sonra Rso ortalamaları azalmaktadır.

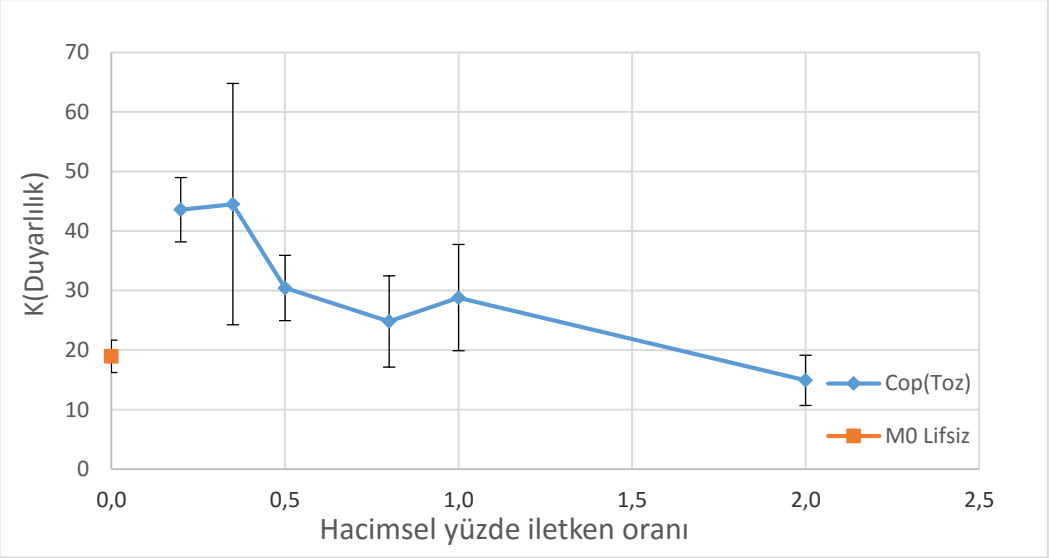


Şekil 3.15 Bakır tozlu karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.16'da bakır tozlu karışımların Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde hacimsel %0.35 toz oranına sahip karışım Cop5, K = 44 ortalama ile grup içinde en yüksek duyarlılığa sahip karışımdır. Ancak standart sapması çok yüksek (Stdev: ±20) olduğundan hacimsel %0,2 toz oranına sahip Cop4 karışımının K=43 ortalama ile grup içindeki en duyarlı karışım olduğu söylenebilir. Grup içinde en düşük duyarlılık ortalamasına sahip karışım ise K=15 ile hacimsel %2 toz oranına sahip Cop3 karışımıdır. Cop3 hariç tüm karışımların ortalamaları referans karışım olan M0(K=19)'dan fazla duyarlılık ortalamasına

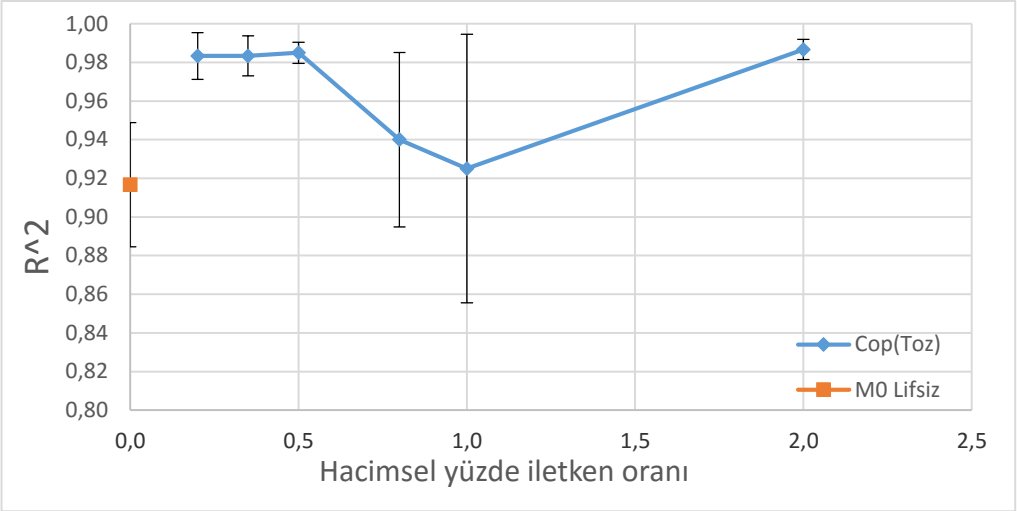
sahiptir. Bakır toz oranının artışıyla duyarlılıkta azalma görülmektedir. Beton örneklerine bakır toz katmak düşük hacim oranlarında duyarlılığı artırmıştır.

Grafik incelendiğinde belirli bir noktadan sonra hacimsel iletken oranı arttıkça duyarlılığın azaldığı da oldukça açık bir şekilde görülmektedir. Karışım içindeki hacimsel iletken oranı arttıkça elektron akışını sağlayan iletken - iletken ve iletken - matris iletim hatları miktarı da artar. Birim şekil değiştirme daha az iletken - iletken ve iletken - matris bağlantısı koparabilir, böylece birim şekil değiştirmenin elektriksel direnç üzerindeki etkisi azalır. %R'daki değişim daha az olur ve duyarlılık düşer (Teomete ve Erdem, 2013).



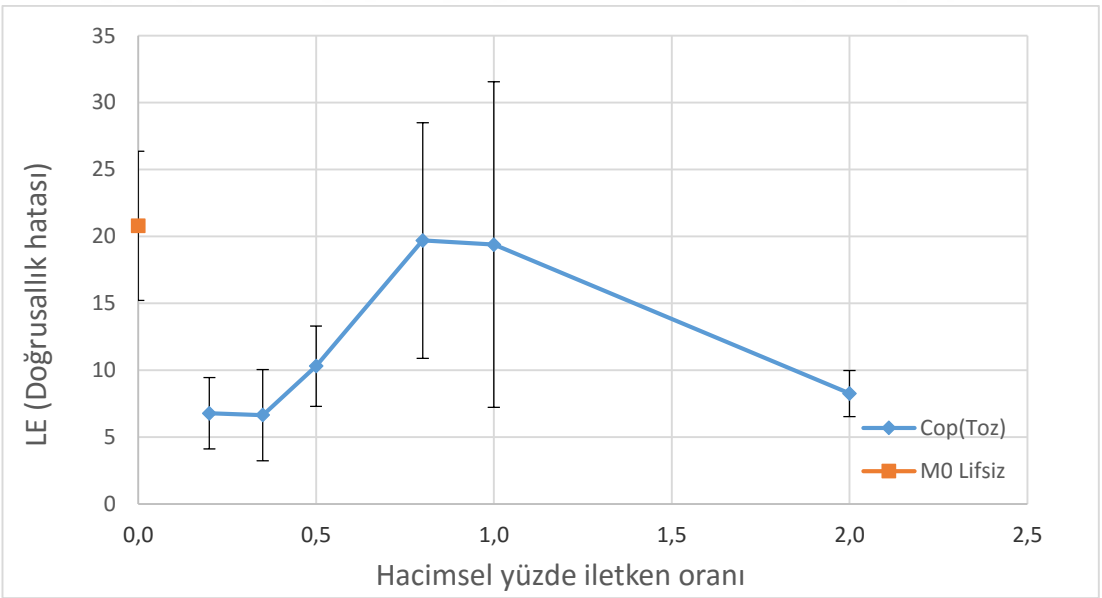
Şekil 3.16 Bakır tozlu karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.17'de bakır tozlu karışımların R^2(Korelasyon katsayısı) – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmektedir. Grafik incelendiğinde bakır tozlu karışımların korelasyon katsayısı ortalamasının iletkensiz olan M0 referans karışımın ortalamasından yüksek olduğu görülmektedir. %0,5 hacimsel iletken oranından %2 hacimsel iletken oranına kadar R^2 ortalamasında azalma görülmektedir. En yüksek R^2 ortalamasına sahip karışım R^2=0,99 ile hacimsel %0,5 toz oranına sahip Cop1 isimli karışımıdır.



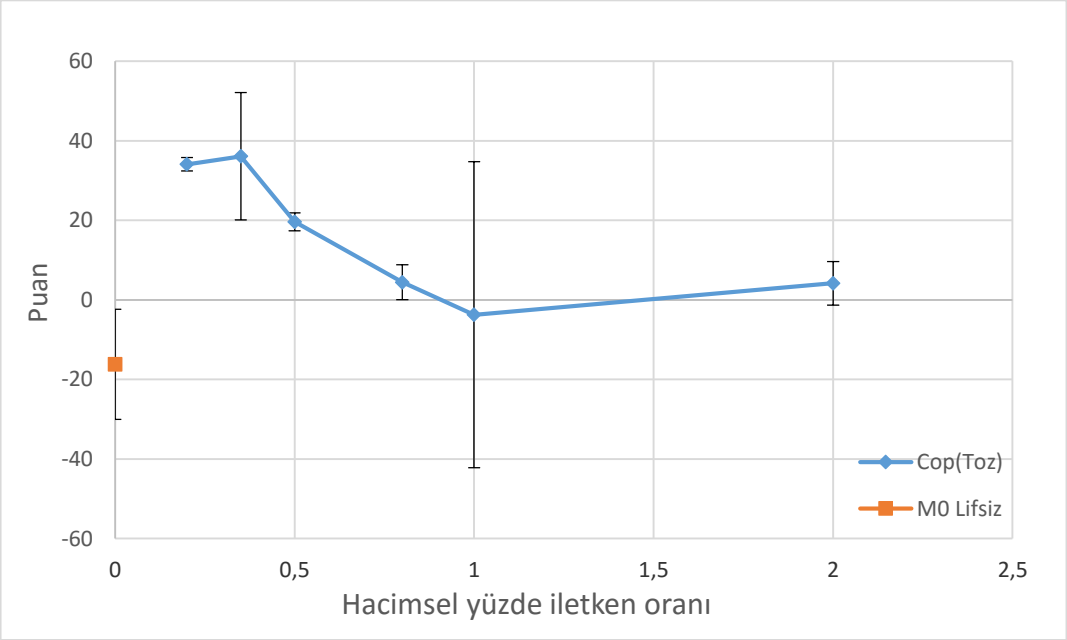
Şekil 3.17 Bakır tozlu karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.18'de bakır tozlu karışımların LE – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. En büyük doğrusallık hatası ortalaması M0 iletkensiz karışımda elde edilmiştir. Doğrusallık hata ortalamaları hacimsel %0,2 ve %0,35 iletken oranlarında en düşüktür. Fakat doğrusallık hatası ortalamaları hacimsel %0,8 ve %1 iletken oranlarında artmış ve en yüksek değerini almış bulunmaktadır.



Şekil 3.18 Bakır tozlu karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği

Şekil 3.19'da bakır tozlu karışımların Puan - Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Puanlar ikinci bölümde verilen Formül 2.6 ile hesaplanmıştır. Puan ortalamaları incelendiğinde bütün karışımların, M0 referans karışımından daha yüksek puana sahip olduğu görülmektedir. En yüksek puan ortalaması 36 ile hacimsel %0,35 toz oranına sahip Cop5 isimli karışıma aittir. Grup içindeki karışımlara göre standart sapmalarda dikkate alındığında Cop4 (%0,20) isimli karışımdan daha stabil, düzenli ve yüksek duyarlılıkta sinyal alındığı görülmektedir. En düşük puana sahip karışım, -4 ile hacimsel %1 toz oranına sahip Cop2 isimli karışımdır. Hacimsel %0,35 iletken oranından sonra artan iletken oranıyla puanlarda düşüş görülmektedir. Betona farklı oranlarda bakır toz karıştırmanın elektriksel iletkenlik – birim şekil değiştirme ilişkisini olumlu yönde etkilemektedir.

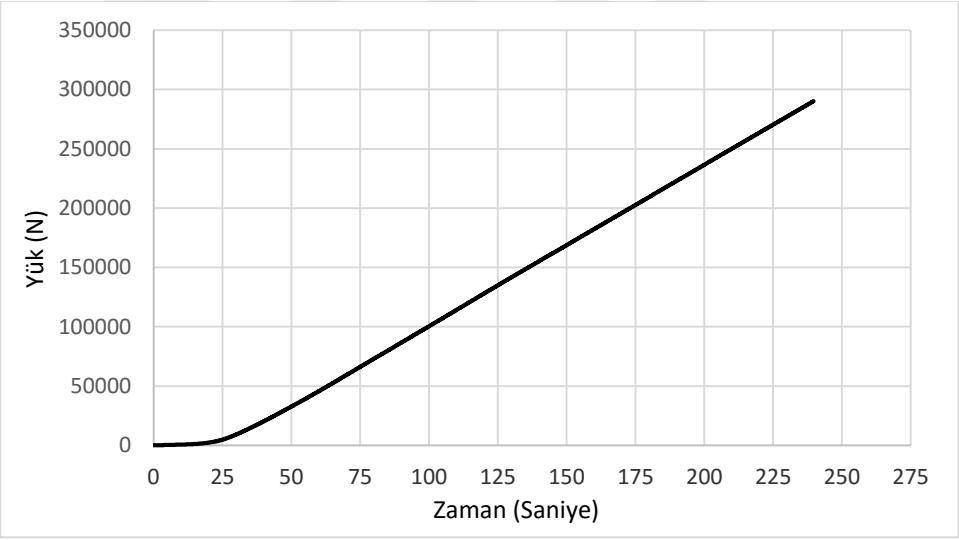


Şekil 3.19 Bakır tozlu karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

3.1.2 Bakır Lifli Karışımların Analiz Sonuçları

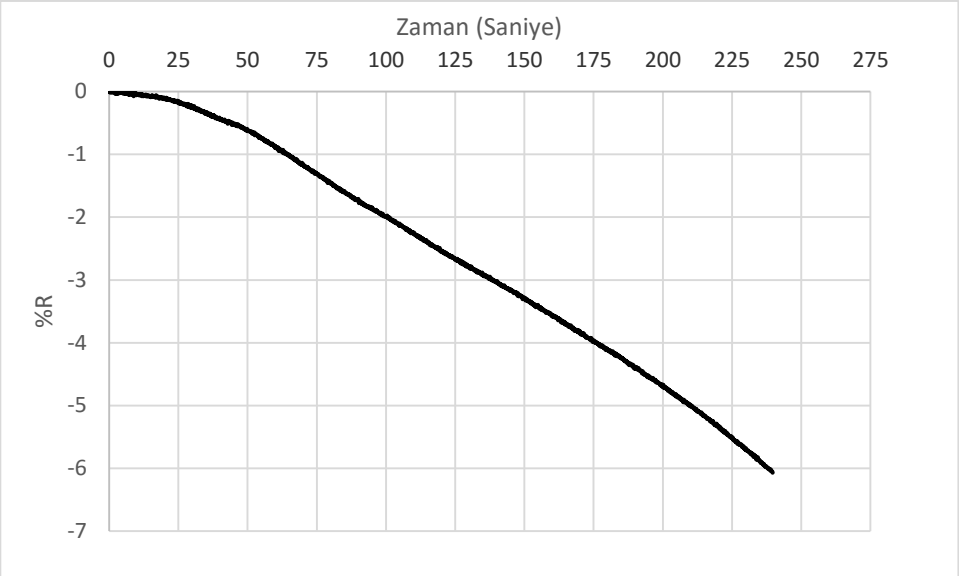
Bakır lif kullanılarak, farklı hacimsel oranlara sahip 7 farklı karışım oluşturulmuştur. Her karışımdan 3'er adet 75mm küp dökülmüştür ve test edilmiştir. Bu grup için toplamda 21 adet beton küp örneği test edilip analiz edilmiştir. Oluşturulan karışımların isimleri ve sahip olduğu bakır lif miktarları Tablo 2.4'te sunulmuştur.

Şekil 3.20'de hacimce %0,2 oranında bakır lif içeren Co7 isimli karışımın yük – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde örneğin 30. saniyeden sonra yük almaya başladığı görülmektedir. Bu zaman sürecinde örnek ile başlık arasında kalan pürüzler ve kusurlar ezilmektedir. Deney 290 kN olan maksimum yüke kadar devam etmiştir. Grupta bulunan tüm örnekler 290 kN yük altında dayanımını yitirmemiştir.



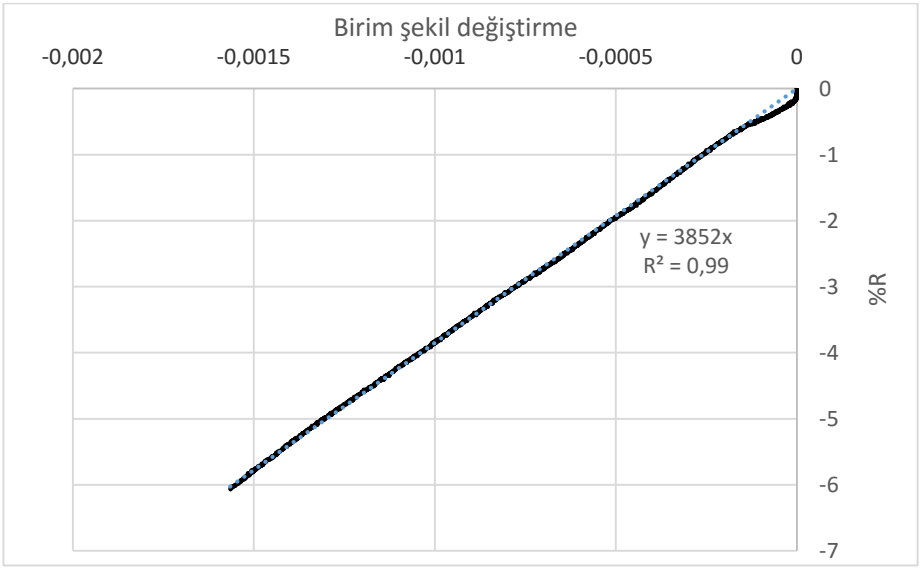
Şekil 3.20 Co7 (%0,2) isimli karışımın yük - zaman grafiği

Şekil 3.21'de hacimce %0,2 oranında bakır lif içeren Co7 isimli karışımın %R – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde deney süresince artan basınç yükü etkisiyle elektriksel dirençte düşme meydana gelmiştir. Mikro boşlukların kapanması ve lif boyu kısalması nedeniyle elektron ve iyon akışı artmış, elektriksel direnç azalmıştır.



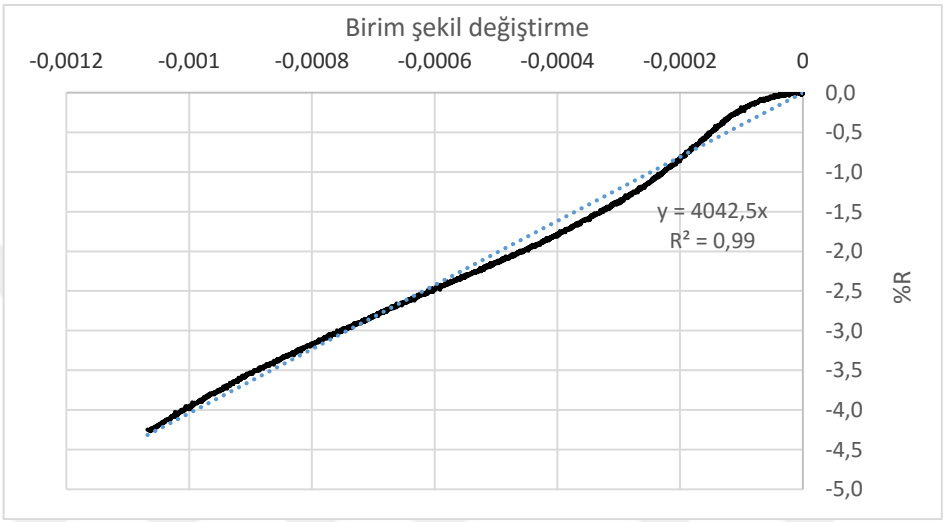
Şekil 3.21 Co7 (%0,2) isimli karışımın %R - zaman grafiği

Şekil 3.22'de hacimce %0,2 oranında bakır lif içeren Co7 isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Co7 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K=37 olarak ölçülmüştür. Co7 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 18 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %5, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0016 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



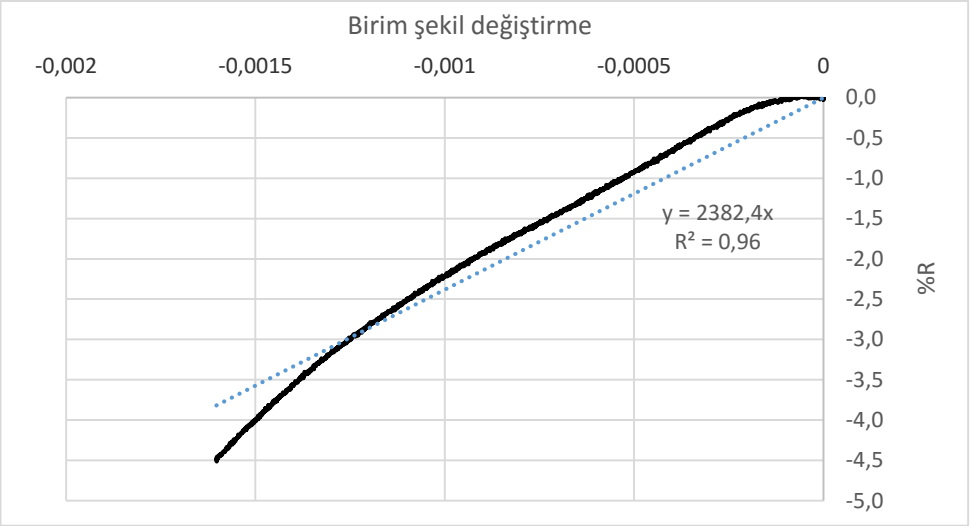
Şekil 3.22 Co7 (%0,2) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=37 LE=5, $R^2 = 0,99$, SL=0,0016)

Şekil 3.23‘te hacimce %0,35 oranında bakır lif içeren Co8 isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Co8 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K=40 olarak ölçülmüştür. Co8 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 20 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %5, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0011 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



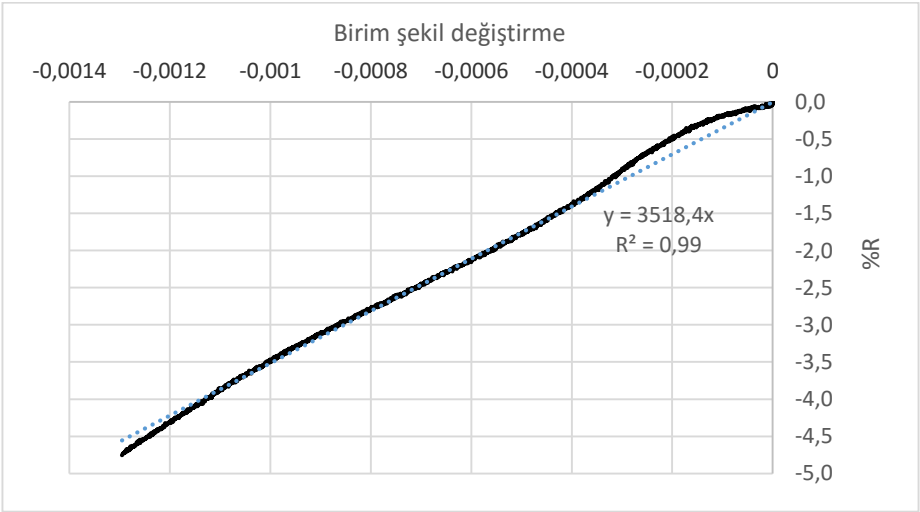
Şekil 3.23 Co8 (%0,35) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=40, LE=5, $R^2 = 0,99$, SL=0,0011)

Şekil 3.24‘te hacimce %0,5 oranında bakır lif içeren Co1 isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Co1 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K=28 olarak ölçülmüştür. Co1 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 14 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %15, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0016 ve korelasyon katsayısı R^2=0,96 olarak bulunmuştur.



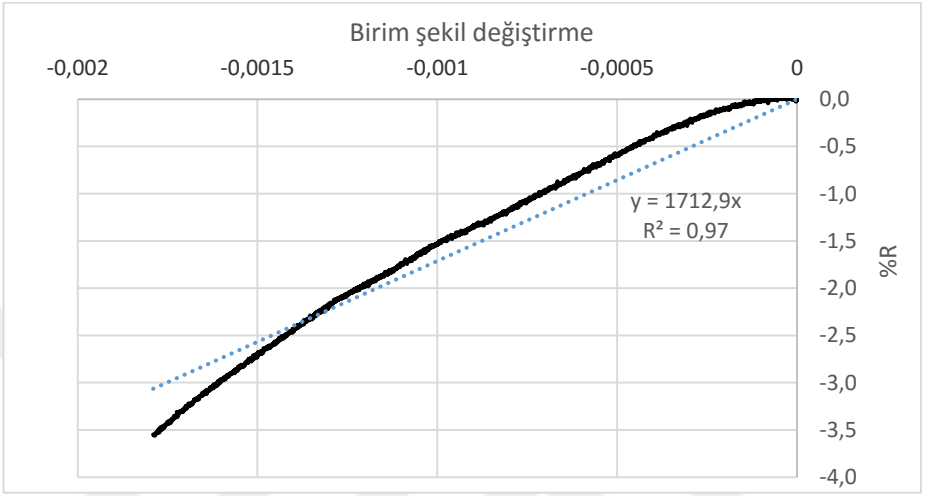
Şekil 3.24 Co1 (%0,5) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=28, LE=15, $R^2 = 0{,}96$, SL=0,0016)

Şekil 3.25'te hacimce %0,8 oranında bakır lif içeren Co9 isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Co9 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K=30 olarak ölçülmüştür. Co9 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 15 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %7, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0017 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



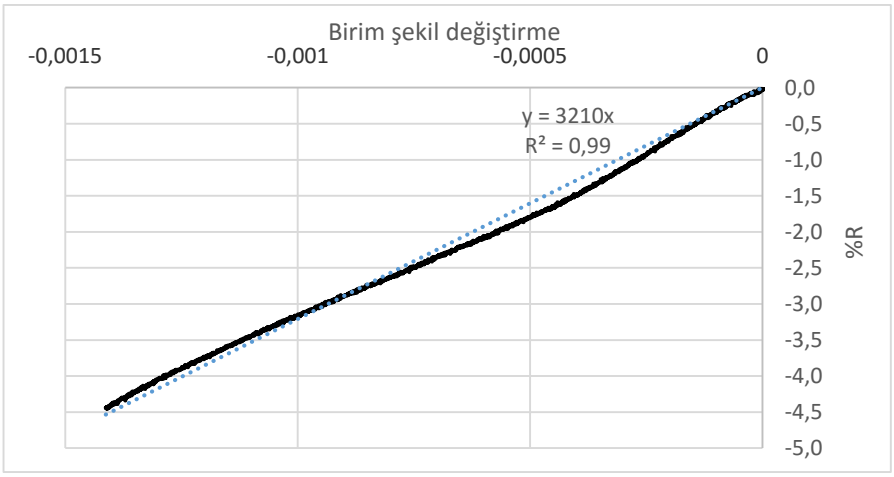
Şekil 3.25 Co9 (%0,8) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=30, LE=7, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0017)

Şekil 3.26‘da hacimce %1 oranında bakır lif içeren Co2 isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Co2 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K=20 olarak ölçülmüştür. Co2 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 10 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %14, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0018 ve korelasyon katsayısı R^2=0,97 olarak bulunmuştur.



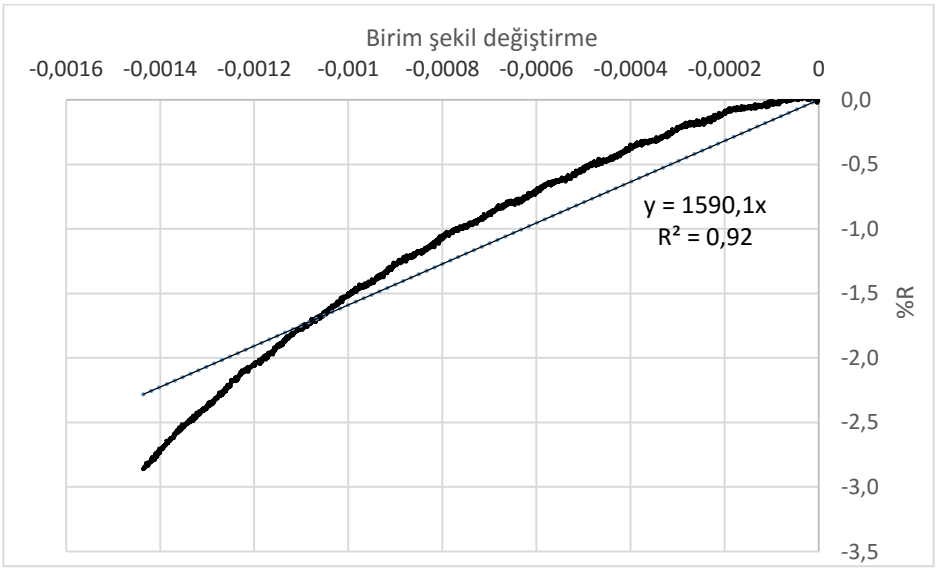
Şekil 3.26 Co2 (%1) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=20, LE=14, $R^2 = 0,97$, SL=0,0018)

Şekil 3.27‘de hacimce %1,5 oranında bakır lif içeren Co10 isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Co10 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K=28 olarak ölçülmüştür. Co10 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 14 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %7, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0016 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



Şekil 3.27 Co10 (%1,5) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=28, LE=7, $R^2 = 0,99$, SL=0,0016)

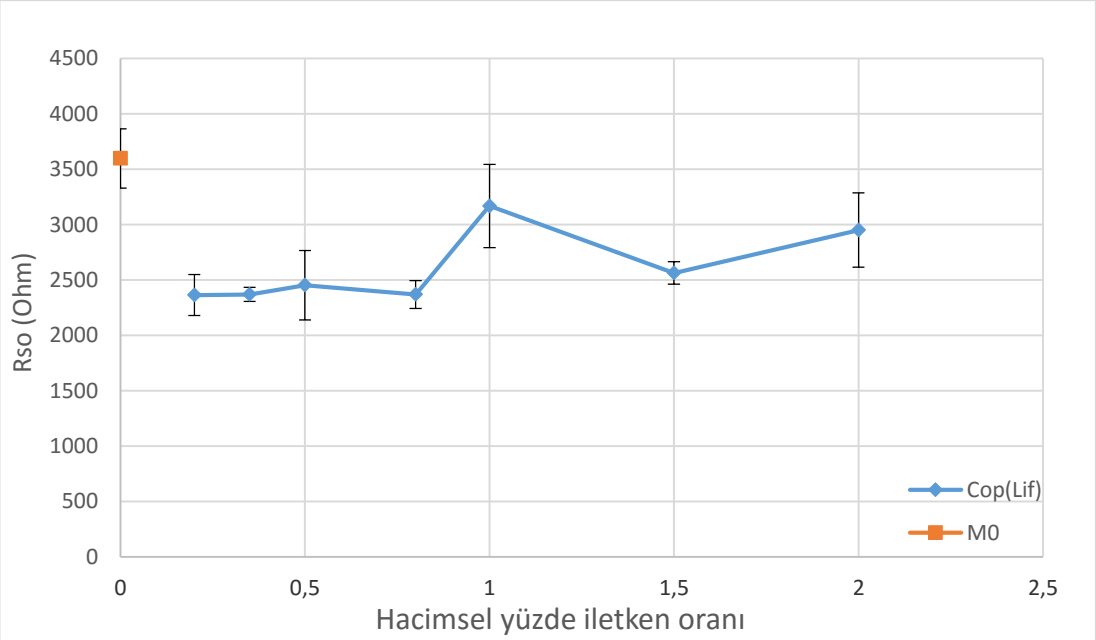
Şekil 3.28'de hacimce %2 oranında bakır lif içeren Co3 isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Co3 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K=20 olarak ölçülmüştür. Co3 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 10 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %19, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0014 ve korelasyon katsayısı R^2=0,92 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.28 Co3 (%2) isimli karışımın %R- birim şekil değiştirme grafiği (K=20, LE=19, $R^2 = 0,92$, SL=0,0014)

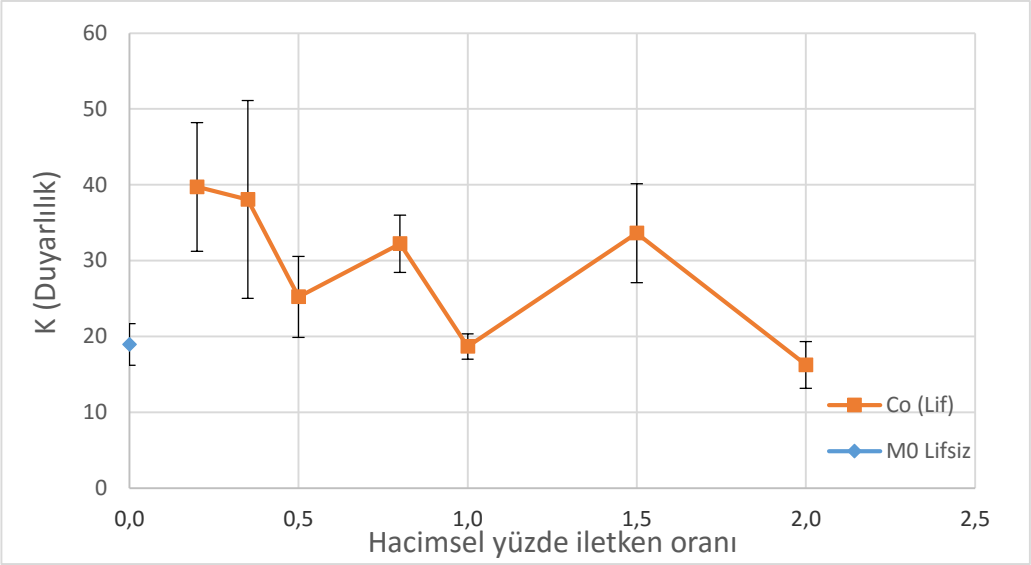
Verilecek grafiklerde her hacim oranı için dökülen 3 karışımın ortalama değerleri görülmektedir. Referans örnek olan M0 ile bakır lifli karışımların analiz sonuçları aşağıda verilmiştir. M0 isimli örneğin hacimsel yüzde iletken oranı %0'dır.

Bakır lifli karışımlar için Rso - Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği Şekil 3.29'da verilmiştir. Bakır lifli örnekler, M0 iletkensiz karışıma göre daha düşük elektriksel direnç ortalamasına sahiptirler. Örneklere bakır lif katmak elektriksel direnci düşürmüştür. Ortalama Rso, hacimsel %0,8 iletken oranına kadar sabit kalmaktadır. Hacimsel %0,8 iletken oranından sonra Rso ortalamaları artmaktadır.



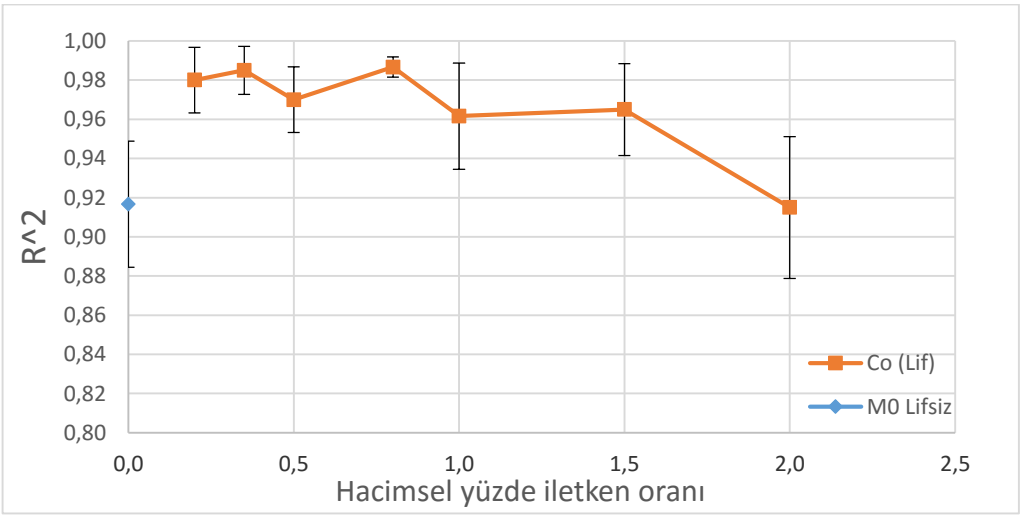
Şekil 3.29 Bakır lifli karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.30'da bakır lifli karışımların Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde hacimsel %1 ve %2 iletken oranına sahip karışımlar hariç tüm karışımların, referans karışım olan M0(K=19) karışımından yüksek duyarlılığa sahip olduğu görülmektedir. En yüksek duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=44 ortalama ile hacimsel %0.2 lif oranına sahip Co7 isimli karışımdır. En düşük duyarlılık ortalamasına sahip karışım ise K=16 ortalama ile hacimsel %2 lif oranına sahip Co3 isimli karışımdır. Bakır lif oranının artışıyla duyarlılıkta azalma görülmektedir. Beton örneklerine bakır lif katmak düşük hacim oranlarında duyarlılığı artırmıştır.



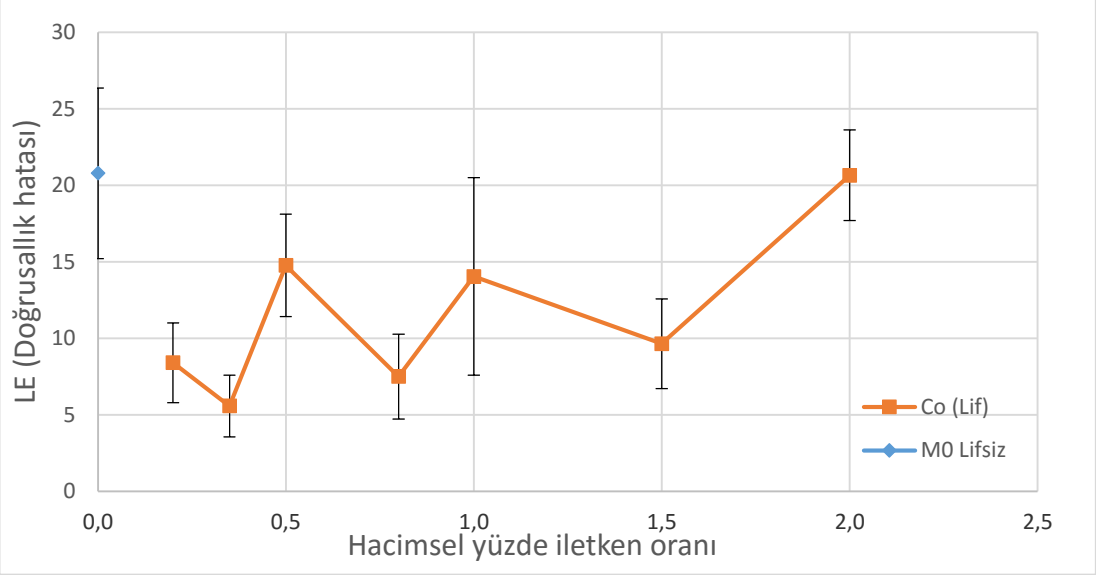
Şekil 3.30 Bakır lifli karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.31'de bakır lifli karışımların R^2(Korelasyon katsayısı) – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmektedir. Grafik incelendiğinde, hacimsel %2 bakır lif oranına sahip Co3 isimli örnek hariç, bakır lifli karışımların korelasyon katsayısı ortalamasının iletkensiz olan M0 referans karışımın ortalamasından yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek R^2 ortalamasına sahip karışımlar R^2=0,99 ile hacimsel %0,35 ve %0,8 lif oranına sahip Cop5 ve Cop6 isimli karışımlardır. Artan iletken oranıyla R^2 ortalamasında düşüş görülmüştür.



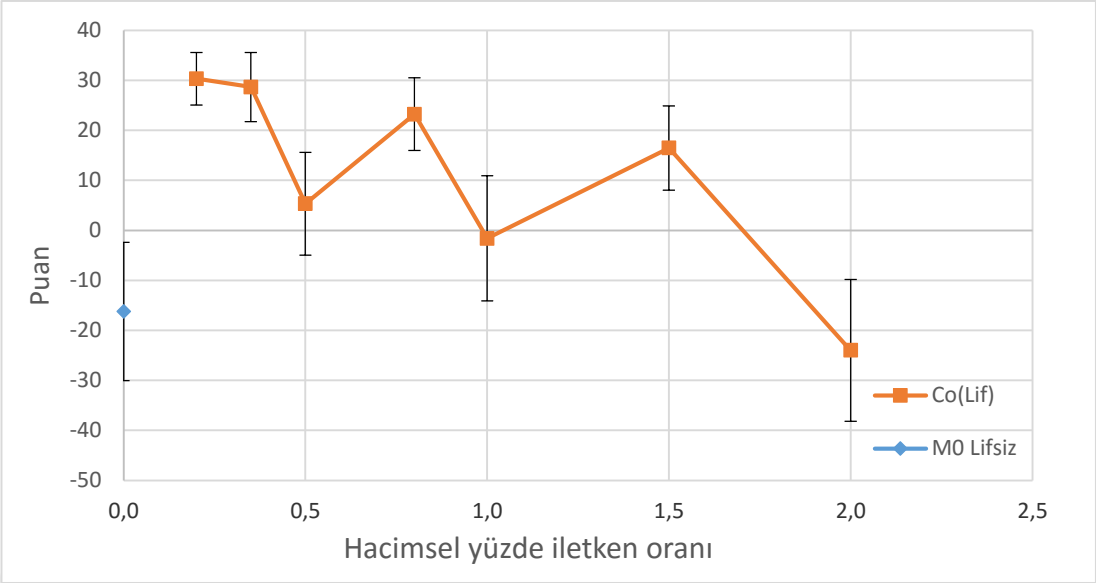
Şekil 3.31 Bakır lifli karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.32'de bakır lifli karışımların LE – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. En büyük doğrusallık hatası ortalaması M0 iletkensiz karışım ve hacimsel %2 lif oranına sahip Co3 isimli karışımda elde edilmiştir. En düşük doğrusallık hatası ortalaması hacimsel %0,35 iletken oranına sahip Co8 isimli karışımdadır. Artan iletken oranıyla doğrusallık hatası ortalamalarında artma görülmüştür.



Şekil 3.32 Bakır lifli karışımlarda *LE* – Hacimsel iletken oranı grafiği

Şekil 3.33'te bakır lifli karışımların Puan - Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Puanlar ikinci bölümde verilen Formül 2.6 ile hesaplanmıştır. Puan ortalamaları incelendiğinde hacimsel %2 lif oranına sahip Co3 hariç bütün karışımların, M0 referans karışımından daha yüksek puana sahip olduğu görülmektedir. En yüksek puan ortalaması 30 ile hacimsel %0,2 lif oranına sahip Co7 isimli karışımdadır. En düşük puan ortalaması -24 ile hacimsel %2 lif oranına sahip Co3 isimli karışımdadır. Artan iletken oranıyla puan ortalamalarında azalma görülmektedir. Betona bakır lif katmak düşük hacim oranlarında elektriksel iletkenlik – birim şekil değiştirme ilişkisini olumlu yönde etkilemektedir.



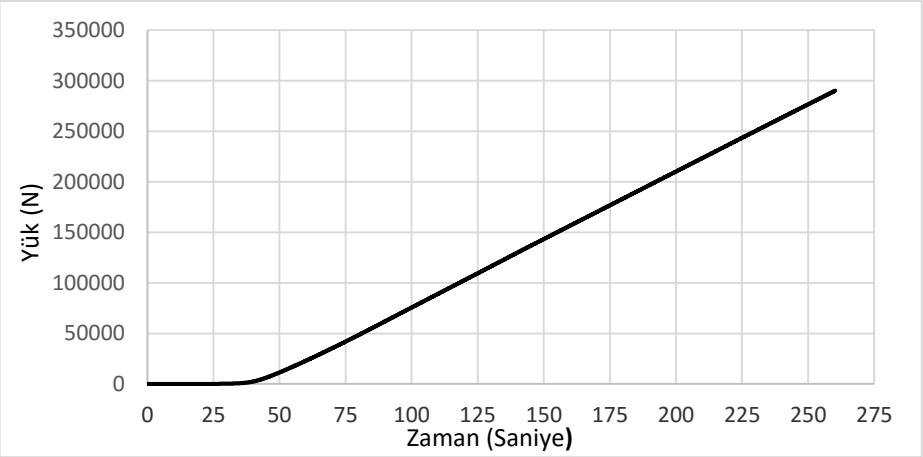
Şekil 3.33 Bakır lifli karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

3.2 Karbon Katkılı Karışımların Analiz Sonuçları

3.2.1 3mm Uzunluktaki Karbon Lifli Karışımların Analiz Sonuçları

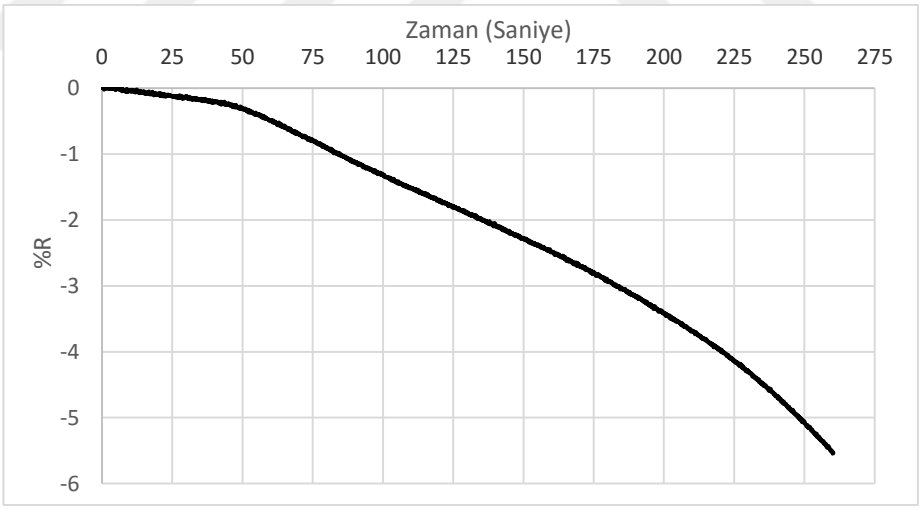
3mm uzunluğunda karbon lif kullanılarak, farklı hacimsel iletken oranına sahip 5 farklı karışım oluşturulmuştur. Her karışımdan 3'er adet 75mm küp dökülmüştür ve test edilmiştir. Bu grup için toplamda 15 adet beton küp örneği test edilip analiz edilmiştir. Oluşturulan karışımların isimleri ve sahip olduğu 3mm karbon lif miktarları Tablo 2.4'te sunulmuştur.

Şekil 3.34'te hacimce %0,35 oranında 3mm uzunluğunda karbon lif içeren C11 isimli karışımın yük – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde örneğin 35. saniyeden sonra yük almaya başladığı görülmektedir. Bu zaman sürecinde örnek ile başlık arasında kalan pürüzler ve kusurlar ezilmektedir. Deney 290 kN olan maksimum yüke kadar devam etmiştir. Grupta bulunan bütün örnekler 290kN yük altında dayanımını korumuştur.



Şekil 3.34 C11 (%0,35) isimli karışımın yük - zaman grafiği

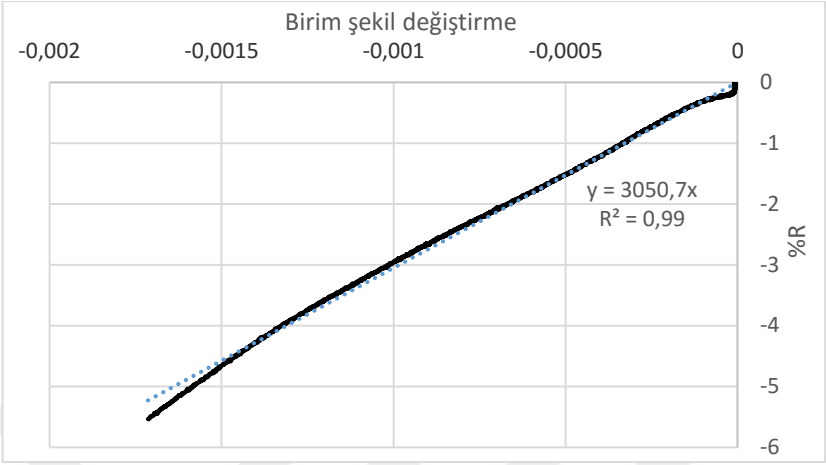
Şekil 3.35'te hacimce %0,35 oranında 3mm uzunluğunda karbon lif içeren C11 isimli karışımın %R – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde deney süresince artan basınç yükü etkisiyle elektriksel dirençte düşme meydana gelmiştir. Mikro boşlukların kapanması ve lif boyu kısalması nedeniyle elektron ve iyon akışı artmış, elektriksel direnç azalmıştır.



Şekil 3.35 C11 (%0,35) isimli karışımın %R - zaman grafiği

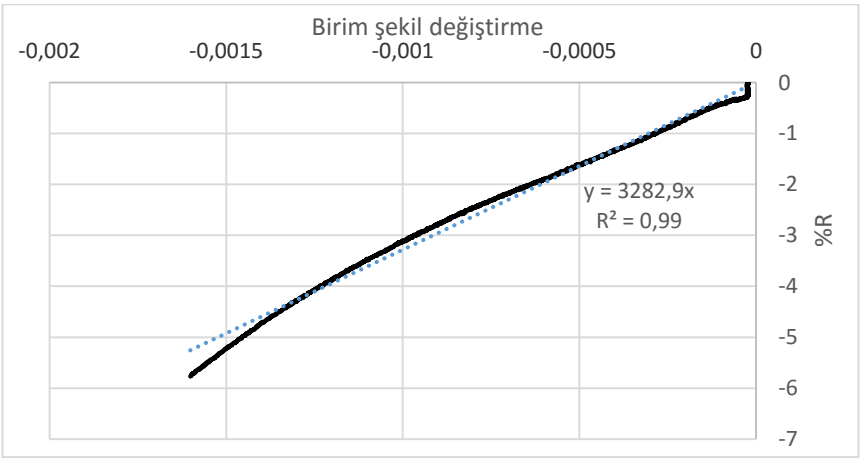
Şekil 3.36'da hacimce %0,35 oranında 3mm uzunluğunda karbon lif içeren C11 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C11 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 31 olarak ölçülmüştür. C11 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 15 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %5, limit

birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0017 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



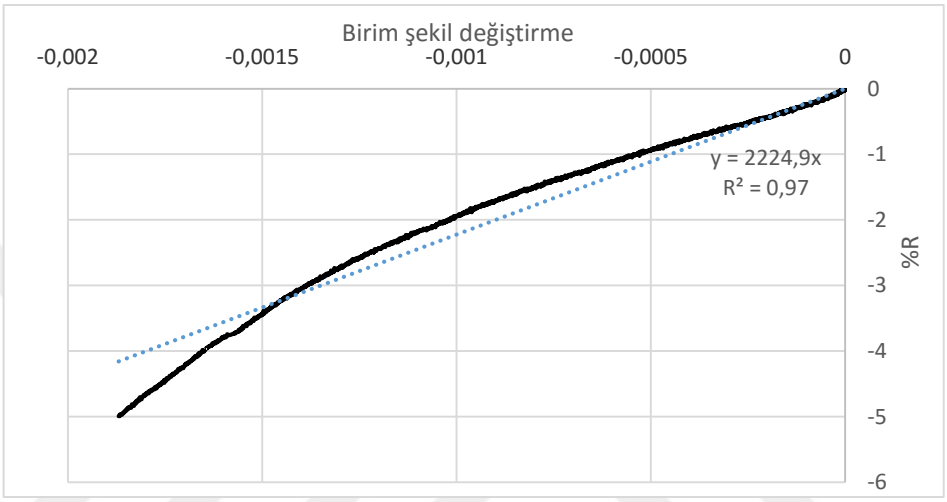
Şekil 3.36 C11 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=31, LE=5, R^2 = 0,99, SL=0,0017)

Şekil 3.37'de hacimce %0,5 oranında 3mm uzunluğunda karbon lif içeren C12 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C12 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 35 olarak ölçülmüştür. C12 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 17 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %7, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0016 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



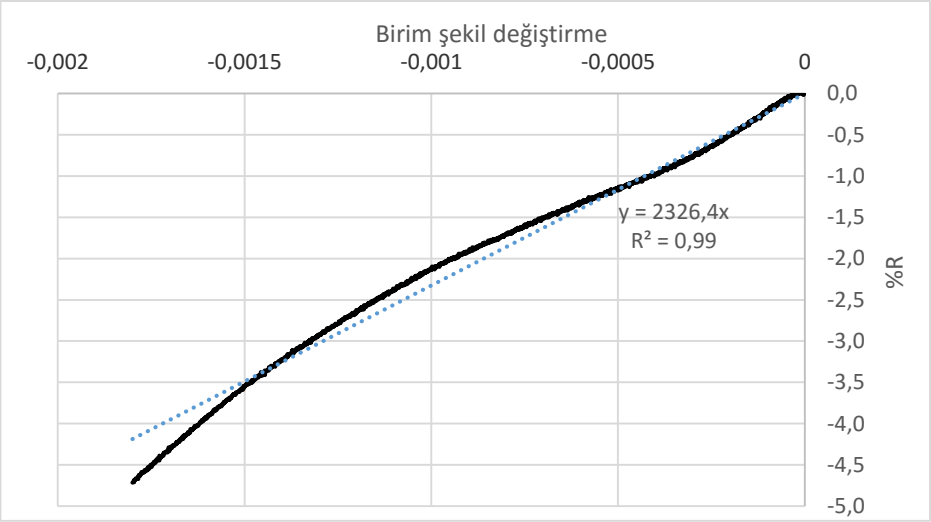
Şekil 3.37 C12 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=35, LE=7, R^2 = 0,99, SL=0,0016)

Şekil 3.38'de hacimce %0,8 oranında 3mm uzunluğunda karbon lif içeren C13 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C13 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 27 olarak ölçülmüştür. C13 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 13 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %17, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0018 ve korelasyon katsayısı R^2=0,97 olarak bulunmuştur.



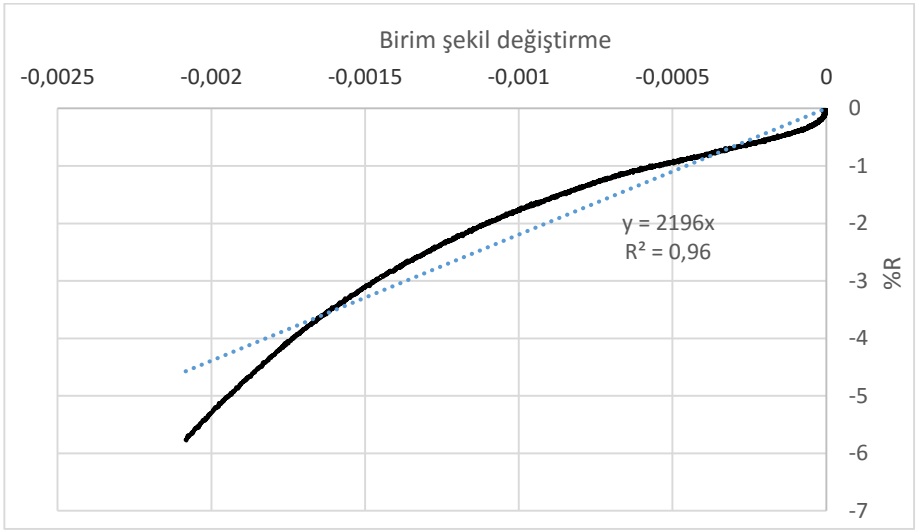
Şekil 3.38 C13 (%0,8) isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği (K=27, LE=17, R^2 = 0,97, SL=0,0018)

Şekil 3.39'da hacimce %1 oranında 3mm uzunluğunda karbon lif içeren C14 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C14 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 26 olarak ölçülmüştür. C14 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 13 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %11, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0018 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



Şekil 3.39 C14 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=26, LE=11, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0018)

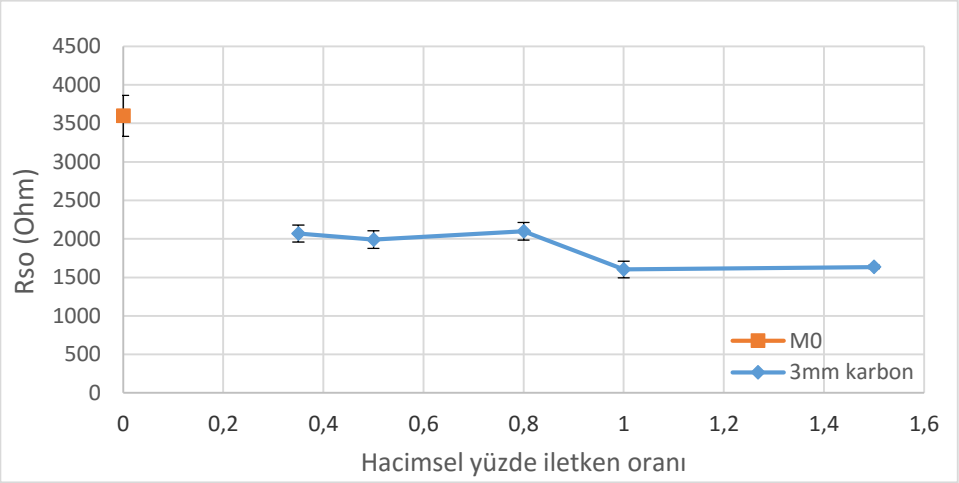
Şekil 3.40'ta hacimce %1,5 oranında 3mm uzunluğunda karbon lif içeren C15 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C15 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 28 olarak ölçülmüştür. C15 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 14 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %21, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0020 ve korelasyon katsayısı R^2=0,96 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.40 C15 (%1,5) isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği (K=28, LE=21, $R^2 = 0{,}96$, SL=0,0020)

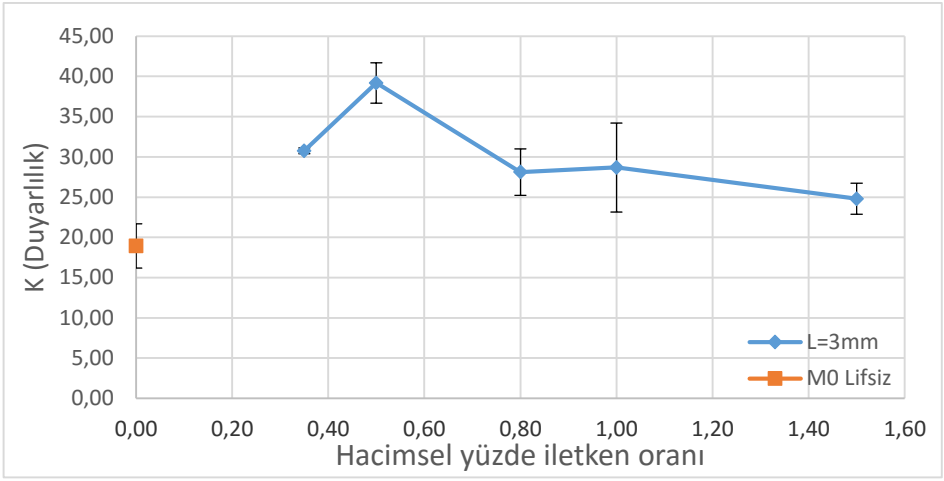
Verilecek grafiklerde her hacim oranı için dökülen 3 karışımın ortalama değerleri görülmektedir. Referans örnek olan M0 ile 3mm uzunluğunda karbon lifle sahip karışımların analiz sonuçları aşağıda verilmiştir. M0 isimli örneğin hacimsel yüzde iletken oranı %0'dır.

3mm karbon lifli karışımlar için Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği Şekil 3.341'de verilmiştir. 3mm karbon life sahip karışımlar M0 iletkensiz karışıma göre daha düşük elektriksel dirence sahiptirler. Örneklere 3mm karbon lif katmak elektriksel direnci düşürmüştür. İletkenli örneklerde ortalama Rso hacimsel %0,8 iletken oranına kadar sabit kalmaktadır. Hacimsel %0,8 iletken oranından sonra Rso artan iletken oranıyla bir miktar azalma göstermiştir.



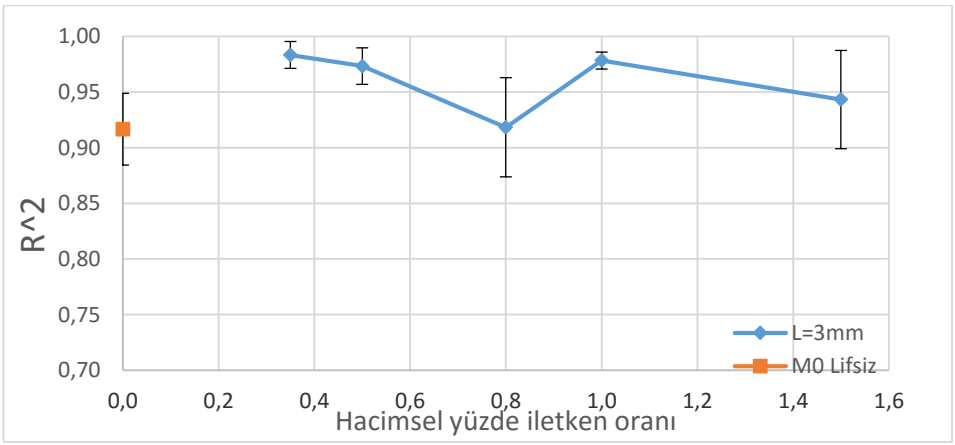
Şekil 3.41 3mm karbon lifli karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.42'de 3mm karbon lifli karışımların Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde grupta bulunan bütün karışımların M0(K=19) referans karışımından yüksek duyarlılık ortalamasına sahip olduğu görülmektedir. En yüksek duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=39 ile hacimsel %0,5 3mm karbon lif oranına sahip C12 isimli karışımdır. En düşük duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=25 ile hacimsel %1,5 3mm karbon lif oranına sahip C15 isimli karışımdır. Hacimsel %0,5 iletken oranından sonra duyarlılık ortalaması artan iletken oranıyla azalma göstermektedir. Betona 3mm karbon lif katmak duyarlılığı artırmıştır.



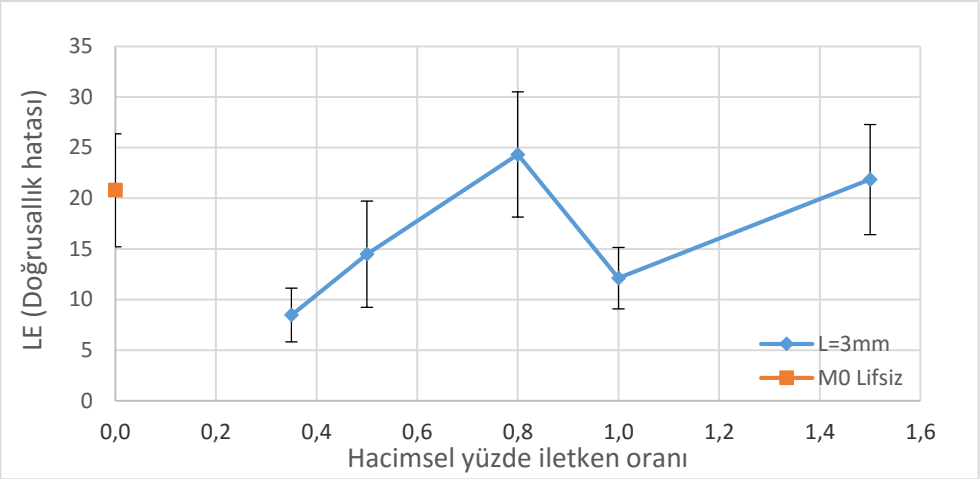
Şekil 3.42 3mm karbon lifli karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.43'te 3mm karbon lifli karışımların R^2(Korelasyon katsayısı) – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmektedir. Grafik incelendiğinde 3mm karbon lifli karışımların korelasyon katsayısı ortalamasının iletkensiz olan M0 referans karışımın ortalamasından yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek R^2 ortalamalarına sahip karışımlar R^2=0,98 ile hacimsel %0,35 ve %0,8 3mm karbon lif oranına sahip C11 ve C14 isimli karışımlardır.



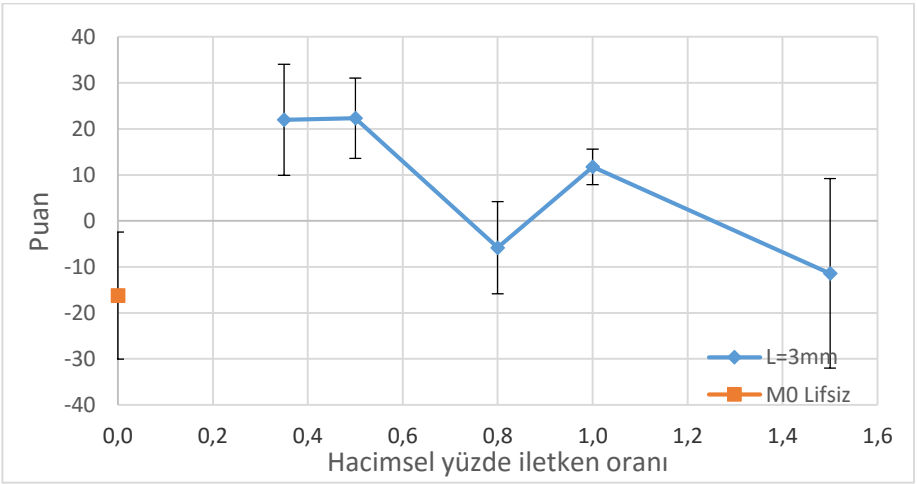
Şekil 3.43 3mm karbon lifli karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.44'te 3mm karbon lifli karışımların LE – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. En küçük doğrusallık hatası ortalaması hacimsel %0,35 3mm karbon lif içeren C11 isimli karışımda elde edilmiştir. Fakat doğrusallık hatası ortalamaları hacimsel %0,8 iletken oranında artmış ve en yüksek değerini almış bulunmaktadır.



Şekil 3.44 3mm karbon lifli karışımlarda *LE* – Hacimsel iletken oranı grafiği

Şekil 3.45'te 3mm karbon lifli karışımların Puan - Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Puanlar ikinci bölümde verilen Formül 2.6 ile hesaplanmıştır. Puan ortalamaları incelendiğinde bütün karışımların, M0 referans karışımından daha yüksek puana sahip olduğu görülmektedir. En yüksek puan ortalaması 22 ile hacimsel %0,5 3mm karbon lif oranına sahip C12 isimli karışımdadır. En düşük puan ortalaması -11 ile hacimsel %1,5 3mm karbon lif oranına sahip C15 isimli karışımdadır. Artan iletken oranıyla puanlarda düşme görülmüştür. Betona 3mm karbon lif katmak düşük hacim oranlarında elektriksel iletkenlik – birim şekil değiştirme ilişkisini olumlu yönde etkilemiştir.



Şekil 3.45 3mm karbon lifli karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

3.2.2 6mm Uzunluktaki Karbon Lifli Karışımların Analiz Sonuçları

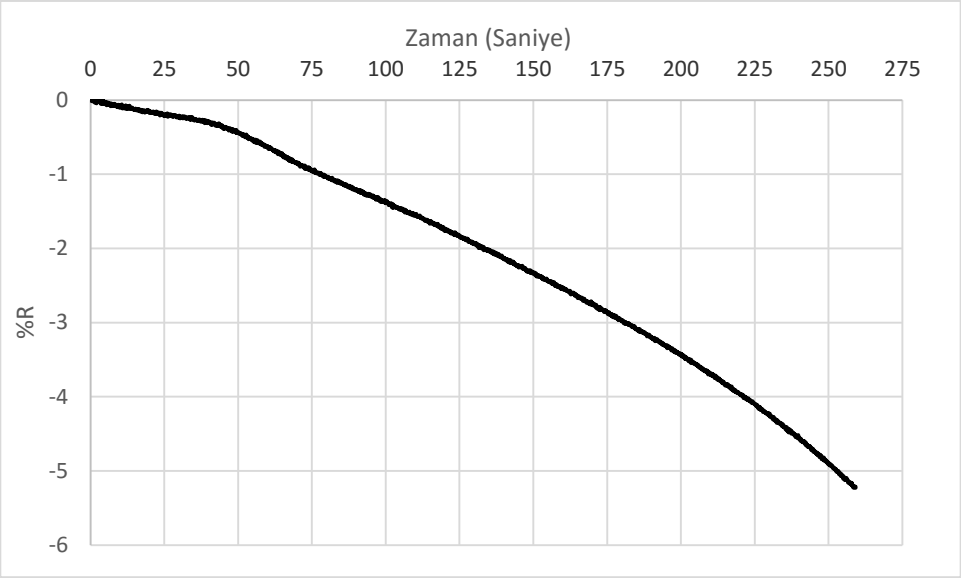
6mm uzunluğunda karbon lif kullanılarak, farklı hacimsel oranlara sahip 5 farklı karışım oluşturulmuştur. Her karışımdan 3'er adet 75mm küp dökülmüştür ve test edilmiştir. Bu grup için toplamda 15 adet beton küp örneği test edilip analiz edilmiştir. Oluşturulan karışımların isimleri ve sahip olduğu 6mm karbon lif miktarları Tablo 2.4'te sunulmuştur.

Şekil 3.46'da hacimce %0,35 oranında 6mm uzunluğunda karbon lif içeren C1 isimli karışımın yük – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde örneğin 30. saniyeden sonra yük almaya başladığı görülmektedir. Bu zaman sürecinde örnek ile başlık arasında kalan pürüzler ve kusurlar ezilmektedir. Deney 290 kN olan maksimum yüke kadar devam etmiştir. Grupta bulunan bütün örnekler 290kN yük altında dayanımını korumuştur.



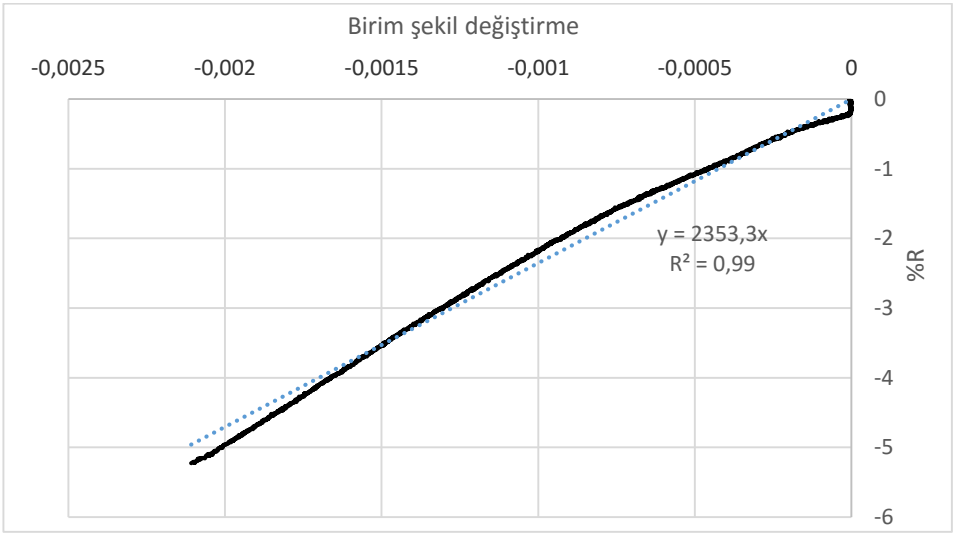
Şekil 3.46 C1 (%0,35) isimli karışımın yük - zaman grafiği

Şekil 3.47'de hacimce %0,35 oranında 6mm uzunluğunda karbon lif içeren C1 isimli karışımın %R – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde deney süresince artan basınç yükü etkisiyle elektriksel dirençte düşme meydana gelmiştir. Mikro boşlukların kapanması ve lif boyu kısalması nedeniyle elektron ve iyon akışı artmış, elektriksel direnç azalmıştır.



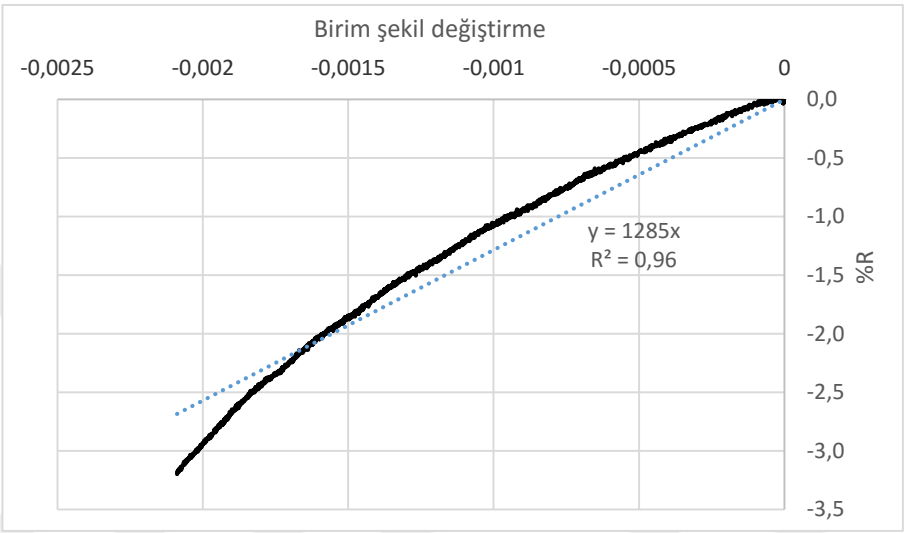
Şekil 3.47 C1 (%0,35) isimli karışımın %R - zaman grafiği

Şekil 3.48'de hacimce %0,35 oranında 6mm uzunluğunda karbon lif içeren C1 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C1 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 25 olarak ölçülmüştür. C1 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 12 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %6, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0021 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



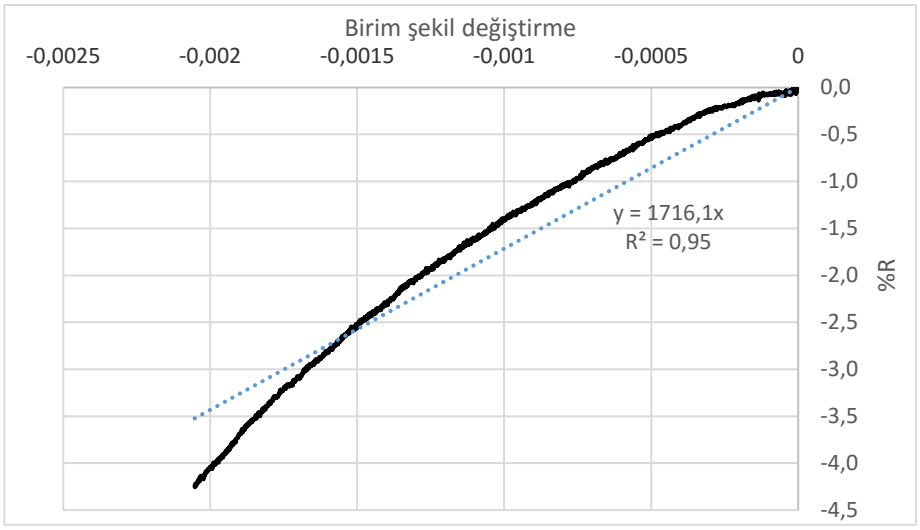
Şekil 3.48 C1 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=25, LE=6, R^2 = 0,99, SL=0,0021)

Şekil 3.49'da hacimce %0,5 oranında 6mm uzunluğunda karbon lif içeren C2 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C2 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 15 olarak ölçülmüştür. C2 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 7 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %16, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0020 ve korelasyon katsayısı R^2=0,96 olarak bulunmuştur.



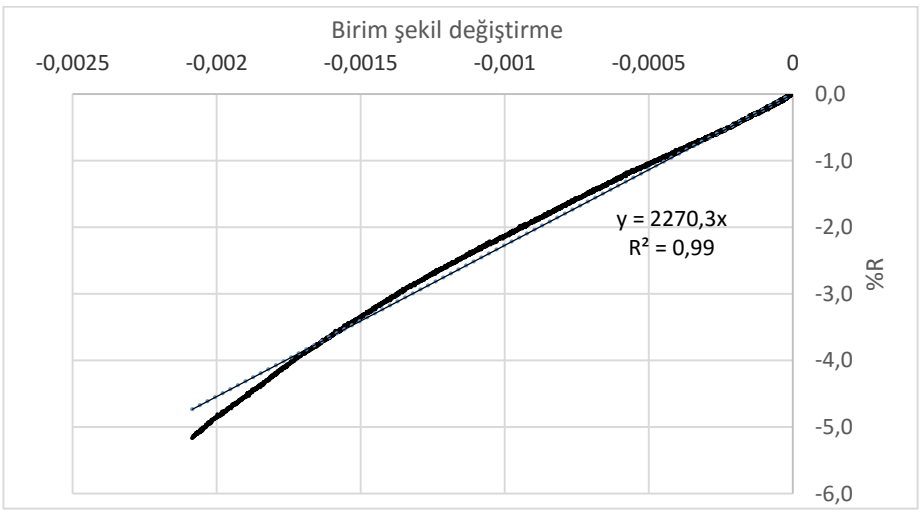
Şekil 3.49 C2 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=15, LE=16, R^2 = 0,96, SL=0,0020)

Şekil 3.50'de hacimce %0,8 oranında 6mm uzunluğunda karbon lif içeren C3 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C3 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 21 olarak ölçülmüştür. C3 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 10 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %17, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0020 ve korelasyon katsayısı R^2=0,95 olarak bulunmuştur.



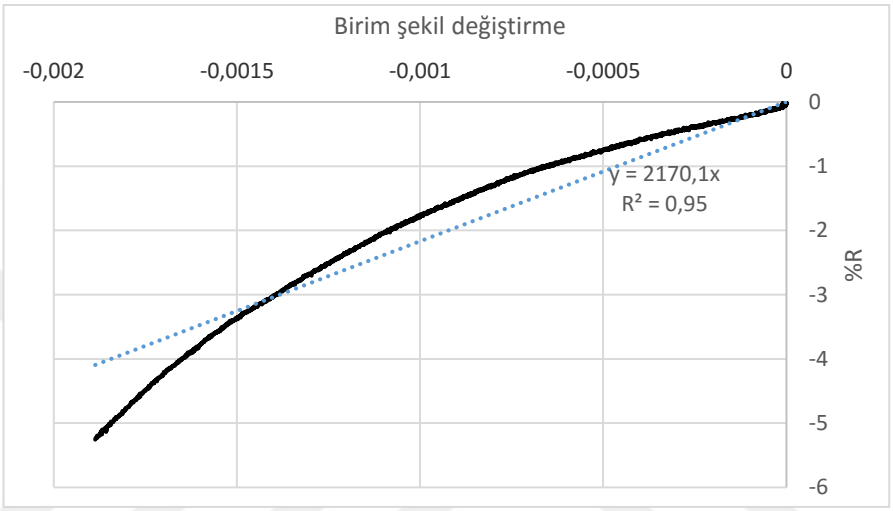
Şekil 3.50 C3 (%0,8) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=21, LE=17, $R^2 = 0{,}95$, SL=0,0020)

Şekil 3.51'de hacimce %1 oranında 6mm uzunluğunda karbon lif içeren C4 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C4 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 27 olarak ölçülmüştür. C4 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 13 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %8, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0020 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



Şekil 3.51 C4 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=27, LE=8, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0020)

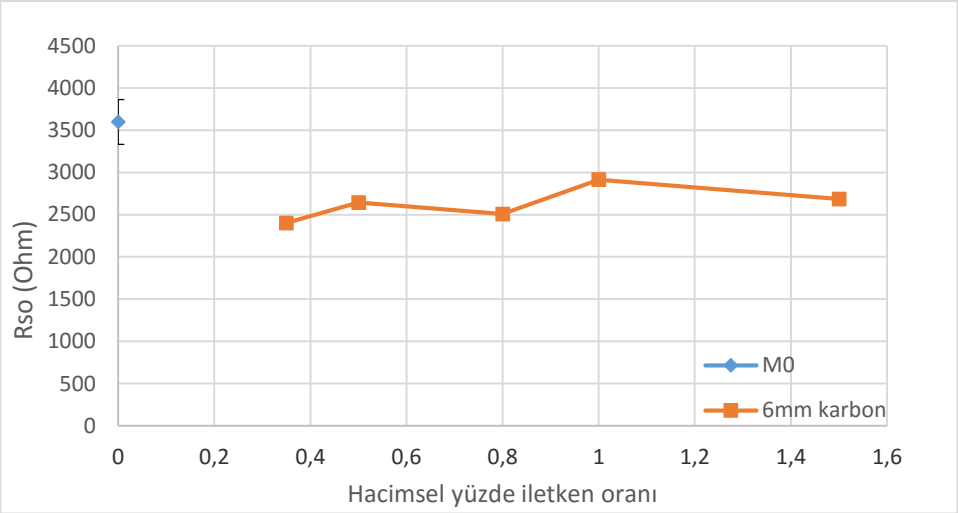
Şekil 3.52'de hacimce %1,5 oranında 6mm uzunluğunda karbon lif içeren C5 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C5 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 28 olarak ölçülmüştür. C5 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 14 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %22, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0018 ve korelasyon katsayısı R^2=0,95 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.52 C5 (%1,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=28, LE=22, $R^2 = 0,95$, SL=0,0018)

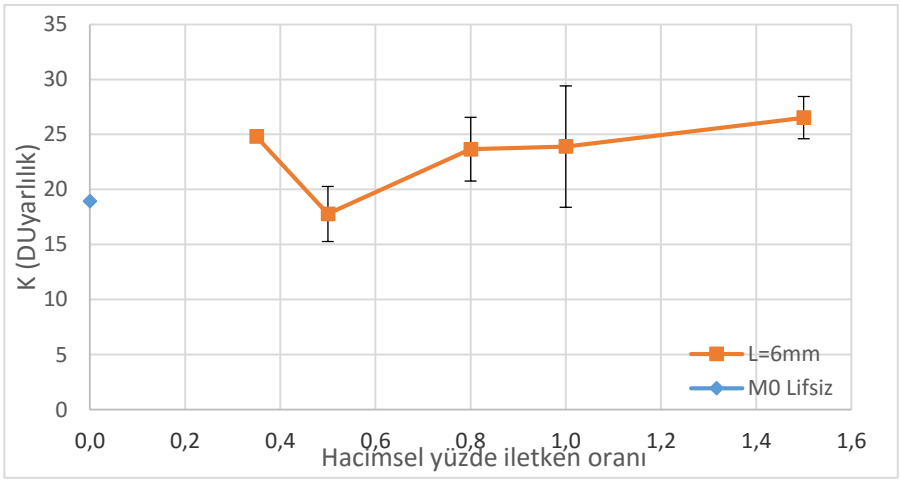
Verilecek grafiklerde her hacim oranı için dökülen 3 karışımın ortalama değerleri görülmektedir. Referans örnek olan M0 ile 6mm uzunluğunda karbon life sahip karışımların analiz sonuçları aşağıda verilmiştir. M0 isimli örneğin hacimsel yüzde iletken oranı %0'dır.

6mm karbon lifli karışımlar için Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği Şekil 3.53'te verilmiştir. 6mm karbon life sahip karışımlar M0 iletkensiz karışıma göre daha düşük elektriksel dirence sahiptirler. Örneklere 6mm karbon lif katmak elektriksel direnci düşürmüştür. İletkenli örneklerde ortalama Rso, hacimsel yüzde iletken oranının artmasıyla artış göstermektedir.



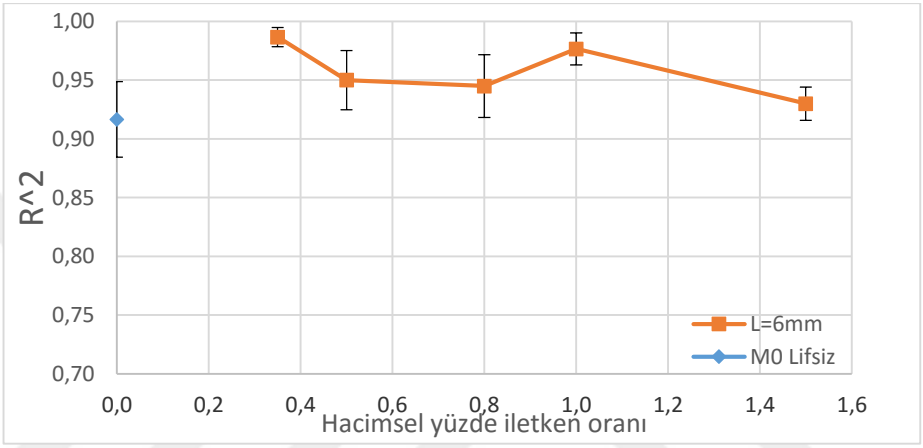
Şekil 3.53 6mm karbon lifli karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.54'te 6mm karbon lifli karışımların Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde %0,5 6mm karbon lif oranına sahip C2 isimli karışım hariç grupta bulunan bütün karışımların, M0(K=19) referans karışımından yüksek duyarlılık ortalamasına sahip olduğu görülmektedir. En yüksek duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=26 ile hacimsel %1,5 6mm karbon lif oranına sahip C5 isimli karışımdır. En düşük duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=18 ile hacimsel %0,5 6mm karbon lif oranına sahip C2 isimli karışımdır. Hacimsel %0,5 iletken oranından sonra duyarlılık ortalaması artan iletken oranıyla artma göstermektedir.



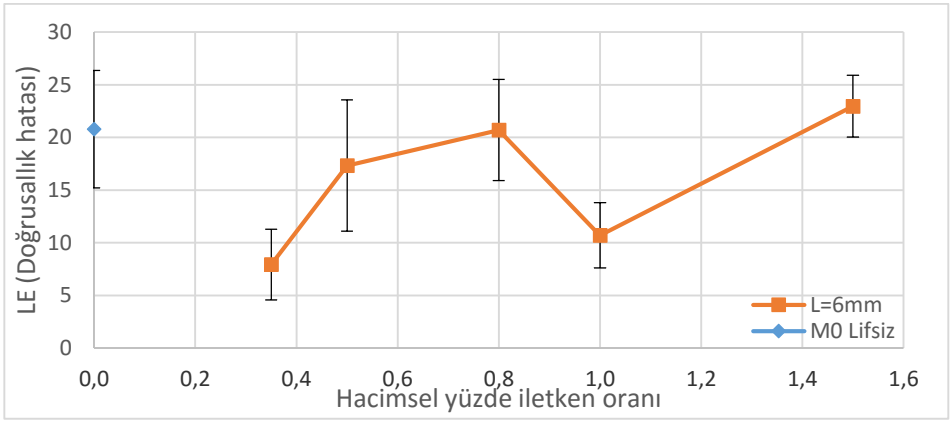
Şekil 3.54 6mm karbon lifli karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.55'te 6mm karbon lifli karışımların R^2(Korelasyon katsayısı) – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmektedir. Grafik incelendiğinde 6mm karbon lifli karışımların korelasyon katsayısı ortalamasının, iletkensiz olan M0 referans karışımın ortalamasından yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek R^2 ortalamalarına sahip karışım R^2=0,99 ile hacimsel %0,35 6mm karbon lif oranına sahip C1 isimli karışımdır. En düşük R^2 ortalamalarına sahip karışım hacimsel %1,5 6mm karbon lif oranına sahip C5 isimli karışımdır.



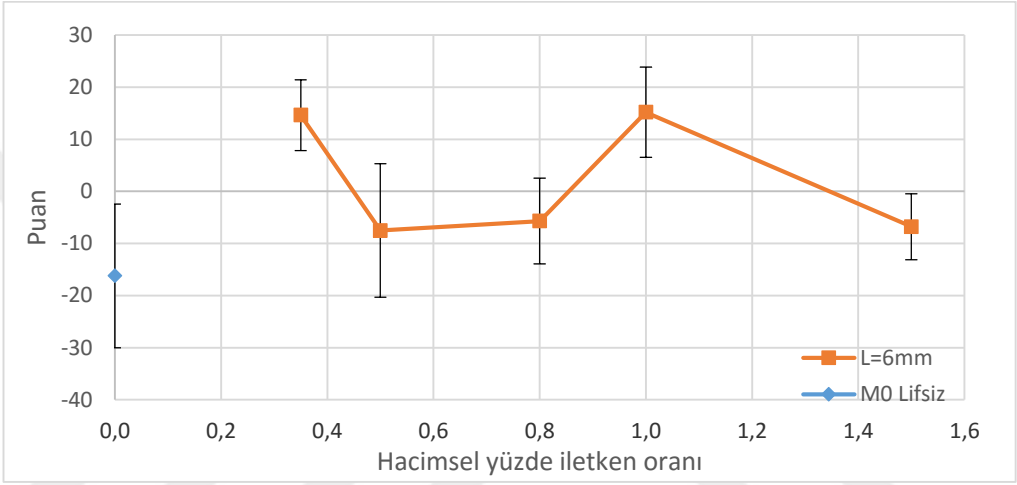
Şekil 3.55 6mm karbon lifli karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.56'da 6mm karbon lifli karışımların LE – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. En düşük doğrusallık hatası ortalaması hacimsel %0,35 6mm karbon lif içeren C1 isimli karışımda elde edilmiştir. Doğrusallık hata ortalaması hacimsel %2 iletken oranında en yüksektir.



Şekil 3.56 6mm karbon lifli karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği

Şekil 3.57'de 6mm karbon lifli karışımların Puan - Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Puanlar ikinci bölümde verilen Formül 2.6 ile hesaplanmıştır. Puan ortalamaları incelendiğinde bütün karışımların, M0 referans karışımından daha yüksek puana sahip olduğu görülmektedir. En yüksek puan ortalaması 14 ile hacimsel %0,35 6mm karbon lif oranına sahip C1 isimli karışımdadır. En düşük puan ortalaması -7 ile hacimsel %0,5 6mm karbon lif oranına sahip C15 isimli karışımdadır.



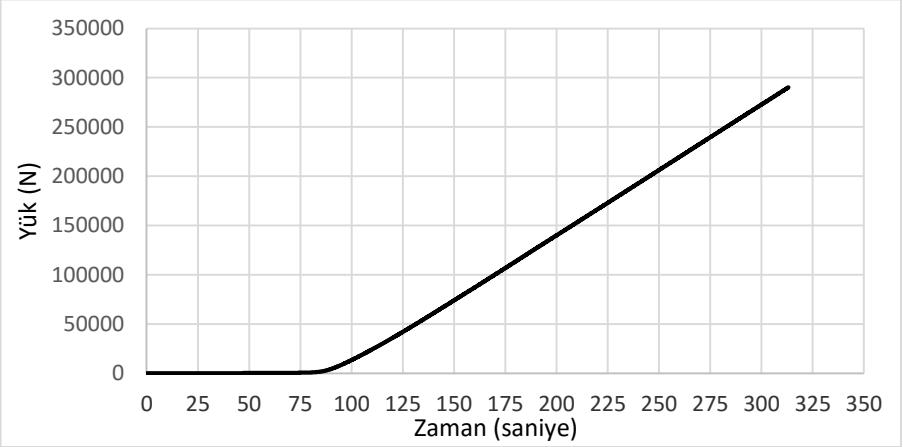
Şekil 3.57 6mm karbon lifli karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

3.2.3 13mm Uzunluktaki Karbon Lifli Karışımların Analiz Sonuçları

13mm uzunluğunda karbon lif kullanılarak, farklı hacimsel oranlara sahip 5 farklı karışım oluşturulmuştur. Her karışımdan 3'er adet 75mm küp dökülmüştür ve test edilmiştir. Bu grup için toplamda 15 adet beton küp örneği test edilip analiz edilmiştir. Oluşturulan karışımların isimleri ve sahip olduğu 13mm karbon lif miktarları Tablo 2.4'te sunulmuştur.

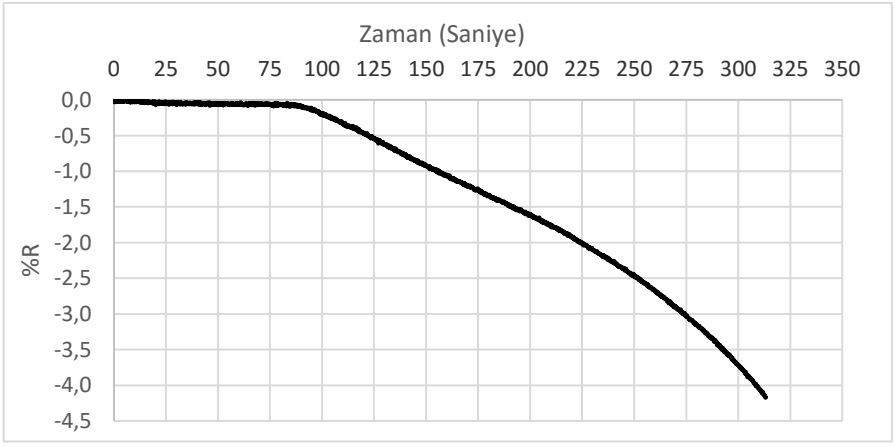
Şekil 3.58'de hacimce %0,35 oranda 13mm uzunluğunda karbon lif içeren C6 isimli karışımın yük – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde örneğin 85. saniyeden sonra yük almaya başladığı görülmektedir. Bu zaman sürecinde örnek ile başlık arasında kalan pürüzler ve kusurlar ezilmektedir. Deney 290 kN olan maksimum yüke

kadar devam etmiştir. Grupta bulunan bütün örnekler 290kN yük altında dayanımını korumuştur.



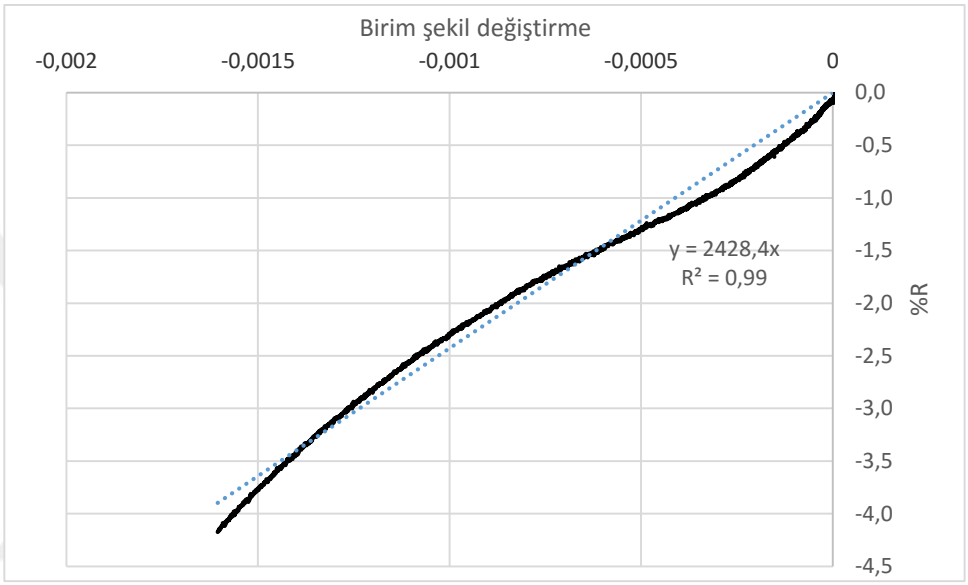
Şekil 3.58 C6 (%0,35) isimli karışımın yük - zaman grafiği

Şekil 3.59'da hacimce %0,35 oranında 13mm uzunluğunda karbon lif içeren C6 isimli karışımın %R – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde deney süresince artan basınç yükü etkisiyle elektriksel dirençte düşme meydana gelmiştir. 85. saniyede örneğin yük almaya başladığı ana kadar elektriksel dirençte değişme meydana gelmemiştir. 85. saniyeden sonra gerçekleşen elektriksel direnç değişimi artan basınç yükü sebebiyle oluşmuştur. Mikro boşlukların kapanması ve lif boyu kısalması nedeniyle elektron ve iyon akışı artmış, elektriksel direnç azalmıştır.



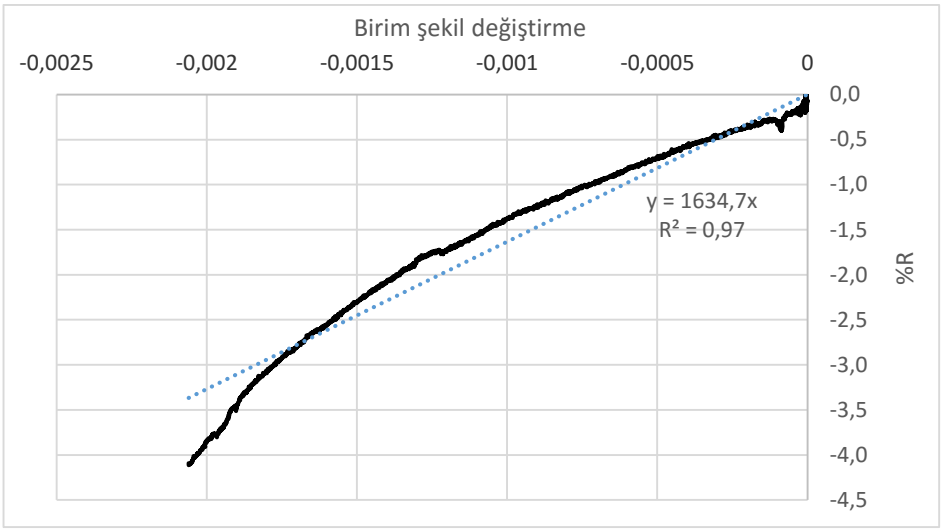
Şekil 3.59 C6 (%0,35) isimli karışımın %R - zaman grafiği

Şekil 3.60'ta hacimce %0,35 oranında 13mm uzunluğunda karbon lif içeren C6 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C6 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K = 26 olarak ölçülmüştür. C6 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 13 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %6, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0016 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



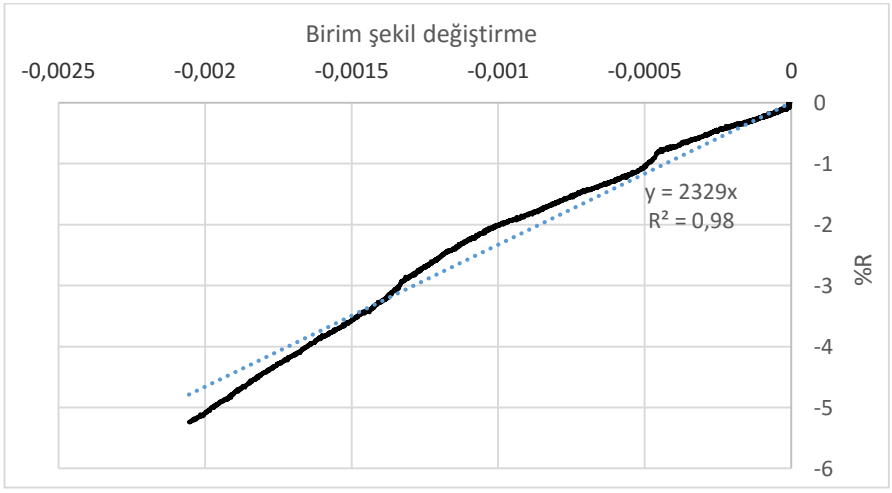
Şekil 3.60 C6 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=26, LE=6, R^2 = 0,99, SL=0,0016)

Şekil 3.61'de hacimce %0,5 oranında 13mm uzunluğunda karbon lif içeren C7 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C7 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 20 olarak ölçülmüştür. C7 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 10 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %12, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0020 ve korelasyon katsayısı R^2=0,97 olarak bulunmuştur.



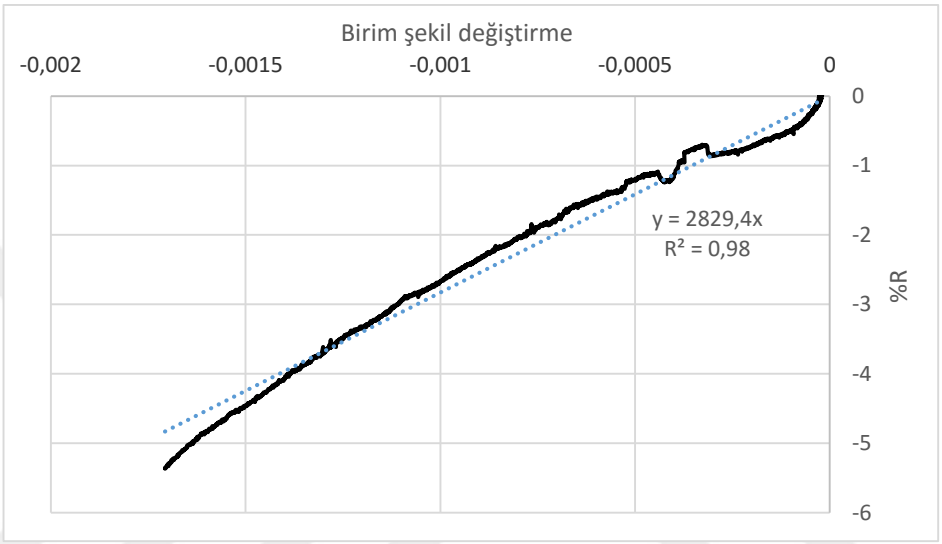
Şekil 3.61 C7 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=20, LE=12, $R^2 = 0{,}97$, SL=0,0020)

Şekil 3.62'de hacimce %0,8 oranında 13mm uzunluğunda karbon lif içeren C8 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C8 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 25 olarak ölçülmüştür. C8 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 12 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %9, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0020 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur.



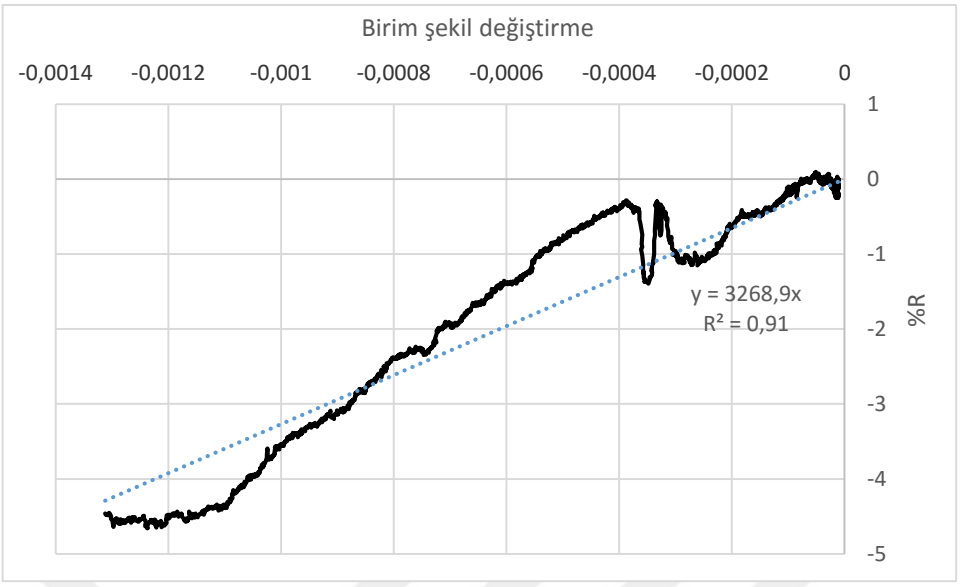
Şekil 3.62 C8 (%0,8) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=25, LE=9, $R^2 = 0{,}98$, SL=0,0020)

Şekil 3.63'te hacimce %1 oranında 13mm uzunluğunda karbon lif içeren C9 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C9 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 31 olarak ölçülmüştür. C9 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 15 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %10, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0017 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.63 C9 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=31, LE=10, $R^2 = 0,98$, SL=0,0017)

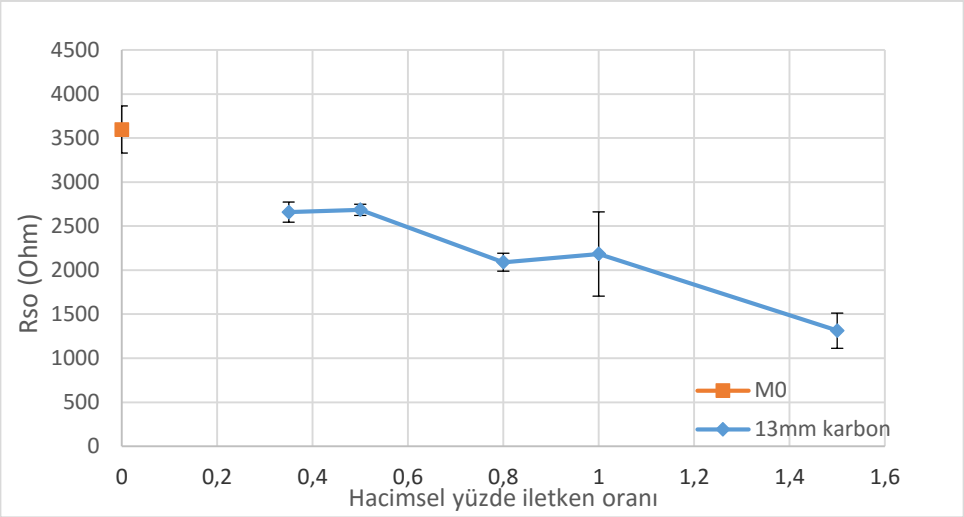
Şekil 3.64'te hacimce %1,5 oranında 13mm uzunluğunda karbon lif içeren C10 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. C10 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 32 olarak ölçülmüştür. C10 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 16 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %24, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0013 ve korelasyon katsayısı R^2=0,91 olarak bulunmuştur. Bu örnekte sinyal kalitesi oldukça kötü gözlenmiştir.



Şekil 3.64 C10 (%1,5) isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği (K=32, LE=24, $R^2 = 0{,}91$, SL=0,0013)

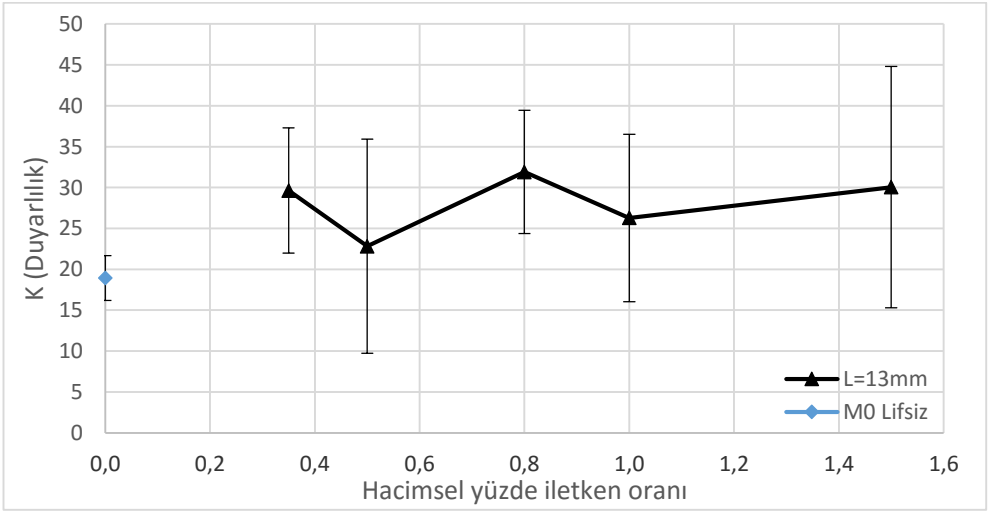
Verilecek grafiklerde her hacim oranı için dökülen 3 karışımın ortalama değerleri görülmektedir. Referans örnek olan M0 ile 13mm uzunluğunda karbon life sahip karışımların analiz sonuçları aşağıda verilmiştir. M0 isimli örneğin hacimsel yüzde iletken oranı %0'dır.

13mm karbon lifli karışımlar için Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği Şekil 3.65'te verilmiştir. 13mm karbon life sahip karışımlar M0 iletkensiz karışıma göre daha düşük elektriksel dirence sahiptirler. Örneklere 13mm karbon lif katmak elektriksel direnci düşürmüştür. Ortalama Rso hacimsel %0,8 iletken oranına kadar sabit kalmaktadır. Hacimsel %0,8 iletken oranından sonra Rso artan iletken oranıyla bir miktar azalma göstermiştir. Betona 13mm karbon lif katmak betonun elektriksel direncini düşürmüştür.



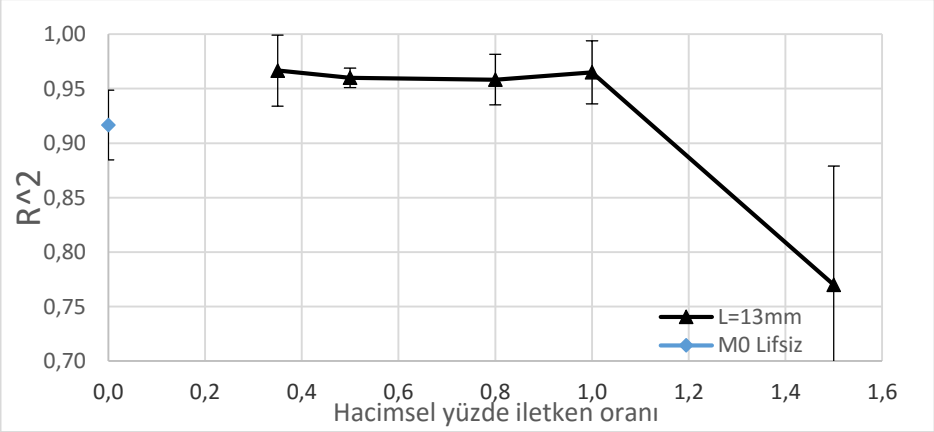
Şekil 3.65 13mm karbon lifli karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.66'da 13mm karbon lifli karışımların Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde grupta bulunan bütün karışımların M0(K=19) referans karışımından yüksek duyarlılık ortalamasına sahip olduğu görülmektedir. En yüksek duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=31 ile hacimsel %0,8 13mm karbon lif oranına sahip C8 isimli karışımdır. En düşük duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=22 ile hacimsel %0,5 13mm karbon lif oranına sahip C7 isimli karışımdır. Betona 13mm karbon lif katmak betonun duyarlılık değerini artırmıştır.



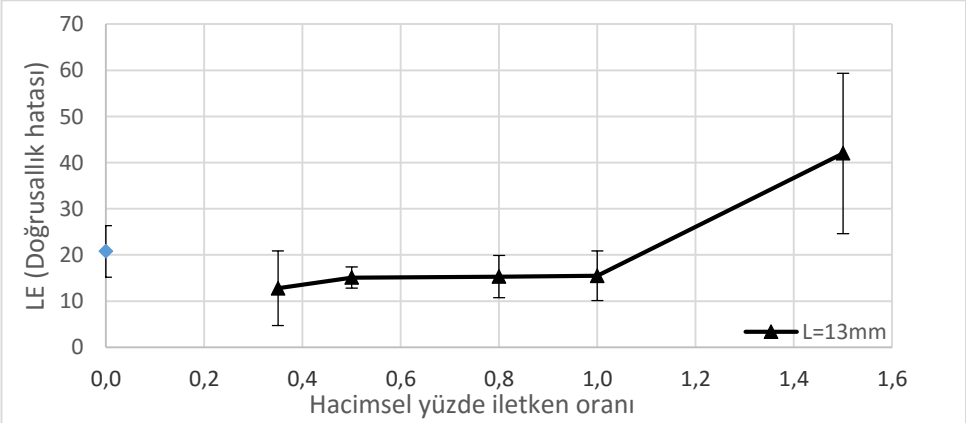
Şekil 3.66 13mm karbon lifli karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.67'de 13mm karbon lifli karışımların R^2(Korelasyon katsayısı) – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmektedir. Grafik incelendiğinde, hacimsel %1,5 13mm karbon lif oranına sahip C10 isimli karışım hariç kalan karışımların korelasyon katsayısı ortalamasının iletkensiz olan M0 referans karışımın ortalamasından yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek R^2 ortalamalarına sahip karışım %0,35 13mm karbon lif oranına sahip C6 isimli karışımdır.



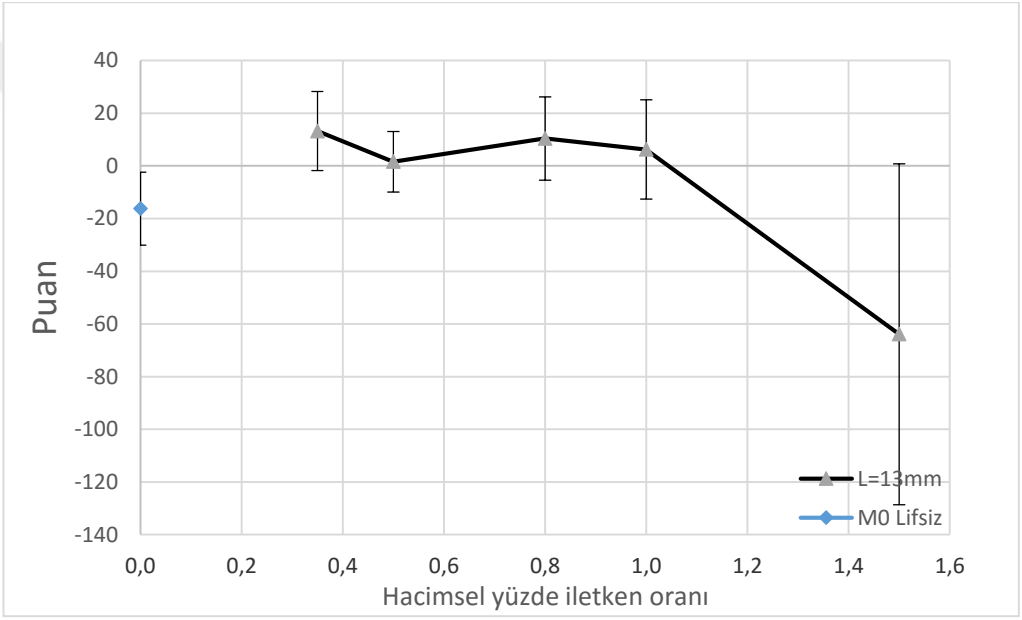
Şekil 3.67 13mm karbon lifli karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.68'de 13mm karbon lifli karışımların LE – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. En büyük doğrusallık hatası ortalaması hacimsel %1,5 13mm karbon lif içeren C9 isimli karışımda elde edilmiştir. Doğrusallık hata ortalaması hacimsel %0,35 iletken oranında en düşüktür. Fakat doğrusallık hatası ortalamaları hacimsel %1,5 iletken oranında artmış ve en yüksek değerini almış bulunmaktadır.



Şekil 3.68 13mm karbon lifli karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği

Şekil 3.69'da 13mm karbon lifli karışımların Puan - Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Puanlar ikinci bölümde verilen Formül 2.6 ile hesaplanmıştır. Puan ortalamaları incelendiğinde %1,5 13mm karbon lif oranına sahip C10 haricinde bütün karışımların, M0 referans karışımından daha yüksek puana sahip olduğu görülmektedir. En yüksek puan ortalaması 13 ile hacimsel %0,35 13mm karbon lif oranına sahip C6 isimli karışımdadır. En düşük puan ortalaması -63 ile hacimsel %1,5 13mm karbon lif oranına sahip C10 isimli karışımdadır. Betona 13mm karbon lif katmak düşük hacim oranlarında elektriksel iletkenlik – birim şekil değiştirme ilişkisini olumlu yönde etkilemiştir.



Şekil 3.69 13mm karbon lifli karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

3.3 Alüminyum Katkılı Karışımların Analiz Sonuçları

Alüminyum katkılı örnekler diğer örneklerden farklı olarak priz alma sürecinde genleşip içi boşluklu bir yapıya bürünmüştür. Bu durum katılan alüminyum tozunun priz süresince oksitlenmesi sonucu oluşur. Oksitlenme sonucu gerçekleşen gaz çıkışı sulu beton içinde baloncuklar oluşturarak beton hacminin artmasını sağlar ve böylece beton kabararak boşluklu bir yapı kazanır. Oluşan bu tepkime ekzotermik bir tepkimedir. Gazın yanında ısıda açığa çıkar. Buna benzer bir proses gaz beton üretiminde de kullanılmaktadır.

Dökümden sonra gözlenen bir diğer konu ise katılan alüminyum miktarı ile oluşan tepkimenin miktarı arasındaki doğru orantıdır. Artan alüminyum miktarı ile beton örneklerinde hacim artmıştır. Şekil 3.71'de, dökülen örnekler ve alüminyum miktarının artışı ile birlikte gelişen hacim artışı net olarak görülmektedir. Sol tarafta hacimce %1,5 alüminyum toz oranına sahip Ap5 isimli örnek diğer örneklere göre daha çok genleşmiştir. Şekil 3.70'te kalıptan alınmış alüminyum tozu katkılı örnekler görülmektedir.



Şekil 3.70 Alüminyum tozu katkılı örnekler kalıptan alınmış



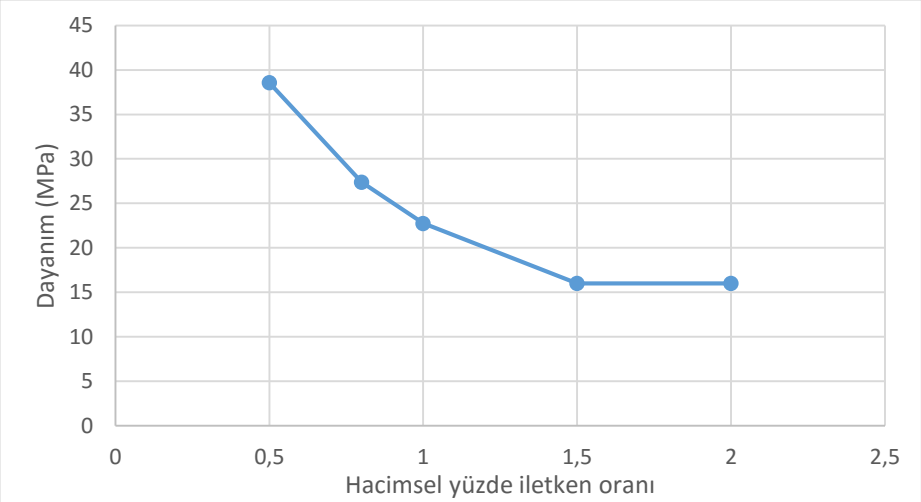
Şekil 3.71 Alüminyum tozu katkılı örnekler kalıpta

3.3.1 Alüminyum Tozlu Karışımların Analiz Sonuçları

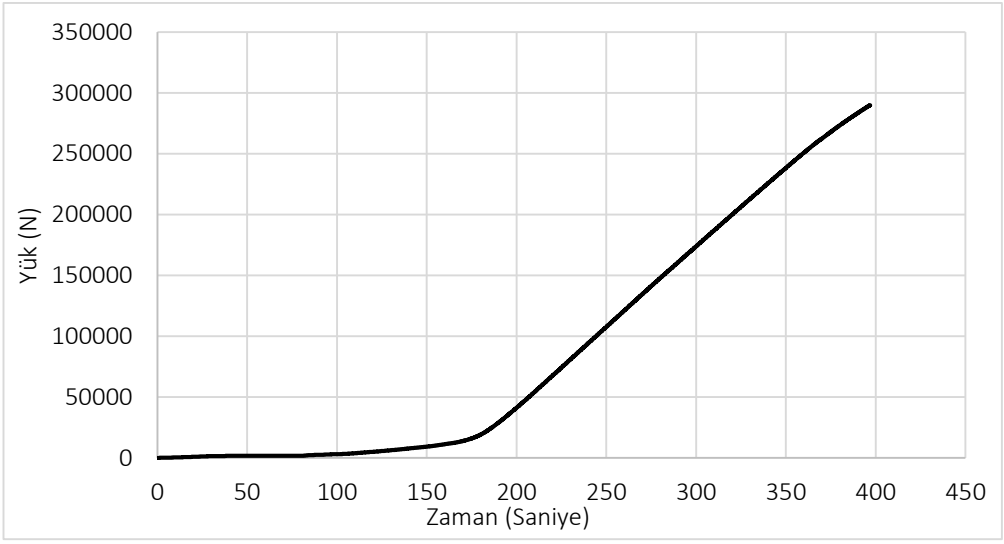
Alüminyum tozu kullanılarak, farklı hacimsel oranlara sahip 6 farklı karışım oluşturulmuştur. Her karışımdan 3'er adet 75mm küp dökülmüştür ve test edilmiştir. Bu grup için toplamda 18 adet beton küp örneği test edilip analiz edilmiştir. Oluşturulan karışımların isimleri ve sahip olduğu alüminyum tozu miktarları Tablo 2.4'te sunulmuştur.

Alüminyum tozunun örnekler içinde boşluklar yaratması ile beton dayanımı azalmıştır. Artan alüminyum miktarları ile dayanımda bir düşme görülmüştür. Şekil 3.72'de hacimsel yüzde iletken oranı – beton dayanımı grafiği sunulmuştur.

Şekil 3.73'de hacimce %0,35 oranda alüminyum toz içeren Ap1 isimli karışımın yük – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde örneğin 75. saniyeden sonra yük almaya başladığı görülmektedir. Bu zaman sürecinde örnek ile başlık arasında kalan pürüzler ve kusurlar ezilmektedir. Deney 290 kN olan maksimum yüke kadar devam etmiştir.

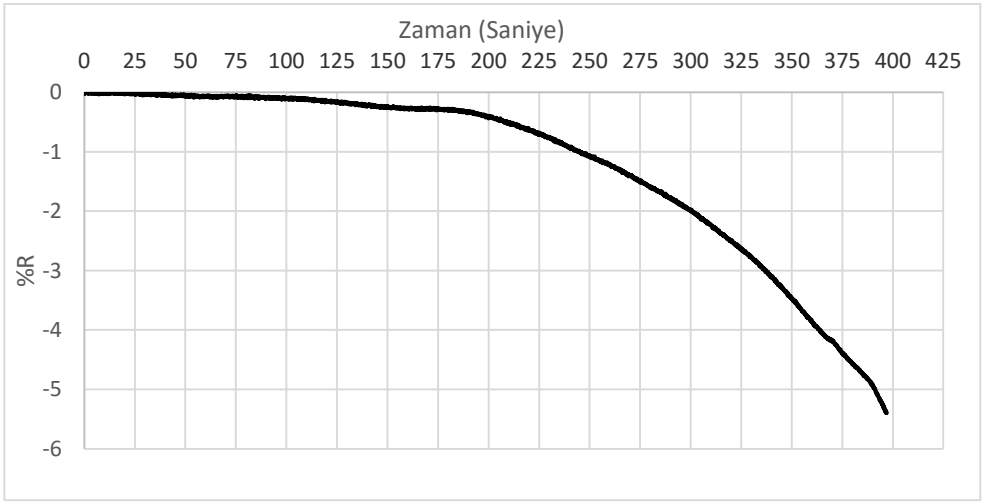


Şekil 3.72 Alüminyum tozu katkılı karışımlarda Dayanım – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği



Şekil 3.73 Ap1 (%0,35) isimli karışımın yük - zaman grafiği

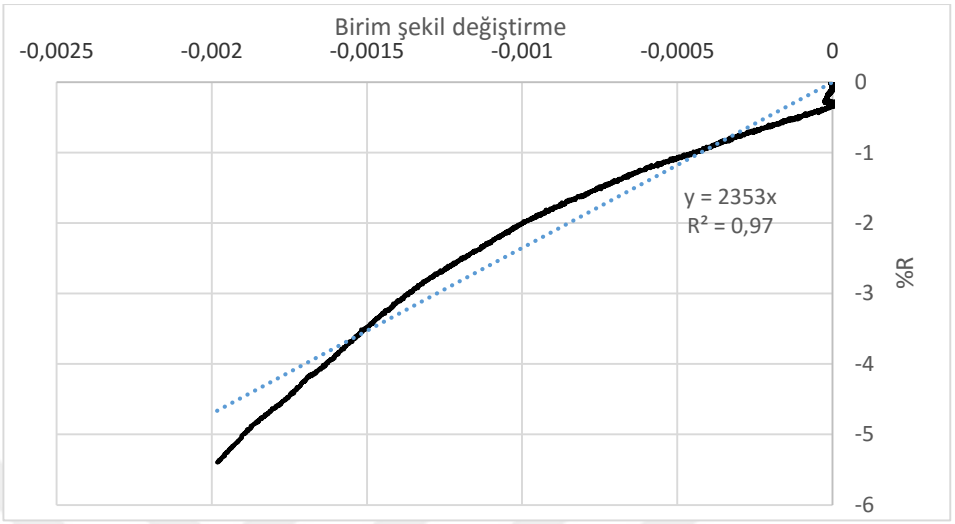
Şekil 3.74'te hacimce %0,35 oranında alüminyum toz içeren Ap1 isimli karışımın %R – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde deney süresince artan basınç yükü etkisiyle elektriksel dirençte düşme meydana gelmiştir. Mikro boşlukların kapanması ve lif boyu kısalması nedeniyle elektron ve iyon akışı artmış, elektriksel direnç azalmıştır.



Şekil 3.74 Ap1 (%0,35) isimli karışımın %R - zaman grafiği

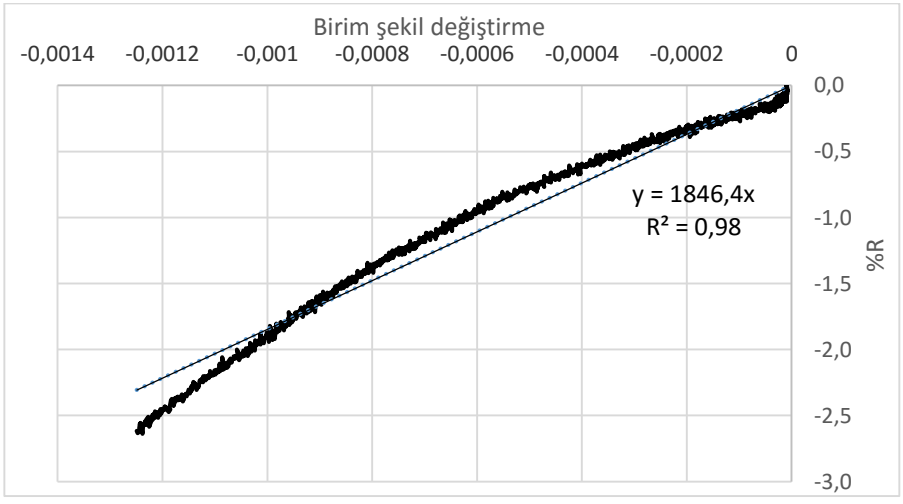
Şekil 3.75'te hacimce %0,35 oranında alüminyum toz içeren Ap1 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Ap1 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 43 olarak ölçülmüştür. Ap1 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim

şekil değiştirmesine 21 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %22, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0011 ve korelasyon katsayısı R^2=0,97 olarak bulunmuştur.



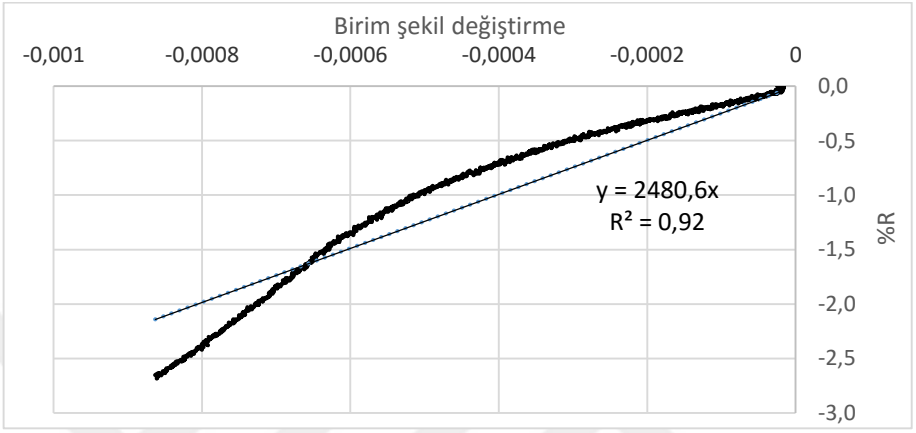
Şekil 3.75 Ap1 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=43, LE=22, R^2 = 0,97, SL=0,0011)

Şekil 3.76'da hacimce %0,5 oranında alüminyum toz içeren Ap2 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Ap2 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 21 olarak ölçülmüştür. Ap2 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 10 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %13, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0012 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur.



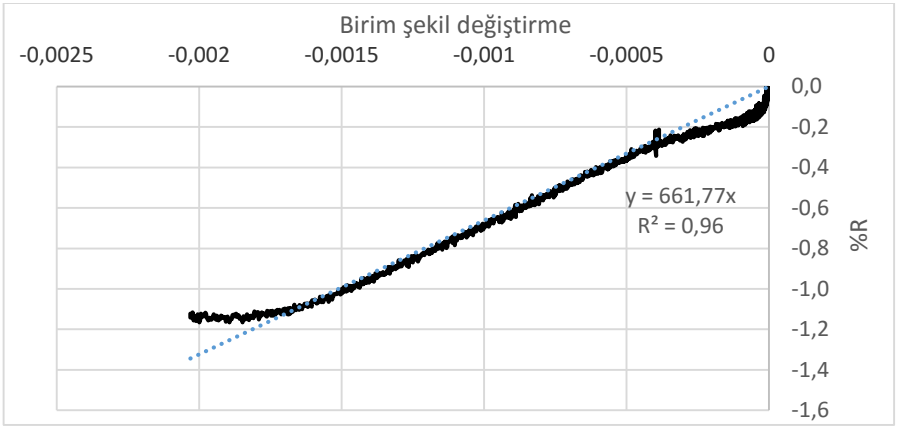
Şekil 3.76 Ap2 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=21, LE=13, R^2 = 0,98, SL=0,0012)

Şekil 3.77'de hacimce %0,8 oranında alüminyum toz içeren Ap3 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Ap3 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 31 olarak ölçülmüştür. Ap3 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 15 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %21, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0008 ve korelasyon katsayısı R^2=0,92 olarak bulunmuştur.



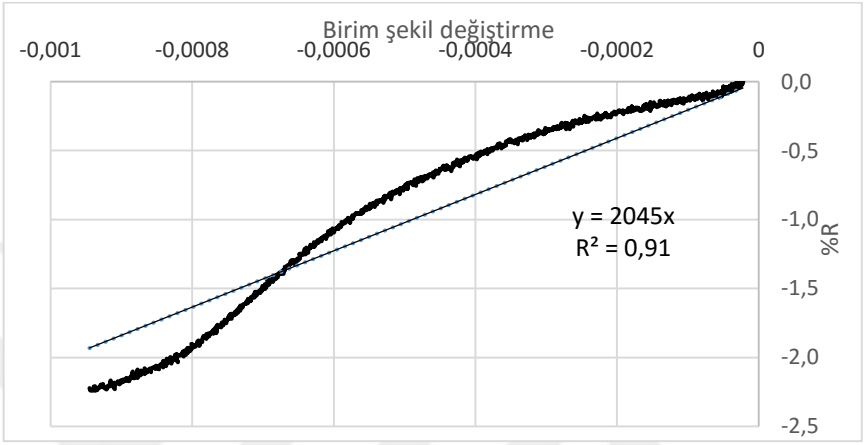
Şekil 3.77 Ap3 (%0,8) isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği (K=31, LE=21, R^2 = 0,92, SL=0,0008)

Şekil 3.78'de hacimce %1 oranında alüminyum toz içeren Ap4 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Ap4 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 6 olarak ölçülmüştür. Ap4 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 3 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %20, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0020 ve korelasyon katsayısı R^2=0,96 olarak bulunmuştur.



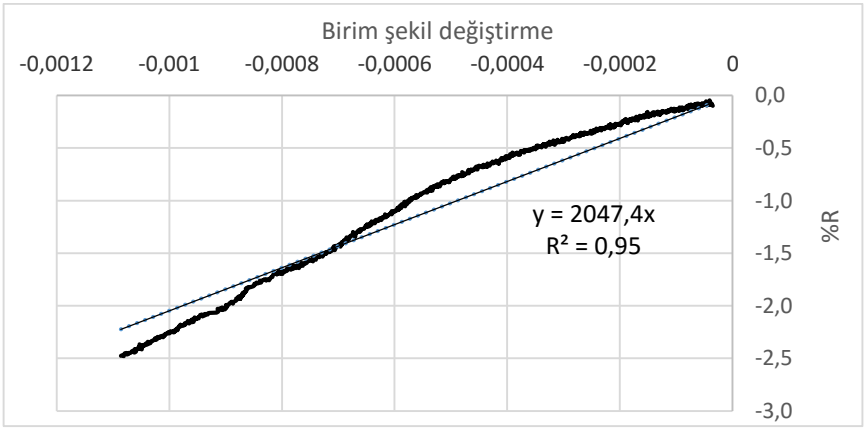
Şekil 3.78 Ap4 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=6, LE=20, R^2 = 0,96, SL=0,0020)

Şekil 3.79'da hacimce %1,5 oranında alüminyum toz içeren Ap5 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Ap5 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 23 olarak ölçülmüştür. Ap5 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 11 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %17, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,001 ve korelasyon katsayısı R^2=0,91 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.79 Ap5 (%1,5) isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği (K=23, LE=17, R^2 = 0,91, SL=0,001)

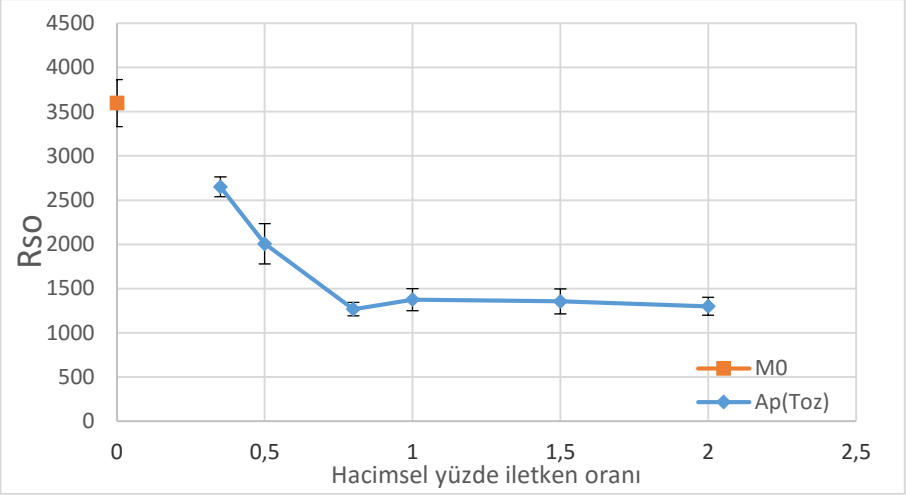
Şekil 3.80'de hacimce %2 oranında alüminyum toz içeren Ap6 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Ap6 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 23 olarak ölçülmüştür. Ap6 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 14 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %27, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0010 ve korelasyon katsayısı R^2=0,95 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.80 Ap6 (%2) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=23, LE=27, R^2 = 0,95, SL=0,0010)

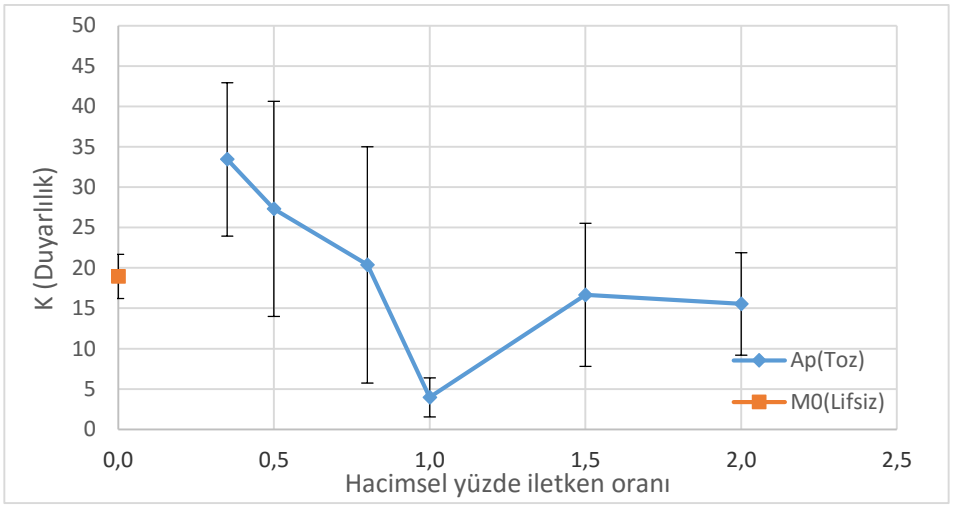
Verilecek grafiklerde her hacim oranı için dökülen 3 karışımın ortalama değerleri görülmektedir. Referans örnek olan M0 ile alüminyum toza sahip karışımların analiz sonuçları aşağıda verilmiştir. M0 isimli örneğin hacimsel yüzde iletken oranı %0'dır.

Alüminyum tozlu karışımlar için Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği Şekil 3.81'de verilmiştir. Alüminyum toza sahip karışımlar M0 iletkensiz karışıma göre daha düşük elektriksel dirence sahiptirler. Örneklere alüminyum toz katmak elektriksel direnci düşürmüştür. İletkenli örneklerde ortalama Rso hacimsel %0,35 iletken oranından %0,8 iletken oranına kadar azalma göstermektedir. Hacimsel %0,8 iletken oranından sonra Rso artan iletken oranıyla değişim göstermemiştir.



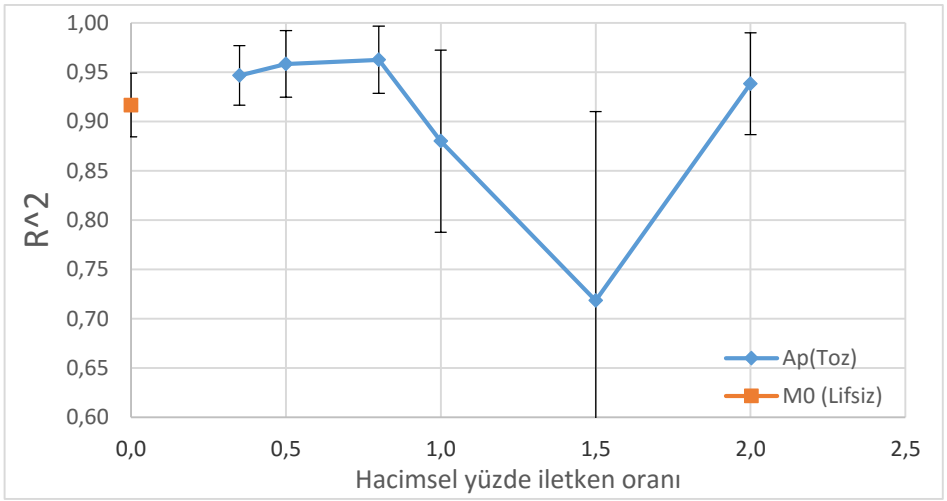
Şekil 3.81 Alüminyum tozlu karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.82'de alüminyum tozlu karışımların Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde sadece hacimsel %0,35 ve %0,5 alüminyum toz oranına sahip Ap1 ve Ap2 isimli karışımların M0(K=19) referans karışımından yüksek duyarlılık ortalamasına sahip olduğu görülmektedir. En yüksek duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=33 ile hacimsel %0,35 alüminyum toz oranına sahip Ap1 isimli karışımdır. En düşük duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=4 ile hacimsel %1 alüminyum toz oranına sahip Ap4 isimli karışımdır. Artan iletken oranıyla duyarlılık ortalamalarında azalma görülmektedir.



Şekil 3.82 Alüminyum tozlu karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

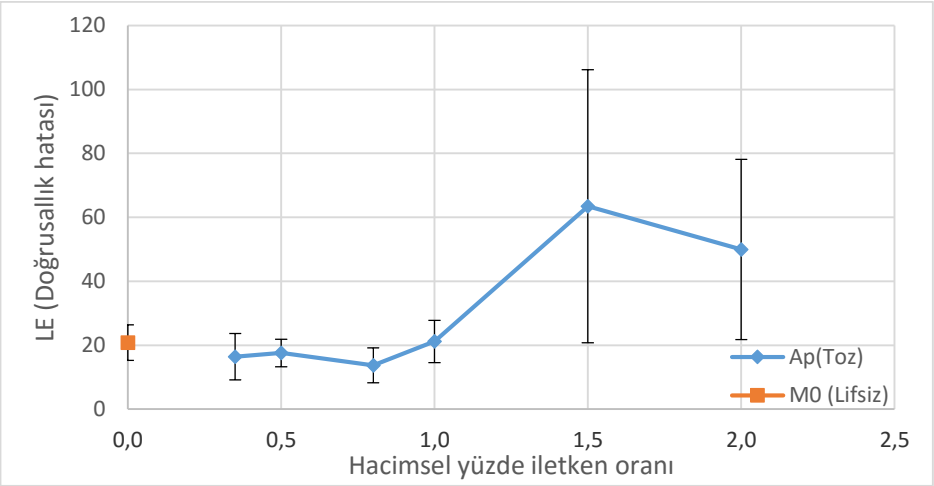
Şekil 3.83'te alüminyum tozlu karışımların R^2(Korelasyon katsayısı) – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmektedir. Grafik incelendiğinde en yüksek R^2 ortalamasına sahip karışım hacimsel %0,8 alüminyum toz oranına sahip Ap3 isimli karışımdır. En düşük R^2 ortalamalarına sahip karışım hacimsel %1,5 alüminyum toz oranına sahip Ap5 isimli karışımdır. Hacimsel %1 ve %1,5 alüminyum toz oranına sahip Ap4 ve Ap5 isimli karışımların R^2 ortalamalarının, referans karışım olan M0'dan oldukça düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 3.83 Alüminyum tozlu karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

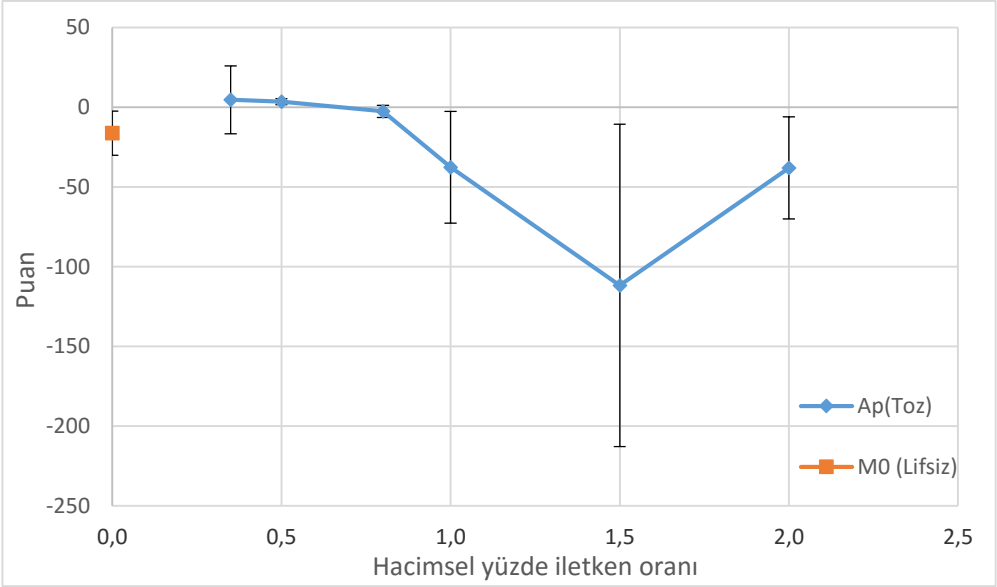
Şekil 3.84'te alüminyum tozlu karışımların LE – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Doğrusallık hata ortalaması hacimsel %0,35 ve %1 iletken oranları

arası en düşüktür. Fakat doğrusallık hatası ortalamaları hacimsel %1,5 iletken oranında artmış ve en yüksek değerini almış bulunmaktadır. En küçük doğrusallık hatası ortalaması hacimsel %0,8 alüminyum toz içeren Ap3 isimli karışımda elde edilmiştir.



Şekil 3.84 Alüminyum tozlu karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği

Şekil 3.85'te alüminyum tozlu karışımların Puan - Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Puanlar ikinci bölümde verilen Formül 2.6 ile hesaplanmıştır. Puan ortalamaları incelendiğinde sadece hacimsel %0,35, %0,5 ve %0,8 iletken oranlarına sahip Ap1, Ap2, Ap3 isimli karışımların M0 referans karışımından daha yüksek puana sahip olduğu görülmektedir. En yüksek puan ortalaması standart sapmalarıda dikkate alarak 4 ile hacimsel %0,5 alüminyum toz oranına sahip Ap2 isimli karışımdadır. En düşük puan ortalaması -111 ile hacimsel %1,5 alüminyum toz oranına sahip Ap5 isimli karışımdadır. Artan iletken oranıyla puanlarda düşme görülmüştür. Betona yüksek miktarda alüminyum toz katmak elektriksel iletkenlik – birim şekil değiştirme ilişkisini olumsuz yönde etkilemiştir ve sinyal kalitesini oldukça düşürmüştür. Bunun nedeni, alüminyum tozun oksitlendiğinde betonda büyük boşluklar oluşmasına neden olmasıdır.

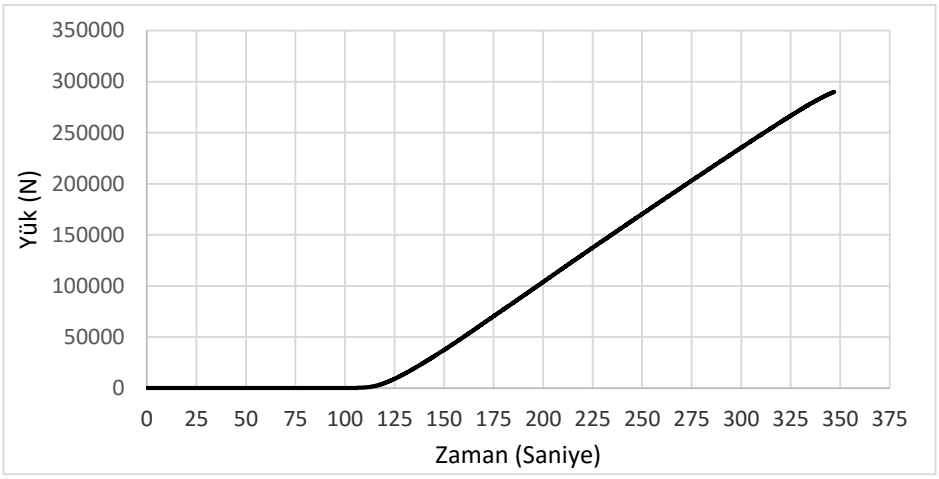


Şekil 3.85 Alüminyum tozlu karışımlarda Puan – Hacimsel iletken oranı grafiği

3.3.2 Alüminyum Lifli Karışımların Analiz Sonuçları

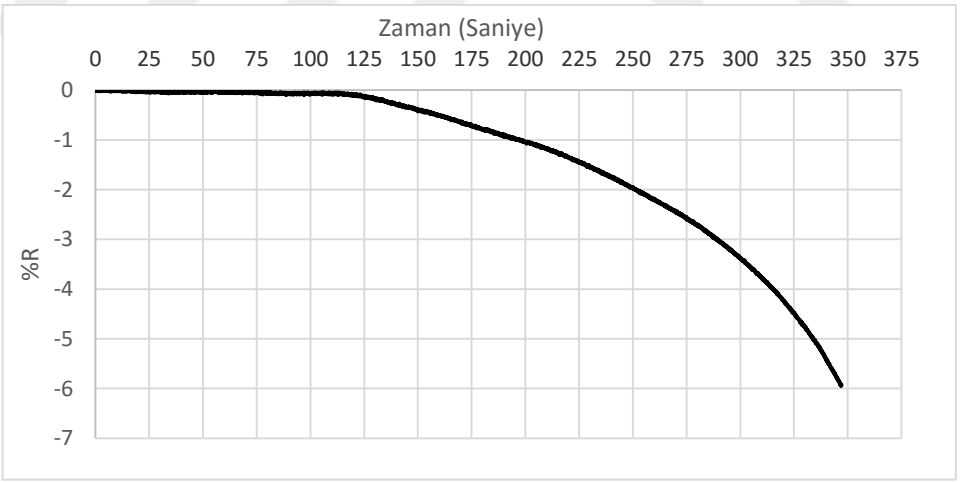
Alüminyum lif kullanılarak, farklı hacimsel oranlara sahip 6 farklı karışım oluşturulmuştur. Her karışımdan 3'er adet 75mm küp dökülmüştür ve test edilmiştir. Bu grup için toplamda 18 adet beton küp örneği test edilip analiz edilmiştir. Oluşturulan karışımların isimleri ve sahip olduğu alüminyum lif miktarları Tablo 2.4'te sunulmuştur.

Şekil 3.86'da hacimce %0,35 oranda alüminyum lif içeren A1 isimli karışımın yük – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde örneğin 115. saniyeden sonra yük almaya başladığı görülmektedir. Bu zaman sürecinde örnek ile başlık arasında kalan pürüzler ve kusurlar ezilmektedir. Deney 290 kN olan maksimum yüke kadar devam etmiştir. Grupta bulunan hacimce %1,5 oranda alüminyum lif içeren A5 isimli örneklerden ikisi ortalama 285kN yükte dayanımını yitirip kırılmıştır. Hacimce %2 oranda alüminyum lif içeren A6 isimli örneklerin üçüde dayanımını yitirmiştir. A6 isimli örneklerin ortalama dayanımı 30MPa bulunmuştur.



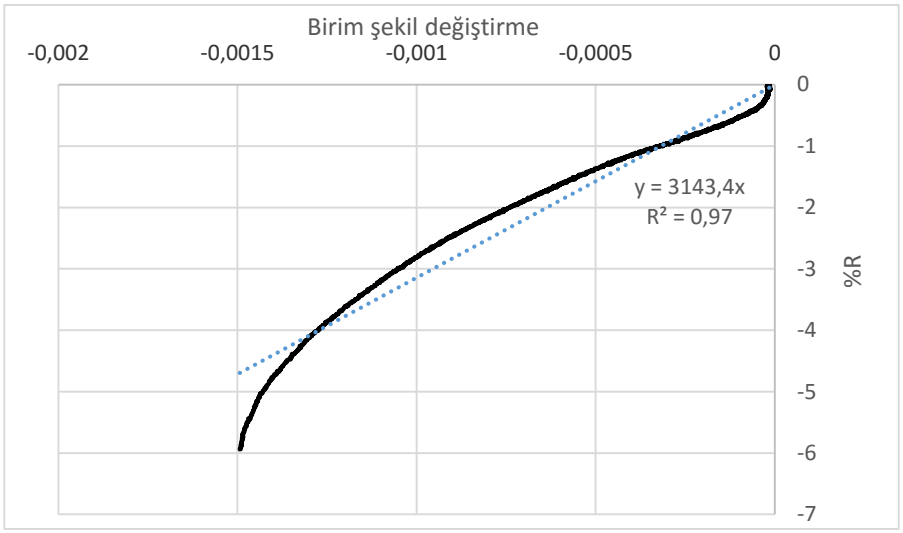
Şekil 3.86 A1 (%0,35) isimli karışımın yük - zaman grafiği

Şekil 3.87'de hacimce %0,35 oranında alüminyum lif içeren A1 isimli karışımın %R – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde deney süresince artan basınç yükü etkisiyle elektriksel dirençte düşme meydana gelmiştir. Mikro boşlukların kapanması ve lif boyu kısalması nedeniyle elektron ve iyon akışı artmış, elektriksel direnç azalmıştır.



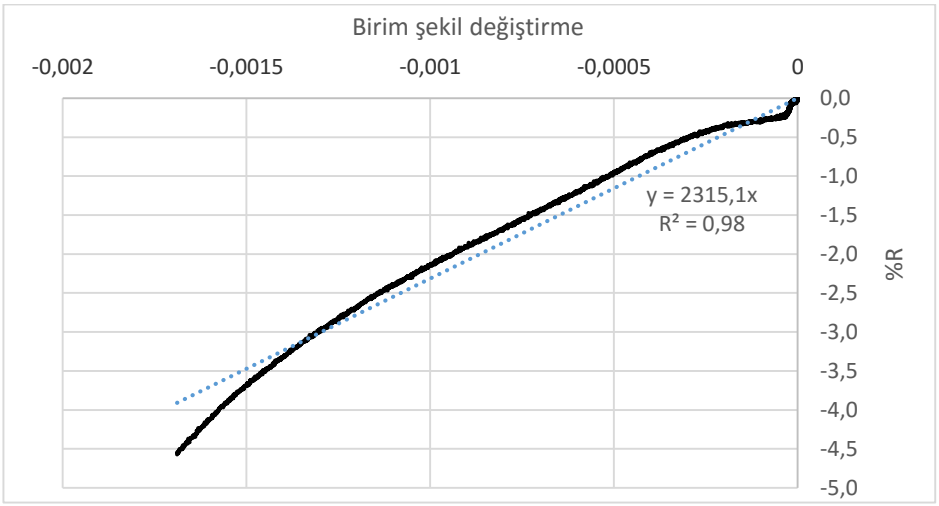
Şekil 3.87 A1 (%0,35) isimli karışımın %R - zaman grafiği

Şekil 3.88'de hacimce %0,35 oranında alüminyum lif içeren A1 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. A1 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 39 olarak ölçülmüştür. A1 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 18 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %21, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0015 ve korelasyon katsayısı R^2=0,97 olarak bulunmuştur.



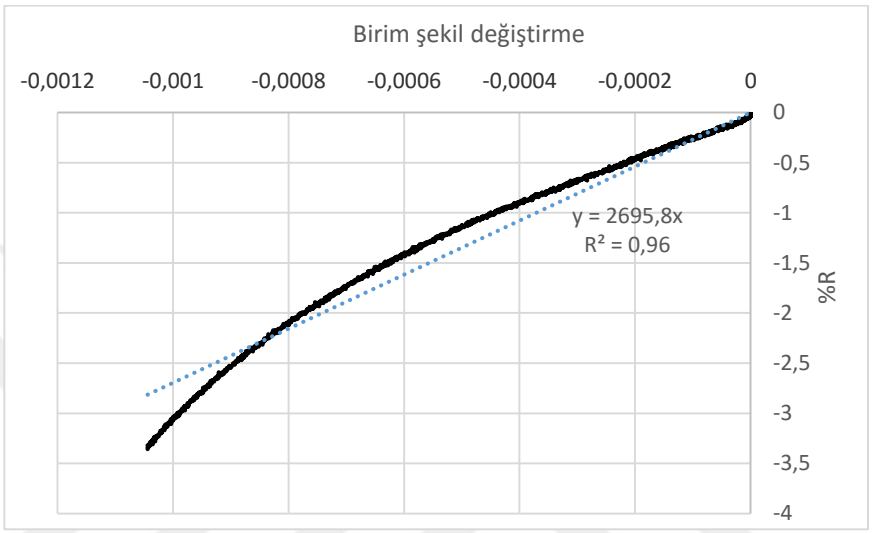
Şekil 3.88 A1 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=39, LE=21, $R^2 = 0{,}97$, SL=0,0015)

Şekil 3.89'da hacimce %0,5 oranında alüminyum lif içeren A2 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. A2 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 27 olarak ölçülmüştür. A2 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 13 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %5, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0016 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur.



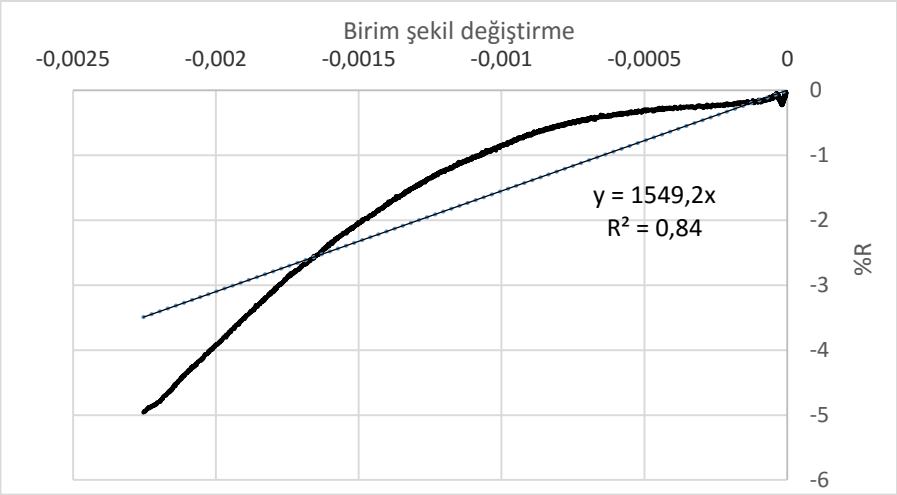
Şekil 3.89 A2 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=27, LE=5, $R^2 = 0{,}98$, SL=0,0016)

Şekil 3.90'da hacimce %0,8 oranında alüminyum lif içeren A3 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. A3 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 32 olarak ölçülmüştür. A3 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 16 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %16, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0010 ve korelasyon katsayısı R^2=0,96 olarak bulunmuştur.



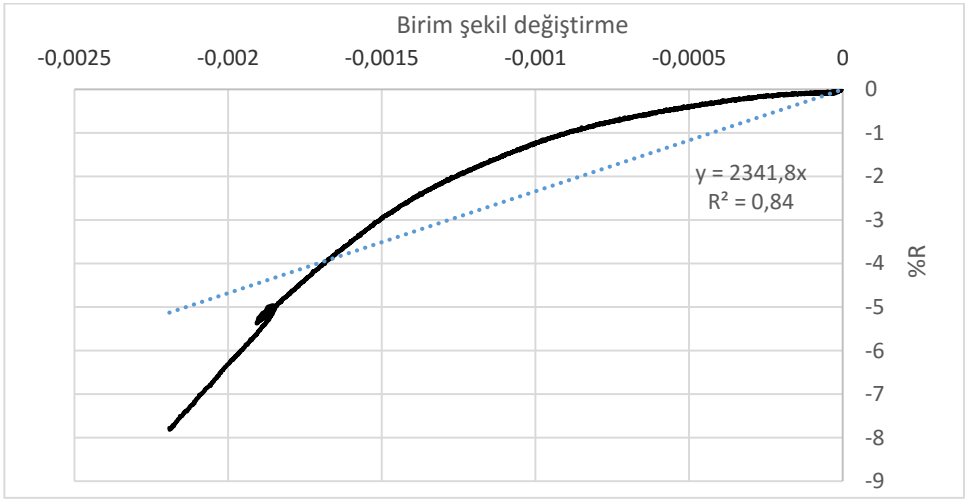
Şekil 3.90 A3 (%0,8) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=32, LE=16, R^2 = 0,96, SL=0,0010)

Şekil 3.91'de hacimce %1 oranında alüminyum lif içeren A4 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. A4 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 22 olarak ölçülmüştür. A4 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 11 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %29, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0022 ve korelasyon katsayısı R^2=0,84 olarak bulunmuştur.



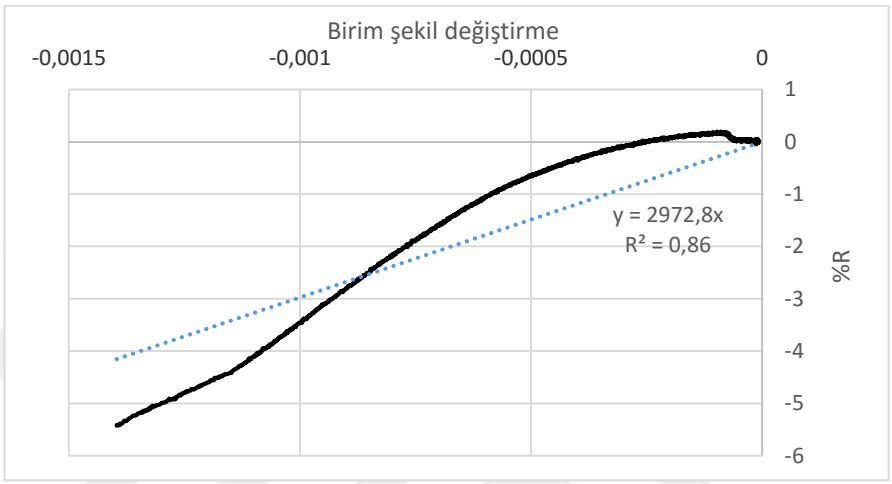
Şekil 3.91 Ap4 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=22, LE=29, $R^2 = 0{,}84$, SL=0,0022)

Şekil 3.92'de hacimce %1,5 oranında alüminyum lif içeren A5 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. A5 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 41 olarak ölçülmüştür. A5 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 20 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %35, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,002 ve korelasyon katsayısı R^2=0,84 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.92 Ap5 (%1,5) isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği (K=41, LE=35, $R^2 = 0{,}84$, SL=0,002)

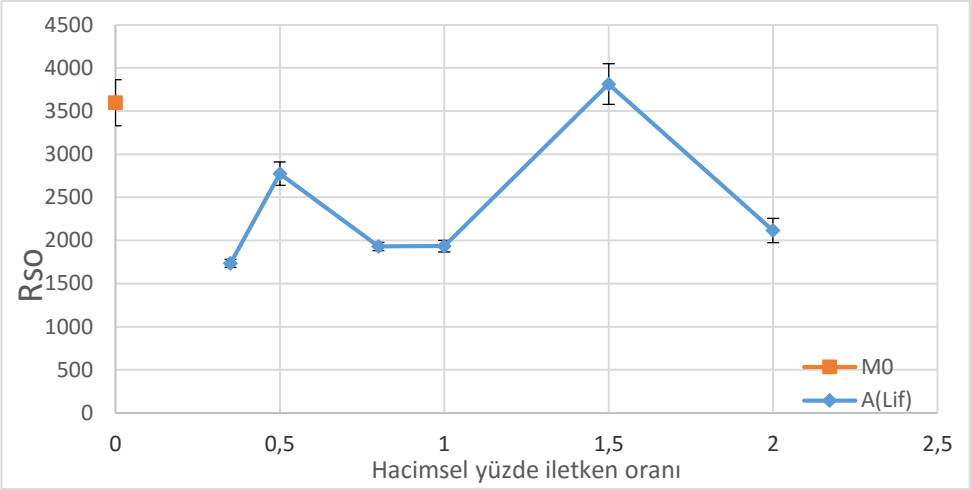
Şekil 3.93'te hacimce %2 oranında alüminyum lif içeren A6 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. A6 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 39 olarak ölçülmüştür. A6 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 18 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %24, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0013 ve korelasyon katsayısı R^2=0,86 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.93 A6 (%2) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=39, LE=24, $R^2 = 0{,}86$, SL=0,0013)

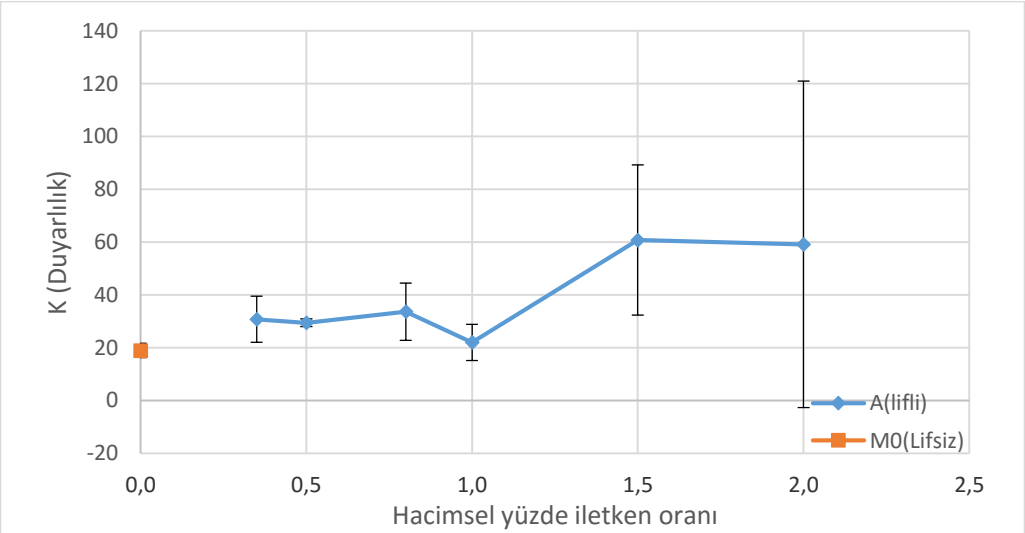
Verilecek grafiklerde her hacim oranı için dökülen 3 karışımın ortalama değerleri görülmektedir. Referans örnek olan M0 ile alüminyum life sahip karışımların analiz sonuçları aşağıda verilmiştir. M0 isimli örneğin hacimsel yüzde iletken oranı %0'dır.

Alüminyum lifli karışımlar için Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği Şekil 3.94'te verilmiştir. Hacimsel %1,5 iletken oranına sahip Ap5 isimli karışım haricinde alüminyum life sahip karışımlar M0 iletkensiz karışıma göre daha düşük elektriksel dirence sahiptirler. Örneklere alüminyum lif katmak düşük hacim oranlarında elektriksel direnci düşürmüştür.



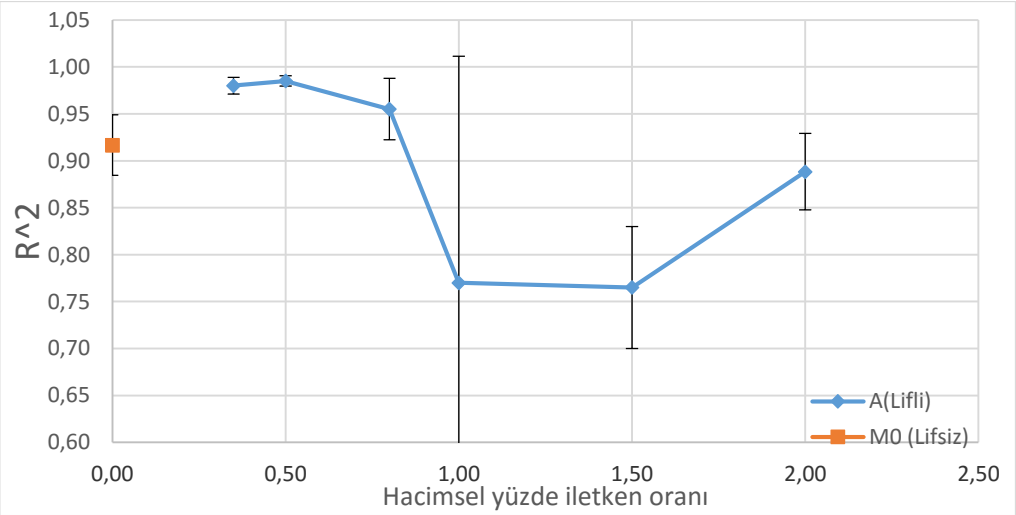
Şekil 3.94 Alüminyum lifli karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.95'te alüminyum lifli karışımların Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde bütün karışımların M0(K=19) referans karışımından yüksek duyarlılık ortalamasına sahip olduğu görülmektedir. En yüksek duyarlılık ortalamasına sahip karışımlar K=60 ile hacimsel %1,5 ve %2 alüminyum lif oranına sahip A5 ve A6 isimli karışımlardır. En düşük duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=22 ile hacimsel %1 alüminyum lif oranına sahip A4 isimli karışımdır. Artan iletken oranıyla duyarlılık ortalamalarında artma görülmektedir.



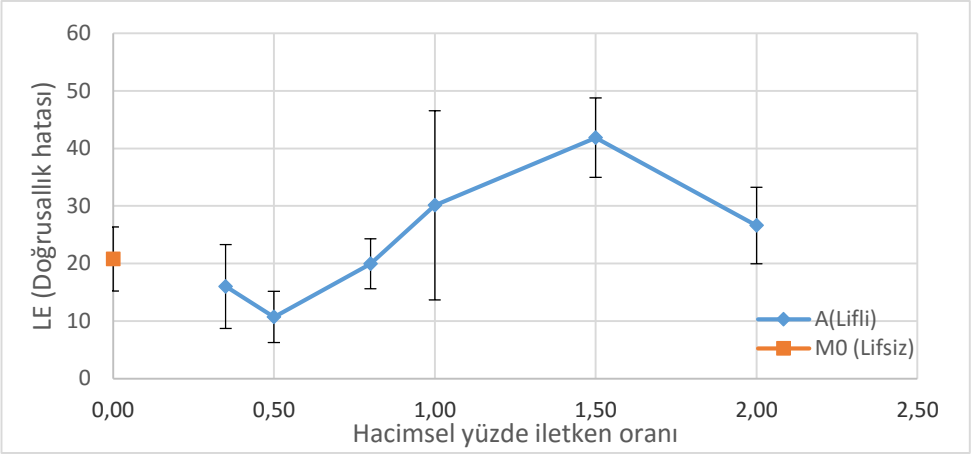
Şekil 3.95 Alüminyum lifli karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.96'da alüminyum lifli karışımların R^2(Korelasyon katsayısı) – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmektedir. Grafik incelendiğinde en yüksek R^2 ortalamasına sahip karışım hacimsel %0,5 alüminyum lif oranına sahip A2 isimli karışımdır. En düşük R^2 ortalamalarına sahip karışımlar, hacimsel %1 ve %1,5 alüminyum lif oranına sahip A4 ve A5 isimli karışımlardır. Hacimsel %1 ve %1,5 alüminyum lif oranına sahip A4 ve A5 isimli karışımların R^2 ortalamalarının, referans karışım olan M0'dan oldukça düşük olduğu görülmektedir.



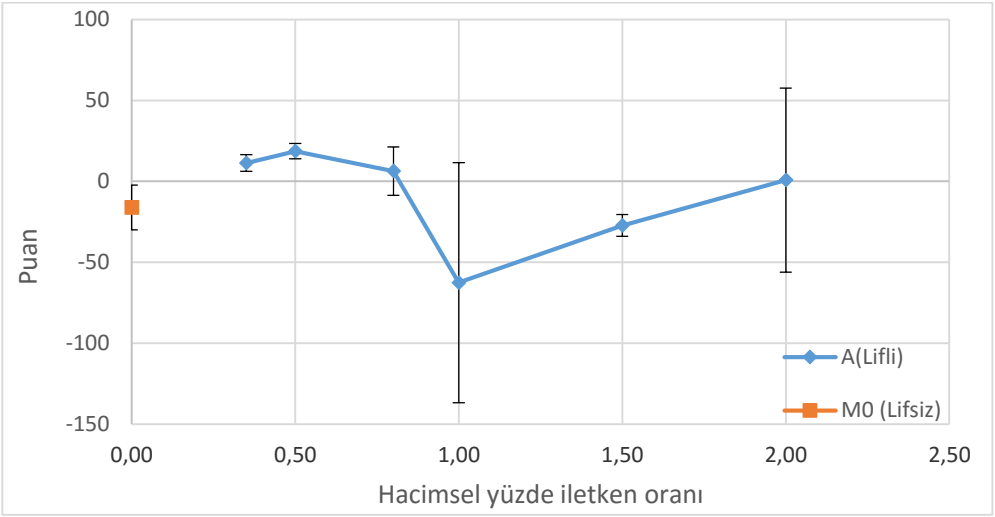
Şekil 3.96 Alüminyum lifli karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.97'de alüminyum lifli karışımların LE – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. En küçük doğrusallık hatası ortalaması hacimsel %0,5 alüminyum lif içeren A2 isimli karışımda elde edilmiştir ve değeri LE= 10,7'dir. Fakat doğrusallık hatası ortalamaları hacimsel %1,5 iletken oranına kadar artmış ve en yüksek değerini almış bulunmaktadır.



Şekil 3.97 Alüminyum lifli karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği

Şekil 3.98'de alüminyum lifli karışımların Puan - Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Puanlar ikinci bölümde verilen Formül 2.6 ile hesaplanmıştır. Puan ortalamaları incelendiğinde sadece hacimsel %1 ve %1,5 iletken oranlarına sahip A4 ve A5 isimli karışımların M0 referans karışımından daha düşük puana sahip olduğu görülmektedir. En yüksek puan ortalaması 18 ile hacimsel %0,5 alüminyum lif oranına sahip A2 isimli karışımdadır. En düşük puan ortalaması -62 ile hacimsel %1 alüminyum lif oranına sahip A4 isimli karışımdadır. Düşük iletken oranlarında betona alüminyum lif katmak elektriksel iletkenlik – birim şekil değiştirme ilişkisini olumlu yönde etkilemiştir.

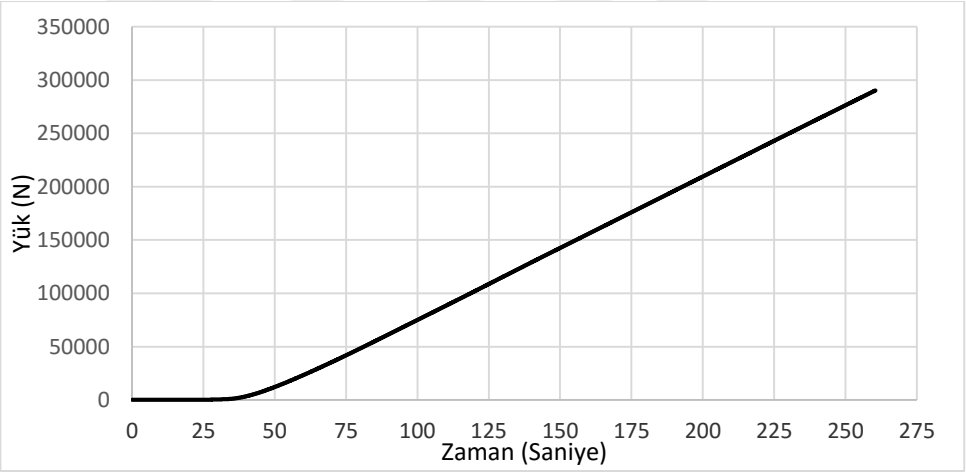


Şekil 3.98 Alüminyum lifli karışımlarda Puan – Hacimsel iletken oranı grafiği

3.4 Pirinç Toz Katkılı Karışımların Analiz Sonuçları

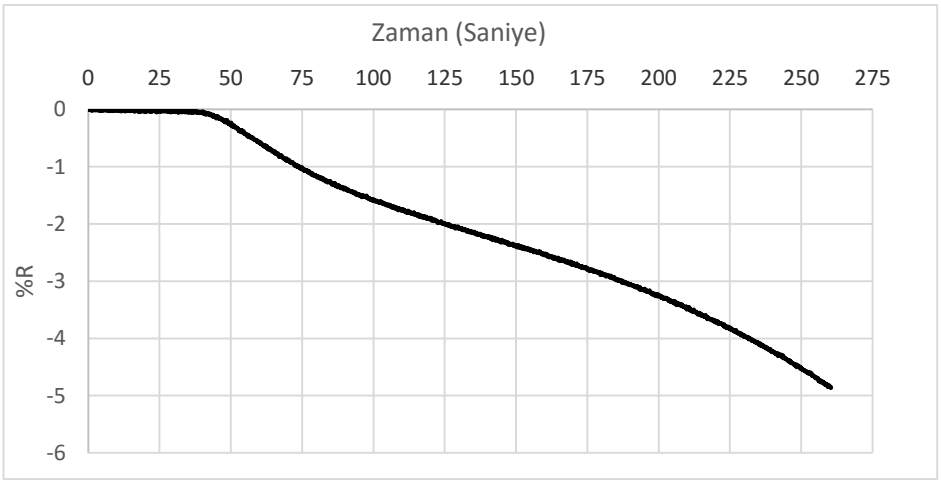
Pirinç tozu kullanılarak, farklı hacimsel oranlara sahip 6 farklı karışım oluşturulmuştur. Her karışımdan 3'er adet 75mm küp dökülmüştür ve test edilmiştir. Bu grup için toplamda 18 adet beton küp örneği test edilip analiz edilmiştir. Oluşturulan karışımların isimleri ve sahip olduğu pirinç tozu miktarları Tablo 2.4'te sunulmuştur.

Şekil 3.99'te hacimce %0,35 oranında pirinç toz içeren Brp1 isimli karışımın yük – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde örneğin 40. saniyeden sonra yük almaya başladığı görülmektedir. Bu zaman sürecinde örnek ile başlık arasında kalan pürüzler ve kusurlar ezilmektedir. Deney 290 kN olan maksimum yüke kadar devam etmiştir. Grupta bulunan bütün örnekler 290kN yük altında dayanımını korumuştur.



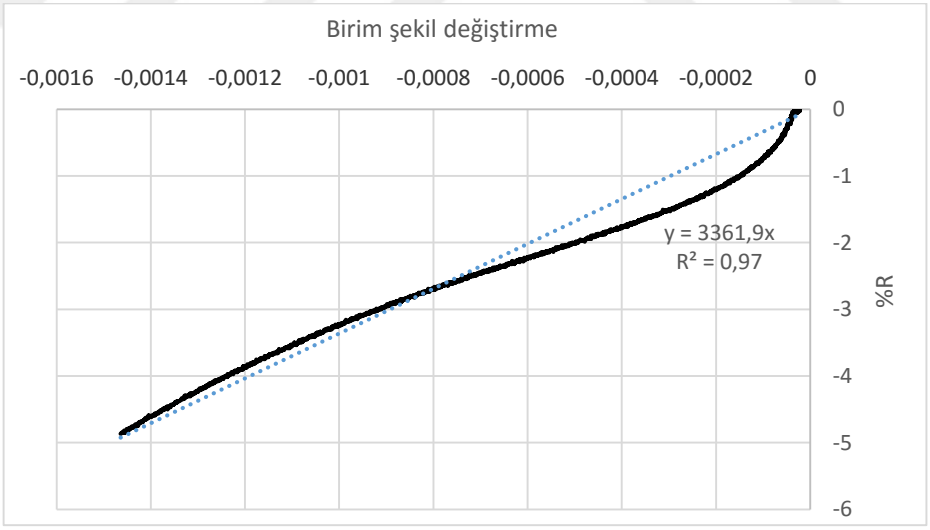
Şekil 3.99 Brp1 (%0,35) isimli karışımın yük - zaman grafiği

Şekil 3.100'de hacimce %0,35 oranında pirinç toz içeren Brp1 isimli karışımın %R – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde deney süresince artan basınç yükü etkisiyle elektriksel dirençte düşme meydana gelmiştir. Mikro boşlukların kapanması ve lif boyu kısalması nedeniyle elektron ve iyon akışı artmış, elektriksel direnç azalmıştır.



Şekil 3.100 Brp1 (%0,35) isimli karışımın %R - zaman grafiği

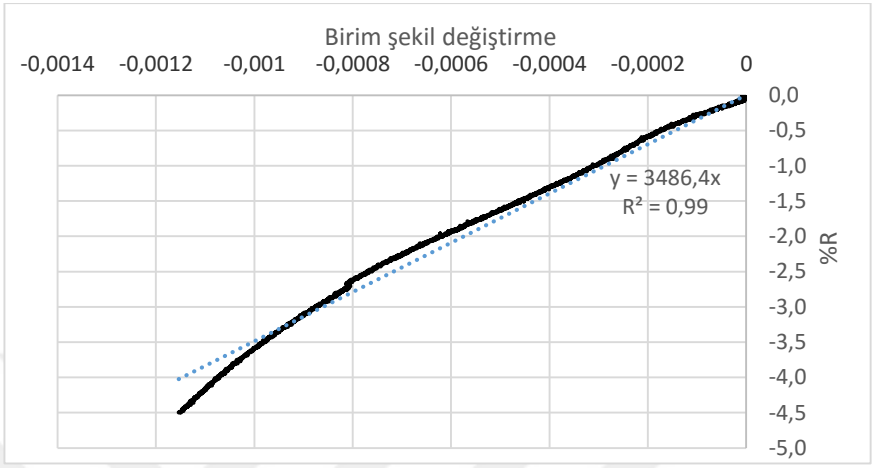
Şekil 3.101'de hacimce %0,35 oranında pirinç toz içeren Brp1 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Brp1 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 33 olarak ölçülmüştür. Brp1 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 16 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %11, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0014 ve korelasyon katsayısı R^2=0,97 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.101 Brp1 (%0,35) isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği (K=33, LE=11, R^2 = 0,97, SL=0,0014)

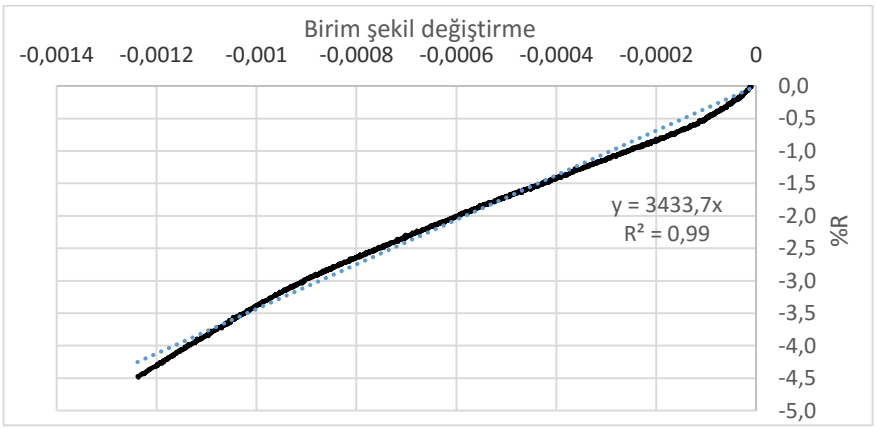
Şekil 3.102'de hacimce %0,5 oranında pirinç toz içeren Brp2 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Brp2 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 39 olarak ölçülmüştür. Brp2 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil

değiştirmesine 19 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %11, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0011 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



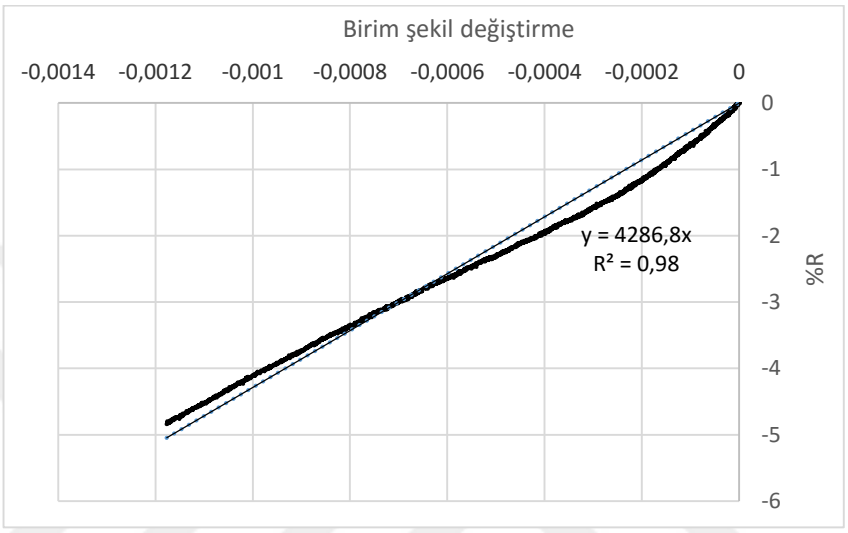
Şekil 3.102 Brp2 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=39, LE=11, R^2 = 0,99, SL=0,0011)

Şekil 3.103'te hacimce %0,8 oranında pirinç toz içeren Brp3 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Brp3 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 36 olarak ölçülmüştür. Brp3 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 18 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %6, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0012 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



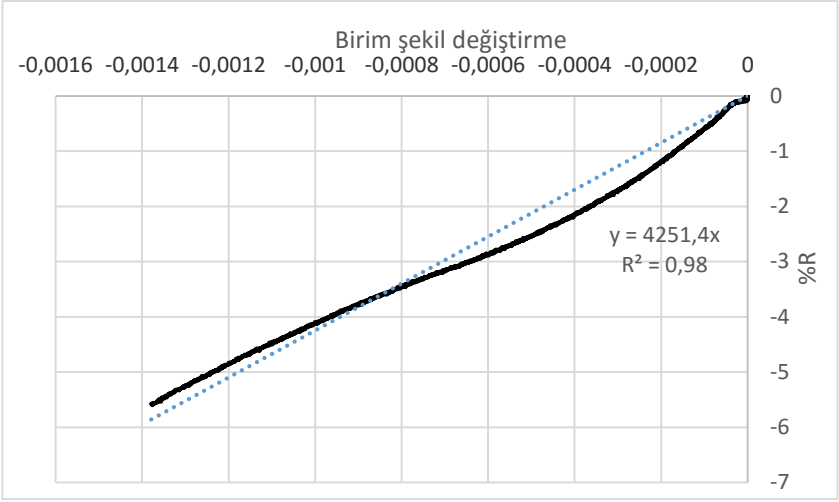
Şekil 3.103 Brp3 (%0,8) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=36, LE=6, R^2 = 0,99, SL=0,0012)

Şekil 3.104'te hacimce %1 oranında pirinç toz içeren Brp4 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Brp4 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 41 olarak ölçülmüştür. Brp4 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 20 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %7, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0011 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur.



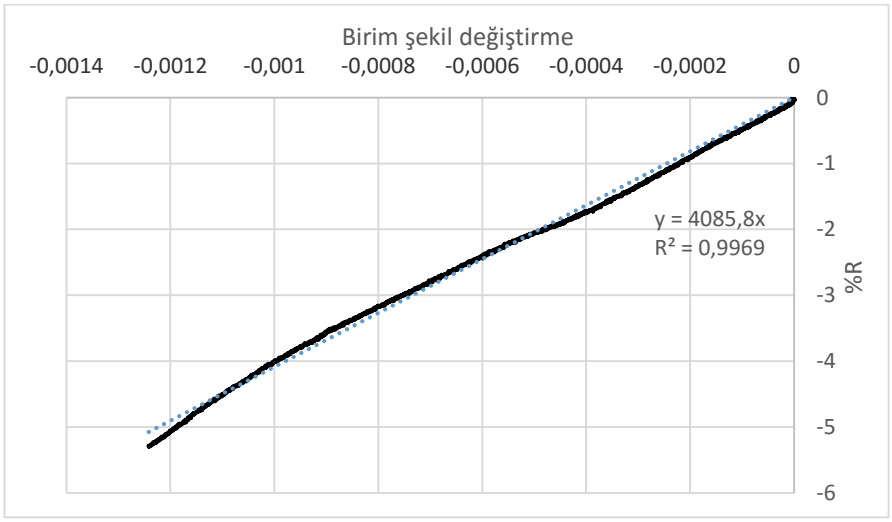
Şekil 3.104 Brp4 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=41, LE=7, $R^2 = 0,99$, SL=0,0011)

Şekil 3.105'te hacimce %1,5 oranında pirinç toz içeren Brp5 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Brp5 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 41 olarak ölçülmüştür. Brp5 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 20 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %9, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0013 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.105 Brp5 (%1,5) isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği(K=41, LE=9, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0013)

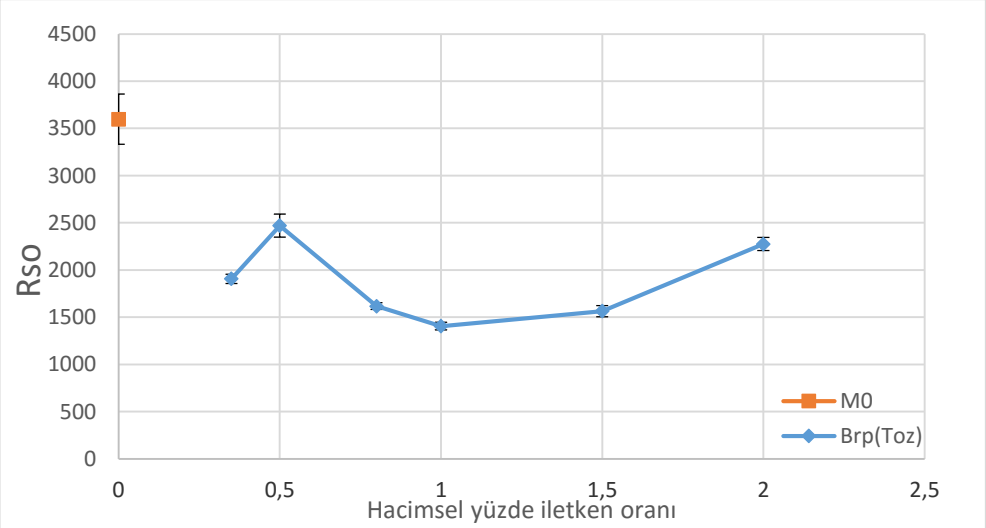
Şekil 3.106'da hacimce %2 oranında pirinç toz içeren Brp6 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Brp6 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 43 olarak ölçülmüştür. Brp6 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 21 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %4, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0012 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



Şekil 3.106 Brp6 (%2) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=43, LE=4, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0012)

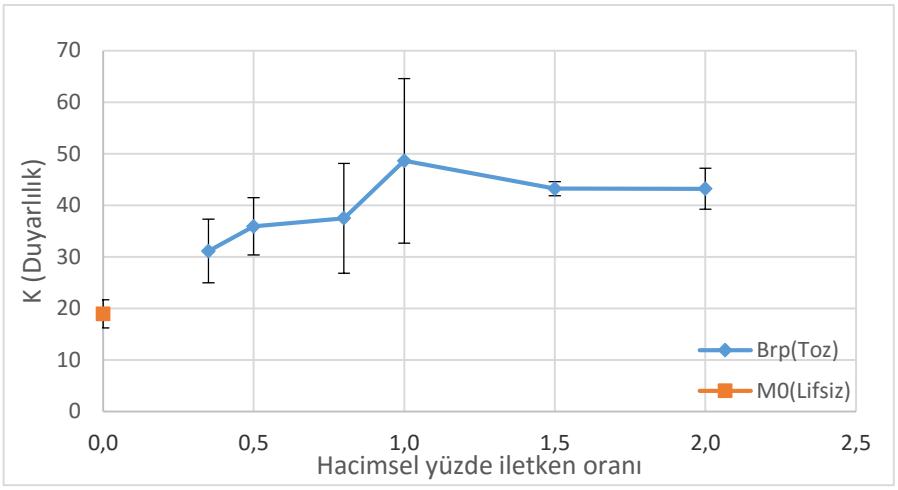
Verilecek grafiklerde her hacim oranı için dökülen 3 karışımın ortalama değerleri görülmektedir. Referans örnek olan M0 ile pirinç toza sahip karışımların analiz sonuçları aşağıda verilmiştir. M0 isimli örneğin hacimsel yüzde iletken oranı %0'dır.

Pirinç tozlu karışımlar için Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği Şekil 3.107'de verilmiştir. Pirinç tozuna sahip karışımlar M0 iletkensiz karışıma göre daha düşük elektriksel dirence sahiptirler. Örneklere pirinç toz katmak elektriksel direnci düşürmüştür. İletkenli örneklerde ortalama Rso hacimsel %0,5 iletken oranında en yüksek değerini almaktadır. Hacimsel %0,5 iletken oranından sonra Rso artan iletken oranıyla bir miktar azalma göstermiştir.



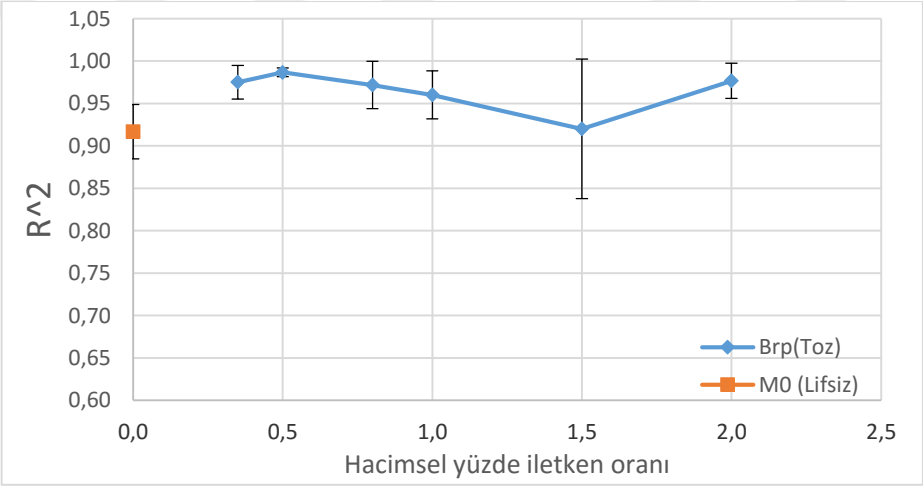
Şekil 3.107 Pirinç tozlu karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.108'de Pirinç tozlu karışımların Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde grupta bulunan bütün karışımların M0(K=19) referans karışımından yüksek duyarlılık ortalamasına sahip olduğu görülmektedir. En yüksek duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=48 ile hacimsel %1 pirinç tozu oranına sahip Brp4 isimli karışımdır. En düşük duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=35 ile hacimsel %0,35 pirinç toz oranına sahip Brp1 isimli karışımdır. Hacimsel %1 iletken oranından sonra maksimum olan duyarlılık ortalaması artan iletken oranıyla azalma göstermektedir.



Şekil 3.108 Pirinç tozlu karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

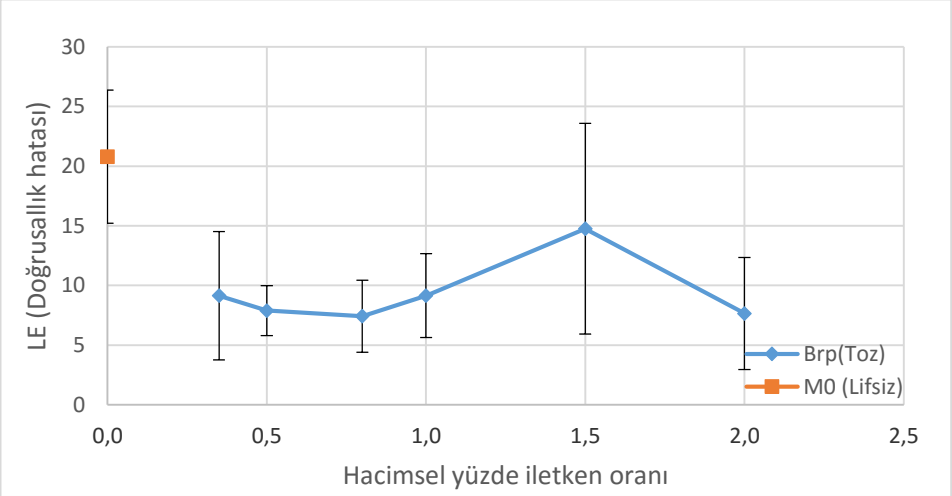
Şekil 3.109'da pirinç tozlu karışımların R^2(Korelasyon katsayısı) – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmektedir. Grafik incelendiğinde pirinç tozlu karışımların korelasyon katsayısı ortalamasının iletkensiz olan M0 referans karışımın ortalamasından yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek R^2 ortalamalarına sahip karışım R^2=0,99 ile hacimsel %0,5 pirinç toz oranına sahip Brp2 isimli karışımdır.



Şekil 3.109 Pirinç tozlu karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

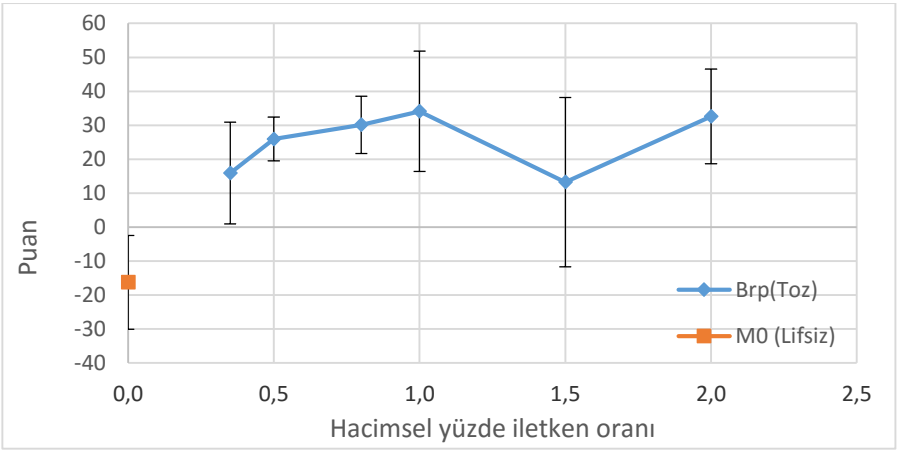
Şekil 3.110'da pirinç tozlu karışımların LE – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. En küçük doğrusallık hatası ortalaması hacimsel %0,8 pirinç toz içeren Brp3 isimli karışımda elde edilmiştir. Brp3 isimli karışımın doğrusallık hatası ortalaması LE=7,42'dir. Doğrusallık hata ortalaması hacimsel 1,5 iletken oranına

sahip karışım dışında %10'un altında kalmıştır. Pirinç tozlu örneklerin sinyal kalitesi yüksektir.



Şekil 3.110 Pirinç tozlu karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği

Şekil 3.111'de pirinç tozlu karışımların Puan - Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Puanlar ikinci bölümde verilen Formül 2.6 ile hesaplanmıştır. Puan ortalamaları incelendiğinde bütün karışımların, M0 referans karışımından daha yüksek puana sahip olduğu görülmektedir. En yüksek puan ortalaması 34 ile hacimsel %1 pirinç toz oranına sahip Brp3 isimli karışımdadır. En düşük puan ortalaması 13 ile hacimsel %1,5 pirinç toz oranına sahip Brp5 isimli karışımdadır. Betona pirinç toz katmak elektriksel iletkenlik – birim şekil değiştirme ilişkisini olumlu yönde etkilemiştir.



Şekil 3.111 Pirinç tozlu karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

3.5 Kömür Toz Katkılı Karışımların Analiz Sonuçları

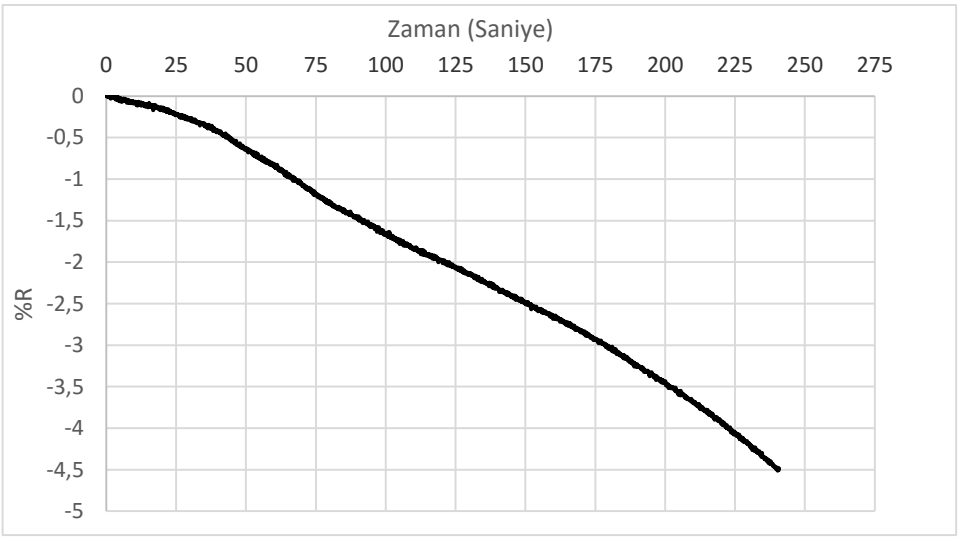
Kömür tozu kullanılarak, farklı hacimsel oranlara sahip 6 farklı karışım oluşturulmuştur. Her karışımdan 3'er adet 75mm küp dökülmüştür ve test edilmiştir. Bu grup için toplamda 18 adet beton küp örneği test edilip analiz edilmiştir. Oluşturulan karışımların isimleri ve sahip olduğu kömür tozu miktarları Tablo 2.4'te sunulmuştur.

Şekil 3.112'de hacimce %0,35 oranında kömür toz içeren K1 isimli karışımın yük – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde örneğin 5. saniyeden sonra yük almaya başladığını görülmektedir. Deney 290 kN olan maksimum yüke kadar devam etmiştir. Grupta bulunan bütün örnekler 290kN yük altında dayanımını korumuştur.



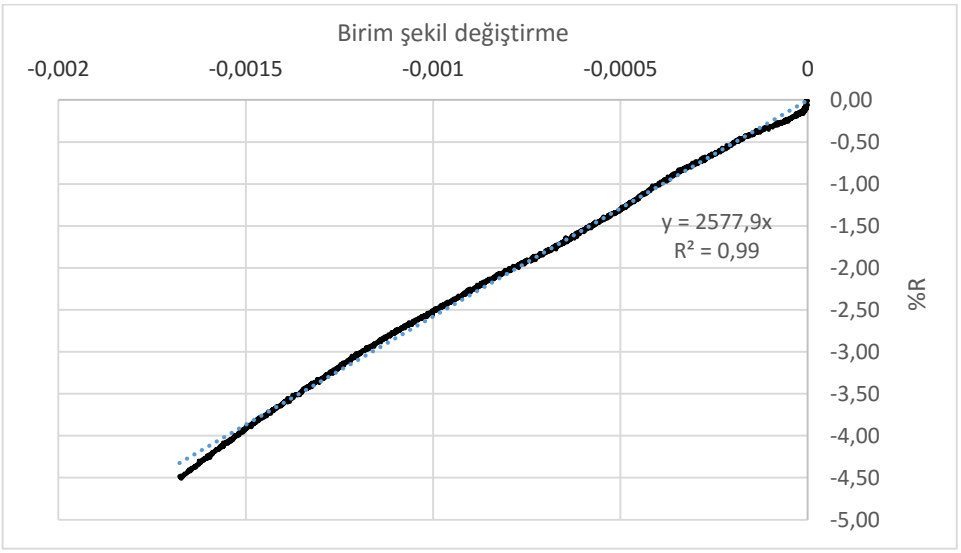
Şekil 3.112 K1 (%0,35) isimli karışımın yük - zaman grafiği

Şekil 3.113'te hacimce %0,35 oranında kömür toz içeren K1 isimli karışımın %R – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde deney süresince artan basınç yükü etkisiyle elektriksel dirençte düşme meydana gelmiştir. Mikro boşlukların kapanması ve lif boyu kısalması nedeniyle elektron ve iyon akışı artmış, elektriksel direnç azalmıştır.



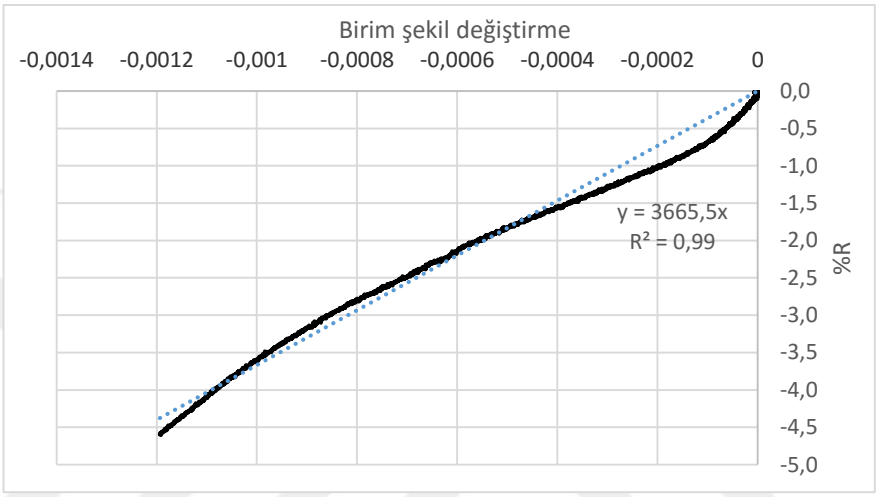
Şekil 3.113 K1 (%0,35) isimli karışımın %R - zaman grafiği

Şekil 3.114'te hacimce %0,35 oranında kömür toz içeren K1 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. K1 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 27 olarak ölçülmüştür. K1 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 13 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %4, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0016 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



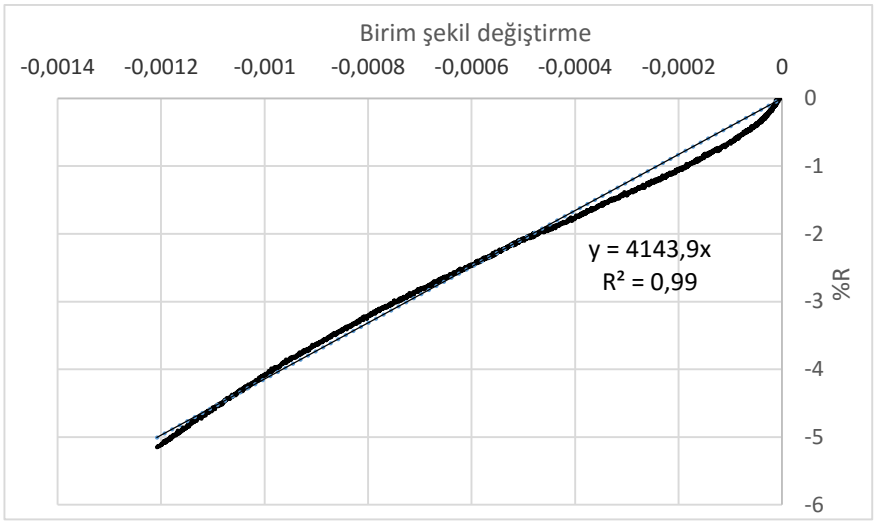
Şekil 3.114 K1 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=27, LE=4, R^2 = 0,99, SL=0,0016)

Şekil 3.115'te hacimce %0,5 oranında kömür toz içeren K2 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. K2 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 38 olarak ölçülmüştür. K2 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 19 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %8, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0012 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



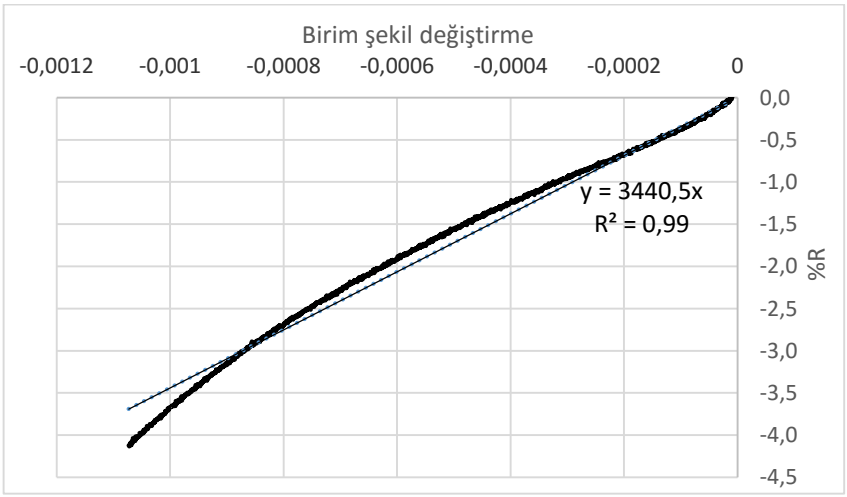
Şekil 3.115 K2 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=38, LE=8, $R^2 = 0,99$, SL=0,0012)

Şekil 3.116'da hacimce %0,8 oranında kömür toz içeren K3 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. K3 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 43 olarak ölçülmüştür. K3 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 21 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %5, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0012 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



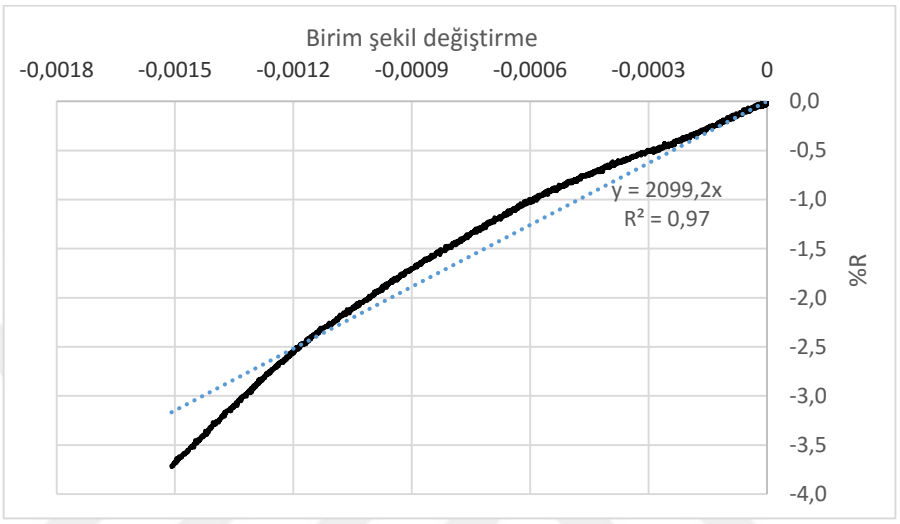
Şekil 3.116 K3 (%0,8) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=43, LE=5, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0012)

Şekil 3.117'de hacimce %1 oranında kömür toz içeren K4 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. K4 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 39 olarak ölçülmüştür. K4 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 19 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %11, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0011 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



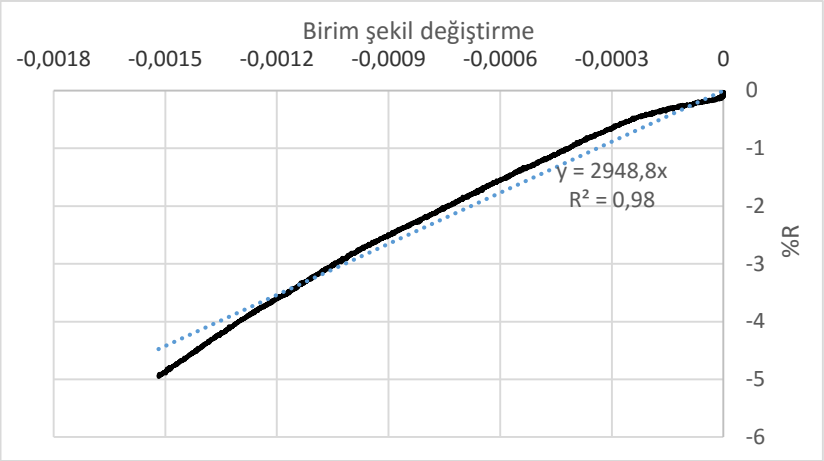
Şekil 3.117 K4 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=39, LE=11, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0011)

Şekil 3.118'de hacimce %1,5 oranında kömür toz içeren K5 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. K5 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 25 olarak ölçülmüştür. K5 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 12 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %15, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0015 ve korelasyon katsayısı R^2=0,97 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.118 K5 (%1,5) isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği (K=25, LE=15, $R^2 = 0,97$, SL=0,0015)

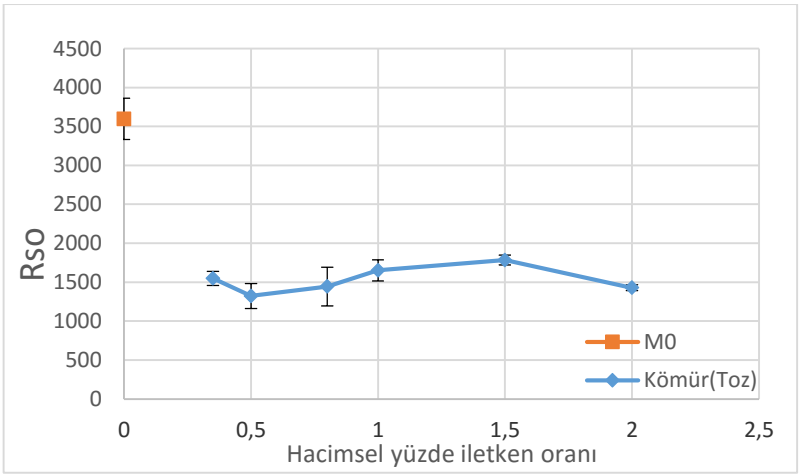
Şekil 3.119'da hacimce %2 oranında kömür toz içeren K6 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. K6 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 33 olarak ölçülmüştür. K6 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 16 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %10, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0015 ve korelasyon katsayısı R^2=0,98 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.119 K6 (%2) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=33, LE=10, $R^2 = 0{,}98$, SL=0,0015)

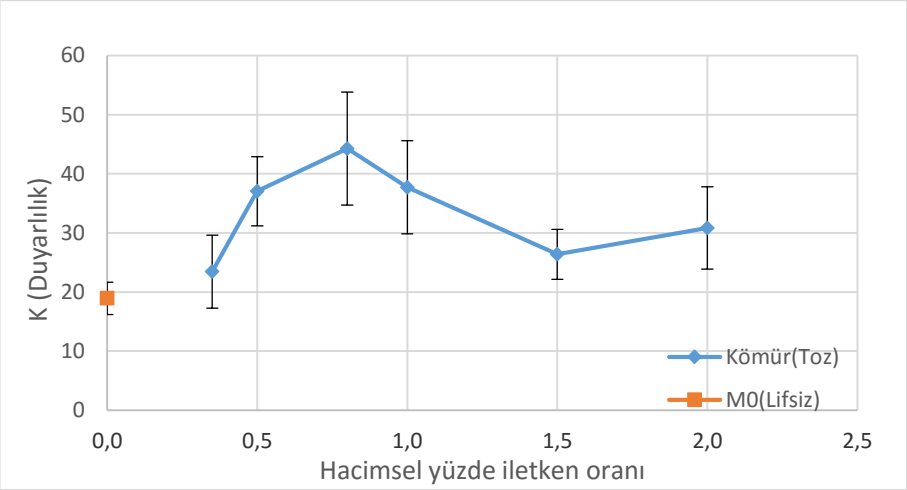
Verilecek grafiklerde her hacim oranı için dökülen 3 karışımın ortalama değerleri görülmektedir. Referans örnek olan M0 ile kömür tozuna sahip karışımların analiz sonuçları aşağıda verilmiştir. M0 isimli örneğin hacimsel yüzde iletken oranı %0'dır.

Kömür tozlu karışımlar için Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği Şekil 3.120'de verilmiştir. Kömür tozuna sahip karışımlar M0 iletkensiz karışıma göre daha düşük elektriksel dirence sahiptirler. Örneklere kömür toz katmak elektriksel direnci düşürmüştür. İletkenli örneklerde ortalama Rso hacimsel %1,5 iletken oranında en yüksek değerini almaktadır. Hacimsel %0,35 iletken oranından hacimsel %2 iletken oranına kadar Rso'da çok büyük bir artış veya azalış görülmemektedir.



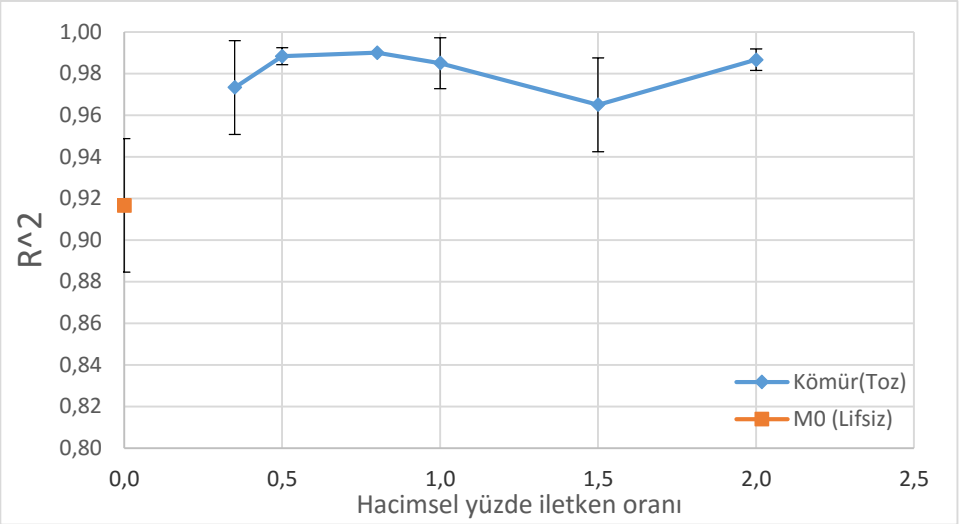
Şekil 3.120 Kömür tozlu karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.121'de kömür tozlu karışımların Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde grupta bulunan bütün karışımların M0(K=19) referans karışımından yüksek duyarlılık ortalamasına sahip olduğu görülmektedir. En yüksek duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=44 ile hacimsel %0,8 kömür tozu oranına sahip K3 isimli karışımdır. En düşük duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=23 ile hacimsel %0,35 kömür toz oranına sahip K1 isimli karışımdır. Hacimsel %0,8 iletken oranından sonra maksimum olan duyarlılık ortalaması artan iletken oranıyla azalma göstermektedir. Betona kömür tozu katmak duyarlılığı artırmıştır.



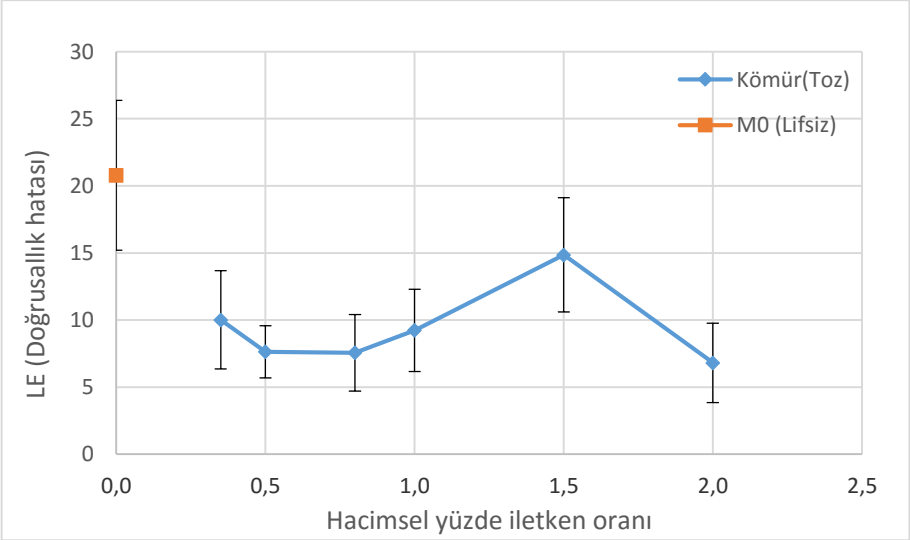
Şekil 3.121 Kömür tozlu karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.122'de kömür tozlu karışımların R^2(Korelasyon katsayısı) – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmektedir. Grafik incelendiğinde kömür tozlu karışımların korelasyon katsayısı ortalamasının iletkensiz olan M0 referans karışımın ortalamasından yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek R^2 ortalamalarına sahip karışımlar R^2=0,99 hacimsel ortalama ile %0,5, %0,8, %1 ve %2 kömür tozu oranına sahip K2, K3, K4 ve K6 isimli karışımlardır.



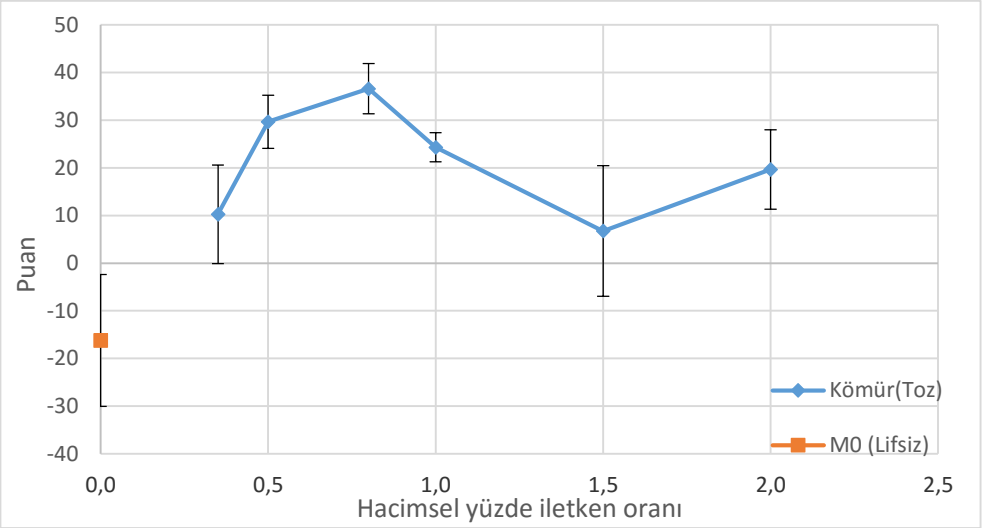
Şekil 3.122 Kömür tozlu karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.123'te kömür tozlu karışımların LE – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde kömür tozlu karışımların doğrusallık hatası ortalamasının iletkensiz olan M0 referans karışımın ortalamasından düşük olduğu görülmektedir. En düşük doğrusallık hatası ortalaması hacimsel %0,8 kömür toz içeren K3 isimli karışımda elde edilmiştir. Doğrusallık hata ortalaması hacimsel 1,5 iletken oranına sahip karışım dışında %10'un altında kalmıştır. Kömür tozlu örneklerin sinyal kalitesi çok yüksektir.



Şekil 3.123 Kömür tozlu karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği

Şekil 3.124'te kömür tozlu karışımların Puan - Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Puanlar ikinci bölümde verilen Formül 2.6 ile hesaplanmıştır. Puan ortalamaları incelendiğinde bütün karışımların, M0 referans karışımından daha yüksek puana sahip olduğu görülmektedir. En yüksek puan ortalaması 37 ile hacimsel %0,8 kömür toz oranına sahip K3 isimli karışımdadır. En düşük puan ortalaması 6 ile hacimsel %1,5 kömür toz oranına sahip K5 isimli karışımdadır. Betona kömür tozu katmak elektriksel iletkenlik – birim şekil değiştirme ilişkisini olumlu yönde etkilemiştir.

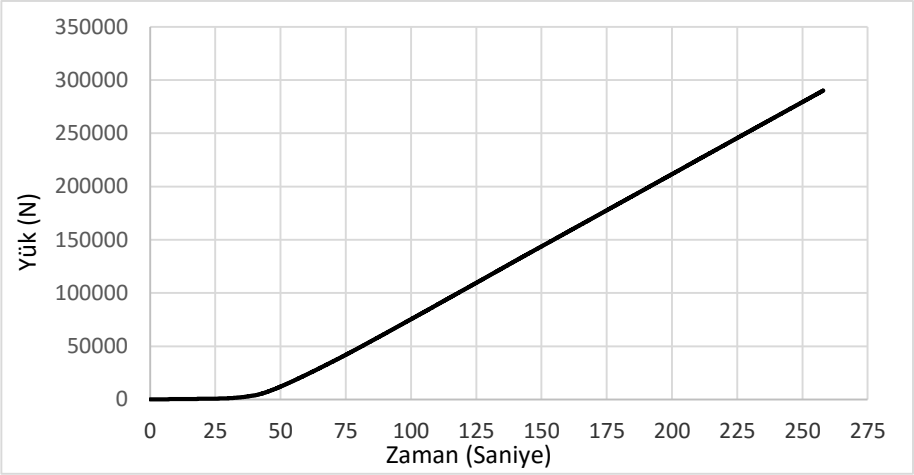


Şekil 3.124 Kömür tozlu karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

3.6 Tufal Katkılı Karışımların Analiz Sonuçları

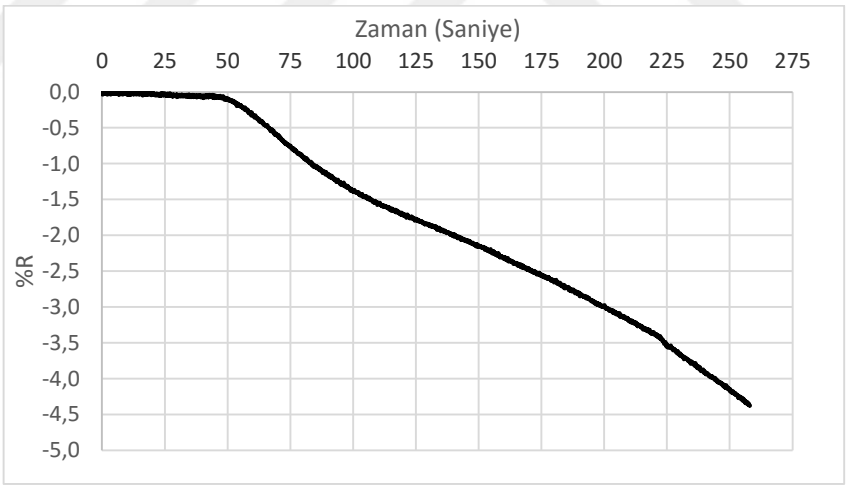
Tufal kullanılarak, farklı hacimsel oranlara sahip 6 farklı karışım oluşturulmuştur. Her karışımdan 3'er adet 75mm küp dökülmüştür ve test edilmiştir. Bu grup için toplamda 18 adet beton küp örneği test edilip analiz edilmiştir. Oluşturulan karışımların isimleri ve sahip olduğu tufal miktarları Tablo 2.4'te sunulmuştur.

Şekil 3.125'te hacimce %0,2 oranında tufal içeren T1 isimli karışımın yük – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde örneğin 30. saniyeden sonra yük almaya başladığı görülmektedir. Bu zaman sürecinde örnek ile başlık arasında kalan pürüzler ve kusurlar ezilmektedir. Deney 290 kN olan maksimum yüke kadar devam etmiştir. Grupta bulunan bütün örnekler 290kN yük altında dayanımını korumuştur.



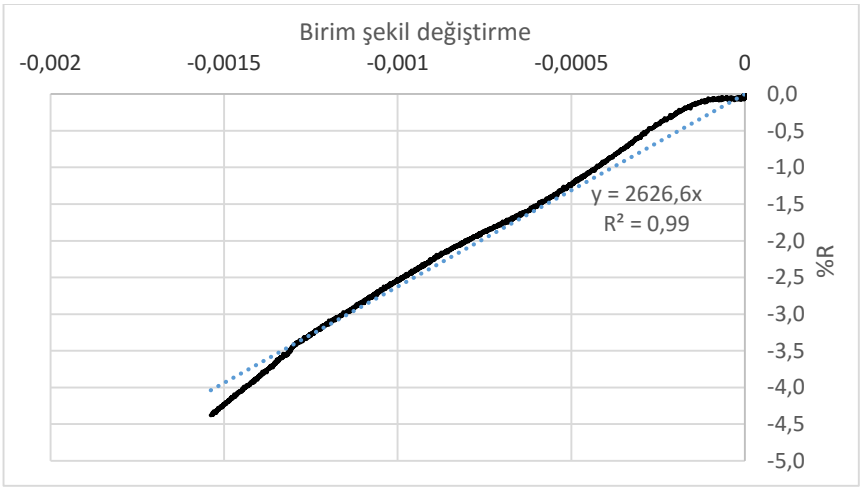
Şekil 3.125 T1 (%0,2) isimli karışımın yük - zaman grafiği

Şekil 3.126'da hacimce %0,2 oranında tufal içeren T1 isimli karışımın %R – zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde deney süresince artan basınç yükü etkisiyle elektriksel dirençte düşme meydana gelmiştir. Mikro boşlukların kapanması ve lif boyu kısalması nedeniyle elektron ve iyon akışı artmış, elektriksel direnç azalmıştır.



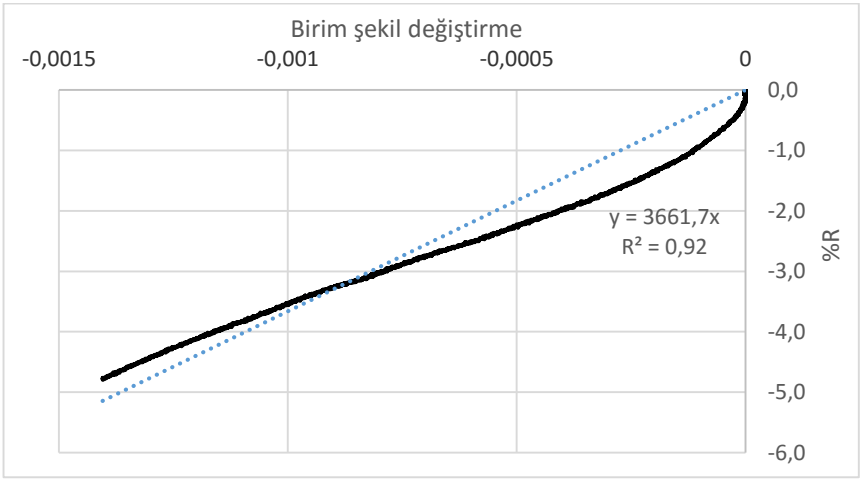
Şekil 3.126 T1 (%0,2) isimli karışımın %R - zaman grafiği

Şekil 3.127'de hacimce %0,2 oranında tufal içeren T1 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. T1 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 28 olarak ölçülmüştür. T1 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 14 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %8, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0015 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



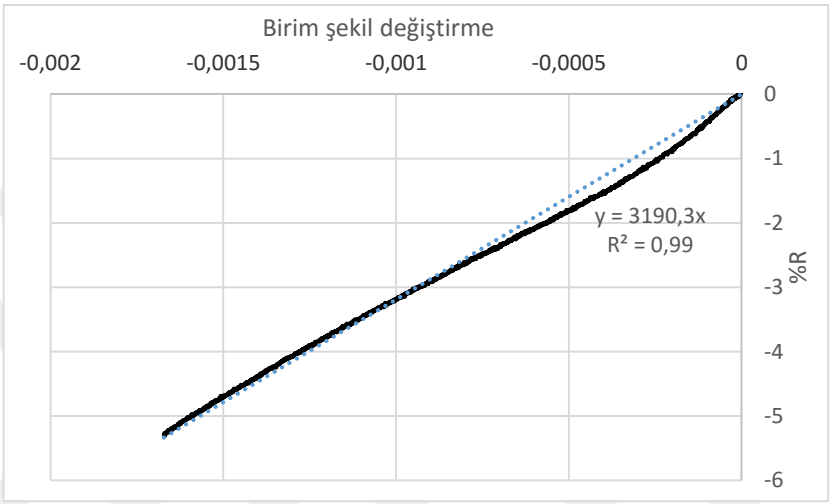
Şekil 3.127 T1 (%0,2) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=28, LE=8, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0015)

Şekil 3.128'de hacimce %0,35 oranında tufal içeren T2 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. T2 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 34 olarak ölçülmüştür. T2 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 17 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %14, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0014 ve korelasyon katsayısı R^2=0,92 olarak bulunmuştur.



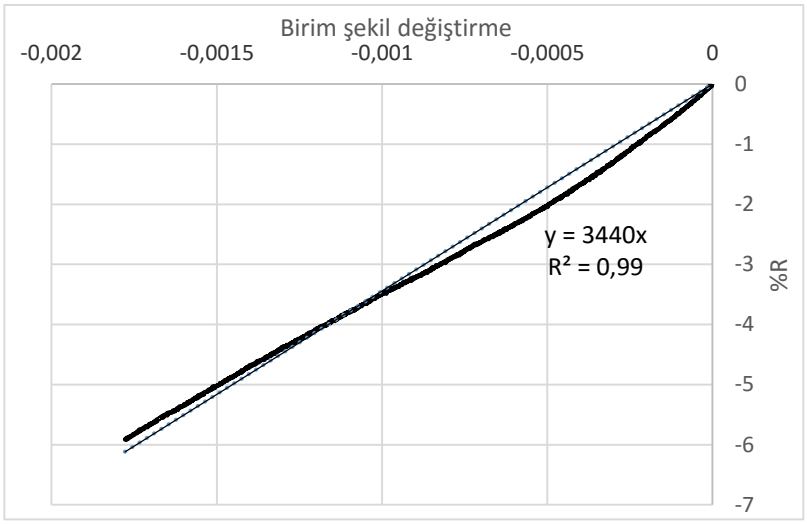
Şekil 3.128 T2 (%0,35) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=34, LE=14, $R^2 = 0{,}92$, SL=0,0014)

Şekil 3.129'da hacimce %0,5 oranında tufal içeren T3 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. T3 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 32 olarak ölçülmüştür. T3 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 16 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %5, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0016 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



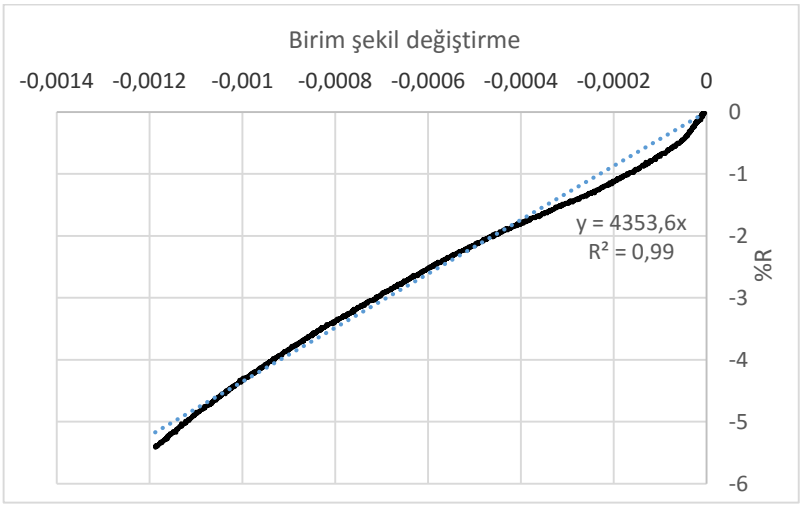
Şekil 3.129 T3 (%0,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=32, LE=5, $R^2 = 0,99$, SL=0,0016)

Şekil 3.130'da hacimce %0,8 oranında tufal içeren T4 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. T4 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 33 olarak ölçülmüştür. T4 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 16 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %6, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0017 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



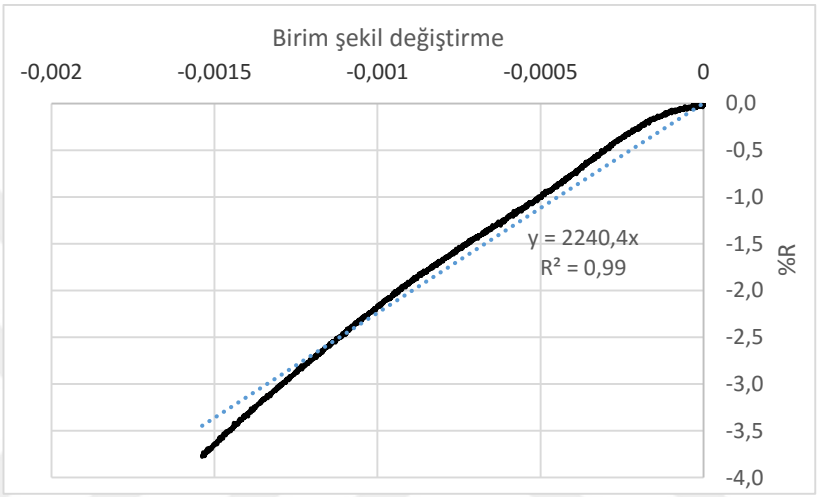
Şekil 3.130 T4 (%0,8) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=33, LE=6, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0017)

Şekil 3.131'de hacimce %1 oranında tufal içeren T5 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. T5 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 46 olarak ölçülmüştür. T5 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 23 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %6, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0011 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



Şekil 3.131 T5 (%1) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=46, LE=6, $R^2 = 0{,}99$, SL=0,0011)

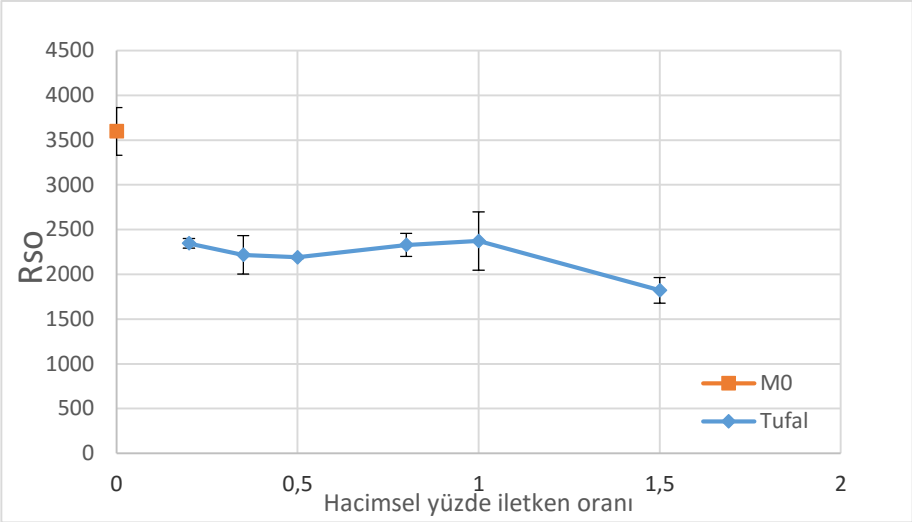
Şekil 3.132'de hacimce %1,5 oranında tufal içeren T6 isimli karışımın %R - birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. T6 isimli karışıma ait duyarlılık değeri K= 25 olarak ölçülmüştür. T6 tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine 12 kat daha duyarlıdır. Doğrusallık değeri %9, limit birim şekil değiştirmesi (SL) 0,0015 ve korelasyon katsayısı R^2=0,99 olarak bulunmuştur. %R ile birim şekil değiştirme arasında güçlü bir korelasyon vardır.



Şekil 3.132 T6 (%1,5) isimli karışımın %R – birim şekil değiştirme grafiği (K=25, LE=9, R^2 = 0,99, SL=0,0015)

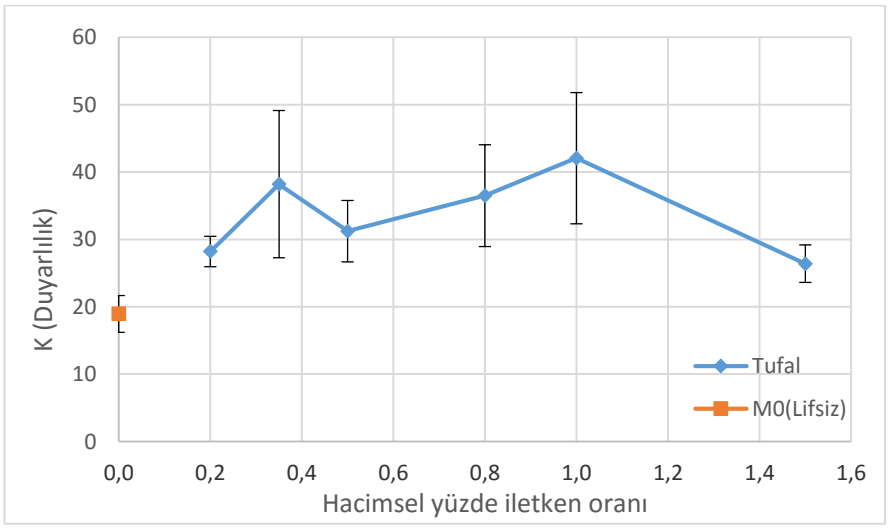
Verilecek grafiklerde her hacim oranı için dökülen 3 karışımın ortalama değerleri görülmektedir. Referans örnek olan M0 ile tufalli karışımların analiz sonuçları aşağıda verilmiştir. M0 isimli örneğin hacimsel yüzde iletken oranı %0'dır.

Tufalli karışımlar için Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği Şekil 3.133'te verilmiştir. Tufale sahip karışımlar M0 iletkensiz karışıma göre daha düşük elektriksel dirence sahiptirler. Örneklere tufal katmak elektriksel direnci düşürmüştür. Hacimsel %0,2 iletken oranından hacimsel %1 iletken oranına kadar Rso'da çok büyük bir artış veya azalış görülmemektedir. Hacimsel %1 iletken oranından sonra Rso artan iletken oranıyla bir miktar azalma göstermiştir.



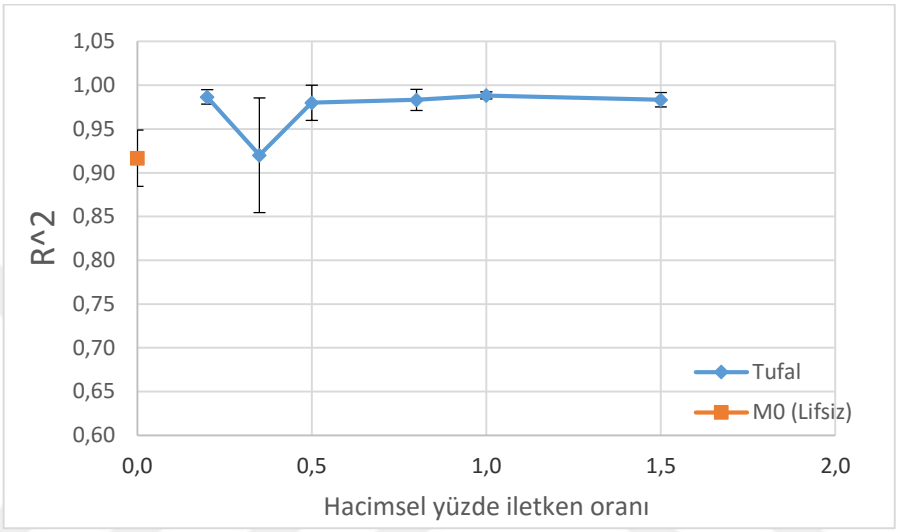
Şekil 3.133 Tufalli karışımlarda Rso – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.134'te Tufalli karışımların Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde grupta bulunan bütün karışımların M0(K=19) referans karışımından yüksek duyarlılık ortalamasına sahip olduğu görülmektedir. En yüksek duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=42 ile hacimsel %1 tufal oranına sahip T5 isimli karışımdır. En düşük duyarlılık ortalamasına sahip karışım K=26 ile hacimsel %1,5 tufal oranına sahip T6 isimli karışımdır. Betona tufal iletkeni katmak betonun duyarlılığını olumlu yönde etkilemiştir.



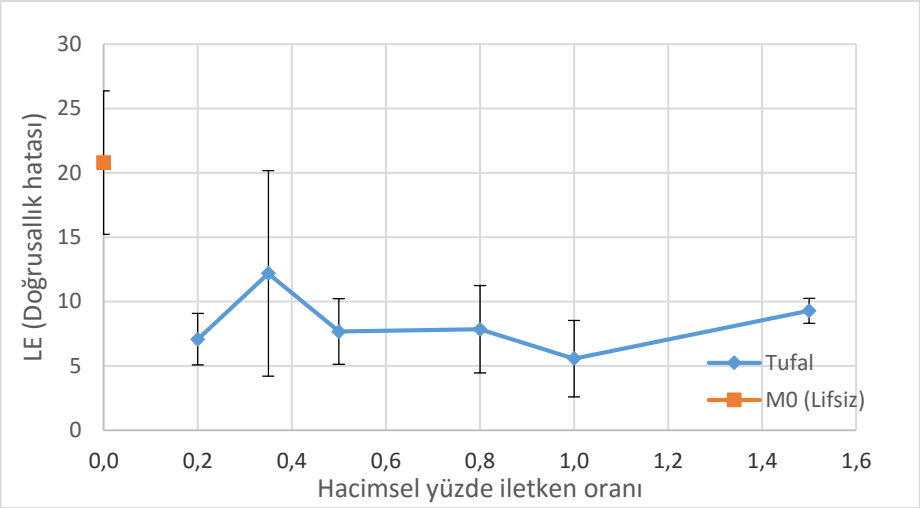
Şekil 3.134 Tufalli karışımlarda Duyarlılık – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.135'te tufalli karışımların R^2(Korelasyon katsayısı) – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmektedir. Grafik incelendiğinde tufalli karışımların korelasyon katsayısı ortalamasının iletkensiz olan M0 referans karışımın ortalamasından yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek R^2 ortalamalarına sahip karışımlar R^2=0,99 ile hacimsel %0,2 tufal oranına sahip T1 ve hacimsel %1 tufal oranına sahip T5 isimli karışımlardır.



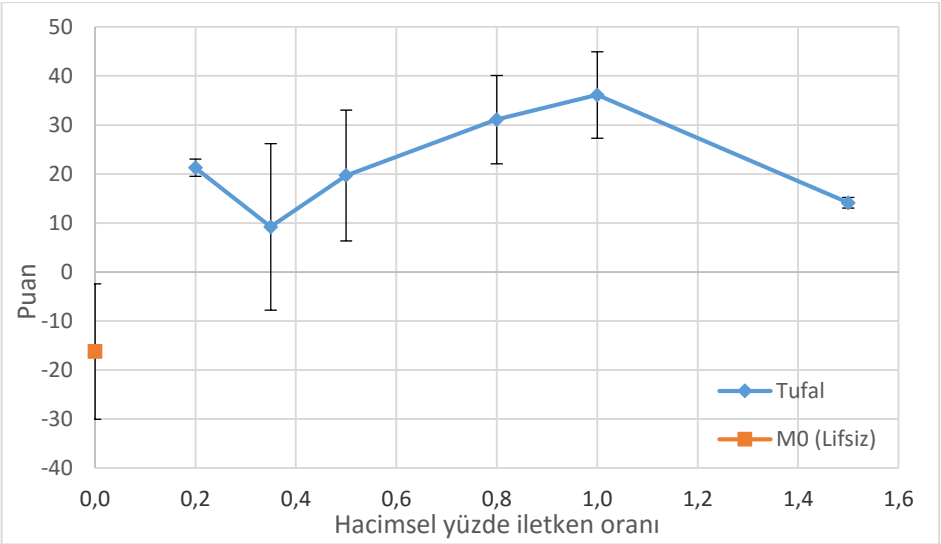
Şekil 3.135 Tufalli karışımlarda R^2 – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.136'da tufalli karışımların LE – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. En küçük doğrusallık hatası ortalaması hacimsel %1 tufal içeren T5 isimli karışımda elde edilmiştir. Doğrusallık hata ortalaması hacimsel %0,35 iletken oranına sahip karışım dışında %10'un altında kalmıştır. Tufalli örneklerin sinyal kalitesi çok yüksektir.



Şekil 3.136 Tufalli karışımlarda LE – Hacimsel iletken oranı grafiği

Şekil 3.137'de tufalli karışımların Puan - Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği verilmiştir. Puanlar ikinci bölümde verilen Formül 2.6 ile hesaplanmıştır. Puan ortalamaları incelendiğinde bütün karışımların, M0 referans karışımından daha yüksek puana sahip olduğu görülmektedir. En yüksek puan ortalaması 36 ile hacimsel %1 tufal oranına sahip T5 isimli karışımdadır. En düşük puan ortalaması 9 ile hacimsel %0,35 tufal oranına sahip T2 isimli karışımdadır. Betona tufal katmak elektriksel iletkenlik – birim şekil değiştirme ilişkisini olumlu yönde etkilemiştir.

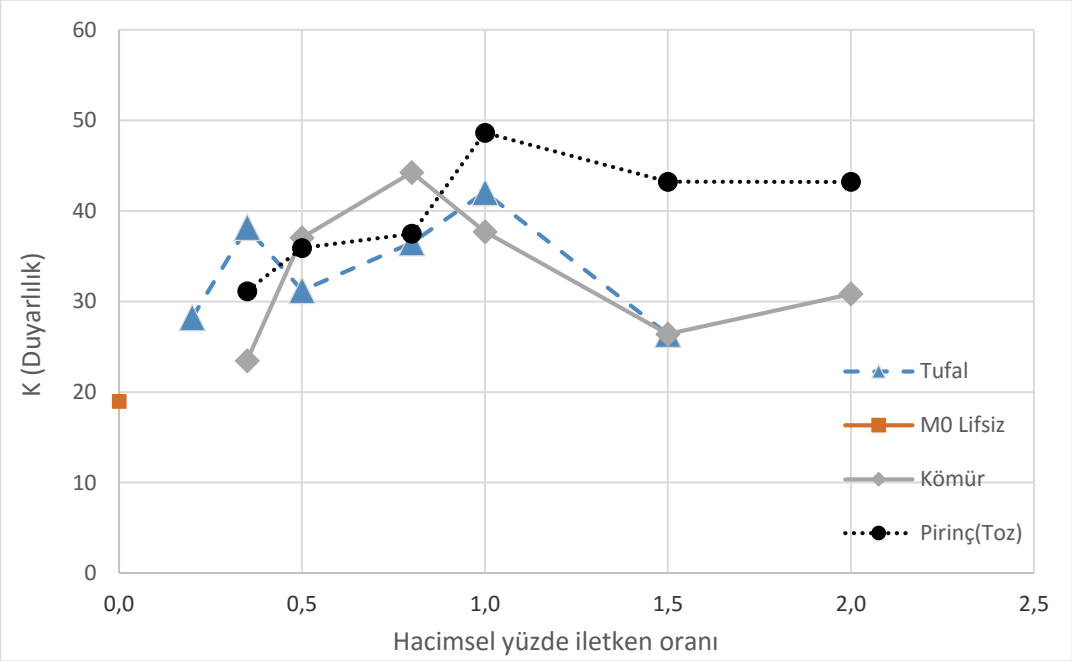


Şekil 3.137 Tufalli karışımlarda Puan – Hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

3.7. En İyi Üç Karışımın Değerlendirilmesi

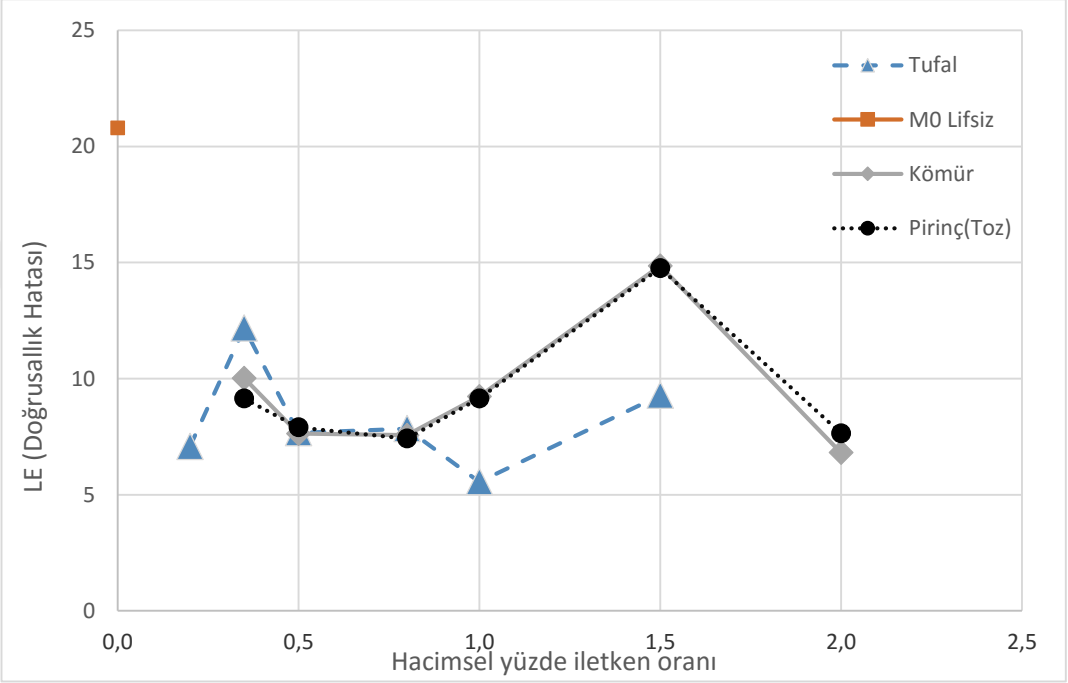
Analizler sonucunda 10 karışım grubu içinden en iyi sinyal kalitesi ve puan ortalaması tufal, kömür ve pirinç tozlu karışım gruplarından elde edilmiştir. Bu bölümde bu üç karışımın duyarlılık, doğrusallık hatası ve puan grafikleri karşılaştırılacaktır.

Şekil 3.138'de tufal, kömür, pirinç tozlu 3 iletken grubunun duyarlılık - hacimsel yüzde iletken oranı grafikleri verilmiştir. Üç karışım içinden en yüksek duyarlılık, hacimsel %1 iletken oranında pirinç tozlu örnekte elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde karışım gruplarının hacimsel %0,8 ile %1 iletken oranı değerinde en yüksek duyarlılık değerini verdiği görülmektedir.



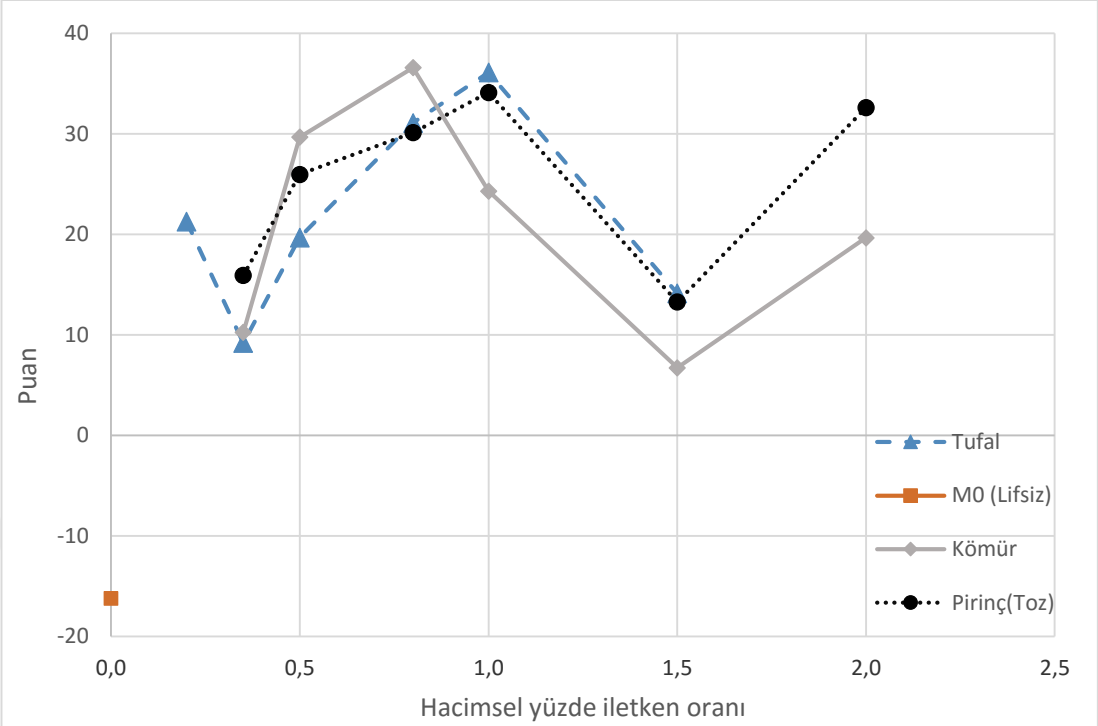
Şekil 3.138 Tufalli, kömür tozlu ,pirinç tozlu ve lifsiz karışımların duyarlılık – hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.139'da tufal, kömür, pirinç tozlu 3 iletken grubunun doğrusallık hatası – hacimsel yüzde iletken oranı grafikleri verilmiştir. Üç karışım içinden en düşük doğrusallık hatası, hacimsel %1 iletken oranında tufalli örnekte elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde karışım gruplarının hacimsel %0,5 ile %1 iletken oranı değerinde en düşük doğrusallık hatası değerini verdiği görülmektedir.



Şekil 3.139 Tufalli, kömür tozlu ,pirinç tozlu ve lifsiz karışımların doğrusallık hatası – hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

Şekil 3.140'ta tufal, kömür, pirinç tozlu 3 iletken grubunun puan grafikleri verilmiştir. Üç karışım içinden en yüksek puan değeri hacimsel %0,8 iletken oranında kömür tozlu örnekte elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde karışım gruplarının hacimsel %0,8 ile %1 iletken oranı değerinde en iyi puan değerini verdiği görülmektedir. Düşük iletken oranında beton matrisi içinde yeterli miktarda iletken – iletken ve iletken - matris iletim hattı oluşmamıştır. Bu durum sinyal kalitesi ve puanlarda düşme yaratmıştır. Yüksek iletken oranlarında ise beton matrisi içinde oluşan iletken – iletken ve iletken - matris iletim hatları miktarı artar. Bu sebepten dolayı birim şekil değiştirme daha az iletken – iletken ve iletken - matris iletim hattını koparabilir. Grafiktede görüldüğü gibi bu üç karışım için en ideal oranlar hacimsel %0,8 ile %1 iletken oranlarıdır.



Şekil 3.140 Tufalli, kömür tozlu ,pirinç tozlu ve lifsiz karışımların puan – hacimsel yüzde iletken oranı grafiği

BÖLÜM DÖRT
SONUÇLAR

Çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler bu bölümde sunulmuştur. Çalışma kapasamında değerlendirilen lifsiz, bakır lifli 7, bakır tozlu 6, 3mm karbon lifli 5, 6mm karbon lifli 5, 13mm karbon lifli 5, alüminyum tozlu 6, alüminyum lifli 6, pirinç tozlu 6, kömür tozlu 6, tufalli 6 toplamda 59 adet karışım grubunda her bir karışım için 3 adet 75mm boyutlu küp örnekler döküldü ve test edildi. Toplamda 177 örnek döküldü, test edildi ve analizleri yapılıp grafiklere işlendi. Basınç testinde örneklerin elektriksel dirençlerindeki değişim ile basınç birim şekil değiştirmeleri eş zamanlı olarak ölçüldü. Test sonuçlarının analizinden elde edilen duyarlılık, doğrusallık hatası, limit birim şekil değiştirme ve korelasyon katsayısı gibi örneklerin karakteristik özelliklerinden her bir örneğin puanı hesaplandı. Grupların ortalaması alınarak lifsiz olan M0 isimli referans karışım ile Rso, duyarlılık, doğrusallık hatası ve korelasyon katsayısı değerleri karşılaştırıldı. Tez kapsamında elde edilen bilgiler ve sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Beton sınıfına giren, içinde 5-15 mm arası agrega içeren çimentolu kompozitlerde sunulan basınç testleri ilk defa bu çalışmada yapılmıştır.

Basınç birim şekil değiştirmesi ile oluşan iletken kısalması, iletken-iletken, matris-iletken ara yüzeylerinin temas alanının artması ve mikro boşlukların kapanması nedenleriyle elektriksel direncin düştüğü gözlemlendi.

İletkenli karışımlar, tipik metal gerinim pullarına göre basınç birim şekil değiştirmesine daha duyarlıdırlar.

İletkenli karışımların elektriksel direnç değişimi- birim şekil değiştirme ilişkilerinin çok güçlü doğrusal ilişkiler olduğu tespit edildi.

Betona alüminyum tozu katmak betonun içinde kimyasal bir tepkimeye neden olmaktadır. Bu tepkime sonucu oluşan boşluklar betonun dayanımını düşürmektedir.

Ayrıca betona yüksek hacim oranında (%2) bakır tozu katmak betonun dayanımında düşmeye sebep olmaktadır.

Betona bakır tozu, bakır lifi , 3mm ,6mm ,13mm boylarında karbon lif, alüminyum toz, alüminyum lif, kömür tozu, tufal ve pirinç lifi katmak betonun elektriksel direncini düşürmektedir.

Betona 3mm karbon, 13mm karbon, tufal, pirinç tozu ve kömür tozu katmak test edilen hacim oranlarında beton örneklerinin duyarlılığında iletkensiz karışıma göre artmaya sebep olmuştur. Beton harcına bakır tozu katmak %0,2 - %1 ve bakır lifi katmak %0,2 - %0,8 hacim oranı aralığında beton örneklerinin duyarlılığında artmaya sebep olmuştur. 6mm karbonlu örneklerde %0,8 - %1,5 hacim oranlarında beton örneklerinin duyarlılıklarında artış görülmüştür. Alüminyumlu örneklerde, betona alüminyum tozu katmak %0,35 - %0,5 hacim oranı aralığında duyarlılığı arttırmıştır. Betona alüminyum lif katmak ise %0,35 - %1 hacim oranı aralığında beton örneklerinin duyarlılığını artırmıştır.

Betona 6mm karbon, bakır tozu, tufal, pirinç tozu ve kömür tozu katmak test edilen hacim oranlarında elektriksel iletkenlik – birim şekil değiştirme ilişkisini olumlu yönde etkilemektedir. Beton harcına bakır lifi katmak %0,2 - %1,5 hacim oranı aralığında elektriksel iletkenlik – birim şekil değiştirme ilişkisini olumlu yönde etkilemektedir. Betona 3mm ve 13mm karbon lif katmak %0,35-%1 hacim oranlarında elektriksel iletkenlik – birim şekil değiştirme ilişkisini olumlu yönde etkilemektedir. Alüminyum iletkenli örneklerde, %0,35-%0,8 hacim oranı aralığında elektriksel iletkenlik – birim şekil değiştirme ilişkisini olumlu yönde etkilenmektedir.

Analizler sonucunda 10 karışım grubu içinden en iyi sinyal kalitesi ve puan ortalaması tufal, kömür ve pirinç tozlu karışım gruplarından elde edilmiştir. Üç karışım için en ideal oranlar hacimsel %0,8 ile %1 iletken oranlarıdır.

İletkenli betonun basınç birim şekil değiştirme- elektriksel direnç ilişkisi güçlü doğrusal ilişki göstermektedir. Yapıların taşıyıcı ve yardımcı elemanlarında kullanılabilecek bu beton teknolojisinin metal gerinim pullarına göre daha sağlıklı ve uzun vadede sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Metal gerinim pulları yapının ya da elemanın yüzeyinden ölçüm alırlar. Akıllı beton karışımlarıyla dökülecek olan yapı elemanlarının direk kendisinden ölçüm alınabilecektir. Bu sayede yapı sağlığının izlenmesi daha kolay ve etkili bir şekilde yapılabilecektir. Bu tez kapsamında üretilen ve test edilen örnekler, kendi hasarını ve birim şekil değiştirmesini ölçen akıllı betonun geliştirilmesi için önemli bir adımdır.

KAYNAKLAR

Banthia, N. (2009). Fiber reinforced concrete for sustainable and ıntelligent ınfrastructure, in: *First International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries*, Algeria, 337–350.

Chen, B. ve Liu, J. (2008). Damage in carbon fiber –reinforced concrete, monitored by both electrical resistance measurement and acoustic emission analysis. *Construction and Building Materials*, *22*, 2196-2201.

Chiarello, M. ve Zinno, R. (2005). Electrical conductivity of self-monitoring CFRC. *Cement and Concrete Composites*, *27*, 463-469.

Chung, D.D.L. (2000). Cement reinforced with short carbon fibers a multi functional material. *Composites Part B: Engineering*, *31*, 511-526.

Chung, D.D.L. (2001). Review functional properties of cement –matrix composites. *Journal of Material Science, 36*, 1315-1324.

Han, B., Guan, X., Ou, J. (2007). Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors. *Sensors and Actuators: A, 135*, 360-369.

Li, H., Xiao, H. ve Ou, J. (2006). Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon blackfilled cement based composites. *Cement and Concrete Composites*, *28*, 824-828.

Li, H., Xiao, H. Ve Ou, J. (2008). Electrical property of cement-based composites filled with carbon black under long-term wet and loading condition. *Composites Science and Technology*, *68*, 2114-2119.

Ou, J. ve Li,H. (2010). Structural health monitoring in mainland China: review and future trends. *Structural Health Monitoring, 9*(3), 219– 231.

Ou, J. ve Han, B. (2009). Piezoresistive cement-based strain sensors and self-sensing concrete components. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 20*(3), 329–336.

Reza, F., Batson, G.B., Yamamuro, J.A. ve Lee, J.S. (2003). Resistance changes during compression of carbon fiber cement composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *15*(5), 476-483.

Teomete, E. (2013). Relations of crack length and electrical resistance for smart cement based composites. *Cement Wapno Beton*, *6*, 329-334.

Teomete, E. (2014). Transverse strain sensitivity of steel fiber reinforced cement composites tested by compression and split tensile tests. *Construction and Building Materials*, *55*, 136‑145.

Teomete, E. ve Erdem, T.K. (2011). Cement based strain sensor: A step to smart concrete. *Cement Wapno Beton*, *2*, 78-91.

Teomete, E. ve Kocyigit, O.I. (2015). Tensile strain sensitivity of steel fiber reinforced cement matrix composites tested by split tensile test. *Construction and Building Materials*, *47*, 962–968.

EKLER

Tablo1: Karışımların performans ve puan değerleri

Karışım	İletken	İletken oranı (%)	Duyarlılık (K)	Doğrusallık Hatası (LE)	Korelasyon Katsayısı (R^2)	Puan
M0	Lifsiz	0,00	18,94	20,79	0,92	-16,22
Co7	Bakır lif	0,20	39,72	8,40	0,98	30,33
Co8	Bakır lif	0,35	38,05	5,57	0,99	28,66
Co1	Bakır lif	0,50	25,21	14,77	0,97	5,33
Co9	Bakır lif	0,80	32,22	7,50	0,99	23,25
Co2	Bakır lif	1,00	18,67	14,05	0,96	-1,60
Co10	Bakır lif	1,50	33,61	9,64	0,97	16,48
Co3	Bakır lif	2,00	16,24	20,66	0,92	-24,00
Cop4	Bakır toz	0,20	43,59	6,79	0,98	34,07
Cop5	Bakır toz	0,35	44,51	6,65	0,98	36,09
Cop1	Bakır toz	0,50	30,42	10,30	0,99	19,60
Cop6	Bakır toz	0,80	24,81	19,69	0,94	4,41
Cop2	Bakır toz	1,00	28,80	19,38	0,93	-3,74
Cop3	Bakır toz	2,00	14,92	8,26	0,99	4,17
C11	3mm karbon	0,35	30,75	8,47	0,98	21,97
C12	3mm karbon	0,50	39,18	14,47	0,97	22,32
C13	3mm karbon	0,80	28,11	24,32	0,92	-5,81
C14	3mm karbon	1,00	28,68	12,11	0,98	11,75
C15	3mm karbon	1,50	24,79	21,85	0,94	-11,42
C1	6mm karbon	0,35	24,80	7,93	0,99	14,65
C2	6mm karbon	0,50	17,77	17,32	0,95	-7,50
C3	6mm karbon	0,80	23,65	20,70	0,95	-5,70
C4	6mm karbon	1,00	23,90	10,69	0,98	15,21
C5	6mm karbon	1,50	26,52	22,96	0,93	-6,78
C6	13mm karbon	0,35	29,64	12,78	0,97	13,23
C7	13mm karbon	0,50	22,83	15,09	0,96	1,60
C8	13mm karbon	0,80	31,89	15,31	0,96	10,38
C9	13mm karbon	1,00	26,28	15,47	0,97	6,23
C10	13mm karbon	1,50	30,05	41,99	0,77	-63,93
Ap1	Alüminyum toz	0,35	33,44	16,40	0,95	4,70
Ap2	Alüminyum toz	0,50	27,30	17,59	0,96	3,52
Ap3	Alüminyum toz	0,80	20,37	13,69	0,96	-2,53
Ap4	Alüminyum toz	1,00	3,97	21,19	0,88	-37,61
Ap5	Alüminyum toz	1,50	16,66	63,45	0,72	-111,73
Ap6	Alüminyum toz	2,00	15,54	49,92	0,94	-38,02

Tablo1: Karışımların performans ve puan değerleri (devamı)

Karışım	İletken	İletken oranı (%)	Duyarlılık (K)	Doğrusallık Hatası (LE)	Korelasyon Katsayısı (R^2)	Puan
A1	Alüminyum lif	0,35	30,77	16,01	0,98	11,26
A2	Alüminyum lif	0,50	29,40	10,70	0,99	18,60
A3	Alüminyum lif	0,80	33,63	19,93	0,96	6,36
A4	Alüminyum lif	1,00	21,99	30,11	0,77	-62,59
A5	Alüminyum lif	1,50	60,79	41,86	0,77	-27,23
A6	Alüminyum lif	2,00	59,15	26,60	0,89	0,81
Brp1	Pirinç toz	0,35	31,14	9,14	0,98	15,92
Brp2	Pirinç toz	0,50	35,90	7,90	0,99	25,97
Brp3	Pirinç toz	0,80	37,47	7,42	0,97	30,13
Brp4	Pirinç toz	1,00	48,64	9,15	0,96	34,12
Brp5	Pirinç toz	1,50	43,22	14,76	0,92	13,28
Brp6	Pirinç toz	2,00	43,21	7,65	0,98	32,60
K1	Kömür	0,35	23,47	10,01	0,97	10,25
K2	Kömür	0,50	37,05	7,63	0,99	29,67
K3	Kömür	0,80	44,26	7,56	0,99	36,60
K4	Kömür	1,00	37,71	9,23	0,99	24,30
K5	Kömür	1,50	26,39	14,85	0,97	6,73
K6	Kömür	2,00	30,83	6,81	0,99	19,66
T1	Tufal	0,20	28,22	7,07	0,99	21,26
T2	Tufal	0,35	38,19	12,18	0,92	9,20
T3	Tufal	0,50	31,22	7,67	0,98	19,70
T4	Tufal	0,80	36,50	7,84	0,98	31,09
T5	Tufal	1,00	42,06	5,56	0,99	36,11
T6	Tufal	1,50	26,39	9,28	0,98	14,13