

**ELEKTROEROZYON İLE İŞLEMEDE POLİMER MATRİSLİ İLETKEN
TOZ TAKVİYELİ KOMPOZİT ELEKTROT İLE İŞLEMENİN
DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

Kemal YAMAN

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2007
ANKARA**

Kemal YAMAN tarafından hazırlanan ELEKTROEROZYON İLE İŞLEMEDE POLİMER MATRİSLİ İLETKEN TOZ TAKVİYELİ KOMPOZİT ELEKTROT İLE İŞLEMENİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Can ÇOĞUN
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Bedri TUÇ

Üye : Prof. Dr. Can ÇOĞUN (Danışman)

Üye : Prof. Dr. Haluk DARENDELİLER

Üye : Doç. Dr. Mustafa YURDAKUL

Üye : Prof. Dr. Mustafa İlhan GÖKLER

Tarih : 20/07/2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Kemal YAMAN

**ELEKTROEROZYON İLE İŞLEMEDE POLİMER MATRİSLİ İLETKEN TOZ
TAKVİYELİ KOMPOZİT ELEKTROT İLE İŞLEMENİN
DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

Kemal YAMAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2007**

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, elektroerozyon ile işlemede (EEİ) elektrot üretilebilirliğini kolaylaştırmak ve maliyetini düşürmek için, alternatif bir elektrot üretim yöntemi geliştirmektir. Bu amaç için, elde hazır halde bulunan modelden alçı, silikon, reçine v.b. bir kalıp yapılarak, daha önce hazırlanmış tutucu ve iletken dolgu malzemesinden oluşan karışımın bu kalıp içine dökülmesi ve katılaşması sağlanmıştır. Çalışmada, tutucu malzeme olarak polyester reçine ve iletkenliği sağlaması için dolgu malzemesi olarak dendritik şekilli saf bakır tozu, grafit tozu ve bunların karışımı kullanılmıştır. Karışımın, döküldüğü kalıpta kısa sürede sertleşerek rijit hale gelmesi için, hızlandırıcı ve dondurucu olmak üzere iki farklı kimyasal madde kullanılmıştır.

İş parçası işleme (İİH) ve elektrot aşınma hızlarını (EAH) karşılaştırarak en uygun elektrot tipini belirlemek amacıyla, serbest bakır-polyester (N-B/P), sıkıştırılmış bakır-polyester (S-B/P), pişirilmiş bakır-polyester (P-B/P), pişirilmiş bakır-grafit-polyester (P-B/G/P) ve sıkıştırılmış bakır-grafit-polyester (S-B/G/P) olmak üzere beş farklı tip kompozit elektrot üretilmiştir. İşleme sonrası İİH, EAH ve bağıl aşınma (BA) değişimleri her tip elektrot için grafik halinde gösterilmiştir.

Elektrotların (N-B/P, S-B/P ve P-B/P tipleri için) elektriksel karakteristiklerini çıkarmak için, işlemede kullanılmış elektrotlardan disk şeklinde numuneler hazırlanarak elektriksel dirençleri ölçülmüş; bu veriler kullanılarak elektrotların elektriksel iletkenlikleri hesaplanmıştır. Elektrotların eşik (perkolasyon) konsantrasyonları, eşik iletkenlikleri, doyma sınırları ve şekil faktörleri karakteristik iletkenlik-konsantrasyon denklemleri ile gösterilmiştir. Çalışmada, pratik uygulamaya en uygun olan P-B/P kompozit elektrotların performansının dolgu malzemesi tane boyutu ile olan ilişkisi incelenmiştir. Ayrıca, kompozit elektrotların İİH ve EAH karakteristiklerinin, dolgu malzemesi konsantrasyonu ve tane boyutu ile olan ilişkileri matematiksel denklemler olarak türetilmiştir.

Bu çalışma, tutucu malzeme olarak ortoflatik polyester ve dolgu malzemesi olarak bakır tozundan üretilen kompozit elektrotun EEİ'ye uygulaması olarak bir ilktir.

Bilim Kodu : 914.1.140
Anahtar Kelimeler : Elektroerozyon ile işleme, elektrot, kompozit elektrot, hızlı prototipleme, işleme hızı, elektrot aşınması, polimer elektrot, perkolasyon konsantrasyonu, elektriksel iletkenlik.
Sayfa Adedi : 151
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF MACHINING
WITH CONDUCTIVE POWDER REINFORCED POLYMER MATRIX
COMPOSITE ELECTRODE IN ELECTRIC DISCHARGE MACHINING
(Ph. D. Thesis)**

Kemal YAMAN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
July 2007**

ABSTRACT

The aim of this study is to develop an alternative electrode production method in order to make the electrode producibility easier and decrease the cost in electric discharge machining (EDM). For this purpose, after constructing a mould made of plaster, silicon or resin using the available model, it is attempted to spill the mixture composed of the matrix and conductive filler into this mould and to solidify it. In this study, polyester resin is chosen as the matrix and the dendritic-shaped pure copper powder, graphite powder, and their mixture are used as the filler in order to provide the conductivity. In order for the mixture to take a hardened rigid form in its mould in a short duration, two different chemical substances, namely, an accelerator and a freezer, are used.

In order to decide on the most convenient electrode type by comparing the material removal rate (MRR) and tool wear rate (TWR), five different types of electrodes, namely, free copper-polyester (N-B/P), compressed copper-polyester (S-B/P), sintered copper-polyester (P-B/P), compressed copper-graphite-polyester (S-B/G/P), and sintered copper-graphite-polyester (P-B/G/P) are produced. After the machining

process, $\bar{H}$, EAH, and relative wear (RW) values are graphically demonstrated for each type of electrode. To find out the electrical characteristics of the N-B/P, S-B/P, and P-B/P type electrodes, their electrical resistances are measured by preparing disc shape samples from the ones used in machining and their electrical conductivity values are determined using these data. Afterwards, the percolation concentration, percolation conductivity, saturation limits, and form factor values of the electrodes are obtained by means of the characteristic conductivity-concentration equations. In the study, the relationship of the performance of P-B/P composite electrodes which are the most convenient ones for practical application with the grain size is examined. Furthermore, the relationships of the MRR and TWR characteristics of the composite electrodes with the concentration and grain size of the filler are derived as mathematical equations.

This is the unique study as applying of composite electrode produced by the ortoflatic polyester as matrix and dendritic shape pure copper powder as filler to EDM.

Science Code : 914.1.140

Key Words : Electrical discharge machining, electrode, composite electrode, rapid prototyping, removal rate, tool wear, polymer electrode, percolation concentration, electrical conductivity.

Page Number : 151

Adviser : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

TEŞEKKÜR

Deneylerin gerçekleştirilmesinde yol gösteren önerileri, tezimin hazırlanmasındaki emeği ve değerli katkılarından dolayı muhterem hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Can ÇOĞUN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin yürütme komitesinde üye olma lütfunda bulunan, kıymetli hocalarım Sayın Prof. Dr. Haluk DARENDELİLER'e, Sayın Doç. Dr. İbrahim USLAN'a ve Sayın Doç. Dr. Mustafa YURDAKUL'a teşekkür ederim.

Tezimin özellikle deneysel kısımlarını gerçekleştirmemde gerek iş gücü ve gerekse teçhizat olarak desteğini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. M. Müjdat TOHUMCU, Sayın Gülay SANDIKÇIOĞLU, Üretim Mühendisliği Birimi çalışanları, Nitelik Denetleme Birimi çalışanları, Malzeme Birimi çalışanları ve tüm TÜBİTAK-SAGE çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Tezimin elektriksel direnç ölçümü ile ilgili bölümlerinde yardımlarını esirgemeyen ODTÜ Fizik Bölümü Öğretim Üyelerinden Sayın Prof. Dr. Mehmet PARLAK'a teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında, manevi desteğini esirgemeyen sevgili eşim, Aysun YAMAN'a göstermiş olduğu sabır ve fedakarlıklarından dolayı teşekkür ederim. Böyle bir çalışmayı yapmamda beni teşvik eden kıymetli Anneme ve Babama da teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME (EEİ)	31
2.1. EEİ ile İşlemenin Fiziksel prensibi	31
2.2. EEİ’de İşleme Parametreleri	33
2.2.1. EEİ’de elektriksel parametreler	34
2.2.2. Jeneratörler	39
2.2.3. Dielektrik sıvı	40
2.2.4. Elektrot (takım)	42
2.2.5. İş parçası ve işleme sonrası iş parçası yüzeyinde oluşan katmanlar	43
2.2.6. İş parçası işleme hızı (İİH)	44
2.2.7. Elektrot aşınma hızı (EAH)	44
2.2.8. Bağlı aşınma (BA)	45
3. KOMPOZİT YAPI VE PERKOLASYON KAVRAMI	46

	Sayfa
3.1. Polimer Yapı ve Elektriksel İletkenlikleri.....	46
3.2. Polimer-Metal Arayüzü.....	49
3.3. Polimer Malzemelerde Kür Oluşum Süreci.....	50
3.4. Perkolasyon Kavramı.....	51
3.5. Polimer Kompozit Yapılarda Elektriksel Direnç Ölçümü.....	53
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	59
4.1. Deneylerde Kullanılan İletken Dolgu Malzemeleri.....	59
4.2. Deneylerde Kullanılan Matris (Tutucu) Malzemeleri.....	60
4.3. İş Parçası.....	60
4.4. Elektrot ve Üretimi.....	60
4.4. 1. Elektrot tipleri.....	63
4.5. EEİ Tezgahı ve İşleme Polaritesi.....	65
4.6. Dielektrik Sıvı ve Uygulama Yöntemi.....	66
4.7. İşleme Parametrelerinin Belirlenmesi.....	67
4.8. Kompozit Elektrotların Elektriksel Direnç Ölçümleri.....	68
4.8.1. Deney numunelerinin hazırlanması.....	68
4.8.2. Numunelerin elektriksel direnç ölçümleri.....	70
4.9. Dolgu Malzemesi Tane boyutu (d).....	72
5. DENEY SONUÇLARI.....	73
5.1. N-B/P Elektrotlarda Dolgu Malzemesi Konsantrasyonunun İİH, EAH ve BA ile Olan İlişkisi	73
5.2. S-B/P Elektrotlarda Dolgu Malzemesi Konsantrasyonunun İİH, EAH ve BA ile Olan İlişkisi	77

Sayfa

5.3. P-B/P Elektrotlarda Dolgu Malzemesi Konsantrasyonunun İİH, EAH ve BA ile Olan İlişkisi.....	81
5.4. S-B/G/P Elektrotlarda Dolgu Malzemesi Konsantrasyonunun İİH, EAH ve BA ile Olan İlişkisi	84
5.5. P-B/G/P Elektrotlarda Dolgu Malzemesi Konsantrasyonunun İİH, EAH ve BA ile Olan İlişkisi.....	86
5.6. Farklı Türdeki Elektrotlarda Dolgu Malzemesi Konsantrasyonunun İİH ve EAH'na Etkisinin Karşılaştırması.....	89
5.7. Direnç Ölçümü Deney Sonuçları	96
5.8. Dolgu Malzemesi Tane Boyutunun İİH ve EAH'na Etkisi	103
5.9. Dolgu Malzemesi Tane Boyutunun Elektriksel İletkenliğe Etkisi.....	106
5.10. İİH ve EAH'nın Dolgu Malzemesi Konsantrasyonu ve Tane Boyutuna Göre Matematiksel İlişkilerini Temsil Eden Denklemlerinin Türetilmesi.....	108
5.10.1. Deney sonuçlarının istatistiksel analizi	109
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	116
6.1. Sonuçlar	116
6.2. Öneriler	117
KAYNAKLAR.....	118
EKLER.....	123
EK-1 Deneylerde kullanılan İstatistik analizleri.....	124
EK-2 Deneylerde kullanılan kalıp seti.....	133
EK-3 Dolgu malzemesi (bakır) tanecik boyutu analiz sonucu	134
EK-4 Dolgu malzemesi (grafit) tanecik boyutu analiz sonucu.....	135
EK-5 Matris malzeme (Polyester) TGA analiz sonucu.....	136
EK-6 Matris malzeme (Polyester) FTIR analiz sonucu.....	137
EK-7 Hacimsel olarak %43.6 dolgu malzemesi Konsantrasyonlu N-B/P elektrotun farklı işleme Parametrelerinde İİH, EAH ve BA deney sonuçları.....	138
EK-8 N-B/P elektrota ait İİH, EAH ve BA deney sonuçları.....	139
EK-9 (a) S-B/P (b) P-B/P elektrotlara ait deney sonuçları.....	140

Sayfa

EK-10 (a) S-B/G/P (b) P-B/G/P elektrotlara ait deney sonuçları.....	140
EK-11 N-B/P elektrota ait direnç ölçümü deney sonuçları.....	142
EK-12 S-B/P elektrota ait direnç ölçümü deney sonuçları.....	143
EK-13 P-B/P elektrota ait direnç ölçümü deney sonuçları.....	144
EK-14 Değişik tane boyutlarında (d) homojen dağılımlı olarak üretmiş elektrotların %43.6 sabit hacimsel dolgu konsantrasyonunda ölçülen İİH ve EAH değerleri.....	145
EK-15 Homojen dağılımlı tane boyutlarına göre üretilmiş elektrotların %43.6 sabit hacimsel dolgu malzemesi konsantrasyonunda ölçülen direnç ve iletkenlik değerleri.....	146
EK-16 Elektrotlara ait elektriksel iletkenlik parametreleri ve iletkenlik- dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyon denklemleri.....	147
EK-17 Örnek çalışma.....	148
ÖZGEÇMİŞ.....	151

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Kompozit malzemenin elektriksel iletkenliğini karakterize eden parametreler.....	9
Çizelge 1.2. Karbon karışım oranına karşılık gelen iletkenlik değerleri.....	16
Çizelge 1.3. Her üç metoda göre ölçülen hacimsel dirençlerin karbon-fiber konsantrasyonu ile olan ilişkileri.....	29
Çizelge 1.4. Her üç metoda göre ölçülen hacimsel dirençlerin karbon-fiber uzunluğu ile olan ilişkileri.....	30
Çizelge 2.1. Farklı malzemelere göre kutuplama biçimleri.....	38
Çizelge 2.2. Tipik elektrot (takım) malzemeleri ve karakteristikleri.....	42
Çizelge 5.1. Tane boyutu ve hacimsel konsantrasyona göre İİH ve EAH'larına ait varyans değerleri.....	110
Çizelge 5.2. Regresyon analizinde kullanılan veriler.....	113

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Test hücresinin şematik diyagramı.....	3
Şekil 1.2. Oda sıcaklığında polyester-alüminyum tozu kompozitin hacimsel elektrik iletkenliğinin dolgu malzemesinin hacimsel katkı yüzdesine göre değişimi.....	3
Şekil 1.3. Elektriksel iletkenliğin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	5
Şekil 1.4. Termoplastik-grafit tozu kompozit elektrot yapımı ve uygulaması.....	7
Şekil 1.5. Elektriksel iletkenliğin dolgu malzemesi hacimsel oranı ile ilişkisi (1) PVC-Cu, (2) ER-Cu, (3) PVC-Ni, (4) ER-Ni.....	10
Şekil 1.6. İletkenliğin (logaritmik) nikel tozu hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi: (a) 40µm, ve (b) 500µm Kür sıcaklıkları: (1, 2) 100°C (2, 4) 20°C; (3, 4) ilk numuneler, (2, 4) elektrot ile temas sonrası.....	11
Şekil 1.7. Aynı karbon iletken tozlu farklı termoset/termoplastik matris malzemelerden elde edilen kompozit malzemeler için, iletkenliğin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	12
Şekil 1.8. Kompozit malzeme ve elektriksel eşdeğeri.....	13
Şekil 1.9. (a) üç farklı karakterde gümüş tozu (b) akım-direnç ilişkisi.....	13
Şekil 1.10. Kompozit malzemenin kür sırasında iç direncinin değişimi.....	14
Şekil 1.11. Kompozit yapıdaki SCF hacimsel oranının iletkenlikle olan ilişkisi.....	16
Şekil 1.12. Simulasyonlarda kullanılan molekül yapıları. (a) 6 yakın komşulu (b) 26 yakın komşulu yapı.....	18
Şekil 1.13. İki farklı model kompozit sistemin iç direncinin hacimsel dolgu oranına göre karşılaştırması.....	19

Şekil	Sayfa
Şekil 1.14. Hacimsel olarak %35 PE, %50 G ve %15 CF'den oluşan kompozit yapının iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi.....	20
Şekil 1.15. Bünyesinde G veya CF bulunduran kompozit sistemin dolgu oranının iletkenlikle olan ilişkisi.....	20
Şekil 1.16. Kompozit yapı içindeki üç farklı katmanın (faz) EP, G, CF bir birleriyle olan ilişkisi, (a) G oranı az (b) G oranı köprü oluşturmak için yeterli (çift perkolasyon durumu).....	21
Şekil 1.17. Logaritmik direncin dolgu malzemesi hacimsel yüzdesine göre değişimi, A, 10 MPa; B, 20 MPa; C, 30 MPa; D, 45 MPa; E, 60 Mpa.....	22
Şekil 1.18. Hacimsel direncin karıştırma süresine göre değişimi.....	24
Şekil 1.19. Karışım süresi attıkça iletken tanelerin yalıtkan polimer matris malzeme ile kaplanmasına ilişkin temsili şekil.....	24
Şekil 1.20. Karbon dolgu malzemeli epoksi matris kompozit elektrotun sinterlenmiş ve sinterlenmemiş elektriksel iletkenliğinin konsantrasyona göre değişimi.....	25
Şekil 1.21. Çelik iğne elektrot sistemi.....	28
Şekil 1.22. Potansiyel-fark metodu ölçüm düzeneği.....	29
Şekil 2.1. Bir elektroerozyon sisteminin temel elemanları.....	31
Şekil 2.2. Akım ve gerilimin zamana göre değişimi ve bu zamanlara karşılık gelen elektrot ve iş-parçası aşınma aşamaları.....	34
Şekil 2.3. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe, vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri.....	35
Şekil 2.4. Elektrot (takım) kutuplama türleri: (a) pozitif kutuplama, (b) negatif kutuplama.....	38
Şekil 2.5. Vurum frekansının ve akımın yüzey kalitesine etkisi.....	39

Şekil	Sayfa
Şekil 2.6. Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri (a) elektrot içinden emme, (b) iş-parçası içinden emme, (c) statik, (d) titreşimli, (e) iş-parçası içinden püskürtme, (f) yanıl püskürtme, (g) elektrot içinden püskürtme.....	41
Şekil 2.7. EEİ'deki iş parçası yüzeyinde oluşan katmanlar: Bölge A: Ergimiş-katılaşmış katman (beyaz bölge), Bölge B: Isıl olarak etkilenmiş katman, Bölge C: Geçiş katmanı.....	43
Şekil 3.1. Bilinen iletken metaller ile iletken karakter taşıyan polimerlerin iletkenlik sınırları karşılaştırması.....	46
Şekil 3.2. Polimer yapıları.....	47
Şekil 3.3. İletken forma dönüşüm için poliasetilenin oksidasyonu.....	48
Şekil 3.4. Polimerik malzeme içinde iletken zincir yapı meydana getiren iletken dolgu malzemesi taneciklerinin uzaysal dağılımı.....	48
Şekil 3.5. Matris yapı içinde dolgu malzemesi partiküllerinin temsili arayüzü.....	49
Şekil 3.6. Polyester molekülü içinde yer alan karbon atomu ile partikül katı yüzeyi (kare) arasında kurulan bağ.....	49
Şekil 3.7. Tipik bir kompozit sistem için elektriksel iletkenlik (logaritmik) iletken dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu ilişkisi	51
Şekil 3.8. Bazı malzemelerin hacimsel direnç karşılaştırması	54
Şekil 3.9. Düşük hacimsel direnç ölçümü, 2-nokta metodu	56
Şekil 3.10. Düşük hacimsel direnç ölçümü (b) 4-nokta metodu	57
Şekil 3.11. Yüksek hacimsel direnç ölçümü: 3-nokta metodu	58
Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan bakır tozuna ait tane boyutu histogramı.....	59
Şekil 4.2. (a) Polyester-bakır tozu kompozit elektrotun üretim aşamaları: 1. Kalıp altlığı, 2. Kalıp, 3. Ham kompozit elektrot, 4. Son ölçülerine işlenmiş kompozit elektrot. (b) Kalıbın boy ve koniklik ölçüleri	61

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. Polyester-iletken tozu kompozit dökümü sonucunda elde edilen ham kompozit parçanın tornalanarak numune elektrot haline getirilmesi.....	62
Şekil 4.4. Kompozit elektrot hacimsel direnç ölçümlerinde kullanılan aparat.....	70
Şekil 5.1. N-B/P elektrotta ait İİH'nın dolgu malzemesi (bakır tozu) hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	73
Şekil 5.2. N-B/P elektrotta ait EAH'nın dolgu malzemesi (bakır tozu) hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	74
Şekil 5.3. N-B/P elektrotta ait İİH ve EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişiminin karşılaştırması.....	75
Şekil 5.4. N-B/P elektrotta ait BA'nın dolgu malzemesi (bakır tozu) hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	75
Şekil 5.5. S-B/P elektrotta ait İİH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	79
Şekil 5.6. S-B/P elektrotta ait EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	80
Şekil 5.7. S-B/P elektrotta ait BA'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	80
Şekil 5.8. S-B/P elektrotta ait İİH ile EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimleri.....	81
Şekil 5.9. P-B/P elektrotta ait İİH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	82
Şekil 5.10. P-B/P elektrotta ait EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	82
Şekil 5.11. P-B/P elektrotta ait BA'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	83
Şekil 5.12. P-B/P elektrotta ait İİH ile EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimleri.....	83

Şekil	Sayfa
Şekil 5.13. S-B/G/P elektrota ait İİH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	84
Şekil 5.14. S-B/G/P elektrota ait EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	84
Şekil 5.15. S-B/G/P elektrota ait BA'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	85
Şekil 5.16. S-B/G/P elektrota ait İİH ile EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimleri.....	85
Şekil 5.17. P-B/G/P elektrota ait İİH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	87
Şekil 5.18. P-B/G/P elektrota ait EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	87
Şekil 5.19. P-B/G/P elektrota ait BA'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	88
Şekil 5.20. P-B/G/P elektrota ait İİH ile EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimleri.....	88
Şekil 5.21. İşleme sonucu iş parçası yüzeyine difüze olmuş bakır tabakası.....	90
Şekil 5.22. Serbest bakır-polyester elektrot ile pişirilmiş serbest bakır-polyester elektrotun İİH karşılaştırması.....	92
Şekil 5.23. Serbest bakır-polyester elektrot ile pişirilmiş serbest bakır polyester elektrotun EAH karşılaştırması.....	92
Şekil 5.24. Tüm kompozit elektrot tiplerine ve saf bakır elektrota ait İİH karşılaştırması.....	93
Şekil 5.25. Tüm kompozit elektrot tiplerine ve saf bakır elektrota ait EAH karşılaştırması.....	94
Şekil 5.26. Tüm kompozit elektrot tiplerine ve saf bakır elektrota ait BA karşılaştırması.....	95

Şekil	Sayfa
Şekil 5.27. N-B/P elektrota ait hacimsel direncin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	97
Şekil 5.28. N-B/P elektrota ait iletkenliğin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	97
Şekil 5.29. S-B/P elektrotlara ait hacimsel direncin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	98
Şekil 5.30. S-B/P elektrota ait iletkenliğin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	98
Şekil 5.31. P-B/P elektrotlara ait hacimsel direncin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	99
Şekil 5.32. P-B/P elektrotlara ait iletkenliğin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.....	99
Şekil 5.33. N-B/P, P-B/P ve S-B/P elektrotlara ait hacimsel direncin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimlerinin karşılaştırması.....	100
Şekil 5.34. N-B/P, P-B/P ve S-B/P elektrotlara ait elektriksel iletkenliğin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimlerinin karşılaştırması.....	101
Şekil 5.35. Homojen dağılımlı olarak üretilen elektrotların İİH'nın tane boyutu ile olan ilişkisi.....	104
Şekil 5.36. (a) tane boyutu geniş aralıklı (b) tane boyutu dar aralıklı kompozit yapıdaki yerleşim boşlukları.....	104
Şekil 5.37. Homojen dağılımlı olarak üretilen elektrotların EAH'nın tane boyutu ile olan ilişkisi.....	105
Şekil 5.38. Homojen dağılımlı olarak üretilen elektrotlara ait BA'nın tane boyutu ile olan ilişkisi	105
Şekil 5.39. Dolgu tane boyutu homojen dağılımlı elektrotların elektriksel iletkenlik -tane boyutu ilişkisi.....	107
Şekil 5.40. Dolgu tane boyutu homojen dağılımlı elektrotların elektriksel direnç -tane boyutu ilişkisi.....	107

Şekil	Sayfa
Şekil 5.41. Tane boyutu ve dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonunun İHH ve EAH üzerindeki etki yüzdeleri.....	111
Şekil 5.42. Dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu sabitken dolgu malzemesi tanecik boyutunun İHH ile olan ilişkisi.....	111
Şekil 5.43. Dolgu malzemesi tanecik boyutu sabitken dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonunun İHH ile olan ilişkisi.....	112
Şekil 5.44. Dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu sabitken dolgu malzemesi tanecik boyutunun EAH ile olan ilişkisi.....	112
Şekil 5.45. Dolgu malzemesi tanecik boyutu sabitken dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonunun EAH ile olan ilişkisi.....	113
Şekil 5.46. Deneysel verilere göre uydurulmuş polinomik yüzey grafiği.....	113

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Hacimsel olarak %32.8 alüminyum tozu içeren polyester- alüminyum tozu kompozitin 100 kat büyütülmüş kesiti	4
Resim 1.2. Hacimsel olarak %44.8 alüminyum tozu içeren polyester-alüminyum tozu kompozitin (a) 50 kat (b) 400 kat büyütülmüş kesiti	4
Resim 1.3. PVC-Ni kompozit yapının optik mikroskopta üç farklı dolgu malzemesi konsantrasyonunda görüntüsü. (a) $\phi < \phi_c$, (b) $\phi \sim \phi_c$, (c) $\phi > \phi_c$	9
Resim 3.1. Numune kesiti (a) 80°C’de tamamen kür olmuş, (b) 120°C’de %50 kür olmuş hali	50
Resim 4.1. Deneylerde kullanılan dendritik bakır tozu (x100 ölçek)	59
Resim 4.2. Deneylerde kullanılan (a) ± 0.01 gr hassasiyetli dijital tartı (b) mikser	61
Resim 4.3. Deneylerde kullanılan genel maksatlı fırın	62
Resim 4.4. Deneylerde kullanılan genel maksatlı 150 tonluk hidrolik pres ve kalıp seti	64
Resim 4.5. Deneylerin yapıldığı EEİ tezgahının genel görünümü	66
Resim 4.6. Deneylerde kullanılan Polyester-Bakır kompozit elektrot ve dielektrik uygulama şekli	66
Resim 4.7. Kesme öncesi tornada işlenmiş fatura	68
Resim 4.8. (a) Mikrometrik kesme cihazı (b) parçanın kesilişi	69
Resim 4.9. Sıralı zımpara bandı	69
Resim 4.10. Yüzeyleri parlatılmış, ölçüme hazır bazı numuneler	69
Resim 4.11. Elektrot bağlama aparatı ve bağlantı detayı	71

Resim	Sayfa
Resim 4.12. Direnç ölçümlerinde kullanılan KEITHLEY-619 tipi elektrometre.....	72
Resim 4.13. Toz eleme makinesi ve elekler	72
Resim 5.1. Elektrotta döküm sonrası oluşan gözenekli yapı (a) N-B/P (b) S-B/P elektrot.....	76
Resim 5.2. Aşırı dolgu malzemesi yüklemesi sonucu elektrotta meydana gelen tozlaşma ve deformasyonlar	76
Resim 5.3. (a) Bakır hacimsel konsantrasyonu %35.3 olan bakır-polyester elektrotun iç yapı fotoğrafı (b) Bakır hacimsel konsantrasyonu %32.6 olan bakır-polyester elektrotun iç yapı fotoğrafı (Fotoğraflar gerçek görüntünün 100 kat büyütülmüş halidir).....	78
Resim 5.4. Preslenmiş bakır-polyester elektrotlara ait bazı elektrot-iş parçası görüntüleri.....	79
Resim 5.5. Pişirme sonucu çatlamış elektrot	91
Resim 5.6. Direnç ölçümü deneylerinde kullanılan elektrotlara ait, (a), (b), (c), perkolasyon altı ($v_c > v$), (d), (e), (f), perkolasyon ($v_c = v$) ve (g), (h), (i), perkolasyon üstü ($v_c < v$) konsantrasyon değerlerindeki mikro yapı fotoğrafları (100 kat büyütülmüştür).....	102
Resim 5.7. Homojen dağılımlı tane büyüklüğüne sahip bakır tozundan üretilmiş elektrotlara ait elektrot-iş parçası görüntüleri	103
Resim 5.8. Elektriksel dirençleri ölçülen (a) küresel şekilli homojen tanecik dağılımlı (b) dendritik şekilli homojen tanecik dağılımlı elektrotlara ait 100 kat büyütülmüş mikro fotoğraflar ve disk numunelere ait görüntüler.....	106

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$A \text{ (cm}^2\text{)}$	Elektrot kesit alanı
a	Şekil faktörü (kritik indeks)
$D \text{ (cm)}$	Elektrot çapı
$d \text{ (}\mu\text{m)}$	Tane boyutu
$E \text{ (V/m)}$	Elektrik alan
$E_d \text{ (J)}$	Boşalım enerjisi
$F \text{ (\%)}$	Doyma sınırı
$f_c \text{ (}\mu\text{s)}$	Vurum frekansı
$I(t) \text{ (Amper, A)}$	Zamana bağlı akım
$I_d \text{ (A)}$	Boşalım akımı
$L \text{ (cm)}$	Elektrot boyu
$m_{eö} \text{ (gr)}$	İşleme öncesi elektrot kütlesi
$m_{es} \text{ (gr)}$	İşleme sonrası elektrot kütlesi
$m_{iö} \text{ (gr)}$	İşleme öncesi iş parçası kütlesi
$m_{is} \text{ (gr)}$	İşleme sonrası iş parçası kütlesi
$P_d \text{ (W)}$	Boşalım gücü
$R \text{ (}\Omega\text{)}$	Elektriksel direnç (hacimsel direnç)
$S \text{ (}\Omega\text{cm}^{-1}\text{, Siemen)}$	Elektriksel iletkenlik
$t \text{ (dakika)}$	Deney süresi
$t_1 \text{ (}\mu\text{s)}$	Gecikme süresi
$t_c \text{ (}\mu\text{s)}$	Vurum çevrim süresi
$t_d \text{ (}\mu\text{s)}$	Boşalım süresi
$t_p \text{ (}\mu\text{s)}$	Bekleme (puls) süresi
$t_s \text{ (}\mu\text{s)}$	Vurum süresi
$V_c \text{ (\%)}$	Kritik hacimsel konsantrasyon

Simgeler V_d (V) V_f (%) $V(t)$ (volt, V) ΔV_e (mm³) ΔV_i (mm³) ρ (Ωcm^{-1}) ρ_e (gr/cm³) ρ_i (gr/cm³) σ (Ωcm^{-1} , Siemen) σ_c (Ωcm^{-1}) σ_f (Ωcm^{-1}) σ_p (Ωcm^{-1})**Açıklama**

Boşalım gerilimi

Dolgu malzemesi hacimsel
konsantrasyonu (oranı)

Zamana bağlı gerilim

Aşınan elektrot hacmi

İşlenen iş parçası hacmi

Öz iletkenlik

Elektrot malzemesi yoğunluğu

İş parçası malzemesi yoğunluğu

İletkenlik

Kritik iletkenlik

Dolgu (takviye) malzeme iletkenliği

Polimer (matris) malzeme iletkenliği

Kısaltmalar

AA

AS

BA

EEİ

EAH

GS

İİH

N-B/P

P-B/G/P

P-B/P

S-B/G/P

S-B/P

Açıklama

Ark Aralığı

Ark Süresi

Bağıl Aşınma

Elektroerozyon ile İşleme

Elektrot Aşınma Hızı

Güç seviyesi

İş parçası İşleme Hızı

Serbest Bakır-Polyester elektrot

Pişirilmiş Bakır-Polyester-Grafit
elektrot

Pişirilmiş Bakır-Polyester elektrot

Sıkıştırılmış Bakır-Polyester-Grafit
elektrot

Sıkıştırılmış Bakır-Polyester elektrot

1. GİRİŞ

Elektroerozyon ile işleme (EEİ) yöntemi, çeşitli endüstriyel dallarda, yeni bir işleme metodu olarak kullanılmaktadır. Elektroerozyon ile işleme tekniğinin başarısını, geleneksel metotlarla işlenemeyen sertlikte ve geometrideki metallerin herhangi bir kesme kuvveti uygulamadan kolayca işlenmesine bağlamak mümkündür. Diğer taraftan, EEİ yöntemi, geleneksel işleme metotlarıyla yapılamayan iç yüzey şekillendirmelerini, örneğin keskin köşeler ve düz dip profiller gibi, istenen tolerans aralığı içinde kolayca yapabilmektedir. Bu iki önemli üstünlük, çok sert ve yüksek mukavemetli, sıcaklığa karşı dayanıklı metal malzemelerin kullanma sıklığı günümüzde arttığı için metodu daha da vazgeçilmez hale getirmektedir.

EEİ tekniğinin gelişimi sürecinde, ilk aşamalarda yöntem olarak zor fabrikasyon işleme problemlerini çözecek yardımcı bir metot olarak düşünülmüştür. Günümüzde, EEİ tezgahı üretiminde görev alan üretici firmalar ve araştırmacılar bu teknolojiyi çok ileri seviyeye götürerek metodun temel işleme teknikleri arasına girmesini sağlamışlardır.

Elektriksel kıvılcımın aşındırma etkisi, uzun zamandır bilinmektedir. Elektriksel kıvılcım boşalımının aşındırma etkisine ilk referans olarak, Priestley'in 1768 yılındaki çalışmaları gösterilebilir. 1889'da da Paschen, yöntemi, matematiksel modele oturtmaya çalışmıştır. Lazarenko ve Lazarenko'nun 1943'lerde yaptığı çalışmalarla elektriksel kıvılcımla aşındırma etkisi kontrol altına alınabilmektedir. EEİ'nin kontrol altına alınmasından sonra araştırmacılar çabalarını, bu metodun daha yaygın kullanılabilir olması yönünde harcamışlardır. Bu çalışmaların başında, elektrot teknolojisi gelmektedir. Elektrot üretimi zorluğu ve maliyetlerinin yüksek olması bu konuda çok yoğun çalışılmasının temel sebeplerini oluşturmaktadır. Yapılan çalışmalarda metal kompozit sinterleme yoluyla üretilen elektrotlar ve son zamanlarda hızlı prototip yöntemi ile üretilen elektrotlar denenmiştir. Karmaşık geometrili elektrot (takım) üretimi zorlukları

nedeniyle, günümüzde yeni bir teknoloji olan, hızlı prototip yöntemine yönelik çalışmalar artmıştır. Bu yöntemin gerek ilk yatırım ve gerekse sarf malzeme maliyetlerinin yüksek olması, araştırmacıları başka alanlara yönlendirmiştir.

EEİ tekniğinin kullanışlı bir teknik olması önündeki en büyük engellerden biri elektrot üretilebilirliği ve maliyetidir. Bu çalışmada, EEİ tekniğinin bu olumsuzluğunu ortadan kaldırmak ve bu tekniğin daha kullanışlı hale gelmesini sağlamak amacıyla, uygulaması kolay ve ucuz, alternatif bir elektrot üretim yönteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Konuyla ilgili literatürde yapılmış çalışmalar

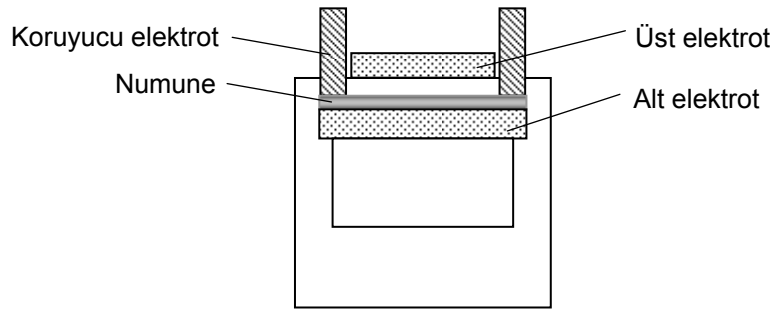
Berger ve Mc Collough yapmış oldukları çalışmada 0 ile %45 hacimsel oranda alüminyum tozu katılmış polyester reçine kompozitin elektriksel davranışlarını incelemişlerdir [1]. Deneylerde kompozitin, 20-130°C sıcaklıklarında, 1, 10 ve 100 kHz frekanslı alternatif akım şartları altında dielektrik sabiti ve öz iletkenlik katsayısı gibi özellikleri sıcaklığın fonksiyonu olarak karakterize edilmiştir. Kompozitin elektriksel direnci oda koşullarında ölçülmüştür. Elde edilen veriler arasındaki ilişkiler değerlendirilerek iletkenlik özellikleri tahmin edilmiştir. Bu tahminlerin yapılmasında kullanılan en önemli bilgi reçine içindeki metal tozlarının birbirleri ile temas ederek bir zincir yapı oluşturmuş olmasıdır. Değişik toz konsantrasyonlu numunelerden elde edilen mikro yapı fotoğrafları da bu kanıyı desteklemiştir [1].

Deneylerde kullanılan numuneler E-980 fiber-glas polyester reçine içine 0-%45 hacimsel oranlarda, %99 saflıkta, ortalama 10 µm tane büyüklüğünde alüminyum tozu yavaş yavaş katılarak vakum fırınında -60 kPa basınç ve 50°C sıcaklık şartları altında yaklaşık 30 dakika kür edilmiştir. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi %99,5 saflıkta nikel dairesel plaka elektrotlar ile numunenin çevresi sarılmış bir biçimde platform üzerine oturtulmuştur. Yapılan ölçümler sonucunda, katılan alüminyum hacim oranı ile hacimsel direnç arasında Şekil

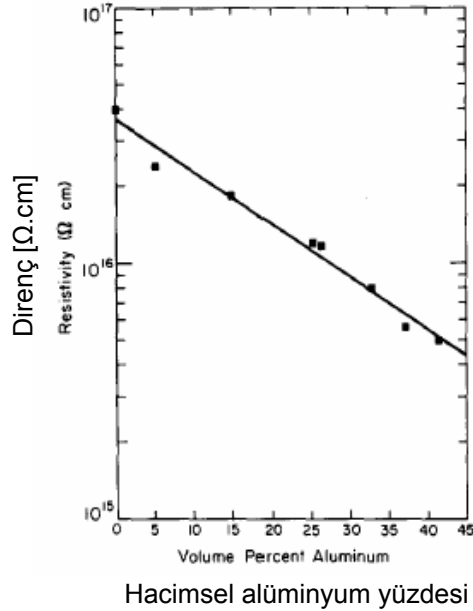
1.2'de gösterilen grafik elde edilmiştir. Kompozit numunelerin hacimsel dirençleri ise Eş. 1.1 ile hesaplanmıştır:

$$R = V.A/(I.h) \quad (1.1)$$

Burada, A numunenin kesit alanı, V uygulanan potansiyel farkı, I numune üzerinden geçen akım ve h numune yüksekliğidir (kalınlık). Devreden geçen akım Keithley 600A tipi elektrometre ile $10^{-13} \pm \%4$ hata payıyla ölçülmüştür.

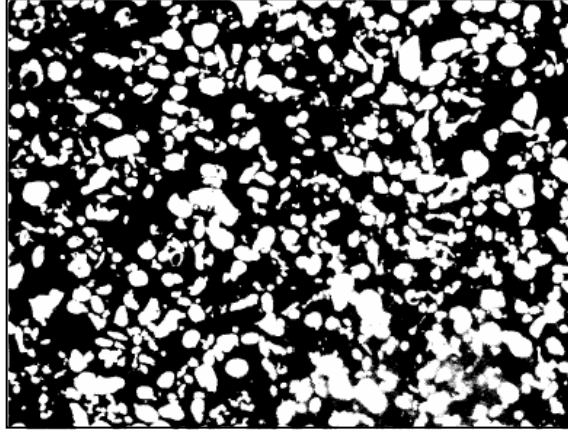


Şekil 1.1. Test hücresinin şematik diagramı [1]

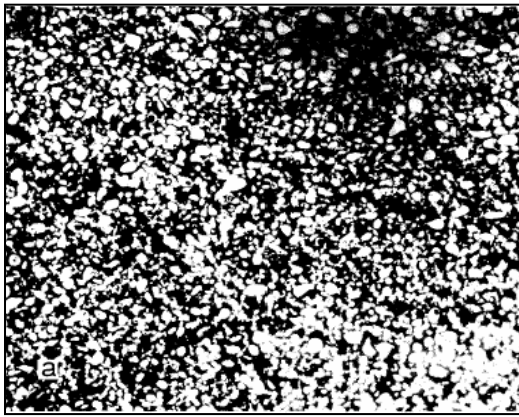


Şekil 1.2. Oda sıcaklığında polyester-alüminyum tozu kompozitin hacimsel elektrik iletkenliğinin dolgu malzemesinin hacimsel katkı yüzdesine göre değişimi [1]

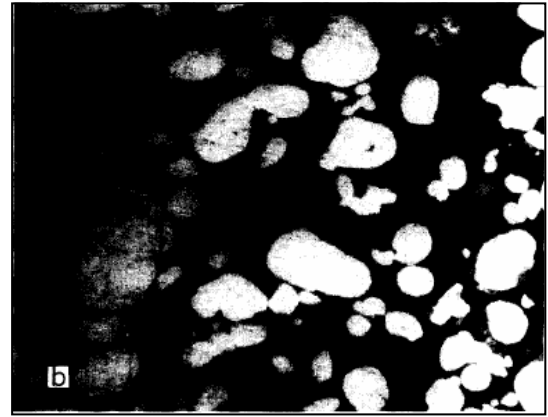
Resim 1.1'de %32,8 oranında alüminyum tozu, Resim 1.2-a ve Resim 1.2-b'de ise %44,8 oranında alüminyum tozu mevcuttur. Resim 1.2'de iletken tanecik zinciri oluşumu daha açık olarak görülmektedir. Bununla birlikte, zincir oluşumunda parçacık boyutunun da belirgin bir etkisi vardır [1].



Resim 1.1. Hacimsel olarak %32,8 alüminyum tozu içeren polyester-alüminyum tozu kompozitin 100 kat büyütülmüş kesiti [1]



(a)



(b)

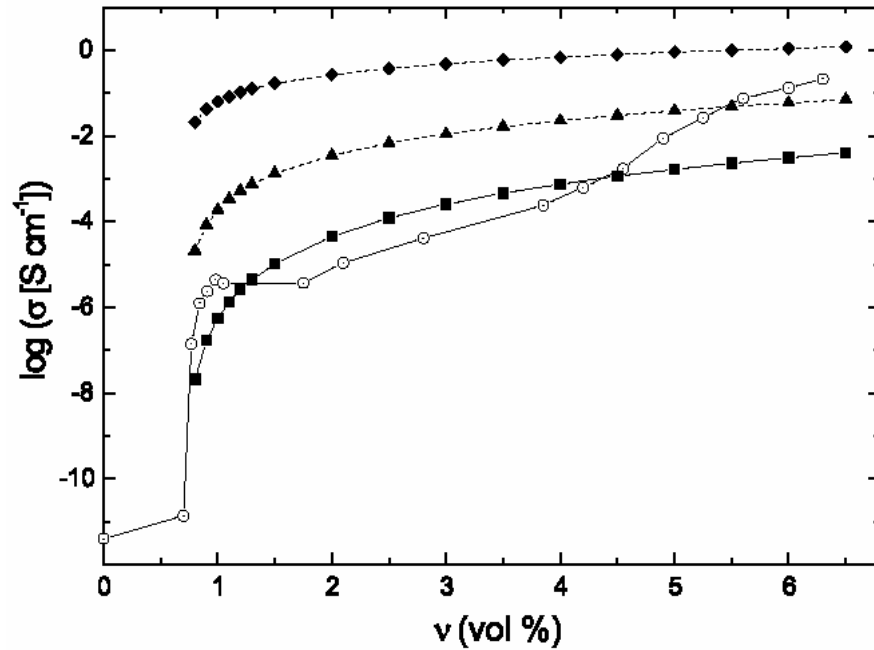
Resim 1.2. Hacimsel olarak %44,8 alüminyum tozu içeren polyester-alüminyum tozu kompozitin (a) 50 kat (b) 400 kat büyütülmüş kesiti [1]

Vilcakova ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada polyester reçine matris malzeme içine katılan kısa karbon fiber malzemeli kompozit yapının elektriksel davranışları deneysel ve teorik olarak incelenmiştir [2]. İncelemeler

sonunda deneysel sonuçların aşağıda verilen teorik denklem ile uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir (Eş. 1.4).

$$\sigma = \sigma_0 (\nu - \nu_c)^t \quad (1.4)$$

Burada, σ_0 kompozitin iletken faz anındaki iletkenliği, ν_c kritik hacimsel dolgu konsantrasyonu (perkolasyon değeri), ν herhangi bir andaki dolgu malzemesi konsantrasyonu ve t ise (form faktörü) kritik katsayıdır. Deneylerde, Chs-109 tipi polyester matris malzemeye iletken dolgu malzemesi olarak ortalama 7 μm çapında ve 3 mm boyunda, yoğunluğu 1,76 gr/cm^3 olan karbon-fiber malzeme hızlandırıcı ve katalizör eşliğinde karıştırılmıştır. Elde edilen karışım oda sıcaklığında 24 saat bekletilerek 10x10x5 mm boyutlarında, hacimsel olarak %0-6,3 arasında değişen on farklı numune denenmiştir.



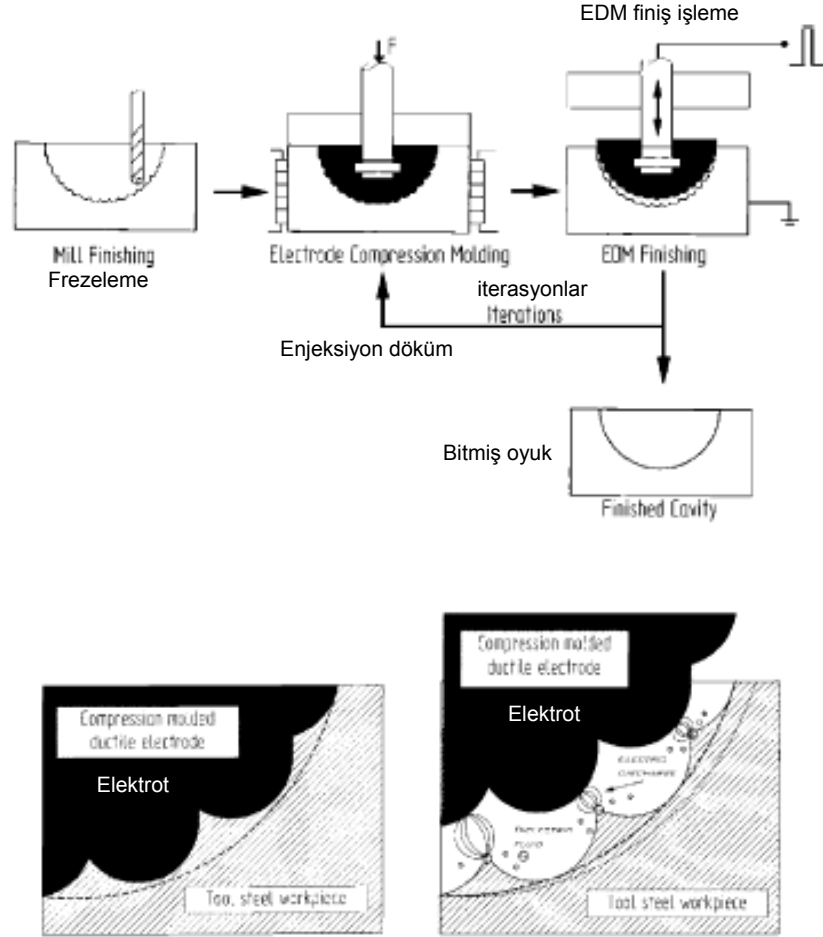
Şekil 1.3. Elektriksel iletkenliğin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi. Deneysel sonuçlar (○), Eş. 1.4'e göre $\sigma_0=21 \text{ S.cm}^{-1}$, $\nu_c=0,7 \times 10^{-2}$ ve $t=1$ (◆), 2 (▲) ve 3 (■) hesaplanan teorik sonuçlar [2]

Doğru akım elektrik iletkenliği hacimsel olarak %0,7 seviyesinden %0,9 seviyesine hızlı bir artış göstermiş, daha sonra çok düşük bir artış hızı ile %6-7 arasında doyuma ulaştığı gözlenmiştir. Bu durum Şekil 1.3'de görülmektedir.

Jimenez ve Elizalde çalışmalarında parçacık boyutu 10 μ m'den küçük olan saf nikel tozunu %99,99 oranında, polyester reçine içine katarak oda sıcaklığında aseton veya metil-etil-keton çözücü maddeleri ile karıştırıp ısıya dayanıklı cam üzerine püskürtmüşlerdir [3]. Kuruduktan sonra numuneler, 50°C ile 100°C arasında kür edilmiştir. Kür işleminden sonra nikel-polyester tabaka cam yüzeyinden sıyrılmıştır. Cama yapışık olan yüzeyde polyester oranı daha yüksek iken diğer yüzde nikel oranının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen numuneler üzerinde oda sıcaklığında yapılan deneyler sonucu $2-6 \times 10^{-2}$ Ω cm, 50-100°C sıcaklıklarda yapılan deneylerde ise $4-6 \times 10^{-2}$ Ω cm elektrik direnci ölçülmüştür.

Curodeau ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, standart EEİ işleminden farklı olarak metal elektrot yerine termoplastik kompozit elektrot kullanmışlardır [4]. Deneylerde %60-65 oranında, nanometre mertebesinde tanecik boyutlarına sahip karbon, tozunu elektrik iletken özellikli eritilmiş termoplastik matris malzeme içine homojen bir biçimde karıştırarak basınçlı döküm tekniği ile hazırladıkları kalıplara dökmüşlerdir (Şekil 1.4). Yaptıkları deneylerde dielektrik olarak havayı kullanmışlardır. Deney sonuçlarında elektrotta düşük aşınma direnci ve düşük elektrik iletkenliğinin sonucu olarak düşük malzeme işleme hızı elde edilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda kompozit elektrotun elektrik iletkenlik direnci 0,18 Ω cm iken piyasada kullanılan, katı grafit elektrotun direnci 0,0003 Ω cm ölçülmüştür. Bu ölçüm sonuçlarının çok farklı çıkmasının temel sebebi, kompozit elektrotta matris malzeme içinde bulunan toz tanelerinin oluşturduğu zincirleme yolların normal katı elektrot malzemeye göre çok daha az olmasıdır. İşlemlerde dielektrik olarak hava kullanılması sonucu çok pürüzsüz ve kaliteli yüzeyler elde edilmiştir. Ayrıca, termoplastik-grafit kompozit elektrotun katı grafit elektrota göre yüksek

hacimsel dirence (elektriksel direnç) ve düşük aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür [4].



Şekil 1.4. Termoplastik-grafit tozu kompozit elektrot yapımı ve uygulaması [4]

Puertolas ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada Salisilalimin bakır, homopolimer bir malzeme olan sıvı kristal polimer (LCP) malzeme ile karıştırılıp mekanik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir [5]. Dielektrik özellikler bir spektroskop ile doğru ve alternatif akım kullanılarak ölçülmüştür. Numuneler 1 mm kalınlığında ve 20 mm çapında diskler şeklinde hazırlanmış, 0,1-30 kHz alternatif akım altında -130 ila 180°C sıcaklık aralığında 1°C/dakika artışla ölçümler alınmıştır. Ölçümler sonucunda malzemenin elektrik iletkenliğinin kritik sıcaklık değeri (50°C) üzerindeki değerlerde hızlı bir artış gösterdiği daha sonra sabite yakın bir seviyede kaldığı görülmüştür [5].

Diğer bir deneysel çalışmada Mamunya ve arkadaşları, epoksi reçine (ER) ve polivinilklorür (PVC) malzemeleri matris, bakır (Cu) ve nikel (Ni) tozlarını da dolgu malzemesi olarak kullanmışlardır. Polimer matris malzeme tipinin ve dolgu malzemesi özelliklerinin kompozit malzemenin elektriksel iletkenliğine ve termal iletkenliğine olan etkisi incelenmiştir [6].

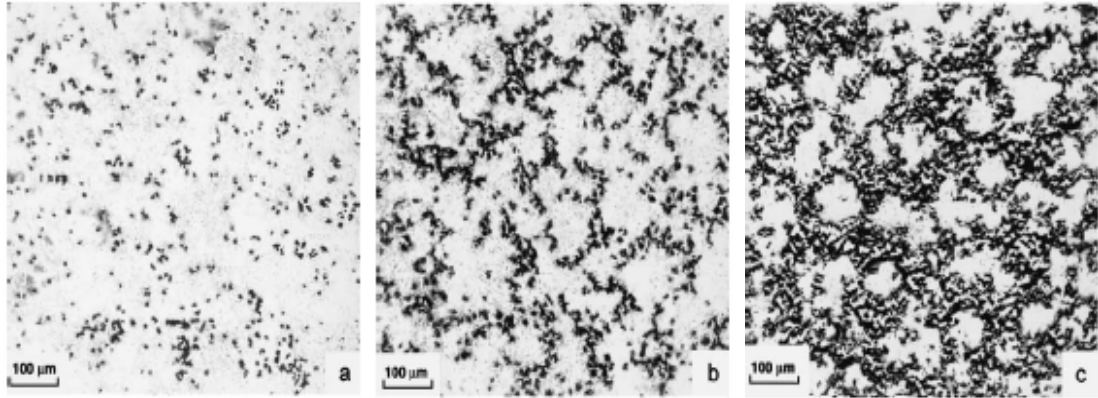
Kompozit malzemenin *perkolasyon* (kompozitin elektriksel iletkenliğe ulaştığı andaki dolgu malzemesi konsantrasyonu) davranışı, dolgu malzemesinin şekline, büyüklüğüne ve matris malzeme içindeki parçacıkların uzaysal dağılımına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Deneylerde kullanılan bakır tozu, gelişi güzel dendritik yapıda ve ortalama tane boyutu 100 μm , nikel tozları ise küresel şekilli olup, ortalama tane boyutları 10 μm mertebesinde. Epoksi reçine bazlı kompozit için ayrı ayrı bakır ve nikel tozları katılmıştır. Hızlandırıcı ve sertleştirici eklenen karışımlar 1s^{-1} devirle dönen bir kap içine homojen bir dolgu malzemesi dağılımı elde etmek üzere dökülmüştür. Malzeme 2 saat boyunca 120°C sıcaklık altında kür edilmiştir. Dolgu malzemesinin dağılımına optik mikroskopta bakılmış ve düzgün dağılım gözlenmiştir. Toz boyutu aralığı 90-120 μm olan bakır tozu ikinci aşamada PVC bazlı matris malzeme ile karıştırılıp 170°C sıcaklıktaki sıcak kalıba dökülüp karıştırılıp preslenmiştir.

Numuneler kür olduktan sonra 30 mm çapında ve 2 mm kalınlığında disk şeklinde işlenip elektriksel iletkenlikleri ölçülmüş ve 10^{-2} - 10^{-4} S (Siemen) aralığında iletkenlik değerleri bulunmuştur. Bunun yanı sıra polimer malzemelerin ve dolgu malzemelerinin deneysel yoğunlukları ölçülmüş ve $\rho_{ER}=1,18 \text{ gr/cm}^3$ (epoksi reçine), $\rho_{PVC}=1,40 \text{ gr/cm}^3$ (poli vinil klorür), $\rho_{Cu}=8,80 \text{ gr/cm}^3$ (bakır), $\rho_{Ni}=8,50 \text{ gr/cm}^3$ (nikel) değerleri elde edilmiştir.

Doyma sınırı F , dolgu malzemesi için hesaplanmıştır. Metal tozları silindirik bir cam kap içine konup 50Hz frekansta titreştirilerek görünür yoğunluğu ölçülmüştür. Tokluk katsayısı $E\phi$ 1.2 ile hesaplanmıştır:

$$F = \frac{P}{(V \cdot \rho_f)} \quad (1.2)$$

Burada P , dolgu malzemesinin ağırlığı, V , dolgu malzemesinin titreşim kabından ölçülen hacmi ve ρ_f , dolgu malzemesinin görünür yoğunluğudur.



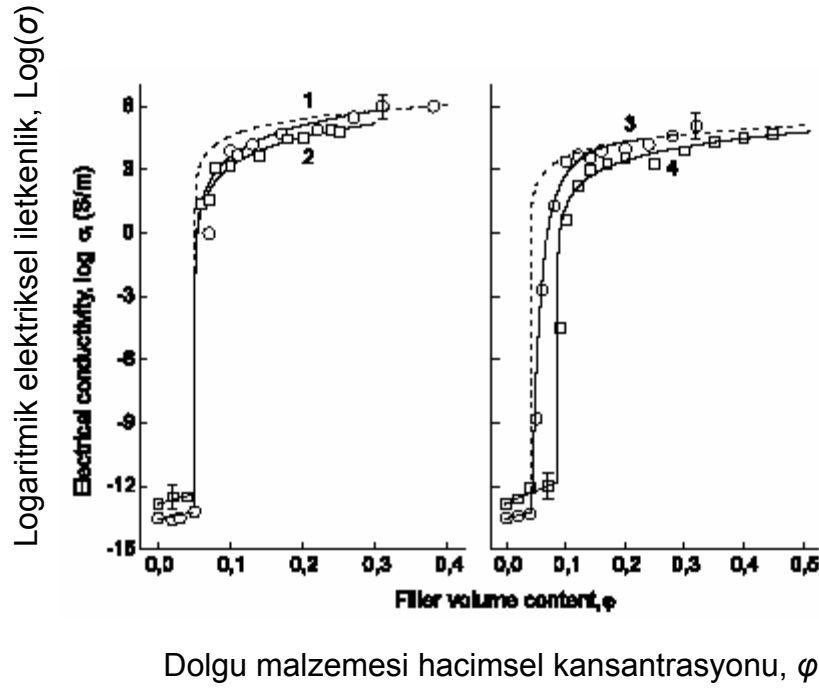
Resim 1.3. PVC-Ni kompozit yapının optik mikroskopta üç farklı dolgu malzemesi konsantrasyonunda görüntüsü. (a) $\varphi < \varphi_c$, (b) $\varphi \sim \varphi_c$, (c) $\varphi > \varphi_c$ [6]

Resim 1.3’de PVC-Ni kompozit sistemin optik mikroskop ile görüntülenmiş farklı dolgu malzemesi konsantrasyonlarındaki iç yapı dağılımı görülmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda PVC-Ni sistemin perkolasyon konsantrasyonu 0,04 ve doyma sınırı 0,25 bulunmuştur. Diğer kompozit sistemler olan ER-Cu, PVC-Cu ve ER-Ni için değerler Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Kompozit malzemenin elektriksel iletkenliğini karakterize eden parametreler [6]

Kompozit	$\text{Log}\sigma_p(\text{S/m})$	$\text{Log}\sigma_c(\text{S/m})$	$\text{Log}\sigma_m(\text{S/m})$	φ_c	F	a
Er-Cu	-12,8	-12,5	5,2	0,050	0,30	2,9
PVC-Cu	-13,5	-13,2	5,8	0,050	0,30	3,2
Er-Ni	-12,8	-12,0	4,8	0,085	0,51	2,4
PVC-Ni	-13,5	-13,3	4,5	0,040	0,25	-

Şekil 1.5’de ise bu farklı kompozit sistemlere ait iletkenlik-dolgu malzemesi konsantrasyonu ilişkisi grafik olarak gösterilmiştir.

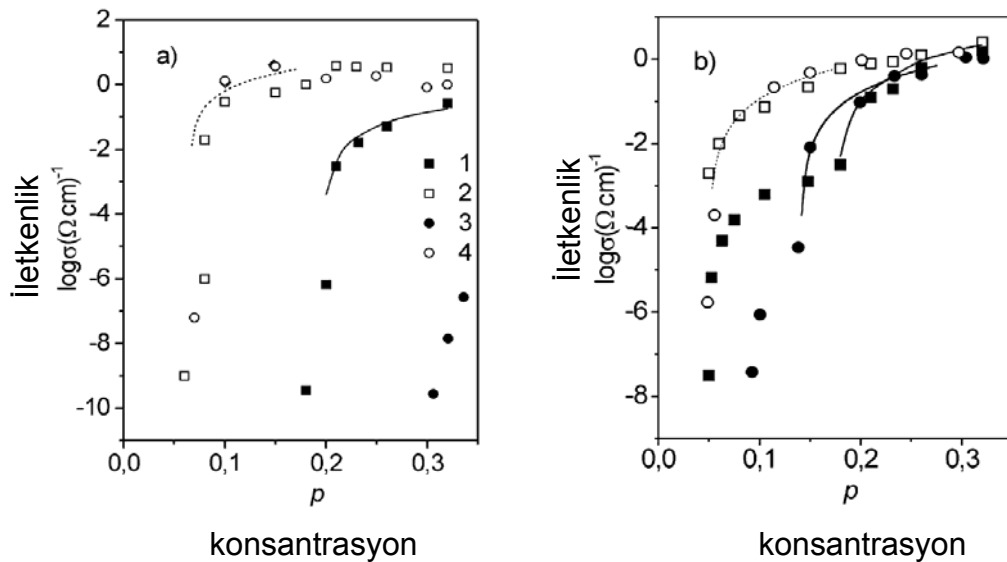


Şekil 1.5. Elektriksel iletkenliğin dolgu malzemesi hacimsel oranı ile ilişkisi.
(1) PVC-Cu, (2) ER-Cu, (3) PVC-Ni, (4) ER-Ni [6]

Bu çalışmalar sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir [6]:

1. Doyma sınırı F , iletken faz topolojisi ve iletken parçacık şekli tarafından etkilenen temel bir parametredir.
2. Perkolasyon eşik konsantrasyonu toz parçacık şekline ve bu parçacıkların matris malzeme içindeki dağılımına bağlıdır. Bu yüzden doyma sınırı ile arasında doğrusal bir ilişki vardır.
3. Teorik perkolasyon denklemi $\sigma \cong (\varphi - \varphi_c)^a$ $a=2,4-3,2$ aralığındaki değerler için doğru olduğu görülmüştür (şekil faktörü $a=1,7$).
4. Sıkıştırma basıncı altında polimer-metal tozlu kompozit sistemin perkolasyon denklemine (herhangi bir a değeri için) uymadığı gözlenmiştir.

Roldughin ve Vysotski yapmış oldukları çalışmada, polimer matris malzeme olarak ED-20 epoksi reçine, iletken toz olarak ortalama tane büyüklüğü 8 μm olan nikel tozu kullanarak elde ettikleri kompozit malzemenin doğru akım iletkenlik ve perkolasyon davranışını incelemişlerdir [7]. Deney numuneleri 0,5x3 cm^2 kare film şeklinde yaklaşık 100°C de kür edilerek hazırlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonunda, kompozit malzemenin elektriksel iletkenliğinin iletken nikel tozu konsantrasyonu ile arttığı ancak ortam sıcaklığı artışı ile azaldığı gözlenmiştir. Bu sonuçlara ilişkin grafikler şekil 1.6'da verilmiştir. Perkolasyon eşik konsantrasyonunun, kullanılan matris malzeme çeşidi, iletken tozu tane büyüklüğü ve tane biçimi ile değiştiği saptanmıştır. Buna göre kullanılan toz tane boyutu küçüldükçe perkolasyon eşik değerinin azaldığı görülmüştür [7]. Kompozit yapı içinde kür sırasında oluşması muhtemel iletkenlik zinciri sayısı kullanılan matris malzemenin viskozitesinin azalması ile arttığı da elde edilen diğer önemli bir sonuçtur. Bu sonucu destekleyen deneysel çalışmada epoksi-siklokarbonat reçinenin eşik perkolasyon değerinin viskozitesi daha yüksek olan epoksi reçinenin (ED-20) perkolasyon eşik değerinden daha düşük olduğu saptanmıştır.



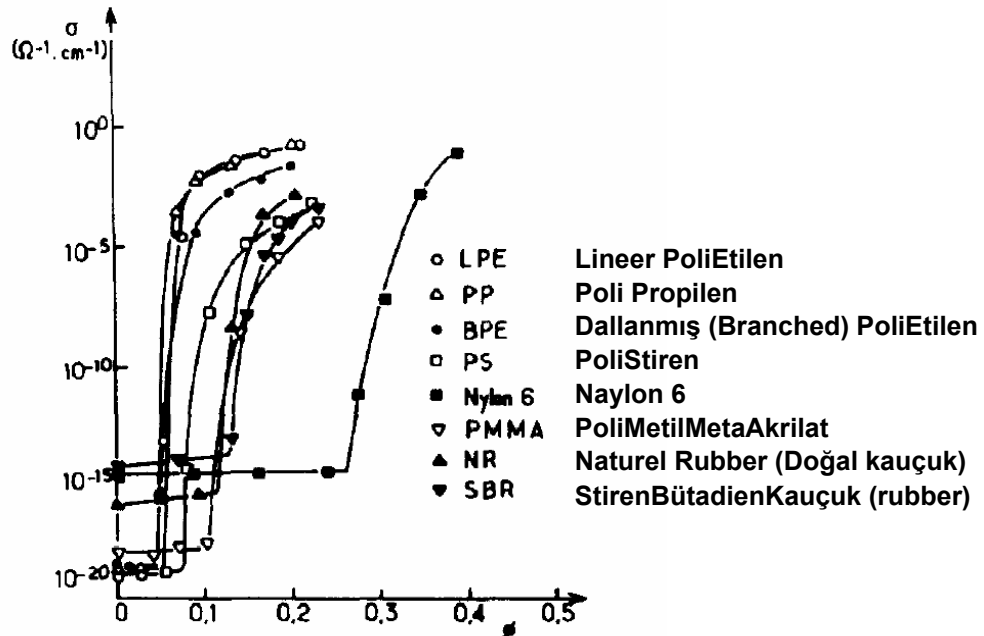
Şekil 1.6. İletkenliğin (logaritmik) nikel tozu hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi: (a) 40 μm , ve (b) 500 μm Kür sıcaklıkları: (1, 2) 100°C (2, 4) 20°C; (3, 4) ilk numuneler, (2, 4) elektrot ile temas sonrası [7]

Daha yüksek ortam sıcaklığında kür edilen kompozit malzemenin perkolasyon eşik değerinin oda sıcaklığında elde edilen değere oranla daha düşük olduğu tespit edilmiştir [7].

Carmona yaptığı bir çalışmada, karbon tozu ile matris malzeme olarak farklı termoplastik ve termoset reçineler kullanarak oluşan kompozit yapının doğru akım elektriksel davranışlarını incelemiştir [8]. Şekil 1.7’de sekiz farklı matris malzemesi için doğru akım elektriksel iletkenliğin karbon tozu hacimsel yüzdesine göre değişimi gösterilmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarının Eş. 1.3 ifadesi ile verilen teorik sonuçlarla uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

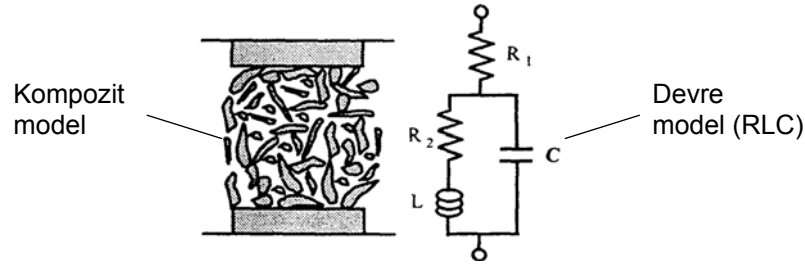
$$\sigma = (p - p_c)^a \quad (1.3)$$

Burada p_c perkolasyon konsantrasyonu, p herhangi bir andaki dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu, a ise kritik indekstir (şekil faktörü).



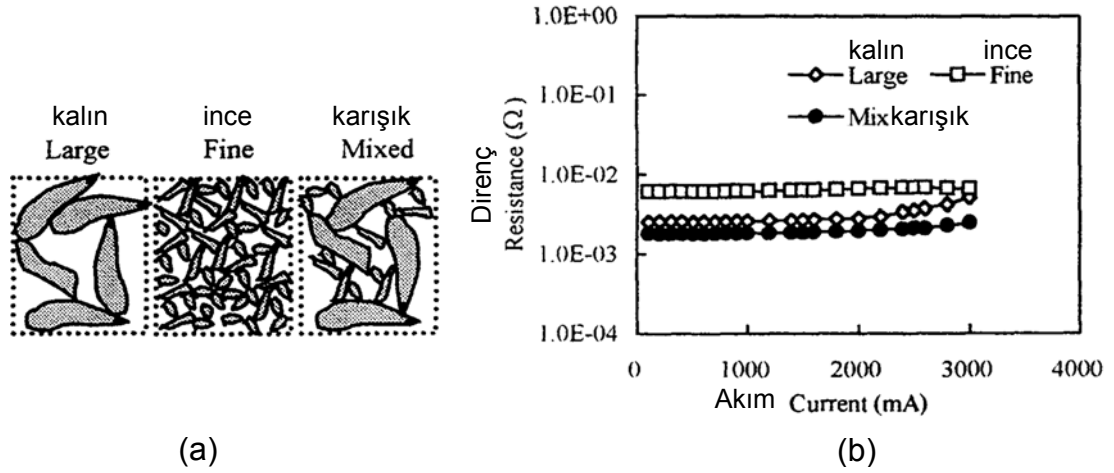
Şekil 1.7. Aynı karbon iletken tozlu farklı termoset/termoplastik matris malzemelerden elde edilen kompozit malzemeler için, iletkenliğin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi [8]

Shimada ve arkadaşları, elektrik iletken yapıştırıcının (electrically conductive adhesives, ECA) akım kapasitesi, indüktans, kapasitans ve rezistans gibi elektriksel karakteristiklerini incelemişlerdir (Şekil 1.8) [9].



Şekil 1.8. Kompozit malzeme ve elektriksel eşdeğeri [9]

Bu çalışmada kullanılan iletken kompozit yapıştırıcıda, matris malzeme olarak Bisfenol-F tipi epoksi reçine ve takviye malzeme olarak gümüş tozları kullanılmıştır.

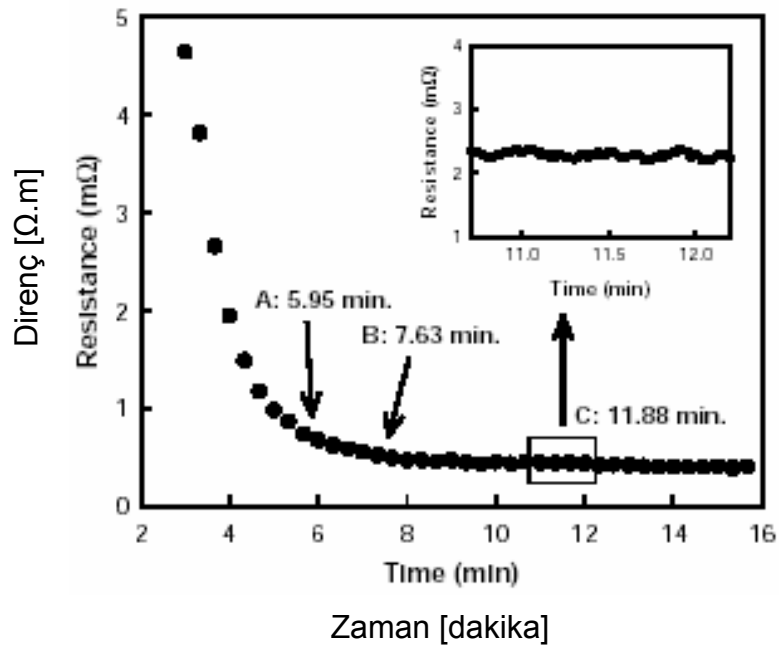


Şekil 1.9. (a) üç farklı karakterde gümüş tozu (b) akım-direnç ilişkisi [9]

Çalışmada epoksi reçine içine kütleli olarak %80Ag/%20reçine karıştırılmıştır. Karışımda Şekil 1.9'da gösterildiği gibi kalın, ince ve karışık olmak üzere üç farklı karakterde gümüş tozu kullanılmıştır. Karışım 50 µm kalınlığında film şeklinde 130°C'de kür edildikten sonra direnci bir elektrometre ile 2-nokta metoduna göre ölçülmüş ve Şekil 1.9'da direnç-akım grafiği olarak gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi kalın taneli yapı inceye göre daha iletken olup, en iyi iletkenlik karışık taneli yapıda elde edilmiştir [9].

Kim ve Shi yapmış oldukları çalışmada elektronik sanayisinde yaygın kullanım alanı bulan elektrik iletken kompozit yapıştırıcı malzemenin elektriksel iletkenlik performansının kürleşme ile olan ilişkisini incelemişlerdir [10]. İletken malzeme olarak gümüş tozu ve gümüş-bakır tozu karışımı, bağlayıcı (matris) olarak da epoksi reçine kullanılmıştır. Çalışmada farklı kür şartlarında ve uygulanan farklı akım yoğunluklarındaki elektriksel performanslar karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmalarda 140-180°C arasında 10°C ölçüm aralıklarında, 10, 20, ve 30A'lık akım yoğunluklarında Diferansiyel Tarama Kalorimetresi, (DCS- *Differential Scanning Calorimeter*) ile iletkenlikler, uygulanan kür sıcaklığı ve zamanın fonksiyonu olarak ölçülmüştür. İletkenlikler kür sırasında sürekli olarak 4-nokta prob metodu kullanılarak Keithley 2000 multimetre cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm sırasında numune temiz iki bakır levha arasına dökülmüş, sıcaklık değişimi ise XT-16 tipi bir ısıl-çift ile kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar 150°C kür sıcaklığı ve ortalama 20 A akım yoğunluğu değerleri için Şekil 1.10'da gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Kompozit malzemenin kür sırasında iç direncinin değişimi [10]

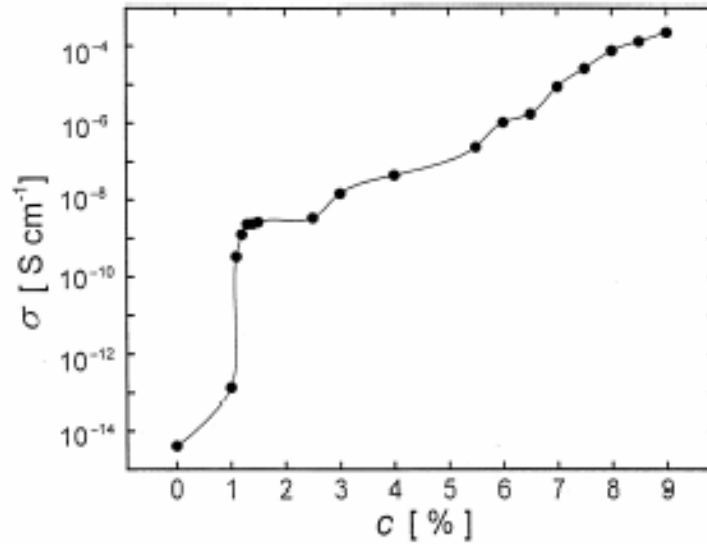
Kür sırasında, üretilen numunede meydana gelen çekmeden (shrinkage) dolayı metal iletken parçacıklar zamanla baskı kuvvetine maruz kalmakta, birbirlerine yaklaşmakta hatta birbirleri ile temas etmektedirler. Bunun sonucu olarak yapıştırıcının iç direnci düşmekte yani iletkenlik artmaktadır [10].

Deneyler sırasında uygulanan yüksek akım yoğunluğu parçacıkların birbirleri ile kurdukları teması azaltmış dolayısıyla yapıştırıcı direnci artmıştır. Kompozit yapıştırıcının daha düşük akım yoğunluklarında daha iyi bir iletken olduğu gözlenmiştir. Bu tip kompozit yapılarda kür süresi tamamlanmadan yapılan ölçümler, parametre değerlerinin olması gereken değerlerden saptığını göstermiştir.

Bu çalışmada Vilcakova ve arkadaşları, farklı dolgu malzemesi (karbon-fiber) oranlarında epoksi reçineli kompozit yapının dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu ile elektriksel iletkenliği arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda, ChS-109 tipi polyester reçine içine çapı 7 μm ve boyu ortalama 3 mm olan kısa karbon fiberli (SCF) iletken dolgu malzemesi kullanılmıştır [11]. Çizelge 1.2’de gösterildiği gibi SCF’nin yüzde karışımı ve bu orana karşılık gelen özgül iletkenlik değerleri deneyler sonunda ölçülmüştür. Numuneler 18 farklı karışım oranında 10x10x15 mm boyutlarında, oda sıcaklığında reçine ile karıştırılarak 30x10x1 mm boyutlarında iki paralel bakır elektrot arasına dökülerek elde edilmişlerdir. Laboratuvar ortamında 22°C sıcaklıkta yapılan ölçümlerde kompozit malzemenin özgül iletkenlik değeri %1 ile %1,3 SCF hacimsel dolgu oranı aralığında ani bir artış gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 1.11). Elde edilen 18 farklı numunenin D.C elektrometre ile iletkenlikleri 28-80°C sıcaklıkları arasında ölçülmüştür (Çizelge 1.2). Bu ani artışın görüldüğü dolgu malzemesi konsantrasyonu (%1,3) perkolasyon eşik değeridir. Bu perkolasyon sınırında malzeme yalıtkan karakterden iletken veya yarı-iletken karaktere geçiş gösterir. Geçiş bölgesinde belli sayıda iletkenlik zinciri kurulmuş olsa bile gerilim artışından dolayı, daha fazla elektron aktif hale geçip, yalıtkan polyester reçine engelini atlayarak diğer iletken parçacığa ulaşır.

Çizelge 1.2. Karbon karışım oranına karşılık gelen iletkenlik değerleri [11]

Conductivity σ of composite material filled with SCF		
Content of SCF (wt.%) Kütlesel	Specific conductivity σ ($S\ cm^{-1}$)	Özgöl iletkenlik
0	4.1×10^{-15}	
1	1.4×10^{-14}	
1.1	3.3×10^{-10}	
1.2	1.3×10^{-9}	
1.3	2.3×10^{-9}	
1.4	2.4×10^{-9}	
1.5	2.6×10^{-9}	
2.5	3.4×10^{-9}	
3	1.5×10^{-8}	
4	4.4×10^{-8}	
5.5	2.4×10^{-7}	
6	1.0×10^{-6}	
6.5	1.7×10^{-6}	
7	8.7×10^{-6}	
7.5	2.6×10^{-5}	
8	7.6×10^{-5}	
8.5	1.3×10^{-4}	
9	3.4×10^{-4}	



Şekil 1.11. Kompozit yapıdaki SCF hacimsel oranının iletkenlikle ilişkisi [11]

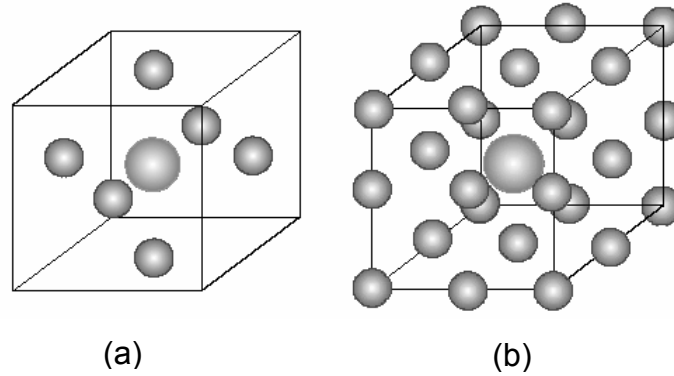
Böylece birbiri ile temasta olan parçacıkların aktarmış olduğu yüke göre daha fazla yük aktarımı bu yarı-iletken mantığı ile gerçekleşir [11]. Dolayısı ile

kompozite uygulanan gerilim arttıkça akım da doğru orantıdan ($V=I.R$) daha fazla artar. Kompozit içindeki SCF oranı yeterli miktara ulaştığı zaman, tipik olarak %9, iletkenlik baskın olarak iletken parçacıkların birbirine temasıyla sağlanır. Bu durumda sistemin davranışı Ohm Kanunları ile belirlenir. Sıcaklık artışı kompozit malzeme içindeki genleşmelerin sonucu olarak iletkenliğe olumsuz yönde etki eder. Ancak, dolgu malzemesi konsantrasyonu artışı parçacıklar arası uzaklaşmayı ortamdaki parçacık sayısını çoğaltarak azalttığından dolayı iletkenliği artırır [11].

Wycisk ve arkadaşlarının yapmış oldukları bu çalışmada karbon tozu ile karıştırılmış düşük yoğunluklu polietilen granülleri ergitilerek preslenmiştir. Elde edilen numunelerin elektriksel dirençleri ölçülmüştür. Kompozit yapı oluşumu ve kararlılık hem deneysel olarak hem de bilgisayar benzetimi (simulasyonu) ile incelenmiştir [12]. Ön çalışmalar sonunda (kompozit yapıyı modellemek için) iki farklı tip ağ yapısı bilgisayar benzetiminde denenmiştir. Bunlardan biri basit kübik 6 yakın komşulu ağ yapı değeri ise 26 komşulu ağ yapısıdır. Şekil 1.12'de görüldüğü gibi merkezdeki molekül polietilen granülü, etrafındaki küçük küreler ise karbon taneleridir. Polietilen granül çapları 5-11 birim arasında değişirken siyah karbon tane boyutları yaklaşık 1 birim olarak alınmıştır. Kompozitin elektriksel iletkenliğini hesaplamada üç ana faktör etkilidir:

- 1- Kompoziti oluşturan bileşenlerin özgül (iç) fiziksel özellikleri
- 2- Parçacıkların uzaysal dağılımı (topolojileri)
- 3- İletken parçacıklar arasındaki yük transferini yansıtan, parçacıklar arası temas direncidir.

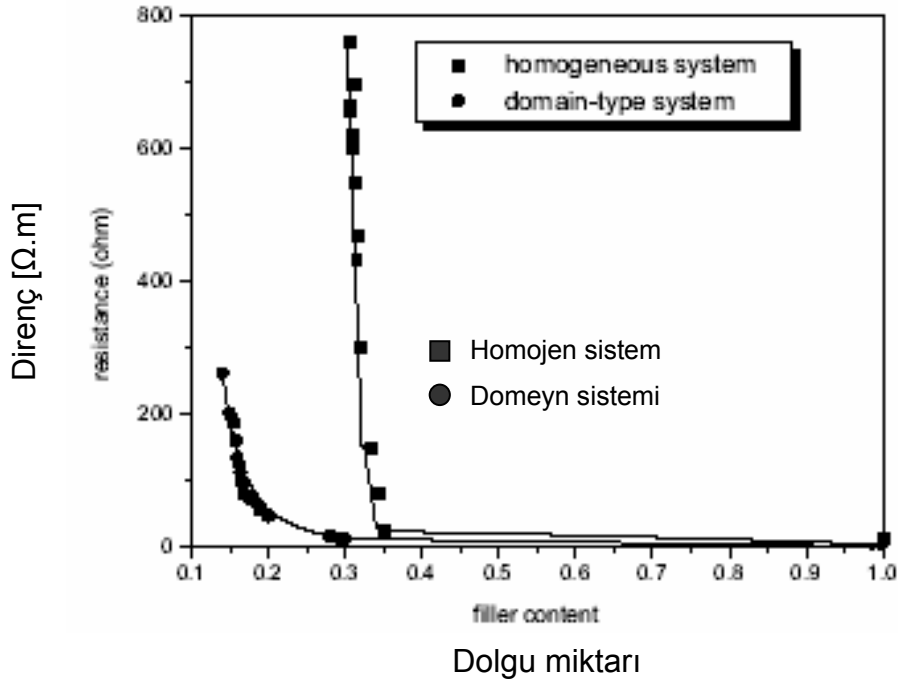
Ağ yapısı benzetimi için Turbo Pascal'da bir çok paket program yazılmıştır. Bu programlar, benzetimi yapılan karbon tozlu polietilen kompozitin perkolasyon eşik konsantrasyonunu hesaplamak ve kompozitin etkin iç direncini ölçmek gibi iki amaç için kullanılmışlardır.



Şekil 1.12. Simulasyonlarda kullanılan molekül yapıları. (a) 6 yakın komşulu (b) 26 yakın komşulu yapı [12]

Deneylerde ise yoğunluğu düşük polietilen (low density polyethylene, LDPE), yoğunluğu $0,922 \text{ gr/cm}^3$ olan matris malzeme ile yoğunluğu $1,50 \text{ gr/cm}^3$ olan iletken karbon tozu kullanılmıştır. Bu karışım 200°C sıcaklıkta 200 MPa basınç altında 10 dakika preslenmiştir. Disk şeklindeki numunelerin kür edilmesinden sonra, elektriksel dirençleri elektrometre ile ölçülmüştür. Simulasyon çalışmalarında iki farklı tip yapı kullanılmıştır: Birinci tip homojen sistemdir; bu sistemde polimer ve karbon molekülleri rasgele dağılmışlardır. İkinci tip alan (domeyn) sistemdir. Bu sistemde komşu moleküller daima karbon, merkezdeki moleküller ise rasgele, karbon veya polimer yapılıdır. Şekil 1.13’de kompozit yapıya katılan siyah karbon hacimsel dolgu miktarı yüzdesine göre homojen ve alan sistemlerin elektriksel dirençleri karşılaştırılmıştır [12].

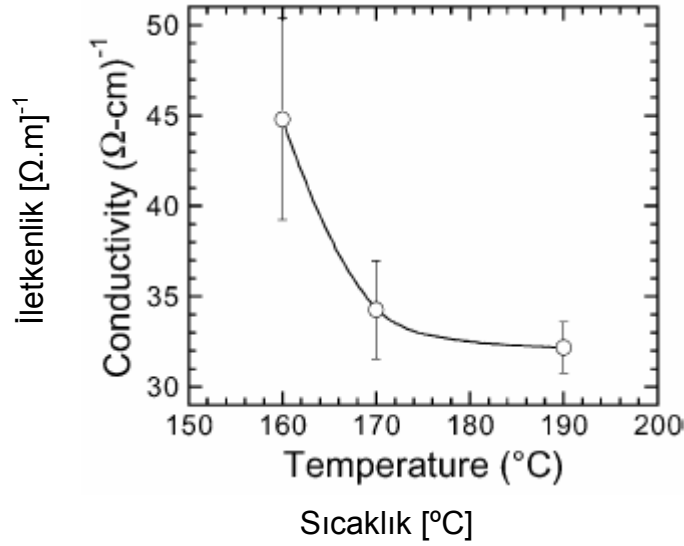
Yapılan deneysel ölçümler sonucunda, kompozit yapı içindeki LDPE granüllerinin çapı arttıkça kompozitin direncinin düştüğü, yani elektriksel iletkenliğin arttığı gözlenmiştir. Bunun yanı sıra karışımda kullanılan karbon tozlarının küresel çapları arttıkça perkolasyon eşik değerinin azaldığı ve geçiş bölgesinin de (smearing region) daraldığı gözlenmiştir [8]. Tüm bu deneysel sonuçların benzetim sonuçları ile benzer olduğu görülmüştür.



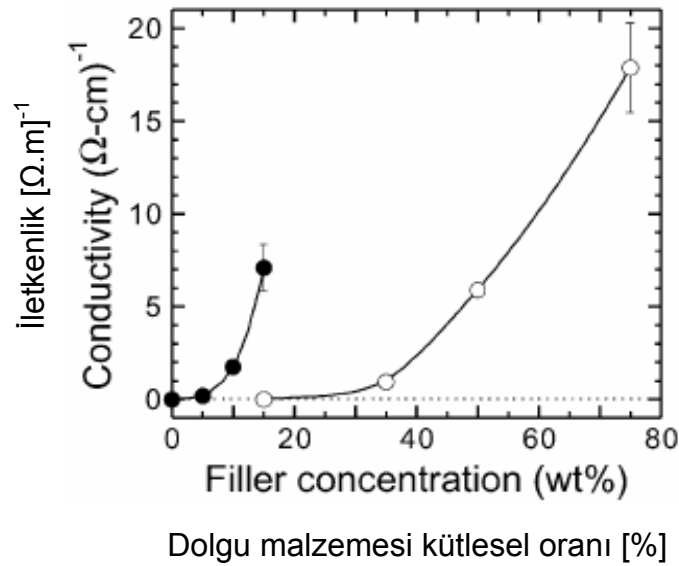
Şekil 1.13. İki farklı model kompozit sistemin iç direncinin hacimsel dolgu oranına göre karşılaştırması [13]

Thongruang ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, dolgu malzemesi olarak grafit (G) ve karbon fiber (CF), matris malzeme olarak yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve en büyük moleküler ağırlığa sahip polietilen olan UHMWPE polietilen türevi kullanmıştır [13]. Numunelerin üretimi için, aynı anda hem HDPE ve hem de UHMWPE polietilen malzemeler birbirleri ile (mekanik olarak bir mikser yardımıyla) karıştırılmış, ardından karışıma sırasıyla G, CF ve G+CF karışımı karıştırılarak farklı konfigürasyonlar elde edilmiştir. Elde edilen karışımlar 40 mmx120 mm² boyutlarında kare tabanlı metal bir kalıba dökülüp 7,2 MPa basınç altında hidrolik preste 160-190°C sıcaklık aralığında dakikada 10°C'lik bir sıcaklık artışı ile tutulmuştur. Bu basınç altındaki karışım 3 dakika sonra 20°C sıcaklığa su sirkülasyonu yardımı ile soğumaya bırakılmıştır. Soğutulmuş malzemeler elektriksel direnç ölçümü için 0,2-0,8 mm kalınlığında, 40x40 mm² boyutlarında, içindeki dolgu malzemesi oranları hacimsel olarak %60 G ve %15 CF olan, ince film plakalar şeklinde işlenmişlerdir. Oda sıcaklığında dört noktadan köprü yöntemi ile numunelerin elektriksel dirençleri ölçülmüştür.

Yapılan ölçüm sonuçlarında iletkenliğin sıcaklıkla olan değişimi Şekil 1.14’de görüldüğü gibi grafikte belirtilmiştir.



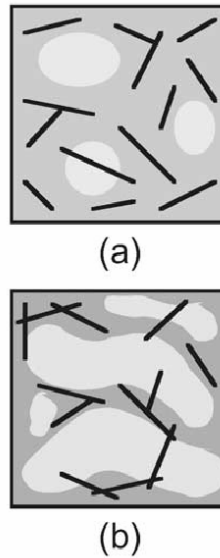
Şekil 1.14. Hacimsel olarak %35 PE, %50 G ve %15 CF’den oluşan kompozit yapının iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi [13]



Şekil 1.15. Bünyesinde G(○) veya CF(●) bulunduran kompozit sistemin dolgu oranının iletkenlikle olan ilişkisi [13]

Ortama katılan G ve CF dolgu malzemelerinin % konsantrasyonları ile elektriksel iletkenlik arasındaki ilişkiler ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 1.15'de gösterilmiştir. Bu grafik, %75/%25 sırasıyla HDPE/UHMWPE oranlarında karıştırılan matris malzeme içindir. Grafik, G ve CF partiküllerinin iletkenlik-hacimsel katılım oranı değerlerini de yansıtmaktadır. Grafikten CF'li yapının perkolasyon eşik değerinin G'li yapının eşik değerinden daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Bununla beraber, CF'de G'ye göre dolgu oranı arttıkça iletkenlik daha fazla artış göstermektedir.

Bunun sebebi, CF parçacıkları G parçacıklarına oranla daha uzundur. Böylece CF parçacıkları G parçacıklarına oranla daha uzun *sürekli iletkenlik zinciri* yapısına sahip olmaktadır.

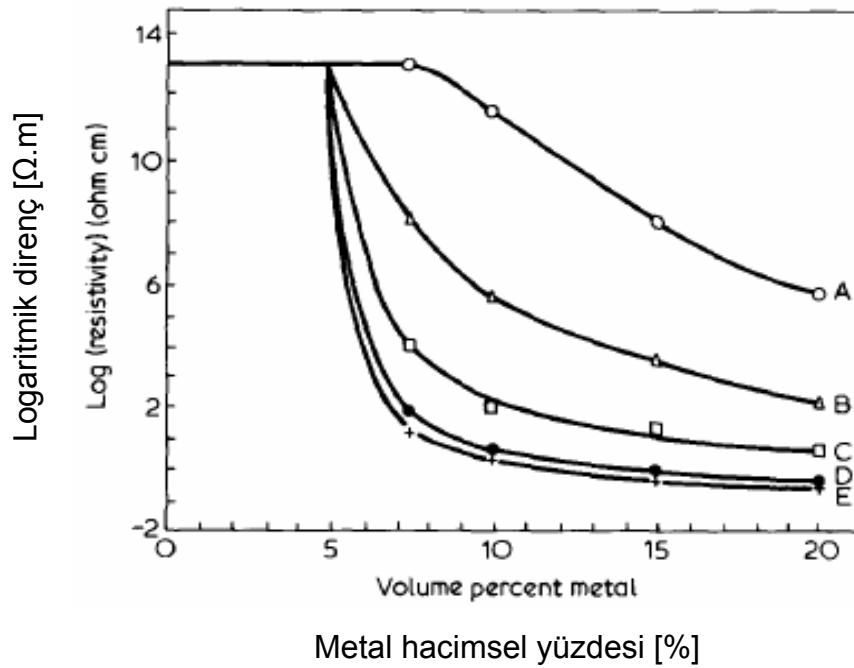


Şekil 1.16. Kompozit yapı içindeki üç farklı katmanın (faz) EP, G, CF bir birleriyle olan ilişkisi, (a) G oranı az (b) G oranı köprü oluşturmak için yeterli (çift perkolasyon durumu) [13]

Bu modelde, birincil dolgu malzemesi (örneğin G) bir iletkenlik kanalı oluşturacak oranda katıldıktan sonra ikincil dolgu malzemesi (CF) hacim içine yayılarak daha önceki dolgu malzemesinin oluşturduğu iletkenlik kanallarını birbirine bağlar, arada köprüler kurar. Şekil 1.16-b'de bu durum temsili olarak görülmektedir. Şekil 1.16-a'da ise G oranı köprü oluşumu için yetersizdir. Sonuçta, ikincil dolgu malzemesi (CF) çift perkolasyon ağı köprüsü kurarak

kompozitin elektriksel iletkenliğini belirgin oranda artırır. Bu model aynı zamanda kompozit yapının mekanik özelliklerini de iyileştirir [13].

Bhattacharyya çalışmasında PVC-Cu kompozit malzemesinin elektriksel davranışlarını incelemiştir [14]. Şekil 1.17’de PVC-Cu kompozit malzemenin elektriksel direncinin değişik sıkıştırma basınçlarına göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 1.17. Logaritmik direncin dolgu malzemesi hacimsel yüzdesine göre değişimi, A, 10 MPa; B, 20 MPa; C, 30 MPa; D, 45 MPa; E, 60 Mpa [14]

PVC ve bakır tozları ortalama tanecik büyüklüğü sırasıyla 128 μm ve 7 μm olan, 130-140°C sıcaklık altında silindirik bir kalıp içinde karıştırılıp Şekil 1.17’de verilen basınçlarda sıkıştırılarak kür edilmiştir. Elde edilen ara ürün parçalar 1.5x10x7 mm boyutlarında dikdörtgenler prizması şeklinde hazırlanmışlardır. Son durumdaki numunelerin elektriksel iletkenliklerinin ölçülebilir hale gelmesi için 50°C’lik bir fırında 10 gün bekletilmişlerdir. Şekil 1.17’de verilen grafikten, Cu-PVC kompozit malzemenin elektriksel direnç ile sıkıştırma basıncının çarpımsal tersi arasındaki ilişki matematiksel olarak

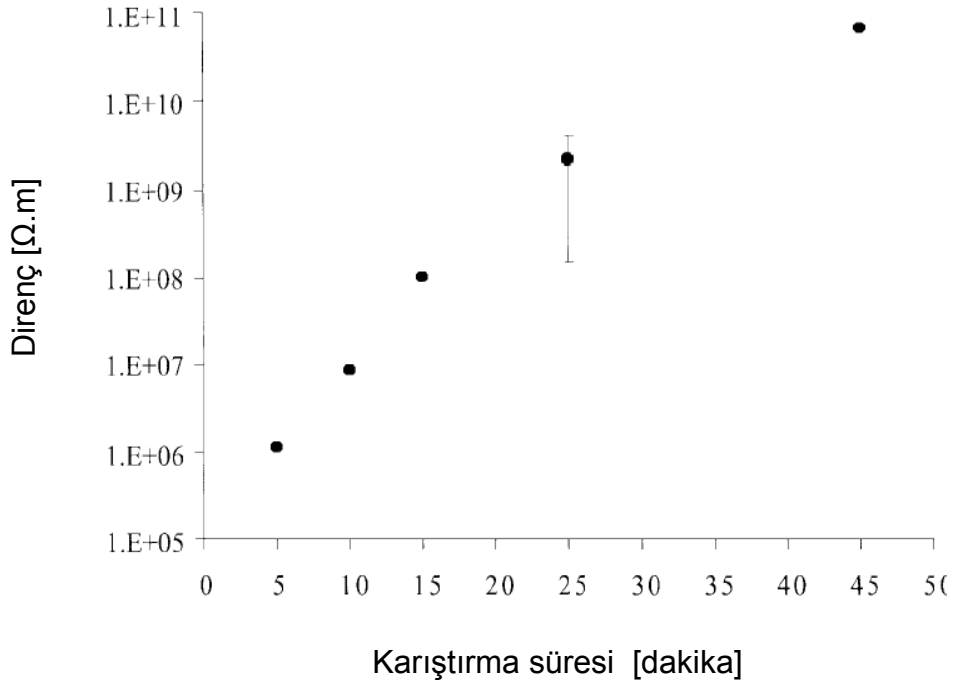
$$R=\exp(K/P) \quad (1.5)$$

şeklinde elde edilmiştir. Eşitlikte K bir sabit, P sıkıştırma basıncı ve R ise elektriksel dirençtir. İletken toz takviyeli polimer kompozit yapıların elektrik iletkenliğini etkileyen boyut ve şekil gibi önemli faktörler mevcuttur. Kompozit yapının herhangi bir düzleminden alınan kesitteki iletken toz tanelerinin dağılımı, birbirinden olan uzaklıkları ve birbiri ile olan temasları da elektriksel iletkenliği etkileyen bir diğer önemli faktördür. Bütün bu faktörler bir parçacıktan diğerine olacak elektriksel boşalmaları doğrudan etkiler. Partiküller arası temas direnci, kompozit yapı içindeki dolgu malzemesinin konsantrasyonu ile değişim gösterir. Konsantrasyon perkolasyon eşik değerini geçtiğinde partiküller arası doğrudan temas meydana gelir. Bu andan itibaren oluşan iletkenliğe *metalik iletkenlik* denir [14].

Kalyon ve arkadaşları, ortalama tane boyutu 70 µm olan grafit tozu ile ortalama tane boyutu 5 µm olan grafit tozunu, karışım oranı kütlece 0,25 olacak şekilde maksimum doluluk oranı için karıştırmışlardır. Elde edilen toz karışımı, polisitren kopolimer elastomer reçine içine katılarak kompozit yapı elde edilmiştir. Deneylerde numunelerin elektriksel iç dirençleri ölçülmüştür [15].

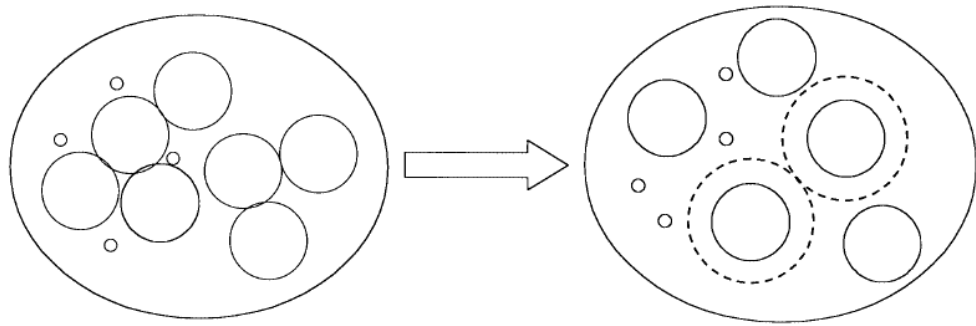
Deneylerde kullanılacak numuneler kütsel olarak %33 grafit, %67 polimer reçine kullanılarak 51 kPa vakum ve 95°C ortam sıcaklığı şartlarında 64 dev/dk çevirme hızında bir karıştırıcı yardımı ile 5, 10, 20 ve 40 dakikalık periyotlarda karıştırılarak elde edilmişlerdir. Numuneler 7,62 cm çapında ve 0,64 cm kalınlığında disk şeklinde hazırlanarak hacimsel direnç ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar Şekil 1.18'de hacimsel direnç-karıştırma süresi şeklinde gösterilmiştir. Grafikten görüleceği gibi, hacimsel direnç, karıştırma süresiyle üstel bir hızda artmakta yani iletkenlik azalmaktadır.



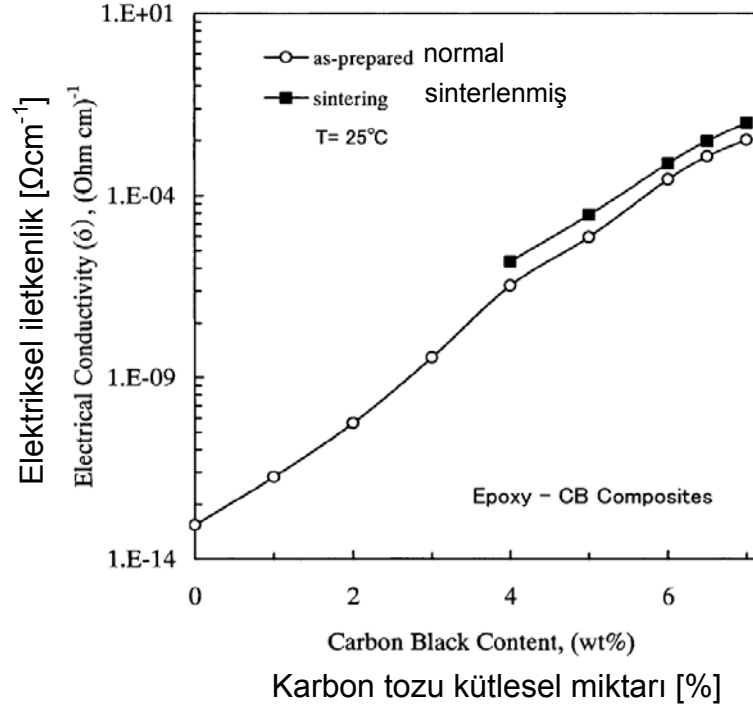
Şekil 1.18. Hacimsel direncin karıştırma süresine göre değişimi [15]

Kompozit yapı karıştırıldıkça karışımın homojenliği artmakta, kür sonrası iç yapı içindeki iletken toz tanelerinin uzaysal dağılımı daha homojen ve daha düzgün olmakta, böylece iletken parçacıkların etrafı yalıtkan reçine matris malzeme ile daha iyi bir biçimde kaplanmakta ve iletkenlik düşmektedir (Şekil 1.19). Dolayısıyla kaliteli ve uzun süreli karıştırma, elektriksel iletkenliği azaltıp hacimsel iç direnci arttırmaktadır [15].



Şekil 1.19. Karışım süresi attıkça iletken tanelerin yalıtkan polimer matris malzeme ile kaplanmasına ilişkin temsili şekil [15]

El-Tantawy ve arkadaşları yaptıkları deneysel çalışmada, epoksi reçine içine katmış oldukları karbon dolgu malzemesinin elektrik iletkenliğinin dolgu malzemesinin konsantrasyonuna ve sinterlemeye göre değişimini incelemiştir [16].



Şekil 1.20. Karbon dolgu malzemeli epoksi matris kompozit elektrodun sinterlenmiş ve sinterlenmemiş elektriksel iletkenliğinin konsantrasyona göre değişimi [16]

Bu çalışmada bağlayıcı olarak 815 tipi ticari epoksi reçine, dolgu olarak ortalama tane büyüklüğü 20 μm olan karbon tozu kullanılmıştır. Numuneler kütleli olarak karbon/epoksi oranı sırasıyla, 4/6, 5/5, 6/4, 6.5/3.5 ve 7/3 olacak şekilde karıştırılarak teflon kalıplara dökülmüş ve sonra 80°C sıcaklıkta 3 saat kür edilmiştir. Diğer üretilen kompozit grubu ise 80°C'de 1 hafta kuru havaya maruz bırakılarak kurutulmuştur. Elektriksel iletkenlikler (σ) çift-elektrot metodu ile ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonunda kompozit malzemenin elektriksel iletkenliğinin karbon konsantrasyonu ile orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra elektriksel iletkenliğin sinterleme (pişirme) ile belirgin oranlarda arttığı da tespit edilmiştir (Şekil 1.20).

Blythe, polimer malzemelerin geleneksel direnç ölçümü metotlarından bahsetmiştir. Blythe'a göre iletkenlik ölçümleri temelde iki farklı başlık etrafında incelenmelidir [17]:

- Düşük hacimsel dirence sahip malzemelerin ölçümü
- Yüksek hacimsel dirence sahip malzemelerin ölçümü

Düşük hacimsel dirence sahip malzemelerin direnç ölçümlerinde temas direnci (*contact resistance*) önemli bir faktördür. Hassas ölçmedeki ana problem, elektrot ile numune arasındaki bu temas direncinin ölçümüdür. Temas direnci elektrotlara bir basınç uygulanarak azaltılabilir. Yüksek hacimsel dirence sahip malzemelerin direnç ölçümlerinde ise, toplam direnci azaltmak için ince iletken elektrotlar kullanılır. Burada temel problem, yüksek gerilim kaynağından ampermetreye tersi olarak da numunenin kendi içinden olan elektrik kaçaklarıdır. Bunun için numune yüzeyine yerleştirilen *düşük-gerilim koruyucu elektrot* (low-voltage guard electrode) sayesinde oluşabilecek herhangi bir akım kaçağı engellenebilir. Akım değeri göstergede denge değerine ulaşana kadar her hangi bir ölçüm alınmamıştır. Göstergeden okunacak akım çok düşük fakat uygulanan gerilim çok yüksek olduğundan direnç değeri Ohm Kanununa göre çok yüksek çıkmıştır.

Blythe, yapmış olduğu deneysel çalışmaların sonucunda aşağıdaki yargılara varılmıştır:

- Düşük dirençli malzemeler için, direnç ölçümünün güvenilirliği açısından temas direncinin büyük önemi vardır. Bu temas direnci etkisi *4-nokta metodu* ile minimize edilebilir.
- Yüksek dirençli malzemeler için, temas direnci çok önemli değildir. Fakat numune yüzeylerinden olan akım kaçakları güvenli ölçüm için önemli bir faktördür. Bu sebeple koruyucu elektrot ile *3-nokta metodu* kullanılarak yapılan ölçümler çok daha hassas ölçüm sonuçları verir [18].

Guoquan yapmış olduğu çalışmada PVC reçine içine kattığı kısa-karbon fiberli kompozit yapının hacimsel direncini farklı yöntemlerle ölçmeye çalışmıştır [19]. Bu yöntemler:

- Direkt kontak metodu
- Çelik iğneli elektrot metodu
- Potansiyel farkı metodu

Bu üç farklı metotta ortak amaç temas direncini azaltmaya çalışmaktır. Deneylerde kullanılacak numuneler, uzunlukları 1,2, 2, 3 ve 5 mm olan karbon-fiberler PVC reçine ile karıştırılıp 180°C'lik fırında 10 dakika pişirilerek hazırlanmıştır. Kompozit numuneler 1mm kalınlığında tabakalar şeklinde hazırlanmıştır. Ölçümler 23±2°C ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve sonuçların, Eş. 1.6'ya uyduğu görülmüştür.

$$\rho_v = \frac{A \cdot R}{t} \quad (1.6)$$

Burada,

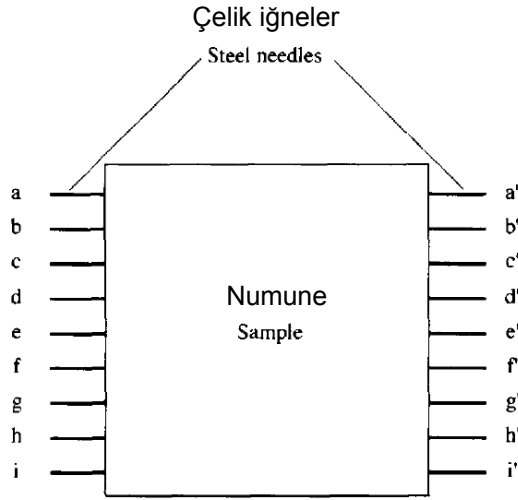
t : Karşılıklı iki bağlantı ucu arası mesafe (10 cm)

R : Avometreden ölçülen direnç değeri

A : Numunenin kesit alanı (1cm²)

ρ_v : Kompozit yapının *bulk* hacimsel iç direncidir.

İkinci aşamada, çelik iğne elektrot ile ölçme metodu denenmiştir. Burada kullanılan çelik iğne elektrotlar ile kontak direnci azaltılmaya çalışılmıştır. Bir önceki metoda benzer olarak aynı devre elemanları kullanılmış ancak, bu sefer iletken teller iğne uçlara bağlanmıştır. Bu iğneler Şekil 1.21'de gösterildiği gibi,



Şekil 1.21. Çelik iğne elektrot sistemi [19]

1 cm aralıkla 9 adet yan yana ve kompozit numuneye 3 mm girecek şekilde yerleştirilmişlerdir. Üçüncü metotta ise Şekil 1.22’de gösterildiği gibi iğne uçlarının kontak direncinin ortadan kaldırılması için iletken uçlar kompozit üzerinde herhangi iki noktadan tutturulmuştur. Bu tarz bağlantıya 4-kutup metodu da denmektedir (ISO 3915 veya ISO 1853). Numunelerin hacimsel dirençleri Eş. 1.7’de verilen ifade ile hesaplanmıştır.

$$\rho_v = \frac{U}{I} \cdot \frac{A}{d} \quad (1.7)$$

Burada,

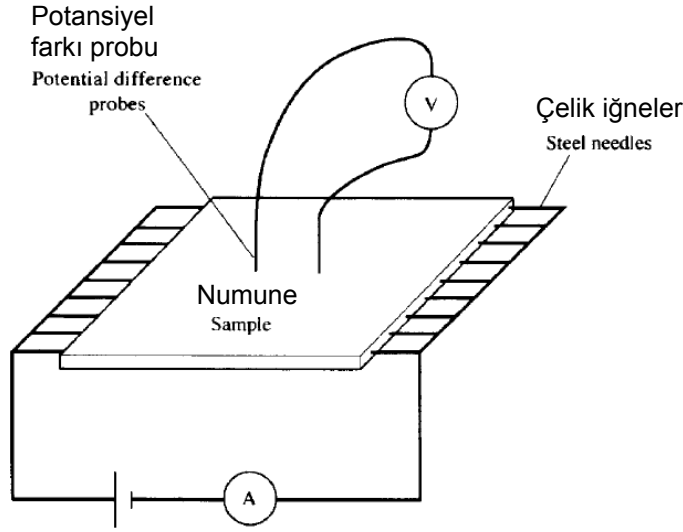
U : İki nokta arası potansiyel farkı

I : Ampermetreden ölçülen akım değeri

A : Numunenin kesit alanı

d : İki nokta arası mesafedir.

Çizelge 1.3’de kompozit malzeme içine katılan karbon-fiber konsantrasyonu ile her üç metoda göre elde edilen hacimsel dirençler [Ωcm] verilmiştir.



Şekil 1.22. Potansiyel-fark metodu ölçüm düzeneği [19]

Çizelge 1.4'de ise her üç metoda göre ölçülen hacimsel dirençlerin karbon-fiber uzunluğu ile olan ilişkileri verilmiştir.

Çizelge 1.3. Her üç metoda göre ölçülen hacimsel dirençlerin karbon-fiber konsantrasyonu ile olan ilişkileri [19]

Concentration of carbon fibre (phr) Karbon-fiber konsantrasyonu	Log volume resistivity (Ω cm)			Logaritmik Hacimsel Direnç
	Method A	Testing methods Method B	Method C	
0.5	7.73	6.88	—	
1.0	2.89	2.35	2.05	
1.5	2.37	1.79	1.30	
2.0	1.96	1.45	0.66	
4.0	0.89	0.15	0.08	

Elde edilen bu sonuçlara göre, potansiyel farkı metoduna göre (metot C) ölçülen değerlerin diğer iki metotla ölçülen değerlere oranla daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun sebebi kontak-direnç etkisinin yok edilmesidir. Bu yüzden potansiyel farkı metodu yüksek dirençli kompozit sistemlerin ölçümü için elverişsizdir [19, 20].

Çizelge 1.4. Her üç metoda göre ölçülen hacimsel dirençlerin karbon-fiber uzunluğu ile olan ilişkileri [19]

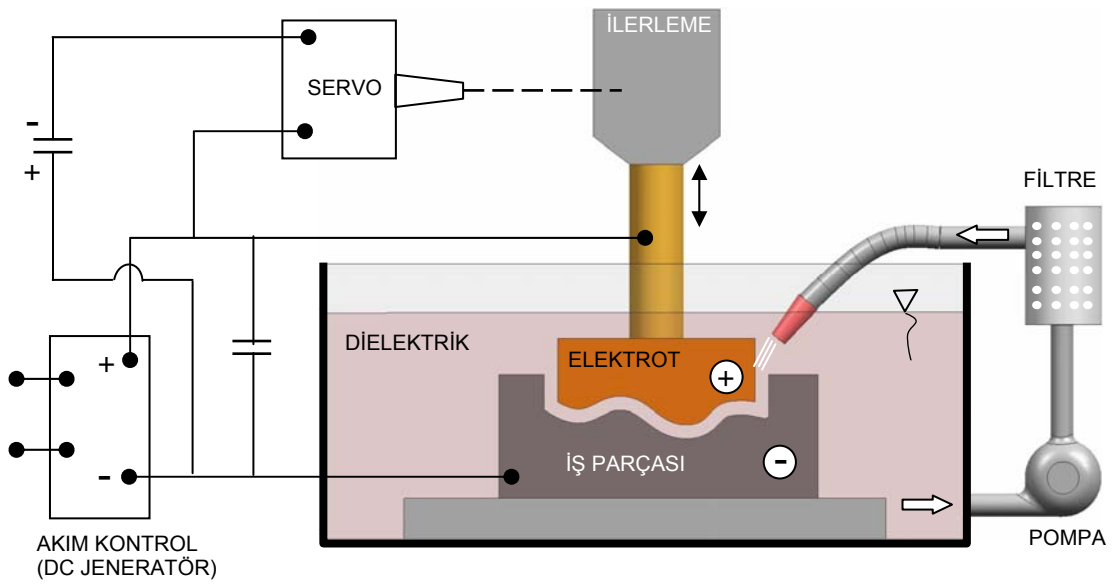
<i>Initial length of carbon fibre (mm)</i> Karbon-fiber'in ilk boyu	<i>Log volume resistivity (Ω cm)</i> Logaritmik Hacimsel Direnç		
	<i>Method A</i>	<i>Testing methods Method B</i>	<i>Method C</i>
1.2	6.30	5.50	—
2.0	2.10	1.72	1.25
3.0	1.96	1.34	0.85
5.0	1.39	0.58	0.25

Lazzaroni ve arkadaşları polimer esaslı alüminyum takviyeli yapıda polimer molekülleri ile metal yüzeyi arasındaki etkileşimi incelemiştir [21]. Deneysel çalışmalarda poliasetilen içine katılan küresel şekilli alüminyum tozu takviyeli kompozit sistemin kür olmasından sonra ince film şeklinde hazırlanan numuneler 1000Å° kalınlığında altın tabaka ile kaplandıktan sonra ultraviyole fotoelektron spektrometresinde ve X-ray'de çekilen görüntüleri incelenmiştir. Yapılan gözlem ve deneyler sonunda birbirine bağlı (konjuge) polimer moleküllerindeki karbon atomları ile alüminyum atomları arasında kovalent bağın oluştuğunu tespit etmişlerdir.

2. ELEKTROEROZYON İLE İŞLEME (EEİ)

2.1. EEİ'nin Fiziksel Prensibi

EEİ enerji boşalması, elektronik kontrollü olarak mikro-saniye aralıklarda arklarla sağlanır ve ark sonucu oluşan tahribat kontrol altına alınabilir.



Şekil 2.1. Bir elektroerozyon sisteminin temel elemanları

EEİ, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi bir dielektrik sıvı içerisinde, daldırılan bir elektrot ve işlenecek iş parçası ile gerçekleştirilir [22]. EEİ'de kıvılcım boşalmasının fiziksel oluşumu dokuz aşamada tanımlanabilir; Bunlar:

1. Elektrot ile iş parçası arasında aralığın en küçük olduğu yerde, güç kaynağının açık durumuna getirilmesinden sonra gerilim yükselir veya dielektriğin yerel iletkenliğinin en yüksek olduğu yerde bir elektrik alanı oluşur.
2. Negatif olarak yüklenmiş partiküller (katyonlar), negatif olarak yüklenmiş iş parçasının yüzeyinden fırlatılır. Bunlar, malzeme çifti arasında bir köprü

oluşturur. Gerilim, düşmeye başlar, fakat akım hala sıfır olarak devam eder.

3. Elektrot (takım) tarafında üretilen negatif yüklü parçacıklar (anyonlar), yani elektronlar aralıkta bulunan dielektrikten çıkan nötr parçacıklarla çarpışır ve yeni pozitif ve negatif parçacıklar üretmek üzere parçalanırlar. Yüklü parçacıkların oluşumu yüzünden dielektrik akışkanın izolasyon etkisi bozulur ve gerilim düşmeye başlar. Boşalmanın ilk aşamasını temsil eden akım, akmaya başlar.

4. Bir buhar tüneli oluşmaya başlar, aradaki iletkenlik yükselir, akım akışı yükselmeye başlar ve gerilim düşer. Patlama hızında negatif ve pozitif parçacık oluşumu devam eder ve pozitif parçacıklar negatif elektroda, negatif parçacıklarda pozitif iş parçasına taşınmaya başlar. İş parçasına çarpan negatif parçacıkların etkisi, küçük bir alanın erimesine sebep olur.

5. Boşalma tüneli, yanlamasına (radyal yönde) genişlemeye başlar ve akım maksimum değerine ulaşır. Sıcaklık yükselirken bir buhar bölgesi oluşur ve bu buhar bölgesinin içerisinde basınç (bu bölgede dielektrik sıvının da buharlaşması ile basınç 20 atm'ye kadar çıkar) yükselmesi meydana gelir.

6. Kıvılcım, bu aşamada en büyük ısı enerjisini üretebilmektedir (sıcaklık 8000-12000 °K değerleri arasına çıkar). Buhar bölgesi hızlı biçimde genişlemeye devam eder, gerilim ve akım aynı seviyede kalır, elektriksel güç kesilir ve elektrik pulsu biter.

7. Elektriksel güç kesilirken, akımda ani bir düşme oluşur ve bu yüklü parçacıkların sayısında ani bir düşüşle sonuçlanır. Artık ısı üretimi de yoktur. Boşalım kanalı yok olur ve işleme sonucu oluşan talaşlar, dielektrik sıvı içine karışır. Burada sözü edilen dielektrik, sürekli veya aralıklı olarak kıvılcım aralığına talaşların birikmesini önlemek için pompalanmaktadır.

8. Buhar kanalı söner (kaybolur) ve malzeme çifti (elektrot/iş parçası) yüzeyleri hızlıca soğutulur ve dielektrik sıvı tarafından temizlenir.

9. Yeni bir elektriksel kıvılcım boşalımı üretmek amacıyla yeniden elektrik uygulanmadan, dielektrikteki iyonların kaybolması (deiyonizasyon) için zaman tanınır [22, 23].

EEİ’de elektrotlarda meydana gelen aşınma aynı değildir. Bu durum;

- Kutuplamaya,
- Malzeme ısı iletkenlik katsayısına,
- Ergime noktasına,
- Boşalımın şiddet ve süresine bağlıdır.

Malzeme kaybı, elektrot üzerinde olduğu zaman, “aşınma” iş parçası üzerinde olduğu zaman da, “işleme” olarak adlandırılır. Uygun elektrot malzemesi seçimiyle, kutup, akım şiddeti, boşalma süresi değiştirilerek hacimsel olarak, %99,8 iş parçası işleme ve %0,2 elektrot aşınması elde etmek mümkündür. Uygulanan bazı özel yöntemlerle 0,1-0,2 μmR_a kalitesinde bitirme yüzeyi elde etmek mümkündür [22, 23].

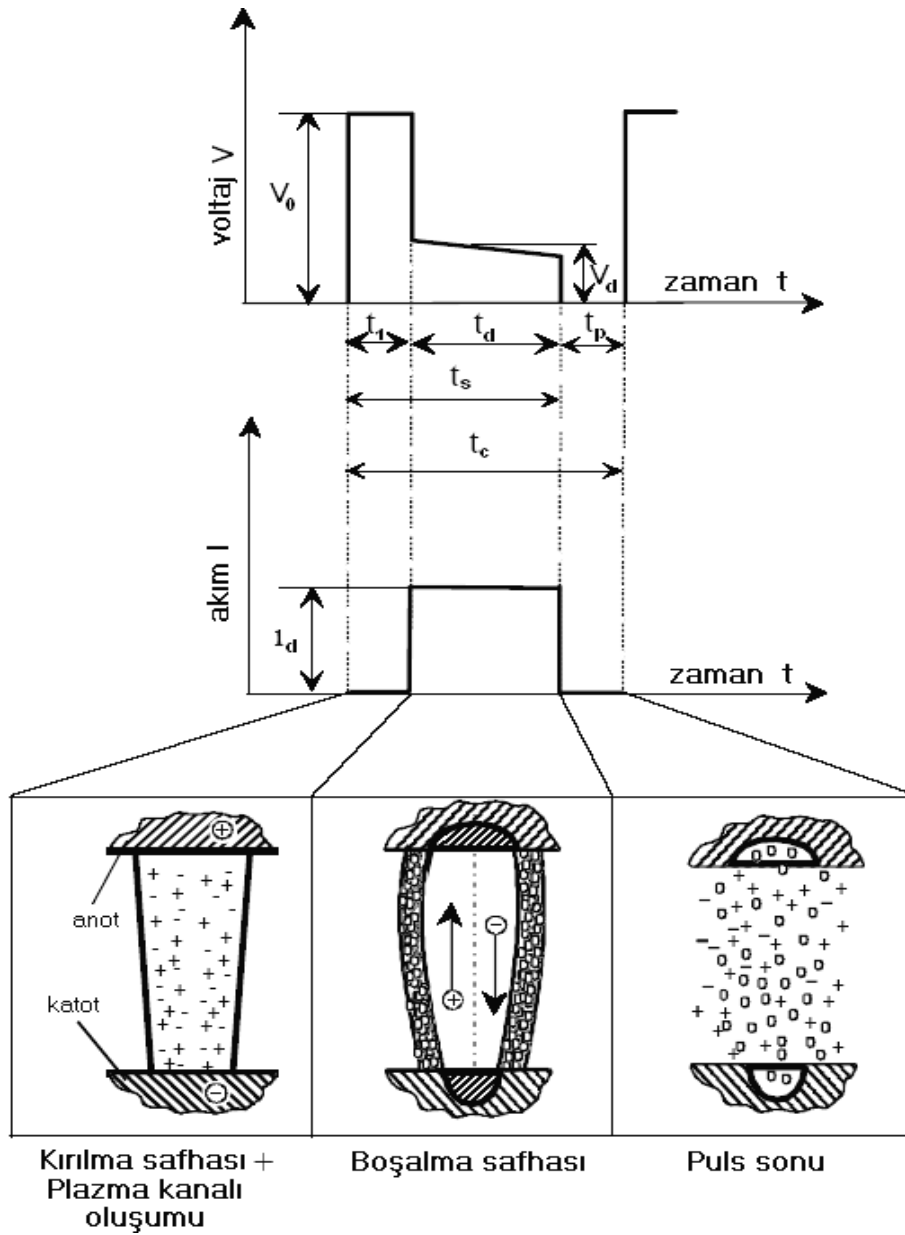
2.2. EEİ’de İşleme Parametreleri

EEİ ile işlemenin temel parametreleri şu alt başlıklara ayrılabilir:

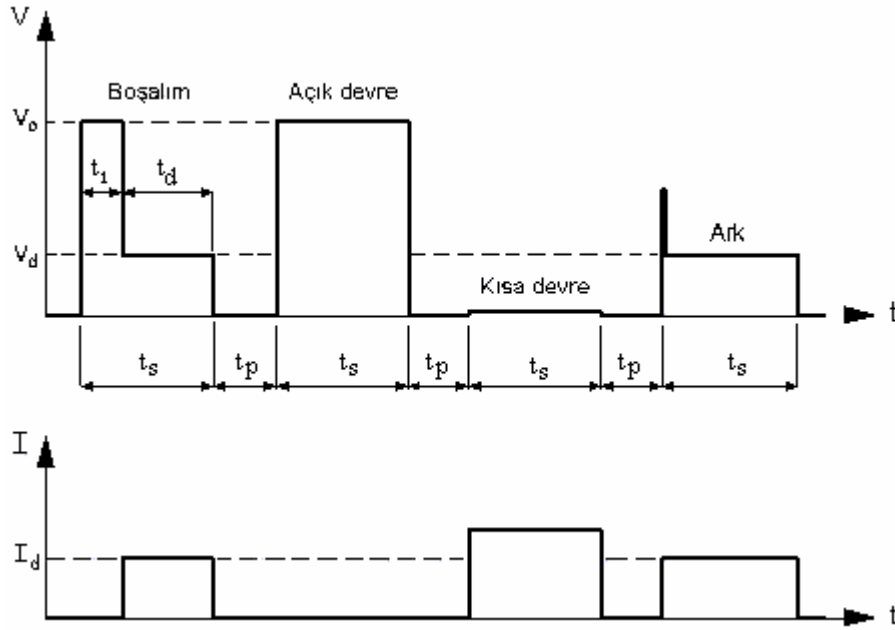
- Elektriksel parametreler,
- Vurum jeneratörü karakteristikleri,
- Dielektrik sıvı,
- Elektrot özellikleri,
- İş parçası özellikleri.

2.2.1. EEİ'de elektriksel parametreler

İşleme aralığındaki elektriksel boşalmanın temel elektriksel parametreleri olan tipik gerilim ve akım değişimleri ($V(t)$ ve $I(t)$) Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'de gerilim kontrollü bir vurum jeneratörü için gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Akım ve gerilimin zamana göre değişimi ve bu zamanlara karşılık gelen elektrot ve iş-parçası aşınma aşamaları [24]



Şekil 2.3. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe, vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri [25]

Boşalım (vurum) enerjisi (E_d)

Gerilim kontrollü vurum jeneratöre sahip elektroerozyon tezgahlarında vurum enerjisi (E_d) Eş. 2.1 ile hesaplanmaktadır. Birim zamanda harcanan boşalma enerjisi ise boşalım gücü olarak Eş. 2.2’de tanımlanmıştır.

$$E_d = \int_t V_d(t) \cdot I_d(t) \cdot dt \cong V_d \cdot I_d \cdot t_d \quad (2.1)$$

$$P_d = V_d \cdot I_d \quad (2.2)$$

Burada,

V_d : Boşalım gerilimi

I_d : Boşalım akımı

t_d : Boşalım süresi

Bu eşitlikte, V_d ve I_d belli iş parçası ve elektrot çiftleri ve dielektrik ortamı için sabit, t_d ise boşalım ortamının o andaki karakteristiklerine bağımlı stokastik bir zaman değişkenidir.

Boşalım akımı (I_d)

Kıvılcım boşalması sırasında meydana gelen akım değeridir. Yüzey kalitesini ve İİH'nı etkileyen en önemli parametredir. Endüstriyel amaçlı elektroerozyon tezgahları 0,5 ile 100 A boşalma akımı aralığında çalışır. Çok yüksek boşalım akımı değerleri, aşırı ısının iş parçası yüzeyine zarar vermesinden dolayı nadiren kullanılmaktadır.

Ortalama işleme akımı (I)

Ortalama işleme akımı, bir elektroerozyon döngüsünde kıvılcım oluşması esnasında görülen akım değerlerinin ortalamasıdır. Bu değer, işleme boyunca tezgahdaki ampermetreden okunabilen bir değerdir.

Vurum süresi (t_s)

Elektrot ile iş parçası arasında, gerilimin ilk uygulanma anı ile kıvılcım boşalımının bitiş anı arasındaki toplam süre olarak ifade edilebilir. Elektrot aşınmasını ve yüzey kalitesini etkileyen önemli bir parametredir.

Bekleme (ara) süresi (t_p)

Birbiri ardına üretilen iki vurum arasında geçen süredir. İşlem talaşlarının ortamdan uzaklaştırılması ve dielektrik sıvının deiyonize olması bekleme süresi boyunca gerçekleşmektedir. Bekleme süresi, toplam işlem süresini artırdığından zaman kaybı gibi görünmesine rağmen, EEİ'nin kararlılığı için gereklidir. Bekleme süresi çok kısa tutulursa koparılan işleme artıkları ortamdan uzaklaşacak süreyi bulamazlar. Bunun neticesinde, işleme artıklarının toplanmasıyla elektriksel alan sürekli aynı noktada oluşur. Bu

durumda hep aynı noktada kıvılcım (ark) oluşacağı için iş parçasında arzu edilmeyen tahribatlar meydana gelir.

Gecikme süresi (t_1)

Kıvılcım boşalması öncesinde dielektrik sıvının iyonize olması için geçen süredir.

Boşalım süresi (t_d)

İşleme aralığı boyunca akımın boşaldığı süredir.

Vurum çevrim süresi (t_c)

Vurum süresinin (t_s) ve bekleme süresinin (t_p) toplamıdır (Eş. 2.3).

$$t_c = t_s + t_p \quad (2.3)$$

Açık devre gerilimi (V_o), boşalım gerilimi (V_d) ve işleme aralığı

Açık devre gerilimi (V_o), vurum jeneratörü tarafından uygulanan ve genellikle 60-120V arasında tutulan, boşalımının olmadığı anda işleme aralığında görülen gerilim değeridir (Şekil 2.2). Boşalım gerilimi (V_d), elektrot ile iş parçası arasında kıvılcım boşalımının devam ettiği sürece ölçülen gerilim değeridir.

Dielektrik sıvı iyonize olduğu anda gerilim değeri, açık devre gerilimi değerinden boşalım gerilimi değerine düşmektedir (Şekil 2.2). Genelde boşalım gerilimi, 80V'luk açık devre geriliminde bakır-çelik elektrot-iş parçası çifti ve gazyağı dielektrik sıvı uygulaması için ortalama 23V'dur [25]. İşleme aralığı, elektrot ile iş parçası arasındaki işleme esnasında servo ilerleme mekanizması tarafından sabit tutulan mesafedir. Dalma tipi elektroerozyon işlemlerinde işleme aralığı 0,01 ile 0,05 mm arasındadır.

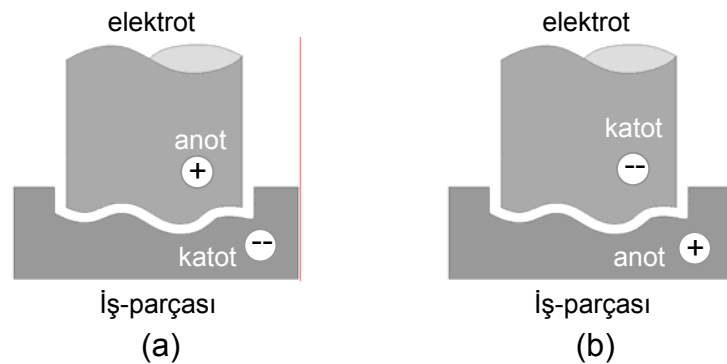
Kutuplama (Polarite)

Kutuplama, elektrotta göre kıvılcımın akış yönünü belirleyen durumdur. Kutuplama, işleme ve aşınma hızını belirleyici bir faktördür.

Çizelge 2.1. Farklı malzemelere göre kutuplama

İşparçası	Kaba İşleme	İnce İşleme
Takım Çeliği	+	+ / -
Paslanmaz Çelik	+	+ / -
Alüminyum	+ / -	+ / -
Titanyum	-	-
Karbür	-	-
Bakır	-	-

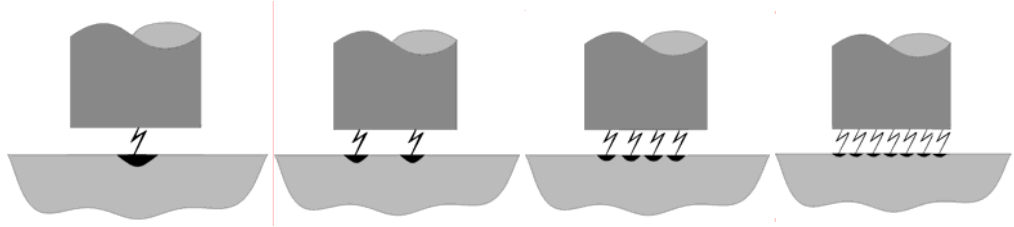
Uygulamanın tipine ve elektrot veya iş parçası malzemelerine bağlı olarak kutup seçimi kaba ve ince işleme için önem arz etmektedir. Çizelge 2.1’de farklı elektrot malzemeleri ve kaba veya ince işleme koşulları için kutuplama tipleri görülmektedir. EEİ’de elektrot (+) veya (-) kutba bağlanabilmektedir. Benzer durum iş parçası için de geçerlidir. EEİ’de kutuplama, Şekil 2.4’de gösterildiği gibi elektrotun sahip olduğu kutba göre adlandırılır.



Şekil 2.4. Elektrot (takım) kutuplama türleri: (a) pozitif kutuplama, (b) negatif kutuplama

Vurum frekansı (f_c)

Jeneratör tarafından elektrotla iş parçası arasına birim zamanda uygulanan gerilim vurumlarının sayısıdır. Diğer işleme parametreleri sabit kalmak koşulu ile vurum frekansı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Bunun sebebi işleme için gerekli boşalım enerjisinin fazla sayıda kıvılcım tarafından işleme yüzeyine iletilmesidir. Böylelikle yüzeyde oluşan krater boyutları küçülmektedir (Şekil 2.5). EEİ'de hassas işleme yapılırken yüksek vurum frekansı tercih edilmektedir.



Şekil 2.5. Vurum frekansının yüzey kalitesine etkisi [25]

2.2.2. Jeneratörler

Jeneratörler EEİ metodu için gerekli olan elektriksel vurumları üretmede kullanılan devrelerdir. EEİ'de aşağıda verilen tip jeneratörler kullanılmaktadır:

- RC (rezistans-kapasitans) jeneratörleri
- Vurum jeneratörleri
- Dönüşümlü impuls jeneratörleri
- Sabit impuls jeneratörleri.

Bunlar içinde en çok kullanılan jeneratörler vurum tipi jeneratörlerdir. Vurum jeneratörleri kare dalga formu üreten jeneratörlerdir. Kare formu önceden ayarlanabilen frekanslarda devreyi açıp kapayabilen bir anahtar yardımı ile üretilir. Bu jeneratörlerde her bir boşalmada hem bitirme yüzeyi hem de işleme verimliliği aralık değiştirmesine rağmen düşüktür. Bu verimi

yükseltmek amacıyla, malzeme çifti arasında, gerilim periyodik olarak uygulanır. Aralığın fiziksel konumu ve ölçüsü boşalmayı oluşturabilecek sınırlar arasında kalmak zorunda olduğundan, boşalım oluşumundan hemen sonra gerilim uygulaması kısa bir süre bekletilir (Şekil 2.2, gecikme süresi, t_d). Bu sayede İİH'da büyük artış, EAH'da ise azalma meydana gelir.

2.2.3. Dielektrik sıvı

EEİ yönteminde çoğunlukla, hidrokarbon bazlı (parafin, madeni yağlar, gazyağı vb.) ve silikon esaslı yağlar dielektrik sıvı olarak kullanılmaktadır. EEİ yönteminin verimli bir şekilde gerçekleşebilmesi için dielektrik sıvının iki özelliğe sahip olması gerekmektedir. Bunlar:

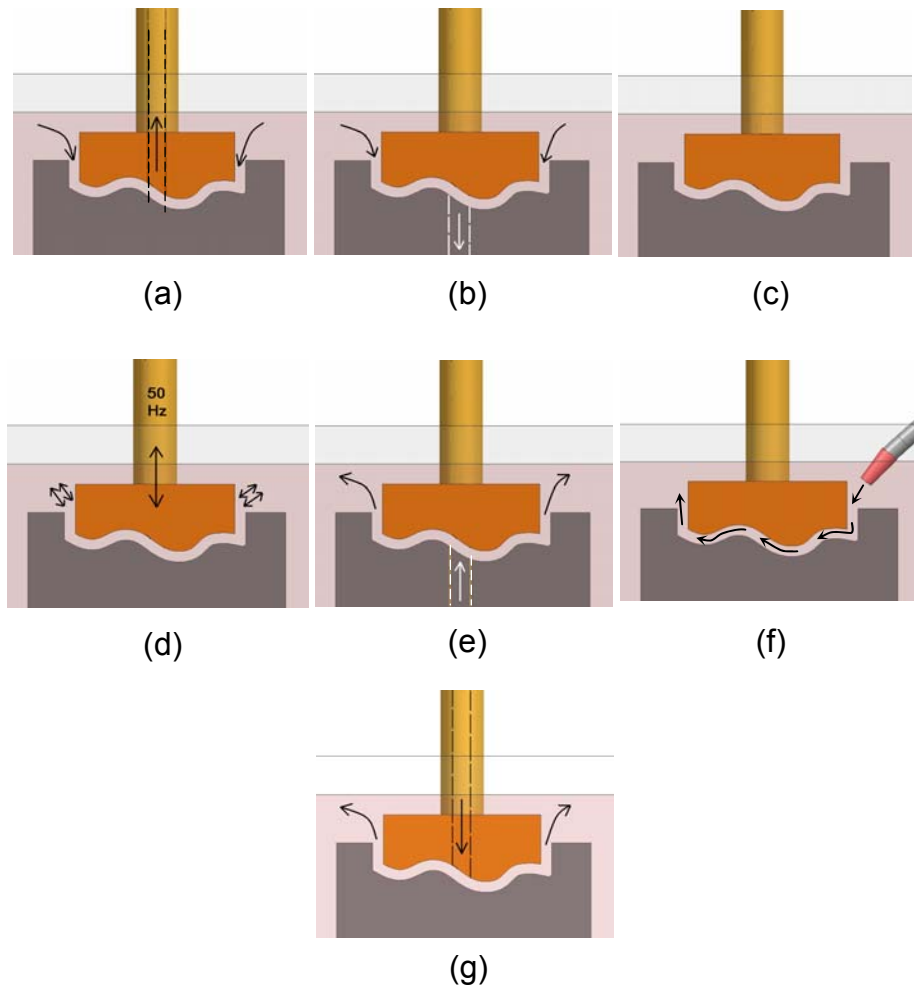
- Boşalım gerilimi değerine ulaşıncaya kadar elektrik yalıtkanlığını koruyacak yeterli dielektrik (elektriksel) direnç sahip olmak,
- Kıvılcım sonrasında çok hızlı bir şekilde deiyonize olabilmektir.

Fazla ısınma, dielektrik sıvının bozunmasına ve bozunma sonrası gaz ve karbonların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Gazlar boşalım kanalında istenmeyen genişlemeye sebep olarak, İİH değerinin azalmasına neden olurlar. Karbon tanecikleri ise elektrot ile iş parçası üzerinde birikerek ark tipi zararlı durumların oluşmasına sebep olur.

Dielektrik sıvının içindeki işleme artıkları boşalım kanalının oluşmasını hızlandırdıkları için dielektrik sıvının çok sık değiştirilmesi işlem performansını negatif etkilemektedir. İletken toz karışımlı dielektrik kullanımında işleme bölgesinde dielektrik sıvı iletkenliği daha iyi olduğundan durumların uygulanması ile görülen gecikme süresi daha kısa olmakta, böylelikle boşalım durumlarının malzeme kaldırma etkisi artmaktadır [25].

Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri

Dielektrik sıvı uygulaması, dielektriğin elektrot ile iş parçası arasında uygun bir biçimde dolaşımıdır. Her elektroerozyon tezgahı basit olarak dielektrik tankı, pompa, dielektrik sıvı filtresi ve işleme tankından oluşan bir sirkülasyon sistemine sahiptir. İşlem performansı için dielektrik sıvı uygulama tipi önemlidir.



Şekil 2.6. Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri (a) elektrot içinden emme, (b) iş parçası içinden emme, (c) statik, (d) titreşimli, (e) iş parçası içinden püskürtme, (f) yanal püskürtme, (g) elektrot içinden püskürtme

Yetersiz (düşük debili) dielektrik sıvı uygulaması ve işe uygun olmayan uygulama tipinin seçilmesi ark ve kısa devre tipi vurum oluşumuna, elektrot

ömrünün azalmasına ve işleme süresinin artmasına neden olmaktadır. Şekil 2.6'da dielektrik sıvının farklı uygulama yöntemleri gösterilmiştir.

2.2.4. Elektrot (Takım)

Temelde elektrik iletkenliği olan bütün malzemeler elektrot yapımında kullanılabilir. EEİ'de elektrot malzemelerinin sahip olması istenen en genel ısı-fiziksel özellikler, yüksek ısı kapasite ve yüksek ergime sıcaklığı değerleridir. EEİ'de elektrot aşınması bu değerler ile ters orantılıdır. Yüksek ergime sıcaklığına ve yüksek ısı kapasiteye sahip elektrot malzemelerinin aşınma direnci yüksektir.

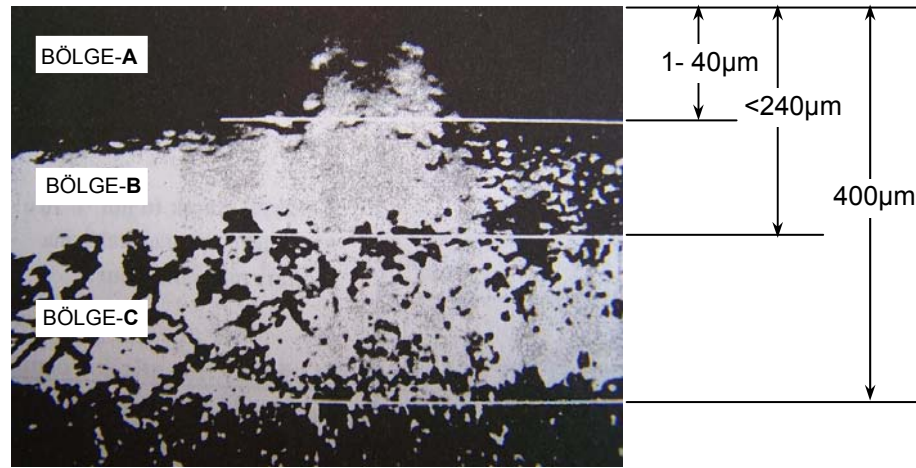
Çizelge 2.2. Tipik elektrot (takım) malzemeleri ve karakteristikleri

Malzeme	EAH	İİH	Üretimi
Bakır	Düşük	Yüksek (Kaba işlemede)	Kolay
Pirinç	Yüksek	Yüksek (bitirme)	Kolay
Tungsten	En düşük	Düşük	Zor
Tungsten Bakır	Düşük	Düşük	Zor
Dökme demir	Düşük	Düşük	Kolay
Çelik	Yüksek	Düşük	Kolay
Çinko alaşımlar	Yüksek	Yüksek (Kaba işlemede)	Kolay
Bakır grafit	Düşük	Yüksek	Zor

Kolay işlenebilirlik, yüksek İİH ve düşük EAH ideal elektrot malzemesi özellikleridir (Çizelge 2.2). Bakır bu niteliklerin çoğuna sahip olduğundan elektrot yapımında en sık kullanılan malzemedir.

2.2.5. İş parçası ve işleme sonrası iş parçası yüzeyinde oluşan katmanlar

Geleneksel yöntemlerle işlenemeyecek sertlikteki malzemeler EEİ'de rahatça işlenebilir. İşleme sonunda malzeme yüzeyinde sıg bir tabaka meydana gelir. İş parçası yüzeyinin, boşalım kanalı ile temasta olan bölgesi aşırı ısıdan eriyip dielektrik sıvı ile hızla soğuyarak katılaşır ve ergimiş-katılaşmış katmanı (beyaz bölge, bölge-A) oluşturur (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. EEİ'deki iş parçası yüzeyinde oluşan katmanlar:
 Bölge A: Ergimiş-katılaşmış katman (beyaz bölge),
 Bölge B: Isıl olarak etkilenmiş katman,
 Bölge C: Geçiş katmanı [22]

Uygulanan EEİ parametrelerine bağlı olarak bu katmanın kalınlığı 1-40 µm arasında değişmektedir. İşlem esnasında oluşan sıcaklığın etkisiyle temelde hidrokarbon bileşiklerinden oluşan dielektrik sıvının kimyasal yapısı bozulur. Kimyasal bozulmadan ortaya çıkan karbon, ergimiş-katılaşmış katmana nüfuz ederek buranın karbonca zengin ve ana metalden oldukça farklı bir metalürjik yapıya sahip olmasına sebep olur. Bu katman oldukça sert (60-65 HRC) bir yapıya sahiptir. Ergimiş-katılaşmış katmanın hemen altında ısıl olarak etkilenmiş bölge (bölge-B) bulunur. Isıl olarak etkilenmiş bölgenin oluşmasında, ergimiş-katılaşmış katmandan malzeme difüzyonu ve hızlı ısınma-soğuma etkilidir. Dielektrik sıvı ile doğrudan temasta olmayan bu

bölge, karbondan az etkilendiği için sahip olduğu sertlik değeri beyaz bölgeye göre daha düşüktür. Ancak işlem sırasında meydana gelen ısı etkilermeler bu bölgenin metalürjik yapısının değışmesine neden olur. Bu da malzemenin yorulma mukavemetini azaltmaktadır. Isıl olarak etkilermiş bölgenin altında iş parçasının orijinal tane yapısından farklı geçiş bölgesi (Bölge-C) bulunur. Bu bölgenin özellikleri ana metale çok yakın olmasına rağmen bir çok kaynakta bu bölge tavlanmış olarak tanımlanır [22].

2.2.6. İş parçası işleme hızı (İİH)

İİH, birim zamanda iş parçası yüzeyinden kaldırılan malzeme hacmidir (Eş. 2.4). Birim zamanda iş parçası yüzeyinden kaldırılan malzeme hacmi, işleme akımı, elektrot malzemesi, kutuplama, ortalama çalışma gerilimi, vurum süresi, bekleme süresi, dielektrik sıvı (tipi, uygulama şekli, içerisine katılan çeşitli malzeme tozları, uygulama basıncı), iş parçası ergime sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır.

$$\text{İİH [mm}^3\text{/dk]} = \frac{\text{İş Parçasından kaldırılan hacim [mm}^3\text{]}}{\text{İşleme süresi [dk]}} \quad (2.4)$$

2.2.7. Elektrot aşınma hızı (EAH)

Oluşan her kıvılcım iş parçasından olduğu gibi elektrottan da bir miktar malzeme kaybına neden olmaktadır. Bundan dolayı, işleme tamamlandığında elektrotta belirgin bir aşınma meydana gelmektedir. EAH, birim zamanda elektrotta meydana gelen aşınma miktarıdır ve Eş. 2.5 ile ifade edilebilir:

$$\text{EAH [mm}^3\text{/dk]} = \frac{\text{Elektrottaki aşınan hacim [mm}^3\text{]}}{\text{İşleme süresi [dk]}} \quad (2.5)$$

2.2.8. Bağlı aşınma (BA)

BA, EAH değerinin İİH değerine oranı şeklinde tanımlanmaktadır:

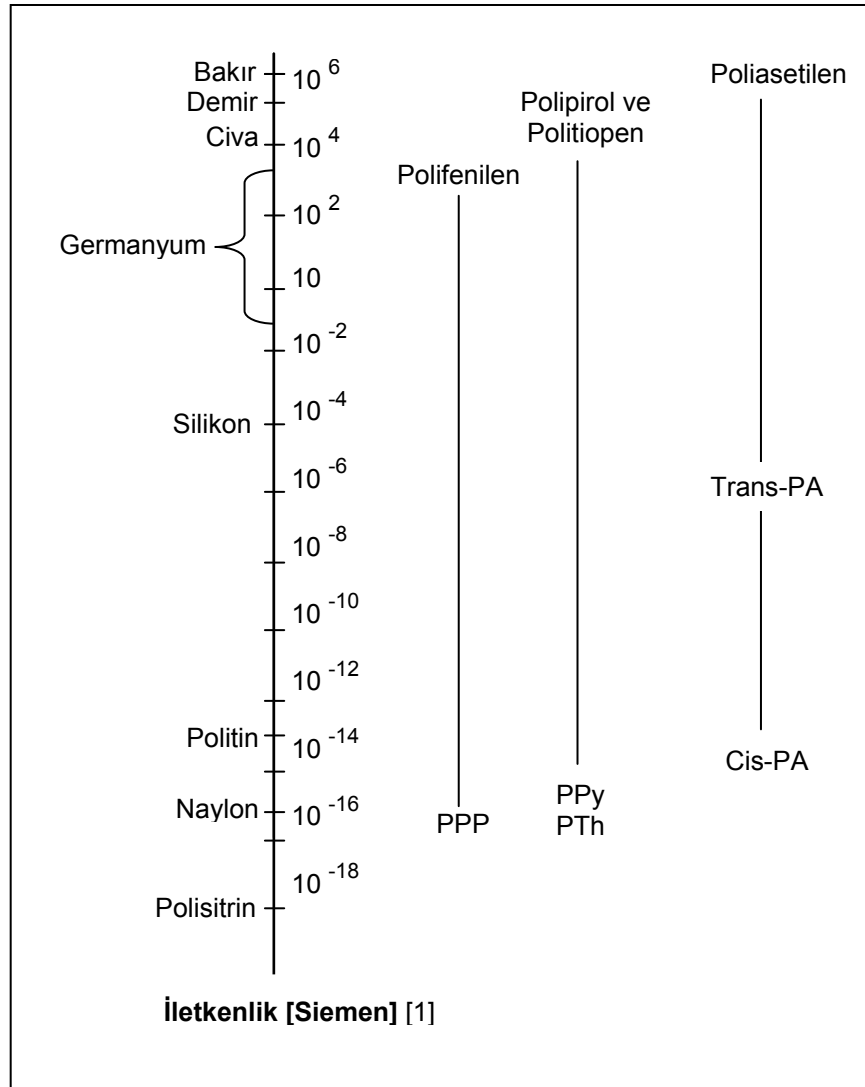
$$BA [.] = \frac{EAH [mm^3/dk]}{İİH [mm^3/dk]} \quad (2.6)$$

Boşalım akımı ve vurum süresi BA'yı etkileyen en önemli parametrelerdir. Düşük ergime sıcaklığına sahip elektrot malzemeleri, yüksek ergime sıcaklığına sahip elektrot malzemelerine göre daha fazla aşınır. Bundan dolayı düşük ergime sıcaklığına sahip elektrot malzemelerinin kullanımında elde edilen BA değerleri daha yüksektir. Ayrıca elektrotun negatif kutuplanmasında işleme akımı artıkça pozitif kutuplamaya göre BA değerleri daha düşük çıkmaktadır.

3. KOMPOZİT YAPI VE PERKOLASYON KAVRAMI

3.1. Polimer Yapı ve Elektriksel İletkenlikleri

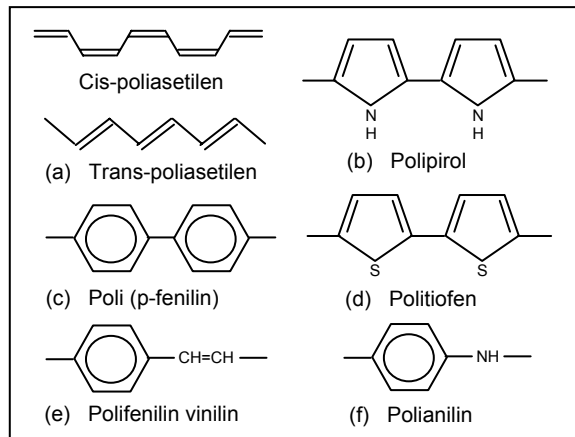
Plastikler önceleri elektronik sanayisinde izolasyon malzemesi olarak biliniyordu. Ancak son zamanlarda keşfedilen yeni polimerler elektronik endüstrisinde elektrik iletken veya yarı iletken malzemeler olarak kullanılmaktadırlar [26].



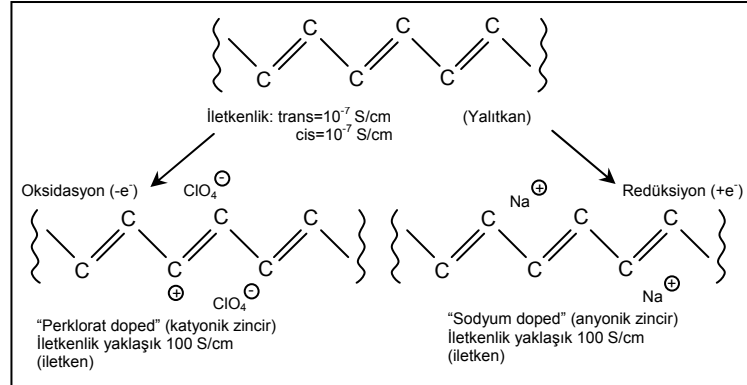
Şekil 3.1. Bilinen iletken metaller ile iletken karakter taşıyan polimerlerin iletkenlik sınırları karşılaştırması [26]

Oldukça geniş sınırı olan bu polimerlerin çoğu şu anda bir çok endüstri alanında kullanılmaktadır. Bu polimerler içerisinde en büyük elektrik iletkenlik değerine sahip olan polimerin iletkenlik değeri metalik bakırın iletkenlik değerinden bir sıralama aşağıdadır (Şekil 3.1). Söz konusu bu iletken karakterdeki polimer malzemeler iletken olmayan polimer malzemelerden çeşitli kimyasal süreçler (doping) sonucu elde edilirler. Elektriksel iletkenlikteki değişimden farklı olarak, bu malzemelerin yapısal özellikleri, iyon taşıma, redoks davranışları, elektro-kimyasal etkileri, elektro-optik ve elektronik bağ özellikleri de değişir. Bu geniş kapsamlı özelliklerinden dolayı sentetik metaller, yani iletken polimerler hem endüstride hem de laboratuvarlarda belirgin olarak ilgi odağı olmuştur. Bir çok farklı kullanım alanlarında ki araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Metallerde elektrik iletkenliği iletim bandı içindeki hareketli elektronların çapraz atomlar arasındaki seyahati olarak tanımlanabilir [26]. Eşdeğer durum inorganik malzemelerde hareketli π -elektronları ile sağlanır. Fakat iletken olmayan polimerlerde ilgili yörüngede bu elektronlar bulunmaz. Bu yüzden bu tür malzemelerde elektrik iletkenliğinden bahsedilemez. Elektrik iletken polimerler ise polimer zinciri boyunca dağınık olarak bulunan ve yerleşik olmayan π -elektronlarına sahiptir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de bazı iletken polimer yapıları gösterilmiştir.

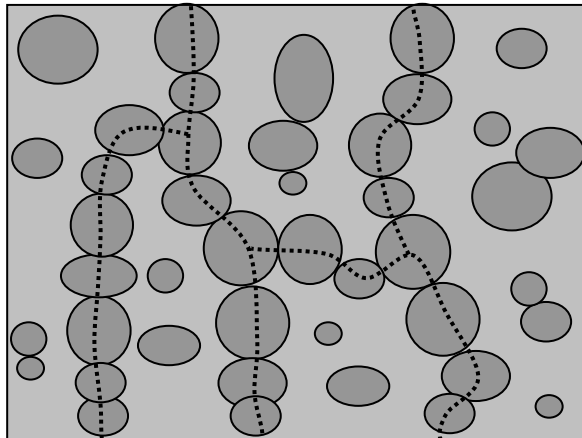


Şekil 3.2. Polimer yapıları [26]



Şekil 3.3. İletken forma dönüşüm için poliasetilenin oksidasyonu [26]

Polimer malzemeler arasında en iyi elektrik iletkenliği karakterine Poliasetilen malzemeler sahiptir. Bu tür malzemelerin üretim maliyetlerinin yüksek oluşu ve elde edilişinin zorluğu, araştırmacıları yarı iletken veya iletken olmayan karaktere sahip polimer malzemeler ile elektrik iletken metal malzemeleri birleştirerek her iki malzeme özelliğini de içinde barındıran yeni tipte kompozit malzemeler üretmeye itmiştir. Polimer malzeme içine katılan iletken toz partikülleri, yapılan araştırmalar sonucu belli bir kritik hacimsel oran üzerine çıkıldığında kompozit yapının iletkenliğinde ani artış meydana getirdiği ve bu artışın toz oranı arttıkça giderek sabit bir iletkenlik değerine doğru eğilim gösterdiği yani doyduğunu göstermiştir [26]. Şekil 3.4'de bu iletkenlik zinciri temsilen gösterilmiştir.



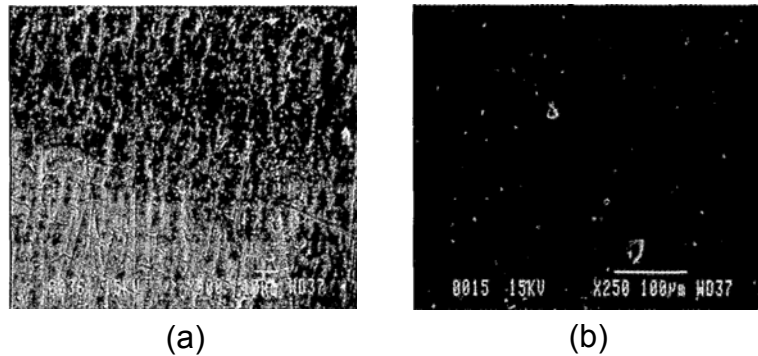
Şekil 3.4. Polimerik malzeme içinde iletken zincir yapı meydana getiren iletken dolgu malzemesi taneciklerinin uzaysal dağılımı

3.3. Polimer Malzemelerde Kür Oluşum Süreci

Polimerlerin kürleşmesi bir dizi aşamadan meydana gelir. Kür olma dallanmalı ağ yapıyı ortaya çıkaran polimer zincirlerin doğrusal oluşumuyla başlar, daha sonra dallanarak çapraz bağlanır.

Kür gelişirken moleküler ağırlık hızla artar ve aşama aşama ağsı yapı oluşmaya başlar (Resim 3.1-a). Ağsı yapı oluşurken polimer, viskoz akışkan halden elastik jel kıvamına döner. Tepkimeler eksotermik olduğundan dışarı ısı çıkışı olur. Ancak kür sırasında ortam sıcaklığı arttırılırsa kür olma hızı, belirgin bir biçimde artar. Aksi durumda kürleşmenin tamamlanması çok uzun sürer. Kür olmada son aşama *vitrifikasyon* (sertleşme) aşaması olup, jel kıvamındaki polimer sertleşerek camsı bir yapıya dönüşür (Resim 3.1-b) [34]. Bu aşamada yapı içindeki solvent buharlaşarak ortamı terk eder, hidroksil grupları kaybolarak ester bağlarına dönüşürler. Bu sayede çift bağ oranı hızla artarak son değerine ulaşır. Oluşan bu yeni yapılanma elektriksel iletkenliğin belirgin oranda artmasına sebep olur [10, 35, 53].

Kürleşme pratikte iki aşamada gerçekleşir. Bunlar ön kürleşme (pre curing) ve son kürleşme (post curing) olarak bilinir. Tipik olarak polimer yapılar ön kürleşmede ortalama 100°C'de 1-2 saat fırınlanarak gerçekleştirilir. Daha sonra kürleşmesi tamamlanmamış kısımlar için tekrar 120°C'de 3-4 saat fırınlanarak süreç tamamlanır.

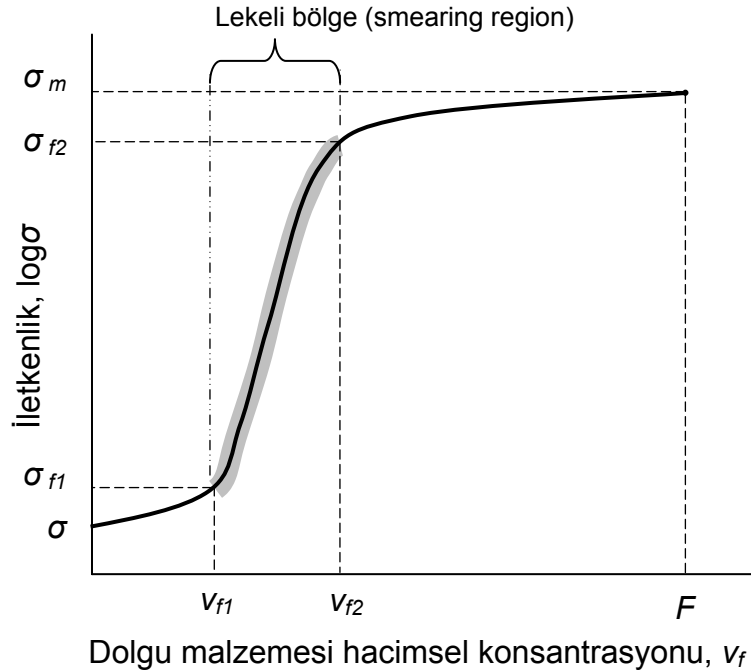


Resim 3.1. Numune kesiti (a) 80°C'de tamamen kür olmuş, (b) 120°C'de %50 kür olmuş hali [34]

3.4. Perkolasyon Kavramı

Polimer takviyeli iletken tozu katkılı kompozit sistemlerde toz konsantrasyonu arttıkça partiküllerin birbirlerine olan uzaklıkları azalır ve hatta birbirleriyle temas ederek uzaysal zincirler kurmaya başlarlar. Bu aşamada kompozit yapının elektriksel özellikleri çok hızlı bir şekilde değişim gösterir, elektriksel iletkenlik artar. Elektrik iletkenlik zincirinin oluştuğu minimum dolgu malzemesi (iletken toz) konsantrasyonuna *perkolasyon konsantrasyonu* denir.

İletken polimer kompozitler iç yapı olarak çok düzensiz sistemlerdir. Perkolasyon teorisi kavramı ve rasgele dağılım geometrisi, kompozit yapı ile bu yapının iletkenliği arasındaki somut ilişkinin kurulmasını sağlayan iki önemli unsurdur. Şekil 3.7'de polimer matris malzemeli iletken tozu takviyeli kompozit sistemlerin tipik iletkenlik-dolgu malzemesi konsantrasyonu ilişkisi gösterilmiştir [1, 2, 6, 8].



Şekil 3.7. Tipik bir kompozit sistem için elektriksel iletkenlik (logaritmik) iletken dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu ilişkisi [1, 2, 6, 8]

Polimer matris malzemenin iletkenliği σ_p ve dolgu malzemesinin iletkenliği σ_f olmak üzere, kompozit malzemenin σ gibi bir genel iletkenliği vardır. Genellikle σ_f , σ_p 'den 10^{16} kat daha büyüktür [3]. Bu yüzden σ_f , σ_p yanında ihmal edilebilir bir büyüklüktür. Dolgu malzemesi (filler) hacimsel oranı, v kritik değerine ulaştığında, v_f kompozit malzeme yalıtkan veya yarı-iletken formdan iletken forma dönüşür. Dolgu malzemesi konsantrasyonu arttıkça (kritik değerden tokluk sınırı, F ye kadar) kompozitin iletkenliği artmaya devam eder ve en büyük değerine ulaşır. Perkolasyon eşiği σ_m (maksimum iletkenlik) altındaki iletkenlik değerlerindeki değişimler ihmal edilebilir ölçüdedir ve bu bölgede kompozitin iletkenliği matris malzemenin iletkenliğine eşit alınabilir [1].

Kompozit sistemin önemli karakteristik özelliklerinden biri de doyma sınırı (packing factor), F dir. Doyma sınırı dolgu malzemesi parçacık şekline ve oluşturmaları muhtemel iskelet veya zincir yapı oluşumuna bağlıdır. Matris malzemenin kabul ettiği en yüksek dolgu malzemesi sınırı olan F parametresi en yüksek dolgu oranı konsantrasyonuna eşit olarak kabul edilir [1].

$$F = \frac{v_f}{(v_f + v_p)} \quad (3.1)$$

Burada v_f dolgu malzemesi parçacıklarının kompozit yapı içinde işgal ettikleri hacimdir. v_p ise tanecikler arasındaki boşluğu dolduran polimer matris malzeme hacmidir. İstatistiksel olarak tek dolgu malzemeli (tek fazlı) kompozit yapıların doyma sınırı 0,64 olarak (%64) tespit edilmiştir. Doyma sınırı parçacık şekline bağlı olup küresel şekilli yapıda en büyük değerini alır.

Bunun yanı sıra çok fazlı kompozit sistemlerde doyma sınırı değerı büyür. Örneğin, bakır-grafit tozlu iki fazlı kompozit yapının doyma sınırı sadece bakır veya grafit tozlu kompozit yapının doyma sınırından daha büyüktür. Bir başka deyişle polimer matris içine daha fazla toz takviyesi yedirilmiş olur. Doyma sınırı ile perkolasyon konsantrasyonu arasında

$$v_f = \chi_c \cdot F \quad (3.2)$$

(2) ifadesinde verildiği gibi bir doğru orantı ilişkisi mevcuttur. Burada χ_c perkolasyon kurulma olasılığıdır. Yapılan çalışmalar sonucu istatistiksel olarak $\chi_c \cdot F$ çarpımı 0,16 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçtan hareketle, $F=0,64$ için $X_c=0,25$ bulunur.

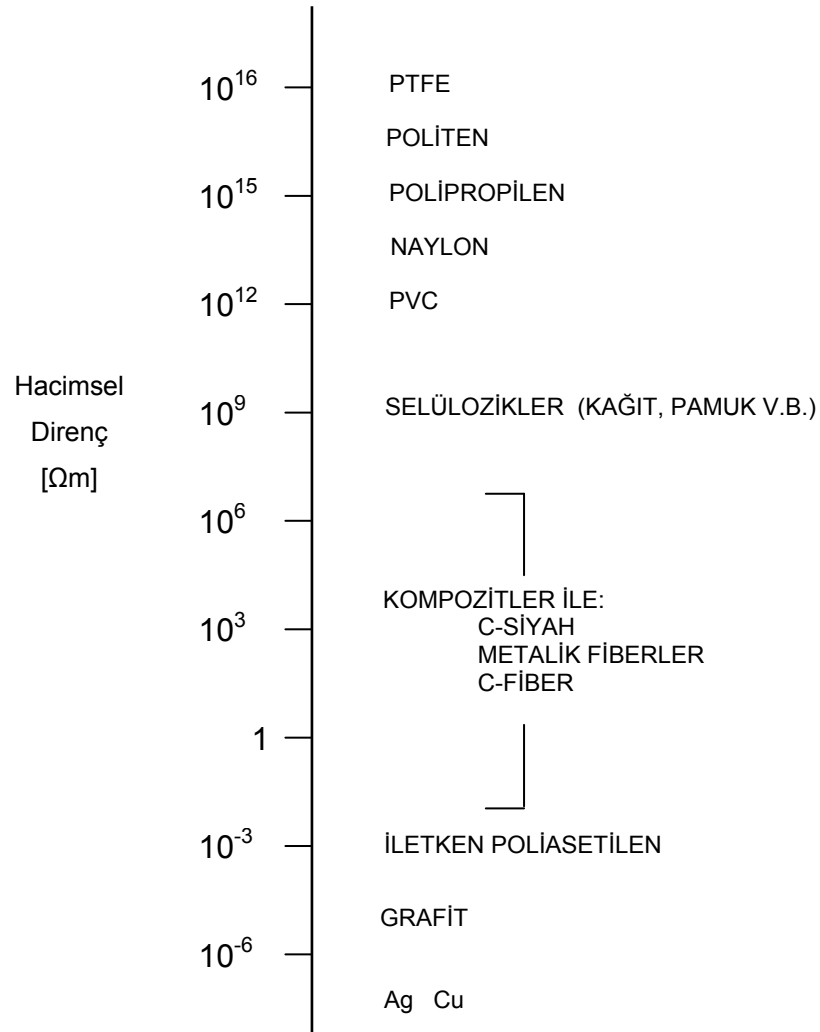
Gerçekte tek fazlı sistemlerde $v_{f1} < v < v_{f2}$ aralığında iletkenlik değerinde ani ve çok büyük bir artış meydana gelir. Bu ani değişikliğin olduğu bölgeye Şekil 3.8'de de gösterildiği üzere lekeli bölge (*smearing region*) denmektedir. Kompozit malzemenin yalıtkanlıktan iletkenliğe geçiş bölgesi de denebilen bu bölgenin aralığı ve büyüklüğü dolgu malzemesinin tane büyüklüğüne, şekline ve dağılım topolojisine göre değişiklik gösterir. Bu bölgede elektriksel iletkenlik ile dolgu malzemesi konsantrasyonu arasında yaklaşık doğru orantı ilişkisi mevcuttur.

Yapılan deneysel çalışmalara göre, söz konusu bu doğru orantı polimer-iletken tozu faz etkileşimi kurulduktan sonra, yani smearing bölgesinden sonra geçerliliğini kaybederek daha karmaşık bir hal aldığı gözlenmiştir [1-3]. Pratikte kompozit sistemler için v_{f2} değeri grafikteki yaklaşık doğru orantıdan dolayı hesaplanabilir. v_{f1} değeri ise v_c perkolasyon eşik değeri olarak kabul edilebilir. Dolayısı ile iletken kompozit sistem v_f , F ve X_c parametreleri ile karakterize edilebilir [2, 7].

3.5. Polimer Kompozit Yapılarda Elektriksel Direnç Ölçümü

Polimerler karakteristik olarak çok yüksek elektriksel dirence sahip malzemelerdir. Çoğu uygulamalarda yalıtkan olarak kullanılırlar. Şekil 3.8'de bazı malzemelerin iyi iletken olan saf alüminyum ve saf bakır metallere göre dirençleri karşılaştırılmıştır [35]. Teorik olarak elektriksel direnç ohm kanunlarına uyum gösterir ancak pratikte direnç değeri yükseldikçe ($10^6 \Omega$ ve

üzeri) lineer ilişki non-lineer hale dönüşür ve temas direnci kavramı ortaya çıkar.



Şekil 3.8. Bazı malzemelerin hacimsel direnç karşılaştırması [1]

Basit bir tanım olarak isotropik malzemelerin hacimsel veya bulk direncine (ρ [Ωm]) rezistans denir ve *Ohm* Yasasına göre Eş. 3.3 ile verilir:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.3)$$

Burada R numunenin her iki ucu arasındaki direnç, A numunenin akıma dik yöndeki kesit alanı ve L iletkenlik yönündeki boyudur. Alternatif olarak, hacimsel direnç genelleştirilmiş Ohm Yasasına göre;

$$E = \rho \cdot J \quad (3.4)$$

ile ifade edilebilir. Burada E elektrik alan, J malzemenin herhangi bir noktasındaki akım yoğunluğudur. Daha genel olarak isotropik malzemeler için direnç ikinci mertebeden bir tensördür.

$$E_i = \rho_{ik} \cdot J_k \quad (3.5)$$

Bu matris yapıda, yapı içindeki iletken fiberlerin dağılımı akım yönünde düzgün bir biçimde olursa bu tip malzemelere *iletken polimer*, aksi durumda ise *yalıtkan polimer* malzemeler denir. Akım yönü $z - z$ olursa;

$$\rho_{zz} \ll \rho_{xx}, \rho_{yy} \quad (3.6)$$

ilişkisi mevcuttur. Yani, z yönündeki dağılım durumunda öz direnç diğer dağılım durumlarındaki öz dirençlerden çok daha küçüktür. Hacimsel iletkenlik, öz direncin çarpımsal tersidir [1]. Eş. 3.3'ten $1/\rho$ ifadesi çekilirse;

$$\frac{1}{\rho} = \left(\frac{L}{A} \right) \cdot \left(\frac{1}{R} \right) \quad (3.7)$$

eşitliği elde edilir. Burada $1/\rho$, ifadesine öz iletkenlik denir ve birimi,

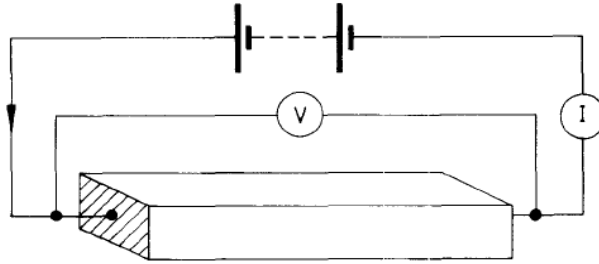
$$\left[\frac{cm}{cm^2} \right] \cdot \left[\frac{1}{ohm} \right] = \left[\frac{1}{ohm \cdot cm} \right] \text{ olarak bulunur. İletkenlik, } \left(\frac{1}{\rho}, [\Omega^{-1}m^{-1}] \right) \text{ genellikle}$$

Siemen (S) olarak temsil edilir. Eğer akım akışı bir yüzeyle sınırlı ise, bu durumda yüzeysel direnç veya iletkenlikten bahsedilebilir. Yüzeysel direnç yüzeyin büyüklüğünden bağımsız olarak ölçülen bir büyüklük olup birimi ohm $[\Omega]$ dur [35].

Genelde, direnç ölçümleri özel şekilli numuneler ve elektrot konfigürasyonları kullanılarak düzgün bir elektrik alan oluşturularak yapılır. Böylece direnç, devreden ölçülen direnç ve elektrotlar arasında ölçülen gerilim değerine göre Ohm Yasası ile kolayca hesaplanabilir. İletkenlik ölçümleri temelde iki farklı başlık etrafında incelenir:

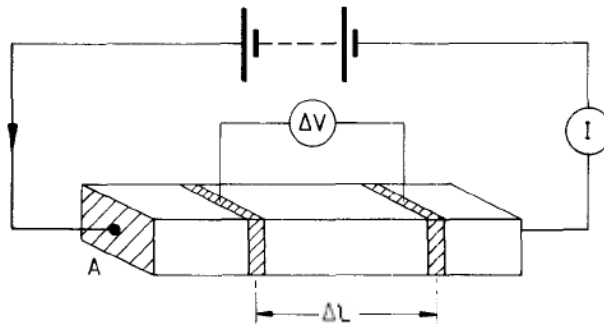
- Düşük hacimsel dirence sahip malzemelerin ölçümü,
- Yüksek hacimsel dirence sahip malzemelerin ölçümü,

Düşük hacimsel dirence sahip malzemelerin direnç ölçümlerinde temas direnci (*contact resistance*) önemli bir faktördür. Şekil 3.9'da gösterildiği gibi direnç, uygulanan gerilimin ölçülen akım şiddetine oranıdır.



Şekil 3.9. Düşük hacimsel direnç ölçümü, 2-nokta metodu [35]

Hassas ölçmedeki ana problem, elektrot ile numune arasındaki temas direncinin ölçümüdür. Temas direnci elektrotlara bir basınç uygulanarak azaltılabilir.



Şekil 3.10. Düşük hacimsel direnç ölçümü (b) 4-nokta metodu [35]

Temas direnci etkisinin daha da azaltılması Şekil 3.10'da gösterildiği gibi 4–*nokta metodu* (four point terminal method) ile elde edilir.

Bu metoda göre, kesit alanının merkezinde bir düzgün akım yoğunluğu J oluşur. Bu bölgedeki akım şiddeti ise elektrotlar arasına uygulanan I akım şiddetidir. Oluşan elektrik alan E ise, ΔV 'nin ΔL 'ye oranından hesaplanır. Bu ifadeler Eş. 3.4'de yerine konursa, direnç:

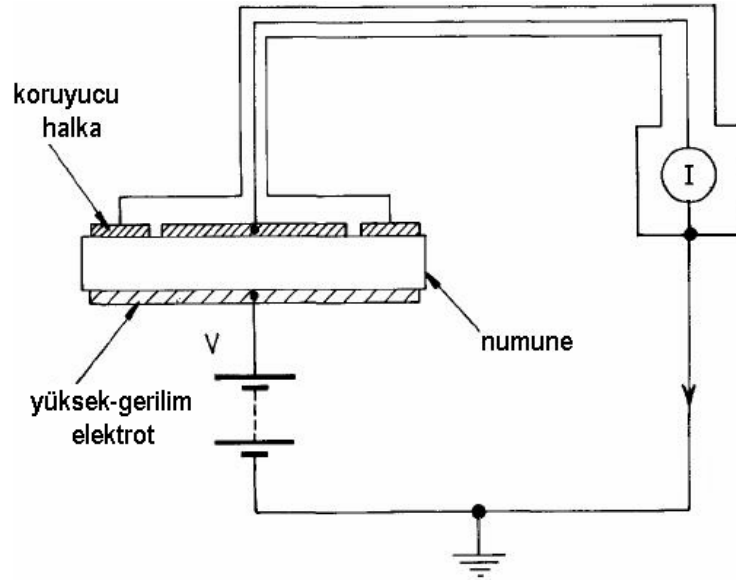
$$\rho = \frac{E}{J} = \frac{\Delta V / \Delta L}{I / A} \quad (3.8)$$

eşitliğiyle hesaplanabilir. Böylece, temas direncinin etkisi numunenin direnci yanında çok daha küçültülerek minimize edilebilir. Pratikte bu metot, direnci $10^6 \Omega\text{m}$ 'den daha düşük olan malzemelerde kullanılır. Aksi durumda akım ölçülemeyecek kadar düşer ve voltmetrenin direnci daha belirgin hale gelir.

Yüksek hacimsel dirence sahip malzemelerin direnç ölçümlerinde ise, Şekil 3.11'de görüldüğü gibi toplam direnci azaltmak için ince iletken elektrotlar kullanılır. Burada temel problem, yüksek gerilim kaynağından ampermetreye tersi olarak numunenin kendi içinden olan elektrik kaçaklarıdır.

Numunenin kendisi üzerinde kirlilik ve nemden dolayı düşük dirençli bir yol oluşur. Böylece numune yüzeyine yerleştirilen *düşük-gerilim koruyucu elektrot* (low-voltage guard electrode) sayesinde oluşabilecek herhangi bir akım kaçağı engellenmiş olur.

Bu düzenekte akım değeri göstergede denge değerine ulaşana kadar ölçüm alınmamalıdır. Göstergeden okunacak akım çok düşük buna oranla uygulanan gerilim çok yüksek olduğundan direnç değeri Ohm Yasasına göre çok yüksek çıkar [35].



Şekil 3.11. Yüksek hacimsel direnç ölçümü: 3-nokta metodu [35]

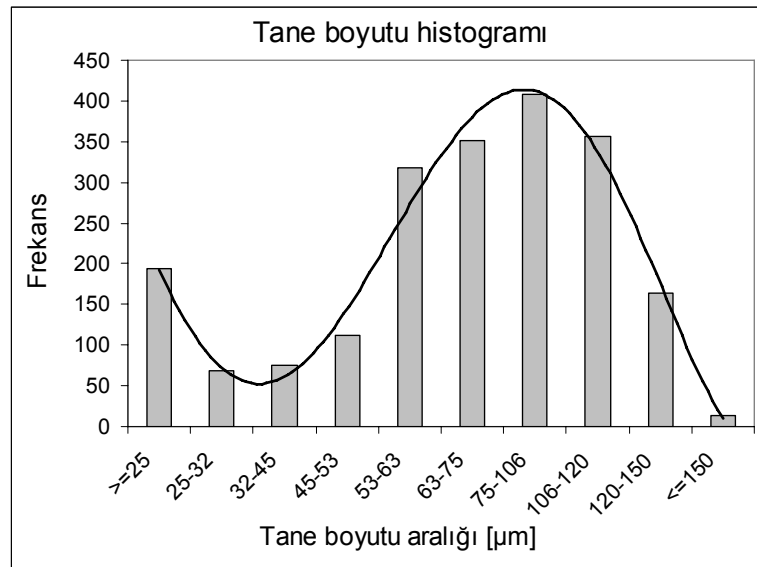
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Deneylerde Kullanılan İletken Dolgu Malzemeleri

Deneylerde kullanılan bakır tozu dendritik şekilli (Resim 4.1), elektrolitik saf bakır (%99,95) olup ortalama tane büyüklüğü 75 μm olarak ölçülmüştür. Tane boyutu-kütle değerleri eleklerden elenerek elde edilmiş ve Şekil 4.1’de tane boyutu histogramı olarak gösterilmiştir.



Resim 4.1. Deneylerde kullanılan dendritik bakır tozu (x100 ölçek)



Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan bakır tozuna ait tane boyutu histogramı

İkinci grup çalışmalarda piyasadan kolayca temin edilebilen, tane boyutu ortalama 70 μm olan grafit tozu kullanılmıştır. Toz boyutları ayrıca MASTERSIZER-X marka parçacık boyutu ölçme cihazı ile de ölçülerek elde edilmiştir. Ölçümlere ilişkin sonuçlar EK-3 ve EK-4’de verilmiştir. Deneylerde grafitin yoğunluğu $1,60 \text{ gr/cm}^3$ ve saf bakırın (%99,98) yoğunluğu ise $8,80 \text{ gr/cm}^3$ olarak alınmıştır.

4.2. Deneylerde Kullanılan Matris (Tutucu) Malzeme

Matris malzeme olarak kullanılan polyester piyasada yaygın kullanılan, CE 92-N8 Ortoflatik tipi polyesterdir. Polyester reçinenin kür olmasını hızlandırması için katalizör (kobalt) ve dondurucu (metil-etil keton peroksit) gibi diğer standart katkı maddeleri kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan polyesterin yoğunluğu deneysel olarak ölçülmüş ve $1,195 \text{ gr/cm}^3$ bulunmuştur (hesaplamalarda yaklaşık $1,20 \text{ gr/cm}^3$ olarak alınmıştır). Matris malzemenin içinde bulunan çözücü ve diğer kimyasalların belirlenmesine yönelik olarak TGA ve FTIR analizleri yapılmıştır (EK-5, EK-6).

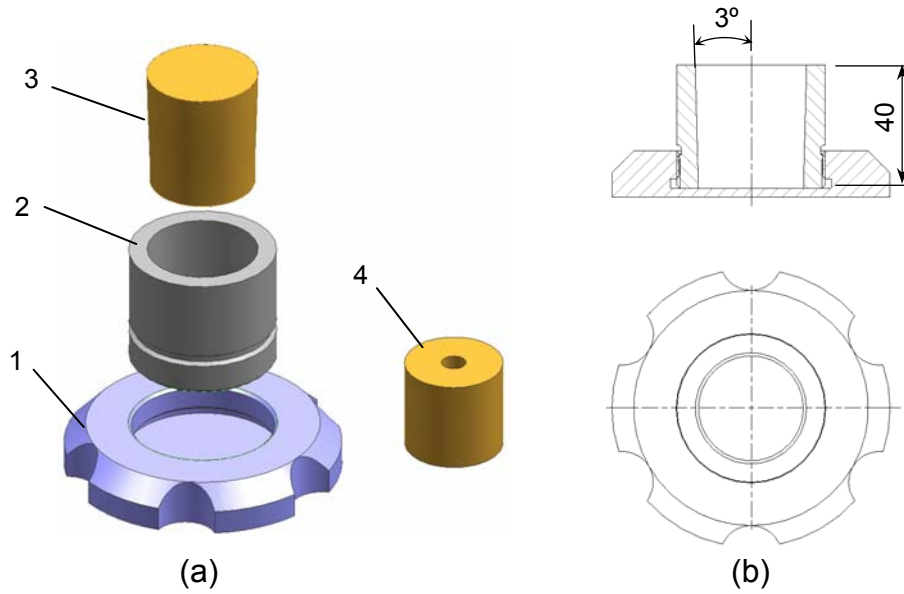
4.3. İş Parçası

Deneylerde iş-parçası olarak her iki yüzeyi taşlanmış, $50 \times 50 \times 12 \text{ mm}$ boyutlarında SAE-1040 (Ç1040) malzemeden üretilmiş dikdörtgenler prizması şekilli parçalar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan İş parçasının yoğunluğu $7,90 \text{ gr/cm}^3$ olarak alınmıştır.

4.4. Elektrot ve Üretimi

Deneylerde kullanılan elektrotlar Şekil 4.2’de gösterilen ölçü ve biçimlerde basit bir kalıp döküm sistemiyle üretilmişlerdir. Dökümlerin daha rijit ve tekrarlanabilir olması ve en düşük malzeme sarfiyatı için kalıp seti Ç4140 malzemeden 40 mm boyunda kompozit karışımın kolay çıkabilmesi için kalıp iç yüzeyine 3° ’lik koniklik verilmiştir (Şekil 4.3). Döküm öncesi karıştırma kabı

tartıya (Resim 4.2-a) konup darası alındıktan sonra, önceden belirlenen oranlara göre, polyester kaba dökülmüş ve darası alınmıştır. Karıştırma kabındaki polyestere ikinci aşamada 1-1,5 gr hızlandırıcı olarak katalizör ilavesi yapıp, polyester içine homojen biçimde mekanik olarak dağıtılmıştır. Karışım kabının tekrar darası alınarak bu karışım üzerine bakır tozları belirlenen miktara göre ilave edilmiştir.



Şekil 4.2. (a) Polyester-bakır tozu kompozit elektrotun üretim aşamaları: 1. Kalıp altlığı, 2. Kalıp, 3. Ham kompozit elektrot, 4. Son ölçülerine işlenmiş kompozit elektrot. (b) Kalıbın boy ve koniklik ölçüleri



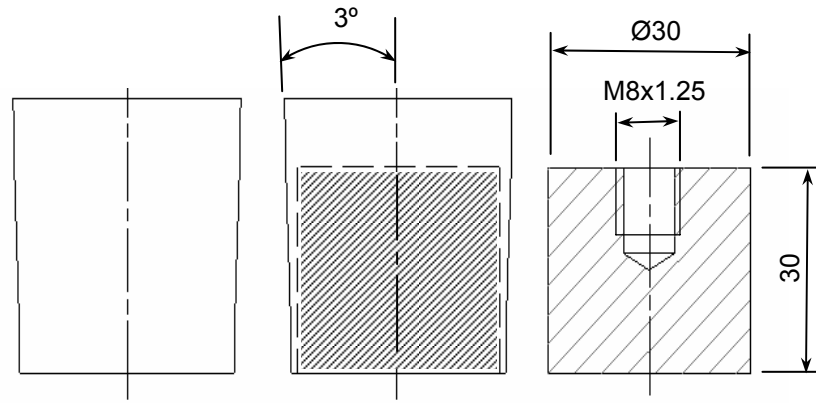
(a)



(b)

Resim 4.2. Deneylerde kullanılan (a) $\pm 0,01$ gr hassasiyetli dijital tartı (b) mikser [40]

Karışım yaklaşık 15 dakika elle karıştırıldıktan sonra dondurucu ilavesi için tekrar darası alınıp 4-5 gr dondurucu ilave edilmiştir. Son karışım 5 dakika bir el mikseri (Resim 4.2-b) ile ortalama 40-60 dev/dk (düşük devirde) hızda karıştırılmıştır. Kompozit karışım kalıba dökülmeden önce sertleşmiş karışımın kalıptan kolay çıkabilmesi için kalıp iç yüzeylerine kalıp ayırıcı sürülerek hazırlanmış karışım kalıp içine dökülmüştür. Döküm sonrası kompozit karışım 15 dakika kalıpta bekletildikten sonra çıkarılmıştır.



Şekil 4.3. Polyester-iletken tozu kompozit dökümü sonucunda elde edilen ham kompozit parçanın tornalanarak numune elektrot haline getirilmesi



Resim 4.3. Deneylerde kullanılan genel maksatlı fırın [40]

Kalıptan çıkarılan ham kompozit numuneler 1 hafta ön-kürde (pre-cure) bekletildikten sonra 120°C'de 4 saat fırınlanarak (Pişirilmiş elektrotlar) son-kür (post-cure) edilmiştir (Resim 4.3). Kür işleminden sonra kompozit elektrotlar, deneylerin aynı şartlarda olmasını sağlamak amacıyla torna tezgahında Şekil 4.3'de gösterilen ölçülere (30 mm çapta ve 30 mm boyda silindirik geometriye) işlenmiştir. Silindirik numuneler torna tezgahında delinip M8x1,25 kılavuz çekilerek daha önce üretilmiş elektrot sapına takılır hale getirilmiştir. Kalıp ve elektrot sapına ait teknik resimler EK-2'de verilmiştir. Benzer işlemler grafit tozlu dökümler için de yapılarak grafit takviyeli polyester matrisli elektrot türü olarak üretilmiştir.

4.4.1. Elektrot tipleri

Serbest (normal) bakır-polyester elektrotlar (N-B/P)

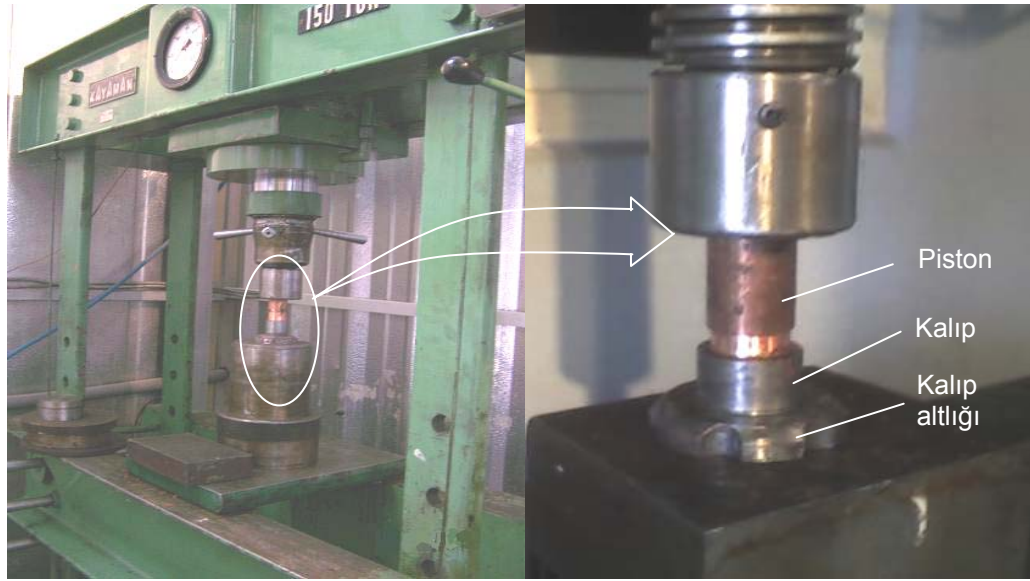
Deneylerde, N-B/P elektrot içindeki bakır tozu hacimsel konsantrasyonu yüzde olarak 20,2 (kütlesel olarak %65 bakır tozu-%35 polyester (bundan sonra kısaca 65B/35P olarak gösterilecektir) oranından başlanarak kütlesel olarak, 68B/32P, 70B/30P, 72B/28P, 75B/25P, 78B/22P, 79B/21P, 80B/20P, 81B/19P, 83B/17P, 85B/15P, 87B/13P oranlarında üretilmiştir.

Pişirilmiş serbest bakır-polyester kompozit elektrot (P-B/P)

Pişirilmiş serbest bakır-polyester kompozit elektrota ait deneylerde kompozit karışım kalıba döküldükten sonra, itici pistonunun kendi ağırlığı ile istiflenerek (hidrolik pres kullanılmadan) kalıba basılmıştır. Döküm sonrası kalıptan çıkarılan parçalar 1 hafta oda şartlarında bekletilmişlerdir. Bekleme sonrası 120°C sıcaklıkta, 4 saat fırında serbest olarak pişirilmişlerdir. Pişirmeden sonra, elektrotlar son boyutlarına tornalanıp deneylere hazır hale getirilmişlerdir. Bu aşamadan sonra çap, boy ve ağırlıkları ölçülerek yoğunlukları hesaplanmıştır.

Sıkıştırılmış bakır-polyester kompozit elektrotlar (S-B/P)

Sıkıştırılmış (preslenmiş) bakır-polyester kompozit elektrot deneylerinde Ø30 mm çapında, boyları 20-30 mm arasında değişen elektrotlar kullanılmıştır. Dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu % oranı (kütlesel bakır/polyester % oranı) 32,6 (78B/22P), 35,3 (80B/20P), 38,3 (82B/18P), 39,9 (83B/17P), 43,6 (85B/15P), 45,6 (86B/14P), 47,7 (87B/13P), 55,1 (90B/10P) ve 61,0 (92B/8P) olan elektrotlar kullanılmıştır. Kompozit elektrotların üretiminde, literatürde (Bkz. [16]) bahsedildiği ve daha önceki deneysel çalışmalarda da gerçekleştirildiği gibi, karışımın homojenliğini azaltmak amacıyla döküm öncesi,



Resim 4.4. Deneylerde kullanılan genel maksatlı 150 tonluk hidrolik pres ve kalıp seti [40]

karıştırıcı (mikser) ile çok düşük devirde (ortalama 60-70 [devir/dakika]) ve kısa süreli (ortalama 5 dakika) karıştırma yapılmıştır. Karışım katalizör ve dondurucu ilavesinden sonra metal kalıba dökülüp, kalıp üzerine yerleştirilen bir piston yardımı ile genel maksatlı 100 tonluk bir hidrolik preste yaklaşık $2,0 \pm 0,02$ ton mertebesinde (28-30 MPa) bir kuvvetle preslenmiştir. Kalıp, piston ve hidrolik prese ait fotoğraflar Resim 4.4’de gösterilmiştir. Sıkıştırılmış elektrotlar için daha sonra herhangi bir pişirme işlemi yapılmamıştır.

Piştirilmiş bakır/grafit/polyester kompozit elektrot (P-B/G/P)

Grafit/bakır-polyester kompozit elektrotlarda kullanılan grafit tozu, tane boyutu ortalama 70 μm (EK-4) olan ve yoğunluğu yaklaşık 1,60 gr/cm^3 olan piyasadan kolay elde edilebilen özelliklerde bir tozdur. Deneysel çalışmalarda, hem piştirilmiş bakır-grafit-polyester kompozit yapıda hem de sıkıştırılmış bakır-grafit-polyester kompozit yapıda grafit tozu sabit olarak kütleli %5 (hacimsel olarak %8,1-%11,9 arasında) oranında kullanılmıştır. Elde edilen elektrotlar 120°C'de 4 saat fırında piştirilerek kür edilmişlerdir.

Sıkıştırılmış bakır-grafit-polyester kompozit elektrot (S-B/G/P)

Bu bölümdeki deneylerde kullanılan elektrotlar diğer üretilen elektrotlardan farklı olarak, ortalama 2,5 ton'luk basınç altında yaklaşık 15-20 dakika süreyle sıkıştırılıp sertleştikten sonra kalıptan çıkarılıp 1 hafta boyunca oda şartlarında bekletilerek kür edilmişlerdir. Daha sonra talaşlı imalatla 30 mm çapta, 18-30 mm arası boylarda silindir haline işlenip, kılavuz çekilerek deneylere hazır hale getirilmişlerdir.

Saf bakır elektrot

Kompozit elektrotların performanslarının değerlendirilmesinde referans oluşturması açısından 30 mm çapta ve 30 mm boyda elektrolitik bakırdan tornalanarak üretilmiş elektrotlar saf bakır elektrot olarak kullanılmıştır. Bu elektrotlarda kompozit elektrotlarda kullanılan işleme parametreleriyle işleme yapılmıştır.

4.5. EEİ Tezgahı ve İşleme Polaritesi

İş parçası işlemeye hazır hale gelen elektrotlar, FURKAN KOMPAK-I 50A marka dalma tipi elektroerozyon tezgahında işlenmiştir (Resim 4.5). Polarite olarak elektrot (-) iş parçası (+) olacak biçimde ayarlanmıştır. Deneylerin tamamı TÜBİTAK-SAGE'nin üretim, malzeme ve nitelik denetleme altyapılarında bulunan tezgah ve cihazlarla gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.5. Deneylerin yapıldığı EEİ tezgahının genel görünümü [40]

4.6. Dielektrik Sıvı ve Uygulama Yöntemi

Sistemde soğutma sıvısı olarak parafinol-5 marka hidrokarbon bazlı bir dielektrik sıvı kullanılmıştır. Tüm işlemlerde yandan püskürtmeli yöntem kullanılmıştır (Resim 4.6).



Resim 4.6. Deneylerde kullanılan Polyester-Bakır kompozit elektrot ve dielektrik uygulama şekli [40]

4.7. İşleme Parametrelerinin Belirlenmesi

Yapılan ön denemelerde kompozit elektrotun yüksek işleme akımı değerlerinde (ortalama 50-100 A aralığında) aşırı ısınmadan dolayı işleme yapamadığı, çok küçük değerlerde ise (ortalama 2,5 A gibi) elektrot aşınmasının iş parçası aşınmasına oranla çok daha fazla olduğu görülmüştür. Bu yüzden ilk aşamada İİH'nın yüksek, EAH'nın düşük olduğu işleme parametrelerinin tespit edilmesi için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda bakır tozlu elektrotlar yanında sadece grafit, hem grafit hem bakır takviyeli ve preslenerek üretim aşamaları söz konusu olacağından bu bölümdeki deneysel çalışmalarda üretilen elektrot için “serbest bakır-polyester” kompozit elektrot ifadesi kullanılmıştır.

Deneylere, üretimi kolay ve iletkenliği iyi olan %43,6 hacimsel dolgu oranına sahip, kütleli olarak %85 bakır-%15 polyester karışım oranlı elektrotlarla başlanmıştır. Kompozit içindeki bakır oranı arttıkça matris malzemenin (polyester) takviye malzemeyi (bakır tozu) tutma özelliği azalmaktadır. Bu sebeple üretim sırasındaki karıştırma ve kür sonrası işleme kolaylıklarından dolayı hacimsel olarak %43,6 oranlı elektrot ile deneylere başlanmıştır. Seçilen bu elektrot sırasıyla, güç seviyesi 1/16 (işleme akımı 2,25A), 3/32 (3A), 1/8 (4,5A), 1/4 (9A) ve 1/2 (18A); vurum süresi 2 (6 µs), 3 (12 µs), 5 (50 µs), 6 (100 µs), 7 (200 µs); vurum aralığı 3 (12 µs), 5 (50 µs), 6 (100 µs), 7 (200 µs), 8 (400 µs) parametreleri altında 6 saat (360 dakika) süreyle işlemeye tabii tutulmuş ve işleme süresi sonunda elde edilen iş parçalarının ve kütleleri ölçülmüştür. Kütle farkları yoğunluk değerlerine bölünerek aşınan hacim değerleri hesaplanmıştır.

Bu çalışma sonucunda en uygun işleme parametreleri sırasıyla güç seviyesi olarak 1/4 (9A), ark süresi olarak 6 (100 µs) ve ark aralığı olarak 7-8 (200-400 µs) değerleri tespit edilmiştir. Bundan sonraki deneysel çalışmalarda (tüm farklı tip elektrotlar için) işleme parametreleri olarak bu değerler kullanılmıştır (EK-7).

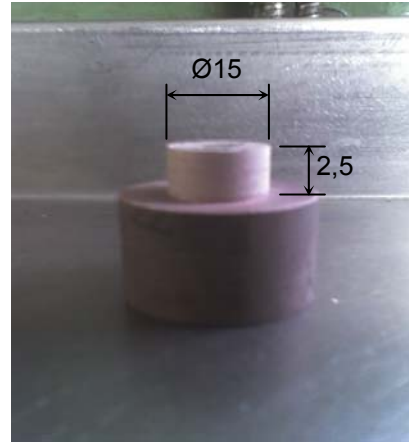
4.8. Kompozit Elektrotların Elektriksel Direnç Ölçümleri

4.8.1. Deney numunelerinin hazırlanması

Direnç ölçümü ve Perkolasyon (eşik) konsantrasyonu tayini deneyleri üç farklı elektrot grubu üzerinde yapılmıştır. Bu elektrotlar:

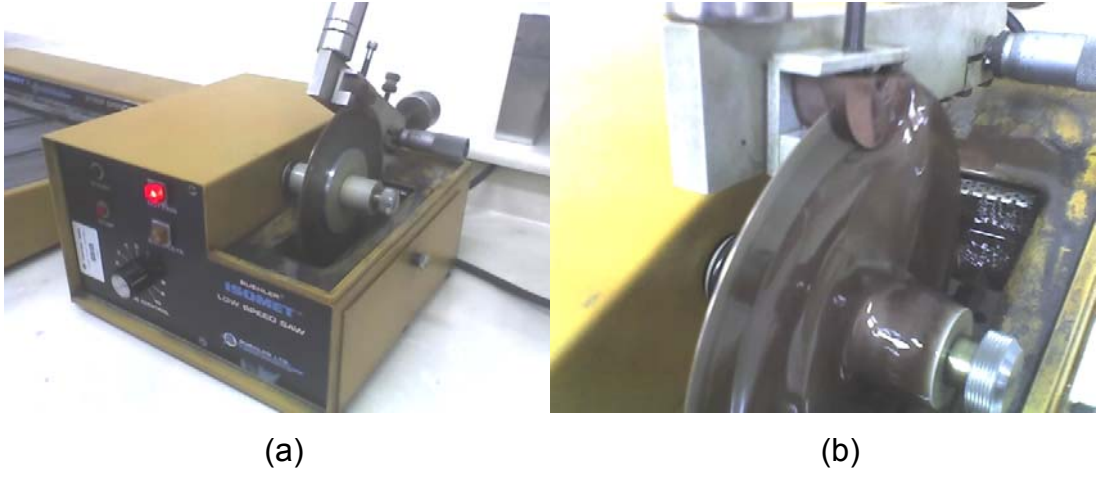
- Serbest (normal) bakır-polyester kompozit elektrot (N-B/P)
- Pişirilmiş bakır-polyester kompozit elektrot (P-B/P)
- Sıkıştırılmış bakır-polyester kompozit elektrot (S-B/P) dur.

Elektrotlar torna tezgahında 15 mm çapta ve en az 2,5 mm genişlikte bir fatura olacak şekilde işlendikten sonra Resim 4.7’de görülen geometriye işlenmiştir. 15 mm çapta ve en az 2,5 mm yükseklikteki bu faturalar bir demir testeresi yardımı ile dip kısımlarından kesilerek hassas kesme cihazında kesmeye hazır hale getirilmiştir. Kesmeye hazır haldeki silindirik numuneler, mikrometrelili hassas



Resim 4.7. Kesme öncesi tornada işlenmiş fatura [40]

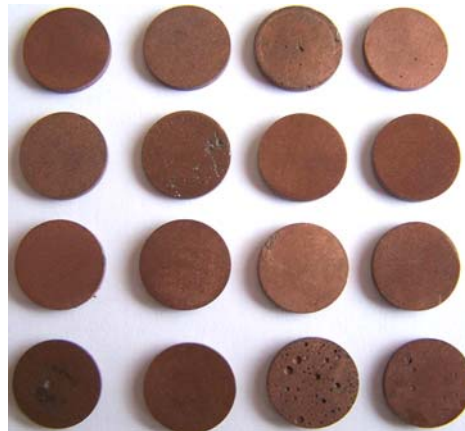
kesme cihazında 15 mm çap ve 1,5 mm kalınlıkta kesilerek disk şekline getirilmiştir. Resim 4.8 (a) ve (b)’de mikrometrik kesme cihazı ve kesme işlemi gösterilmiştir. Kesme sonu elde edilen disk numuneler her iki yüzeyi zımpara ve parlatma makinesinde taşlanarak direnç ölçümleri için pürüzsüz hale getirilmiştir. Resim 4.9’da sıralı zımpara bandı ve Resim 4.10’da ölçüme hazır hale getirilmiş disk numuneler görülmektedir. Numunelerin ölçümlere kadar oksitlenmelerini engellemek amacı ile her iki yüzüne bant yapıştırılmıştır. Ölçüm sırasında bu bantlar çıkartıldıktan sonra numune yüzeyindeki kir ve yağ artıklarını gidermek amacıyla etil alkolle temizlenerek ölçümlere hazır hale getirilmiştir.



Resim 4.8. (a) Mikrometrik kesme cihazı (b) parçanın kesilişi [40]



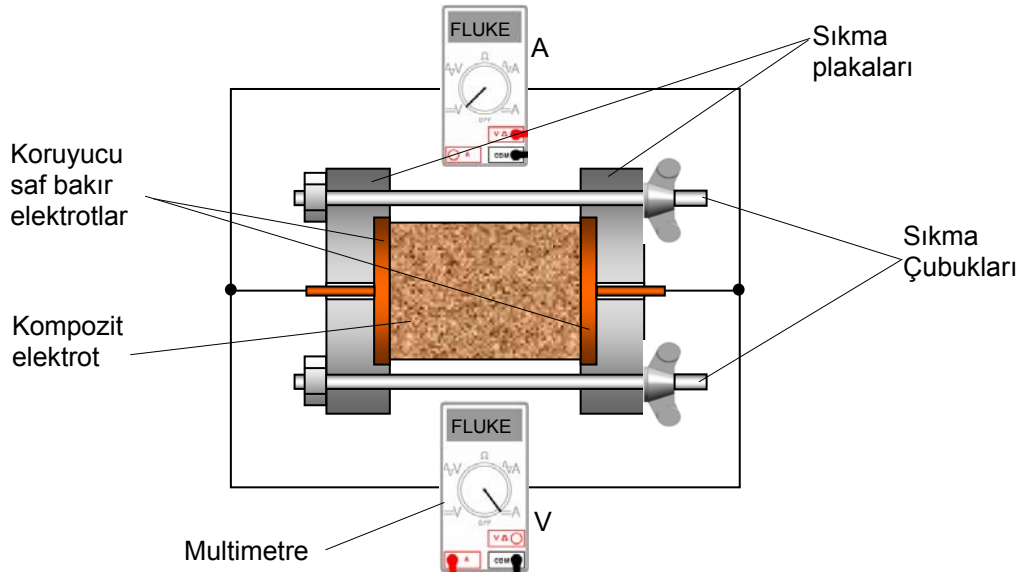
Resim 4.9. sıralı zımpara bandı [40]



Resim 4.10. Yüzeyleri parlatılmış, ölçüme hazır bazı numuneler [40]

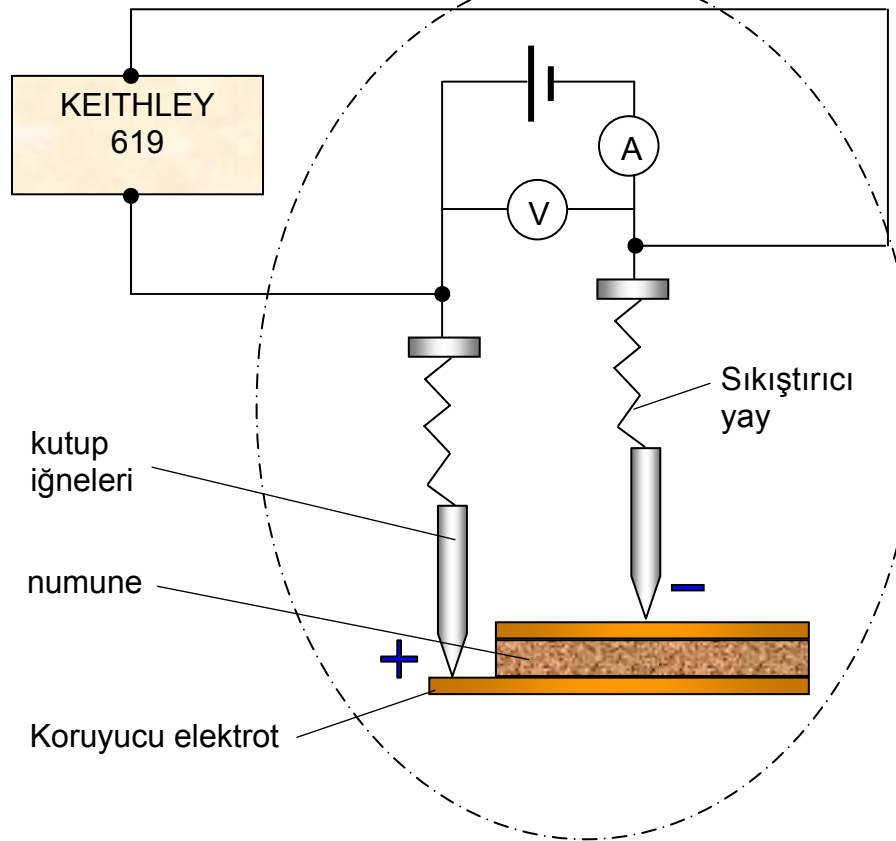
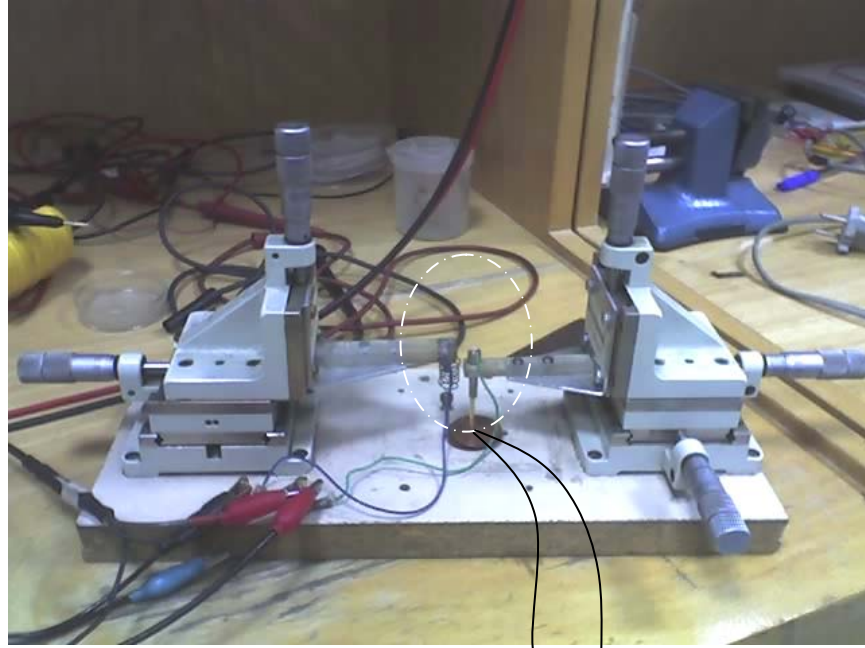
4.8.2. Numunelerin elektriksel direnç ölçümleri

Elektriksel direnç ölçümü deneylerine başlangıçta Şekil 4.4’de gösterilen basit bir aparat ile başlanmıştır. FLUKE-189 tipi dijital multimetre ile yapılan ölçümler değişken değerler vermesi ve her ölçümde aynı yüzeysel temas basıncının sağlanamamasından dolayı bu sistem güvenilir bulunmamıştır. Bunun yerine direnç okuma aralığı $0,1-1 \times 10^{12}$ olan, KEITHLEY-619 tipi doğru akım, programlanabilir bir elektrometre kullanılmıştır (Resim 4.12).



Şekil 4.4. Kompozit elektrot hacimsel direnç ölçümlerinde kullanılan aparat

Elektriksel direnç ölçümleri, cihazın değeri denge değerine ulaşmasından sonra (1-5 dakika beklendikten sonra) kaydedilmiştir. Resim 4.11’de gösterildiği gibi ölçümü yapılacak numuneler %99,99 saflıkta bakırdan üretilmiş 15 mm çap ve 1 mm kalınlıkta koruyucu elektrotlar arasına yerleştirildikten sonra aparatın kutup iğneleri ile sıkıştırılarak devre tamamlanmıştır (iki nokta temas metodu). Cihazın okuyabildiği en küçük akım değeri olan $0,1 \times 10^{-9}$ A değerine ayarlandıktan sonra gerilim göstergesinden gerilim değerleri okunarak kaydedilmiştir. Numunelere ait direnç değerleri ise gerilimin akıma oranından hesaplanarak bulunmuştur.



Resim 4.11 . Elektrot bağlama aparatı ve bağlantı detayı [40]



Resim 4.12. Direnç ölçümlerinde kullanılan KEITHLEY-619 tipi elektrometre [40]

Cihazın okuyabildiği en büyük direnç değeri 2,0 Tera-Ohm ($1,99999 \times 10^{12}$ ohm), gerilim değeri 200 Volt ve en küçük akım değeri 2 nano-Amper ($1,99999 \times 10^{-9}$ A) mertebesinde olduğundan bu değerlerin üzerindeki direnç değerleri ölçülememiştir. Yapılan ölçümlere ilişkin sonuçlar gerilim [V], akım [A], direnç [$\Omega = \text{volt/amper}$] ve iletkenlik [$1/\Omega\text{cm}$] olarak ölçülmüştür. İletkenlik değerleri giriş kısmında verilen (3.7) numaralı eşitlikten çekilen $1/\rho$ değeri olarak, N-B/P, P-B/P ve S-B/P elektrotlar için hesaplanmıştır.

4.9. Dolgu Malzemesi Tane Boyutu (d)

İlk aşamada ortalama 75 μm tanecik büyüklüğüne sahip olan bakır tozları 25 μm altı, 25-32 μm , 32-45 μm , 45-53 μm , 53-63 μm , 63-75 μm , 75-90 μm , 90-106 μm , 106-120 μm ve 120-150 μm aralığında tane boyutlarına elenerek ayrılmıştır (Resim 4.13). Ortalama olarak homojen sayılabilecek tane boyutlu bakır tozları hacimsel %43,6 oranında (kütlesel olarak %85B/15P) olacak şekilde karıştırılarak homojen tane boyutu dağılımlı elektrotlar olarak üretilmiştir. Üretilen elektrotların İİH ve EAH değerleri ölçülmüştür.

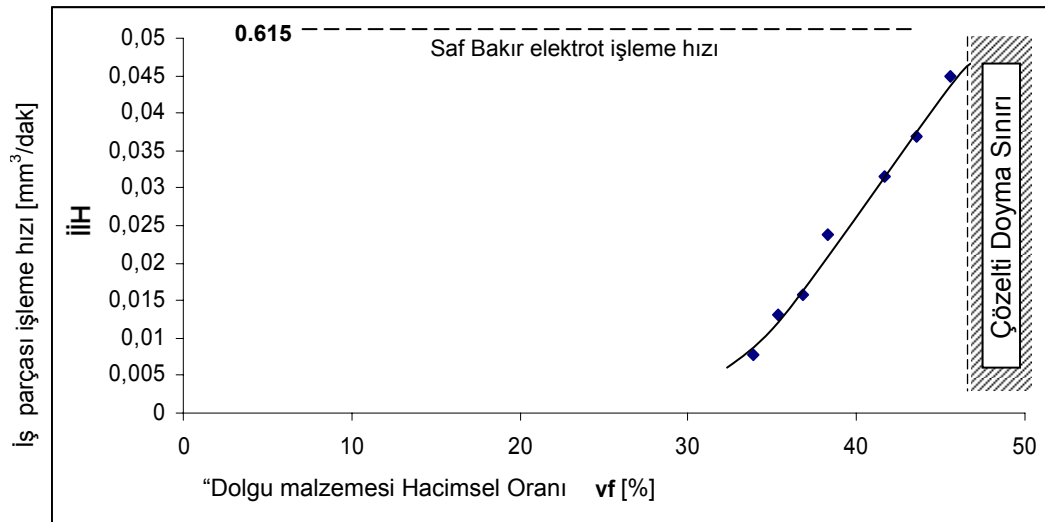


Resim 4.13. Toz eleme makinesi ve elekler [40]

5. DENEY SONUÇLARI

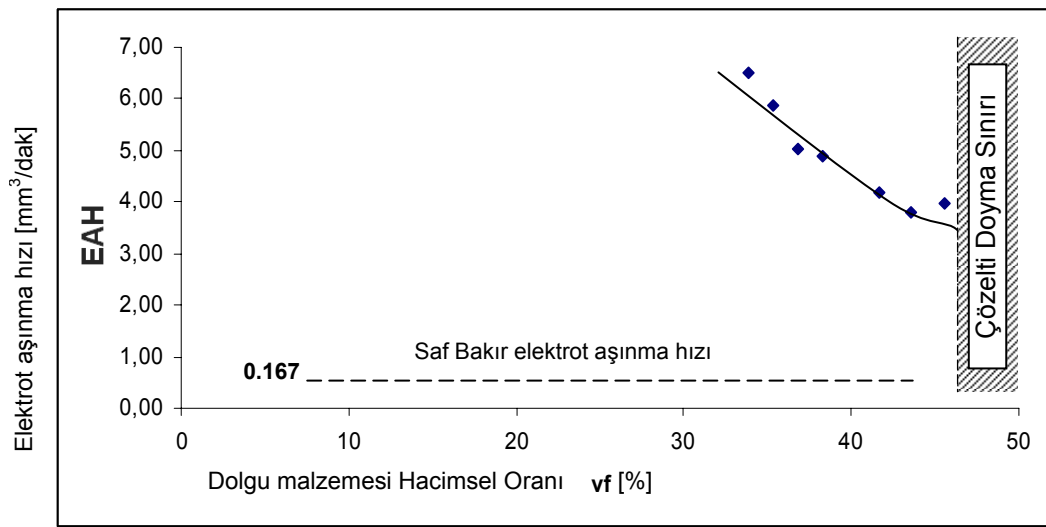
5.1. N-B/P Elektrotlarda Dolgu Malzemesi Konsantrasyonunun İİH, EAH ve BA ile Olan İlişkisi

Deneylerde, işleminin gerçekleştiği en düşük konsantrasyon kütleli olarak 79B/21P, hacimsel olarak %33,9 konsantrasyonu olmuştur. Bu oranın üzerinde üretilen kompozit elektrotların hepsi işleme yapmıştır. Bu elektrotların hacimsel dolgu malzemesi konsantrasyonları sırasıyla, %35,9 (80B/20P), %36,8 (81B/19P), %38,3 (82B/18P), %41,7 (84B/16P), %43,6 (85B/15P), %45,6 (86B/14P) ve %47,7 (87B/13P) olmuştur. Bu elektrotlara ait İİH, EAH ve BA değerleri EK-8’de verilmiştir. En son %55,1 (90B/10P) oranı denenmiş fakat üretilmemiştir. Bunun sebebi, aşırı doymuş çözeltinin meydana gelmiş olmasıdır (Resim 5.2). Matris malzeme takviye malzemeyi tutma işlevini yapamadığı için üretilen elektrot rijit bir yapı gösterememiş, tornada talaşlı işleme sırasında dağılmıştır. İİH değerlerinin üretilen kompozit elektrotlardaki bakır tozu hacimsel yüzdesine göre değişimi Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. N-B/P elektrota ait İİH'nın dolgu malzemesi (bakır tozu) hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi

Bu grafikten görüldüğü gibi işleme hızı %33,9 (kütlesel olarak 79B/21P) değerinden %47,7 (87B/13P) değerine kadar dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu ile yaklaşık doğru orantılı olacak şekilde artış göstermiş ve yaklaşık %48 değerinden itibaren doyuma ulaşmıştır. EAH ise (Şekil 5.2) dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu ile ters orantılı bir biçimde yaklaşık doğrusal olarak azalarak doyuma ulaşmıştır.

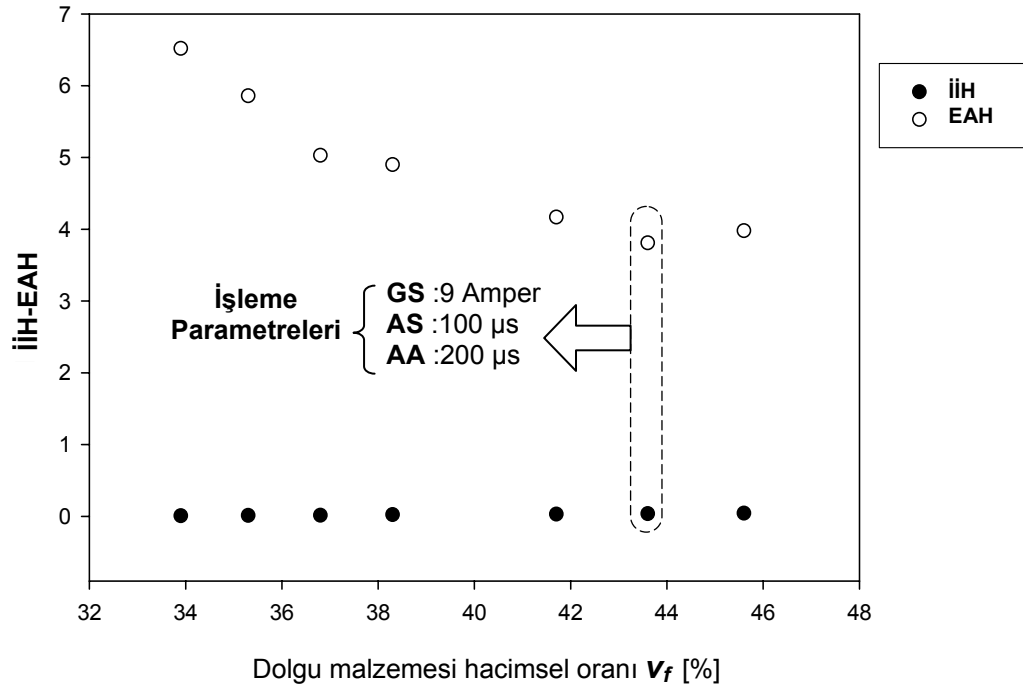


Şekil 5.2. N-B/P elektrota ait EAH'nın dolgu malzemesi (bakır tozu) hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi

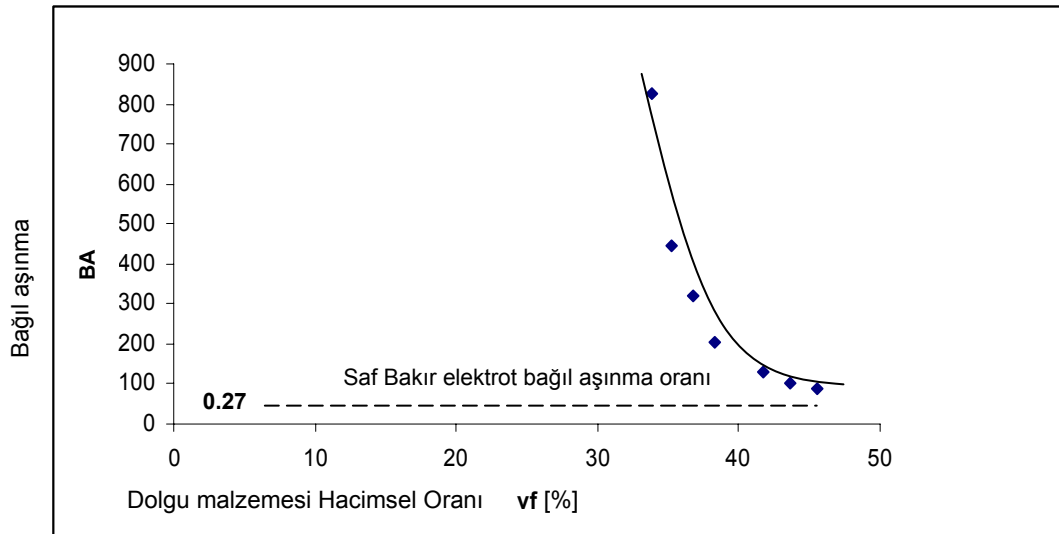
Şekil 5.3'de İİH ve EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimleri birlikte gösterilmiştir. İİH değerleri EAH değerlerine göre çok daha düşük çıkmıştır. Bu da elektrotun iş parçasına göre çok daha fazla aşındığını göstermektedir. Grafikte görüldüğü gibi BA, dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu ile ters orantılı (doğrusal) olarak %40 değerine kadar azaldıktan sonra %50 değerlerine doğru doyma eğilimi göstermiştir.

Deneysel çalışmalar, elektrotun iş parçasına oranla çok daha fazla aşındığını göstermiştir. Bu olumsuzluğa, kompozit elektrotun kür olması sırasında içinde kalan hava boşlukları ve düşük elektriksel iletkenlik sebep olmaktadır.

İİH'nın EAH'a göre değişimi

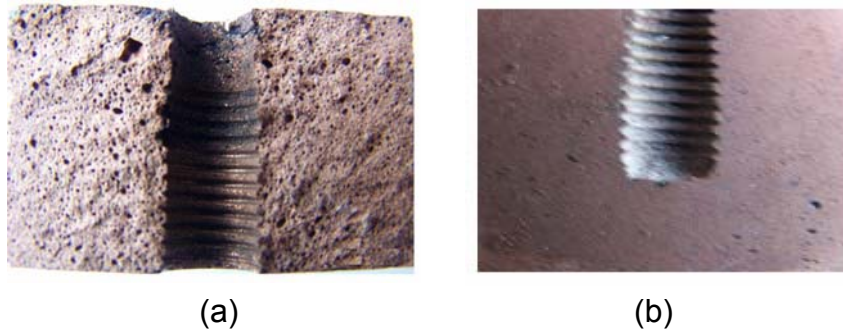


Şekil 5.3. N-B/P elektrota ait İİH ve EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişiminin karşılaştırması



Şekil 5.4. N-B/P elektrota ait BA'nın dolgu malzemesi (bakır tozu) hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi

Bu olumsuzluk, yani gözeneklilik, ileride bahsedileceği üzere, kür sırasında elektrotun preslenmesi ile büyük ölçüde aşılabilmektedir (Resim 5.1). Bu sayede elektrotun elektriksel iletkenliği dolayısıyla işleme performansı da arttırılmıştır. Diğer yandan kompozit yapı içine katılan iletken tozu konsantrasyonu arttırılarak gözeneklilik azaltılabilir ve böylece elektrot performansı daha da iyileştirilebilir.



Resim 5.1. Elektrotta döküm sonrası oluşan gözenekli yapı (a) N-B/P (b) S-B/P elektrot [40]

Dolgu malzemesi konsantrasyonunun İİH ile ilişkisi deneyleri sonucunda, kompozit malzemeye ilişkin önemli karakteristik katsayılar elde edilmiştir. Bunlar, serbest dökülmüş polyester reçine-bakır tozlu kompozit sistem için perkolasyon eşik konsantrasyonu $v_c = \%33,8$ ve doyma sınırı yaklaşık olarak $F = \%55$ (kütleli olarak 90B/10P gr) bulunmuştur.



Resim 5.2. Aşırı dolgu malzemesi yüklemesi sonucu elektrotta meydana gelen tozlaşma ve deformasyonlar [40]

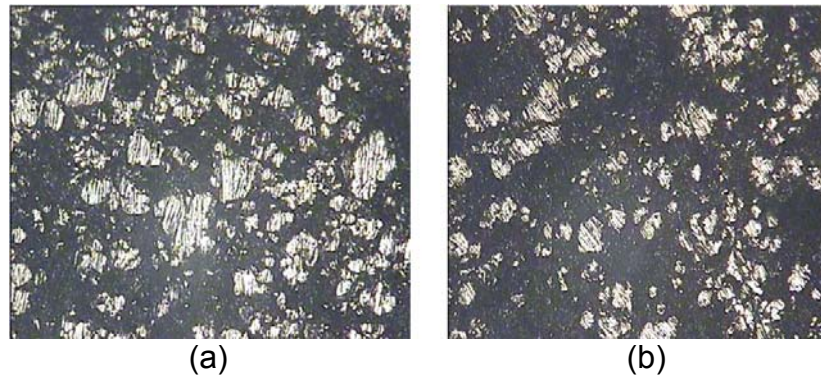
N-B/P elektrotla yapılan deneylerde, %38,3 (82B/18P) üretilen iki farklı elektrottan birinde dondurucu oranı yüksek, katalizör oranı düşük tutulmuş, diğerinde ise tam tersi olarak, dondurucu oranı düşük katalizör oranı yüksek tutulmuştur. Bu iki elektrottan ilki, yani dondurucu oranı yüksek katalizör oranı düşük olan elektrot işleme yapmış diğeri yapmamıştır. Bu uygulama bir kaç farklı oranlı elektrotlara da uygulanmış benzer sonuçlar alınmıştır. Buna göre dondurucu oranının kompozit yapının iletkenliğine engel olmadığı fakat katalizörün (kobalt) yüksek oranda katılmasının iletkenliği kötüleştirdiği gözlenmiştir. Dolayısıyla daha kaliteli kompozit elektrot için dondurucu miktarına göre daha az katalizör kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Örneğin, karışıma katılan katalizör miktarının, kütleli olarak %90 bakır içeren 100 gr'lık bakır tozu-polyester çözeltisinde 1-1,2 gr aralığında olması durumunda istenen sonuçları verdiği tespit edilmiştir.

Kompozit malzemenin yüksek devirde uzun süre karıştırılması sonucu elde edilen elektrotların iyi sonuçlar vermediği hatta aynı oranlı fakat kısa süreli, düşük devirde üretilen elektrotla göre hiç çalışmadığı görülmüştür. Bu yüzden karışım kısa süreli (5 dakika) ve düşük devirde (60-70 dev/dk) karıştırılarak hazırlanmıştır.

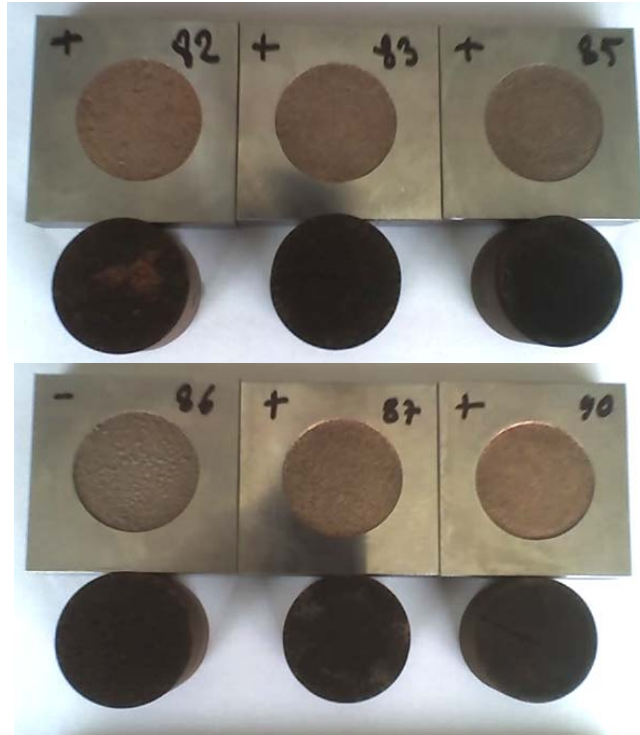
5.2. S-B/P Elektrotlarda Dolgu Malzemesi Konsantrasyonunun İİH, EAH ve BA ile Olan İlişkisi

Üretimler sırasında, %38,3 (81B/19P) hacimsel dolgu oranı altındaki değerlerde sıkıştırılabilirliğin, düşük viskoziteden dolayı düşük ve zor olduğu görülmüştür. Presleme anında, çok düşük hızlarla bile yapılsa, malzemenin kalıp boşluklarından fışkırdığı gözlemlenmiştir. Bu durumu en aza indirmek yani sıkıştırılabilirliği arttırmak için bir süre beklenerek karışımın biraz daha serleşmesi (jel kıvamına gelmesi) sağlandıktan sonra presleme yapılmıştır. Burada kalıp içindeki karışımın tamamen kür olmadan sıkıştırılması önemlidir. Kür olduktan yani sertleşme gerçekleşikten sonraki sıkıştırma kristaller arası istiflemeyi çok, ezilmeye sebep olmaktadır.

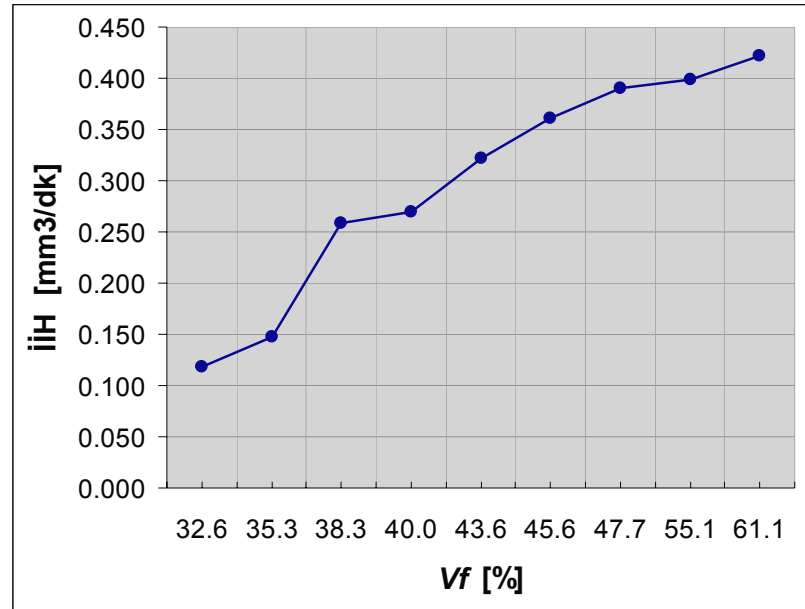
Bazı elektrot boylarının daha kısa olması döküm sırasında ve/veya kalıptan çıkarırken oluşan boşluklu ve deformasyonlu bölgelerin tornada alınmasından dolayıdır. Yüksek dolgu oranlı karışımlarda ise döküm sonrası kür sırasında oluşan çatlamlar veya kür sonrası tornalama aşamasında aşırı doygunluktan dolayı dağılarak parçalanmalar üretim sırasında yaşanan en büyük sorunlardır. Bu olumsuzlukların sonucu olarak preslenmiş bakır-polyester kompozit sistemde kütleli olarak %92 bakır-%8 polyester (%61.0 hacimsel) üzerindeki değerlerde üretim yapılamamıştır. Alt değer olarak ise Kütleli olarak %78 bakır-%22 polyester (%32,6 hacimsel) oranı altındaki değerlerde üretilen elektrotlar işleme yapmamıştır. Resim 5.2-a ve Resim 5.2-b'de sırasıyla, %35,3 ve %32,6 hacimsel konsantrasyonlu elektrotların iç yapılarına ait 100 kat büyütülmüş mikro fotoğrafları gösterilmiştir. Resim 5.3'de bazı S-B/P elektrot ve iş parçası görüntüleri verilmiştir. S-B/P elektrotu ait deney sonuçları EK-9(a)'da verilmiştir. Bu sonuçlara yönelik İİH, EAH, BA ve İİH-EAH grafikleri sırasıyla Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Şekil 5.5'de verilen İİH- v_f grafiğinden anlaşılacağı gibi İİH, bakır konsantrasyonu ile doğrusal olarak %61,1 (kütleli %92 bakır) oranına kadar artış göstermiştir. EAH- v_f grafiğinde (Şekil 5.6) ise tam tersi olarak, azalış gözlenmiştir. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de verilen grafiklerden EAH'nın İİH'na göre çok daha fazla olduğu ancak konsantrasyon yükseldikçe birbirlerine yaklaştıkları görülmüştür.



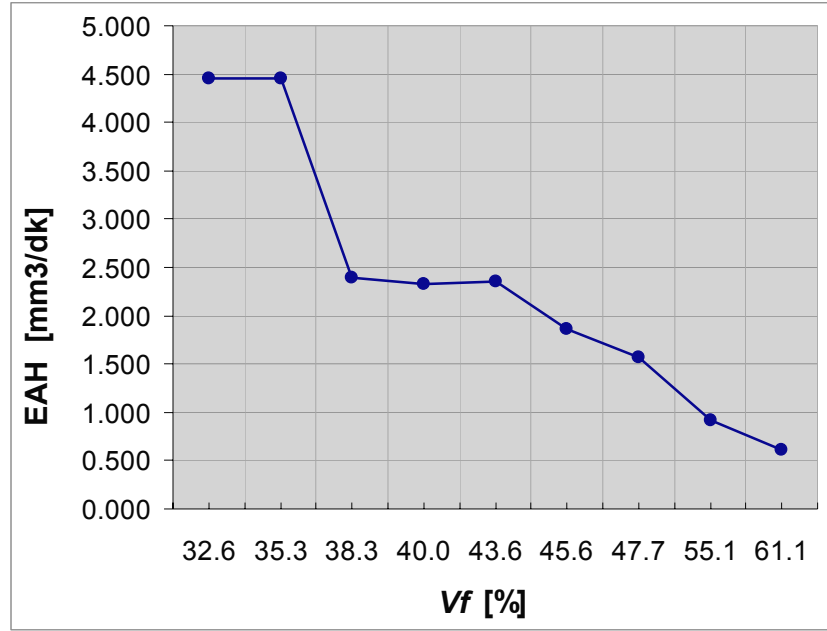
Resim 5.3. (a) Bakır hacimsel konsantrasyonu %35,3 olan bakır-polyester elektrotun iç yapı fotoğrafı (b) Bakır hacimsel konsantrasyonu %32,6 olan bakır-polyester elektrotun iç yapı fotoğrafı (Fotoğraflar gerçek görüntünün 100 kat büyütülmüş halidir)



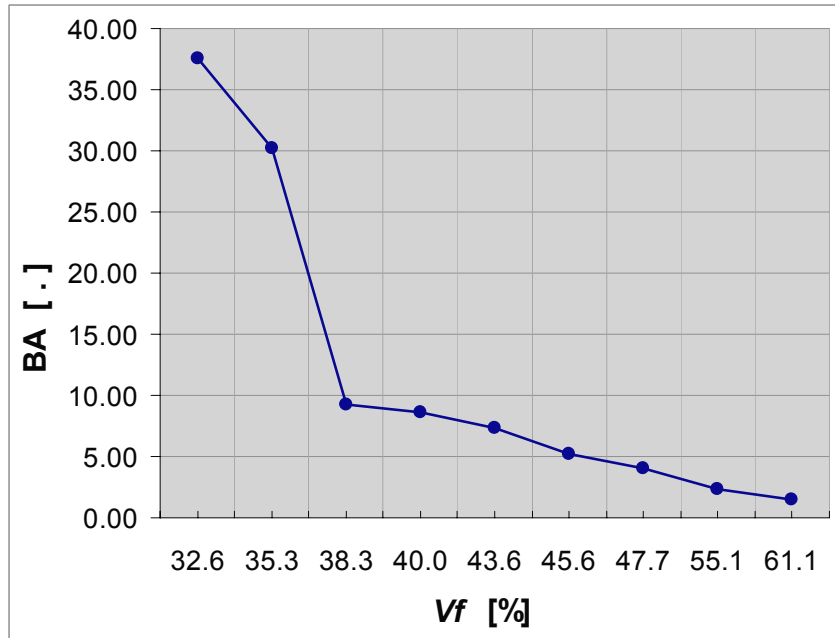
Resim 5.4. Preslenmiş bakır-polyester elektrotlara ait bazı elektrot-işparçası görüntüleri [40]



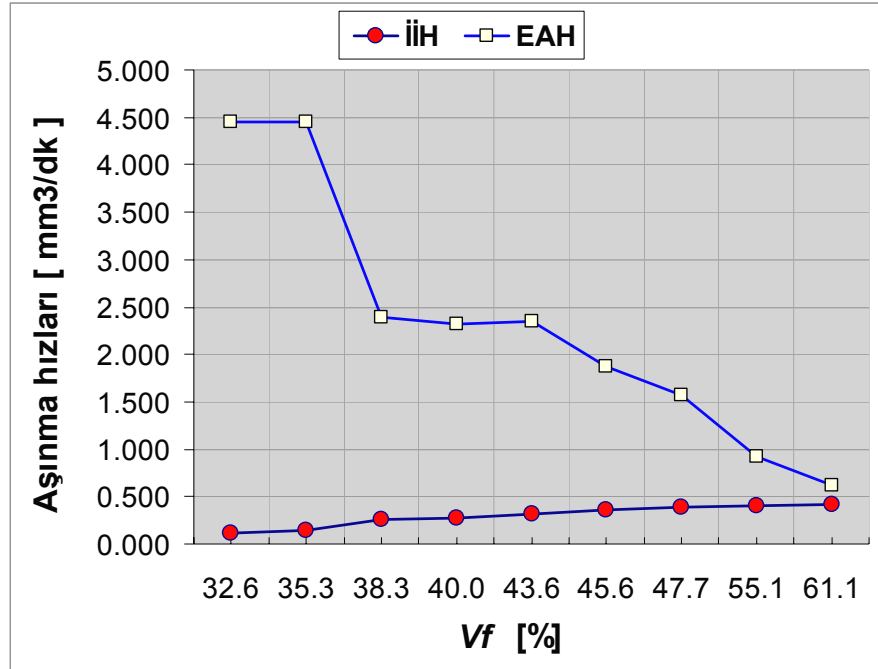
Şekil 5.5. S-B/P elektrota ait İİH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



Şekil 5.6. S-B/P elektrota ait EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



Şekil 5.7. S-B/P elektrota ait BA'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi

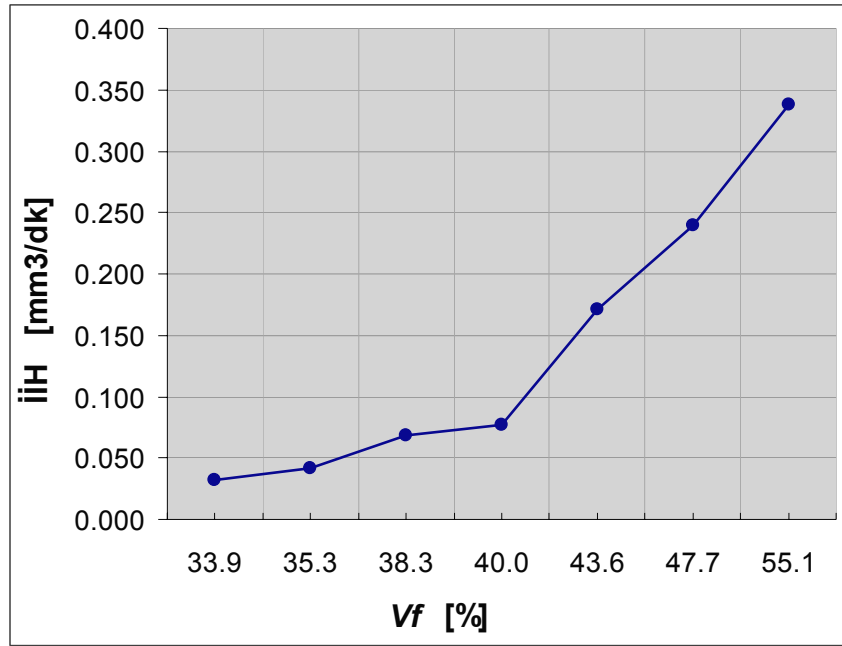


Şekil 5.8. S-B/P elektrota ait İİH ile EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimleri

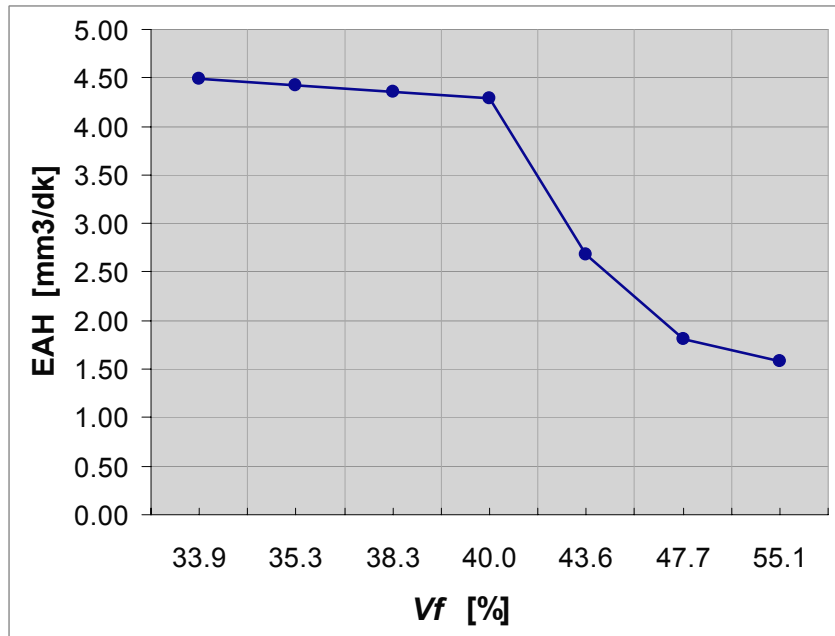
5.3. P-B/P Elektrotlarda Dolgu Malzemesi Konsantrasyonunun İİH, EAH ve BA ile Olan İlişkisi

Deneyler sonucu elde edilen verilere (EK-9(b)) göre İİH, EAH, BA ve İİH-EAH ilişkisi grafikleri sırasıyla Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de verilmiştir.

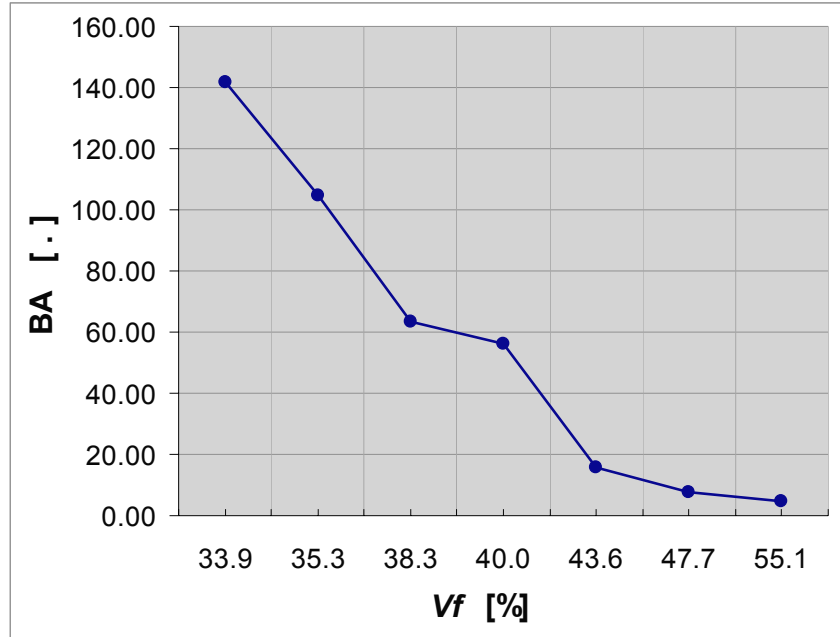
Elde edilen grafik ve verilerden, İİH'nın bakır konsantrasyonu ile yaklaşık olarak parabolik bir artış gösterdiği görülmüştür. EAH ile bakır konsantrasyonunun %40 değerine kadar düşük eğimli, %40'dan sonra daha keskin bir eğimle doğrusal azalış gösterdiği görülmüştür. Bakır tozu oranı arttıkça BA'nın giderek düştüğü %55 oranına doğru saf bakır elektrota yaklaştığı görülmüştür.



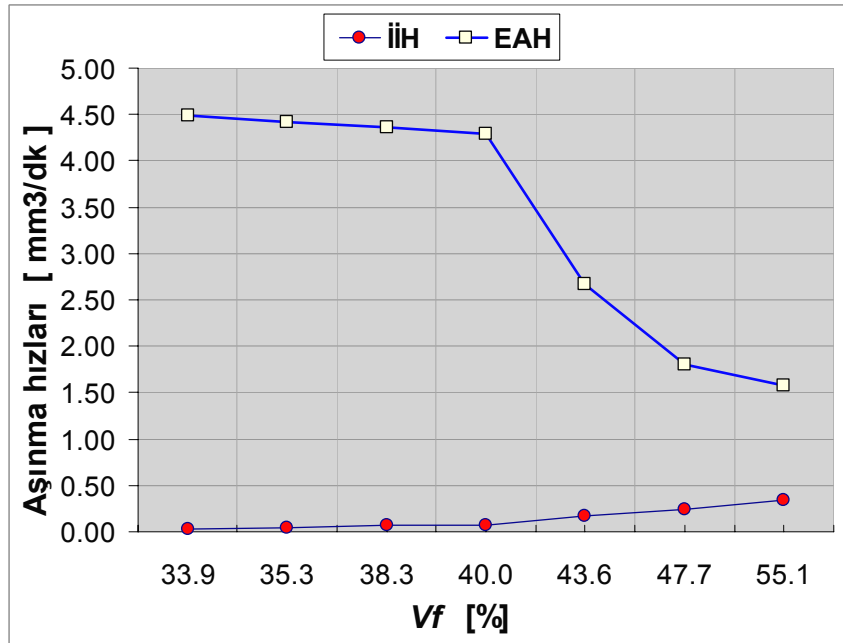
Şekil 5.9. P-B/P elektrota ait İİH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



Şekil 5.10. P-B/P elektrota ait EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi.



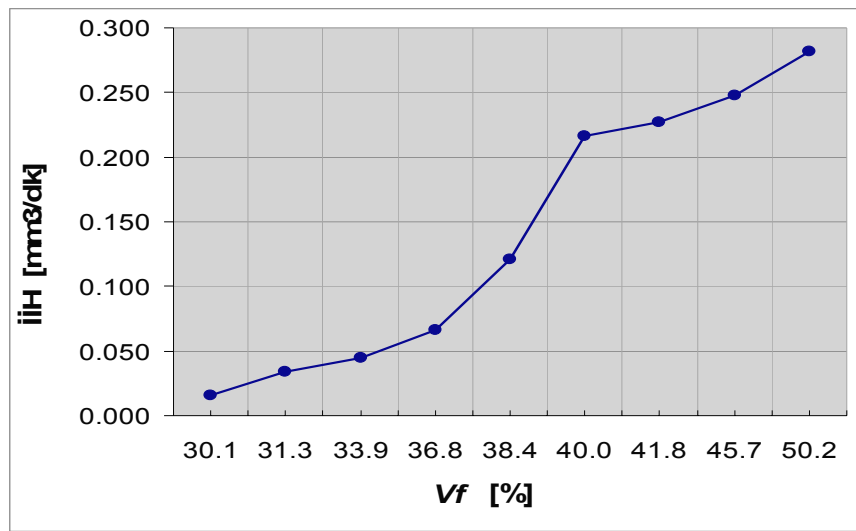
Şekil 5.11. P-B/P elektrota ait BA'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



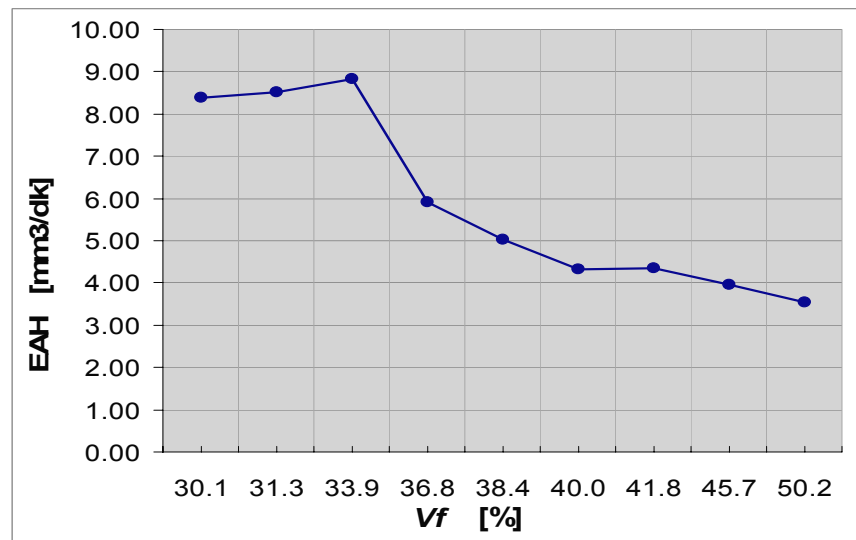
Şekil 5.12. P-B/P elektrota ait İİH ile EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimleri

5.4. S-B/G/P Elektrotlarda Dolgu Malzemesi Konsantrasyonunun İİH, EAH ve BA ile Olan İlişkisi

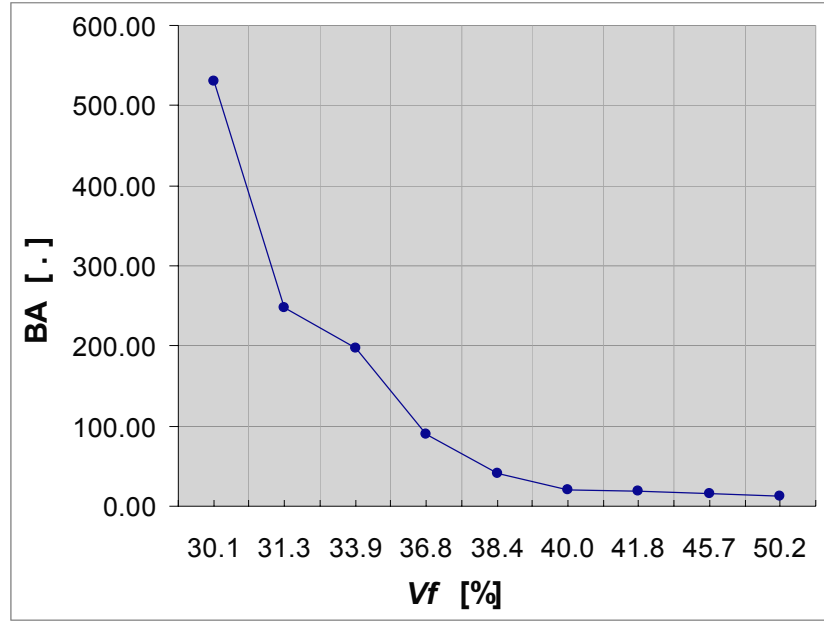
Deneysel sonuçlar EK-10(a)'da gösterilmiştir. İİH dolgu malzemesi konsantrasyonuyla doğrusal bir artış gösterirken (Şekil 5.13), EAH doğrusal azalış göstermiştir (Şekil 5.14). Sonuçlar P-B/G/P elektrotlara göre biraz daha iyi (İİH yüksek, EAH düşük) çıkmıştır (Şekil 5.15 ve Şekil 5.16).



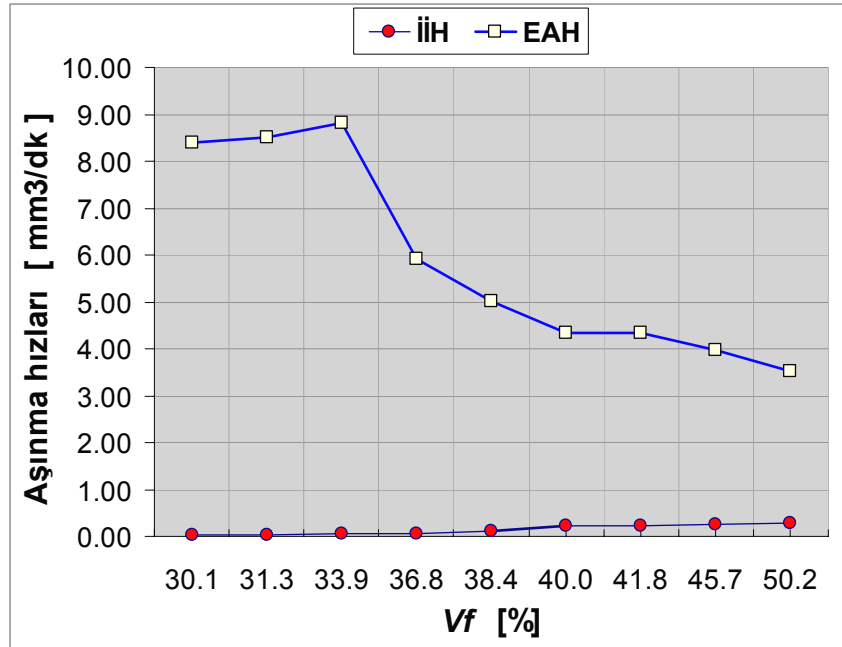
Şekil 5.13. S-B/G/P elektrota ait İİH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



Şekil 5.14. S-B/G/P elektrota ait EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



Şekil 5.15. S-B/G/P elektrota ait BA'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



Şekil 5.16. S-B/G/P elektrota ait İİH ile EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimleri

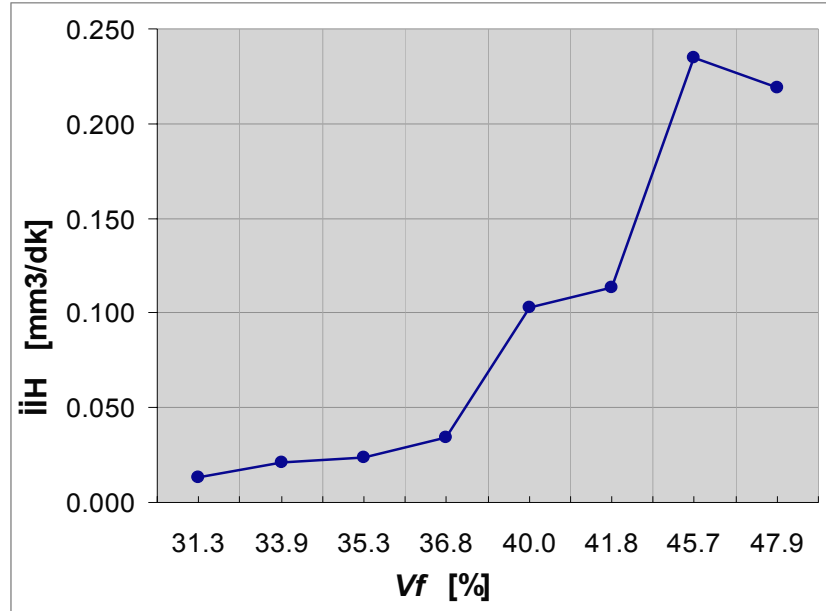
5.5. P-B/G/P Elektrotlarda Dolgu Malzemesi Konsantrasyonunun İİH, EAH ve BA ile Olan İlişkisi

Grafit tozu yapısı itibariyle bakır-polyester çözeltiyi çok küçük konsantrasyon değerlerinde bile doyuma ulaştırmaktadır. Bunun yanı sıra yapılan ön denemelerde kütleli olarak %10'un üzerindeki karışım oranlarında, düşük elektriksel iletkenlik dolayısıyla düşük işleme performansı vermiştir. Bu yüzden yüksek oranlarda kullanılan grafit tozunun gerek elektrot aşınmasının çok yüksek olması ve gerekse İİH'nın çok düşük olması gibi olumsuzluklarından dolayı karışım oranı düşük tutulmuş ve ön denemeler sonucunda kütleli olarak %5 grafit karışım oranı en iyi oran olarak tespit edilmiştir.

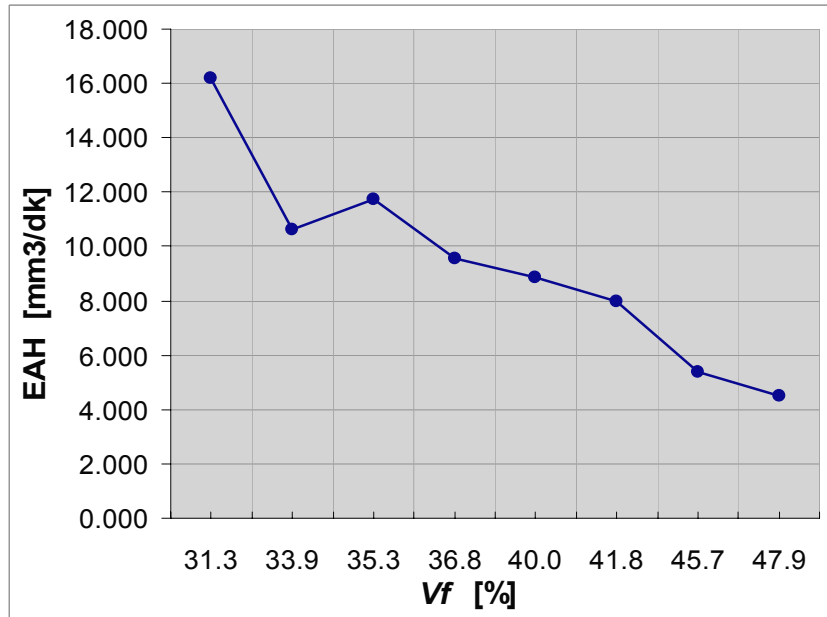
Deneyisel çalışmalarda hacimsel %55,1 bakır-%11,3 grafit (kütleli %86 bakır-%5 grafit-%9 polyester) konsantrasyonu üzerinde elektrot üretilmemiştir. Alt sınır olarak da hacimsel %33,9 bakır-%8,3 grafit (kütleli %76 bakır-%5 grafit-%19 polyester) altındaki elektrotlar işleme yapmamıştır. Deneyisel sonuçlar EK-10(b)'de gösterilmiştir. İİH konsantrasyon ile doğrusal olarak artmış (Şekil 5.17), EAH ise azalmıştır (Şekil 5.18). Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de verilen grafiklerden açıkça görüldüğü gibi EAH değerleri İİH değerlerinden çok daha büyük çıkmıştır. Hatta bu fark tek fazlı kompozit elektrotlara (S-B/P ve P-B/P) göre bile daha büyüktür.

Çift dolgu malzemeli (bakır-grafit) elektrotlarda grafit oranı arttırıldıkça çözeltinin doyma noktasının ani bir şekilde düştüğü gözlemlenmiş, bu yüzden bakır-grafit-polyester kompozit elektrotlarda grafit oranı bakır oranına göre çok daha düşük tutulmuştur (grafit hacimsel oranı % 8-13 arası). Bunun yanı sıra grafit katkılı elektrotların üretimi sırasında, grafit oranı yükseldikçe karışımın sıkıştırılabilirliğinin de belirgin bir şekilde azaldığı gözlenmiştir. Karışım kür sırasında sıkıştırılırken kalıp etrafındaki boşluklardan fışkırmış bu da diğer elektrotlarla eşit oranda ve homojen bir sıkışmaya engel olmuştur. Dolayısıyla kompozit yapı içinde polyester ve/veya grafit oranı yüksek olan

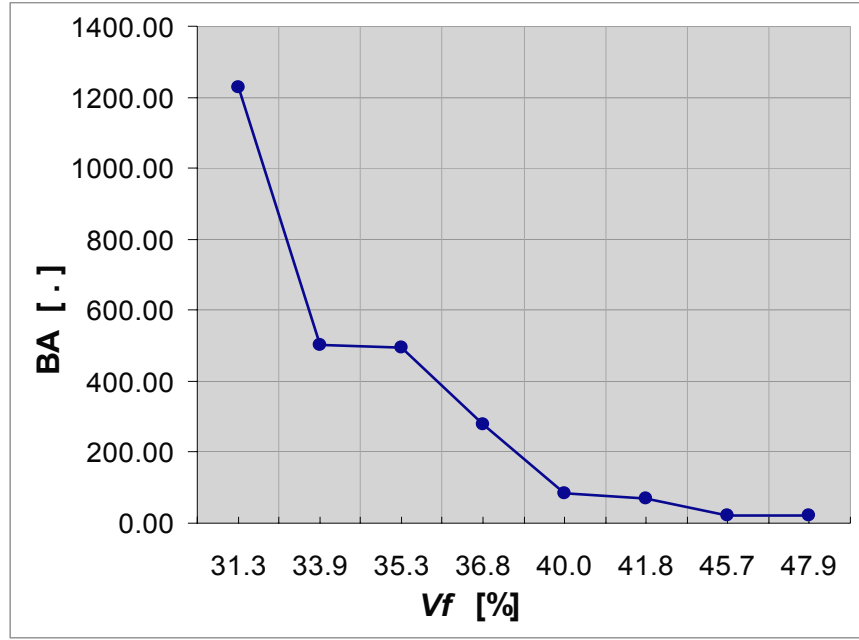
elektrotların performans değerleri ister serbest üretilsin isterse preslenerek üretilsin bir birlerine yakın çıkmıştır.



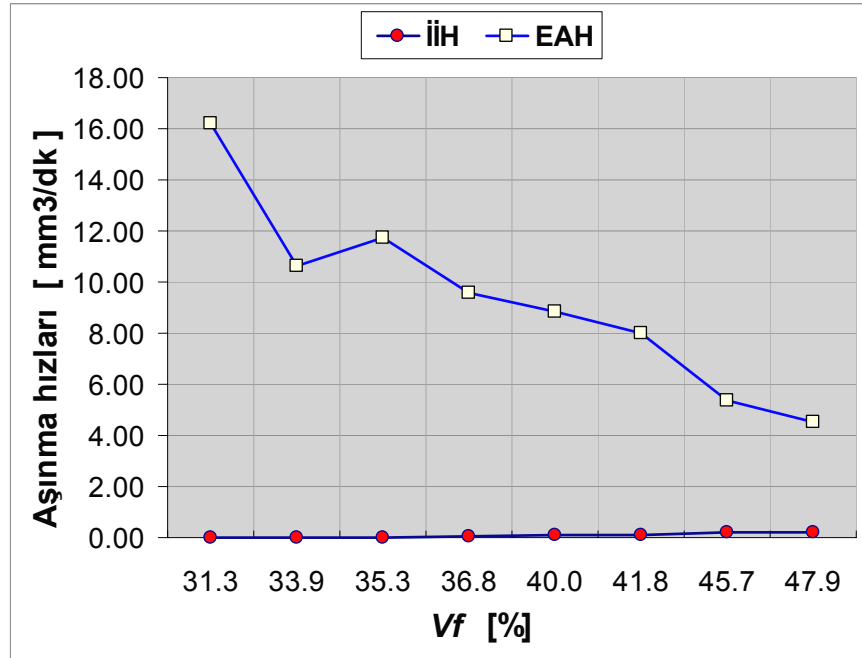
Şekil 5.17. P-B/G/P elektrota ait İİH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



Şekil 5.18. P-B/G/P elektrota ait EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



Şekil 5.19. P-B/G/P elektrota ait BA'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



Şekil 5.20. P-B/G/P elektrota ait İİH ile EAH'nın dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimleri

5.6. Farklı Türdeki Elektrotlarda Dolgu Malzemesi Konsantrasyonunun İİH ve EAH'na Etkisinin Karşılaştırması

Farklı türdeki elektrotlara ait, İİH ve EAH deneyleri sonucu elde edilen verilere göre İİH (Şekil 5.24) en yüksek ve EAH (Şekil 5.25) en az olan elektrotların sıkıştırılmış bakır-polyester kompozit (S-B/P) elektrotlar olduğu görülmüştür. Bu elektrotlar sıkıştırmadan (istiflenmeden) dolayı daha yüksek dolgu malzemesi konsantrasyonlarında, yani daha yüksek yoğunluklarda üretilmiştir. Tipik olarak, bakır-polyester elektrotlarda kütleli %92-93 oranlarına kadar çıkılabilmektedir. Öte yandan sıkıştırma etkisi ile iletken tanecikler birbirlerine daha da yakınlaştığından dolayı elektriksel iletkenlik daha düşük konsantrasyonlarda başlamıştır. İletkenliğin başladığı, yani çalışabilir en düşük dolgu malzemesi konsantrasyonlu elektrotlar (kütleli olarak %77 bakır-%22 polyester oranıyla) preslenmiş bakır-polyester elektrotlardan elde edilmiştir. Örneğin, S-B/P elektrotlardan kütleli %92bakır-%8polyester oranlı elektrotun İİH değeri yaklaşık 0,422 [mm^3/dk], saf bakır elektrotun İİH olan 0,615 [mm^3/dk] değerine çok yaklaşmıştır. EAH olarak değerler, kompozit elektrot için 0,612 [mm^3/dk] iken, saf bakır elektrot için 0,167 [mm^3/dk], BA değerleri ise saf bakır elektrotta 0,27 iken preslenmiş bakır-polyester elektrotta 1,45 olarak tespit edilmiştir. Bu sayısal değerlerden anlaşılacağı gibi kompozit yapı içindeki iletken parçacık adedi arttıkça ve bu iletken parçacıklar birbirlerine yaklaştıkça saf bakır elektrotta yakın sonuçlar elde edilmiştir.

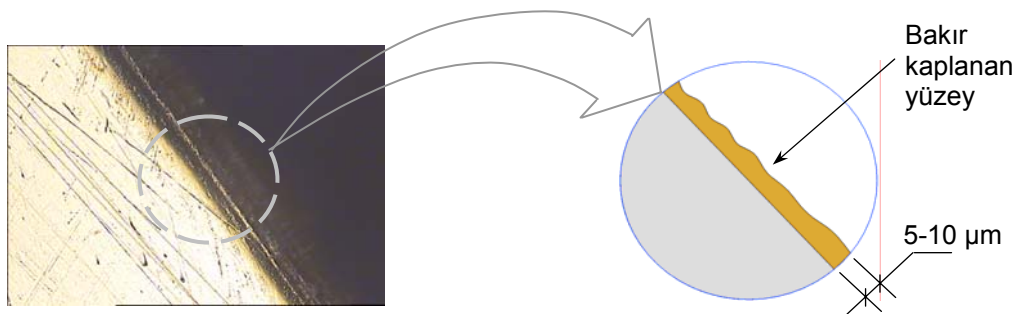
Sıkıştırılmış bakır-polyester elektrotlardan sonra İİH en yüksek ve EAH en düşük olan elektrotlar, pişirilmiş serbest bakır-polyester (P-B/P) elektrotlar olmuştur. Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'de serbest ve pişirilmiş bakır-polyester elektrotların İİH ve EAH karşılaştırmaları verilmiştir. Sonuç olarak en yüksek İİH ve en düşük EAH kriterlerine göre sıralama saf bakır, S-B/P, P-B/P, S-B/G-P, P-B/G/P ve en son N-B/P şeklinde olmuştur (Şekil 5.24 ve Şekil 5.25). Dolgu malzemesi konsantrasyonu yükseldikçe S-B/P ve P-B/P elektrotların BA değerleri saf bakır elektrotun BA değerine çok yaklaşmıştır (Şekil 5.26).

Dolayısıyla kompozit yapıdaki bakır tozu oranı artırıldıkça kompozit elektrot karakter olarak saf bakır elektrota yaklaşmaktadır.

Yapılan ölçümler sonucu yüzey pürüzlülüğü değerlerinin 2-7,5 μmRa arasında (saf bakır elektrot için 0,8 μmRa ölçülmüştür) değiştiği yani pürüzlülüğü yüksek bitirme yüzeyleri elde edildiği görülmüştür.

Kompozit karışım kür olurken katalizör, hızlandırıcı ve polyester arasındaki iç tepkimelerden dolayı önce hızla ısınmış ardından da aynı hızla soğumuştur (10-15 dakika). Soğuma olayı gerçekleştikten sonra kompozit yapının çok büyük oranda (ön-kür olduğu) katılaştığı görülmüştür. Bu katılaşma süresi yukarıda bahsedilen üç kimyasalın oranlarına göre değişiklik göstermiştir (5 dakika-3 ay). Fakat işleme yapan elektrotlar için bu sürenin genellikle 5-15 dakika sürdüğü tespit edilmiştir. Bu süreden sonra yani soğuyup katılaşmadan sonra, kompozit yapı üzerinde şekil değiştirmeye yönelik etkiler iletken taneler arası istiflenmeden çok, elastik veya plastik deformasyonlara (ezilme gibi) sebep olduğu, bu sebeple kompozit yapı içindeki iletken tanelerin iyi bir biçimde istiflenebilmesi için sıkıştırma işleminin jelleşme ile katılaşma arasında yapılması gerektiği görülmüştür.

Dolgu malzemesi konsantrasyonunun, İİH ve EAH ile ilişkisi deneylerinin sonucunda, tüm tip elektrotlar için, işleme sırasında polarizasyon değişiminin İİH'nı az da olsa attırdığı bununla birlikte EAH'nı belirgin oranda azalttığı gözlenmiştir.



Şekil 5.21. İşleme sonucu iş parçası yüzeyine difüze olmuş bakır tabakası

Bu yüzden deneylerde polarite elektrot (-) iş parçası (+) olarak ayarlanmıştır. Aynı zamanda bu tip polarite ile işlendiğinde iş parçası yüzeyine bakır difüzyonunun daha az olduğu görülmüştür. Normal polarite durumunda Şekil 5.21’de gösterildiği gibi (elektrot (+) iş parçası (-)) yaklaşık 5-10 µm arasında bir kalınlıkta bakır kaplanmış tabaka oluştuğu görülmüştür.

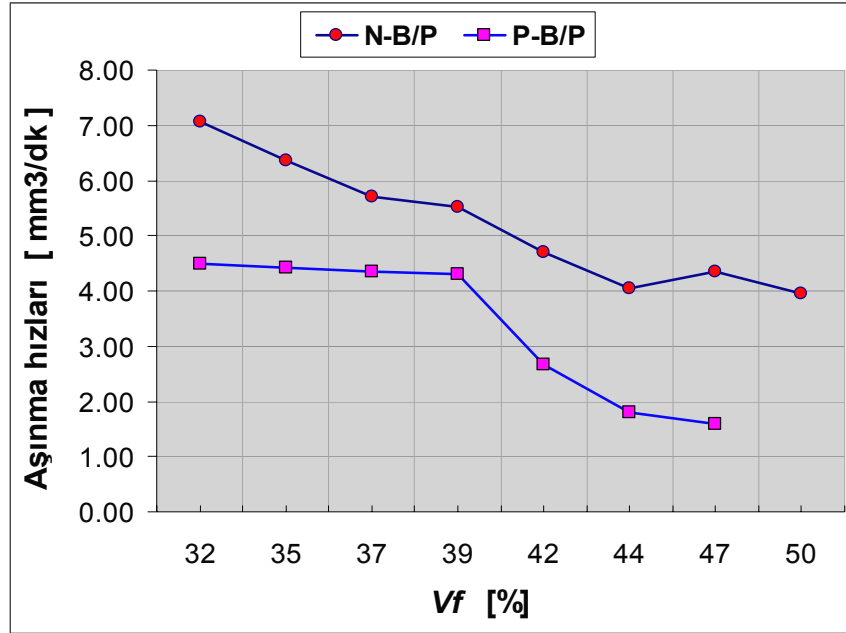
Literatür çalışması kısmında bahsedilen ve deneysel çalışmalarda da açıkça görülen bir diğer önemli husus ise, kürden önceki kaliteli karıştırmanın iletkenliğe dolayısıyla işleme performanslarına olan olumsuz etkisidir. Kompozit karışımı kalıba dökmeden ve hızlandırıcıyı eklemekten önce uzun süre ve homojen (mikser veya benzeri bir karıştırıcı ile yüksek devirde) karıştırıldığında kür sonrası elde edilen elektrotların, kısa süreli ve elle karıştırılmış aynı oranlı elektrotlara göre işlediği veya hiç işleme yapmadığı görülmüştür. Dolayısıyla elektrot işleme ve aşınma performansları açısından, kompozit karışımın uzun süreli ve homojen bir biçimde karıştırılmaması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Elektrotları işleme öncesi pişirmenin, pişirilmemiş aynı karışım oranlı ve tipteki elektrotlara oranla çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Pişirilmiş elektrotların aynı karışım oranlı ve tipteki elektrotlara göre elektrik iletkenliğinin daha iyi, İH’nın daha yüksek ve EAH’nın daha düşük olduğu saptanmıştır. Ancak pişirmenin yukarıda bahsedilen bu olumlu yanları yanında bazı

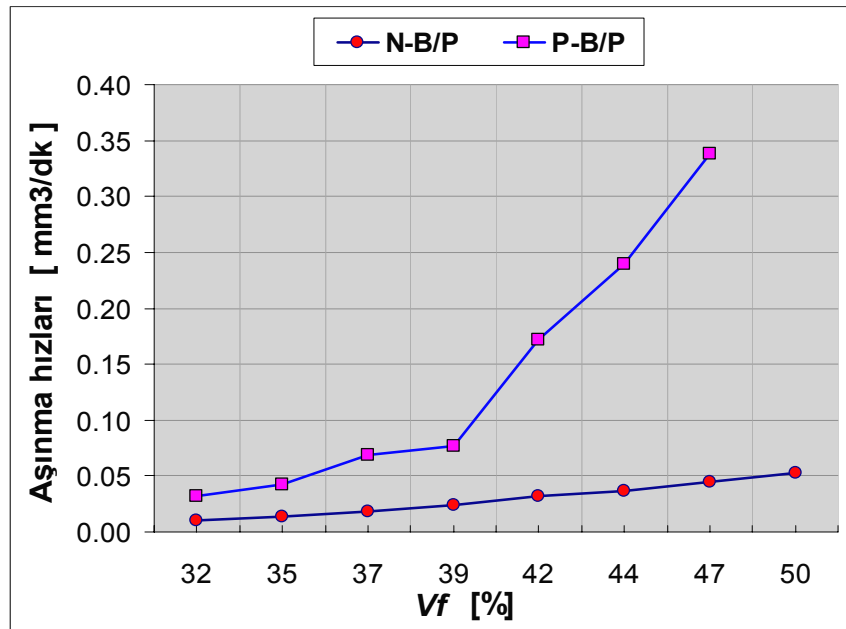


Resim 5.5. Pişirme sonucu çatlamış elektrot [40]

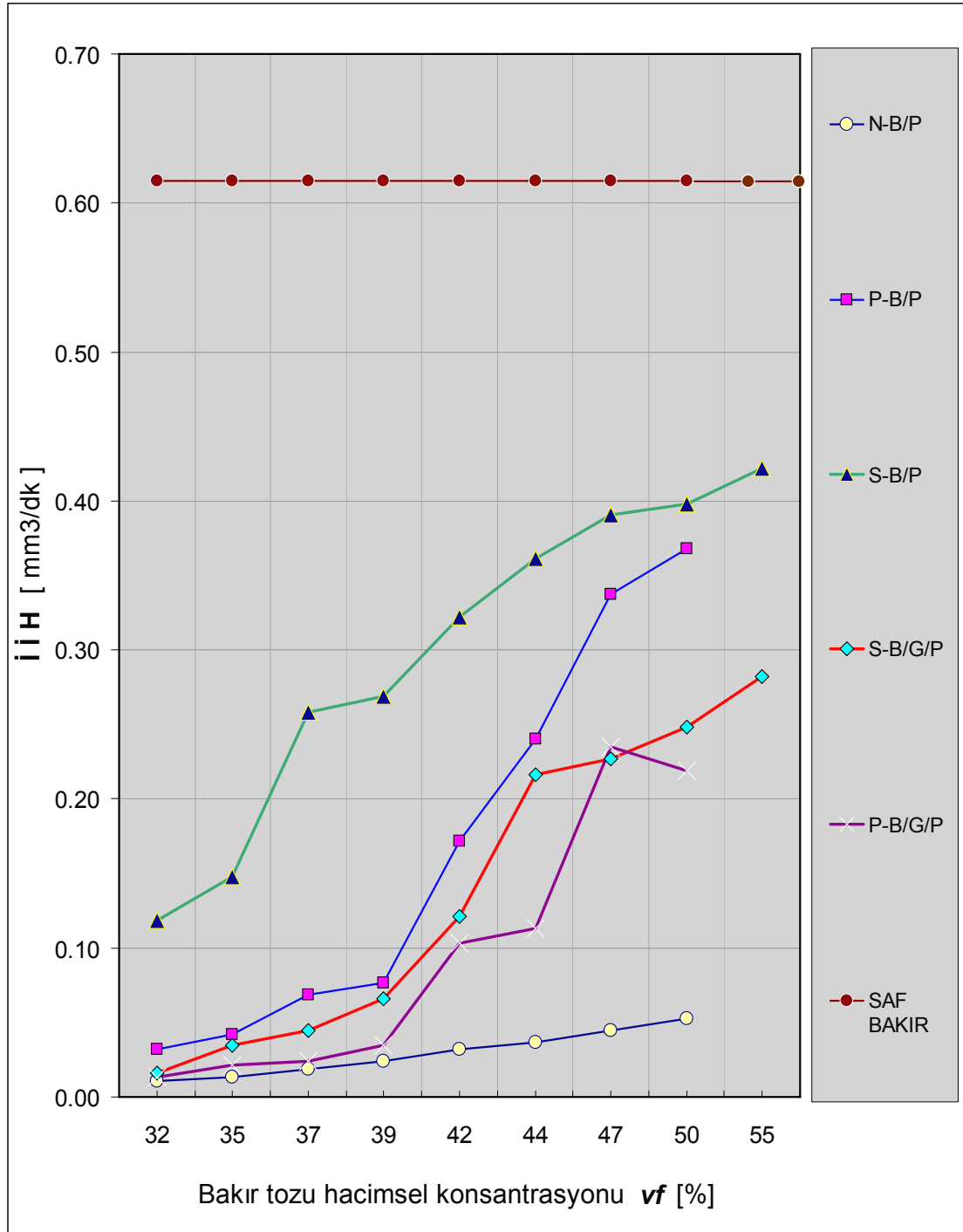
olumsuzlukları da görülmüştür. Pişirme sırasında yapı içindeki ısı genleşmelerden dolayı elektrotta çatlaklar ve yer yer yarılmalar meydana gelmektedir. Bu çatlaklar elektrotun düzenli çalışmasına engel olmuştur (Resim 5.4). Bu yarılma ve çatlamlar preslenmiş elektrotlarda, iç gerilmelerin daha fazla olması nedeniyle, preslenmemiş elektrotlara oranla çok daha sık ve büyük boyutta oluştuğu görülmüştür.



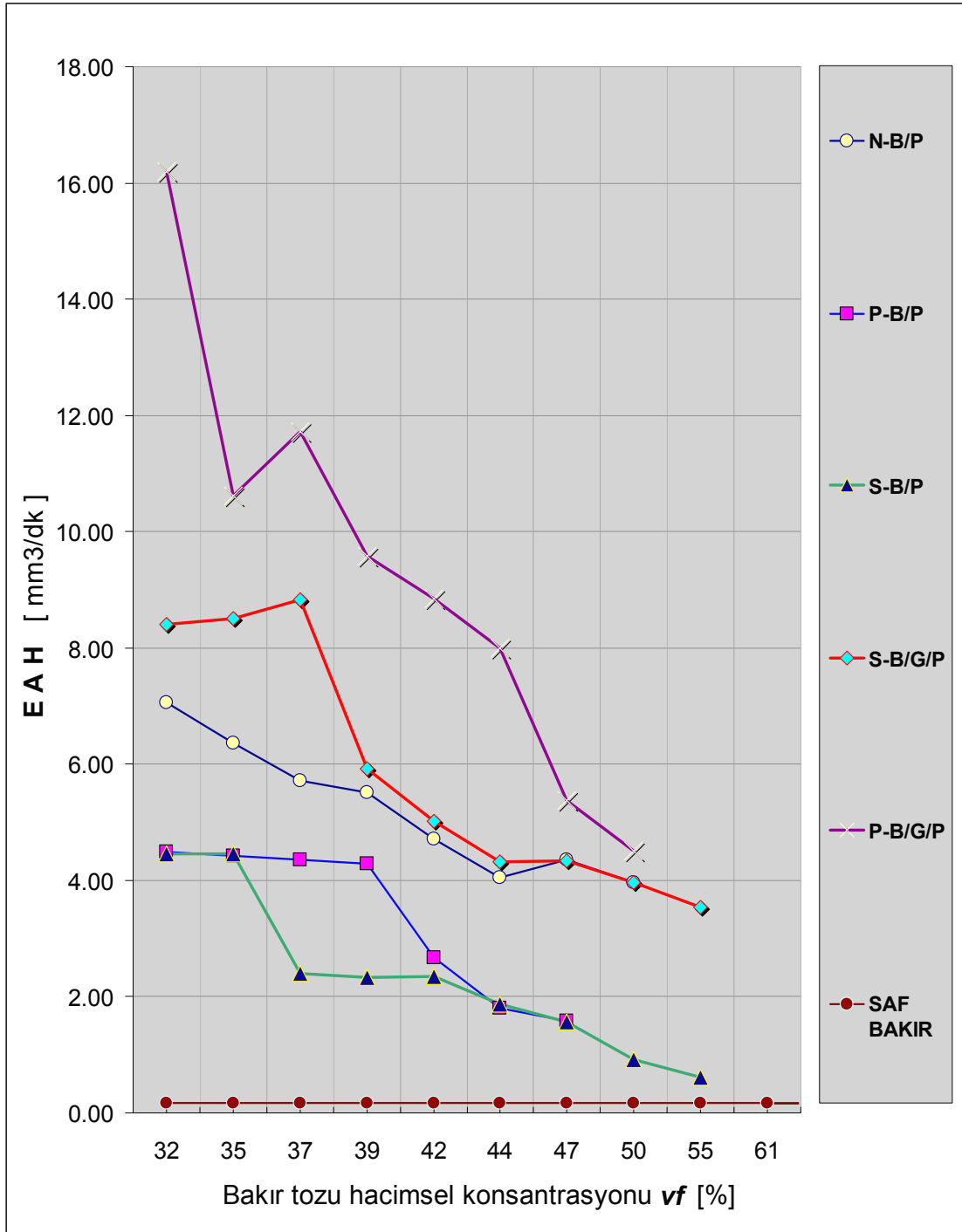
Şekil 5.22. Serbest bakır-polyester elektrot ile pişirilmiş serbest bakır-polyester elektrotun İİH karşılaştırması



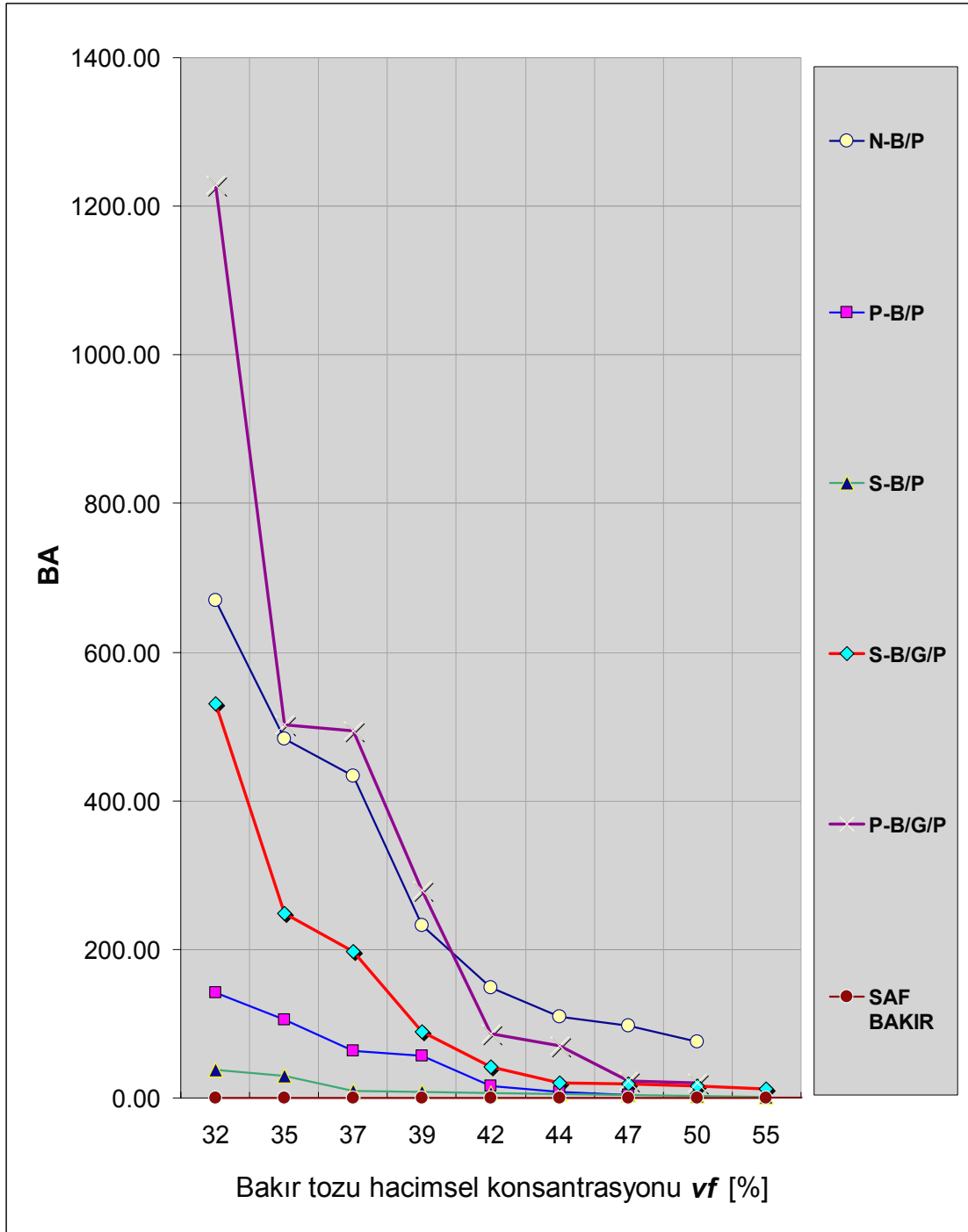
Şekil 5.23. Serbest bakır-polyester elektrot ile pişirilmiş serbest bakır-polyester elektrotun EAH karşılaştırması



Şekil 5.24. Tüm kompozit elektrot tiplerine ve saf bakır elektrota ait i_{LH} karşılaştırması



Şekil 5.25. Tüm kompozit elektrot tiplerine ve saf bakır elektrota ait EAH karşılaştırması



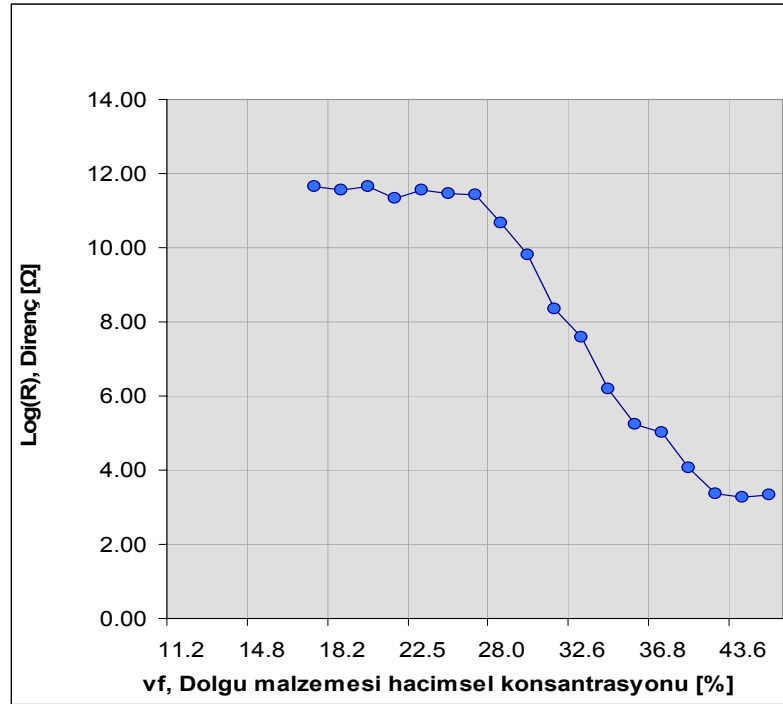
Şekil 5.26. Tüm kompozit elektrot tiplerine ve saf bakır elektrota ait BA karşılaştırması

5.7. Direnç Ölçümü Deney Sonuçları

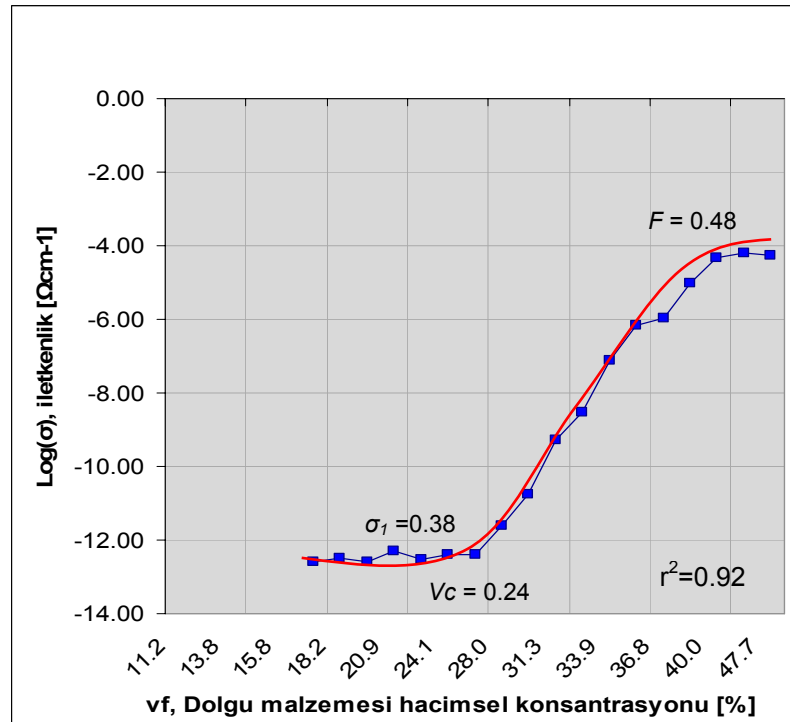
Direnç ölçüm sonuçlarından iletkenlik değerleri hesaplanarak bulunmuştur (EK-13, EK-14 ve EK-15). Hesaplanan iletkenlik değerleri, iletkenlik-dolgu malzemesi konsantrasyonu ($\sigma-v_f$) grafiklerinde çok büyük sayılar olduğundan logaritmik ölçekte verilmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen ($\sigma-v_f$) grafikleri ile literatürde farklı matris-dolgu malzemesi çiftleri için verilmiş olan grafikler birbiriyle benzer çıkmıştır (Bkz. Şekil 3.7). Bu grafiklerden kompozit malzemeyi karakterize eden perkolasyon konsantrasyonu, perkolasyon iletkenliği (kritik iletkenlik), doyma sınırı, şekil sabiti ve karakteristik denklemler elde edilmiştir. Bu parametreler N-B/P, S-B/P ve P-B/P elektrotlardan alınmış numunelere ait iletkenlik-dolgu konsantrasyonu grafiklerine MS-Excel paket programında yapılan uygun eğri geçirme (curve fitting) ve regresyon (EK-1) işlemleriyle elde edilmiş ve EK-18'de verilmiştir (Şekil 5.28, Şekil 5.30, Şekil 5.32).

Deneylerde elektriksel direnç ölçümleri yapılmış bazı elektrotların mikro-yapı fotoğrafları Resim 5.5'de gösterilmiştir. Bu fotoğraflardan açıkça görüldüğü gibi matris malzeme içindeki iletken tanecik sayısı arttıkça taneciklerin bir birlerine daha çok yaklaştıkları ve bunun sonucu olarak daha fazla sayıda iletkenlik zinciri kurulabileceği görülmektedir.

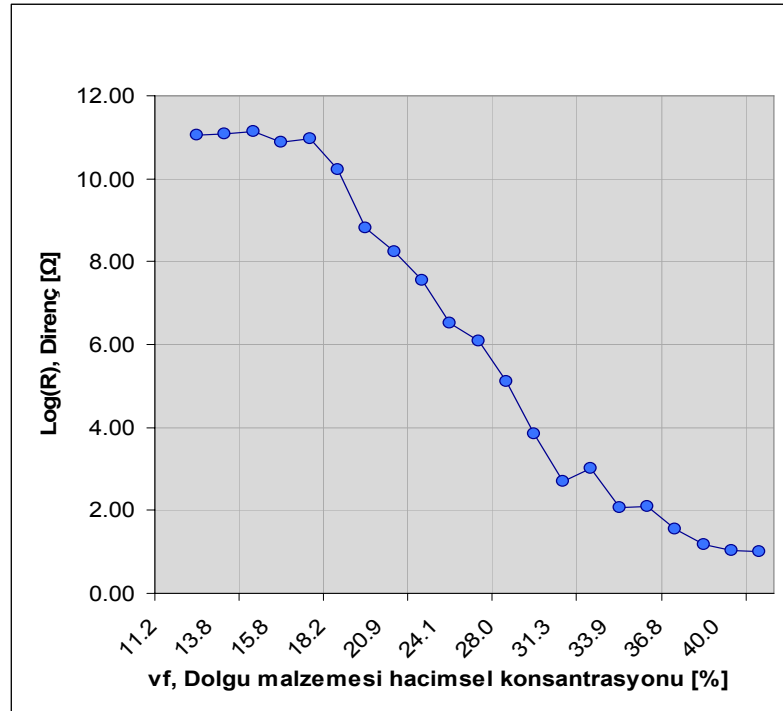
Karşılaştırma grafiklerinde görüldüğü gibi, elektriksel iletkenliğin büyükten küçüğe doğru sıralanması S-B/P, P-B/P ve N-B/P elektrotlar şeklinde olmuştur (Şekil 5.33, Şekil 5.34). Yüksek elektriksel iletkenliğe sahip elektrotlar daha düşük dolgu konsantrasyonlarında iletken hale geçerken, daha yüksek iletkenlik değerlerinde doyuma ulaşmıştır. Elektrotların iletkenlikleri yaklaşık olarak %18-%40 dolgu malzemesi konsantrasyonları arasında (smearing bölgesi) doğrusal bir artış göstermiştir.



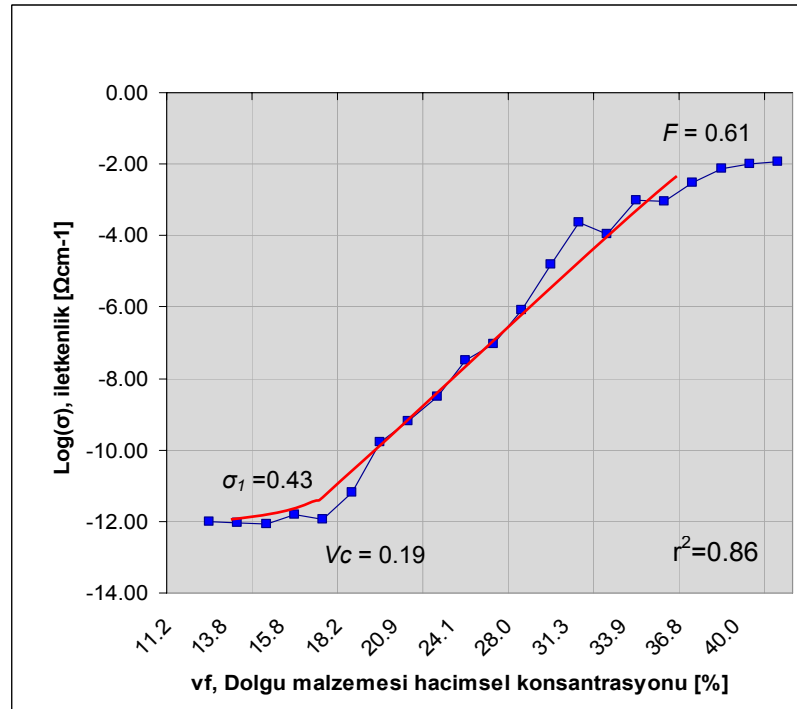
Şekil 5.27. N-B/P elektrotlara ait hacimsel direncin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



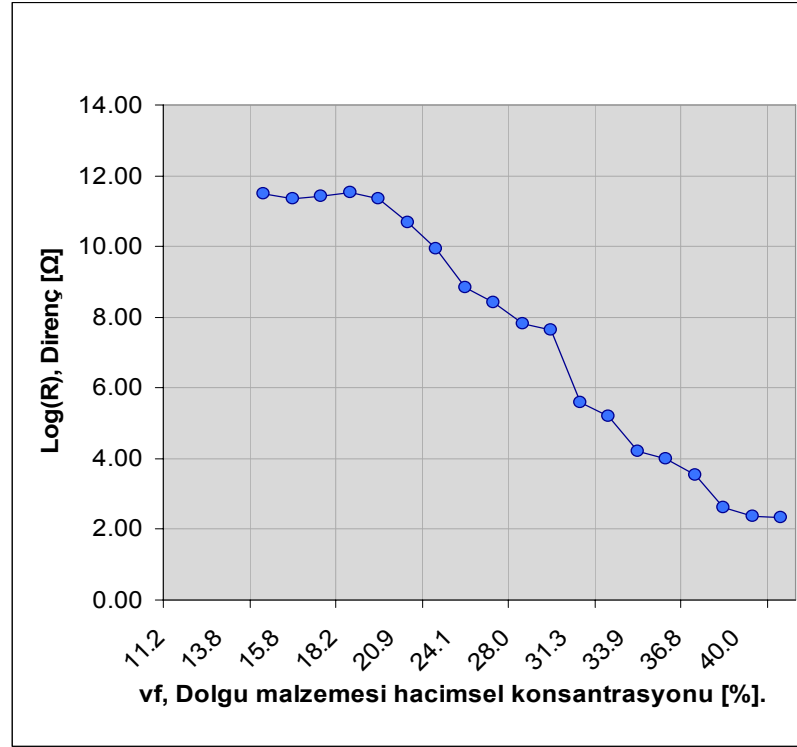
Şekil 5.28. N-B/P elektrotlara ait iletkenliğin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



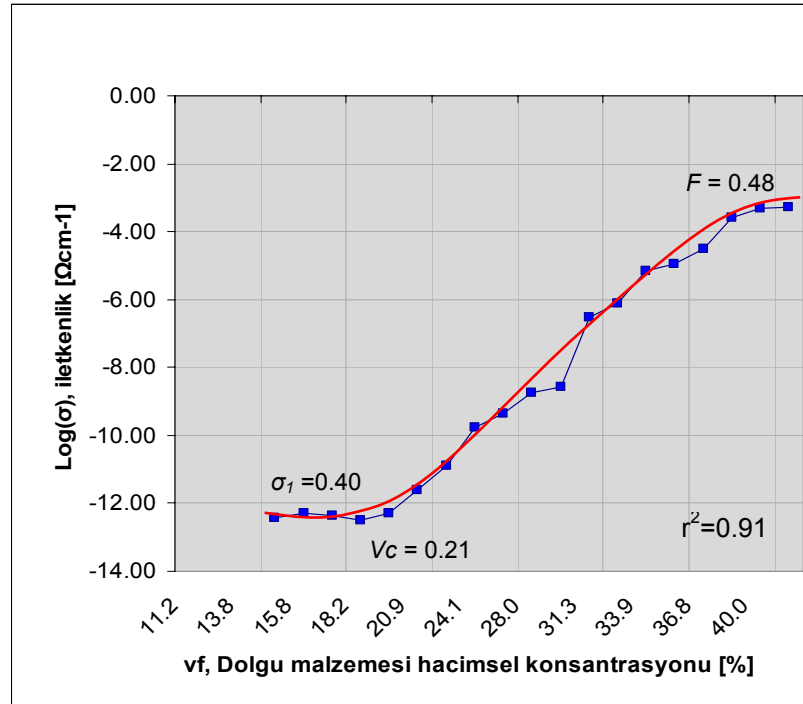
Şekil 5.29. S-B/P elektrotlara ait hacimsel direncin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



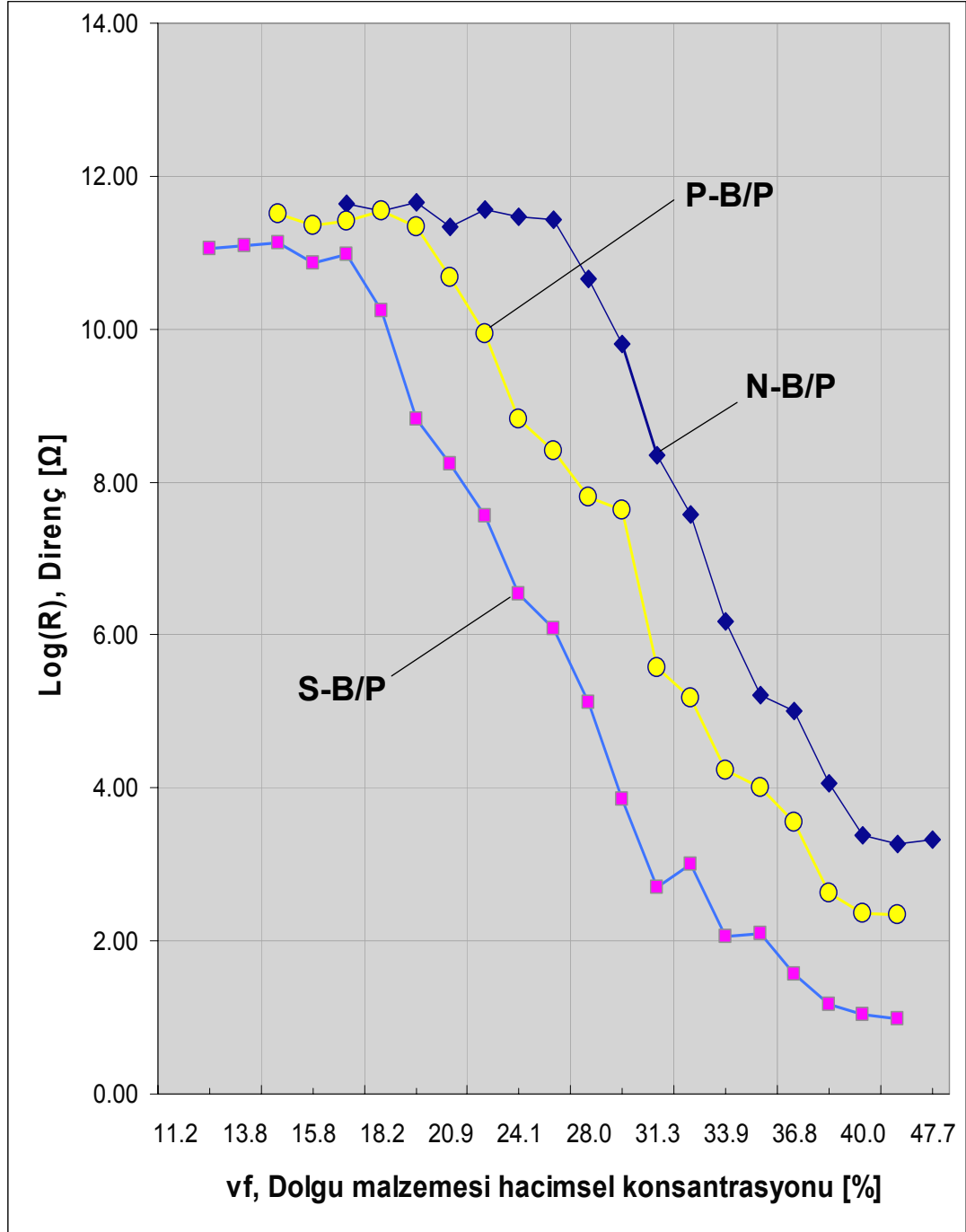
Şekil 5.30. S-B/P elektrotlara ait iletkenliğin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



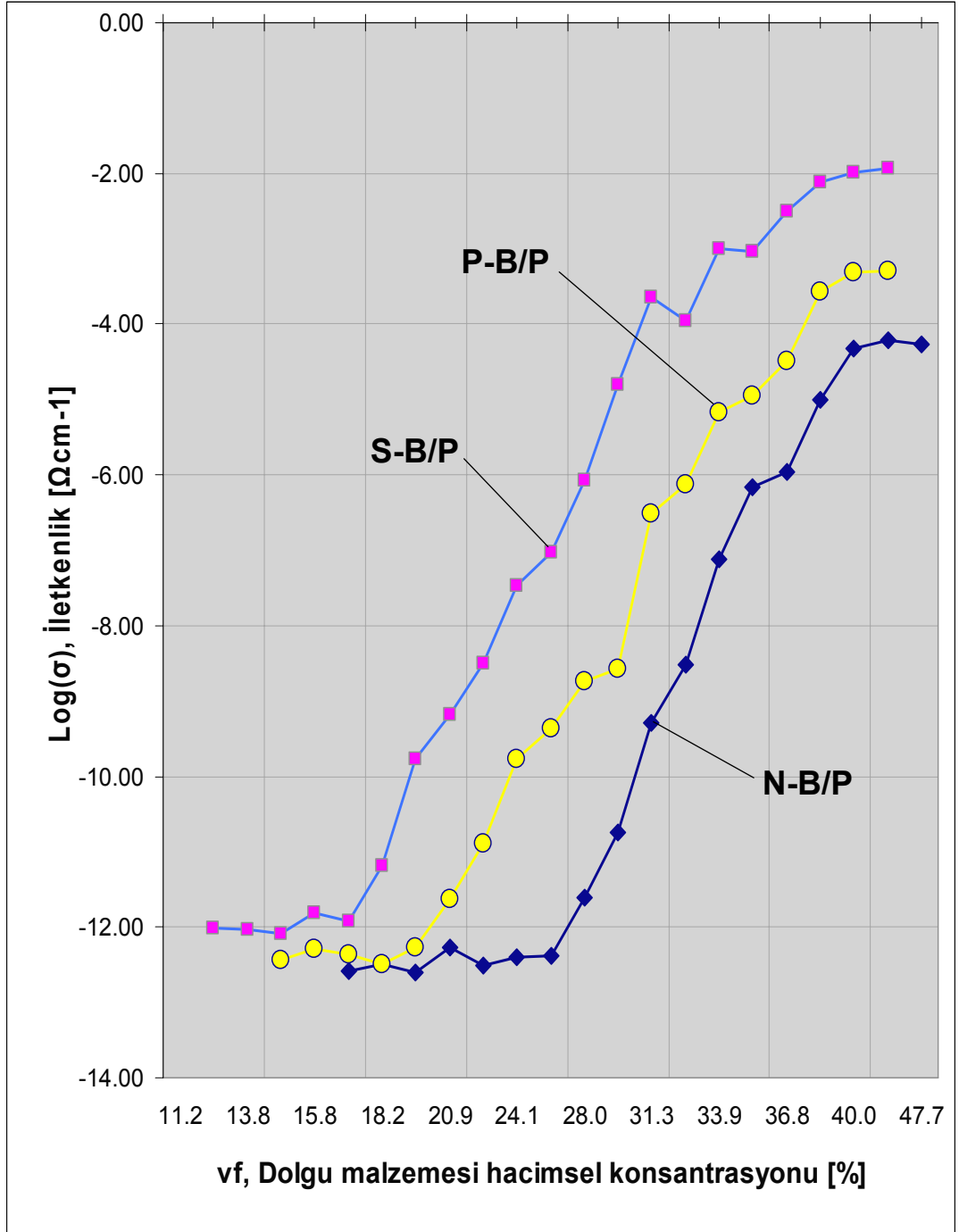
Şekil 5.31. P-B/P elektrotlara ait hacimsel direncin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



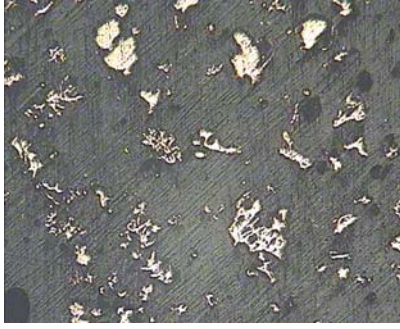
Şekil 5.32. P-B/P elektrotlara ait iletkenliğin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimi



Şekil 5.33. N-B/P, P-B/P ve S-B/P elektrotlara ait hacimsel direncin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimlerinin karşılaştırması

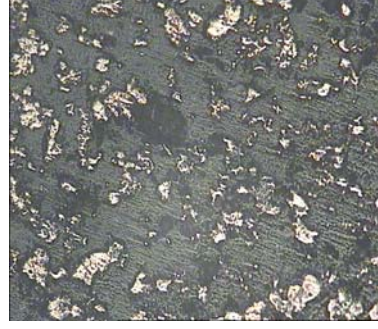


Şekil 5.34. N-B/P, P-B/P ve S-B/P elektrotlara ait elektriksel iletkenliğin dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonuna göre değişimlerinin karşılaştırması



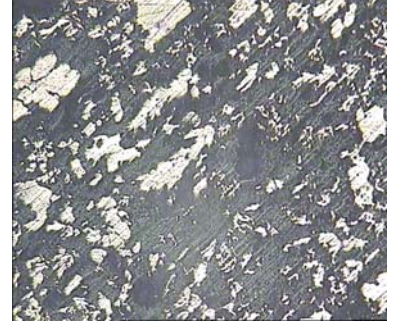
N-%58B/%42P

(a)



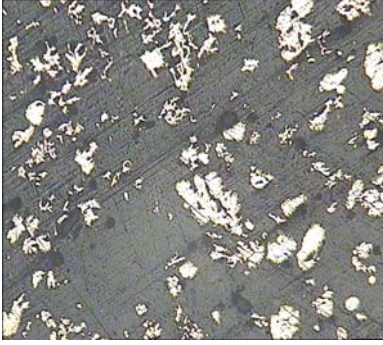
N-%72B/%28P

(d)



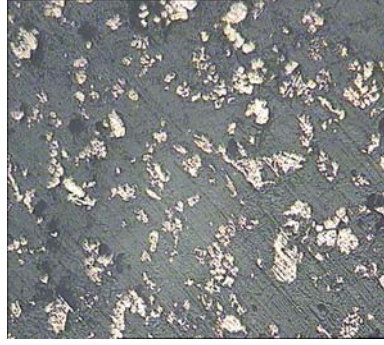
N-%83B/%17P

(g)



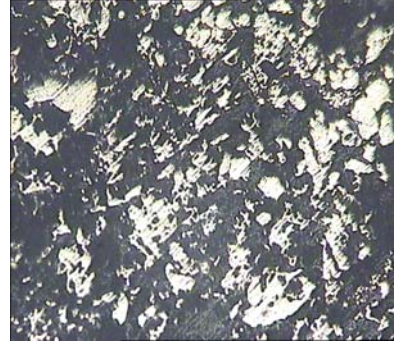
P-%65B/%35P

(b)



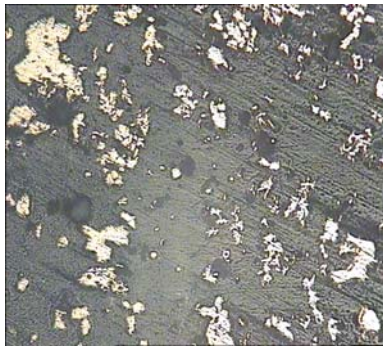
P-%70B/%30P

(e)



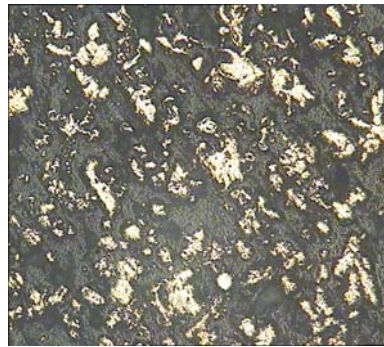
P-%90B/%10P

(h)



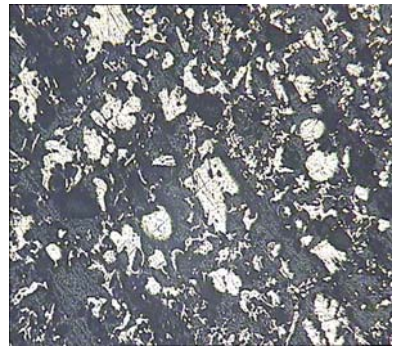
S-%65B/%35P

(c)



S-%73B/%27P

(f)



S-%87B/%13P

(i)

Resim 5.6. Direnç ölçümü deneylerinde kullanılan elektrotlara ait, (a), (b), (c), perkolasyon altı ($vc > v$), (d), (e), (f), perkolasyon ($vc = v$) ve (g), (h), (i), perkolasyon üstü ($vc < v$) konsantrasyon değerlerindeki mikro yapı fotoğrafları (100 kat büyütülmüştür)

5.8. Dolgu Malzemesi Tane Boyutunun İİH ve EAH'na Etkisi

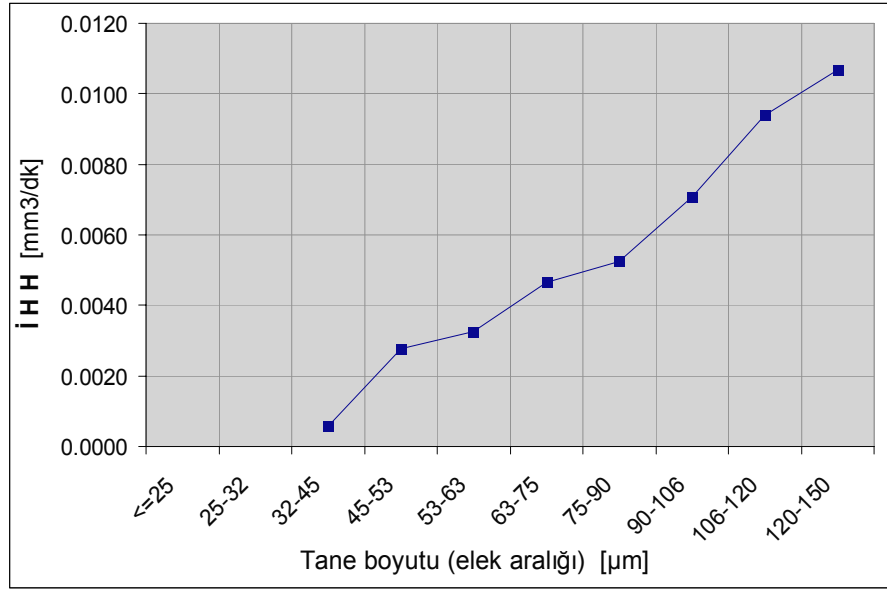
Değişik tane boyutu dağılımlı elektrotlardan 25 μm altı ve 25-32 μm aralıklı tane boyutuna sahip olan elektrotlar işleme yapmamıştır. İşleme yapmış elektrotlara ilişkin elektrot-iş-parçası görüntüleri Resim 5.6'de gösterilmiştir. İşleme yapan elektrotlara ait İİH, EAH ve BA değerleri EK-16'da verilmiştir. İİH ile dolgu malzemesi tane boyutu Şekil 5.35'de görüldüğü gibi doğrusal bir artış göstermiştir. EAH grafiğinde tane boyutu dağılımı arttıkça (doğrusal) ters orantılı olarak EAH düşmektedir (Şekil 5.37). Şekil 5.38'deki BA grafiğinde ise BA, 45-53 μm tane boyutu aralığına doğru hızla düşmüş daha sonra çok düşük hızda azalma göstermiştir. Küçük taneli bakır tozundan imal edilen elektrotlarda EAH İİH'a göre çok daha büyük çıkmış ancak tane boyutu büyüdükçe üstel olarak küçülmüştür.



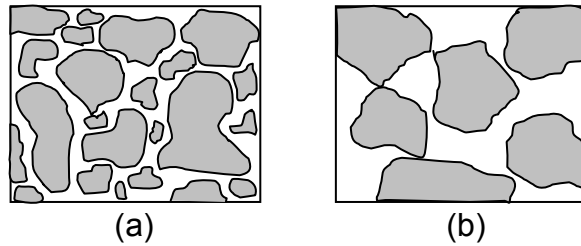
Resim 5.7. Homojen dağılımlı tane büyüklüğüne sahip bakır tozundan üretilmiş elektrotlara ait elektrot-iş parçası görüntüleri [40]

Sonuçta dolgu malzemesi tane boyutu büyüdükçe üretilen elektrotların karakter olarak saf bakır elektrota yaklaştığı görülmüştür. Ancak İİH değerleri ortalama tane boyutu 75 μm olan geniş dağılımlı bakır tozundan üretilen S-B/P ve P-B/P elektrotlara göre çok daha düşük EAH ve BA değerleri ise daha

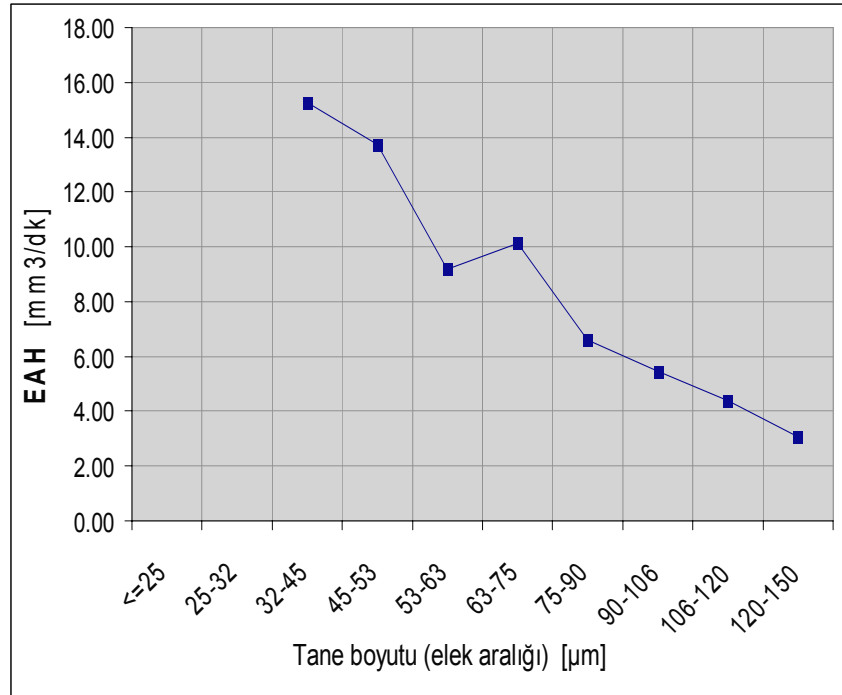
büyük çıkmıştır. Bunun sebebi, daha geniş aralıklı tane boyutuna sahip dolgu malzemesinden üretilen elektrotlar, daha dar aralıklı tane boyutuna sahip dolgu malzemesinden üretilen elektrotlara göre (kompozit yapı içinde partiküllerin uzaysal yerleşimi açısından) daha pek (kompakt) olmuş olmasıdır. Yaklaşık aynı tane boyutlu (homojen dağılımlı) kompozit yapıda taneler arasına girebilecek küçük boyutlu partikül sayısı daha az olduğundan, yapıda meydana gelen boşluklar geniş aralıklı tane boyutu dolgulu kompozit yapıya göre daha fazla olacaktır. Partiküller arası yerleşimden kaynaklanan bu boşluklar iletkenliği düşürdüğünden, homojen dağılımlı dolgudan üretilen elektrotlarda İİH ve EAH çok düşük çıkmıştır (Şekil 5.36).



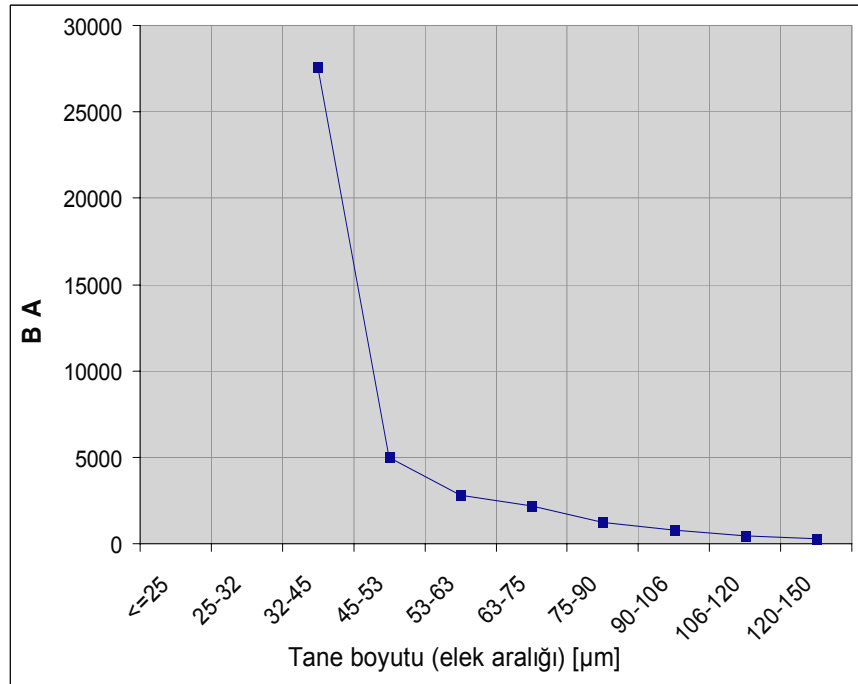
Şekil 5.35. Homojen dağılımlı olarak üretilen elektrotların İİH'nın tane boyutu ile olan ilişkisi



Şekil 5.36. (a) tane boyutu geniş aralıklı (b) tane boyutu dar aralıklı kompozit yapıdaki yerleşim boşlukları



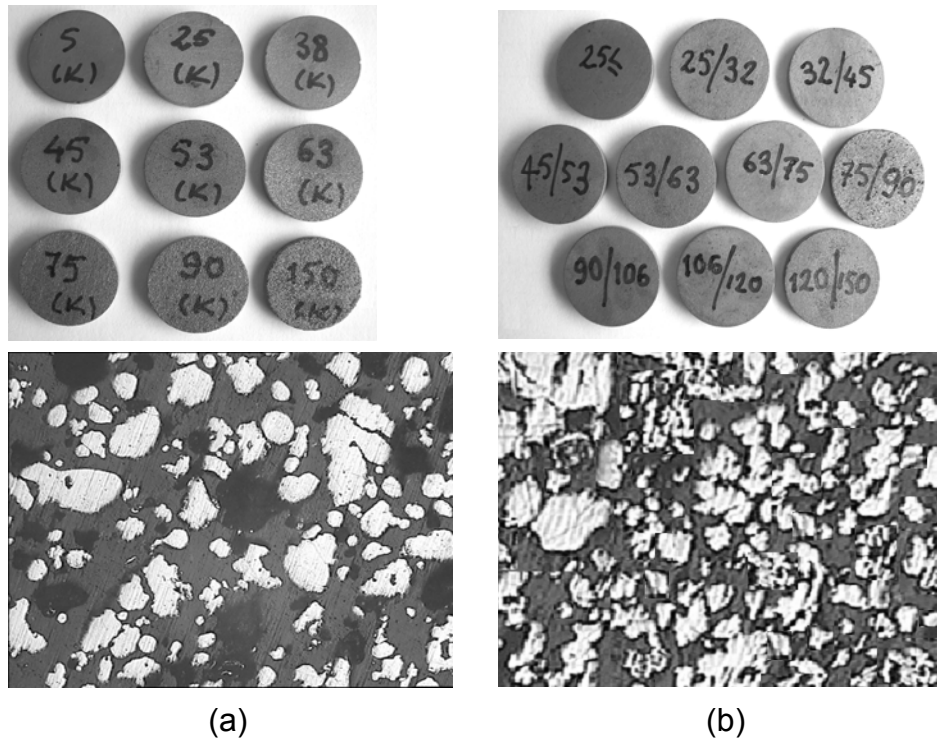
Şekil 5.37. Homojen dağılımlı olarak üretilen elektrotların EAH'nın tane boyutu ile olan ilişkisi



Şekil 5.38. Homojen dağılımlı olarak üretilen elektrotlara ait BA'nın tane boyutu ile olan ilişkisi

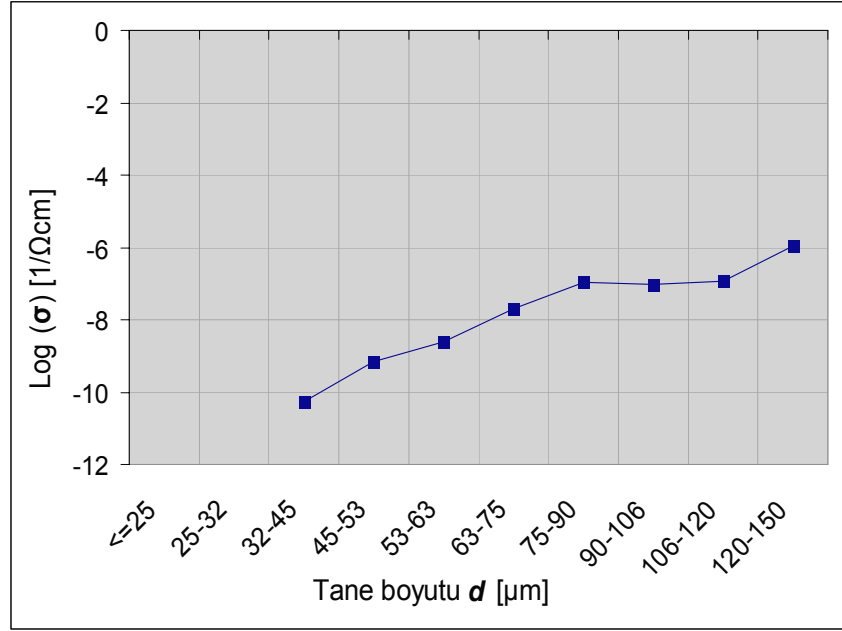
5.9. Dolgu Malzemesi Tane Boyutunun Elektriksel İletkenliğe Etkisi

Bu bölümde yapılan deneysel çalışmalarda, dolgu malzemesi partiküllerinin İHH, EAH ve σ 'ya olan etkilerini görebilmek için hem küresel şekilli bakır tozları hem de dendritik şekilli bakır tozlarından %43,6 oranında homojen olarak üretilmiş elektrotlar denenmiştir. Üretilen bu elektrotlara ait görüntüler ve mikro yapı fotoğrafları sırasıyla Resim 5.6 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.

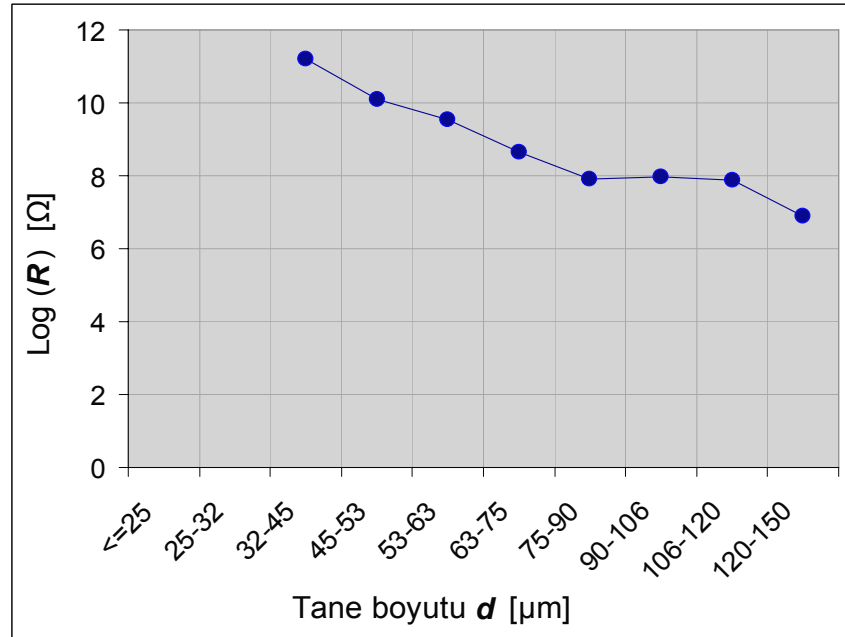


Resim 5.8. Elektriksel dirençleri ölçülen (a) küresel şekilli homojen tanecik dağılımlı (b) dendritik şekilli homojen tanecik dağılımlı elektrotlara ait 100 kat büyütülmüş mikro fotoğraflar ve disk numunelere ait görüntüler [40]

Küresel şekilli elektrotlardan hiçbirinin direnç değerleri, elektrometrenin okuma sınırları dışında kaldığından dolayı, ölçülememiştir. Dendritik şekilli bakır tozlarından, 25-32 μm ve altındaki tane boyutu dağılımlı dolgudan üretilen elektrotların da direnç ölçümleri alınamamıştır.



Şekil 5.39. Dolgu tane boyutu homojen dağılımlı elektrotların elektriksel iletkenlik -tane boyutu ilişkisi



Şekil 5.40. Dolgu tane boyutu homojen dağılımlı elektrotların elektriksel direnç -tane boyutu ilişkisi

Homojen dağılımlı tane boyutlarına göre üretilmiş elektrotlara ilişkin direnç ve iletkenlik değerleri EK-17’de verilmiştir. Grafiklerde direnç ve iletkenlik

değerleri tane boyutu ve dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu yanında mertebe olarak çok büyük olduğundan dolayı bu değerler logaritmik ölçekte gösterilmiştir. İletkenlik-tane boyutu grafiğinden görüldüğü gibi tane boyutu büyüdükçe elektriksel iletkenlik doğrusal olarak artmaktadır (Şekil 5.39). Elektriksel direnç ise iletkenlikle ters orantılı olduğundan tane boyutu arttıkça azalmaktadır (Şekil 5.40).

Elde edilen sonuç ve grafiklerle, daha önce konuyla ilgili literatürde yapılmış çalışmalar kısmında bahsedilen tane boyutu-iletkenlik çalışmaları benzer sonuçlar vermiştir (Bkz. [9, 10]). Küresel şekilli bakır tozundan (ortalama tane boyutu 100 μm) üretilen elektrotlarda, toz partiküllerinin küresel şeklinden dolayı uzaysal dağılım topolojisi içinde birbirlerine daha uzak kalması ve bunun sonucu olarak olası kurulması beklenen iletkenlik zinciri adedinin daha az kurulmuş olması ve partiküller arası ark atlaması mesafesinin yeterli olmayışı gibi etkenlerden dolayı iletkenlik karakteri oluşamamıştır.

5.10. İİH ve EAH'nın Dolgu Malzemesi Konsantrasyonu ve Tane Boyutuna Göre Matematiksel İlişkilerini Temsil Eden Denklemlerinin Türetilmesi

Daha önce çalışmanın amacı başlığı altında da açıklandığı gibi, preslenerek üretilmiş elektrotlar diğer yöntemle üretilen elektrotlara oranla İİH ve EAH açısından daha iyi sonuçlar vermesine rağmen yöntemin “basitlik” ve “uygulanabilirlik” mantığıyla uyuşmadığı için (elektrot, modelden elde edilen kalıpta dökülürken gerek kalıp geometrisi ve gerekse kalıbın yapısal dayanımı açısından preslenemez) ikinci en iyi sonuçları veren P-B/P elektrot üzerine çalışmalar devam etmiştir. Bu bölümde P-B/P elektrotların İİH ve EAH'na ait verilerden hareketle, basit matematiksel denklemleri eğri uydurma yöntemi ile çıkarılmıştır. Bu süreçte işleme gerilimi, işleme akımı, vurum süresi, vurum aralığı, polarite, dielektrik basıncı ve uygulama şekli gibi elektroerozyonun temel işleme parametreleri sabit tutularak elektrot özelliklerinin etkileri incelenmiştir.

5.10.1. Deney sonuçlarının istatistiksel analizi

Deney sonuçlarının istatistiksel analizinde varyans analizi metodu kullanılmıştır. Varyans analizi (ANOVA-analysis of variance), deney sonuçlarını yorumlamanın bir yöntemi olarak geliştirilmiştir. Varyans analizi, işlem parametrelerinin istatistiksel olarak önemli olup olmadığına bakmak için yapılır [45]. Bu metot, işlem parametrelerinin optimum kombinasyonu ve performans karakteristikleri üzerinde bu parametrelerin etkisini belirlemek için kullanılabilir. Eş. 5.1 ve Eş. 5.2’de varyans analizi ile tane boyutu ve hacimsel dolgu malzemesi konsantrasyonu parametrelerinin % olarak etkileri (değerler Çizelge 5.1’den alınarak) hesaplanabilir [44]:

$$\%d = \frac{\sum (d - \bar{d})^2}{(\sum (d - \bar{d})^2 + \sum (v_f - \bar{v})^2)} \quad (5.1)$$

$$\%v_f = \frac{\sum (v_f - \bar{v})^2}{(\sum (d - \bar{d})^2 + \sum (v_f - \bar{v})^2)} \quad (5.2)$$

Yapılan matematiksel çalışmalar sonucunda İİH için:

$$\%d = (8.22E-05 / (8.22E-05 + 0.149)) \times 100 \approx \%0.09 \quad (5.3)$$

ve

$$\%v_f = (0.149 / (8.22E-05 + 0.149)) \times 100 \approx \%99.91 \quad (5.4)$$

EAH için:

$$\%d = (126.932 / (126.932 + 14.725)) \times 100 \approx \%90 \quad (5.5)$$

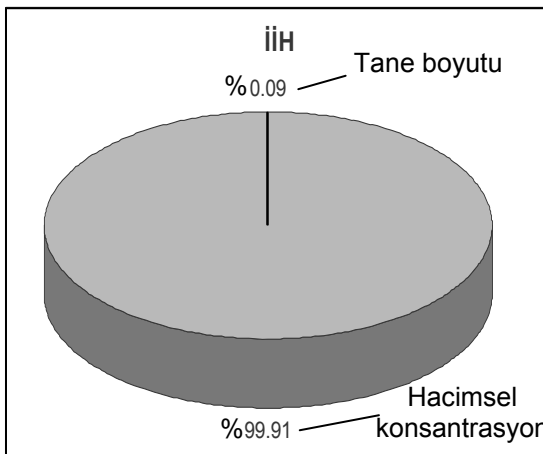
ve

$$\%v_f = (14.725 / (126.932 + 14.725)) \times 100 \approx \%10 \quad (5.6)$$

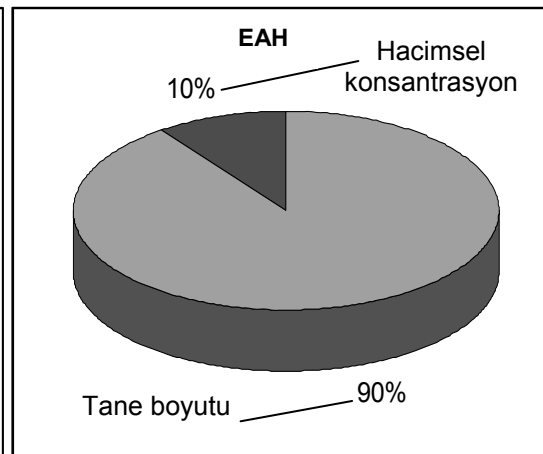
Bulunmuştur.

Çizelge 5.1. Tane boyutu ve hacimsel konsantrasyona göre İİH ve EAH'larına ait varyans değerleri

İş parçası işleme hızı ($d=\text{sabit}$) İİH^{vf}	İş parçası işleme hızı ($v_f=\text{sabit}$) İİH^d	Elektrot işleme hızı ($d=\text{sabit}$) EAH^{vf}	Elektrot işleme hızı ($v_f=\text{sabit}$) EAH^d	Varyans $\sigma_d\text{-İİH}$	Varyans $\sigma_{vf}\text{-İİH}$	Varyans $\sigma_d\text{-EAH}$	Varyans $\sigma_{vf}\text{-EAH}$
0,0316	0,00055	4,48	14,27	2,440E-05	0,020	46,050	1,943
0,0422	0,00277	4,42	13,75	7,463E-06	0,0172	27,790	1,769
0,0686	0,00324	4,36	9,18	5,102E-06	0,0109	0,495	1,600
0,0765	0,00467	4,29	8,13	6,93E-07	0,0094	2,754	1,447
0,1714	0,00525	2,68	6,60	6,36E-08	3,20E-06	3,522	0,171
0,2400	0,00707	1,81	5,45	2,46E-06	0,00446	9,188	1,638
0,3376	0,00939	1,58	4,38	1,51E-05	0,02701	16,799	2,275
0,4180	0,01068	1,12	3,97	2,68E-05	0,0599	20,340	3,881
Toplam				8,22E-05	0,149	126,932	14,725

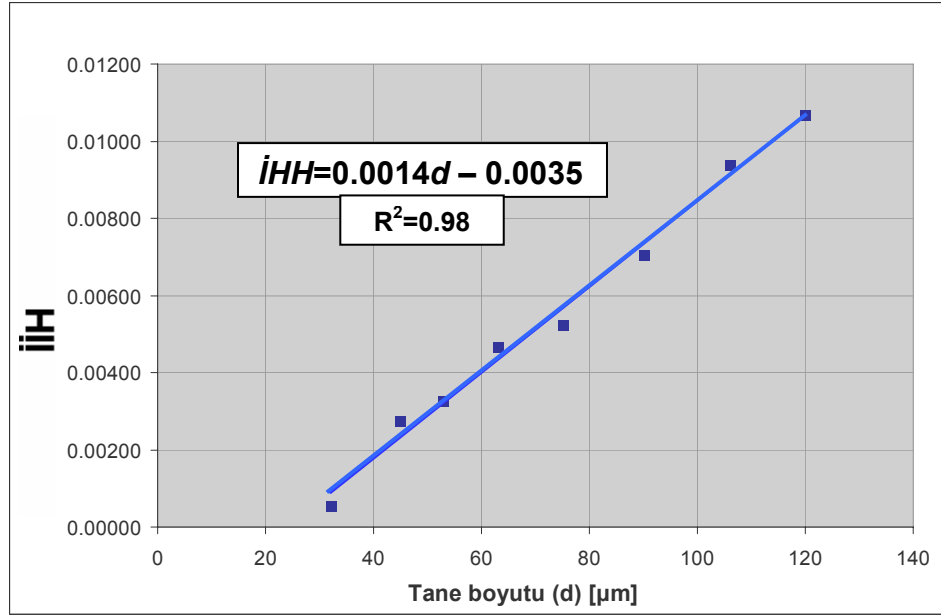


(a)

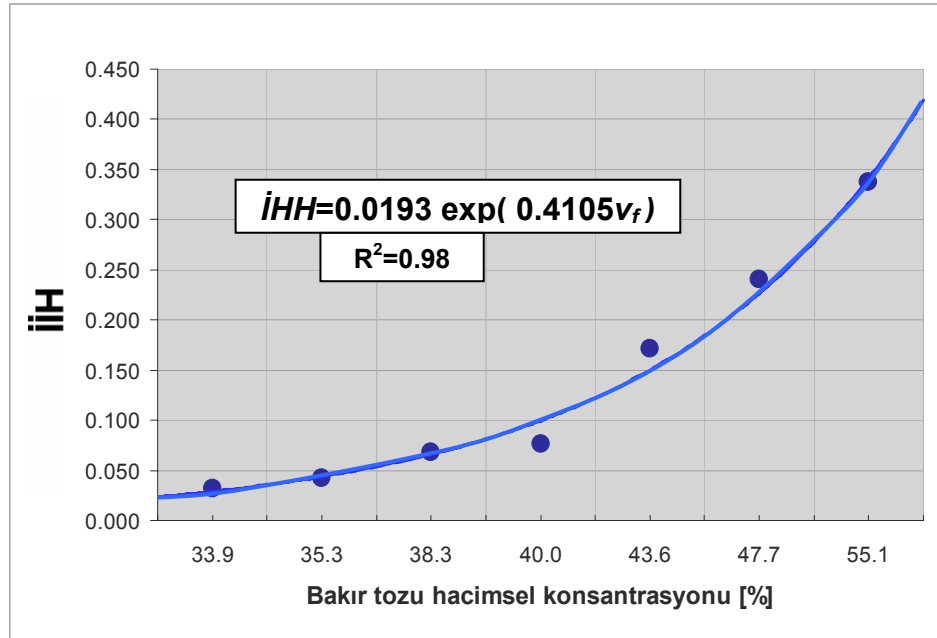


(b)

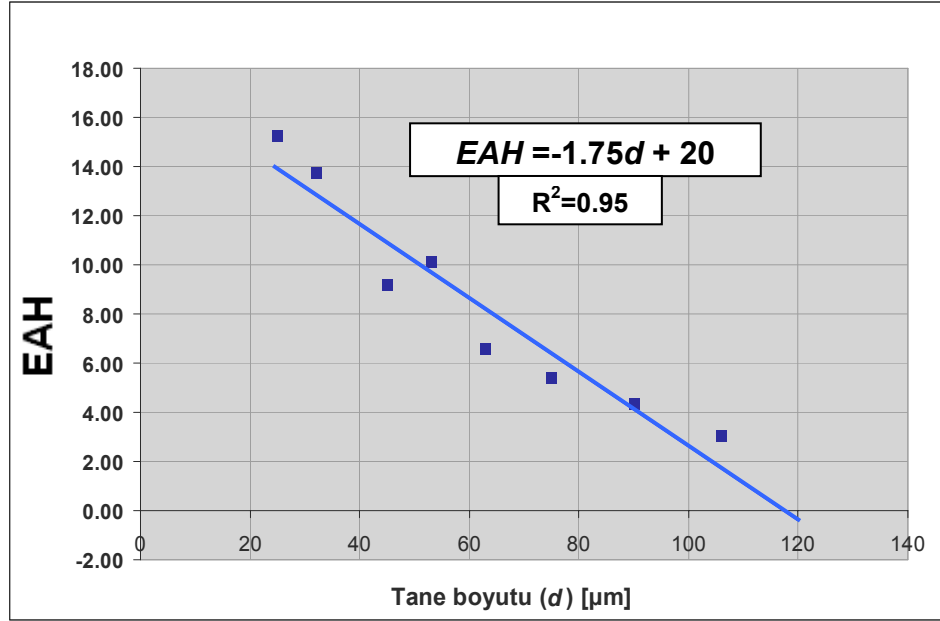
Şekil 5.41. Tane boyutu ve dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonunun (a) İİH ve (b) EAH üzerindeki etki yüzdeleri



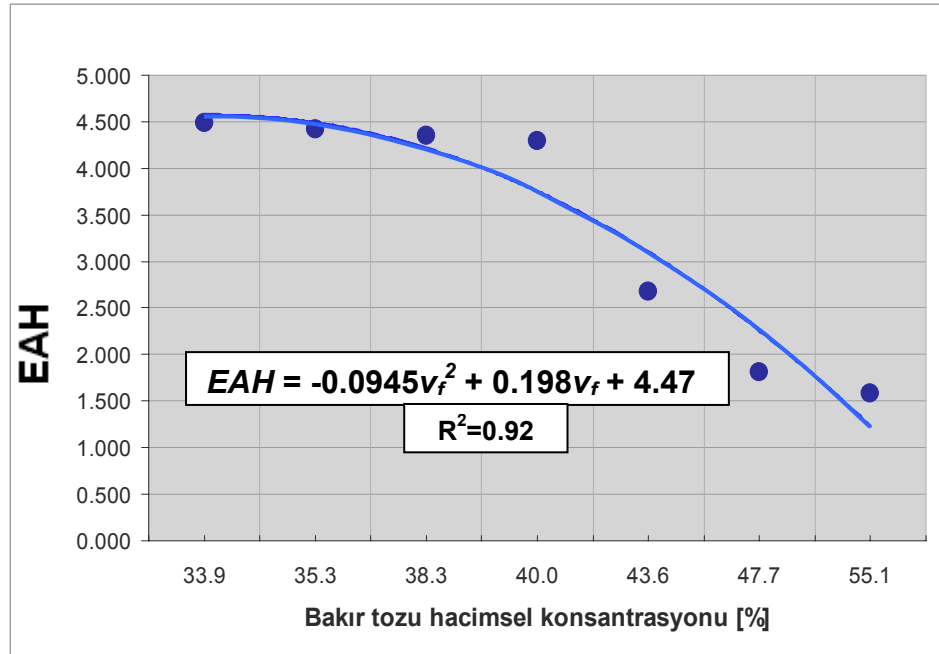
Şekil 5.42. Dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu sabitken dolgu malzemesi tanecik boyutunun $\dot{I}H$ ile olan ilişkisi



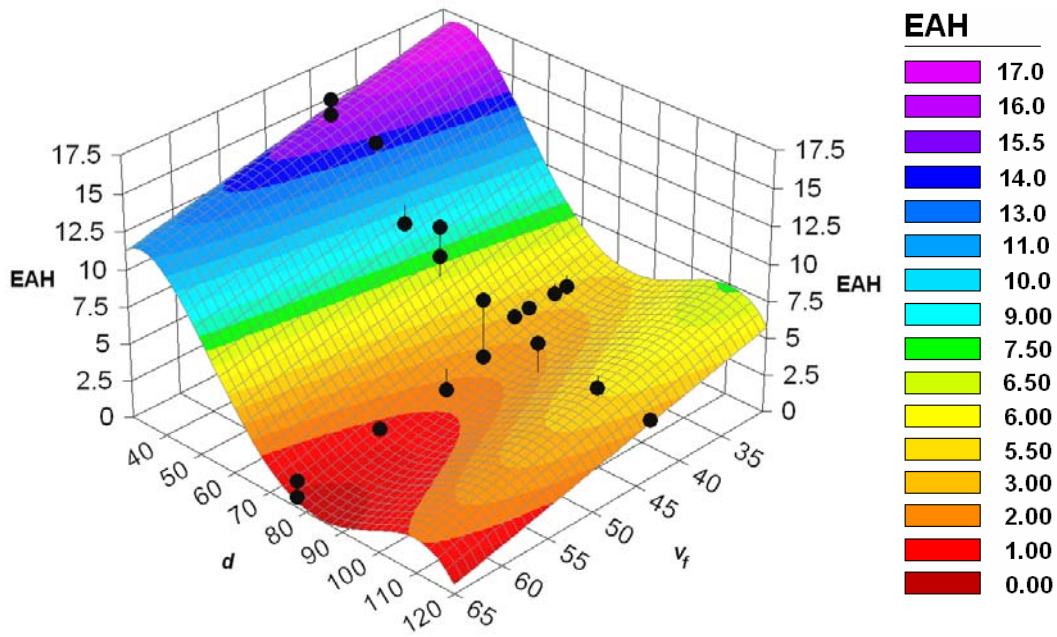
Şekil 5.43. Dolgu malzemesi tanecik boyutu sabitken dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonunun $\dot{I}H$ ile olan ilişkisi



Şekil 5.44. Dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu sabitken dolgu malzemesi tanecik boyutunun EAH ile olan ilişkisi



Şekil 5.45. Dolgu malzemesi tanecik boyutu sabitken dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonunun EAH ile olan ilişkisi



Şekil 5.46. Deneysel verilere göre uydurulmuş polinomik yüzey grafiği

Çizelge 5.2. Regresyon analizinde kullanılan veriler

v_f	d	EAH	EAH-Tahmini	EAH-Kalıntı
33,91	75,00	4,484	4,897	-0,413
35,29	75,00	4,420	3,633	0,787
38,32	75,00	4,355	4,422	-0,067
39,97	75,00	4,293	5,221	-0,928
43,60	75,00	2,676	5,199	-2,523
43,60	32,00	14,266	14,269	-0,004
43,60	45,00	13,751	13,327	0,425
43,60	53,00	9,183	10,754	-1,570
43,60	63,00	8,139	7,653	0,486
43,60	75,00	6,603	5,194	1,409
43,60	90,00	5,449	4,374	1,075
43,60	106,00	4,381	4,740	-0,358
43,60	120,00	3,970	3,906	0,064
47,71	75,00	1,810	2,249	-0,439
55,10	75,00	1,582	1,521	0,060
64,00	75,00	1,120	1,125	-0,005

Çizelge 5.2’de gösterilen verilerden hareketle yapılan yüzey uydurma (Şekil 75) işlemi sonucunda aşağıdaki iki boyutlu eşitlik elde edilmiştir.

$$EAH \approx -30.99 - 0.148v_f + 3.86d - 0.0958(d)^2 - 0.00091(d)^3 - 2.99E^{-6}(d)^4$$

(Regresyon katsayısı, $r^2=0.91$)

Analiz sonuçlarından, homojen tane boyutunun (dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu sabitken) İİH'na etkisi (%0,09) küçük çıktığı görülmüştür. Daha önceki çalışmalar ve literatür araştırmaları, çok iyi iletken ve tok (iletken tanecikler homojen ve sık dağılmış) elektrotların çok daha az aşındığını ve İİH'nın da büyük oranda arttığını göstermiştir. Burada kullanılan elektrotlardaki dolgu malzemesi belli partikül büyüklüğünü tutan eleklerden geçirildiğinden dolayı tane boyutu, (kullanılan elek meş boyutu bakımından) homojene yakın kabul edilebilir. Ortalama olarak hep aynı boyutlu partiküller karışım sırasında bir birleri arasındaki boşlukları, boşluk ancak kendi boyutunda ise doldurabilecektir. Halbuki irili ufaklı tanelerin karışımında aralardaki bu boşluklar azami ölçüde dolacağından daha tok (pek) ve sıkı bir uzaysal dağılım elde edilir (Bkz. Şekil 5.36). Dolayısıyla matris malzeme içinde oluşan boşluklu yerleşim iletkenliği büyük ölçüde azaltmakta ve bunun sonucu olarak elektrot aşınması büyük oranda artmaktadır.

Bununla birlikte, tane boyutu küçüldükçe partiküller arası mesafeler kısaldığından iletkenlik düşmektedir. Bu yüzden 25 µm altı ve 25-32 µm aralığındaki tozlardan üretilen elektrotlar işleme yapmamıştır.

Tane boyutu aralığı daraltılan dolgu malzemeli kompozit elektrotlar, tane boyutu aralığı geniş tutulan dolgu malzemeli kompozit elektrotlara oranla daha yüksek elektriksel dirence dolayısıyla daha düşük iletkenliğe sahip oldukları görülmüştür. Bir başka deyişle tane boyutu aralığı daraltıldıkça elde edilen kompozit elektrotların İİH'nın düştüğü ve EAH'nın arttığı görülmüştür.

Elde edilen bu sonuçlara göre dendritik bakır dolgulu kompozit elektrotun İİH bu çalışmada tane boyutundan bağımsız kabul edilebilir. Diğer taraftan tanecik boyutunun elektrot aşınması üzerinde çok büyük bir etkisi olduğundan (%90) elektrot aşınmasını temsil eden eşitlik iki boyutlu bir yüzey fonksiyonu çıkmıştır.

MS-Excel, SigmaPlot 8.0 ve TableCurve-3D paket programlarında yapılan çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda İİH ve EAH Eş. 5.8 ve Eş. 5.9 olarak bulunmuştur.

$$\boxed{\text{İİH} \approx 0,019 \exp(0,4105v_f)} \quad (r^2=0,98) \quad (5.8)$$

$$\boxed{\text{EAH} \approx -31 - 0,15v_f + 3,86d - 0,096d^2 - 0,0009d^3 - 3E^{-6}d^4} \quad (r^2=0,91) \quad (5.9)$$

Elde edilen bu ampirik eşitlikler kullanılarak deneylerde denenmemiş ara dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyonu ve tane boyutu değerlerine göre İİH ve EAH'lar yaklaşık olarak hesaplanabilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada işleme akımı olarak kullanılan 9 amper'in üzerindeki işleme uygulamalarında elektrotun iş parçasına oranla daha fazla aşındığı ve elde edilen iş parçası yüzeyinin daha pürüzlü olduğu görülmüştür. Bu akım değeri altındaki deneylerde ise iş parçası işleme hızının (İİH) düştüğü görülmüştür.

Elektrotların pişirilerek son-kür ile kürleşmenin %90-%100 oranlarına kadar tamamlanmasının elektriksel iletkenliğe dolayısıyla işleme-aşınma performansına belirgin bir biçimde etki ettiği görülmüştür. Pişirme ile elektrotların iş parçası işleme hızının (İİH) arttığı, elektrot aşınma hızının (EAH) azaldığı ve bağlı aşınmanın (BA) saf bakır elektrotla yaklaştığı gözlenmiştir.

Bu çalışmada denemeleri yapılmış olan elektrotların saf bakır elektrotla göre düşük İİH ve yüksek EAH değerlerinden dolayı kaba operasyondan çok bitirme (finiş) operasyonunda kullanılmasının daha uygun olacağı görülmüştür.

Elektriksel iletkenliği iyi olan elektrotların İİH, EAH ve BA değerlerinin de iyi olduğu, saf bakır elektrot değerlerine yaklaştığı tespit edilmiştir. Elektriksel iletkenliğin en başta dolgu malzemesi konsantrasyonuna (çözelti içindeki oranına) bağlı olduğu, arttıkça üstel bir artış gösterdiği görülmüştür. Ayrıca dolgu malzemesi partikül şekil ve ortalama boyutunun da elektrot elektriksel iletkenliğini etkileyen önemli parametreler olduğu görülmüştür. Elektriksel iletkenlik-dolgu malzemesi konsantrasyonu ilişkisinin, literatürde verilen farklı polimer matris-iletken dolgu malzemesi çiftleri ile benzer olduğu görülmüştür.

Aynı yöntem ile üretilmiş, ancak bakır ve grafit dolgu tozlarının karıştırılmasından elde edilen kompozit elektrotların bakır dolgulu elektrotlara göre elektriksel iletkenlikleri ve İİH değerleri daha düşük, EAH değerleri daha

büyük çıkmıştır. Karışımda bakır tozuyla birlikte kullanılan grafit tozunun karışımdaki polyester matris malzeme oranını daha fazla arttırması (yalıtkanlık matris malzeme oranı arttıkça artmaktadır) ve iletkenliğinin bakıra göre daha düşük olması bu dolgu malzemesinin ilavesi ile üretilen elektrotların elektriksel iletkenliğinin daha düşük çıkmasına sebep olmuştur.

İİH ve EAH ile ilgili deneylerden elde edilen tüm veriler 30mm çapında ve yaklaşık 30mm boyunda silindir şekilli bakır-polyester, ve bakır-grafit-polyester elektrotlar için geçerlidir. Geometri değiştiğinde farklı sonuçlar elde edilebilir.

6.2. Öneriler

Elektriksel iletkenlik dolgu malzemesinin matris yapı içinde kurmuş olduğu iletkenlik zinciri adedi ile doğru orantılı olduğundan, zincir yapı oluşturma olasılığı daha fazla olan çubuksu (boyu enine göre çok daha uzun olan) şekilli iletken partiküllerin dolgu malzemesi olarak seçilmesi halinde daha iyi sonuçlar alınabilir.

Tutucu malzeme, doyma noktası yüksek olan (daha fazla dolgu malzemesini bünyesinde tutabilen), düşük viskoziteli özellikte malzemelerden seçilirse daha yüksek dolgu malzemesi konsantrasyonlarına çıkılabilir. Ayrıca, tutucu malzeme olarak yalıtkan polimer yerine iletken hale getirilmiş, poliasetilen gibi malzemelerin kullanılması iletkenlik ve işleme performansları açısından daha iyi sonuçlar verebilir.

Karıştırma ve döküm sırasında ortamdaki hava karışım içine girerek kompozit yapıda gözeneklere sebep olmaktadır. Üretim sürecinin vakumlu bir ortamda gerçekleştirilmesi, gözenekliliği azaltabilir ve daha tok ve iletkenliği daha yüksek elektrotlar elde edilebilir.

İşleme sırasında iş parçası yüzeyi dolgu malzemesi ile kaplandığından bu yöntemle ulaşılması zor karmaşık şekilli yüzeyler yerel olarak kaplanabilir.

KAYNAKLAR

1. Berger, M., A., Mc.Cullough, R.,L., "Characterization and Analysis of the Electrical properties of Metal-filled Polimer", **Composite Science and Technology**, 22: 81-106, (1985).
2. Vilcakova, J., Saha, P.,Quadrat, O., "Electrical Conductivity of Carbon fibres – Polyester resin composites in the Percolation Treshold region", **European Polymer Journal**, 38: 2343-2347, (2002).
3. Jimenez, M.,M., Elizalde, M.,P., Gonzales, M., "Electrochemical Behavior of Nickel-Polyester Composite Electrodes", **Electrochimica Acta**, 45: 4187-4193, (2000).
4. Curodeau, A., Richard, M., Frohn, L., "Mold Surface finishing with new EDM process in air with thermoplastic Composite Electrodes", **Journal of Materials Processing Technology**, 149: 278-283, (2004).
5. Puertolas, J.,A., Oriol, L.,Calleja, R., D., "Dielektric and Mechanical Behaviour of a Copper (II) Metallomesogenic homopolymer", **Journal of Non-Crystalline Solids**, 172-174: 950-954, (1994).
6. Mamunya, Y., P., Davydenko, V., V., Pissis, P., Lebedev, E., V., "Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders", **European polymer journal**, 38: 1887-1897, (2002).
7. Roldughin, V., I, Vysotskii, V., V., "Percolation properties of metal-filled polymer films, Structure and mechanisms of conductivity", **Progress in Organic Coatings**, 39: 81-100, (2000).
8. Carmona, F., "Conducting filled polymers", **Physica A**, 157: 461-469, (1989).
9. Shimada, Y., Daoqiang, L., Wong C., P. "Electrical Characterizations and Considerations of Electrically Conductive Adhesives (ECAs)", **International Symposium on Advanced Packaging Materials**, 16: 214-232, (2000).
10. Kim, H., K., Shi, F.,G., "Electrical reliability of electrically conductive adhesive joints: dependence on curing condition and current density", **Microelectronics journal**, 32: 315-321, (2001).
11. Vilcakova, J., Saha, P.,Quadrat, O.,Kresalek, V., "Pre-exponential factor and activation energy of electrical conductivity in polyester resin-Carbon Fibre Composites", **Synthetic Metals**, 71: 2139-2142, (1995).

12. Wycisk, W., Pozniak, R., Pasternak, A., "Conductive polymer materials with low filler content", **Journal of Electrostatics**, 56: 55-66, (2002).
13. Thongruang, W., Spontak, R., J., Balik, C., M., "Bridged double percolation in conductive polymer composites: an electrical conductivity, morphology and mechanical property study", **Polymer**, 43: 3717-3725, (2002).
14. Bhattacharyya, K., S., "Electrical resistivity of PVC-Cu Composites", **Polymer**, 20: 1166-1167, (1979).
15. Kalyon, D., M., Birinci, E., Yazıcı, R., Karuv, B., Walsh, S., "Electrical properties of composites as affected by the degree of mixedness of the conductive filler in the polymer matrix", **Polymer Engineering and Science**, 42: 7, (2002).
16. El-Tantawy, F., Kamada, K., Ohnabe, H., "Electrical properties and stability of epoxy reinforced carbon black composites", **Materials Letters**, 57: 242-251, (2002).
17. Blythe, A., R., "Electrical resistivity measurement of polymer materials", **Polymer Testing**, 4: 195-209, (1984).
18. Guoquan, W., "Electrical resistance measurement of conductive network in short carbon fibre-polymer composites", **Polymer Testing**, 16: 277-286, (1997).
19. Thongruang, W., Spontak, R., Balik, C., M., "Correlated electrical conductivity and mechanical property analysis of high-density polyethylene filled with graphite and carbon fiber", **Polymer**, 43: 2279-2286, (2002).
20. Lazzaroni, L., Dannelun, P., Fredriksson, C., "The Chemical and Electronic Structure of The Interface Between Aluminum and Conjugated Polymers", **Electrochimica Acta**, 39: 234-244, (1994).
21. Poyrazoğlu, O., "Elektriksel kıvılcımla aşındırma metodu ile işleme" **Tekev**, Ankara, 1-30, (1994).
22. Çoğun, C., Akaslan, Ş., "The effect of Machining parameters on tool wear and machining performance in EDM", **KSME International Journal**, 16, 1: 46-59, (2002).
23. Amorim, F., L., Weingaertner, W., L., "Die-Sinking Electrical Discharge Machining of a High-Strength Copper-Based Alloy for Injection Molds", **ABCM**, 26: 2-137, (2004).

24. Özerkan, H., B., "Atomize Demir ve Dendritik Bakır Tozlarının Görünür Yoğunluğunun Farklı Boyutlardaki Toz İlavesiyle Değişiminin İncelenmesi", Yüksek Lisans tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 12-40, (2003).
25. Walton, D., J., "Electrically Conductive polymers", **Materials and Design**, 11: 3, (1990).
26. Novak, I., Krupa, I., "Electro-Conductive resins filled with graphite for casting applications", **European Polymer Journal**, 40: 1417-1422, (2004).
27. Lau, W.,S., Wang, M., Lee, W., B. "Electrical Discharge Machining of Carbon-Fibre Composite material", **Journal of Machine Tools and Manufacture**, 30: 297-308, (1990).
28. Pucic, I., Ranogajec, F., "DC-Electrical Conductivity as a method for monitoring radiation curing of unsaturated polyester resins III Evaluation of results", **Radiation Physics and Chemistry**, 54: 95-108, (1999).
29. Kuhn, H., Child, A., D., Kimbrell, W., C., "Toward Real Applications of Coductive Polymers", **Synthetic Metals**, 71: 2139-2142, (1995).
30. Mamunya, Y., P., Zois, H., Apekis, L., Lebedev, E., V., "Influence of pressure on the electrical conductivity of metal powders used as fillers in polmer composites", **Powder Technology**, 38: 1887-1897, (2002).
31. Dang, M., Z., Zhang, Y., H., Tjong, S., C., "Dependence of dielectric behavior on the physical property of fillers in the polymer-matrix composites", **Synthetic Metals**, 146: 79-84, (2004).
32. Kroker, R., Schneider, M., Hamann, K., "Polymer Reaction on Powder Surfaces", **Progress in Organic Coatings**, 1: 23-44, (1972).
33. Cao, L., Zonghe, L., Johan L. "Effect of Curing Condition of Adhesion Strength and ACA Flip-Chip Flip-Chip Contact resistance", **IEEE proceeding of HDP**, 5: 7803-8620, (2004).
34. Blythe, A., R., "Electrical resistivity measurement of polymer materials", **Polymer Testing**, 4: 195-209, (1984).
35. Psarras, G., C., Manolakaki, E., Tsangaris, G., M., "Dielectric dispersion and ac conductivity in-Iron particles loaded-polmer composites", **composites (Part A)**, 34: 1187-1198, (2003).

36. Shevchenko, V., G., Ponomarenko, A., T., Enikolopyan, N., S., "Anisotropy effects in electrically conducting polymer composites", ***Applied Electromagnetics in Materials***, 5: 267-277, (1994).
37. Dani, A., Ogale, A., A., "Electrical percolation behavior of short-fiber composites: experimental characterization and modeling", ***Composite Science and Technology***, 56: 911-920, (1996).
38. Furkan A.Ş., "Furkan Elektroerozyon Tezgahı Kullanma Klavuzu", Ankara, 1-72, (2000).
39. Kovacik, J., Bielek, J., "Electrical Conductivity of Cu/Graphite composite material as a function of structural characteristics", ***Scripta Materialia***, 35: 151-152, (1996).
40. Yaman, K., arşivinden, (2007).
41. Thongruang, W., Spontak, R., Balik, C., M., "Correlated electrical conductivity and mechanical property analysis of high-density polyethylene filled with graphite and carbon fiber", ***Polymer***, 43: 2279-2286, (2002).
42. Kovacik, J., Bielek, J., "Electrical Conductivity of Cu/Graphite composite material as a function of structural characteristics", ***Scripta Materialia***, 35: 151-152, (1996).
43. Gavarri, J., R., Tortet, L., Musso, J., "Transport properties and percolation in two-phase composites", ***Solid State Ionics***, 117: 75-85, (1999).
44. Tosun, N., "Tel Erozyon Tezğahında Tel aşınmasının ve Yüzey Pürüzlülüğünün Deneysel olarak İncelenmesi ve Modellenmesi", Doktora tezi, ***Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, 76-83, (2004).
45. Gavarri, J., R., Tortet, L., Musso, J., "Transport properties and percolation in two-phase composites", ***Solid State Ionics***, 117: 75-85, (1999).
46. Kalaycı, Ş., "SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri", ***Asil Yayın Dağıtım Ltd.***, Regresyon Analizi, 3-419, (2005).
47. Boğan, Ö., "Elektro erozyon ile İşlemede Toz Karışımli Dielektrik Sıvının İşleme Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi", Yüksek Lisans tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, 18-75, (2002).

48. Mori, K., Watanabe, Y., Okai Y., "Conductivity of Copper Powder with and without Surface Treatment", ***Powder Technology***, 59: 191-197, (1989).
49. Scrosati, B., "Elektrochemical Properties of Conducting Polymers", ***Prog. Solid State Chemical***, 18: 1-77, (1988).
50. Zhang, A., Q., Cui, C., Q., Lee, Y., "Metal-Polymer Interactions in the Ag Poly-o-aminophenol System", ***Journal of Electroanalytical Chemistry***, 413: 143-151, (1996).
51. Miller, L., Vandemark, M., "Preparation; Analysis and Use of an Electrode Surface Modified by Polymer Adsorption", ***Journal of Electroanalytical Chemistry***, 88: 437-440, (1978).
52. Heeger, A., J., "Semi Conducting and Metallic Polymer: The Fourth Generation of Polimeric Materials", ***Current Applied Physics***, (Nobel Prize 2000 Lecture) 1: 247-267, (2001).
53. Nguyen, T., P., Ettaik, H., Lefrant, S., "Studies of the Polyparaphenylene /Aluminium Interface", ***Synthetic Metals***, 38: 69-76, (1990).
54. One Technology Center, Phelps Dodge Center Wire Company, James, J., "FTIR Analysis of Polyester Enamel Cure", 2: 263-265, Indiana, USA, (1990).

EKLER

EK-1 Deneylerde kullanılan İstatistik analizleri

1. REGRESYON ANALİZİ

Regresyon analizi, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek ve bu ilişkiyi kullanarak o konu ile ilgili tahminler (estimation) yada kestirimler (prediction) yapabilmek amacıyla yapılır.

Matematikte bağımsız değişkenler ile onlara bağlı değişkenler arasındaki ilişkinin kuralına fonksiyon adı verilir. Değişkenler bağımsız değişkenler ve bağımlı değişkenler olmak üzere ayırım yapılırlar. Basit regresyonda bağımlı değişkenin bir tek bağımsız değişkene olan regresyonu incelenirken, çoklu regresyonda (multi variate regression) birden fazla bağımsız değişkenin tek bir bağımlı değişkene olan etkileri incelenir.

Regresyon fonksiyonu, bir tek bağımsız değişken durumunda iki boyutlu koordinat sisteminde bir eğriyle temsil edilir. İki bağımsız değişken durumunda, sabit regresyon kontürleri veya tek bir yüzey fonksiyonu ile temsil edilir. İki'den fazla bağımsız değişken olması durumunda ise, regresyon yüzeyleri ile temsil edilirler. Regresyon eğrileri ve/veya yüzeyleri küçük kareler yöntemi kullanılarak bulunurlar [46].

1.2. Basit Regresyon

$(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)$ gibi bir takım gözlemlerden meydana gelen düz bir doğru en küçük kareler yaklaşımının en basit örneğidir. Doğru fonksiyonu için matematiksel ifade Eş. 1.1 gibi yazılabilir:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + e \quad (1.1)$$

EK-1 (Devam) Deneylerde kullanılan İstatistik analizleri

Burada, a_0 ve a_1 eğimi temsil eden katsayılardır. e ise matematiksel model ve gözlemler arasındaki hatadır. Eş. 1.1 tekrar düzenlenirse;

$$e = y - a_0 - a_1 \cdot x \quad (1.2)$$

Regresyonda amaç, deneysel gözlemlerle elde edilen x ve y arasındaki ilişkiyi temsil eden en iyi hattı bulmak olduğundan, hataların kareleri toplamının minimize edilmesi gerekir. Yani tahmin edilen y_i değerlerindeki hataların en küçük olmasıdır.

Bu amaçla Eş.1.2 ile verilen ifadenin karesi alınıp katsayılara göre kısmi türevleri alınarak sıfıra eşitlenir. Elde edilen denklemlerden katsayılar bulunur. Bu yöntemle en küçük kareler yöntemi (least square) denir.

Hataların kareleri toplamı:

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_i)^2 \quad (1.3)$$

a_0 ve a_1 katsayılarına göre kısmi türevler sıfıra eşitlenir.

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_i) = 0 \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n ((y_i - a_0 - a_1 \cdot x_i) \cdot x_i) = 0 \quad (1.5)$$

Eşitliklerde $\sum_{i=1}^n a_0$ yerine $n \cdot a_0$ yazılırsa, iki bilinmeyenli doğrusal denklem sistemi elde edilir ve Eş. 1.6 ve Eş. 1.7 olarak yazılır.

EK-1 (Devam) Deneylerde kullanılan İstatistik analizleri

$$n.a_0 + \sum_{i=1}^n x_i.a_1 = \sum_{i=1}^n y_i \quad (1.6)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i.a_0 + \sum_{i=1}^n x_i^2.a_1 = \sum_{i=1}^n x_i.y_i \quad (1.7)$$

Bu denklemler normal denklemler olarak adlandırılırlar ve sayısal çözümlendiklerinde a_1 katsayısı:

$$a_1 = \frac{n.\sum_{i=1}^n x_i.y_i - \sum_{i=1}^n x_i.\sum_{i=1}^n y_i}{n\sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (1.8)$$

Bulunan a_1 katsayısı Eş. 2.6'da yerine konarak a_0 katsayısı bulunur.

$$a_0 = \bar{y} - a_1.\bar{x} \quad (1.9)$$

Eş. 1.9'daki $\bar{y}$ ve $\bar{x}$ değerleri sırasıyla her bir y ve x değişkenlerinin aritmetik ortalamalarını ifade eder ve Eş. 1.10 gibi yazılabilir:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \text{ ve } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1.10)$$

1.3. Çoklu Regresyon

Regresyon fonksiyonları göz önüne alındığında, gözlem değerleri üç yada daha fazla gruptandırmaya tabi tutulacaksa bunlar arasındaki ilişki, artık eğrilerle temsil edilemez, regresyon yüzeyleri söz konusu olur.

EK-1 (Devam) Deneylerde kullanılan İstatistik analizleri

Bir sonuca, herhangi bir x_1 değişkeni ile birlikte x_2 değişkeni de etki ediyorsa, aradaki ilişki bir eğri ile temsil edilemez ancak bir yüzeyle temsil edilebilir [45].

Çoklu (multivariate) regresyonda bir bağımlı değişken ile en az iki bağımsız değişken inceleme konusu yapılarak cevap fonksiyonu araştırılır. Çoklu regresyon için lineer denklem Eş. 1.11 gibi yazılabilir.

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + \dots + a_n \cdot x_n \quad (1.11)$$

Basit regresyonda olduğu gibi bilinmeyen katsayılar, hataların kareleri toplamının bilinmeyen her bir katsayıya göre ayrı ayrı kısmi türevleri alınıp, sıfıra eşitlenmesiyle bulunur.

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_{1i} - a_2 \cdot x_{2i} - \dots - a_m \cdot x_{mi}) = 0 \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n ((y_i - a_0 - a_1 \cdot x_{1i} - a_2 \cdot x_{2i} - \dots - a_m \cdot x_{mi}) \cdot x_{1i}) = 0 \quad (1.5)$$

$$\begin{array}{ccccccc} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{array}$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_m} = -2 \sum_{i=1}^n ((y_i - a_0 - a_1 \cdot x_{1i} - a_2 \cdot x_{2i} - \dots - a_m \cdot x_{mi}) \cdot x_{mi}) = 0$$

İfade matris form da Eş. 1.6 gibi yazılabilir,

$$\begin{vmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i} \cdot x_{2i} \\ \sum x_{2i} & \sum x_{1i} \cdot x_{2i} & \sum x_{2i}^2 \end{vmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum y_{1i} \\ \sum x_{1i} \cdot y_{1i} \\ \sum x_{2i} \cdot y_{1i} \end{Bmatrix} \quad (1.6)$$

EK-1 (Devam) Deneylerde kullanılan İstatistik analizleri

Daha genel olarak,

$$\{Y\} = [Z]\{A\} + \{E\} \quad (1.12)$$

Olarak yazılabilir. Burada $\{Y\}$ bir kolon vektörü olup bağımlı değişkenleri temsil eder, $\{A\}$ katsayılar vektörü ve $\{E\}$ de hatalar vektörü, $[Z]$ matrisi ise bağımsız değişkenler matrisi olup açık olarak Eş. 1.13 gibi yazılabilir.

$$[Z] = \begin{bmatrix} z_{01} & z_{11} & z_{21} & \vdots & z_{m1} \\ z_{02} & z_{12} & z_{22} & \vdots & z_{m2} \\ z_{03} & z_{13} & z_{23} & \vdots & z_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{0n} & z_{1n} & z_{2n} & \vdots & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Eş. 1.12'den katsayılar vektörü çekilirse,

$$\{A\} = \left[[Z]^T \cdot [Z] \right]^{-1} \cdot [Z]^T \cdot \{Y\} \quad (1.14)$$

Olarak bulunur.

1.4. Doğrusal Olmayan Regresyon

Doğrusal olmayan eşitlikler ve veriler arasındaki hataların kareleri toplamını minimize etmek için Gauss-Newton algoritması kullanılır. Bu algoritma, doğrusal olmayan denklemi doğrusal formda ifade etmek için Taylor serisine açarak kullanır. Hataları minimize etmek için parametrelerin yeni tahminlerini bulmak için en küçük kareler yöntemini kullanır [45].

EK-1 (Devam) Deneylerde kullanılan İstatistik analizleri

Doğrusal olmayan denklemde değişkenler arasındaki ilişki,

$$y_i = f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m) + e_i \quad (1.16)$$

Şeklinde yazılabilir. Burada y_i , bağımlı değişkenlerin ölçülen değeridir. $f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)$, bağımsız değişken x_i 'nin ve $a_0, a_1, \dots, a_m$ 'nin doğrusal olmayan bir bağıntısıdır, e ise rasgele bir hatadır.

İki parametrelili bir durum için, doğrusal olmayan bu model ilk türevleri alındıktan sonra Taylor serisine göre açılırsa:

$$f(x_i)_{j+1} = f(x_i)_j + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 \quad (1.17)$$

Burada j başlangıç tahmini, $j+1$ ise tahmin olup $\Delta a_0 = a_{0,j+1} - a_{0,j}$ ve $\Delta a_1 = a_{1,j+1} - a_{1,j}$ şeklindedir. Bu ifadeler Eş. 1.16 ve Eş. 1.17'de yerine konursa:

$$y_i - f(x_i)_j = \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 + e_i \quad (1.18)$$

şeklinde yada matris form da,

$$\{D\} = [Z]\{\Delta A\} + \{E\} \quad (1.19)$$

Burada $[Z]$ kısmi türevler matrisi olup, Eş. 1.20 gibi yazılabilir:

EK-1 (Devam) Deneylerde kullanılan İstatistik analizleri

$$[Z_j] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial a_0} & \frac{\partial f_1}{\partial a_1} \\ \frac{\partial f_2}{\partial a_0} & \frac{\partial f_2}{\partial a_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial a_0} & \frac{\partial f_n}{\partial a_1} \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

Burada n veri sayısını ve $\frac{\partial f_i}{\partial a_k}$ i 'inci veride değerlendirilen k 'inci parametreye göre fonksiyonun kısmi türevidir. $\{D\}$ vektörü, ölçümler ve fonksiyon değerleri arasındaki farklardır.

$$\{D\} = \begin{Bmatrix} y_1 - f(x_1) \\ y_2 - f(x_2) \\ \vdots \\ y_n - f(x_n) \end{Bmatrix} \quad (1.21)$$

ve $\{A\}$ vektörü, parametrelerin değerlerindeki değişikliklerdir.

$$\{A\} = \begin{Bmatrix} \Delta A_0 \\ \Delta A_1 \end{Bmatrix} \quad (1.22)$$

Eş. 2.13'de en küçük kareler yöntemi uygulanırsa,

$$[[Z_j]^T [Z_j]] \{\Delta A\} = [Z_j]^T \{D\} \quad (1.23)$$

Elde edilir. Böylece $\{A\}$ için Eş. 1.23 çözülürse:

$$a_{0,j+1} = a_{0,j} + \Delta a_0$$

EK-1 (Devam) Deneylerde kullanılan İstatistik analizleri

ve (1.24)

$$a_{1,j+1} = a_{1,j} + \Delta a_1$$

Parametrelerinin değerleri hesaplanır.

$$|\varepsilon_a|_k = \left| \frac{a_{k,j+1} - a_{k,j}}{a_{k,j+1}} \right| \cdot 100 \quad (1.25)$$

Şeklinde bir hesaplama ile kabul edilebilir bir durdurma kriterinin altına düşene kadar (iterasyon) tekrar edilir [45].

2. KORELASYON ANALİZİ

Korelasyon iki değişken arasındaki ilişkinin derecesini ve yönünü belirlemek amacıyla kullanılan istatistik yöntemlerden birisidir. Değişkenlerin bağımlı veya bağımsız olması dikkate alınmaz. Değişik şekillerde hesaplanan ve değişik amaçlar için kullanılan Pearson korelasyon katsayısı, Kanonik korelasyon katsayısı, kısmi korelasyon katsayısı gibi farklı isimler alan korelasyon katsayıları vardır.

2.1. Kısmi Korelasyon

Belirli bir olay üzerinde, faktörlerden birinin tesiri sabit kabul edilip, diğerinin etkisi ölçülürse, yani bir bağımsız değişken ile bir bağımlı değişken arasındaki ilişki, belli diğer bağımsız değişkenlerin etkileri sabit kabul edilmek suretiyle hesaplanırsa buna *kısmi korelasyon* (partial correlation) denir.

EK-1 (Devam) Deneylerde kullanılan İstatistik analizleri

Farz edelim ki, X, Y ve Z aralarında kısmi korelasyon aranan üç bağımsız değişken olsun. Burada X olayı üzerinde yalnız Y olayının etkisini ararsak, basit korelasyon söz konusu olur. Ancak bu iki olayın ilişkisi dışında, bir diğer olayın (Z) tesiri de mevcut olabilir. Bu takdirde üçüncü olayın mevcut, fakat etkisini sabit kabul (etkisiz) edip, X ve Y arasında korelasyon ararsak Eş. 2.1 ifadesiyle hesaplanır:

$$r_{yx.z} = \frac{r_{xy} - (r_{xz} \cdot r_{yz})}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2) \cdot (1 - r_{yz}^2)}} \quad (2.1)$$

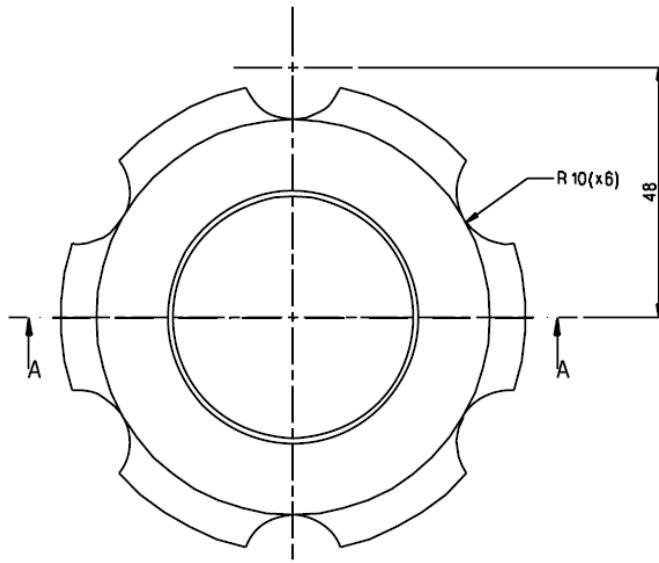
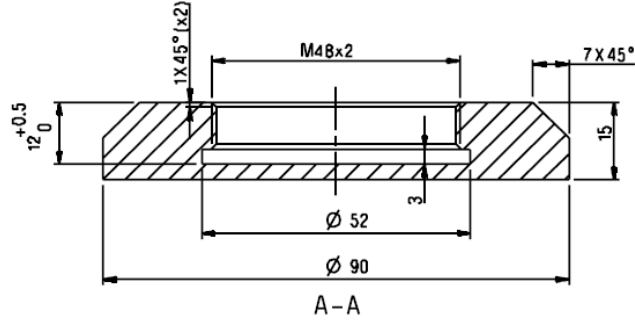
Şayet Y ve Z olayları arasında bir korelasyon aranıyor ve X'in etkisi sabit (yok) kabul ediliyorsa Y ile Z arasındaki korelasyon Eş. 2.2 ile hesaplanır.

$$r_{yz.x} = \frac{r_{yz} - (r_{yx} \cdot r_{zx})}{\sqrt{(1 - r_{yx}^2) \cdot (1 - r_{zx}^2)}} \quad (2.2)$$

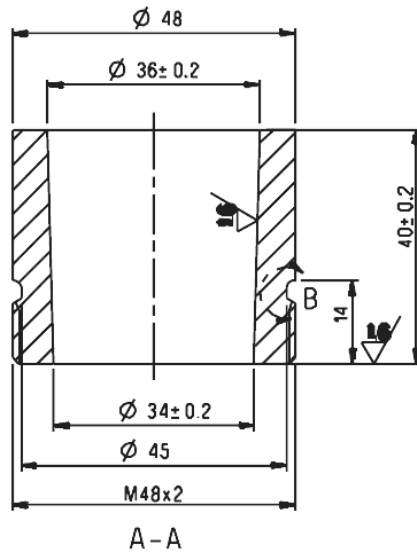
Son olarak, X ve Z olayları arasındaki korelasyon Y'nin etkisi sabitken Eş. 2.3'de ki gibi hesaplanır:

$$r_{xz.y} = \frac{r_{xz} - (r_{xy} \cdot r_{zy})}{\sqrt{(1 - r_{xy}^2) \cdot (1 - r_{zy}^2)}} \quad (2.3)$$

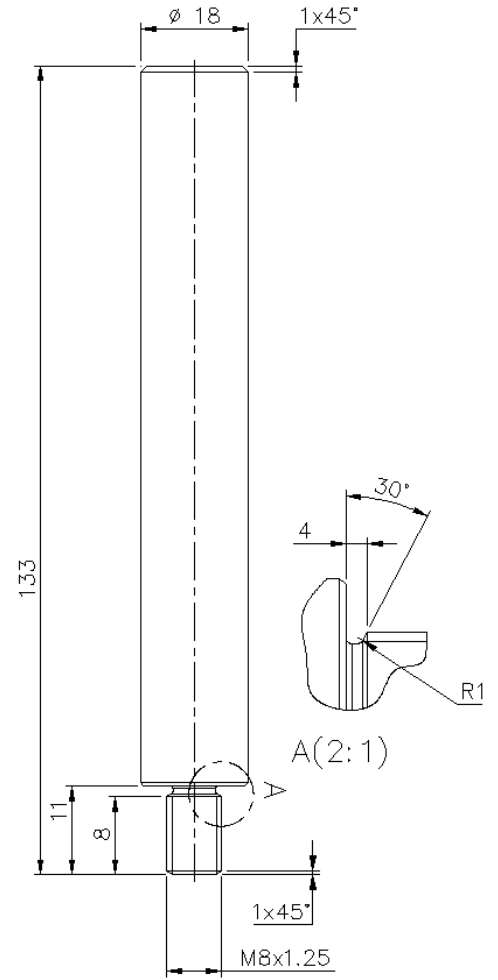
EK-2 Deneylerde kullanılan kalıp seti



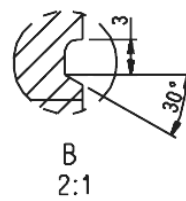
Kalıp altlığı



Kalıp



Elektrot sapı

B
2:1

EK-3 Dolgu malzemesi (bakır) tanecik boyutu analiz sonucu



Version 1.2a

26 May 2006 14:50

BAKIR :Run Number 1

Sample File Name: ATS , Record: 571
 Measured on: 26 May 2006 14:43 Last saved on: 26 May 2006 14:44

Source: Analysed

Presentation: 2OAD
 Polydisperse model

Volume Result

Focus = 300 mm.

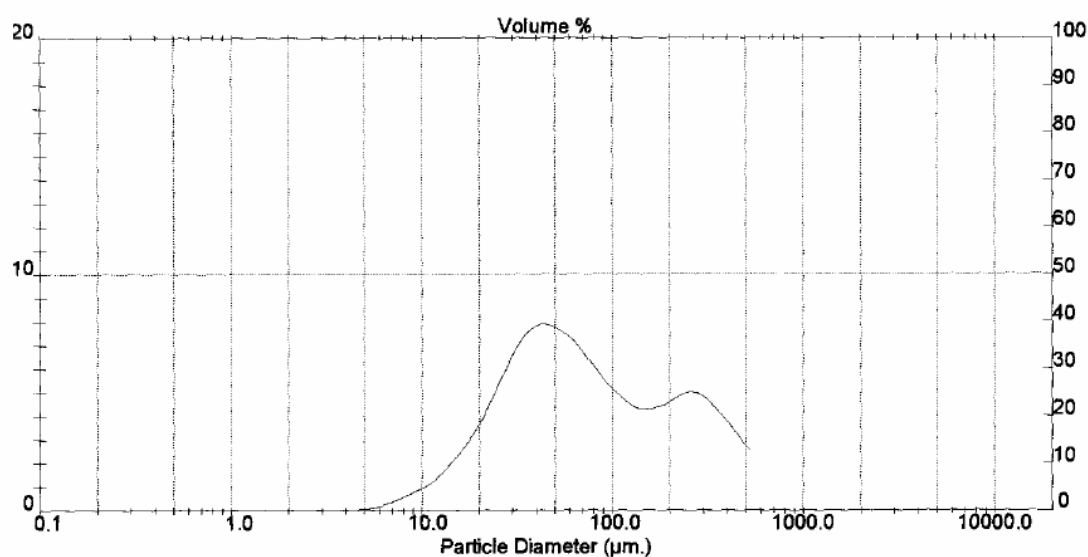
Residual = 0.794 %
 d (0.5) = 67.44 μ m
 D [4,3] = 125.79 μ m
 Sauter Mean (D[3,2]) = 46.70 μ m
 Specific Surface Area = 0.0659 sq. m. / gm

Concentration = 0.000 %
 d (0.1) = 21.36 μ m
 Span = 4.57

Obscuration = -0.95 %
 d (0.9) = 329.50 μ m

Mode = 43.52 μ m
 Density = 1.95 gm. / c.c.

Size (Lo) μ m	Result In %	Size (Hi) μ m	Result Below %	Size (Lo) μ m	Result In %	Size (Hi) μ m	Result Below %
0.50	0.00	1.32	0.00	25.46	6.11	31.01	20.29
1.32	0.00	1.60	0.00	31.01	7.36	37.79	27.65
1.60	0.00	1.95	0.00	37.79	7.85	46.03	35.50
1.95	0.00	2.38	0.00	46.03	7.74	56.09	43.24
2.38	0.00	2.90	0.00	56.09	7.21	68.33	50.45
2.90	0.00	3.53	0.00	68.33	6.37	83.26	56.82
3.53	0.02	4.30	0.02	83.26	5.48	101.44	62.30
4.30	0.05	5.24	0.07	101.44	4.77	123.59	67.08
5.24	0.16	6.39	0.23	123.59	4.33	150.57	71.41
6.39	0.39	7.78	0.61	150.57	4.32	183.44	75.73
7.78	0.70	9.48	1.31	183.44	4.61	223.51	80.34
9.48	1.00	11.55	2.32	223.51	4.99	272.31	85.33
11.55	1.58	14.08	3.90	272.31	4.83	331.77	90.16
14.08	2.34	17.15	6.24	331.77	4.12	404.21	94.28
17.15	3.32	20.90	9.55	404.21	3.28	492.47	97.56
20.90	4.62	25.46	14.18	492.47	2.44	600.00	100.00



EK-4 Dolgu malzemesi (grafit) tanecik boyutu analiz sonucu



Version 1.2a

26 May 2006 14:55

GRAFIT :Run Number 2

Sample File Name: ATS , Record: 575
 Measured on: 26 May 2006 14:54 Last saved on: 26 May 2006 14:54

Source: Analysed

Presentation: 2TKD
 Polydisperse model

Volume Result

Focus = 300 mm.

Residual = 0.248 %
 d (0.5) = 68.97 μ m
 D [4, 3] = 92.80 μ m
 Sauter Mean (D[3,2]) = 35.55 μ m
 Specific Surface Area = 0.0865 sq. m. / gm

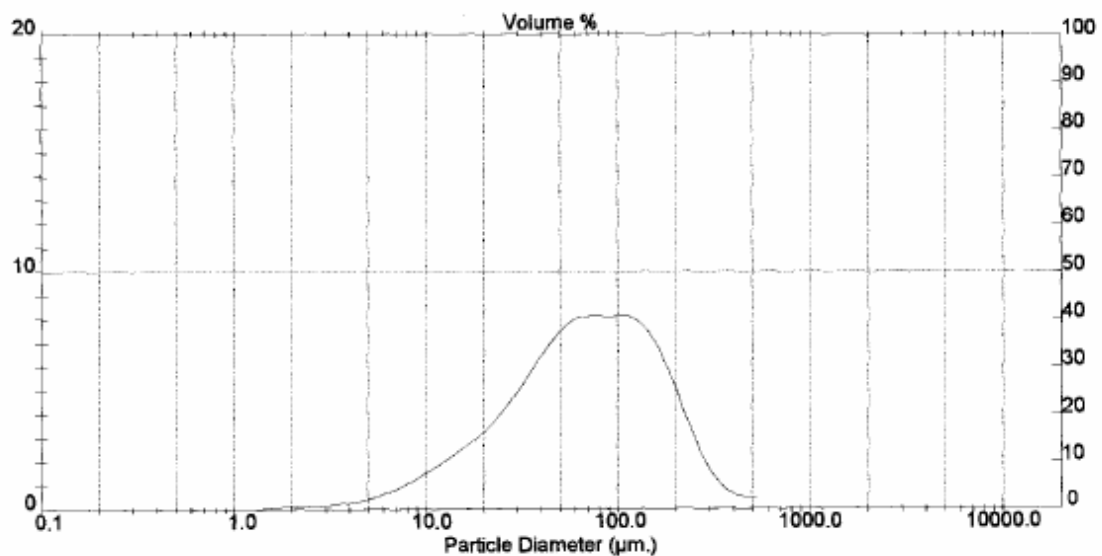
Concentration = 0.092 %
 d (0.1) = 16.86 μ m
 Span = 2.58

Obscuration = 18.06 %
 d (0.9) = 195.02 μ m

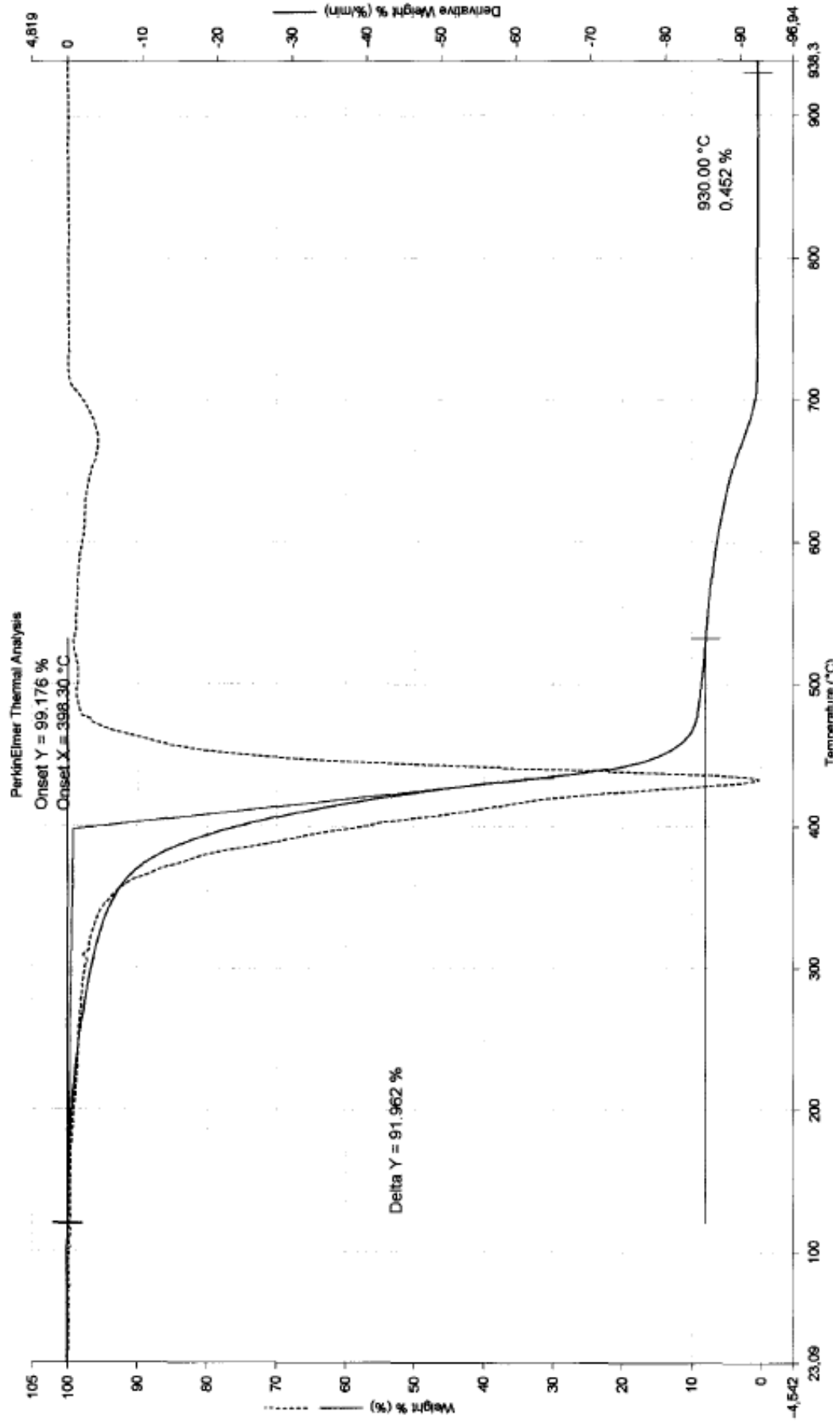
Mode = 106.99 μ m
 Density = 1.95 gm. / c.c.

Size (Lo) μ m	Result In %	Size (Hi) μ m	Result Below %
0.50	0.02	1.32	0.02
1.32	0.07	1.60	0.09
1.60	0.10	1.95	0.19
1.95	0.13	2.38	0.32
2.38	0.16	2.90	0.48
2.90	0.19	3.53	0.67
3.53	0.27	4.30	0.94
4.30	0.39	5.24	1.33
5.24	0.59	6.39	1.92
6.39	0.86	7.78	2.78
7.78	1.21	9.48	3.99
9.48	1.62	11.55	5.62
11.55	2.08	14.08	7.70
14.08	2.55	17.15	10.24
17.15	3.08	20.90	13.32
20.90	3.75	25.46	17.08

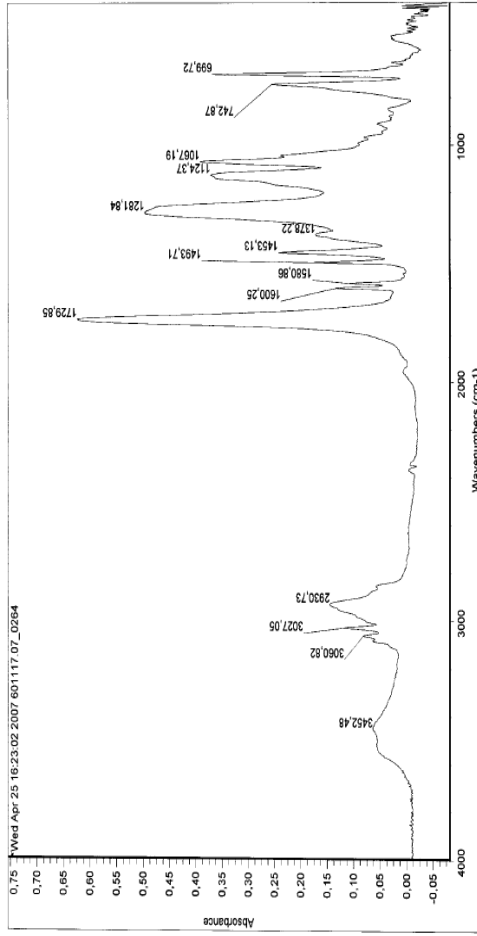
Size (Lo) μ m	Result In %	Size (Hi) μ m	Result Below %
25.46	4.63	31.01	21.70
31.01	5.64	37.79	27.35
37.79	6.69	46.03	34.03
46.03	7.56	56.09	41.59
56.09	8.03	68.33	49.62
68.33	8.12	83.26	57.74
83.26	8.10	101.44	65.84
101.44	8.12	123.59	73.96
123.59	7.68	150.57	81.64
150.57	6.63	183.44	88.27
183.44	4.97	223.51	93.24
223.51	3.15	272.31	96.39
272.31	1.70	331.77	98.09
331.77	0.85	404.21	98.93
404.21	0.55	492.47	99.48
492.47	0.52	600.00	100.00



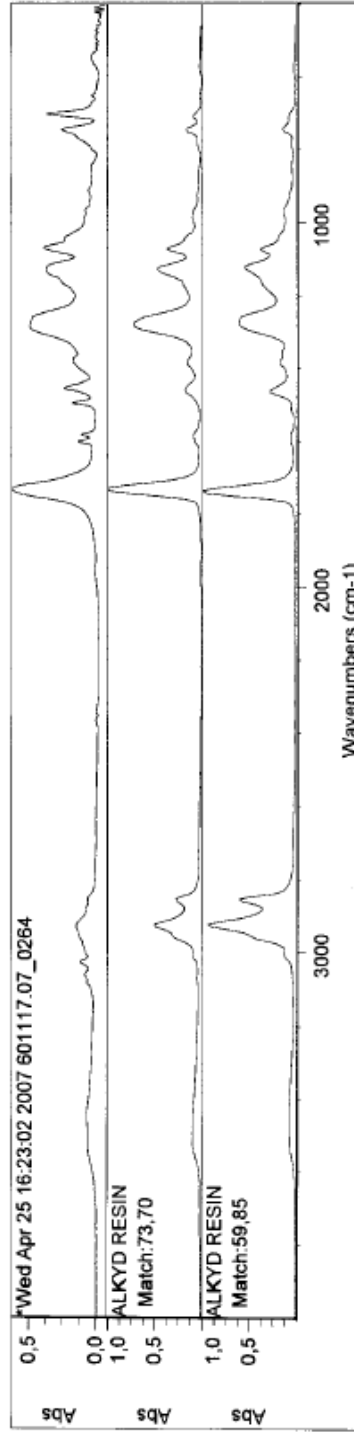
EK- 5 Matris malzeme (Polyester) TGA analiz sonucu



EK- 6 Matris malzeme (Polyester) FTIR analiz sonucu



Search results for: "Wed Apr 25 16:23:02 2007 601117.07_0264"
 Date: Wed Apr 25 16:26:33 2007
 Search algorithm: Correlation
 Regions searched: 3995,85-455,13



Search results list of matches

Index	Match	Compound Name	Library Name	
1	13	73.70	ALKYD RESIN	Hummel Polymer Sample Library
2	14	59.85	ALKYD RESIN	Hummel Polymer Sample Library
3	42	56.36	POLY(STYRENE/ACRYLONITRILE/MMA)	Hummel Polymer Sample Library
4	46	54.86	POLY(STYRENE), ATACTIC	Hummel Polymer Sample Library
5	47	53.19	POLY(STYRENE/VINYLIDENE CHLORIDE)	Hummel Polymer Sample Library
6	36	52.61	POLYESTER RESIN, UNSATURATED	Hummel Polymer Sample Library
7	16	51.40	Wed Mar 17 16:24:32 1999 polystyrene	User Example Library
8	30	51.16	POLY(METHYL METHACRYLATE)	Hummel Polymer Sample Library
9	25	49.76	PS	User Example Library
10	3	47.14	POLYESTER, TERE-&ISO-PHTHALATE	Hummel Polymer Sample Library

EK- 7 Hacimsel olarak %43,6 dolgu malzemesi konsantrasyonlu N-B/P elektrotun farklı işleme parametrelerinde İİH, EAH ve BA deney sonuçları

İş parçası	İş parçası Kütlesi [gr] (İşleme öncesi)	İş parçası Kütlesi [gr] (İşleme sonrası)	Kütlesel Karışım oranı (%)	Elektrot Kütlesi [gr] (İşleme öncesi)	Elektrot Kütlesi [gr] (İşleme sonrası)	İş parçası hacimsel aşınma hızı [mm ³ /dak]	Elektrot hacimsel aşınma hızı [mm ³ /dak]	Bağıl aşınma [.]	İşleme süresi [dakika]	Hacimsel Dolgu malzemesi [%]	Güç seviyesi [A]	Ark süresi [µs]	Ark aralığı [µs]
NO	$m_{iö}$	m_{is}	B/P	$m_{eö}$	m_{es}	$İİH$	EAH	BA	t	V_f	GS	AS	AA
009	238,20	238,18	85B/15P	68,82	66,65	0,00703	1,30	184,9	360	43,6	1/16 ⁻ ,25	2- 6	3- 12
010	237,31	237,26	85B/15P	66,65	59,76	0,01758	4,13	234,9	360	43,6	3/32- 3	3- 12	5- 50
011	238,18	238,02	85B/15P	59,75	46,24	0,05625	8,11	144,1	360	43,6	1/8- 4,5	5- 50	6- 100
012	238,25	238,05	85B/15P	46,22	30,43	0,07033	9,47	134,65	360	43,6	¼- 9	6- 100	7- 200
013	227,05	226,65	85B/15P	63,24	25,82	0,1406	22,45	159,67	360	43,6	½- 18	7- 200	8- 400
014	238,24	236,49	SAF BAKIR ELEKTROT	247,81	247,28	0,6153	0,167	0,27	360	100,0	¼- 9	6- 100	7- 200

EK-8 N-B/P elektrota ait İİH, EAH ve BA deney sonuçları

İş parçası	İş parçası Kütlesi [gr] (İşleme öncesi)	İş parçası Kütlesi [gr] (İşleme sonrası)	Kütlesel Karışım oranı (%)	Elektrot Kütlesi [gr] (İşleme öncesi)	Elektrot Kütlesi [gr] (İşleme sonrası)	İş parçası aşınma Hızı [mm ³ /dak]	Elektrot aşınma Hızı [mm ³ /dak]	Bağlı aşınma [.]	İşleme süresi [dakika]	Hacimsel Dolgu malzemesi [%]	Güç seviyesi [A]	Ark süresi [µs]	Ark aralığı [µs]
NO	$m_{iö}$	m_{is}	B/P	$m_{eö}$	m_{es}	$İİH$	EAH	BA	t	V_f	GS	AS	AA
001	227,47	227,43	79B/21P	79,85	66,87	0,0105	7,058	669,12	480	33,9	¼- 9	6- 100	7- 200
002	227,25	227,2	80B/20P	75,55	63,65	0,0132	6,367	482,88	480	35,3	¼- 9	6- 100	7- 200
003	227,08	227,01	81B/19P	74,29	63,55	0,0185	5,717	433,60	480	36,8	¼- 9	6- 100	7- 200
004	227,56	227,47	82B/18P	78,84	68,22	0,0237	5,520	232,58	480	38,3	¼- 9	6- 100	7- 200
005	227,9	227,78	84B/16P	84,65	75,3	0,0316	4,705	148,68	480	41,7	¼- 9	6- 100	7- 200
006	227,26	227,12	85B/15P	85,29	77,16	0,0369	4,054	109,79	480	43,6	¼- 9	6- 100	7- 200
007	227,36	227,19	86B/14P	59,24	50,47	0,0448	4,362	97,31	480	45,6	¼- 9	6- 100	7- 200
008	226,99	226,79	87B/13P	82,16	74,17	0,053	3,960	75,08	480	47,7	¼- 9	6- 100	7- 200

EK-9 (a) S-B/P (b) P-B/P elektrotlara ait deney sonuçları

(a)

Elektrot Adı	İş Parçası Adı	Hacimsel olarak Dolgu malzemesi [%]	İş parçası Kütlesi [gr] (İşleme öncesi)	İş parçası Kütlesi [gr] (İşleme sonrası)	Elektrot Kütlesi [gr] (İşleme öncesi)	Elektrot Kütlesi [gr] (İşleme sonrası)	Elektrot yoğunluğu [gr/cm ³]	İş parçası hacimsel aşınması [mm ³ /dak]	Elektrot hacimsel aşınması [mm ³ /dak]	Bağıl aşınma [.]	İşleme süresi [dakika]
		<i>V_f</i>	<i>m_{iö}</i>	<i>m_{is}</i>	<i>m_{eö}</i>	<i>m_{es}</i>	<i>ρ_e</i>	<i>iiH</i>	<i>EAH</i>	<i>BA</i>	<i>t</i>
S-78B/22P	N029	32,6	230,01	229,56	73,67	65,46	3,843	0,119	4,451	37,51	480
S-80B/20P	N032	35,3	229,62	229,06	67,79	59,64	3,810	0,148	4,456	30,17	480
S-82B/18P	N016	38,3	228,86	227,88	68,40	63,97	3,856	0,258	2,393	9,26	480
S-83B/17P	N015	40,0	229,3	228,28	65,57	61,20	3,919	0,269	2,323	8,64	480
S-85B/15P	N033	43,6	230,55	229,33	64,61	60,08	4,008	0,322	2,355	7,32	480
S-86B/14P	N038	45,6	229,47	228,1	80,84	77,08	4,197	0,361	1,866	5,17	480
S-87B/13P	N014	47,7	226,37	224,89	68,05	64,63	4,546	0,390	1,567	4,02	480
S-90B/10P	N013	55,1	227,38	225,87	52,14	50,11	4,602	0,398	0,919	2,31	480
S-92B/8P	N045	61,1	229,82	228,22	61,31	59,92	4,704	0,422	0,612	1,45	480

(b)

Elektrot Adı	İş Parçası Adı	Hacimsel olarak Dolgu malzemesi [%]	İş parçası Kütlesi [gr] (İşleme öncesi)	İş parçası Kütlesi [gr] (İşleme sonrası)	Elektrot Kütlesi [gr] (İşleme öncesi)	Elektrot Kütlesi [gr] (İşleme sonrası)	Elektrot yoğunluğu [gr/cm ³]	İş parçası hacimsel aşınması [mm ³ /dak]	Elektrot hacimsel aşınması [mm ³ /dak]	Bağıl aşınma [.]	İşleme süresi [dakika]
		<i>V_f</i>	<i>m_{iö}</i>	<i>m_{is}</i>	<i>m_{eö}</i>	<i>m_{es}</i>	<i>ρ_e</i>	<i>iiH</i>	<i>EAH</i>	<i>BA</i>	<i>t</i>
P-79B/21P	N030	33,9	229,61	229,49	69,74	61,48	3,837	0,032	4,484	141,70	480
P-80B/20P	N031	35,3	229,44	229,28	72,73	64,41	3,922	0,042	4,420	104,75	480
P-82B/18P	N026	38,3	230,08	229,82	65,32	56,93	4,012	0,069	4,355	63,52	480
P-83B/17P	N034	40,0	228,6	228,31	71,20	62,93	4,012	0,076	4,293	56,13	480
P-85B/15P	N035	43,6	229,46	228,81	74,34	69,18	4,020	0,171	2,676	15,61	480
P-87B/13P	N036	47,7	229,95	229,04	72,01	68,46	4,088	0,240	1,810	7,54	480
P-90B/10P	N037	55,1	230,72	229,44	77,57	74,42	4,146	0,338	1,582	4,69	480

EK-10 (a) S-B/G/P (b) P-B/G/P elektrotlara ait deney sonuçları

(a)

Elektrot Adı	İş Parçası Adı	Hacimsel olarak Dolgu malzemesi [%]	İş parçası Kütlesi [gr] (İşleme öncesi)	İş parçası Kütlesi [gr] (İşleme sonrası)	Elektrot Kütlesi [gr] (İşleme öncesi)	Elektrot Kütlesi [gr] (İşleme sonrası)	Elektrot yoğunluğu [gr/cm ³]	İş parçası hacimsel aşınması [mm ³ /dak]	Elektrot hacimsel aşınması [mm ³ /dak]	Bağıl aşınma [.]	İşleme süresi [dakika]
		V_f	m_{iö}	m_{is}	m_{eö}	m_{es}	ρ_e	İİH	EAH	BA	t
S-75B/5G/20P	N027	30,1	230,65	230,59	72,16	60,43	2,910	0,016	8,396	530,65	480
S-76B/5G/19P	N028	31,3	229,75	229,62	71,92	59,62	3,011	0,032	8,011	248,28	480
S-78B/5G/17P	N042	33,9	229,21	229,04	71,69	56,68	3,544	0,045	8,823	196,81	480
S-80B/5G/15P	N022	36,8	229,61	229,36	74,64	64,35	3,624	0,066	5,915	89,72	480
S-81B/5G/14P	N025	38,4	230,28	229,82	66,05	56,93	3,780	0,121	5,027	41,44	480
S-82B/5G/13P	N043	40,0	230,26	229,44	76,59	68,72	3,789	0,216	4,328	20,01	480
S-83B/5G/12P	N024	41,8	230,81	229,95	65,88	58,13	3,723	0,227	4,336	19,12	480
S-85B/5G/10P	N048	45,7	242,58	241,64	59,26	52,09	3,768	0,248	3,964	15,99	480
S-87B/5G/8P	N041	50,2	229,59	228,52	55,72	49,14	3,883	0,282	3,530	12,51	480

(b)

Elektrot Adı	İş Parçası Adı	Hacimsel olarak Dolgu malzemesi [%]	İş parçası Kütlesi [gr] (İşleme öncesi)	İş parçası Kütlesi [gr] (İşleme sonrası)	Elektrot Kütlesi [gr] (İşleme öncesi)	Elektrot Kütlesi [gr] (İşleme sonrası)	Elektrot yoğunluğu [gr/cm ³]	İş parçası hacimsel aşınması [mm ³ /dak]	Elektrot hacimsel aşınması [mm ³ /dak]	Bağıl aşınma [.]	İşleme süresi [dakika]
		V_f	m_{iö}	m_{is}	m_{eö}	m_{es}	ρ_e	İİH	EAH	BA	t
P-76B/5G/19P	N021	31,3	227,44	227,39	68,4	41,54	3,197	0,013	16,199	1228,54	480
P-78B/5G/17P	N017	33,9	228,24	228,16	74,78	57,85	3,325	0,021	10,609	502,88	480
P-79B/5G/16P	N019	35,3	229,15	229,06	65,55	45,27	3,604	0,024	11,724	493,98	480
P-80B/5G/15P	N039	36,8	229,59	229,46	78,75	62,17	3,606	0,034	9,578	279,38	480
P-82B/5G/13P	N040	40,0	229,57	229,18	74,31	58,92	3,627	0,103	8,839	85,94	480
P-83B/5G/12P	N018	41,8	229,66	229,23	60,23	46,18	3,662	0,113	7,992	70,48	480
P-85B/5G/10P	N020	45,7	229,53	228,64	65,4	55,74	3,743	0,235	5,377	22,91	480
P-6B/5G/9P	N023	47,9	230,54	229,71	69,21	60,92	3,832	0,219	4,507	20,59	480

EK-11 N-B/P elektrota ait direnç ölçümü deney sonuçları

(N) SERBEST BAKIR ELEKTROT			$V_c=0,24$		$\sigma_1=0,38$	$F=0,48$	
V_f [%]	ELEKTROT ADI	GERİLİM [V]	AKIM [A]	DİRENÇ Ω [ohm]	İLETKENLİK σ [1/ohm.cm]	Log (Ω)	Log (σ)
11,2	N-48B/52P	ölçülemiyor	ölçülemiyor				
12,0	N-50B/50P	ölçülemiyor	ölçülemiyor				
13,8	N-54B/46P	ölçülemiyor	ölçülemiyor				
14,8	N-56B/44P	ölçülemiyor	ölçülemiyor				
15,8	N-58B/42P	ölçülemiyor	ölçülemiyor				
17,0	N-60B/40P	44,16	1,00E-10	4,42E+11	2,56E-13	11,65	-12,59
18,2	N-62B/38P	35,67	1,00E-10	3,57E+11	3,17E-13	11,55	-12,50
19,5	N-64B/36P	44,44	1,00E-10	4,44E+11	2,55E-13	11,65	-12,59
20,9	N-66B/34P	21,54	1,00E-10	2,15E+11	5,25E-13	11,33	-12,28
22,5	N-68B/32P	37,12	1,00E-10	3,71E+11	3,05E-13	11,57	-12,52
24,1	N-70B/30P	28,96	1,00E-10	2,90E+11	3,91E-13	11,46	-12,41
26,0	N-72B/28P	27,41	1,00E-10	2,74E+11	4,13E-13	11,44	-12,38
28,0	N-74B/26P	45,63	1,00E-09	4,56E+10	2,48E-12	10,66	-11,61
29,0	N-75B/25P	63,92	1,00E-08	6,39E+09	1,77E-11	9,81	-10,75
31,3	N-77B/23P	22,16	1,00E-07	2,22E+08	5,10E-10	8,35	-9,29
32,6	N-78B/22P	3,74	1,00E-07	3,74E+07	3,02E-09	7,57	-8,52
33,9	N-79B/21P	15,20	1,00E-05	1,52E+06	7,44E-08	6,18	-7,13
35,3	N-80B/20P	1,67	1,00E-05	1,67E+05	6,77E-07	5,22	-6,17
36,8	N-81B/19P	1,02	1,00E-05	1,02E+05	1,11E-06	5,01	-5,96
38,3	N-82B/18P	1,14	1,00E-04	1,14E+04	9,92E-06	4,06	-5,00
40,0	N-83B/17P	2,36	1,00E-03	2,36E+03	4,79E-05	3,37	-4,32
43,6	N-85B/15P	1,84	1,00E-03	1,84E+03	6,15E-05	3,26	-4,21
47,7	N-87B/13P	2,08	1,00E-03	2,08E+03	5,44E-05	3,32	-4,26

EK-12 S-B/P elektrota ait direnç ölçümü deney sonuçları

(S) PRESLENMİŞ BAKIR ELEKTROT				$V_c=0,19$	$\sigma_1=0,43$	$F = 0,61$	
V_f [%]	ELEKTROT ADI	GERİLİM [V]	AKIM [A]	DİRENÇ Ω [ohm]	İLETKENLİK σ [1/ohm.cm]	Log (Ω)	Log (σ)
14.8	S-56B/44P	ölçülemiyor	ölçülemiyor				
15.8	S-58B/42P	11,45	1,00E-10	1,15E+11	9,88E-13	11,06	-12,01
17.0	S-60B/40P	12,16	1,00E-10	1,22E+11	9,30E-13	11,08	-12,03
18.2	S-62B/38P	13,67	1,00E-10	1,37E+11	8,28E-13	11,14	-12,08
20.2	S-65B/35P	7,44	1,00E-10	7,44E+10	1,52E-12	10,87	-11,82
20.9	S-66B/34P	9,54	1,00E-10	9,54E+10	1,19E-12	10,98	-11,93
22.5	S-68B/32P	17,12	1,00E-09	1,71E+10	6,61E-12	10,23	-11,18
24.1	S-70B/30P	66,96	1,00E-07	6,70E+08	1,69E-10	8,83	-9,77
26.0	S-72B/28P	17,41	1,00E-07	1,74E+08	6,50E-10	8,24	-9,19
28.0	S-74B/26P	35,63	1,00E-06	3,56E+07	3,17E-09	7,55	-8,50
29.0	S-75B/25P	33,92	1,00E-05	3,39E+06	3,33E-08	6,53	-7,48
31.3	S-77B/23P	12,16	1,00E-05	1,22E+06	9,30E-08	6,08	-7,03
32.6	S-78B/22P	13,31	1,00E-04	1,33E+05	8,50E-07	5,12	-6,07
33.9	S-79B/21P	7,12	1,00E-03	7,12E+03	1,59E-05	3,85	-4,80
35.3	S-80B/20P	0,50	1,00E-03	5,00E+02	2,26E-04	2,70	-3,65
36.8	S-81B/19P	1,02	1,00E-03	1,02E+03	1,11E-04	3,01	-3,96
38.3	S-82B/18P	1,14	1,00E-02	1,14E+02	9,92E-04	2,06	-3,00
40.0	S-83B/17P	12,49	1,00E-01	1,25E+02	9,06E-04	2,10	-3,04
43.6	S-85B/15P	3,66	1,00E-01	3,66E+01	3,09E-03	1,56	-2,51
47.7	S-87B/13P	1,47	1,00E-01	1,47E+01	7,70E-03	1,17	-2,11
55.1	S-90B/10P	1,08	1,00E-01	1,08E+01	1,05E-02	1,03	-1,98
61.1	S-92B/8P	0,98	1,00E-01	9,80E+00	1,15E-02	0,99	-1,94

EK-13 P-B/P elektrota ait direnç ölçümü deney sonuçları

(P) PİŞİRİLMİŞ SERBEST BAKIR ELEKTROT				$V_c=0,21$	$\sigma_f=0,40$	$F=0,48$	
V_f [%]	EL. ADI	GERİLİM [V]	AKIM [A]	DİRENÇ Ω [ohm]	İLETKENLİK σ [1/ohm.cm]	Log (Ω)	Log (σ)
12.0	P-50B/50P	ölçülemiyor	ölçülemiyor				
13.8	P-54B/46P	ölçülemiyor	ölçülemiyor				
14.8	P-56B/44P	ölçülemiyor	ölçülemiyor				
15.8	P-58B/42P	31,45	1,00E-10	3,15E+11	3,60E-13	11,50	-12,44
17.0	P-60B/40P	22,16	1,00E-10	2,22E+11	5,10E-13	11,35	-12,29
18.2	P-62B/38P	25,67	1,00E-10	2,57E+11	4,41E-13	11,41	-12,36
19.5	P-64B/36P	34,44	1,00E-10	3,44E+11	3,28E-13	11,54	-12,48
20.9	P-66B/34P	21,54	1,00E-10	2,15E+11	5,25E-13	11,33	-12,28
22.5	P-68B/32P	47,12	1,00E-09	4,71E+10	2,40E-12	10,67	-11,62
24.1	P-70B/30P	86,96	1,00E-08	8,70E+09	1,30E-11	9,94	-10,89
26.0	P-72B/28P	67,41	1,00E-07	6,74E+08	1,68E-10	8,83	-9,78
28.0	P-74B/26P	25,63	1,00E-07	2,56E+08	4,41E-10	8,41	-9,36
29.0	P-75B/25P	63,20	1,00E-06	6,32E+07	1,79E-09	7,80	-8,75
31.3	P-77B/23P	42,16	1,00E-06	4,22E+07	2,68E-09	7,62	-8,57
32.6	P-78B/22P	3,74	1,00E-05	3,74E+05	3,02E-07	5,57	-6,52
33.9	P-79B/21P	15,20	1,00E-04	1,52E+05	7,44E-07	5,18	-6,13
35.3	P-80B/20P	1,67	1,00E-04	1,67E+04	6,77E-06	4,22	-5,17
36.8	P-81B/19P	1,02	1,00E-04	1,02E+04	1,11E-05	4,01	-4,96
38.3	P-82B/18P	35,14	1,00E-02	3,51E+03	3,22E-05	3,55	-4,49
40.0	P-83B/17P	42,06	1,00E-01	4,21E+02	2,69E-04	2,62	-3,57
43.6	P-85B/15P	23,11	1,00E-01	2,31E+02	4,89E-04	2,36	-3,31
47.7	P-87B/13P	21,98	1,00E-01	2,20E+02	5,15E-04	2,34	-3,29

EK-14 Değişik tane boyutlarında (d) homojen dağılımlı olarak üretilmiş elektrotların %43,6 sabit hacimsel dolgu konsantrasyonunda ölçülen İİH ve EAH değerleri

TANE BOYUTU d [μm]	V_f	ELEKTROT ADI	NUMUNE ADI	İŞLEME SÜRESİ [dk]	İŞLEME ÖNCESİ İŞ-PARÇASI KUTLESİ	İŞLEME SONRASI İŞ-PARÇASI KUTLESİ	İŞLEME ÖNCESİ ELEKTROT KUTLESİ	İŞLEME SONRASI ELEKTROT KUTLESİ	İİH	EAH	BA
≤ 25	43,6	N-85B/15P	İŞLEME YAPMADI				66,62		İŞLEME YAPMADI		
25-32	43,6	N-85B/15P					69,6				
32-45	43,6	N-85B/15P	N054	480	255,11	254,9	75,75	51,31	0,00055	14,27	27565,4
45-53	43,6	N-85B/15P	N053	480	256	254,95	65	43,34	0,00277	13,75	4966,3
53-63	43,6	N-85B/15P	N051	480	256,01	254,78	60,12	45,14	0,00324	9,18	2831,2
63-75	43,6	N-85B/15P	N055	480	255,98	254,21	66,84	50,36	0,00467	8,13	2172,3
75-90	43,6	N-85B/15P	N056	480	254,87	252,88	73,78	63,32	0,00525	6,60	1258,3
90-106	43,6	N-85B/15P	N052	480	255,49	252,81	61,58	52,83	0,00707	5,45	770,9
106-120	43,6	N-85B/15P	N050	480	255,28	251,72	57,4	50,53	0,00939	4,38	466,7
120-150	43,6	N-85B/15P	N057	480	255,78	251,73	60,13	55,33	0,01068	3,07	287,1

EK-15 Homojen dağılımlı tane boyutlarına göre üretilmiş elektrotların %43,6 (Kütlece %85B/15P) sabit hacimsel dolgu malzemesi konsantrasyonunda ölçülen direnç ve iletkenlik değerleri

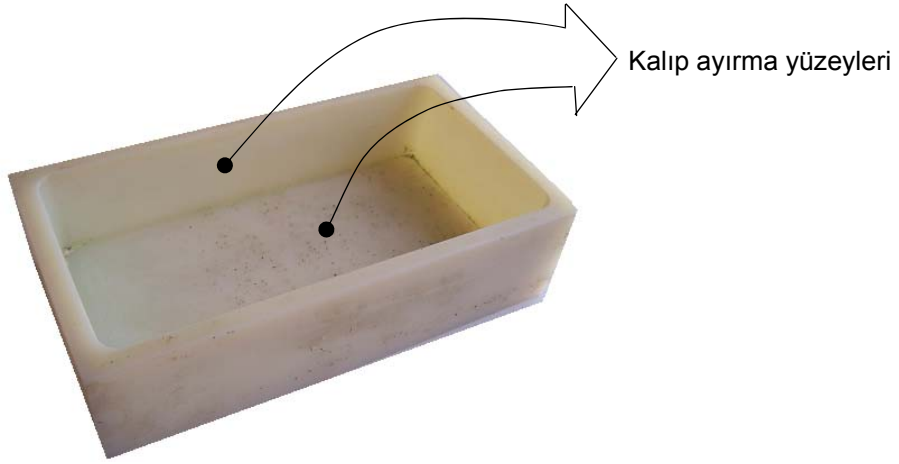
d [μm]	V_f	EL. ADI	GERİLİM [V]	AKIM [A]	DİRENÇ R [ohm]	İLETKENLİK σ [1/ohm.cm]	Log (R)	Log (σ)
<=25	43,6	N-85B/15P	Ö L Ç Ü L E M E D İ					
25-32	43,6	N-85B/15P						
32-45	43,6	N-85B/15P	1,620E+01	1,000E-10	1,620E+11	5,457E-11	11,210	-10,263
45-53	43,6	N-85B/15P	1,250E+00	1,000E-10	1,250E+10	7,072E-10	10,097	-9,150
53-63	43,6	N-85B/15P	3,500E-01	1,000E-10	3,500E+09	2,526E-09	9,544	-8,598
63-75	43,6	N-85B/15P	4,400E-02	1,000E-10	4,400E+08	2,009E-08	8,643	-7,697
75-90	43,6	N-85B/15P	8,000E-02	1,000E-09	8,000E+07	1,105E-07	7,903	-6,957
90-106	43,6	N-85B/15P	9,000E-02	1,000E-09	9,000E+07	9,822E-08	7,954	-7,008
106-120	43,6	N-85B/15P	7,320E-03	1,000E-10	7,320E+07	1,208E-07	7,865	-6,918
120-150	43,6	N-85B/15P	8,000E-03	1,000E-09	8,000E+06	1,105E-06	6,903	-5,957

EK-16 Elektrotlara ait elektriksel iletkenlik parametreleri ve iletkenlik- dolgu malzemesi hacimsel konsantrasyon denklemleri

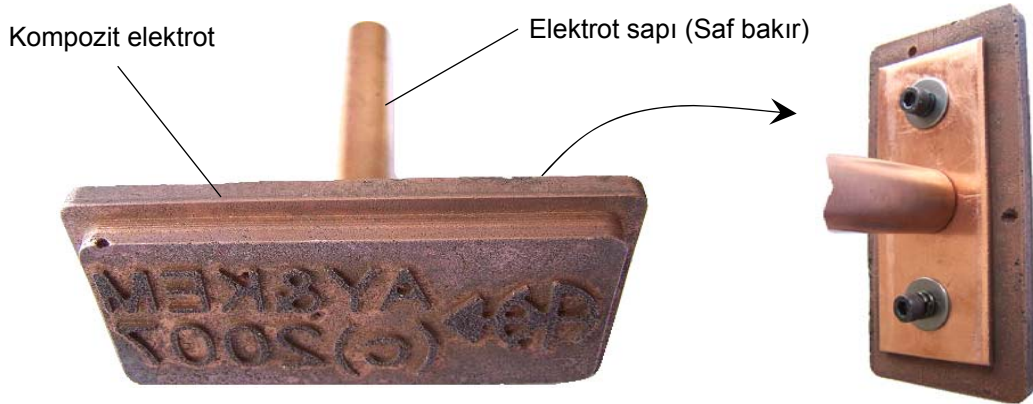
Elektrot	Perkolasyon konsantrasyonu v_f	Perkolasyon iletkenliği σ_f	Şekil sabiti a	Doyma sınırı F	Genel eşitlik $\sigma(v_f)$
N-B/P	0,24	0,38	2,1	0,48	$\sigma = 0,38(v_f - 0,24)^{2,1}$
S-B/P	0,19	0,43	3,2	0,61	$\sigma = 0,43(v_f - 0,19)^{3,2}$
P-B/P	0,21	0,40	2,8	0,48	$\sigma = 0,4(v_f - 0,21)^{2,8}$

EK-17 Örnek çalışma

Bu örnek çalışmada, polyamid malzemeden üretilmiş, elimizde daha önceden var olan bir modelden yararlanılarak reçine kalıbı yapılmıştır. Polyester reçine malzeme içine katılan katalizör ve dondurucu karıştırılarak Resim 17.1’de gösterilen, yüzeylerine kalıp ayırıcı sürülmüş hazneye dökülmüştür. Daha sonra, kalıp ayırma yüzeylerine kalıp ayırıcı sürülmüş olan model, içinde reçine bulunan haznenin üzerine ters çevrilerek kapatılmış ve beklemeye bırakılmıştır.

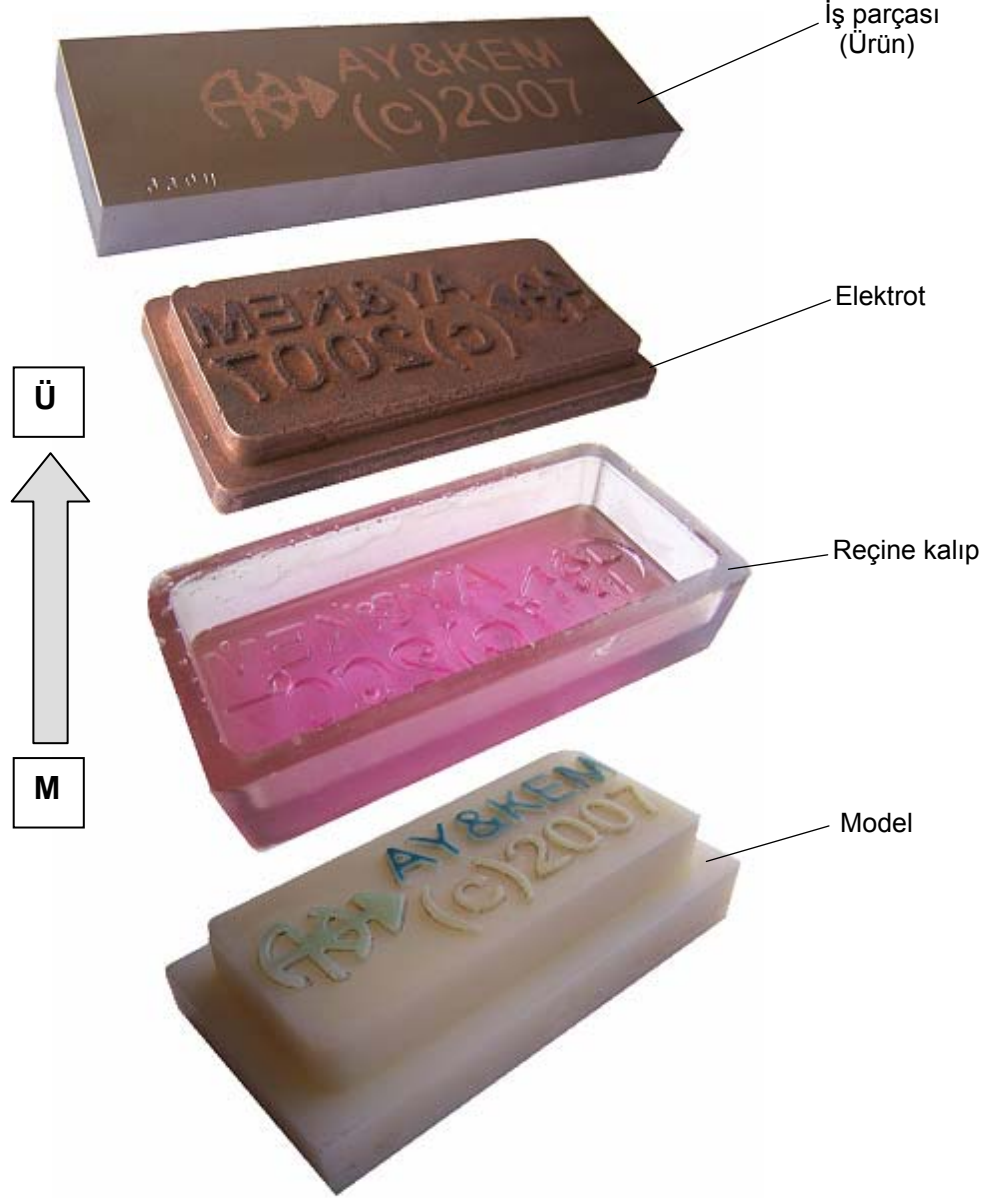


Resim 17.1. Döküm haznesi ve kalıp ayırma yüzeyleri [40]



Resim 17.2. Elektrot sapı ve bağlantı detayı [40]

EK-17 (Devam) Örnek çalışma



Resim 17.3. Modelden ürüne üretim aşamalarında çıkan ara ürünler [40]

Döküm katılaştıktan sonra hazneden çıkarılmıştır. Elde edilen reçine kalıba %43.6 (kütlesel %85 bakır-%15 polyester) bakır tozu hacimsel konsantrasyonunda kompozit karışım, kalıp ayırma yüzeylerine kalıp ayırıcı sürüldükten sonra dökülmüştür (Resim 17.3). Yaklaşık 30 dakika sonra

EK-17 (Devam) Örnek çalışma

kompozit karışım reçine kalıptan çıkarılarak kür için 120°C'de 4 saat fırında pişirilmiştir. Kür işleminden sonra elektrotta sap bağlanabilmesi için elektrotun arka kısmına delikler delinerek kılavuz çekilmiştir (Resim 17.2). Elektrot 80x40x5 mm boyutlarında (saf bakır) bir plaka ile bağlanarak işlemeye hazır hale getirilmiştir.



Resim 17.4. İşleme sonrası elde edilen ürün ve boyutları [40]

İşlemeye hazır haldeki kompozit elektrot ile Ç1040 malzemeden üretilmiş her iki yüzü taşlanmış iş parçası 120 dakika boyunca işlenmiştir. Resim 17.4'de işleme sonucu elde edilen iş parçası ve boyutları mm olarak gösterilmiştir.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YAMAN, Kemal
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 04.02.1973 Ankara
 Medeni hali : Evli, iki çocuk babası
 Telefon : 0 (312) 590 91 80
 Faks : 0 (312) 590 91 48
 e-mail : kyaman@sage.tubitak.gov.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniv. Fen. Bil. Ens./ Makina Müh.	2001
Lisans	Gazi Üniv./ Makina Müh. Bölümü	1997
Lise	Mustafa Kemal Lisesi	1992

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1997-2002	Gazi Üniv. Makina Müh. Bölümü	Araştırma Görevlisi.
2002-Halen	TÜBİTAK-SAGE	Uzman Araştırmacı.

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Bilgisayar, CAD/CAM teknolojileri, Resim, Sinema

Katıldığı Eğitimler

- UniGraphics NX CAD/CAM/CAE
- Geometrik Boyutlandırma ve Toleranslandırma
- Hacim Kalıpçılığı.