



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**ELEKTRİKSEL YALITIM SİSTEMLERİNDE
KULLANILAN POLİMERİK İZOLATÖRLERE BOR
KATKISI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Yük. Müh. Aysel ERSOY

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

Prof. Dr. Ayten KUNTMAN

Ekim, 2007

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**ELEKTRİKSEL YALITIM SİSTEMLERİNDE
KULLANILAN POLİMERİK İZOLATÖRLERE BOR
KATKISI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Yük. Müh. Aysel ERSOY

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

Prof. Dr. Ayten KUNTMAN

Ekim, 2007

İSTANBUL

Bu çalışma 18/10/2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı Elektrik-Elektronik programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi



Prof. Dr. Ayten KUNTMAN (Danışman)
İstanbul Üniversitesi



Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. Sıddık YARMAN
İstanbul Üniversitesi



Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ
İstanbul Teknik Üniversitesi



Doç. Dr. Mukden UĞUR
İstanbul Üniversitesi

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin
T-35 15122006 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yüksek gerilim konularına olan ilgimi ve sevgimi arttıran, tezin gerçekleştirilmesi aşamalarındaki yardım ve yönlendirmeleri ve ortaya çıkan sorunlar karşısındaki sabırlı ve anlayışlı tutumlarından dolayı Sayın Hocam **Prof.Dr. Ayten KUNTMAN'a**; bu çalışmanın ortaya çıkmasında gerekli birikime sahip olmamda büyük katkıları olan Sayın Doç. Dr. Mukden UĞUR ve Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye teşekkür ederim.

Ayrıca doktora öğrenimime ve çalışmalarına destek sağlayan İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne ve TÜBİTAK'a teşekkürü borç bilirim.

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hep yanımda bulduğum sahip olmaktan büyük mutluluk ve onur duyduğum Sevgili Babam **Adnan ERSOY'a** ve Sevgili Annem **Neriman ERSOY'a** sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

EKİM 2007

Aysel ERSOY

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER	II
ŞEKİL LİSTESİ.....	IV
TABLO LİSTESİ	XI
SEMBOL LİSTESİ	XIII
ÖZET.....	XIV
SUMMARY	XV
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	10
2.1. ELEKTRİKSEL YALITIM SİSTEMLERİ.....	10
2.2. POLİMERİK YALITKANLAR.....	12
2.2.1. Polyester.....	14
2.3. KATI YALITKANLARDA BOZULMA.....	15
2.3.1. Yaşlanma.....	16
2.3.2. Kısmi Boşalma	16
2.3.3. Kanal Oluşumu	16
2.3.4. Termik Delinme	17
2.3.5. Elektromekanik Delinme	17
2.3.6. Erozyon	18
2.3.7. Yüzey Aşınımı	18
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	19
3.1. EĞİK DÜZLEM YÜZEY AŞINIM TESTİ.....	21
3.1.1. Deney Düzenekinin Hazırlanışı	21
3.1.2. Test Örneğinin Hazırlanışı	24
3.1.3. Bor Minerallerinin Özellikleri	25

3.1.4. Elektrolit Çözeltinin Hazırlanması.....	28
3.1.5. Titreşim Etkisinin Oluşturulması	29
3.2. FOURİER ANALİZİ	30
3.3. DİFERANSİYEL TARAMALI KALORİMETRE (DSC) ANALİZİ	34
3.4. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) ANALİZİ	36
3.5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	37
3.5.1. Elektromanyetizma ve Maxwell Denklemleri	38
3.5.2. FEMLAB Yarı Statik Alan Uygulama Modu	39
3.5.3. Kısmi Diferansiyel Denklemlerin Formülleştirilmesi.....	41
3.6. GÜVENİLİRLİK.....	42
3.6.1. Weibull Dağılımı.....	44
4. BULGULAR	47
4.1. EĞİK DÜZLEM YÜZEYDE İZ OLUŞUMU DENEYLERİ	49
4.1.1. Farklı Bor Mineralleri İle Yapılan İz Oluşumu Deneyleri.....	49
4.1.2. Titreşim Etkisi ile Yorulma Sonrası Farklı Bor Mineralleri İle Yapılan İz Oluşumu Deneyleri	52
4.2. TİNKAL MİNERALİ İLE YAPILAN İZ OLUŞUMU DENEYLERİ	56
4.3. FOURİER ANALİZİ	68
4.4. DİFERANSİYEL TARAMALI KALORİMETRE ANALİZİ SONUÇLARI	93
4.5. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) ANALİZLERİ.....	97
4.6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ELEKTRİK ALAN DAĞILIMI ANALİZİ	122
4.7. GÜVENİLİRLİK ANALİZİ.....	131
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	139
KAYNAKLAR	150
EKLER.....	159
ÖZGEÇMİŞ.....	169

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: Polyester izolatör.....	15
Şekil 3.1	: Eğik düzlem yüzeyde iz oluşumu test düzeneği şematik gösterimi.	22
Şekil 3.2	: Yüksek gerilim elektrodunun yandan (a) ve önden (b) görünüşü...	23
Şekil 3.3	: Toprak elektrodunun yandan (a) ve önden (b) görünüşü.....	24
Şekil 3.4	: Deneylerde kullanılan test örneğinin boyutları (a) ve kendisi (b)...	25
Şekil 3.5	: Tinkal mineralinin termogravimetrik analizi sonucu.....	27
Şekil 3.6	: Uleksit mineralinin termogravimetrik analizi sonucu.....	27
Şekil 3.7	: Kolemanit mineralinin termogravimetrik analizi sonucu.....	28
Şekil 3.8	: Polyester yalıtkanlarda iz oluşumuna titreşimin etkisinin incelendiği test düzeneği.....	29
Şekil 3.9	: DSC analizi test düzeneği.....	34
Şekil 3.10	: Bozulma oranı fonksiyonları.....	45
Şekil 4.1	: Ağırlıkça % 0.1 oranında farklı bor mineralleri ile hazırlanan örneklerden birinin yüzeyde iz oluşumu deneyi sonrası görüntüleri a) Tinkal, b) Uleksit, c) Kolemanit, d) Sassolit katkılı polyester örnek.....	50
Şekil 4.2	: Ağırlıkça % 0.3 oranında farklı bor mineralleri ile hazırlanan örneklerden birinin yüzeyde iz oluşumu deneyi sonrası görüntüleri a) Tinkal, b) Uleksit, c) Kolemanit, d) Sassolit katkılı polyester örnek.....	50
Şekil 4.3	: Ağırlıkça % 0.5 oranında farklı bor mineralleri ile hazırlanan örneklerden birinin yüzeyde iz oluşumu deneyi sonrası görüntüleri a) Tinkal, b) Uleksit, c) Kolemanit, d) Sassolit katkılı polyester örnek.....	51
Şekil 4.4	: Ağırlıkça % 0.1 oranında farklı bor mineralleri ile hazırlanan mekanik titreşim etkisi ile yorulmuş örneklerden birine ait iz oluşumları. a) Tinkal, b) Uleksit, c) Kolemanit, d) Sassolit katkılı polyester örnek.....	53
Şekil 4.5	: Ağırlıkça % 0.3 oranında farklı bor mineralleri ile hazırlanan mekanik titreşim etkisi ile yorulmuş örneklerden birine ait iz oluşumları. a) Tinkal, b) Uleksit, c) Kolemanit, d) Sassolit katkılı polyester örnek.....	53

Şekil 4.6	: Ağırlıkça % 0.5 oranında farklı bor mineralleri ile hazırlanan mekanik titreşim etkisi ile yorulmuş örneklerden birine ait iz oluşumları. a) Tinkal, b) Uleksit, c) Kolemanit, d) Sassolit katkılı polyester örnek.....	54
Şekil 4.7	: Polyestere ağırlıkça % tinkal katkısının ömür süresine olan etkisine ait deneysel sonuçlar ve ortalamaları.....	56
Şekil 4.8	: Katkisız polyester örneğe ait a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.....	57
Şekil 4.9	: Ağırlıkça % 0.1 tinkal katkılı polyester örneğe ait a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.....	58
Şekil 4.10	: Ağırlıkça % 0.2 tinkal katkılı polyester örneğe ait a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.....	59
Şekil 4.11	: Ağırlıkça % 0.3 tinkal katkılı polyester örneğe ait a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.....	60
Şekil 4.12	: Ağırlıkça % 0.4 tinkal katkılı polyester örneğe ait a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.....	61
Şekil 4.13	: Ağırlıkça % 0.6 tinkal katkılı polyester örneğe ait a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.....	62
Şekil 4.14	: Ağırlıkça % 0.7 tinkal katkılı polyester örneğe ait a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.....	63
Şekil 4.15	: Ağırlıkça % 0.8 tinkal katkılı polyester örneğe ait a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.....	64
Şekil 4.16	: Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı polyester örneğe ait a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.....	65
Şekil 4.17	: Ağırlıkça % 1.2 tinkal katkılı polyester örneğe ait a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.....	66

Şekil 4.18	: Ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı polyester örneğe ait a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.....	67
Şekil 4.19	: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.....	69
Şekil 4.20	: Katksız polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA'i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.....	70
Şekil 4.21	: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.....	71
Şekil 4.22	: Ağırlıkça % 0.1 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA'i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.....	72
Şekil 4.23	: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.....	73
Şekil 4.24	: Ağırlıkça % 0.2 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA'i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.....	74
Şekil 4.25	: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.....	75
Şekil 4.26	: Ağırlıkça % 0.3 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA'i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.....	76
Şekil 4.27	: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.....	77
Şekil 4.28	: Ağırlıkça % 0.4 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA'i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.....	78
Şekil 4.29	: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.....	79
Şekil 4.30	: Ağırlıkça % 0.6 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA'i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.....	80

Şekil 4.31	: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.....	81
Şekil 4.32	: Ağırlıkça % 0.7 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA’i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.....	82
Şekil 4.33	: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.....	83
Şekil 4.34	: Ağırlıkça % 0.8 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA’i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.....	84
Şekil 4.35	: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.....	85
Şekil 4.36	: Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA’i geçmeden önceki son 100 ms ve buna ait FFT işareti.....	86
Şekil 4.37	: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.....	87
Şekil 4.38	: Ağırlıkça % 1.2 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA’i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.....	88
Şekil 4.39	: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.....	89
Şekil 4.40	: Ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA’i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.....	90
Şekil 4.41	: Akımın tek harmonic bileşenleri için ağırlıkça % katkı oranı ile harmonik distorsiyonlar arasındaki değişim.....	92
Şekil 4.42	: Katkisız polyester örneğin DSC analizi sonucu.....	93
Şekil 4.43	: Ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı polyester örneğin DSC analizi sonucu.....	94
Şekil 4.44	: Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı polyester örneğin DSC analizi sonucu.....	94
Şekil 4.45	: Ağırlıkça %1.5 tinkal katkılı polyester örneğin DSC analizi sonucu.....	95
Şekil 4.46	: Deneyler gerçekleştirilmeden önceki katkisız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 150 kat).....	97
Şekil 4.47	: Deneyler gerçekleştirilmeden önceki katkisız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat).....	98

Şekil 4.48	: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 25 kat).....	99
Şekil 4.49	: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 350 kat).....	100
Şekil 4.50	: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat).....	100
Şekil 4.51	: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat).....	101
Şekil 4.52	: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1500 kat).....	101
Şekil 4.53	: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 250 kat).....	102
Şekil 4.54	: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1500 kat).....	102
Şekil 4.55	: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 200 kat).....	103
Şekil 4.56	: Deneyler gerçekleştirilmeden önce ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı polyester örneğin yüzeyi (Büyütme 150 kat).....	104
Şekil 4.57	: Deneyler gerçekleştirilmeden önce ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı polyester örneğin yüzeyi (Büyütme 150 kat).....	104
Şekil 4.58	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 25 kat).....	105
Şekil 4.59	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 35 kat).....	106
Şekil 4.60	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 100 kat).....	106
Şekil 4.61	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat).....	107
Şekil 4.62	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 500 kat).....	108
Şekil 4.63	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 500 kat).....	108
Şekil 4.64	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat).....	109
Şekil 4.65	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 550 kat).....	109
Şekil 4.66	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 500 kat).....	110
Şekil 4.67	: Deneyler gerçekleştirilmeden önce ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı polyester örneğin yüzeyi (Büyütme 150 kat).....	111
Şekil 4.68	: Deneyler gerçekleştirilmeden önce ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı polyester örneğin yüzeyi (Büyütme 150 kat).....	111
Şekil 4.69	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 25 kat).....	112
Şekil 4.70	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 300 kat).....	113
Şekil 4.71	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat).....	113

Şekil 4.72	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat).....	114
Şekil 4.73	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat).....	115
Şekil 4.74	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat).....	115
Şekil 4.75	: Deneyler gerçekleştirilmeden önce ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı polyester örneğin yüzeyi (Büyütme 150 kat).....	116
Şekil 4.76	: Deneyler gerçekleştirilmeden önce ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı polyester örneğin yüzeyi (Büyütme 1000 kat).....	117
Şekil 4.77	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 25 kat).....	118
Şekil 4.78	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 35 kat).....	118
Şekil 4.79	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 35 kat).....	119
Şekil 4.80	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 300 kat).....	120
Şekil 4.81	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat).....	120
Şekil 4.82	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat).....	121
Şekil 4.83	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat).....	121
Şekil 4.84	: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat).....	122
Şekil 4.85	: Katkısız polyester örneğe ait iz oluşumu sonrası çizilen modeli....	123
Şekil 4.86	: Katkısız polyester örneğe ait iz oluşumu sonrası çizilen modelin (a) ağ yapısı (b) elektrik alan dağılımı.....	124
Şekil 4.87	: Katkısız örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.....	125
Şekil 4.88	: Ağırlıkça % 0.1 tinkal katkılı örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.....	126
Şekil 4.89	: Ağırlıkça % 0.2 tinkal katkılı örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.....	127
Şekil 4.90	: Ağırlıkça % 0.3 tinkal katkılı örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.....	127
Şekil 4.91	: Ağırlıkça % 0.4 tinkal katkılı örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.....	128
Şekil 4.92	: Ağırlıkça % 0.6 tinkal katkılı örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.....	128
Şekil 4.93	: Ağırlıkça % 0.7 tinkal katkılı örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.....	129
Şekil 4.94	: Ağırlıkça % 0.8 tinkal katkılı örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.....	129
Şekil 4.95	: Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.....	130
Şekil 4.96	: Ağırlıkça % 1.2 tinkal katkılı örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.....	130

Şekil 4.97	: Ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.....	132
Şekil 4.98	: Katkısız polyester örnekler ile yapılan deneyler sonrası elde edilen ömür sürelerinin Weibull dağılımına uygunluğu.....	132
Şekil 4.99	: Katkısız polyester örnekler için birikimli dağılım fonksiyonu.....	133
Şekil 4.100	: Katkısız polyester örnekler için güvenilirlik eğrisi.....	133
Şekil 4.101	: Katkısız polyester örnekler için olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	134
Şekil 4.102	: Katkısız polyester örnekler için bozulma oranı –zaman eğrisi.....	134
Şekil 4.103	: Ağırlıkça % tinkal katkısının iz oluşumu başlangıç süresine etkisi.	136
Şekil 4.104	: Ölçek parametresinin ağırlıkça % tinkal katkısı ile değişimi.....	137
Şekil 4.105	: Şekil parametresinin ağırlıkça % tinkal katkısı ile değişimi.....	138

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1	: Bu çalışmada kullanılan bor mineralleri ve özellikleri.....	26
Tablo 3.2	: Programa girilen büyüklüklere ait tablo.....	41
Tablo 4.1	: Farklı bor mineralleri ile hazırlanan ağırlıkça farklı konsantrasyonlara sahip polyester örneklerin ortalama ömür süreleri.....	52
Tablo 4.2	: Farklı bor mineralleri ile hazırlanan ağırlıkça farklı konsantrasyonlara sahip mekanik titreşim etkisi ile yorulmuş örneklerin ortalama ömür süreleri.....	55
Tablo 4.3	: Katkısız polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.....	70
Tablo 4.4	: Ağırlıkça % 0.1 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.....	72
Tablo 4.5	: Ağırlıkça % 0.2 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.....	74
Tablo 4.6	: Ağırlıkça % 0.3 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.....	76
Tablo 4.7	: Ağırlıkça % 0.4 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.....	78
Tablo 4.8	: Ağırlıkça % 0.6 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.....	80
Tablo 4.9	: Ağırlıkça % 0.7 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.....	81
Tablo 4.10	: Ağırlıkça % 0.8 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.....	84
Tablo 4.11	: Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.....	86
Tablo 4.12	: Ağırlıkça % 1.2 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.....	88
Tablo 4.13	: Ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.....	90
Tablo 4.14	: 3., 5., 7. ve 9. Tek harmonik bileşenlere ait HD değerlerinin ortalamalarının katkı oranı ile değişimi	91
Tablo 4.15	: Katkısız ve tinkal katkılı polyester örnekler için camsı geçiş sıcaklığı ve bozulma sıcaklığının değişimi.....	96
Tablo 4.16	: Femlab 3.2 ile modellenen farklı oranda tinkal katkılı temsilci örneğin yüzeyi üzerinden elde edilen maksimum alan şiddeti değerinin katkı oranına göre değişimi.....	131
Tablo 4.17	: Ağırlıkça % tinkal katkısının ortalama ömür süresine etkisi.....	135

Tablo 4.18	: Ölçek parametresinin ağırlıkça % tinkal katkısı ile değişimine ait alt ve üst limit değerleri.....	136
Tablo 4.19	: Şekil parametresinin ağırlıkça % tinkal katkısı ile değişimine ait alt ve üst limit değerleri.....	138

SEMBOL LİSTESİ

i_n	: n. dereceden harmonik akımın anlık değeri
I_n	: n. dereceden harmonik için akımın etkin değeri
ω_1	: Temel frekansa ait açısal frekans
δ_n	: n. harmonik için akıma ait faz açısı
HD	: Harmonik Distorsiyon
THD	: Toplam Harmonik Distorsiyon
E	: Elektrik alan şiddeti (V/m)
H	: Manyetik alan şiddeti (A/m)
D	: Elektriksel akı yoğunluğu (C/m ²)
B	: Manyetik akı yoğunluğu (Wb/m ²)
J	: Akım yoğunluğu (A/m ²)
P	: Polarizasyon vektörü (C/m ²)
M	: Mıknatıslanma vektörü (A/m)
t	: Zaman (s)
σ	: Elektriksel iletkenlik (S/m veya 1/ Ω m)
ϵ	: Dielektrik katsayısı (F/m)
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti (F/m)
μ	: Manyetik geçirgenlik (H/m)
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği (H/m)
c_0	: Işık hızı (m/s)
$f(t)$	: Olasılık yoğunluk fonksiyonu (Probability Density Function, PDF)
F(t)	: Birikimli dağılım fonksiyonu (Cumulative Density Function, CDF)
R(t)	: Güvenilirlik fonksiyonu
α	: Ölçü parametresi (karakteristik ömür)
β	: Şekil parametresi

ÖZET

ELEKTRİKSEL YALITIM SİSTEMLERİNDE KULLANILAN POLİMERİK İZOLATÖRLERE BOR KATKISI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Günümüzde polimer yalıtım sistemleri çeşitli avantajları nedeniyle iletim ve dağıtım hatlarında giderek artan miktarda kullanılmaktadır. Kendi başlarına kullanım alanları çok kısıtlı olan bu izolatörlere çeşitli katkılamalar yapılarak kullanım alanlarını genişletmek mümkündür. Bu çalışmada Türkiye ve Amerika Birleşik Devletlerinde yüksek miktarda rezervi bulunan bor mineralleri polyester yalıtkanlara katkılanmış ve elektriksel özelliklere olan etkisi incelenmiştir. Bor minerali olarak tinkal, uleksit, kolemanit ve sassolitten yararlanılmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde farklı tür ve konsantrasyonda bor minerali ile hazırlanan polyester örnekler ASTM D2303 yüzeyde iz oluşumu test metoduna uygun olarak denenmiştir. İki farklı durumda test edilen örneklerde ilk grupta örnekler normal koşullarda, ikinci grupta önceden yapay olarak yatay titreşim etkisinde yorulduktan sonra test edilmiştir. Deneysel çalışmaların sonucunda katkısız örneklerin ömür sürelerinin yatay titreşim etkisinde yorulduktan sonra % 40 azaldığı gözlenmiştir. Titreşim etkisi altında yorulan kompozit örneklerin ömür süresinin bor konsantrasyonundan bağımsız olarak % 70 ile % 80 arasında azaldığı yapılan çalışmada gözlenmiştir.

Tinkal katkısının polyester örneklerin iz oluşumu davranışına olan etkisi kaçak akımın temel ve harmonik bileşenleri kullanılarak incelenmiş ve bozulmanın değişimini incelemeye kullanılabilir olduğu belirtilmiştir. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi ile polyester örnekler tinkal katkılaması sonrası camsı geçiş ve bozulma sıcaklığındaki değişim çıkarılmıştır. Tinkal katkısı polyesterin camsı geçiş sıcaklığını arttırmış, bozulma sıcaklığını ise ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılaması dışında azaltmıştır. Katkısız ve tinkal katkılı örneklerin yüzeylerindeki değişimler taramalı elektron mikroskobu (SEM) altında incelenmiştir. Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sonrasında tinkal katkısı ile örnek yüzeylerinde bozulma sonrası oluşan camsı yapı gözlenmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile örnek yüzeylerindeki iz oluşumlarının simülasyonu yapılmış ve teorik olarak elektrik alan değerleri çıkarılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlardan tinkal konsantrasyonunun polyester örneğin güvenilirliğine etkisini veren bir fonksiyon Weibull istatistik modeli kullanılarak elde edilmiştir.

SUMMARY

INVESTIGATING BORON CONTRIBUTION AND ELECTRICAL PROPERTIES OF POLYMERIC INSULATORS USED IN ELECTRICAL INSULATION SYSTEMS

Recently polymeric insulators used in both distribution and transmission systems gained popularity due to their excellent insulating properties. Although in practice they have limited application area without any additives, the addition of several types of minerals has been found to improve insulating properties in the resulting composite. In this study, several types of boron minerals (tincal, ulexite, colemanite, sassolite) which are widely found in Turkey and USA, were used as an additive to polyester resin and their effect on the resulting composite has been investigated in detail.

In the first part of the study polyester samples prepared with different type and concentration of boron minerals have been tested according to ASTM D2303 surface tracking test method. Initially samples are tested under two different conditions, such as with and without any vibration effect. The test results revealed clearly that the useful lifetime of polymeric insulators without any additives has reduced up to 40% when they are subjected to lateral vibration for a certain time. However the same level of vibration effect has significantly accelerated the ageing process and hence reduced the lifetime of composite insulators (up to 70%-80%) regardless of the boron concentration.

The insulating properties of composite samples prepared with polyester resin as the main substance and tincal as additive, have been investigated by measuring the fundamental and harmonic frequencies of the leakage current flowing over the surface of the test sample. By using Differential Scanning Calorimeter (DSC) the change in glass transition and degradation temperature of polyester samples containing tincal as additive has been analysed. Although tincal has slightly increased the glass transition temperature of polyester samples, it has a negative effect on the degradation temperature except for samples containing up to 0.5% tincal as an additive. The morphologies of the samples with and without tincal minerals were observed by using a scanning electron microscope (SEM). This analyse revealed clearly that tracking images of polyester samples containing tincal as additive have glass type surfaces.

With using finite element method (FEM) the surface tracking patterns have been simulated and also electrical field values have been calculated. Also by using Weibull statistics, a special reliability function has been derived, which indicates the remaining lifetime of the polymeric samples according to the tincal concentration.

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler insanoğlunun hayatını her geçen gün daha da kolaylaştırıp refah seviyesini yükseltirken elektrikli cihazların kullanımının yaygınlaşması elektrik enerjisine olan ihtiyacı arttırmaktadır. Bunun sonucu olarak da iletim ve dağıtım hatlarında gün geçtikçe iletimin güç seviyesi yükselmektedir. Elektriksel yalıtım sistemleri bu yüksek güç seviyelerinin iletim ve dağıtımının ana ögesidir. Güvenli ve standart bir emniyeti sağlayan bir yalıtım sisteminin tasarlanabilmesi için kullanılacak yalıtkanın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir.

Elektriksel yalıtım sistemleri geçtiğimiz yüzyıl içerisinde büyük değişimler geçirmiştir. 19. yüzyılda organik kağıt yalıtkanlar ve petrol bazlı sıvı yağlardan oluşan yalıtım sistemleri gününüzde camlar, porselenler, polimerler ve bunlarla oluşturulan kompozit yalıtkanlar ile binlerce çeşide ulaşmıştır. Bu gelişmelerin sonucu olarak da elektriksel yalıtım sisteminin kapasitesine göre oluşturulan güç sistemlerinin yerini 21. yüzyılda artık güç sistemlerinin gereksinimleri göz önüne alınarak gerçekleştirilen yalıtım sistemleri almıştır.

Elektriksel yalıtım sistemleri içerisinde polimerik yalıtkanlar yüksek delinme dayanımları, mekanik ve kimyasal dayanıklılıkları, hafiflikleri, iyi ısı iletim yetenekleri ve uzun süreli güvenilirlikleri ile dikkat çekmektedir. 1944 yılında polietilen (PE) ticari olarak kullanılan ilk polimerik yüksek gerilim yalıtkanı olmuştur [1]. Günümüzde polikarbonat, epoksi reçine, polyester, vb. diğer polimerik yalıtkanlar yüksek gerilim seviyelerinde yalıtım amaçlı kullanılmaktadır [1-8].

Polimerik yalıtkanların tek başlarına pratik olarak kullanımı alanı çok azdır. Elektrik-elektronik endüstrisinde kullanılan E sınıfı polimerlerin ağırlıkça % 50'den fazlası katkı ve dolgulardan oluşmaktadır. Bu katkılar polimerin, mekanik, elektriksel ve alev geciktirici özelliklerini geliştirerek, oluşturulan yalıtım sisteminin güvenilirliğini arttırmaktadır. Alev geciktiriciler bu katkı malzemeleri içerisinde yalıtkanın elektriksel

ve fiziksel dayanımını belirlemede önemli bir etkidir. Yalıtkanlarda kullanılan alev geciktiriciler, aromatik ana zincirlere sahip polimer katkıları, halojen katkıları, fosforlu bileşikler, silikonlu bileşikler ya da metal oksitler olabilmektedir [1-63].

Polimerlerin alev geciktirme özelliklerini geliştirmede ilk başvuru yöntemi, yanma sırasında az kabuk oluşturan polimere, kabuk oluşturan polimerin katkılanmasıdır. Genel olarak aromatik katkıların ısı dayanımları iyidir. Yanma sırasında bu polimerler sert bir kabuk oluşturmak eğilimindedirler. Oluşan bu kabuk, yalıtkindan ısı ve kütle transferinin önüne geçen bir bariyer gibi davranmaktadır. Böylece yanmanın ilerlemesi yavaşlamakta ve yayılmasının önüne geçilmektedir. Kabuk oluşturan aromatik zincire sahip polimerlerden bazıları; poli(2,6-dimetilfenilen oksid) (PPO), polimide (PP), polifenilen sulfid (PPS) ve polieter keton (PEKK)'dur. Zhu ve Weil etilen-propilen-dien-monomere (EPDM), alev geciktirici olarak PPO-melamin-kaolin karışımını katkılayarak polimerin bozulma sıcaklığını ötelemeyi başarmışlardır [9].

Yalıtım sistemlerine klor katkılanarak delinme dayanımının yükseltilmesi 1900'lü yılların başlarında klorlu yağlar ile başlamıştır [3]. Polimerik yalıtkanlarda ise klor, oluşturduğu C-Cl dipolar yapısı nedeni ile polimer zincirleri arasındaki çekimi güçlendirmekte ve polimerin dış etkenlere karşı dayanımını arttırmaktadır. Fakat oluşan yeni polimer "halojenli alev geciktirici polimer" haline gelmektedir [10]. Polivinilklorid, ısı ile karşı karşıya kaldığında oluşan HCl alevin ilerleme hızını sınırlamakta fakat sağlık için ciddi sorunlar yaratmaktadır. Cl ile birlikte yapıya katkılanan metal oksitler (Sb_2O_3) halojen içeren polimerin daha uzun süreli ve etkin alev geciktirmesini sağlamaktadır [10-11].

Günümüzde plastikler için en yaygın kullanılan alev geciktirici, brom katkılı organik bileşiklerdir. Bu bileşikler sağlık ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerine rağmen halen yoğun olarak kullanılmaktadır. Etkinlik mekanizması hidrobromik asitin yanma sırasında (genellikle 1000 °C'nin üzerinde) değişmesidir. HBr yangının yanma kimyasını gaz fazında değiştirir. Ayrıca düşük sıcaklıklarda örneğin plastiğin üretim aşamalarında da belirli oranlarda bromlu bileşiğin polimer yapıdan ayrıldığı bilinmektedir. C-Br bileşikler çok zayıf bağlara sahiptir. Bu nedenle yanma sırasında yapıdan ilk olarak bromlu bileşikler ayrılır [12].

Elektrik elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılan polyester yalıtkanların alev geciktirme özelliklerini iyileştirebilmek için pek çok çalışma yapılmaktadır. Polyestere üretim aşamasında sitren yerine bromositren katkılanarak alev geciktirme özelliklerinin, brom miktarına göre iyileştiği yapılan çalışmada gözlenmiştir [13]. Polyestere antimon oksit/brom polikarbonat katkılanarak hazırlanan yalıtkanın, etkin alev geciktirici polimer özelliği gösterdiği yapılan bir diğer çalışmada gözlenmiştir [14].

Yanma sonrası oluşan kanserojen bileşikler nedeni ile Avrupa Birliği elektrik-elektronik uygulamalarında bromlu difenil oksit alev geciktiricilerin kullanımının yasaklanması üzerinde çalışmalar sürdürmektedir [15]. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Birleşik Devletler Çevreyi Koruma Örgütü (US Enviromental Protection Agency) de dioksinler ve benzeri bileşikler için kullanım limitleri getirmek üzere çalışmalar yürütmektedir [16-18].

Fosfor ve bileşikler toksik ürün oluşturmadığı için “yeşil” yalıtkan katkı malzemesi olarak elektrik-elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [19]. Amonyum Poli Fosfat (APP) yaygın olarak kullanılan ve en çok bilinen halojensiz alev geciktiricidir. Isıl bozulma başladığında amonyum polifosfat, polimerle ısı kaynağı arasında su buharı ve hidrokarbon yapılarla reaksiyona giren fosfor oksitleri oluşturur. Fosfor oksitleri erime sıcaklığı çok yüksek olan kabuğu oluşturur. Oluşan kabuk cam özelliği gösterir ve ultrafosfat denilen çapraz bağlı yapıyı oluşturur [20].

Ayrıca fosfam ((PN_2H)_n) ve fosfor oksinitrid ((PON)_m) ile poliamidlerde yapılan çalışmalarda bu iki fosfor bileşiğinin alev geciktirmeyi sağlamanın yanı sıra yüksek radyasyon etkisi altında da polimerik yalıtkanın çapraz bağlarının bozulmasını geciktirdiği gözlenmiştir [21].

Fosfor ve fosfor tuzlarının avantajlarının yanı sıra dezavantajları da mevcuttur. Tüm genişleyen alev geciktiricilerde olduğu gibi fosfor tuzlarının kullanıldığı polimerlerde istenen alev geciktirici etkinlik için yapıya ayrıca bir asit kaynağı (zeolit, silikotungistik asit, vb.), bir kabuk oluşturucu ve uçurucu katkılaması zorunludur. Bunun yanı sıra bu üç bileşenin polaritelerine ve dağılımlarına da dikkat edilmelidir ki oluşturulan

polimerik yalıtkanın su tutma veya suya karşı dayanımı kontrol altında tutulabilsin [21]. Fosfor ve fosfor tuzlarının halojen katkılara oranla daha ucuz olması maliyet bakımından avantaj gibi görünse de etkin bir alev geciktirme davranışı için polimere ağırlıkça yüksek oranda katkılanmak zorunda olmaları bu avantajı dezavantaja çevirmektedir [22-23].

Polyester yalıtkanların ısı stabiliteilerinin ve alev geciktirme özelliklerinin iyileştirilmesi için son 20 yılda fosfor katkılanması yapılan çalışmalarda ön plana çıkmıştır [24-29]. Petreus ve arkadaşları, polyester zincirlerinde fosfor içeren fosforik diklorid ve diolik monomerler kullanılması ile başarılı sonuçlar almıştır [24-25, 29]. Polyestere katkılanan fosforun alev geciktirme davranışını olumlu etkilediği yapılan diğer çalışmalarda da gözlenmiştir [26-28].

Elektrik endüstrisinde yaygın olarak kullanılan üç plastikten biri polipropilendir. Bu yalıtkanın alev geciktirme davranışının iyileştirilmesi için 1972'den beri pek çok alev geciktirici kullanılmış, halojenli bileşikler etkin alev geciktirme özellikleri ile diğer alev geciktiricilerin önüne geçmiştir [30]. Fakat halojenli bileşikler yanma sırasında polipropilenden yoğun duman ve toksik gazlar çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle pek çok elektriksiz yalıtım noktasında polipropilenin kullanımı sınırlandırılmıştır [31]. Günümüzde pek çok araştırmacı yaygın olarak kullanılan bu yalıtım sistemi için uygun alev geciktirici tasarımı konusunda yoğun olarak çalışmaktadır. Lv ve arkadaşları polipropilene melamin fosfat katkılı olarak olumlu sonuçlar elde etmiştir. Yaptıkları çalışmada melamin fosfat oranı arttıkça polipropilende duman çıkışı azalmakta ve ısı dayanımı artmaktadır. Yanma sonrası oluşan kabuğun miktarı polimer içerisinde melamin fosfat arttırıldıkça daha da genişleyip büyüdüğü yapılan çalışmada gözlenmiştir [32].

Halojen içermeyen katkılardan olan silikonlu bileşikler sıklıkla kullanılan alev geciktiriciler arasındadır. Silikon kauçuk kullanılarak yapılan bir çalışmada, silikonun etkin alev geciktirme etkisi sağlayabilmesi için katkı oranının ağırlıkça % 30'lara kadar çıkarılması gerekmektedir. Termal iletkenliği düşük olan bu katkı malzemesi polimer zinciri ile yaptığı bağ sayesinde diğer halojen bileşikler kadar etkili olabilmektedir [33]. Silikon kauçuk ile yapılan bir diğer çalışmada yeterli alev geciktirme etkisini elde

edebilmek için mikron boyutta silika moleküllerinden ağırlıkça % 50'den fazla ve nano boyutta silika moleküllerinden ağırlıkça % 10 oranında kullanılması gerektiği gözlenmiştir [34]. Silikon içeren bileşikler polimerin erime fazında kabuk oluşturarak ve buhar fazında aktif radikalleri tuzaklayarak etkin bir alev geciktirme sağlarlar [35]. Yapılan çalışmalarda silikon bileşiklerin çevre dostu katkılar olduğu rapor edilmiştir [36].

Aluminyum TriHidroksit (ATH) günümüzde üzerinde sıkça çalışılan bir diğer alev geciktiricidir. Isıl bozulma sırasında yapısında yer alan OH grubu ayrılır. Endotermik reaksiyonla su gaz fazına geçer. Bu sırada termal olarak stabil olan alumina oluşur. Yüzeyde oluşan alumina tabakası, genişleyen alev geciktiricilerde olduğu gibi polimer ile alev arasında ısı ve kütle transferini bir kabuk oluşturarak engeller. Katkılandığı polimerik yalıtkanın mekanik özelliklerini oldukça zayıflatır [37]. Ayrıca alev almama özelliği zayıftır. Bu nedenle katkılandığı polimer üzerine genellikle silikon kauçuk kaplama yapılır [38-41].

Aluminyum hidroksit, halojen içermeyen alev geciktiriciler hazırlanırken sınırlı miktarlarda katkılanmaktadır. Epoksi reçine ile yapılan çalışmalarda şekil verme ve dielektrik özellikleri iyileştirdiği gözlenmiştir [42].

Magnezyum hidroksit diğer alev geciktiricilerle beraber kullanıldığında duman miktarını azaltır. Yanma sonrası toksik olmayan ürünleri ile dikkat çeken bir alev geciktirici olmasına karşın etkin alev geciktirmenin sağlanabilmesi için yüksek miktarlarda katkılanması yalıtkanın mekanik özelliklerini zayıflatmaktadır [43-45]. Magnezyum dihidrat ile yapılan çalışmalarda yanma sırasında oluşan ısı ile bozularak su buharı oluşturduğu böylece ortamdan ısıyı uzaklaştırdığı gözlenmiştir [45].

Alev geciktiricilerin kendi başlarına etkin çözüm sağlayamadıkları durumlarda bunların etkisini arttırmak ya da etkin olmasını sağlayabilmek için sinerjist adı verilen katkıların kullanılması polimerler için yaygın bir uygulamadır. Örneğin polipropilende etkin bir alev geciktirme sağlanabilmesi için halojenlerin kendi başlarına kullanıldığı durumda yapıya % 40 klorlu bileşik veya % 20 bromlu bileşik katkılanması gerekmektedir. Fakat yapıya antimon veya kalay bileşikleri gibi sinerjistler ilave edildiğinde halojen katkı

oranını % 5-10 seviyelerine düşürmek mümkündür [46]. Günümüzde yaygın olarak kullanılan sinerjistler, antimon, kalay, çinko, bakır, demir, nitrojen ve fosfor içeren bileşiklerdir [30].

Antimon trioksit (Sb_2O_3), halojenlerle birlikte, özellikle klorla yaygın olarak kullanılmaktadır. Halojenlerin kullanılmadığı durumlarda etkisizdir. PVC ile yapılan çalışmalarda antimon ile halojenin birleşerek antimon triklorid oluşturduğu aynı anda oluşan su buharı ile oksijenin de alevden uzaklaştırılmış olduğu gözlenmiştir. Antimon oksit kullanıldığında ise yanma sırasında açığa çıkan duman miktarının antimon triklorid kullanıldığı duruma göre oldukça arttığı yapılan çalışmada verilmiştir [47].

Kalay halojenlerle birlikte çok iyi bir sinerjistir. Hem sıvılaşma hem de buhar fazında etkindir [48, 49]. Antimonlu bileşiklerle benzer özelliklere sahip olmasının yanı sıra onlardan daha az zehirlidir. Ayrıca çinko ile beraber katkılандıklarında daha fazla duman çıkmasının önüne geçer. Kalay klorid ile beraber kullanıldığında oluşan kalay-tetra-klorid $114\text{ }^\circ\text{C}$ 'de buharlaşır. Ve buhar fazında etkinleşen bir alev geciktirici oluşturur. Fakat yapılan çalışmalarda $400\text{ }^\circ\text{C}$ civarında polyester içerisindeki tüm klorun kaybolduğu gözlenmiştir. Çinko kalay, halojenlerin yapıdan ayrılmasını önler. Halojenlerin olmadığı durumlarda polyester yapıdan $500\text{ }^\circ\text{C}$ 'den önce ayrılmazlar [50].

CuSO_4 ve FeCl_3 olarak poliamidlere katkılanan bu metal iyonlar polimer yapı içerisindeki silikat yapının su tutma özelliğini organik yalıtkanların su tutmasına benzer olarak değiştirmektedirler. Alev geciktiricilerin nano boyutta komposit yapmasına olanak sağlayarak yalıtkanın dayanımını arttırmaktadırlar. Etkileri günümüzde yoğun olarak araştırılmaktadır [51].

Poliamid, polikarbonat, polietilenteraftalat ve polifenilenoksid kullanılarak gerçekleştirilen bir deneysel çalışmada nitrojen ve fosforun beraber kullanıldığı bir sinerjist hazırlanmıştır. % 0.34 oranında nitrojen ve % 0.76 oranında fosfor içeren sinerjist bu 4 farklı polimere brom katkılандığı durumla karşılaştırılmış alev alma davranışını ciddi olarak iyileştirdiği gözlenmiştir [52].

Son 20 yılda alev geciktiricilerde hetero-elementlerin sayısı hızla artmaktadır. Fakat günümüzde ticari anlamdaki üstünlük, halen halojenli bileşikler içeren özellikle klorlu ve bromlu alev geciktiricilerdedir. Bunlar oldukça verimli katkılar olmasına karşın termal bozulma sonrası oluşan zehirli ve tehlikeli ürünleri en büyük dezavantajlarıdır. Son yıllarda halojen içermeyen alev geciktirici alanındaki gelişmeler ile alev geciktiren P, Si, B, N ve diğer elementler kullanılarak yapılan reaktif polimerler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır [8].

Borik asit ve boratlar 1800'lü yıllardan beri alev geciktirici olarak kullanılmaktadır. Fakat bu katkılar üzerinde fosfor, halojen ve diğer bileşikler kadar çok çalışma yapılmamıştır. Boratların alev geciktirmedeki etkinliği ile ilgili yapılan ilk çalışmalar 20. yüzyılın başlarına denk gelmektedir [1-8]. Günümüzde polimerlerde kullanılan başlıca bor bileşikleri, çinko borat, kalsiyum borat ve boratlardan oluşmaktadır.

Çinko borat halojenli yalıtkanlarda 1979'dan beri kullanılmaktadır [53]. PVC, elastomer, poliamid, epoksi reçine, polipropilen gibi, halojen katkılar ile alev geciktirmesi iyileştirilen polimerlere alev geciktirici olarak katılanmaktadır [54-55]. Çinko ve borun oluşturduğu bileşikler uçucu değildir ve yüksek sıcaklıklarda eriyerek cam benzeri bir kaplamanın oluşmasına neden olurlar. Yüzeyde kalan bor tabakası ise selülozdaki hidroksil gruplarla reaksiyona girer ve ek suyun oluşmasını sağlayarak alttaki tabakalara alevin geçmesini önlemektedir. Böylece alevin ilerlemesi de durdurulmaktadır [56, 57]. Ayrıca alüminyum polifosfat kullanılarak alev geciktirmenin etkinleştirilmesi amacı ile pentaeritrol ve ağırlıkça % 1.5 oranında çinko borat katkılamanın, polipropilenin alev geciktirme davranışını iyileştirdiği yapılan çalışmalarda gözlenmiştir [58].

Çinko borat alev geciktirici olarak kullanılmasının yanı sıra sinerjist olarak da kullanılmaktadır. Genişleyen alev geciktiriciler ile çinko boratın birlikte kullanıldığı deneysel bir çalışmada oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ağırlıkça % 4,2 oranında çinko borat katkısı ile düşük yoğunluklu polietilenin alev alma davranışı iyileştirilmiştir [59].

Üzerinde çalışılan bir diğer bor bileşiği olan kalsiyum borat, PVC'ye katılanmış ve çinko borat kadar etkin olmadığı yapılan deneylerle gözlenmiştir [60]. Polietilen poliamin ile çapraz bağlanmış epoksi reçineler ile yapılan çalışmalarda ağırlıkça % 0.4 kalsiyum boratın, belirgin olarak yanma sırasındaki kömürleşme dayanımını arttırdığı gözlenmiştir. Kalsiyum boratın kompozisyona ilavesiyle oluşan kalsiyum-fosfor-boratın oluşması yalıtkanın ısı kapasitesinde pratik bir sapma göstermemektedir. Fakat kalsiyum borat, mangan dioksit (ağırlıkça % 0.4) ile birlikte katkılандığında oluşan yeni kompozisyonun ısı kapasitesi 2-3 katına çıkmaktadır. Yanma sırasında oluşan kabuğun alanı 16 kat artmakta ve yanma sıcaklığı düşmekte, ayrıca tutuşma sıcaklığının da arttığı yapılan çalışmada belirtilmektedir [61]. Epoksi reçine ile yapılan çalışmalarda yüksek sıcaklıklarda kalsiyum boratın, bromlu bileşiklere oranla daha etkin bir alev geciktirici davranışı olduğu deneysel olarak gözlenmiştir [62].

Polisitren ve polivinilklorid gibi polimerlerin, zincirlerinde bor içeren reaktif gruplara yer verilerek yapılan pek çok çalışma literatürde yer almaktadır. Reçinelerle yapılan çalışmalarda borik asit katkısı % 2.4 ile % 3.8 arasında kullanılmıştır. Reçineye reaktif grup olarak eklenen borik asidin reçinenin alev geciktirmesini önemli miktarda arttırdığı gözlenmiştir [63].

Bu çalışmanın amacı elektrik endüstrisinde kablo ve transformatörlerde yaygın olarak kullanılan polyester yalıtkan içerisine ağırlıkça farklı oranda ve farklı türde bor mineralleri katkılanarak hazırlanan polyester yalıtkanların elektriksel özelliklerindeki değişimin çıkarılmasıdır.

Bu çalışma çerçevesinde tinkal, uleksit, kolemanit ve sassolit mineralleri kullanılmıştır. Polyester yalıtkanına ağırlıkça farklı oranda yapılan katkılarla ömür süresindeki değişim Eğik Düzlem Yüzeyde İz Oluşumu (Inclined Plane Tracking Test method, IPT) test yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Aynı yöntemle titreşim etkisi ile yorulan bor katkılı polyester yalıtkanların ömür sürelerindeki değişim çıkarılmıştır. Çalışmanın devamında tinkal katkılı polyester örnekler üzerine yoğunlaşmıştır.

Tinkal katkılanarak hazırlanan polyester örnekler için ağırlıkça katkı oranı aralığı sıklaştırılmış ve 132 örnek kullanılmıştır. Eğik Düzlem Yüzeyde İz Oluşumu test

yöntemi ile test edilen örneklerin üzerinden akan kaçak akım 48 000 örnek /saniye örneklenerek bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Elde edilen kaçak akım sinyali Fourier analizi ile harmonik bileşenlerine ayrılmıştır. Harmonik bileşenler kullanılarak ağırlıkça farklı oranda tinal katkı örneklerin bozulma davranışındaki değişim çıkarılmıştır.

Çalışmanın devamında tinal katkılanarak hazırlanan polyester örnekler için diferansiyel taramalı kalorimetre (Differential Scanning Calorimeter, DSC) analizi gerçekleştirilmiştir. Yüzeyde iz oluşumu sonrası polyester örnek yüzeyindeki morfolojik değişimler Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ile incelenmiştir.

DeneySEL çalışmaların sonunda, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak örnek yüzeyinde oluşan iz üzerindeki elektrik alan dağılımı FEMLab 3.2 ile modellenmiştir. 274 örneğin kullanıldığı çalışmada 132 tinal katkı polyester örnek için güvenilirlik analizi Weibull 7++ programı ile yapılmıştır. Yapılan istatikSEL çalışma sonucunda katkı oranı ile güvenilirliği veren bir bağıntı elde edilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ELEKTRİKSEL YALITIM SİSTEMLERİ

Elektriksel yalıtım sistemlerinin tarihçesi 19. yüzyılda Michael Faraday'ın elektriksel yalıtkan karakteristiklerini tanımlaması ile başlamıştır [1]. İnsanoğlunun elektrik enerjisine olan ihtiyacının her geçen gün artması ve elektriğin kullanım alanının çeşitlenmesi ile birlikte yalıtım sistemleri de değişmiştir. Elektriksel yalıtım sistemlerinin tasarımı, elektrik mühendislerinin yanı sıra fizikçilerin, kimyacıların, malzeme mühendislerinin ve hatta günümüzde biyologların da üzerinde yoğun olarak çalıştığı bir konu haline gelmiştir. Bu sayede 19. yüzyılda yalıtım sisteminin limitlerine göre tasarlanmak zorunda olan güç sistemleri sınırları, ortadan kalkmıştır [2].

Elektriksel yalıtım sistemleri katı, sıvı ve gaz yalıtkanlar olmak üzere 3 sınıfa ayrılırlar [1-8].

Gaz yalıtkan malzemeler en basit ve en yaygın kullanılan yalıtkanlardır. Enerji iletim hatları ve transformatör istasyonlarının baraları birbirlerinden hava aralıkları ile ayrılmıştır. Hava aralıklarının delinmesi ile yüksek gerilim hatlarında kısa devreler meydana gelebilir. Bu tür arızaların önüne geçebilmek için yaygın olarak kullanılan gaz yalıtkan temsilcileri basınçlı hava ve SF₆'dır. Yüksek gerilim sistemlerinde gaz yalıtkan olarak hava kullanılmasının nedenleri havanın bol, ucuz ve delinmeden sonra kendi kendini onarabilmesidir. SF₆ gazı kimyasal stabilitesi ve yüksek delinme dayanımı ile en önemli elektronegatif gazlar arasında yer almaktadır. Elektronegatif gazlar serbest elektronları yakalayıp ağır negatif iyonlar haline gelir ve böylece yüksek delinme dayanımı kazanırlar. Diğer temsilcileri CCl₄, CHCl₃, CCl₂-F₂, C₂H₅I, SeF₄ ve C₃H₁₂'dir [1-8].

Sıvı yalıtkan malzemeler ya da yalıtkan yağlar daha çok transformatörde, yüksek gerilim kesicilerinde, yüksek gerilim kablolarında, yüksek gerilim kondansatörlerinde

kullanılır. Sıvı yalıtkanlar tek olarak veya katı yalıtkanlarla birlikte cihazları ve cihazların birbirlerine karşı yalıtılması amacıyla kullanılabilir. Sıvı yalıtkanlar elektrik endüstrisinde soğutma özelliklerinden, kompozit yalıtkanlardaki boşlukları doldurmak için, yüksek gerilim anahtar/devre kesicilerinde ark oluşumunu kontrol etmek gibi çeşitli amaçlarla yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik endüstrisinde kullanılan yalıtkan yağlar, mineral yağların damıtılması ile elde edilen sıvı yalıtkanlardır. Günümüzde kullanıldığı yere ve amaca göre madeni, reçineli, klorlu, silikonlu ve florürlü yağlar kullanılmaktadır [1-6].

Katı yalıtkanlar elektrik güç sistemlerinde zayıf akımlardan kuvvetli akımlara kadar her noktada yaygın olarak kullanılmaktadır. Katı yalıtkanların delinme dayanımı sıvı ve gazlara oranla daha yüksektir. Fakat bir kez elektriksel özelliklerini kaybettikten sonra yeniden veya kısmen eski durumlarına dönememeleri en büyük dezavantajlarıdır. İdeal bir katı yalıtkanın yüksek delinme dayanımının yanı sıra düşük dielektrik kayıp, yüksek mekanik dayanım ve sertliğe sahip olması, gaz katkıları ve nem içermemesi, ısı ve kimyasal etkileşimlere dayanıklı olması istenir. Bunların yanı sıra kullanıldığı bölgedeki ortam şartlarından etkilenmemeli, ozona ve radyasyona karşı dayanıklı olmalı, higroskopik esnekliğe sahip olmalı ve sıvı sızdırmaması istenir. Katı yalıtkanlar organik, inorganik ve sentetik polimerler olarak kimyasal kompozisyonlarına göre sınıflandırılabilir [1-8].

Organik katı yalıtkanlar bitkisel veya hayvansal kökenli malzemelerdir. İyi yalıtım özelliklerine sahip olmalarına karşın 100 °C'nin üzerindeki çalışma sıcaklıklarında bu özelliklerini yitirirler. Yağ emdirilmiş kağıt yalıtkan ve mukavvalar kablolar, kapasiteler, transformatörler ve panellerde kullanılırlar. Tahta kolay işlenebilen ve mekanik dayanımı yüksek olan bir yalıtkan maddedir. Kurutulmuş, laklanmış ve yağ emdirilmiş olarak kullanılmaktadır [3, 7].

İnorganik katı yalıtkanlar 250 °C'ye kadar elektriksel ve mekanik özelliklerini koruyabilen malzemelerdir. Kompakt yapıları nedeniyle yağı ve verniği emmezler. İnorganik katı yalıtkanların üretimi çok güç olmasına karşın oldukça iyi yalıtım sağlarlar. Seramik, elektrik endüstrisinde yalıtkan olarak kullanılmış ilk malzemedir. İnorganik katı yalıtkanların en yaygın kullanılan temsilcileri seramik, cam ve

porselendir. Bütün bu iyi özelliklerine karşın inorganik katı yalıtkanların kayıp faktörleri diğer katı yalıtkanlara göre yüksektir [3, 4, 7].

Polimerik yalıtkanlar termoplastik ve termoset polimerler olmak üzere 2 gruba ayrılırlar. Termoplastiklerin erime sıcaklıkları düşüktür (100–160 °C) buna karşın esnek olmaları sebebi ile erime sıcaklıklarının altındaki sıcaklıklarda kalıplanabilir ve işlenebilirler. Bu özellikleri nedeniyle termoplastikler yüksek gerilim kablolarının yalıtımında kullanılırlar. Termoset polimerler ise ısı ile bir kez şekil alırlar ve şekil aldıktan sonra işlenemezler. Mekanik dayanımları ve sertlikleri termoplastiklere göre daha iyidir. Günümüzde üzerinde yoğun şekilde çalışılmaya devam edilen polimer yalıtkanlar oldukça çeşitlenmiş ve yaygınlaşmıştır. Yapılan katkılar ile polimerler özel uygulamalarda (yüksek sıcaklık gerektiren, mekanik dayanım gerektiren, kimyasallara karşı zırh olarak, vb.) güvenle kullanılabilirler [1-6].

2.2. POLİMERİK YALITKANLAR

Elektrik-elektronik endüstrisinde yalıtkan olarak polimerlerin kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Polimerler hafiflikleri, elektrik alana karşı dayanımları, kayıp faktörleri, çevresel faktörlere karşı dayanımları, maliyetlerinin düşük olması ile diğer katı yalıtkanlara (cam, seramik, porselen, vb.) göre dikkat çekmektedir

Elektriksel yalıtkan olarak polimerlerin kullanımı 1900'lü yılların ilk yarısında epoksi ile başlamıştır. 1950'de mükemmel dielektrik özellikleri ve korona dayanımı ile polikarbonat kullanılmaya başlanmıştır. 1973 yılında polietersülfon reçineler 180 °C'ye kadar olan çalışma sıcaklığı ile elektriksel yalıtımda kullanılan yalıtkanlar arasına girmiştir. 1980 yılında poliakrilat ve polieter-eterketon (PEEK) içeren 600 °C'ye kadar olan çalışma sıcaklığı ve su geçirgenliğine karşı yüksek dayanımları ile özel reçineler kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde elektrik endüstrisinde yaygın olarak kullanılan polimerik yalıtkanlara örnek olarak epoksi reçine, polietilen (PE), polivinilklorür (PVC), elastomer, ve polyester gösterilebilir [1-8].

Epoksi reçineler termoset polimerler sınıfında yer alırlar, suya karşı dayanımları oldukça iyidir. 130 °C civarında güvenli bir şekilde çalıştırılabilirler, fakat cam dolgu

kullanılarak bu çalışma sıcaklığı 650 °C'ye kadar yükseltilebilir. Yapı içerisindeki dipoller nedeni ile kayıp faktörleri sıcaklıkla artar. Genelde yüksek mekanik dayanımları, kullanılacak malzemeye ve metale oldukça iyi yapışması ve rutubete karşı dayanıklılığı nedeniyle epoksi reçineler yüksek gerilim ekipmanlarında diğer polimerik yalıtkanlara göre daha fazla tercih edilirler. Günümüzde 69 kV altındaki gerilim seviyelerinde kullanılmaktadırlar [2, 3, 6].

Polietilen elektrik endüstrisinde yaygın olarak kullanılan termoplastik polimerdir. PE polar gruplar içermediği için dielektrik sabiti ve kayıp faktörü oldukça düşüktür. Reaksiyon proseslerine bağlı olarak polietilenler düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) veya PE moleküllerinin çapraz bağlanmasıyla (XLPE) olarak üretilirler. LDPE düşük gerilim ve akımların yalıtımında, HDPE ve XLPE yüksek akım ve gerilimlerin yalıtımında kullanılmaktadır [2, 3].

PVC 1930'lu yıllardan beri kablo yalıtkanı olarak ve son dönemde de dolgu olarak kullanılmaktadır. Yapılarındaki polar gruplar nedeni ile kayıp faktörleri yüksektir. Isıl iletkenlikleri oldukça iyi olan PVC yalıtkanlar elektrik endüstrisinde orta gerilim seviyelerinin altında (<10 kV) kullanılmak üzere tercih edilirler [2, 3].

Elastomerler kauçuğa benzer elastik özellikler gösteren polimerlerdir. Güç sistemlerinde en çok kullanılan elastomerler silikon kauçuk, Etilen Propilen Kauçuk (EPR), Etilen Propilen Dien Monomer (EPDM)'dir. Ozona, koronoya, kimyasallara ve hava koşullarına karşı oldukça iyi bir dayanımı vardır. Kablolarda yalıtkan olarak kullanılmasının yanı sıra silikon kauçuklar yüksek gerilim hatlarında seramik yalıtkanların üzerine kılıf olarak konurlar ve böylece yalıtkanın kirli havalardaki performansını arttırmada kullanılırlar [2, 3, 7].

2.2.1. Polyester

Elektrik endüstrisinde kullanılan polyester bileşikler çok küçük elektronik elemanlardan çok büyük elektrik elemanlara kadar pek çok noktada yalıtım amaçlı kullanılmaktadır. Polyesterlerin oldukça iyi dielektrik özellikleri ve yüzey sertlikleri vardır [7]. Pek çok kimyasal bileşene karşı dayanıklıdırlar. Doymuş (saturated) ve doymamış (unsaturated) polyesterler olarak 2 gruba ayrılırlar. Doymamış polyesterler, camfiber ve camlamine katkılıdırlar. Doymuş polyesterler, fiber ve film yapımında kullanılırlar. Elektriksel uygulamalarda polyester fiberler kaplama amaçlı kullanılırlar. Polyester filmler ise motorlarda, transformatörlerde, kapasitelerde, metallerin yalıtımında ve kablolarda kullanılırlar [7, 8].

Polyester filmler kağıt yalıtkanların kullanıldığı noktalarda onların yerine yaygın olarak kullanılmaktadır. Polyester filmlerin yumuşama sıcaklığının kağıt yalıtkanların yumuşama sıcaklığından daha yüksek olması onları daha kullanışlı hale getirmiştir. Düşük frekanslarda kayıp faktörleri düşüktür ve sıcaklık arttıkça azalmaya devam eder. Dielektrik dayanımı 200 kV/mm ve hacimce direnci 100 °C sıcaklıkta $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 'dir. Her tür hava koşuluna karşı dayanıklıdırlar. Ayrıca kimyasal dayanıklılıkları nedeni ile yer altı kablolarında da kullanılırlar. Böylece güç sistemlerinde motor ve transformatörlerin yanı sıra değişen hava koşulları etkisinde kalan yüksek frekanslı elemanların yalıtımında da kullanılmaktadırlar [3, 8].

Mineral ve cam-fiber katkılı polyester bileşiklerin 1 MHz te dielektrik sabiti $\epsilon_r = 4.6$ kayıp faktörü 0.002 ve oda sıcaklığında direnci $1 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ olarak ölçülmüştür. Mükemmel şekil alma ve kalıplanma özellikleri mevcuttur. Elektriksel arka, aleve, ısıya ve yüksek darbelere karşı dayanıklı olan bu bileşikler ayrıca oldukça iyi mekanik ve elektriksel özelliklere sahiptirler [3, 8].

Elektrik endüstrisinde kullanılan polyester yalıtkanların çeşitli özelliklerini iyileştirmek için $\text{Al}(\text{OH})_3$, MgO , CaO gibi maddeler ağırlıkça % 50'ye varan miktarlarda katkılanmaktadır [3]. Şekil 2.1'de polyester yalıtkan ile hazırlanmış bir çubuk izolatör gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Polyester izolatör

2.3. KATI YALITKANLARDA BOZULMA

Katı yalıtkanlar, yüksek gerilim ekipmanlarının ayrılmaz bir parçasıdır. Katı yalıtkanlarda bozulma, sıvılardan ve gazlardan farklıdır. Gaz yalıtkanlar bozulma gerçekleştikten sonra tamamen eski hallerine dönebilirken, sıvı yalıtkanlar bozulma gerçekleştikten sonra bir kısmı eski haline dönebilir. Fakat katı yalıtkanlar bozulma gerçekleştikten sonra eski haline geri dönemezler.

Katı yalıtkanlar kullanım süreleri boyunca çeşitli elektriksel, termal ve mekanik streslerin yanı sıra aşırı akım ve gerilimlere maruz kalırlar. Rutubet, ısı değişiklik, güneş ışını UV etkisi, mekanik gerilmeler ve benzeri çevresel faktörler (titreşim,vb.) yalıtkanlarda bozulmayı hızlandırmaktadır [64-70]. Bu nedenle elektrik iletim ve dağıtım hatlarının güvenliği ve güvenilirliği için katı yalıtkanlarda bozulma davranışının bilinmesinin büyük önemi vardır. Katı yalıtkanlardaki başlıca bozulma mekanizmaları, Yaşlanma, Kısmi boşalma, Kanal oluşumu, Termik delinme, Elektromekanik delinme, Erozyon ve Yüzey aşınımı başlıkları altında incelenir [1-8].

2.3.1. Yaşlanma

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC, International Electrotechnical Commission), yaşlanmayı yüksek gerilim yalıtkanın kullanımına bağlı olarak gözlenen geri dönüşümü olmayan bozucu değişim olarak tanımlamaktadır [1]. Yaşlanmanın nedenleri elektriksel, termal, mekanik, kimyasal veya çevresel faktörler olabildiği gibi bunların beraber etkimesi sonucu da gerçekleşebilmektedir. Orta ve alçak gerilim seviyelerinde kullanılan yalıtkanların tamamı tüketiciye sunulmadan önce yaşlanma testlerine tabi tutulurlar. Böylece elektriksel ve çevresel faktörlerin yalıtkanın ömür süresine olan etkisi elde edilmeye çalışılır [3, 5, 6, 8].

2.3.2. Kısmi Boşalma

Kısmi boşalma, yalıtkanın kısmi delinmesi olarak tanımlanabilir. Yalıtkanlarda yer alan boşluklarda veya kompozit yalıtıkanda bileşenlerden birinde, yüksek elektrik alan etkisi sonucu gerçekleşir. Bunların dışında yalıtkan yüzeyinde meydana gelen boşalmalar da bu tanımın içine katılabilir.

Polimerik yalıtkanlar, içlerinde hava boşluğu kalmayacak şekilde üretilmeye çalışılırlar. Fakat üretim esnasında polimerin içine yerleşen ve dielektrik geçirgenliği polimerden daha az olan, hava kabarcıkları, gaz basıncına ve diğer faktörlere bağlı kalarak bir yüksek alan oluşturur. Bu alan boşluktaki gazın iyonize olmasına ve boşlukta başlayan boşalmalara ve hatta delinmelere neden olmaktadır. Bu tür boşalmalar yalıtkanın ani bozulmasına neden olmazlar, fakat kullanım ömrünü kısaltırlar [1, 5, 6, 8].

2.3.3. Kanal Oluşumu

Katı yalıtkanlarda kanal oluşumu, elektriksel öncül delinme olarak tanımlanabilir. Katı yalıtkanlarda kanal oluşumunu tetikleyen pek çok mekanizma vardır. Bunlar yalıtıkanda noktasal ısınmalar, termal bozulma, elektrik alana bağlı olarak sürekli değişen polariteler nedeni ile bağların kopması, yalıtıkanda habbeciklerin yer alması, elektrik alana bağlı olarak gözlenen mekanik stresler olabilmektedir. Bu etkiler kendi başlarına ya da birlikte etkiyerek yalıtıkanda iletken kanalların oluşmasına neden olurlar. Oluşan

elektriksel olarak iletken kanallar elektrik alanında etkisi ile hızla büyüyerek yalıtkanın delinmesine ve kullanım dışı kalmasına neden olurlar [1-8, 71].

2.3.4. Termik Delinme

Elektrik-elektronik elemanları üzerinde görülen termal bozulma, aşırı akım yüklenmesi veya ortam sıcaklığının artması nedeniyle gözlenir. Her yalıtkan için belirli sıcaklık düzeyinin üzerine çıkıldığı zaman kimyasal ve fiziksel bozunma hızlanır. Bir yalıtkanın oda sıcaklığında iken içerisinden akan iletim akımı, genellikle düşüktür fakat bunun değeri ortamın sıcaklığının artması ile artar. Bu sırada akım tarafından üretilen ısı kısmen çevreye verilip atılırken kısmen de yalıtkan içinde yutulur. Yalıtkan içinde artan sıcaklık, yalıtkan içinden geçen akımı, dolayısıyla da sıcaklığı artırır. Eğer yalıtkan içinde herhangi bir noktada üretilen ısı o yalıtkan için belirli bir değeri aşarsa kararsız bir durum ortaya çıkar ve yalıtkan örnek termik delinme ile bozulur [3, 8, 72].

2.3.5. Elektromekanik Delinme

Katı yalıtkanların kimyasal birleşimi, üretim tekniği, çevresel etkiler ve kullanıldığı noktadaki akım ve gerilim değerleri zamanla yalıtkanın fiziksel olarak etkilenmesine neden olur. Fiziksel özellikleri değişen yalıtkan uygulanan gerilimle birlikte elektromekanik olarak bozulur.

Kağıt yalıtkanlar ve organik bazlı yalıtkanlar rutubet emici özelliktedir. Yüksek oranda rutubet gözlenen çevre şartlarında tek başlarına kullanılmaya müsait değildir. Rutubet bu organik bazlı yalıtkan liflerinin şişmesine sebep olur ve yalıtkanın kalınlığını arttırarak daha fazla yer kaplamasına neden olur. Ya da bu yalıtkanların içeriğindeki kritik su miktarı olması gereken değerin altına düştüğünde kullanılabilirlikleri ortadan kalkar. Bu durumdaki yalıtkanlar gerilim uygulandığında kolaylıkla bozulur [5-8].

2.3.6. Erozyon

Elektrik endüstrisinde kullanılan polimerik yalıtkanların kullanımı sırasında özellikle yüksek gerilim kablolarında başlıca bozulma nedenlerinden biri erozyondur. Polimerik yalıtkan yüzeyinde gerçekleşen yüzeysel boşalmalar termal ve elektronik olarak yalıtkanın moleküler ve atomik yapısını zorlar ve değişmesine neden olur. Bazı durumlarda bu değişim polimerin zincir yapısını değiştirir ve yalıtkanın geride karbon kalıntısı kalmayacak şekilde bozulmasına yani yalıtkanın erozyonuna neden olur [1, 6, 8, 73].

2.3.7. Yüzey Aşınımı

Katı yalıtkanlarda yüzeyde oluşan kaçak akım, yüzeyin bozulmasına ve bir karbonize yolun oluşmasına neden olmaktadır. Bu olaya yüzey aşınımı veya yüzeyde iz oluşumu denir [1, 6].

Yüzey aşınımı daha çok polimerik yalıtkanlarda gözlemlenen bir bozulma biçimidir. Yüzey aşınımı sonucunda, yalıtkanın yüzeyi yanmaya bağlı olarak karbonlaşır ve o bölgede bir iz meydana gelir. Yüzeyde oluşan iz ve oluşum süresi, yalıtkanın kullanılan polimerin moleküler yapısına, uygulanan gerilime, elektrot tipine, deney sırasında yüzeyden akan sıvının akış hızına bağlıdır. Yapılan çalışmalar, yüzey aşınım deneyinde çeşitli faktörlerin polimerik yalıtkanın yüzey aşınım süresini etkilediğini göstermiştir. Bu faktörler rutubet, yüzeyden akan sıvının miktarı, deney gerilimi, yalıtkan örneğin yapısı ve yüzey durumu biçiminde sıralayabiliriz [64-74].

Polyester örneklerle ASTM D2303 test yöntemine göre yapılan yüzey aşınım testlerinde örneklerin artan titreşim ve rutubetle ömrünün arttığı gözlenmiştir [65-67]. Bir diğer çalışmada yüzey aşınımına etki eden UV etkisi, buz yükü etkisi, örneğe uygulanan gerilim seviyesi ve sıvı akış hızının etkileri incelenmiş UV ve buz yükünün etkisi arttıkça ömrü kısalttığı gözlenmiştir. Aynı çalışmada test örneğine uygulanan gerilimin seviyesi arttıkça ömrünün kısaltıldığı, elektrolit akış hızının ise bir optimum değeri olduğu deneysel olarak gözlenmiştir [68].

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada elektrik elektronik endüstrisinde kullanılan polimerik yalıtkanlara bor katkısının bu yalıtkanların elektriksel özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla alçak gerilimden yüksek gerilimlere kadar hemen hemen her noktada yalıtkan olarak kullanılan bir malzeme olan polyester, incelenecek polimer olarak seçilmiştir. Bor mineralleri, çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği farklı özellikler nedeni ile endüstride birçok noktada farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Bu çalışmada bor minerallerinin alev geciktirme özelliklerinden yararlanılmış ve polyester örneklerine bor katkısı olarak ülkemizde yoğun miktarda rezervi bulunan tinkal, uleksit, kolemanit ve sassolit adlı bor mineralleri katkılanmıştır.

Bor minerallerinin polyester yalıtkanın elektriksel davranışına olan etkisi yüzey aşınım testi kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Yüzey aşınım testleri “ASTM D2303 Eğik Düzlem Yüzeyde İz Oluşumu Test Standartı”na uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde mekanik özelliklerin değişimi bulunurken de titreşim etkisi ile yorulan bor katkılı polyester yalıtkanların ömür sürelerindeki değişim “Eğik Düzlem Yüzeyde İz Oluşumu Test Yöntemi” ile çıkarılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda optimum verimliliğin tinkal mineralinden elde edildiği gözlenmiştir. Çalışmanın bundan sonraki aşamalarında polyester yalıtkanına tinkal minerali katkılanarak araştırmalar sürdürülmüştür.

Enerji iletim ve dağıtım hatlarında bozulmaların önceden tespitinde harmonik bileşenlerin kullanılması yaygın bir yöntemdir. Çalışmanın bundan sonraki aşaması olan tinkal katkılı örnekler için gerçekleştirilen deneyler sırasında örnek yüzeyindeki bozulma davranışını takip edebilmek için kaçak akım harmonik bileşenlerinden yararlanılmıştır. Deney sırasında tinkal katkılı örnek yüzeylerinden 48000 örnek/saniye ile ses kartı üzerinden kaçak akım sinyalleri toplanmış ve bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Aktarılan kaçak akım sinyalleri Fourier analizi ile harmonik bileşenlerine ayrılarak bozulma davranışı elde edilmeye çalışılmıştır. Temel, 3., 5., 7., ve 9. tek

harmonik bileşenler kullanılarak ağırlıkça tinkal katkı oranındaki değişimin bozulmaya etkisi çıkarılmıştır.

Katkısız, ağırlıkça % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 tinkal katkılı örnekler için diferansiyel taramalı kalorimetre (Differential Scanning Calorimeter, DSC) analizi gerçekleştirilmiştir. DSC analizi yapılan çalışma sonucu tinkal katkısının camsı geçiş sıcaklığına olan etkisi elde edilmiştir.

Eğik düzlem yüzeyde iz oluşumu deneyleri sonrası örnek yüzeyindeki morfolojik değişimler taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ile katkısız, ağırlıkça % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 tinkal katkılı örnekler için incelenmiştir.

Eğik düzlem yüzeyde iz oluşumu deneyleri sonrası tinkal katkılı örneklerin yüzeyinde oluşan iz, sonlu elemanlar yöntemi ile FEMLab 3.2 programı kullanılarak modellenmiştir. Böylece örnek yüzeyinde oluşan iz üzerindeki elektrik alan dağılımı teorik olarak çıkarılmıştır.

Bu çalışma çerçevesinde 274 örnek deneysel olarak incelenmiştir. İncelenen bu örneklerden 132 adet tinkal katkılı örnek için Weibull 7++ programı kullanılarak güvenilirlik analizi yapılmış ve ağırlıkça tinkal katkı oranı ile güvenilirliği veren bir bağıntı elde edilmiştir.

3.1. EĞİK DÜZLEM YÜZEY AŞINIM TESTİ

Polimerik yalıtkanlar, işletme ömürleri boyunca çeşitli yaşlanma etkenleriyle karşı karşıya kalırlar. Birçok etken yapının yalıtkan özelliğine zarar vermekte ve sonucunda da bozulma meydana gelmektedir. Bozulma, zaman içinde çeşitli dış etkilere bağlı olduğundan yalıtkanın kullanım ömrü hakkında bir kestirimde bulunmak zordur. Bu tür problemleri çözmek ve bir kestirimde bulunabilmek için laboratuvar koşullarında hızlandırılmış yaşlanma deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları;

- Eğik Düzlem Deneyi (Inclined Plane Test)
- Karşılaştırmalı İz oluşum İndisi Deneyi (Comparative Tracking Index Test)
- Tozlu – Sis Deneyi (Dust Fog Test)
- Tuzlu – Sis Deneyi (Salt Fog Test)
- Kuruda Ark Deneyi (Dry Arc Test)
- Farksal Yaşta İz oluşumu (Differential Wet Tracking) Deneyi
- İz oluşumuna Dayanım Çarkı (Tracking Endurance Wheel) Deneyi

olarak sıralanabilir. Bu çalışmada eğik düzlem deneyleri yapılmıştır.

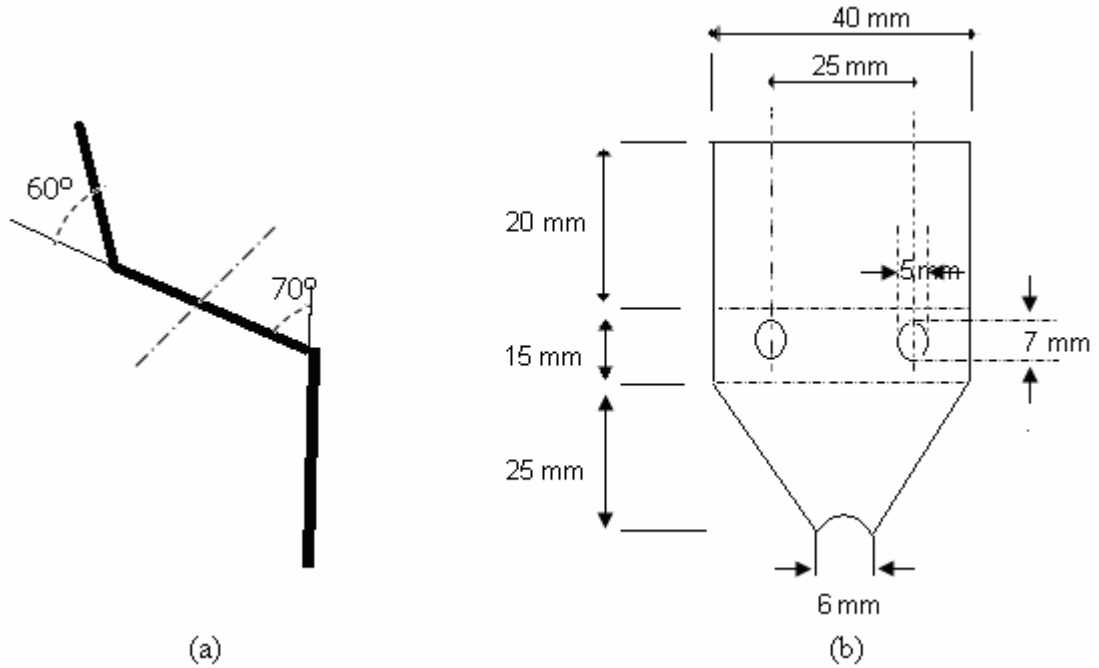
Eğik Düzlem Deneyi (Inclined Plane Test) ilk olarak 1961 yılında gerçekleştirilmiş ve 1964 yılında Amerika’da ASTM D2303 standardı olarak kabul edilmiştir [75]. Bu test ile ilgili olarak ilerleyen yıllarda IEC 587 standardı olarak yeni bir standart geliştirilmiştir [76]. ASTM ve IEC testleri arasında küçük farklılıklar olmakla birlikte temelde aynı teoriye dayanmaktadırlar [75, 76]. Eğik düzlem deneyinde deney; i) örnek üzerinden akan kaçak akım değerinin 60 mA’i 2 saniye süre ile geçmesi, ii) örnek üzerindeki iz oluşumu boyunun topraklanmış elektrottan itibaren 25 mm’yi geçmesi veya iii) örnek yüzeyinde erozyon oluşması, durumlarında tamamlanır [74-76].

3.1.1. Deney Düzenekinin Hazırlanışı

Bu çalışmada ağırlıkça farklı oranda bor minerali içeren örneklerin elektriksel özellikleri incelenirken eğik düzlem yüzeyde iz oluşumu deneylerinden yararlanılmıştır.

örnekleme için 48 000 örnek/ saniye’lik bir sıklığın kaçak akım içerisindeki harmonik distorsiyonları gözlemlemede yeterli olduğu yapılan örnekleme çalışmaları ile görülmüştür. Daha sonra toplanan kaçak akım bilgisi, Matlab 6.5 programı kullanılarak sinyalin temel, 3., 5., 7. ve 9. tek harmonik bileşenlerine ayrıştırılmıştır.

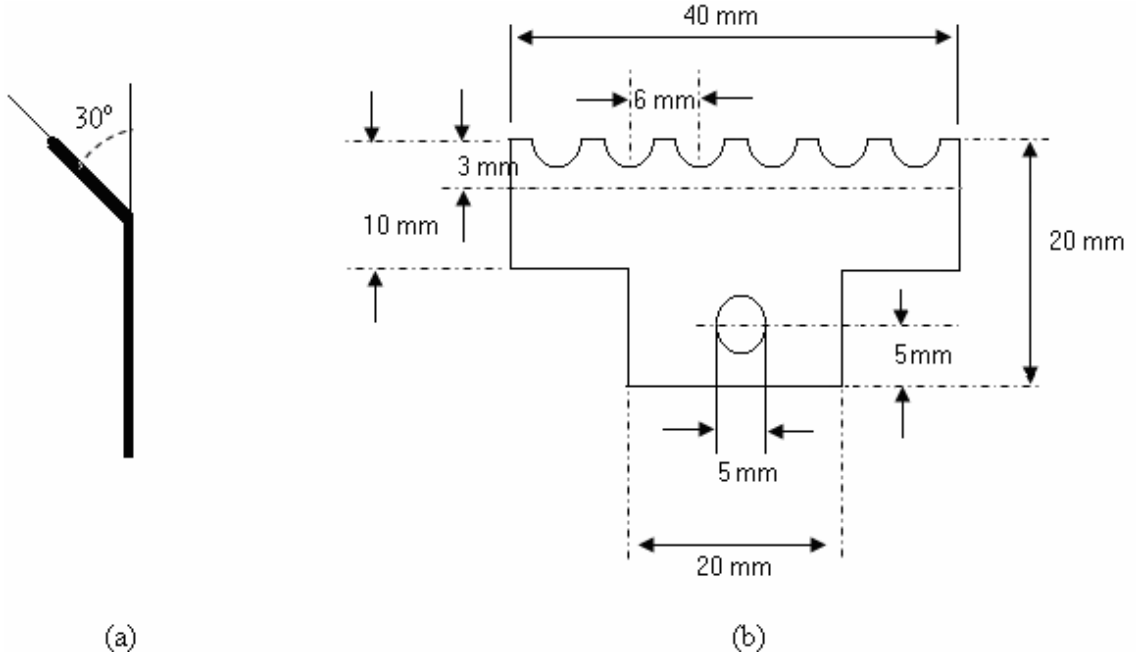
Deneyde kullanılan elektrotların tamamı paslanmaz çelik olup korozyona karşı dayanıklıdır. Eğik durumdaki deney örneği üzerinde yüksek gerilimi elektrodu üstte ve toprak elektrodu altta yer almaktadır. Yüksek gerilim elektrodu ASTM D2303 standardında belirtildiği gibi 33 k Ω ’luk seri direnç üzerinden gerilim değeri kademeli olarak bir varyak ile değiştirilebilen bir yüksek gerilim transformatöründen beslenmektedir. Şekil 3.2’de yüksek gerilim elektrodunun önden ve yandan ölçülendirilmiş şekli gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Yüksek gerilim elektrodunun yandan (a) ve önden (b) görünüşü

Eğik düzlem yüzeyde iz oluşumu deneyi için kullanılan toprak elektrodunun deney örneğine temas ettiği yüzeyinde, çapı 5 mm olan yarım daireler açılarak toprak elektrodunun örneğe 7 farklı noktadan temas etmesi sağlanmıştır. Toprak elektrodu, örnek ile arasındaki açı 30 derece olacak şekilde sabitlenmiştir. Toprak elektrodu ile

toprak arasına 60 mA’lık bir sigorta konarak, test örneğinin yüzeyindeki boşalmaların oluşturduğu anlık akım yükselmelerinden korunulmuştur. Şekil 3.3’de toprak elektrodunun ölçülendirilmiş şekli yandan ve önden gösterilmiştir.

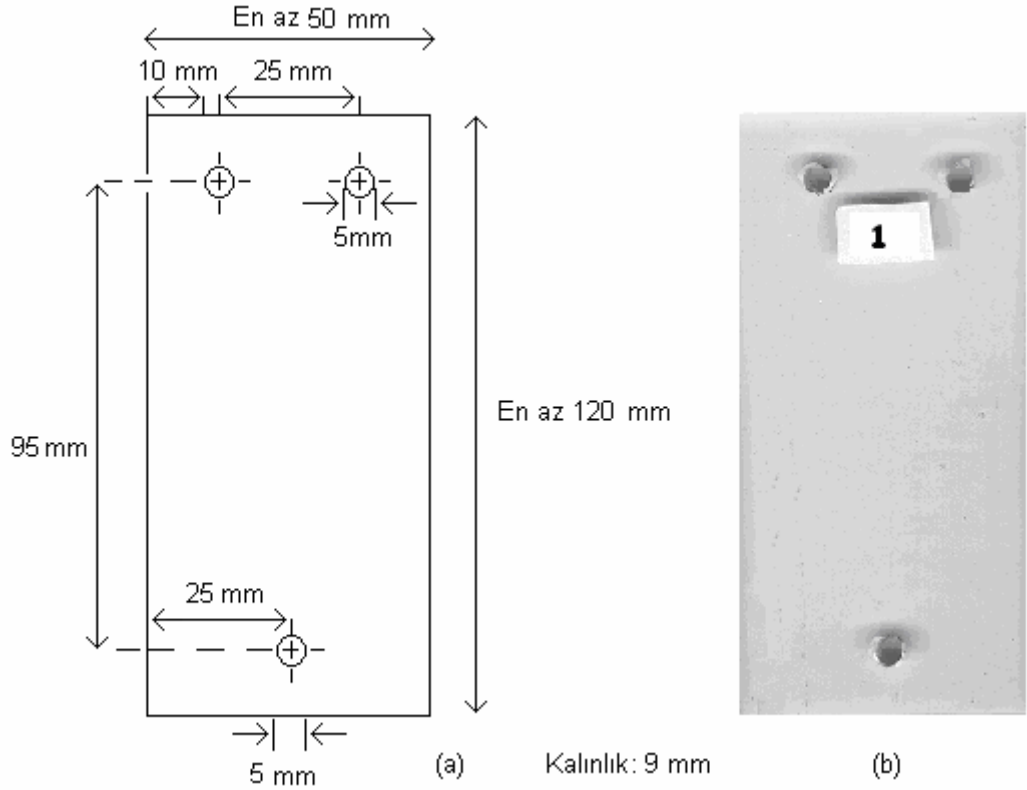


Şekil 3.3: Toprak elektrodunun yandan (a) ve önden (b) görünüşü

3.1.2. Test Örneğinin Hazırlanışı

Bu çalışma kapsamında kullanılan bütün örnekler aynı laboratuvar koşulları altında polyester reçineye ağırlıkça % 0.25 metil-etil-keton-peroksit (MEKP) ve ağırlıkça % 0.25 hızlandırıcı (kobalt) kullanılarak hazırlanmıştır. Test örnekleri boyutları ASTM D2303 standardında tanımlandığı gibi en az 120mmX50mmX9mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Şekil 3.4’de deneyler sırasında kullanılan örneğin ve ASTM D2303 standartında tanımlanan test örneğinin şekilleri verilmiştir [75].

Bu çalışma kapsamında polyester örneklerle, bor minerali olarak tinkal, uleksit, kolemanit ve sassolit mineralleri katkılanmıştır. Kullanılan bor minerallerinin boyutları 35 μ m’dir. Katkılama polyestere üretim aşamasında yapılmıştır.



Şekil 3.4: Deneylerde kullanılan test örneğinin boyutları (a) ve kendisi (b).

3.1.3. Bor Minerallerinin Özellikleri

Türkiye ve Amerika Birleşik Devletleri dünyanın en büyük bor rezervlerine sahiptir ve bor üretiminde dünyanın en büyük üreticileri konumundadır. Türkiye dünyadaki bor rezervlerinin % 66'sına sahiptir. Doğada yaklaşık 230 çeşit doğal bor minerali vardır. Ticari değere sahip olan ve yaygın kullanılanlar; tinkal, kolemanit, üleksit, probertit, borasit, pandemit, szyabelit, hidroborasit ve kernit'tir.

Genelde yaygın kullanılan bor ürünleri boraks (dekahidrat, pentahidrat, susuz boraks), borik asit, sodyum perborat (monohidrat, tetrahidrat)'tan oluşur. Bor ürünleri ısıya karşı dayanıklılık, yüzey sertliği, mekanik dayanıklılık gibi iyi özelliklere sahiptir. Bu nedenle cam sanayii, seramik sanayii, temizleme ve beyazlatma sanayii, yanmayı

önleyici (alev geciktirici) maddeler, ilaç ve kimya sanayii, tarım, emaye, metalürji, enerji depolama, arabalarda(hava yastıkları, hidrolik fren vb), atık sulardan ağır metallerin temizleme işlemleri, pigment ve kurutucu olarak, nükleer uygulamalar gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Borik asit ve boratlar bazı maddelerin ateşe karşı dayanıklılığını yanma sırasında borat ve su moleküllerine ayrışarak sağlarlar. Özellikle selülozik yapılara yapılan katkılama ile bor bileşiklerinin yapı, tutuşma sıcaklığına gelmeden selülozdaki su moleküllerini uzaklaştırdığı ve oluşan kömürün yüzeyini kaplayarak daha ileri bir yanmayı engellediği yapılan çalışmalarda rapor edilmiştir [61]. Bu özellikleri ile bor ürünleri alev önleyici olarak kullanılmaktadır. Bor ve bor bileşiklerinin, çeşitli alanlarda kullanımı üzerine son yıllarda oldukça geniş ulusal ve uluslararası çalışmalar yapılmaktadır.

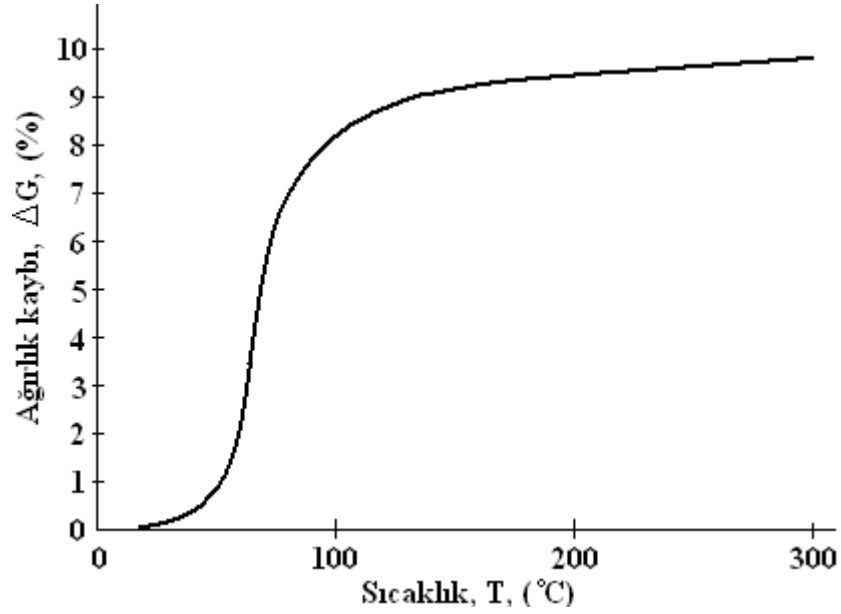
Bu çalışmada tinkal (boraks), uleksit, kolemanit ve sassolit minerallerinden yararlanılmıştır. Bu minerallerin formülleri ve ağırlıkça % borat ve su miktarları Tablo 3.1’de verilmiştir [78, 79].

Tablo 3.1: Bu çalışmada kullanılan bor mineralleri ve özellikleri

Mineral	Formülü	B ₂ O ₃ %	H ₂ O %
Tinkal (Boraks)	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	36.5	47.2
Uleksit	Na ₂ Ca ₂ B ₁₀ O ₁₈ .16H ₂ O	43.0	35.6
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .5H ₂ O	50.9	21.9
Sassolit (Borik asit)	H ₃ BO ₃	56.4	43.6

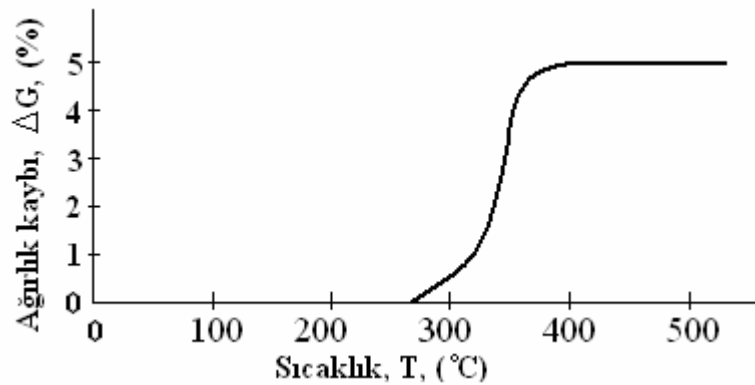
Tinkal (boraks) minerali ile yapılan termogravimetrik analizler ile sıcaklıkla tinkalin dehidrasyon eğrisi çıkarılmıştır (Şekil 3.5). Bu eğrinin geniş bir değerlendirmesi yapıldığında boraksın 25-78 °C sıcaklık aralığında 7 molekül su kaybettiği daha sonra 79-138 °C sıcaklık aralığında kalan su molekülü anyonlarının yapıdan ayrıldığı ve 138 °C de 9 molekül su kaybı gerçekleştiği gözlenmiştir. Daha sonra dehidrasyon hızı azalmış ve mineral son molekül suyunu 217 °C’de kaybetmiştir. Bunun sonucunda

tinkal minerali içerisinde yapısal olarak yer alan % 16.26 oranında Na_2O ve ve % 36.63 oranında B_2O_3 ortaya çıkar.



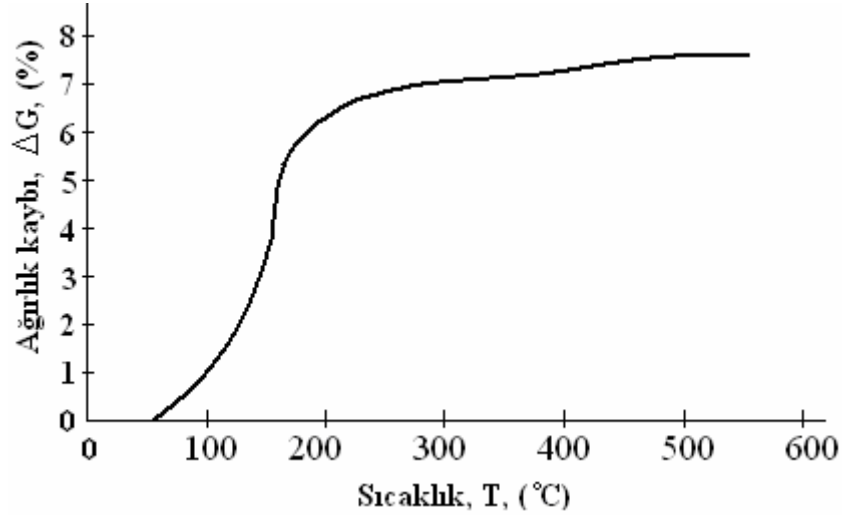
Şekil 3.5: Tinkal mineralinin termogravimetrik analizi sonucu.

Uleksitin dehidrasyon eğrisi Şekil 3.6'da verilmektedir. Dehidrasyon eğrisi incelendiğinde 59 °C'ye kadar uleksitten su kaybı olmadığı görülmektedir. Mineralin ilk 6 molekül suyunu 196 °C'ye kadar verdiği ve 196-267 °C aralığında dehidrasyonunun yavaşladığı ve 267-449 °C'den sonra bu suyun da minerali terk ettiği yapılan termogravimetrik analizi ile gözlenmiştir. Termogravimetrik analizleri sonrası uleksitteki bu endotermik reaksiyonların 132, 148 ve 178 °C'de olduğu görülmüştür. Bu üç endotermik reaksiyon birbirlerine çok yakın oldukları için tek bir endotermik reaksiyon (178 °C) olarak görülebilir [79].



Şekil 3.6: Uleksit mineralinin termogravimetrik analizi sonucu.

Kolemanit bor bileşikleri içinde en yaygın olarak bulunanıdır. Şekil 3.7’de yapılan termogravimetrik analizler sonrasında kolemanitin 262 °C’ye kadar su kaybetmediği görülmüştür. 262-412 °C arasında 5 molekül suyunu tamamen verdiği görülmüştür. Yapılan termogravimetrik analizleri sonrası iki endotermik reaksiyon 390 ve 400 °C’de gerçekleşmiştir [79].



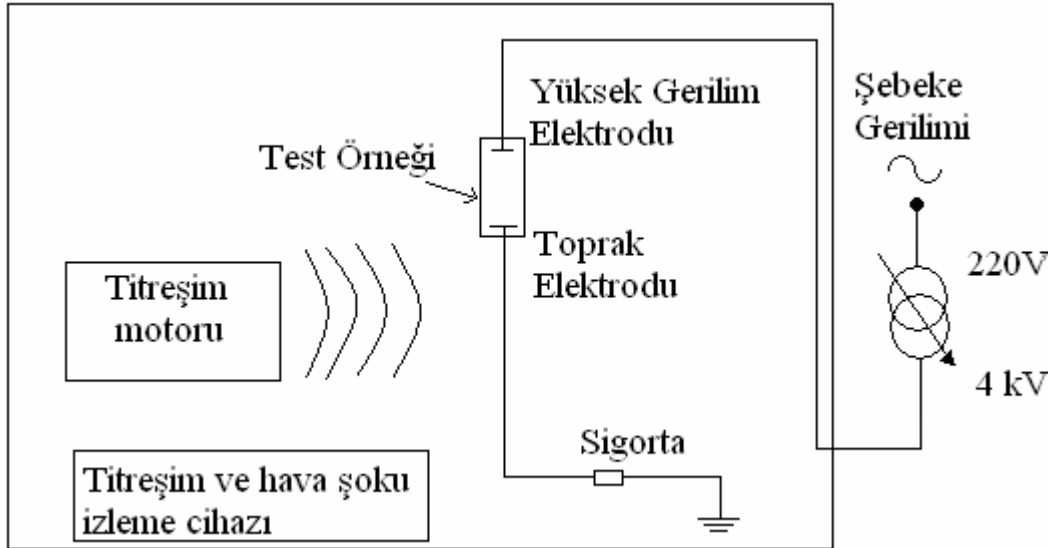
Şekil 3.7: Kolemanit mineralinin termogravimetrik analizi sonucu.

3.1.4. Elektrolit Çözeltinin Hazırlanması

Eğik düzlem deney düzeneğinde yalıtkan üzerinden akan sıvı ASTM D2303’de tanımlanan elektrolit bir çözelti olup iletkenliğinin oda sıcaklığında 300 S/cm olması istenir. Bu amaçla saf suyun içine % 0.1 ± 0.002 oranında NH_4Cl (Amonyum Klorür) ve % 0.2 ± 0.002 oranında da Triton-X100 eklenerek elektrolit sıvı hazırlanır. Bu çözeltide amonyum klorür sıvının elektrik iletkenliğini artırmak, Triton-X ise sıvının yalıtkan yüzeyinde daha uzun süre kalmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Yüzeyden akan elektrolit sıvının akış hızı, devrede yer alan direnç ve uygulanacak gerilim değerleri göz önüne alınarak ASTM D2303 test standardından bulunur. Bu çalışmada deney sırasında örneklerle uygulanacak 4 kV gerilim ve 33 k Ω seri direnç değeri için sıvı akış hızı standartta belirtildiği üzere 36 ml/saat olarak uygulanmıştır. Sıvı akış hızını kontrol etmek için peristaltik pompa kullanılmıştır [75, 77].

3.1.5. Titreşim Etkisinin Oluşturulması

Çalışmanın bu bölümünde tinkal, uleksit, kolemanit ve sassolit katkılı örneklerin titreşim ile yorulma sonrası ömür sürelerindeki değişimin incelenebilmesi için bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Test düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.8’de verilmiştir. ASTM D2303 test standardına göre hazırlanan deney düzeneğine polimerlerin kullanımları sırasında etkilenebilecekleri düzlemsel (yatay) mekanik titreşimleri temsil etmek için titreşim oluşturmak üzere 24 V DC gerilim kaynağı ile beslenen titreşim motoru yerleştirilmiştir. Kullanılan motorun ürettiği titreşim değerleri zemin üzerinde ve yalıtkan örnek üzerinde ayrı ayrı titreşim ve hava şoku izleme sistemi ile ölçülmüştür (Mini Seis Titreşim ve Hava Şoku İzleme Cihazı). Zemin üzerinde ortalama 27.2 mm/s ve örnek üzerinde ortalama 34.6 mm/s titreşim değerleri ölçülmüştür. Hazırlanan deney sisteminde diğer dış etkenler (rutubet, sıcaklık, gerilim, sıvı akış hızı vb.) sabit tutulmuş, örnekler 8 saat süre ile titreşim etkisi altında yorulmuştur. Titreşim erkisi ile yorulmuş bor katkılı örneklerde bor konsantrasyonunun test örneğinin bozulma süresine etkisi incelenmiştir. Her test için minimum 5 örnek kullanılmıştır.



Şekil 3.8: Polyester yalıtkanlarda iz oluşumuna titreşimin etkisinin incelendiği test düzeneği

3.2. FOURIER ANALİZİ

Elektrik-elektronik sistemlerinin arızasını bulmada harmonik bileşenlerden yararlanılması sıklıkla başvurulmuş bir yöntemdir. Örneğin asenkron motorlarda rulman arızalarının tespitinde 2-4 kHz arasındaki harmonik bileşenler kullanılmaktadır [80]. Enerji iletim hatlarının ve güç sistemlerinin verimliliği ise 35. harmoniğe kadar olan harmoniklerin değişimi incelenerek yorumlanmaktadır [81].

Polimerik yalıtkanların yaşlanmaya bağlı bozulmaları incelenirken de harmonik bileşenlerden yararlanılmaktadır [82-88]. Eğik düzlem yüzeyde iz oluşumu ile yapılan bir diğer çalışmada ATH katkılı ve katkısız silikon örnekler ile polietilen vinil asetat örnekler yapay olarak yaşlandırılmış deney boyunca kaçak akım işaretleri kaydedilmiştir. Sonuçta kaçak akımın ortalama ve maksimum değerleri için örnekler karşılaştırılmış ve kaçak akımın polimer örneklerin performansını değerlendirmede kullanılabilir olduğu gösterilmiştir [82].

Silikon kauçuk ile tuz-sis ile yapılan yaşlandırma testlerinde temel, 3. ve 5. harmonikler ile yalıtkanın bozulma davranışı arasındaki ilişki çıkarılmaya çalışılmıştır. Bozulma tamamlandıktan sonra kaçak akımın temel bileşenin artmaya devam ettiği fakat 3. ve 5. harmoniğinin azaldığı gözlenmiştir [83].

Gubanski ve arkadaşları katı yalıtkanlarda bozulma davranışı ile kaçak akım harmonik bileşenleri arasındaki ilişki üzerinde çok sayıda çalışma yapmışlardır [84-87]. 6 farklı polimerik yalıtkanın kirlenme ile kaçak akım bileşenleri arasındaki değişim incelenmiş ve bozulma sırasında kaçak akımın yüksek miktarda 3. ve 5. harmonik bileşen içerdiği gözlenmiştir [84]. Aynı polimerlerle yaptıkları diğer çalışmalarda örneklerin hidrofobik özelliklerindeki değişim ile kaçak akım bileşenleri arasındaki değişim verilmiştir [85, 86]. AC ve DC gerilimler altında yaşlandırılan silikon kauçuğa ATH katkılanması ile kaçak akım bileşenleri arasındaki ilişki çıkarılmaya çalışılmış ATH katkı oranının artmasının harmonik bileşenleri arttırdığı gözlenmiştir [87].

Polimerik yalıtkanların hidrofobik özelliklerindeki değişimin kaçak akım bileşenleri ile değişimini veren çeşitli çalışmalar literatürde mevcuttur. Bunlardan birinde silikon

kauçuğa ATH katkılındığı durumda silika kaplamanın hazırlanan örneğin hidrofobik özelliklerine etkisi kaçak akım sinyali kullanılarak incelenmiştir. Örnek üzerinden toplanan sinyalden 10. harmoniğe kadar olan harmonik bileşenler Fourier analizi ile çıkarılmış ve hidrofobik özelliğini koruyan silika kaplı örneklerin harmonik bileşenlerinin diğer örneklere göre daha düşük olduğu deneysel olarak çıkarılmıştır [88].

İletim ve dağıtım hatlarındaki bozulmalar sinüsoidal olmayan işaretlerin oluşmasına neden olur. J. Fourier, sinüsoidal olmayan periyodik dalgaların genlik ve frekansları farklı birçok sinüsoidal dalgaının toplamından oluştuğunu göstermiştir. Sinüsoidal olmayan dalgaları, genlik frekansları farklı olan sinüsoidal dalgalara Fourier Serileri ile ayırabilmek mümkündür [89].

Bir $f(t)$ fonksiyonunun Fourier dönüşümü

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3.1)$$

biçiminde tanımlanır ve $F(\omega)$ 'nin ters Fourier dönüşümü,

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (3.2)$$

olarak tanımlanır. (3.1) ve (3.2) eşitlikleri, Fourier dönüşüm çifti olarak adlandırılır. Bu eşitlikler zaman veya frekans domeninin $(-\infty, \infty)$ aralığındaki herhangi bir fonksiyonu ters domende sürekli bir fonksiyona dönüştürmek için kullanılır. Periyodik sinüsoidal olmayan dalga şeklinin frekans spektrumunun incelenmesinde ayrık Fourier dönüşümü veya hızlı Fourier dönüşümü kullanılmaktadır.

Frekans domeni fonksiyonu (3.1) ve zaman domeni fonksiyonu (3.2), her periyotta N adet örneklemeyle periyodik olarak örneklenmiş fonksiyonlar olduğu zaman bu ifadeler ayrık Fourier dönüşümü denir. Frekans domeni ve zaman domeni ifadeleri şu şekilde yazılabilir.

$$F(k\Delta\Omega) = \sum f(n\Delta T) e^{-j2\pi kn/N} \quad (3.3)$$

$$F(n\Delta T) = \sum f(k\Delta\Omega) e^{-j2\pi kn/N} \quad (3.4)$$

Burada $k, n = 0, 1, \dots, N-1$, $\Delta\Omega = \frac{2\pi}{\Delta T}$ ve $\Delta T = \frac{T}{N}$. Ölçüm bilgisi bir örnekleme zaman fonksiyonu şeklinde elde edilebildiği için, ayrık Fourier dönüşümü harmonik ölçümlerinde çok kullanılır.

Hızlı Fourier dönüşümü, ayrık Fourier dönüşümünü kolaylaştırmak için kullanılır. $W = e^{-2j\pi/N}$ tanımı yapılarak elde edilen $[W^{kn}]$ matrisindeki elemanların benzerliğinden yararlanılmaktadır. Böylece işlem sayısı $(N \cdot \log_2(N))$ seviyesine düşmektedir.

İletim ve dağıtım hatlarında olumsuz etkiler yaratan sinüsoidal olmayan akımın anlık değerini Fourier serisine açarsak aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (3.5)$$

Burada i_n n. dereceden harmonik akımın anlık değeridir. Burada DC terimler ihmal edilmiştir. I_n n. dereceden harmonik akımın etkin değeridir. ω_1 temel frekansa ait açısal frekanstır. δ_n ise n. harmonik akıma ait faz açısıdır.

Bir güç sistemindeki harmonik bozulmaları değerlendirmek istersek harmonik bileşenlerin etkin değerlerini, temel bileşen efektif değerine oranlayarak hesaplayabiliriz. Bu işlem, toplam harmonik distorsiyon (THD) olarak isimlendirilir ve standartlarda yaygın olarak kullanılır.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.6)$$

(3.6) ifadesinde akım için toplam harmonik distorsiyonu ifadesi verilmiştir. Benzer şekilde n. harmonik mertebesindeki akım için tekil harmonik distorsiyonu da şu şekilde ifade edilir.

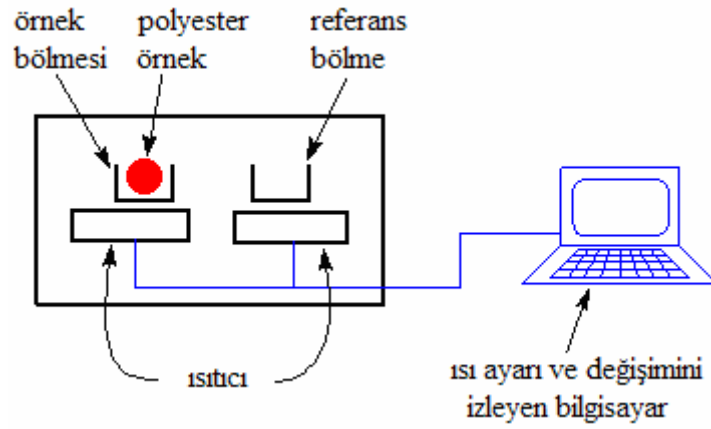
$$HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (3.7)$$

Katkısız ve tinkal katkılı polyester örneklerin yüzeyde iz oluşumu davranışlarındaki değişim incelenirken örnek üzerinden deney boyunca kaçak akım işaretleri toplanmıştır. Kaçak akım işareti, 48 000 örnek/saniye örnekleme hızı ile ses kartı üzerinden bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bozulma davranışını daha rahat takip edebilmek için tinkal katkılı örneklerin üzerinden alınan işaretlerin tamamı yerine bozulma gerçekleşmeden önceki son 20 saniyenin kullanılması uygun görülmüştür. Kaçak akımın harmonik bileşenlerinin sayısal değerlendirmesinin yapılabilmesi için hızlı Fourier dönüşümü (FFT) kullanılmıştır. Örnek üzerinden alınan kaçak akımın temel, 3., 5., 7. ve 9. harmonik bileşenleri Matlab kodu ile ayrıştırılmıştır. Her bir katkı oranı için deneylerde kullanılan tüm örneklerin kaçak akımının harmonik analizi yapılmış ve katkı oranı ile harmonik distorsiyonlar arasındaki ilişki elde edilmeye çalışılmıştır.

3.3. DİFERANSİYEL TARAMALI KALORİMETRE (DSC) ANALİZİ

Polimerik yalıtkanların elektriksel özellikleri sıcaklıktan doğrudan etkilenir. Sıcaklık arttırıldığında polimer yalıtkan içerisindeki atom ve elektronların enerjileri artar ve kutuplaşma kolaylaşır. Sıcaklık artışı ile katı yalıtkanlardan örneğin cam ve seramikte dielektrik kayıp ve dielektrik sabiti sıcaklıkla doğru orantılı olarak artar. Polimerlerde ise diğer katı yalıtkanlardan farklı olarak dielektrik özellikler bir camsı geçiş sıcaklığı civarında değişir ve maksimum değerini alır.

Diferansiyel taramalı kalorimetre analizi (Differential Scanning Calorimeter, DSC) polimerlerin ısı emilimini ya da ısı kaybını sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçer ve kaydeder. Malzemenin sıcaklığa göre verdiği tepkiler o maddenin yapısı, kalitesi, saflığı ve dayanıklılığı gibi birçok özelliği hakkında bilgi verir. DSC ile yapılan bazı uygulamalar ile polimerlerdeki camsı geçiş sıcaklığının ölçümü, erime noktası kullanılarak malzeme karakterizasyonu ve saflık tayini yapılabilir. DSC analizi test düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9: DSC analizi test düzeneği.

Bu düzende iki farklı bölme yer almaktadır. Bu bölmelerden birine polyester örnek yerleştirilir. Diğer bölme referans bölme olarak kullanılır ve boş bırakılır. Örneklerin altına birbirinden bağımsız iki adet ısıtıcı yerleştirilmiştir. Isıtıcıların aynı miktarda ısı akışını bölmelere yansıtması istenen bu ölçme yönteminde doğal olarak polyester örneğin yer aldığı bölmeye daha fazla ısı aktarılması gerekecektir. DSC analizi referans bölmeye göre ne kadar fazla ısı aktarıldığını verir. Elde edilen bu

verilerle çizdirilen eğrilerde x-ekseni kaplardaki sıcaklık değişimini ve y-ekseni ise referans bölmeye göre, örnek bölmesine aktarılan fazla ısı miktarını verir.

Bu çalışmada katkısız ve ağırlıkça % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 oranlarında tinkal katkılı örneklerin DSC analizi Mettler Toledo, Model 822 DSC ile yapılmıştır. Isıtma işlemi 25–400 °C aralığında azot ortamında 10 °C/dak. sıcaklık artışı ile gerçekleştirilmiştir.

3.4. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) ANALİZİ

Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) görüntü, yüksek gerilim ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir.

Bu çalışmada katkısız polyester örnek ve ağırlıkça % 0.5 , % 1.0 ve % 1.5 tinkal katkılı örneklerin SEM analizleri yapılmıştır. Çalışmada JSM 5600 marka SEM cihazı kullanılmıştır. Yalıtkanların yüzeyleri en fazla 20 nm mertebesinde iletkenliği sağlayan altın ile kaplanmıştır. Yalıtkan örneklerin boyutları 1x1x1 mm'nin altında olacak şekilde hazırlanmıştır. Yapılan çekimlerde ölçekler μm olarak verilmiştir.

3.5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi, çok çeşitli mühendislik problemine uygulanabilecek sayısal bir yöntemdir. Kararlı rejimli, değişken rejimli, doğrusal, doğrusal olmayan durumlar için gerilim analizi, ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve elektromanyetizma problemlerinin analizleri için sonlu elemanlar yöntemi kullanılabilir [90-102].

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan bir çalışmada polyester yalıtkanların yüzeyde iz oluşumu ile yaşlandırılması sonucu yüzeylerinde oluşan iz modellenmiş ve örnek yüzeyindeki potansiyel fark ve elektrik alan değerleri teorik olarak elde edilmiştir [90].

Elektriksel yalıtım sistemlerinde buzlanmanın elektriksel alana etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile pek çok çalışmada incelenmiş ve buzlanmanın yalıtım sistemindeki etkisi teorik olarak yapılan çalışmalarda elde edilmeye çalışılmıştır [91-93]

Sonlu elemanlar yönteminde problem, çözümü daha kolay alt problemlere ayrılır. Oluşturulan alt problemler çözüldükten sonra birleştirilerek esas problemin çözümü yapılabilir. Problemin tam çözümü yerine kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözümü tercih edilir. Öyle problemler vardır ki, bunlarda yaklaşık çözüm tek yol olarak benimsenir. Örneğin, gerilme analizi üzerine çalışan mühendisler gerilme problemini basit kiriş, plak, silindir gibi geometrisi bilinen benzer şekillerle sınırlarlar. Bu çözümler çoğu kez gerçek problemin yaklaşık çözümüdür.

FEMLAB (Finite Element Modelling Laboratory) Sonlu Eleman Modelleme Laboratuvarı, içerdiği bir çizim aracı ile diferansiyel eşitliklerle düzenlenen bilimsel problemlerin 2 veya 3 boyutlu olarak modellenmesine olanak sağlayan, bu modeller üzerinde sonlu elemanlar yöntemini ve veritabanındaki temel bilimsel denklemleri kullanarak çözümleyip sonuçlandıran bir bilgisayar programıdır [102].

Bu çalışmada, FEMLab programının “elektromanyetik” problemlerin çözümüne yönelik olarak geliştirilmiş ve içinde temel elektromanyetik bağıntılarını içeren “elektromanyetizma” bölümü kullanılmıştır.

3.5.1. Elektromanyetizma ve Maxwell Denklemleri

FEMLAB ile elektromanyetik problemler çözülürken probleme bağlı olarak kullanılan temel elektromanyetik eşitlikler ve bunlarda sınır koşullarının nasıl uygulandığı görülebilmektedir. Bu çalışmada, genelleştirilmiş elektrostatik ve yarı-statik elektrik alan akımları uygulama modlarından yararlanılmıştır [94-99].

Modern elektromanyetik alan kuramı Maxwell denklemlerine dayanmaktadır. Maxwell denklemleri diferansiyel veya integral formda yazılabilirler. Burada sadece diferansiyel formdaki denklemler göz önüne alınacaktır. Çünkü sonlu elemanlar yöntemi diferansiyel formdaki Maxwell denklemlerini kullanarak işlem yapabilmektedir [78-81].

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.8)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.10)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.11)$$

Burada (3.8) eşitliği Maxwell-Amper yasasını, (3.9) eşitliği Faraday yasasını, (3.10) eşitliği Gauss yasasını, (3.11) eşitliği ise Manyetik Gauss yasasını göstermektedir [89, 90].

Diğer bir temel denklem ise süreklilik denklemdir ve aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [88].

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.12)$$

Bu denklemler yapısal bağıntılarla tamamlanır ve bu bağıntılar ortamın makroskopik özelliklerini belirlerler.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (3.13)$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (3.14)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.15)$$

Bu eşitliklerdeki büyüklükler şunlardır:

E : Elektrik alan şiddeti (V/m)	σ : Elektriksel iletkenlik (S/m veya 1/ Ω m)
H : Manyetik alan şiddeti (A/m)	ϵ : Dielektrik katsayısı (F/m)
D : Elektriksel akı yoğunluğu (C/m ²)	ϵ_0 : Boşluğun dielektrik sabiti (F/m)
B : Manyetik akı yoğunluğu (Wb/m ²)	μ : Manyetik geçirgenlik (H/m)
J : Akım yoğunluğu (A/m ²)	μ_0 : Boşluğun manyetik geçirgenliği (H/m)
J^ℓ : Dış akım yoğunluğu (A/m ²)	c_0 : Işık hızı (m/s)
P : Polarizasyon vektörü (C/m ²)	J_1 : 1. bölgenin akım yoğunluğu (A/m ²)
M : Manyetizasyon vektörü (A/m)	J_2 : 2. bölgenin akım yoğunluğu (A/m ²)
t : Zaman (s)	

3.5.2. FEMLAB Yarı Statik Alan Uygulama Modu

Bu uygulama modu için indüksiyon akımları ihmal edilir.

Bu durumda;

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (3.16)$$

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (3.17)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = \nabla \cdot (\sigma \vec{E} + \vec{J}^\ell) = -\vec{J} \omega \rho \quad (3.18)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.19)$$

Sınır Koşulları

Bu model için sınır koşulları elektrik potansiyelinin bağımlı bir değişken olduğu durumlarda uygulanır.

Elektriksel Yalıtkan:

Elektriksel yalıtkan sınır koşulu, sınır dışında elektriksel deplasmanının sıfır olduğunu belirtir.

$$n \cdot J = 0 \quad (3.20)$$

Elektrik Potansiyeli:

Elektrik potansiyeli sınır koşulu, sınır üzerindeki potansiyeli belirtir.

$$V = V_0 \quad (3.21)$$

Toprak:

Toprak sınır koşulu, sınır üzerindeki potansiyelin sıfır volt olduğunu belirtir.

$$V = 0 \quad (3.22)$$

Yüzey Gerilimi:

Yüzey gerilimi sınır koşulu, yüzey geriliminin integral ile ifade edilebilmesini sağlar.

$$\int_{\partial\Omega} n \cdot (J_1 - J_2) = I_0 \int_{\partial\Omega} -n \cdot J = I_0 \quad (3.23)$$

3.5.3. Kısmi Diferansiyel Denklemlerin Formülleştirilmesi

Zamana bağlı elektrik akımı uygulamaları için,

$$-\nabla \cdot d((\sigma + j\omega\varepsilon_0)\nabla V - (J^\ell + j\omega P)) = dQ_j \quad (3.24)$$

Eşitliği ve kısa süreli elektrik akımlar için ise (3.37) eşitliği kullanılır [90, 91, 94].

$$-\nabla \cdot d\left(\frac{\partial}{\partial t}((\varepsilon_0\nabla V + P) - \nabla \cdot d(\sigma\nabla V - J^\ell))\right) = dQ_j \quad (3.25)$$

Bu çalışma kapsamında katkısız ve tıkal katkılı örnek yüzeyleri 2 boyutlu olarak FEMLab 3.2 programında modellenmiştir. Modellemeler gerçekleştirilirken programa girilen büyüklükler Tablo 3.2’de verilmiştir. Örnek yüzeyinde oluşan iz elektrolit sıvı olarak modellenmiş diğer alanlar ise polyester yalıtkan olarak modellenmiştir. Her bir katkı oranı için 3 adet örnek modellenmiştir.

Tablo 3.2: Programa girilen büyüklüklere ait tablo

Büyüklük	Polyester	Elektrolit Sıvı	Çelik elektrodlar
Elektriksel İletkenlik (S/m)	2.857e-18	0.00025	0.374e7
Bağıl Dielektrik Sabiti	4.6	100	1
Kalınlık (mm)	10	1	5

3.6. GÜVENİLİRLİK

Güvenilirlik belli koşullar altında sistemin belli bir zaman aralığında amacına uygun bir performans gösterme olasılığı olarak tanımlanır. Bunun sonucu olarak güvenilirlik rasgele bir değişkenin uygun fonksiyonları ile ifade edilir [103]. Dolayısıyla güvenilirlik, performans güvencesinin ölçüsü olarak tanımlanabilir. Bir mühendislik sisteminin güvenilirliği sistemin bozulmama ya da kalıcılık olasılığı ile değerlendirilir. Güvenilirlik teorisinde bir riskin gerçekleşmesini ifade eden limit duruma ulaşılması ihtimali bozulma riski terimiyle adlandırılır. Bozulma riskinin ortadan kaldırılamaması nedeni ile olan belirsizlikler ancak istatistiksel çıkarsamayla elde edilen bilgilerin olasılık yasalarına göre değerlendirilmesiyle çözümlenebilir [102, 103].

Mühendislik sistemlerinin güvenilirliği, önceleri çoğunlukla deterministik kavramlara dayanan yaklaşımlarla sağlanmış, anılan fiziksel sistemlerin davranışlarına ilişkin kabuller yaparak ve uygun güvenlik katsayıları kullanılarak sistem güvence altına alınmıştır. Günümüzde mühendislik sistemlerinin güvenliği genelde olasılıksal kavramları esas alan yaklaşımlarla gerçekleştirilmektedir. Mühendislik sistemlerinin bozulma olasılıklarının, tahmin edilmesini sağlayan risk çözümleme teknikleri geliştirilmiş fakat tahmin edilen risklerin kabul edilebilirliğinin değerlendirilmesi için genel bir kural konulmamıştır. Risk düzeyleri olasılıksal risk çözümlemeleriyle tahmin edilemiyorsa, deneysel bilgilere dayanılarak tahmin edilmeli ve tahminlerin güvenilebilirliği değerlendirilmelidir. Olasılıksal risk tahminleri, gelişen teknolojiye paralel olarak elektrik -elektronik ekipmanlarının tasarımı sırasında performans ölçümünü yapmada sıkça kullanılan bir yöntem haline gelmiştir [103-108].

Temel istatistiksel kavramlara göre;

$t = 0$ anında kullanılmaya başlayan bir cihazın bir t zamanına kadar bozulma olasılığı (Cumulative hazard Distribution Function, CDF) birikimli bozulma olasılık dağılım fonksiyonu $F(t)$;

$$\left. \begin{array}{ll} F(t) = 0 & t < 0 \\ 0 \leq F(t) \leq F(t') & 0 \leq t \leq t' \\ F(t) \rightarrow 1 & t \rightarrow \infty \end{array} \right\} \quad (3.26)$$

t ile $t + dt$ zamanları arasında bozulma olasılığı olarak da tanımlayabileceğimiz olasılık yoğunluk fonksiyonu (Probability Density Function PDF) $f(t)$, birikimli dağılım fonksiyonunun türevi alınarak elde edilir.

$$\left. \begin{array}{ll} f(t) = dF(t) / dt & \text{(PDF)} \\ F(t) = \int_0^t f(x) dx & \text{(CDF)} \end{array} \right\} \quad (3.27)$$

Güvenilirlik fonksiyonu ise;

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(x) dx = \int_t^\infty f(x) dx \quad (3.28)$$

şeklindedir.

Böylece olasılık yoğunluk fonksiyonu

$$f(t) = -dR(t) / dt \quad (3.29)$$

bağıntısı ile de elde edilebilir.

3.6.1. Weibull Dağılımı

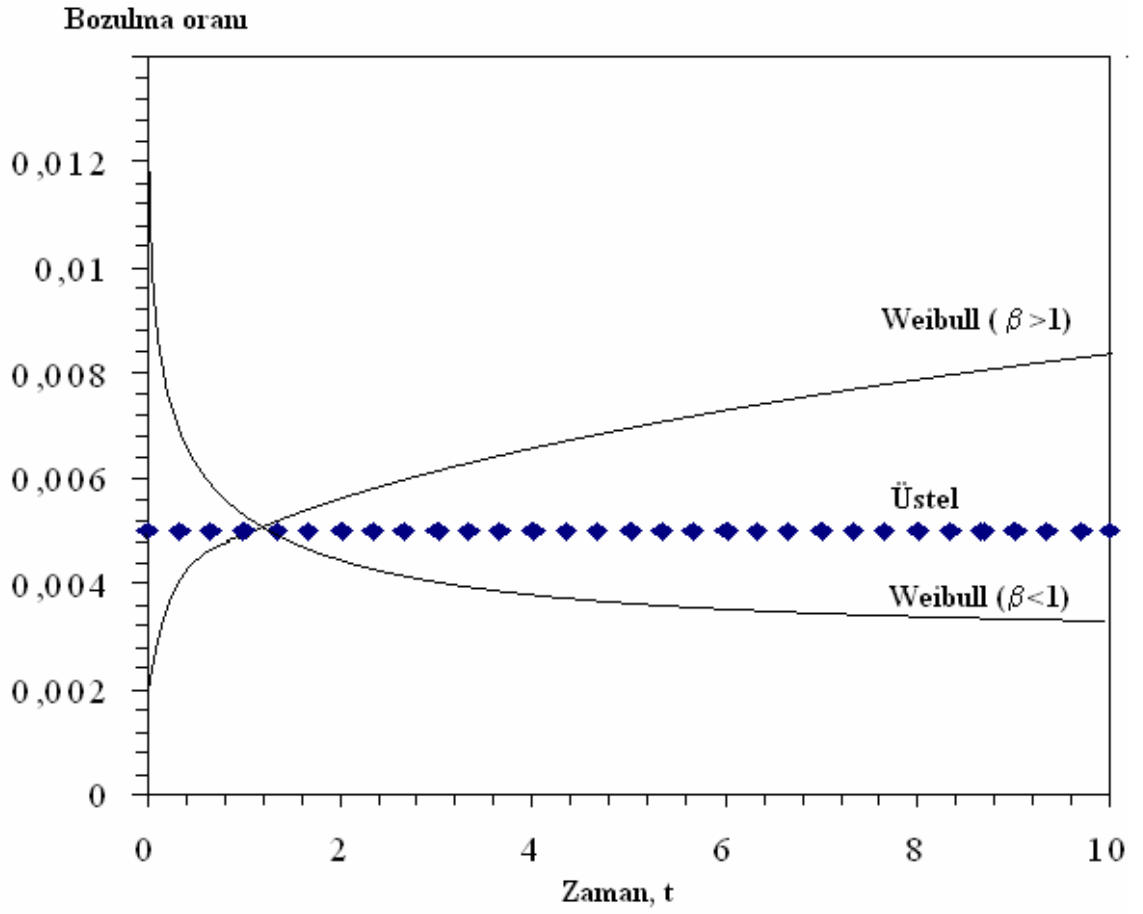
Bir sistemin güvenilirliği ve çalışması o sistemi oluşturan çeşitli elemanların güvenilirliğine bağlıdır. Dayanabileceğinden büyük bir stresin etkisinde kalan bir sistem elemanı ya da malzeme yorulabilir, yorulma kırılması ile gücünü kaybedebilir. Benzer çevre koşulları altında bulunan benzer elemanlar farklı ve önceden kestirilemeyen zamanlarda yorulma nedeniyle kırılabilir ya da bozulabilir.

Weibull dağılımı, İsveçli bilim adamı Wallodi Weibull tarafından 1939 yılında ortaya atılmış yorulma olgusu ile ilgili olasılıksal sorunların çözümünde ömür ve bozulma zamanı hesaplarında sıkça kullanılan bir dağılımdır [103]. Weibull dağılımı uyumlu şekli ve değişken bozulma oranlarının modellenmesine uygun olması nedeni ile ampirik bir model olarak birçok uygulamada başarı ile kullanılmaktadır.

Weibull dağılımı bozulma hızı fonksiyonu (α ve β parametreleri olmak üzere);

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \quad (3.30)$$

şeklindedir. Bu formülde α ölçü parametresi (karakteristik ömür) ve β şekil parametresidir. Şekil parametresi bozulma oranını tanımlayan bir büyüklüktür. $\beta = 1$ değerinde Weibull dağılımı üstel modele dönüşür. Bu durum hata, kaza gibi tesadüfi bozulma olaylarını kuvvet eğrisindeki sabit bozulma oranını modeller. $\beta < 1$ ise bozulma oranı azalmakta, $\beta > 1$ ise bozulma artmaktadır. $\beta < 1$ durumu başlangıçta oluşan erken bozulmaları, üretim hatalarından kaynaklanan bozulmaları, performans düzelmelerini modeller. Bu durum kuvvet eğrisindeki ilk kısımdır. $\beta > 1$ durumu ise aşınma, yorulma, eskime gibi olayları ve yaşlanmadan kaynaklanan bozulma oranı artışını modeller ve kuvvet eğrisindeki son kısma denk düşer. α ve β parametrelerinin değerleri deneysel verilerden hesaplanır [103].



Şekil 3.10: Bozulma oranı fonksiyonları.

Şekil 3.10’da Üstel ve Weibull dağılımın bozulma oranı fonksiyonları görülmektedir.

Belli bir etki altında bırakılan elemanlar her ne kadar aynı zamanda bozulmasalar da ölçülen zamanlar belli bir uyum gösterirler [103]. Elde edilen zamanlardan oluşturulan Weibull dağılımına göre benzer örnekler arasından seçilen bir parçanın bir t zamanından önce bozulma olasılığı

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (3.31)$$

formülünden bulunur. $F(t)$ birikimli olasılık dağılım fonksiyonuna ait (Cumulative Distribution Function, CDF) α ve β parametreleri, gözlem sonuçlarına Maksimum

olabilirlik (Maximum Likelihood), lineer regresyon, grafik ve moment (MOM) metodları uygulanarak hesaplanabilir [103, 104].

Birikimli olasılık dağılım fonksiyonunun türevini alarak olasılık yoğunluk fonksiyonu (Probability Density Function, PDF) $f(t)$ elde edilir.

$$\frac{dF(t)}{dt} = f(t) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad (3.32)$$

Bir parçanın bozulacağı ya da sağlam kalacağı ihtimalinden yola çıkarak bozulma olasılığıyla bozulmama olasılığı toplamının 1 eşit olacağını söyleyebiliriz. Bu durumda parçanın sağlam kalma ihtimali yani güvenilirliği;

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (3.33)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad (3.34)$$

formülünden hesaplanır.

Bu çalışma kapsamında tinal katkıli örnekler için Weibull dağılımı ile güvenilirlik analizi yapılmıştır. Her bir katkı oranı için α ve β parametreleri hesaplanmıştır. Bu parametreler için güvenlik aralığı verilmiştir. Yapılan çalışmanın sonunda ağırlıkça % tinal katkısı ile güvenilirliği veren bir bağıntı elde edilmiştir.

4. BULGULAR

Bu çalışmada bor katkılı polyester örneklerin elektriksel özelliklerinin çıkarılabilmesi için yapılan deneysel çalışmalar, laboratuvar ortamında ASTM D2303 test standartına uygun olarak kurulan test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4.1’de ağırlıkça farklı oranda ve farklı türde bor mineralleri katkılanarak hazırlanan örneklerin deneysel sonuçları verilmiştir. Ağırlıkça % 0.1, % 0.3 ve % 0.5 bor minerali katkılı örnekler hazırlanmış deneyler titreşim etkisi ile yorulmuş ve yorulmamış örnekler üzerinde ASTM D2303 standartına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 4.2’de tinkal minerali ile hazırlanan polyester örneklerin eğik düzlem yüzeyde iz oluşumu deneyleri sonrası katkı oranı ile ömür süresi arasındaki değişim verilmiştir. Her bir katkı oranı için bir temsilci örnek seçilmiş, örnek taranarak görüntüsü ve yüzeyinden akan kaçak akım sinyalleri bu bölümde verilmiştir. Bölüm 4.3’de tinkal katkılı örneklerin üzerinden toplanan kaçak akım sinyalleri Matlab programı kullanılarak Fourier analizi ile harmonik bileşenlerine ayrılmıştır. Kaçak akım sinyalinden temel, 3., 5., 7. ve 9. tek harmonik bileşenleri çıkarılmıştır. Ağırlıkça yapılan katkı oranına göre gruplara ayrılan örneklerden her bir katkı oranı için Bölüm 4.2’de seçilen temsilci örneğin harmonik bileşenleri yanı sıra belirtilen katkı oranı için yapılan deneylerin harmonik distorsiyon değerleri ve toplam harmonik distorsiyon ortalaması bu bölümde verilmiştir.

Bölüm 4.4’de katkısız, ağırlıkça % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 tinkal katkılı örnekler için DSC analizlerinin sonuçları verilmiştir. Bölüm 4.5’de aynı katkı oranlarına sahip örneklerin yüzeyindeki iz oluşumu karakteristikleri taramalı elektron mikroskobu altında incelenmiş ve görüntüler μm ölçek kullanılarak verilmiştir.

Bölüm 4.6’da iz oluşumu deneyleri sonrası örnek yüzeylerindeki iz oluşumu şekilleri FEMLAB 3.2 programında 2 boyutlu olarak birebir modellenmiştir. Böylece iz oluşumu tamamlandığında teorik olarak yüzeydeki bazı noktalardaki elektrik alan değerleri elde edilmiştir. Ayrıca her bir katkı oranı için 3 farklı yüzey bozulması için yapılan modellerin üzerinden okunan maksimum elektrik alan değeri ortalaması alınarak verilmiştir.

Bölüm 4.7’de her bir katkı oranı için yapılan deneylerden elde edilen ömür sürelerinin Weibull 7++ dağılımı çıkarılarak istatistik olarak ömür süreleri saptanmıştır. Her bir katkı oranı için güvenilirlik fonksiyonları elde edilmiş ve sonuçta istatistiksel olarak tüm katkı oranları ile ömrün değişimini yaklaşık olarak veren bir güvenilirlik bağıntısı önerilmiştir.

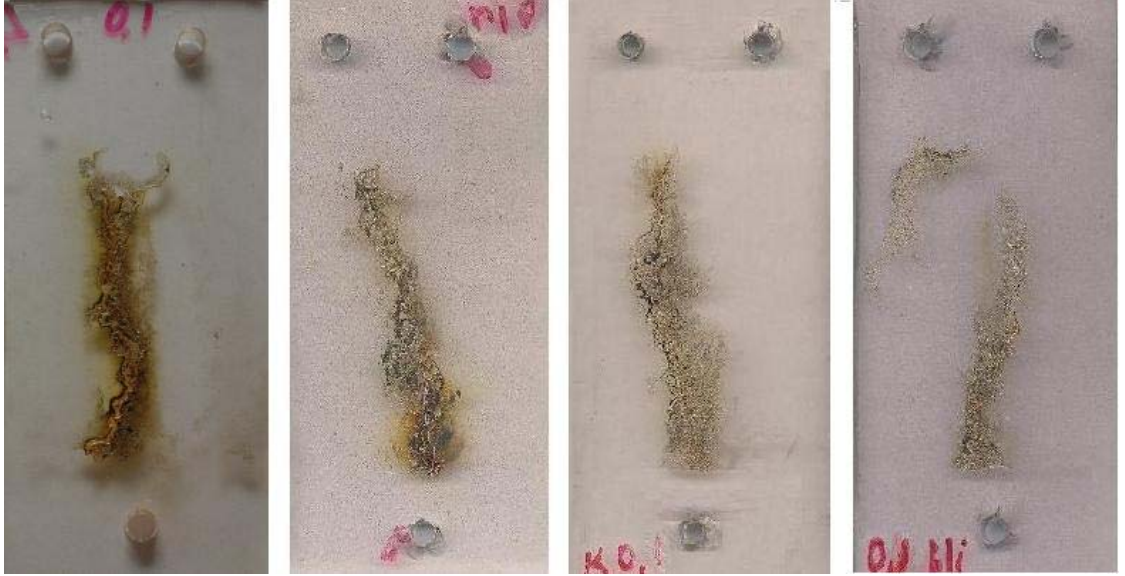
4.1. EĞİK DÜZLEM YÜZEYDE İZ OLUŞUMU DENEYLERİ

Çalışmanın bu bölümünde polyestere partikül boyutu 35 μm olan tinkal, uleksit, kolemanit, sassolit mineralleri ağırlıkça farklı oranlarda katkılanmıştır. Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında polyester yalıtkanın yalıtkanlık özeliğini yitirdiği değer olarak ASTM D2303’de verilen kaçak akımın genliğinin 60 mA değerini 2 saniye süre ile geçmesi koşulu göz önüne alınmıştır.

İlk olarak polyester yalıtkanına katkılan farklı bor minerallerinin etkisi incelenmiştir. Katkılama sonrası polyesterin ömür süresindeki ve yüzey davranışındaki değişim Bölüm 4.1.1’de özetlenmiştir. Daha sonra yine aynı mineraller, aynı oranlarda polyester yalıtkan örneklerle katkılanmış, elde edilen test örnekleri 8 saat süre ile titreşim etkisi altında mekanik olarak yorulmuştur. Yorulan örneklerin eğik düzlem yüzeyde iz oluşumu test yöntemi ile yapılan deneyleri sonucunda ömür sürelerindeki değişim Bölüm 4.1.2’de verilmiştir.

4.1.1. Farklı Bor Mineralleri İle Yapılan İz Oluşumu Deneyleri

Çalışmanın bu bölümünde polyester yalıtkanlara katkılanan farklı bor minerallerinin yüzeyde iz oluşumuna etkisi incelenmiştir. Polyester örneklerle ağırlıkça % 0.1, % 0.3 ve % 0.5 oranlarında tinkal, uleksit, kolemanit ve sassolit mineralleri ayrı ayrı katkılanmıştır. ASTM D2303 test standartına uygun olarak gerçekleştirilen deneylerin sonucunda örnek yüzeyindeki iz oluşumları ağırlıkça % 0.1 katkı oranı için Şekil 4.1’de, ağırlıkça % 0.3 katkı oranı için Şekil 4.2’de ve ağırlıkça % 0.5 katkı oranı için Şekil 4.3’de görülmektedir. Deneylerde her bir bor minerali ve katkı oranı için toplam 5 adet örnek test edilmiş ve elde edilen ortalama ömür süreleri Tablo 4.1’de verilmiştir.



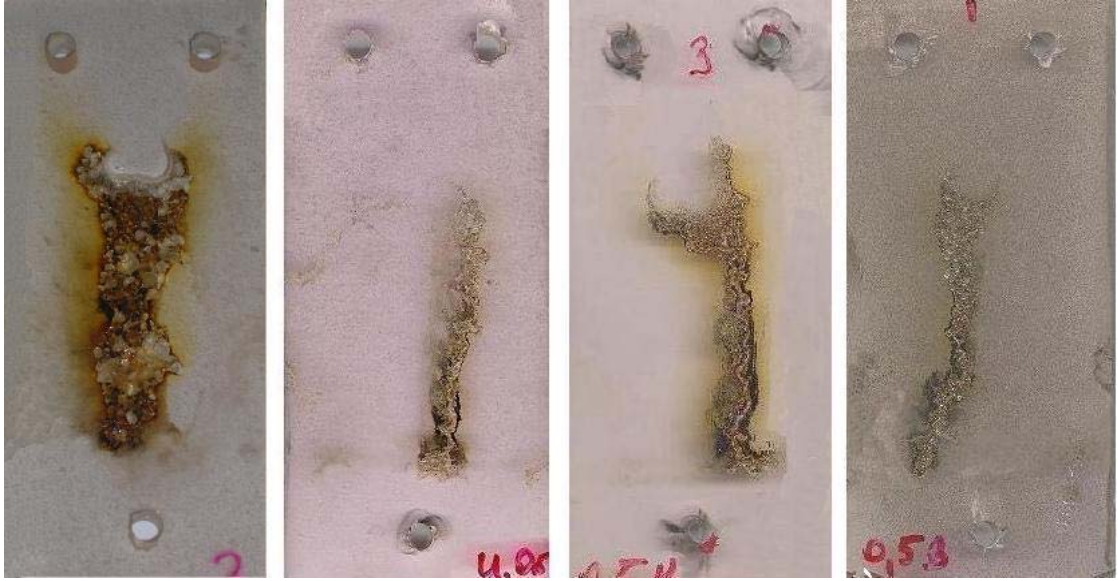
Şekil 4.1: Ağırlıkça % 0.1 oranında farklı bor mineralleri ile hazırlanan örneklerden birinin yüzeyde iz oluşumu deneyi sonrası görüntüleri

a) Tinkal, b) Uleksit, c) Koleanit, d) Sassolit katkılı polyester örnek



Şekil 4.2: Ağırlıkça % 0.3 oranında farklı bor mineralleri ile hazırlanan örneklerden birinin yüzeyde iz oluşumu deneyi sonrası görüntüleri

a) Tinkal, b) Uleksit, c) Koleanit, d) Sassolit katkılı polyester örnek



Şekil 4.3: Ağırlıkça % 0.5 oranında farklı bor mineralleri ile hazırlanan örneklerden birinin yüzeyde iz oluşumu deneyi sonrası görüntüleri

a) Tinkal, b) Uleksit, c) Kolemanit, d) Sassolit katkılı polyester örnek

Katkısız polyester örnekler ile yapılan deneyler sonrasında ortalama ömür süresi 18:06 dakika olarak bulunmuştur. Tablo 4.1'deki değerler ile karşılaştırıldığında bu sürenin bor minerallerinin polyestere katkılanması ile arttığı görülmektedir. Ağırlıkça % 0.1 oranında yapılan katkılamada, tinkal ve kolemanit mineralleri polyesterin ömür süresini iki kat arttırırken uleksit ve sassolit, polyesterin ömrünü sırasıyla % 54 ile % 107 oranlarında arttırmıştır. Ağırlıkça % 0.3 oranında yapılan katkılamada, tinkal, uleksit, sassolit ve kolemanit mineralleri, polyesterin ömrünü sırasıyla % 228.9, % 83.94, % 93.9 ve % 200.4 oranlarında arttırmıştır. Bu artma eğilimi ağırlıkça % 0.5 oranında katkılamada da devam etmiş ve katkısız polyester örneğe yapılan tinkal, uleksit, sassolit ve kolemanit katkılaması sonrası ömür süresi sırasıyla, % 204.6, % 178.7, % 145.1 ve % 299.1 oranlarında arttırmıştır.

Tablo 4.1: Farklı bor mineralleri ile hazırlanan ağırlıkça farklı konsantrasyonlara sahip polyester örneklerin ortalama ömür süreleri.

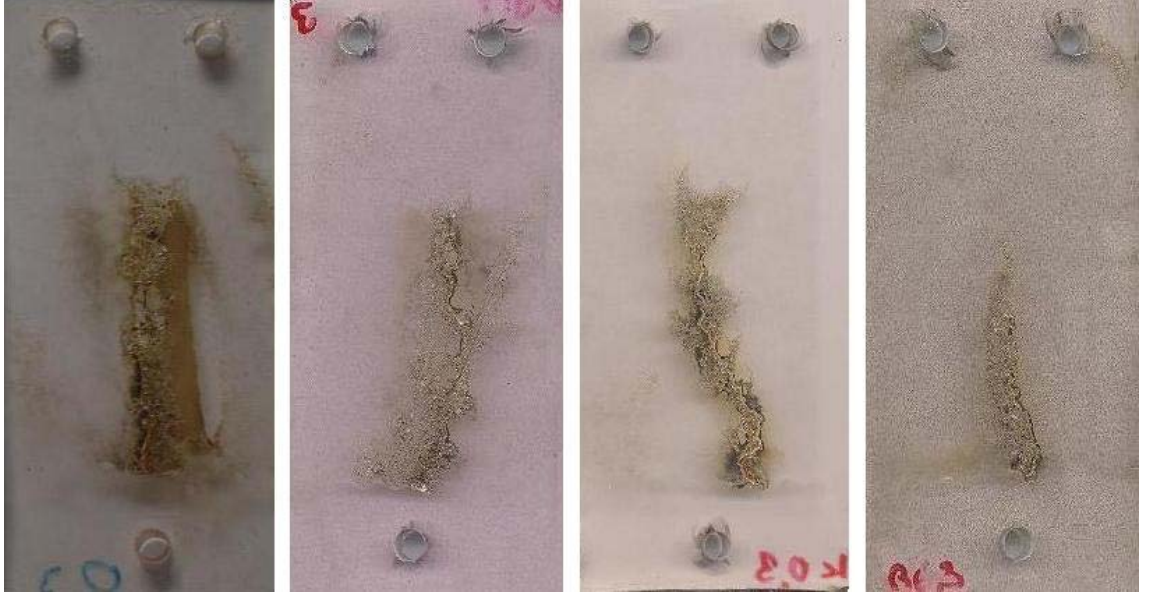
Bor minerali	Ağırlıkça katkı oranları, [%]		
	0.1	0.3	0.5
Tinkal	42:06	59:41	55:01
Uleksit	27:16	33:22	50:34
Sassolit	28:37	35:02	44:27
Kolemanit	37:38	54:26	72:08

4.1.2. Titreşim Etkisi ile Yorulma Sonrası Farklı Bor Mineralleri İle Yapılan İz Oluşumu Deneyleri

Çalışmanın bu bölümünde farklı türde ve konsantrasyonda bor minerali içeren örnekler titreşim etkisi altında yorulmuş ve sonrasında eğik düzlem yüzeyde iz oluşumu deneyi ile ömür sürelerindeki değişim incelenmiştir. Bu amaçla hazırlanan deney sisteminde diğer dış etkenler (rutubet, sıcaklık, gerilim, sıvı akış hızı vb.) sabit tutularak katkısız ve katkılı örnekler 8 saat süre ile ayrı ayrı mekanik titreşim etkisi altında bırakılmıştır. Örneklerin yerleştirildiği zemin ve örnek üzerindeki titreşim hızı, titreşim motorunu besleyen gerilim kaynağı ile kontrol edilmiştir. Örnek üzerindeki ve zemindeki titreşim değerleri, her örnek için titreşim ve hava şoku izleme cihazı ile ölçülmüştür. Ortalama titreşim hızı zemin üzerinde 27.2 cm/s polimerik yalıtkanın üzerinde 34.6 cm/s olarak polyester örneğin bulunduğu yerin rezonans değerine yakın tutularak yorulmuştur. Deneyler sırasında ağırlıkça % 0.1, % 0.3 ve % 0.5 oranında farklı bor mineralleri içeren örnekler Eğik Düzlem Yüzeyde İz Oluşumu Test standardına (ASTM D2303) uygun olarak denenmiştir.

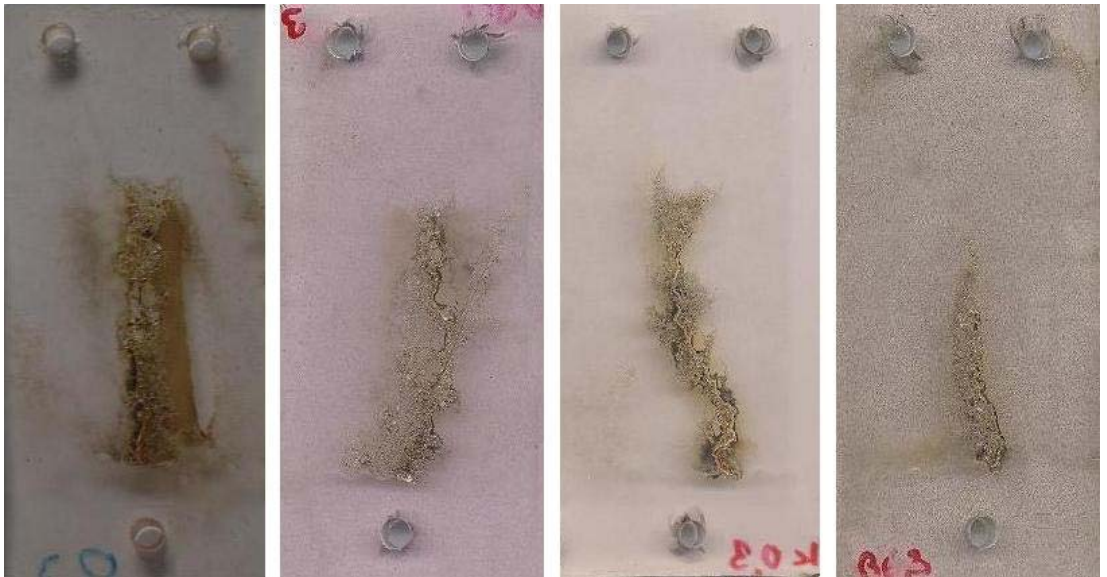
Şekil 4.4’de tinkal, uleksit, kolemanit ve sassolit mineralleri ağırlıkça % 0.1 oranında katkılanarak hazırlanmış titreşim etkisi ile yorulmuş örneklerin iz oluşumu sonrası

yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da sırasıyla ağırlıkça % 0.3 ve % 0.5 oranında katkılama yapılarak hazırlanan önceden yorulmuş örneklerin yüzeyleri görülmektedir.



Şekil 4.4: Ağırlıkça % 0.1 oranında farklı bor mineralleri ile hazırlanan mekanik titreşim etkisi ile yorulmuş örneklerden birine ait iz oluşumları.

a) Tinkal, b) Uleksit, c) Kolemanit, d) Sassolit katkılı polyester örnek



Şekil 4.5: Ağırlıkça % 0.3 oranında farklı bor mineralleri ile hazırlanan mekanik titreşim etkisi ile yorulmuş örneklerden birine ait iz oluşumları.

a) Tinkal, b) Uleksit, c) Kolemanit, d) Sassolit katkılı polyester örnek



Şekil 4.6: Ağırlıkça % 0.5 oranında farklı bor mineralleri ile hazırlanan mekanik titreşim etkisi ile yorulmuş örneklerden birine ait iz oluşumları.

a) Tinkal, b) Uleksit, c) Kolemanit, d) Sassolit katkılı polyester örnek

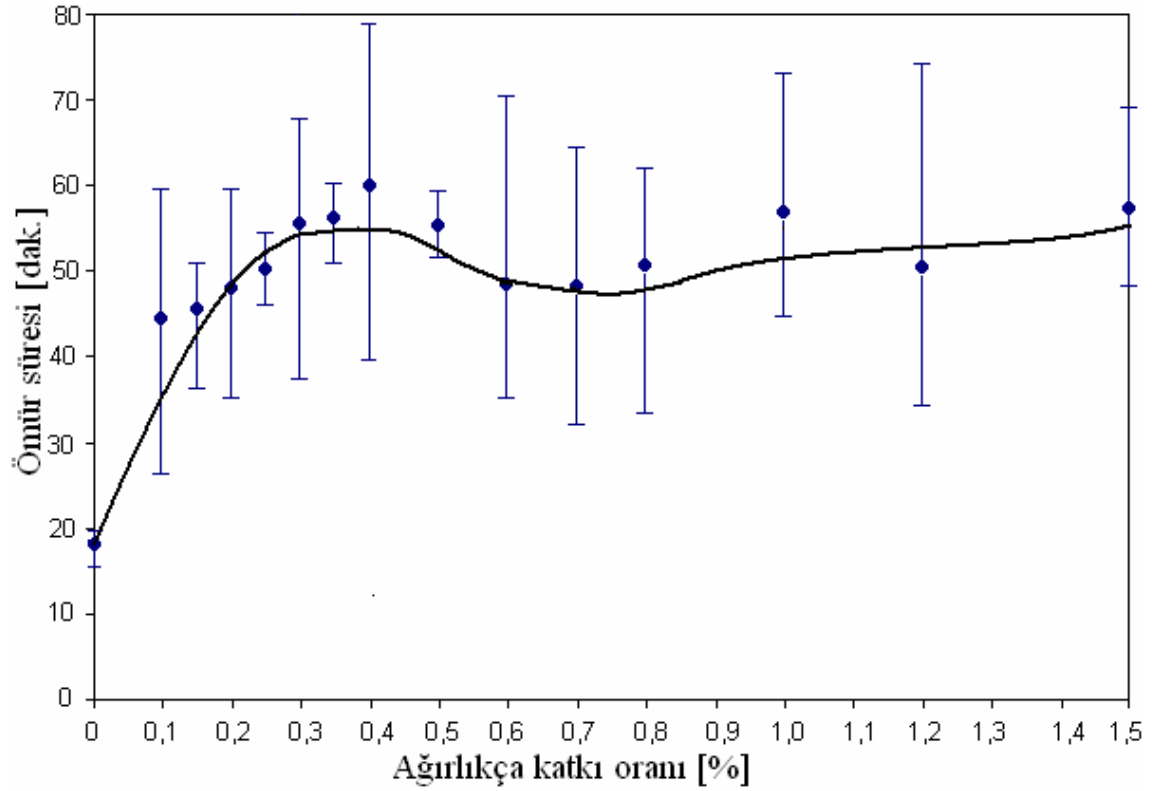
Deneylerde her bir bor minerali ve katkı oranı için toplam 5 adet örnek test edilmiş ve elde edilen ortalama ömür süreleri Tablo 4.2’de verilmiştir. Titreşim etkisi altında mekanik olarak yorulan katkısız polyester yalıtkan örnekler ile yapılan çalışmalar sonucunda ortalama ömür süresi 11:02 dakika olarak bulunmuştur. Farklı türde ve oranlarda bor mineralleri ile yapılan çalışmalar sonucunda ağırlıkça % 0.1 oranında yapılan katkılama sonrası yalnızca kolemanit mineralinin ömür süresi katkılama ile % 64.88 artmıştır. Tinkal, uleksit ve sassolit için ise ağırlıkça % 0.1 katkılama sonrası ömür sırasıyla % 25.68, % 16.15 ve % 35.1 azalmıştır. Katkılama oranı ağırlıkça % 0.3 olarak yapıldığında tinkal ve kolemanit mineralleri için ömür % 9.1 ve % 85.2 artarken uleksit ve sassolit için % 32.7 ve % 25.9 azalmıştır. Ağırlıkça % 0.5 bor minerali katkılaması sonrası ömür süresindeki değişim tüm mineraller için katkısız polyester yalıtkanla oranla artmıştır. Bu artış tinkal, kolemanit, uleksit ve sassolit mineralleri için sırasıyla % 36.5, % 121.6, % 55.9 ve % 18.3 oranında gerçekleşmiştir.

Tablo 4.2: Farklı bor mineralleri ile hazırlanan ağırlıkça farklı konsantrasyonlara sahip mekanik titreşim etkisi ile yorulmuş örneklerin ortalama ömür sürelerinin değişimi.

Bor minerali	Ağırlıkça katkı oranları, [%]		
	0.1	0.3	0.5
Tinkal	8:19	12:02	15:04
Uleksit	9:24	7:42	13:04
Sassolit	7:15	8:17	17:18
Kolemanit	18:17	20:41	24:42

4.2. TİNKAL MİNERALİ İLE YAPILAN İZ OLUŞUMU DENEYLERİ

Çalışmanın bu bölümünde tinkal minerali kullanılarak ağırlıkça % 0.1 ile % 1.5 arasında değişen oranlarda katkılamalar yapılarak hazırlanan örnekler ile deneyler gerçekleştirilmiştir. ASTM D2303 test standartına uygun olarak gerçekleştirilen deneylerde katkısız örnekler için 8 adet ve her bir katkı oranı için 12 adet toplam 132 adet örnek kullanılmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi için her bir katkı oranı için bir örnek yüzeyi ve o örneğe ait kaçak akım işareti referans olarak aşağıda verilmiştir. Tinkal konsantrasyonunun polyester örneğin kullanım süresine olan etkisine ait yüzeyde iz oluşumu deney sonuçlarının ortalamaları Şekil 4.7’de grafik olarak verilmiştir.

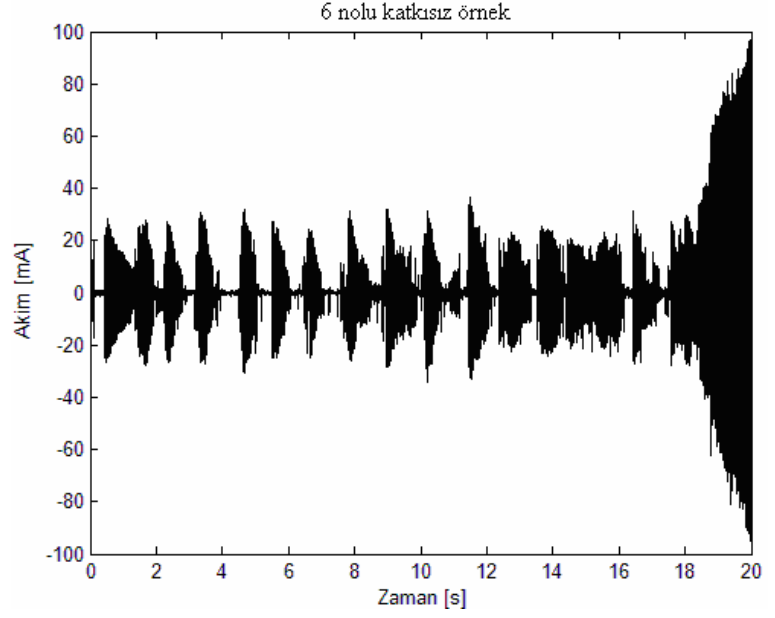


Şekil 4.7: Polyestere ağırlıkça % tinkal katkısının ömür süresine olan etkisine ait deneysel sonuçlar ve ortalamaları.

Katkısız polyester örneğe ait deney sonucu yüzey görüntüsü ve kaçak akım işaretinin değişimi Şekil 4.8’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.8: Katkısız polyester örneğe ait

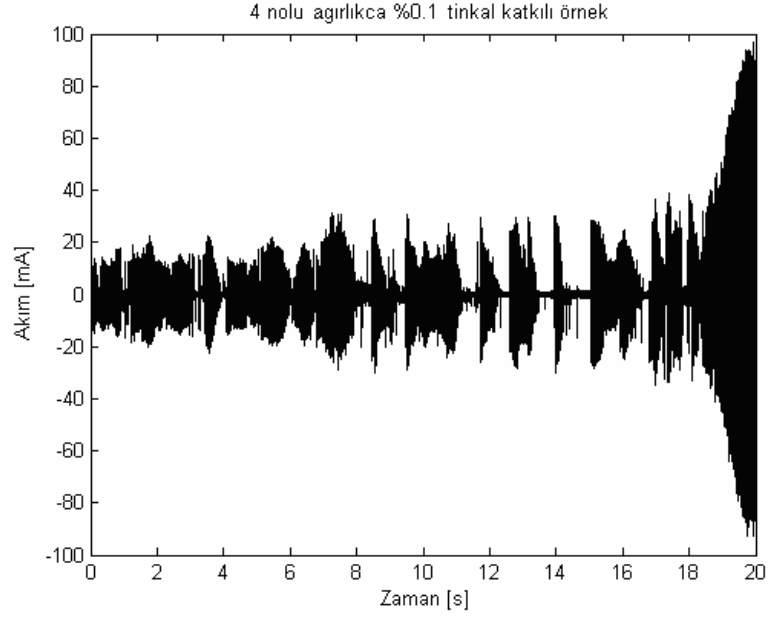
a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi

b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.

Ağırlıkça % 0.1 tinkal katkılı polyester örneğe ait deney sonucu yüzey görüntüsü ve kaçak akım işaretinin değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.9: Ağırlıkça % 0.1 tinkal katkılı polyester örneğe ait

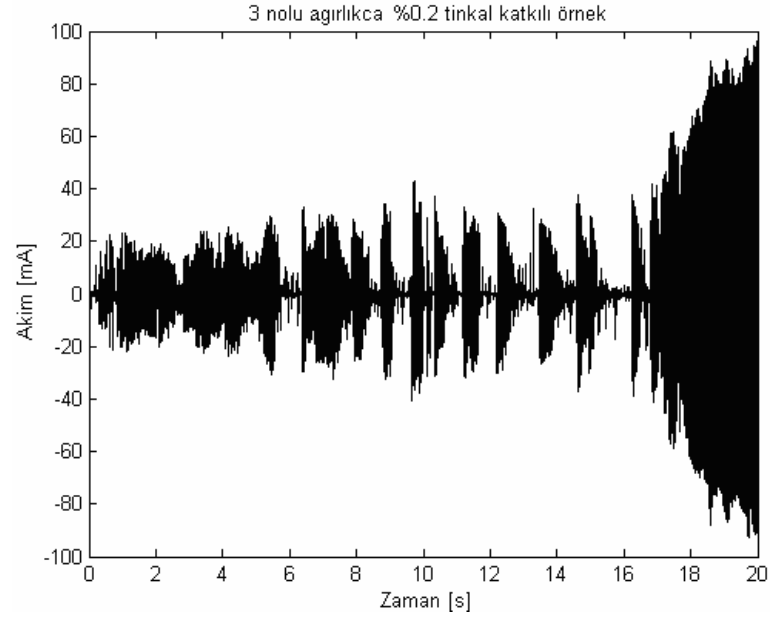
a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi

b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.

Ağırlıkça % 0.2 tinkal katkılı polyester örneğe ait deney sonucu yüzey görüntüsü ve kaçak akım işaretinin değişimi Şekil 4.10'da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.10: Ağırlıkça % 0.2 tinkal katkılı polyester örneğe ait

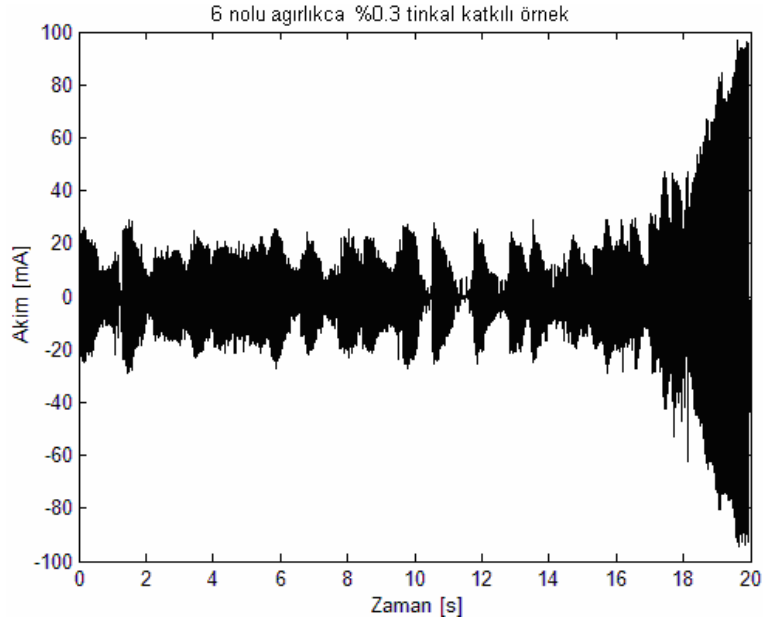
a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi

b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.

Ağırlıkça % 0.3 tinkal katkılı polyester örneğe ait deney sonucu yüzey görüntüsü ve kaçak akım işaretinin değişimi Şekil 4.11’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.11: Ağırlıkça % 0.3 tinkal katkılı polyester örneğe ait

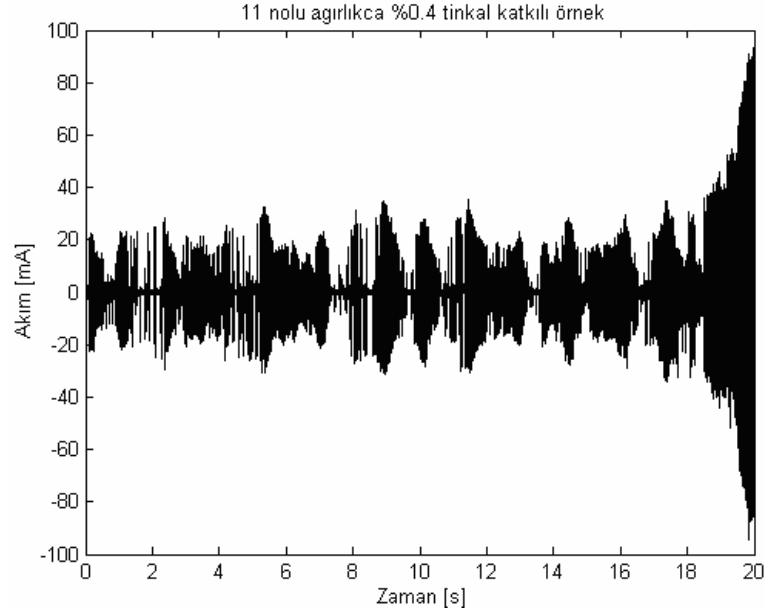
a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi

b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.

Ağırlıkça % 0.4 tinkal katkılı polyester örneğe ait deney sonucu yüzey görüntüsü ve kaçak akım işaretinin değişimi Şekil 4.12’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.12: Ağırlıkça % 0.4 tinkal katkılı polyester örneğe ait

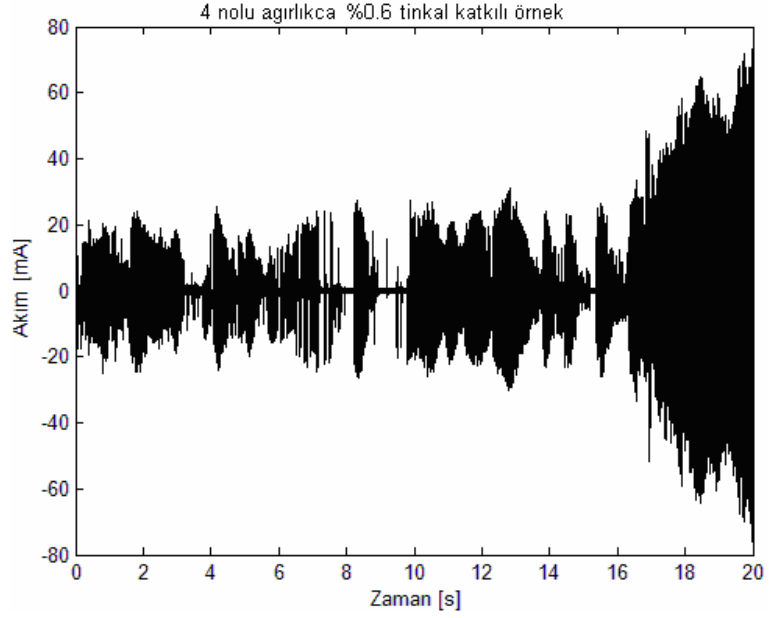
a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi

b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.

Ağırlıkça % 0.6 tinkal katkılı polyester örneğe ait deney sonucu yüzey görüntüsü ve kaçak akım işaretinin değişimi Şekil 4.13’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.13: Ağırlıkça % 0.6 tinkal katkılı polyester örneğe ait

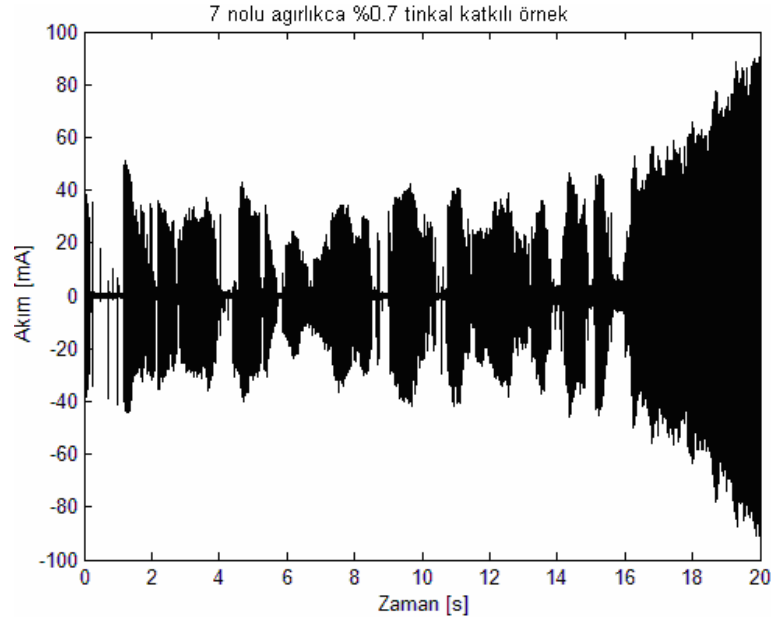
a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi

b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.

Ağırlıkça % 0.7 tinkal katkılı polyester örneğe ait deney sonucu yüzey görüntüsü ve kaçak akım işaretinin değişimi Şekil 4.14’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.14: Ağırlıkça % 0.7 tinkal katkılı polyester örneğe ait

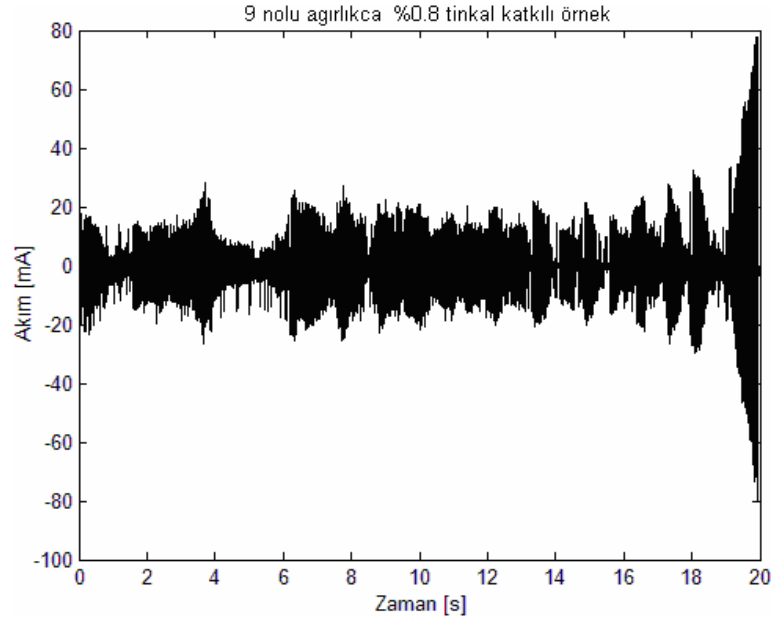
a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi

b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.

Ağırlıkça % 0.8 tinkal katkılı polyester örneğe ait deney sonucu yüzey görüntüsü ve kaçak akım işaretinin değişimi Şekil 4.15’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.15: Ağırlıkça % 0.8 tinkal katkılı polyester örneğe ait

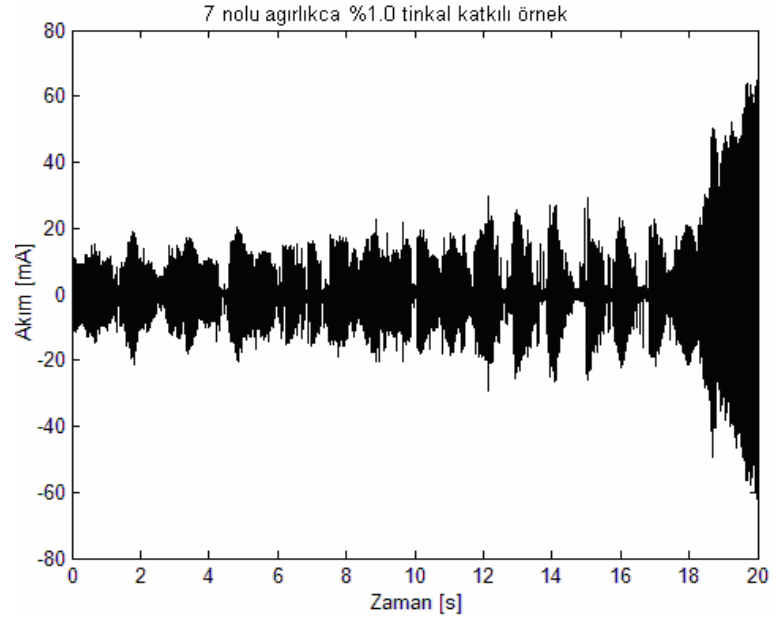
a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi

b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.

Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı polyester örneğe ait deney sonucu yüzey görüntüsü ve kaçak akım işaretinin değişimi Şekil 4.16'da verilmiştir.



(a)



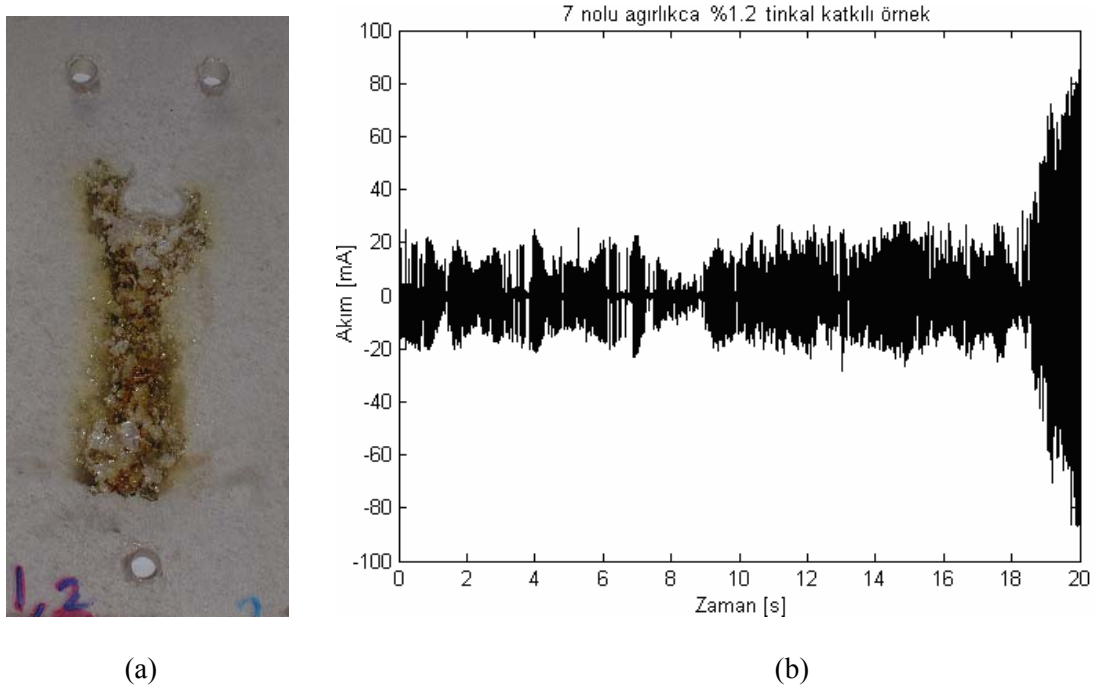
(b)

Şekil 4.16: Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı polyester örneğe ait

a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi

b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.

Ağırlıkça % 1.2 tinkal katkıli polyester örneğe ait deney sonucu yüzey görüntüsü ve kaçak akım işaretinin değişimi Şekil 4.17’de verilmiştir.

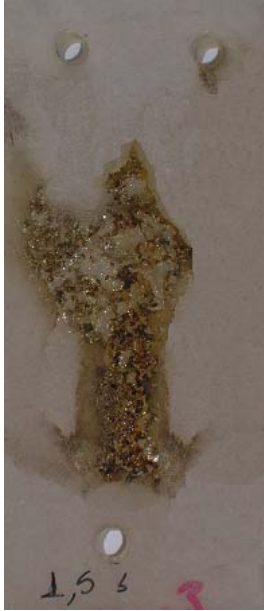


Şekil 4.17: Ağırlıkça % 1.2 tinkal katkıli polyester örneğe ait

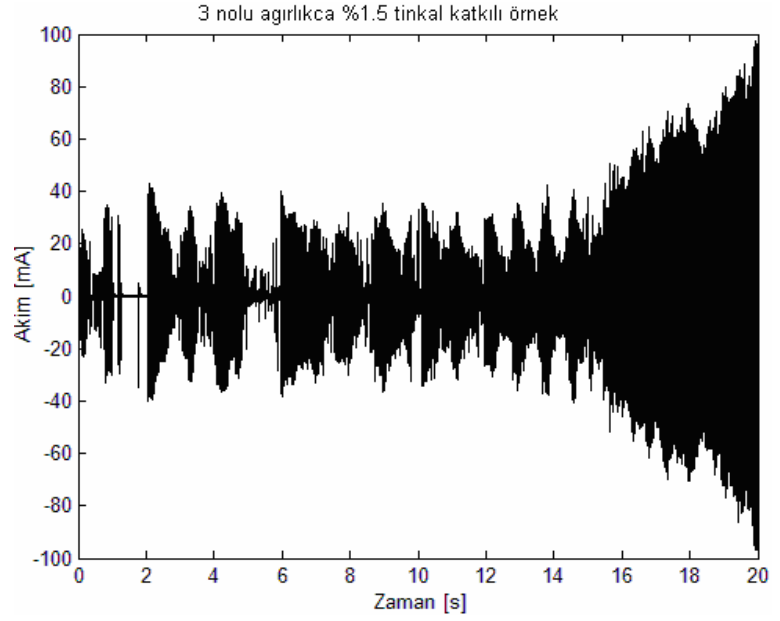
a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi

b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.

Ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı polyester örneğe ait deney sonucu yüzey görüntüsü ve kaçak akım işaretinin değişimi Şekil 4.18’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.18: Ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı polyester örneğe ait

a) İz oluşumu tamamlandıktan sonraki örnek yüzeyi

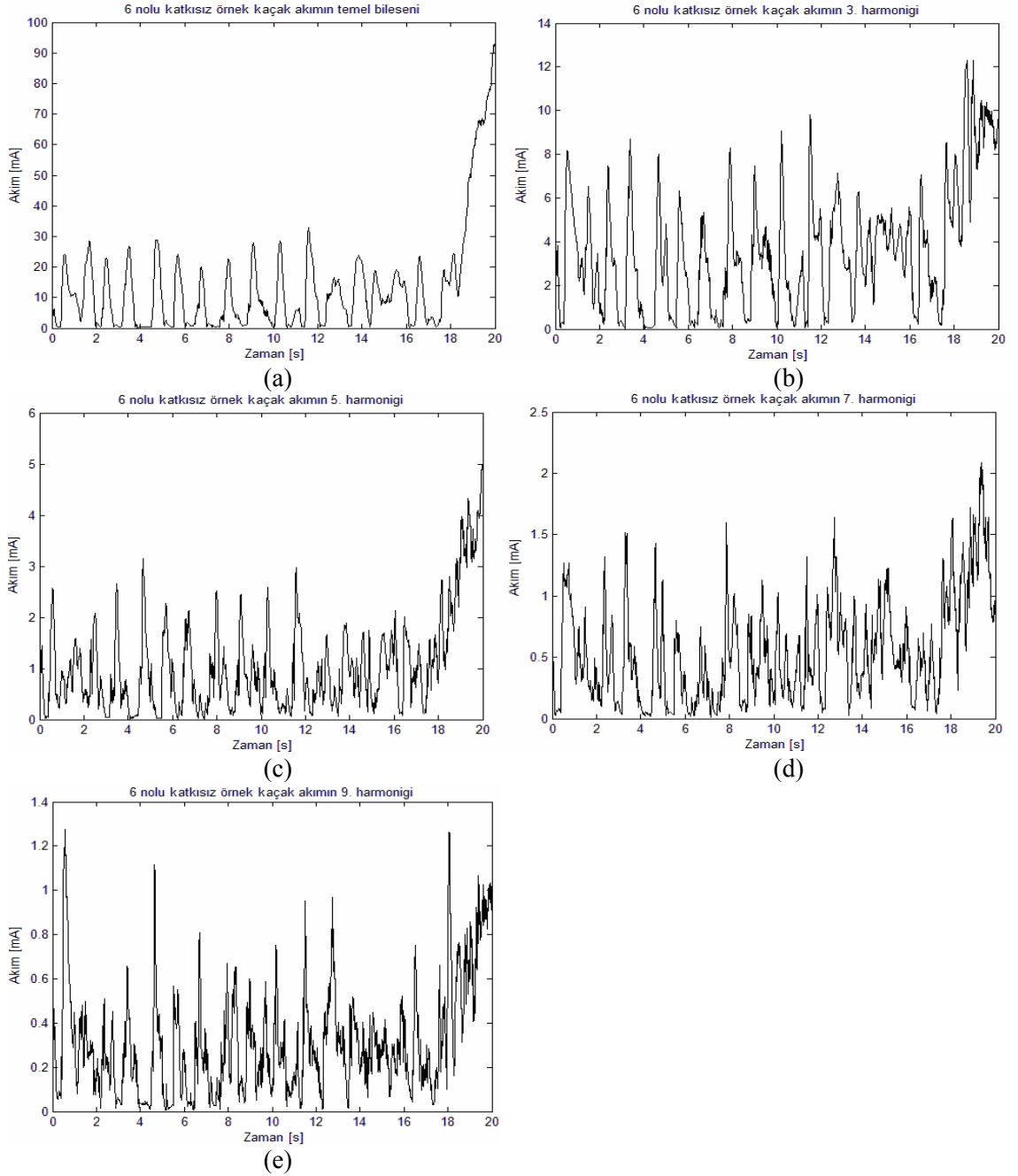
b) örnek yüzeyinden alınan kaçak akım işaretinin bozulma tamamlanmadan önceki son 20 saniyesi.

4.3. FOURIER ANALİZİ

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen eğik düzlem yüzeyde iz oluşumu deneylerinde deneylerin tamamlandığını belirten durumlardan biri olan örnek yüzeyinden akan kaçak akımının genlik değerinin 60 mA’i geçmesi ifadesi göz önüne alınarak deneyler tamamlanmıştır. Bölüm 3.2’de belirtildiği gibi örnek yüzeyindeki toprak elektrota seri bağlı bir ampermetreden deney boyunca kaçak akım değeri kaydedilmiştir. Kaydetme işlemi sırasında kaçak akım işaretindeki bozulmaların takip edilebilmesi için örnekleme 48 000 örnek/saniye ile yapılmıştır. Toplanan veriler bilgisayar ortamında harmonik bileşenlerine ayrılmıştır. Yapılan çalışma sonrasında örneklerin bozulma davranışının incelenmesinde bozulma gerçekleşmeden önceki son 20 saniyenin kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.

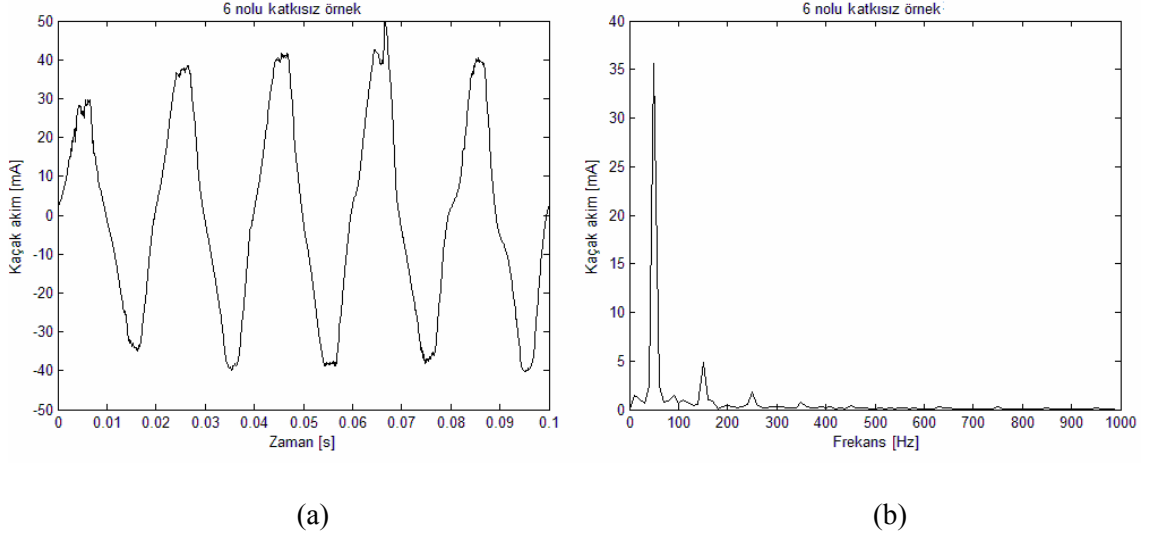
Bu bölümde katkısız ve tinkal katkılı polyester örnekler ile gerçekleştirilen deneylerden her bir katkı oranı için Bölüm 4.2’de verilen temsilci örneğin kaçak akım işareti temel, 3., 5., 7. ve 9. tek harmonik bileşenleri ayrı ayrı verilmiştir. Daha sonra seçilen temsilci örneğin bozulma öncesi harmonik distorsiyonları çıkarılmıştır. Harmonik distorsiyon ve toplam harmonik distorsiyonlar elde edilirken örnek yüzeyinden 60 mA ve üzeri akım geçmeden hemen önceki son 100 ms kullanılmıştır. Çalışmanın son kısmında Tablo 4.14’de katkısız ve tinkal katkılı örnekler için yapılan tüm deneylerden elde edilen işaretlerin 9. harmoniğe kadar olan harmonik distorsiyonlarının ortalamaları verilmiştir.

Katkısız polyester örnek yüzeyinde iz oluşumu gerçekleşirken ve iz oluşumu tamamlanırken elde edilen kaçak akımın temel ve harmonik bileşenleri Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.

Katkısız polyester örnek yüzeyinden elde edilen kaçak akımın genlik değerinin 60 mA’i geçmeden önceki son 100 ms ve alınan bu işarete ait FFT Şekil 4.20’de verilmiştir. Ayrıca Tablo 4.3’de temsilci örnek ve katkısız örneklerden elde edilen kaçak akımın tek harmonik distorsiyonlarının ortalamaları verilmiştir.

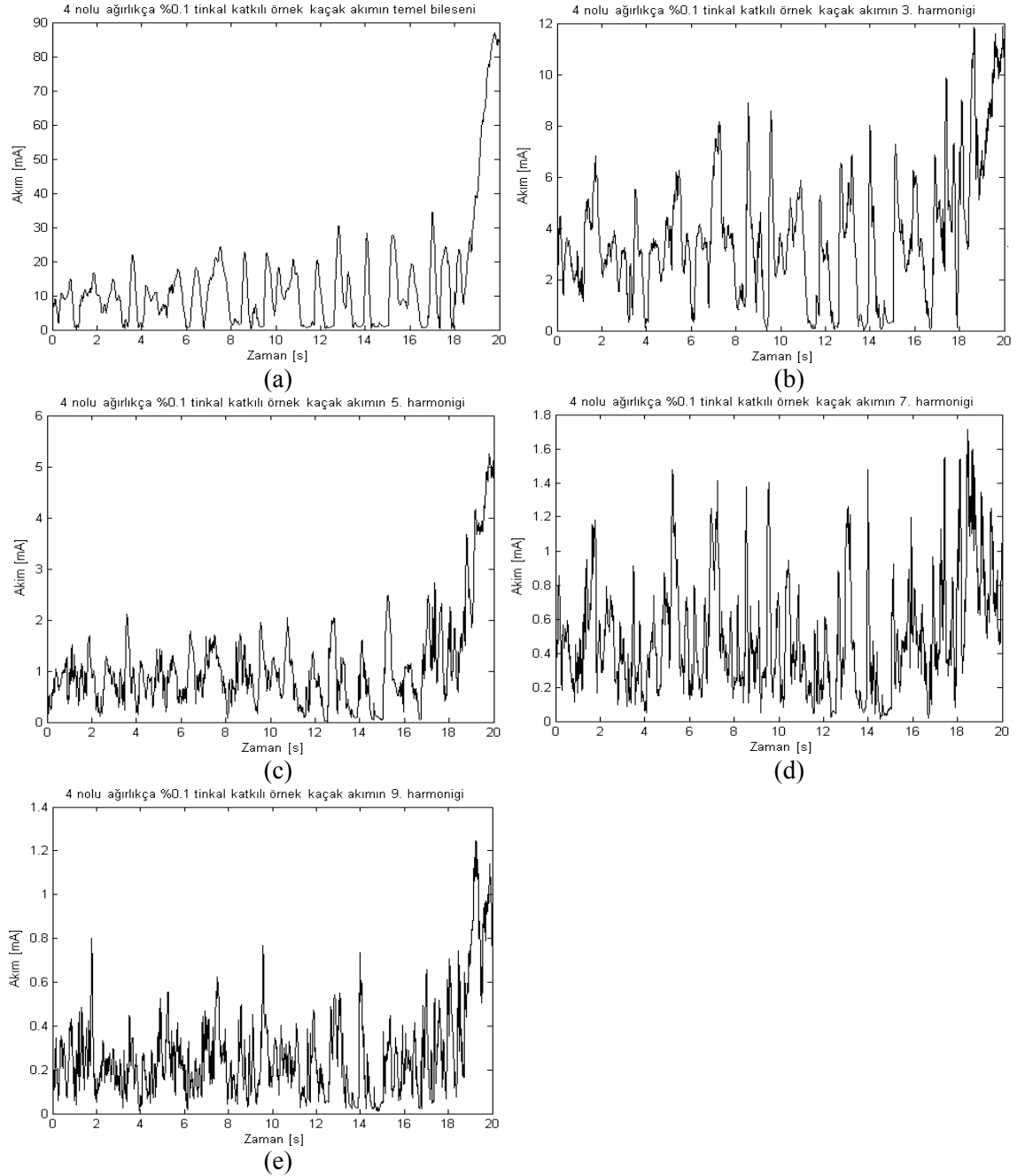


Şekil 4.20: Katkısız polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değeri 60 mA’i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.

Tablo 4.3: Katkısız polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.

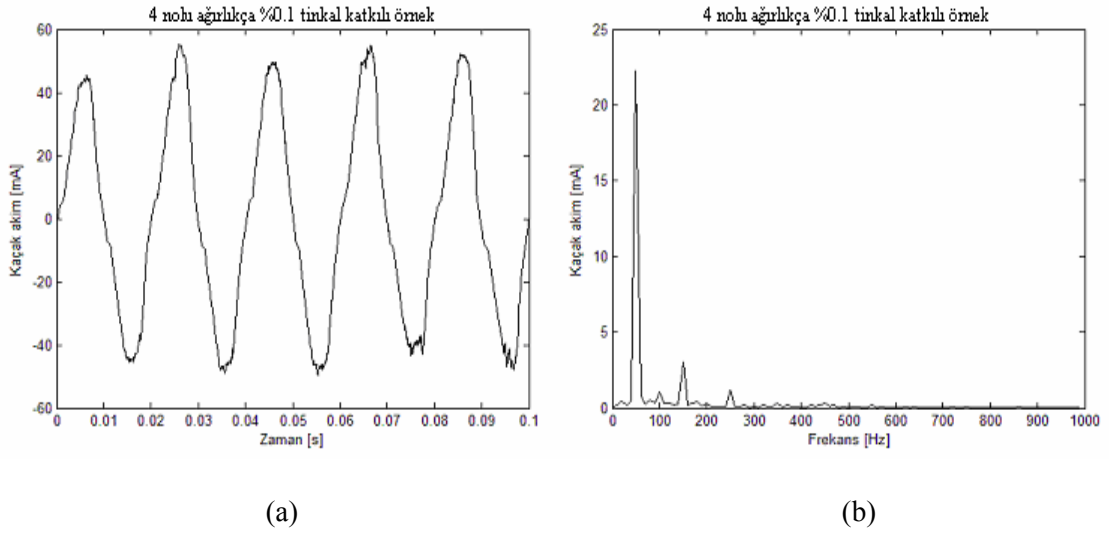
İz oluşumu sırasında gözlenen dalga şekline ait HD (60 mA’i geçmeden önceki), [%]	HD ₁₃	HD ₁₅	HD ₁₇	HD ₁₉	THD
	13.74	5.02	2.21	1.28	14.85
Ortalama, [%]	14.864	4.663	2.318	1.351	15.808

Ağırlıkça % 0.1 tinkal katkılı örnek yüzeyinde iz oluşumu gerçekleşirken ve iz oluşumu tamamlanırken elde edilen kaçak akımın temel ve harmonik bileşenleri Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21 a-e: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.

Ağırlıkça % 0.1 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinden elde edilen kaçak akımın genlik değerinin 60 mA’i geçmeden önceki son 100 ms ve alınan bu işarete ait FFT Şekil 4.22’de verilmiştir. Ayrıca Tablo 4.4’de temsilci örnek ve ağırlıkça % 0.1 tinkal katkılı örneklerden elde edilen kaçak akımın tek harmonik distorsiyonlarının ortalamaları verilmiştir.

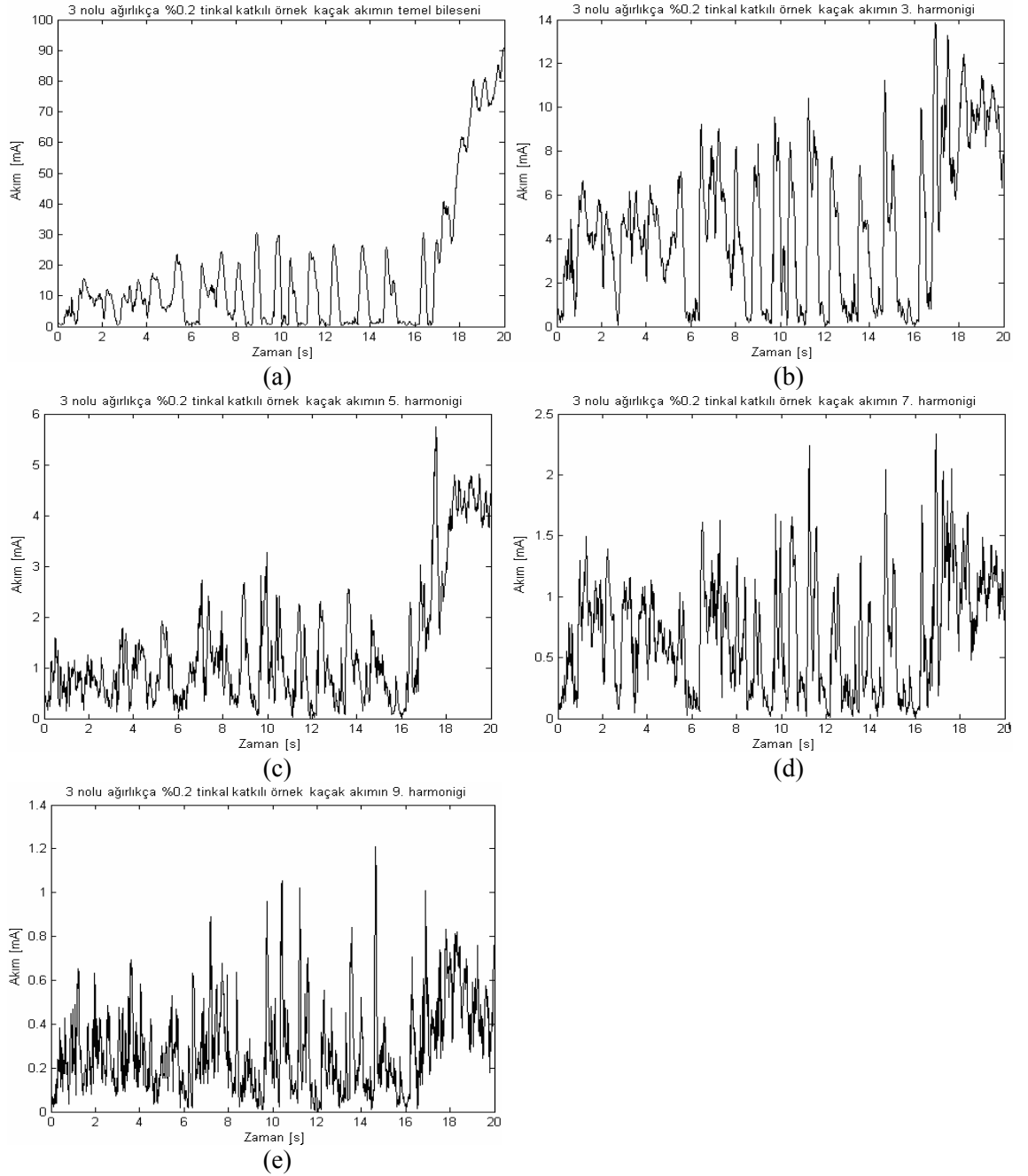


Şekil 4.22: Ağırlıkça % 0.1 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA’i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.

Tablo 4.4: Ağırlıkça % 0.1 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.

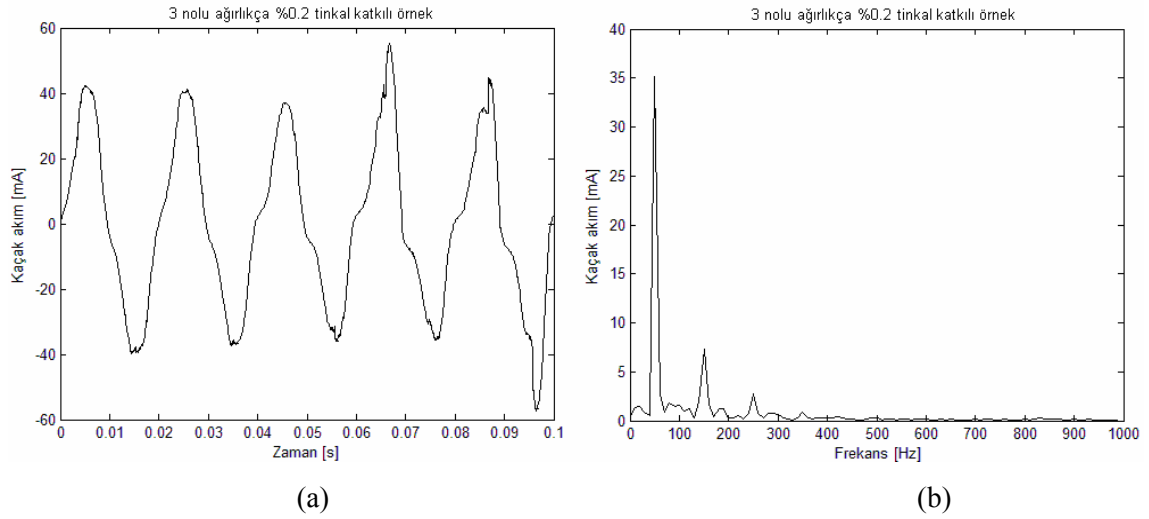
İz oluşumu sırasında gözlenen dalga şekline ait HD (60 mA’i geçmeden önceki), [%]	HD ₁₃	HD ₁₅	HD ₁₇	HD ₁₉	THD
	13.61	5.43	1.51	1.44	14.81
Ortalama, [%]	18.881	6.328	2.396	1.505	20.113

Ağırlıkça % 0.2 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde iz oluşumu gerçekleşirken ve iz oluşumu tamamlanırken elde edilen kaçak akımın temel ve harmonik bileşenleri Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.23 a-e: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.

Ağırlıkça % 0.2 tinkal katkıli polyester örnek yüzeyinden elde edilen kaçak akımın genlik değerinin 60 mA’i geçmeden önceki son 100 ms ve alınan bu işarete ait FFT Şekil 4.22’de verilmiştir. Ayrıca Tablo 4.5’de temsilci örnek ve ağırlıkça % 0.2 tinkal katkıli örneklerden elde edilen kaçak akımın tek harmonik distorsiyonlarının ortalamaları verilmiştir.

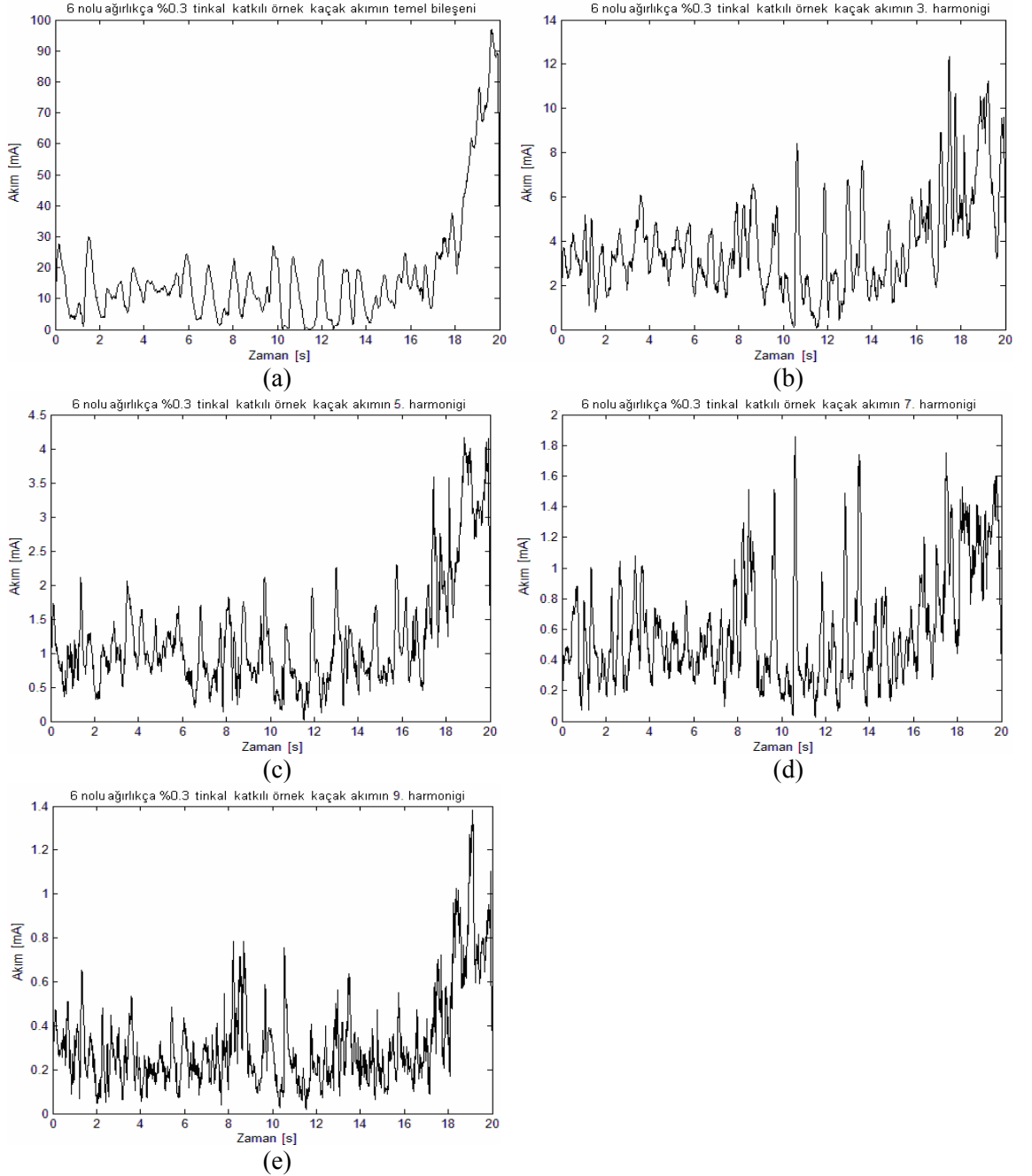


Şekil 4.24: Ağırlıkça % 0.2 tinkal katkıli polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA’i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.

Tablo 4.5: Ağırlıkça % 0.2 tinkal katkıli polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.

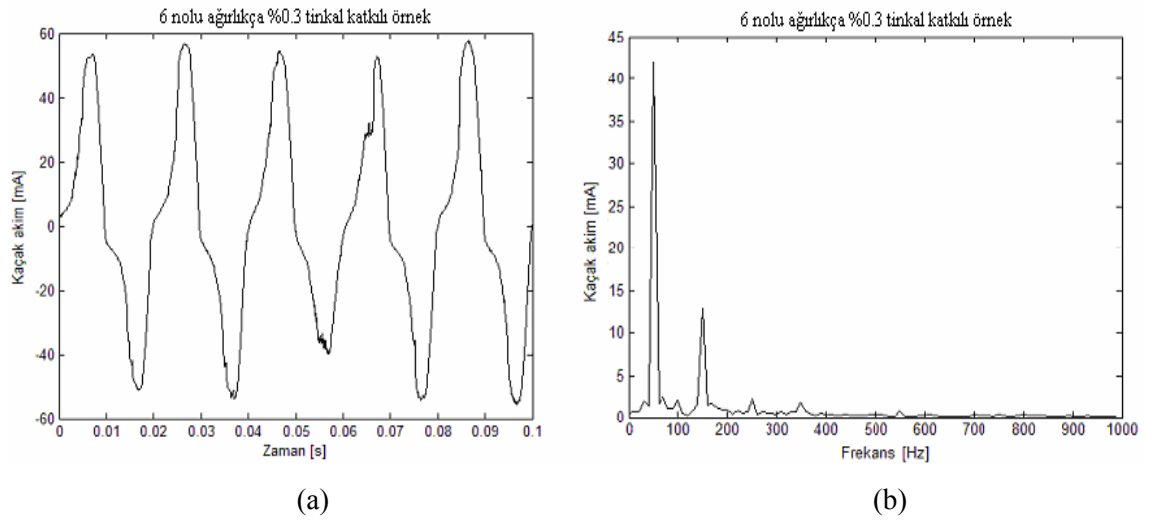
İz oluşumu sırasında gözlenen dalga şekline ait HD (60 mA’i geçmeden önceki), [%]	HD _{I3}	HD _{I5}	HD _{I7}	HD _{I9}	THD
	20.26	7.62	2.45	0.41	21.79
Ortalama, [%]	20.171	6.921	1.677	0.827	21.407

Ağırlıkça % 0.3 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde iz oluşumu gerçekleşirken ve iz oluşumu tamamlanırken elde edilen kaçak akımın temel ve harmonik bileşenleri Şekil 4.25’de verilmiştir.



Şekil 4.25 a-e: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.

Ağırlıkça % 0.3 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinden elde edilen kaçak akımın genlik değerinin 60 mA’i geçmeden önceki son 100 ms ve alınan bu işarete ait FFT Şekil 4.26’da verilmiştir. Ayrıca Tablo 4.6’da temsilci örnek ve ağırlıkça % 0.3 tinkal katkılı örneklerden elde edilen kaçak akımın tek harmonik distorsiyonlarının ortalamaları verilmiştir.

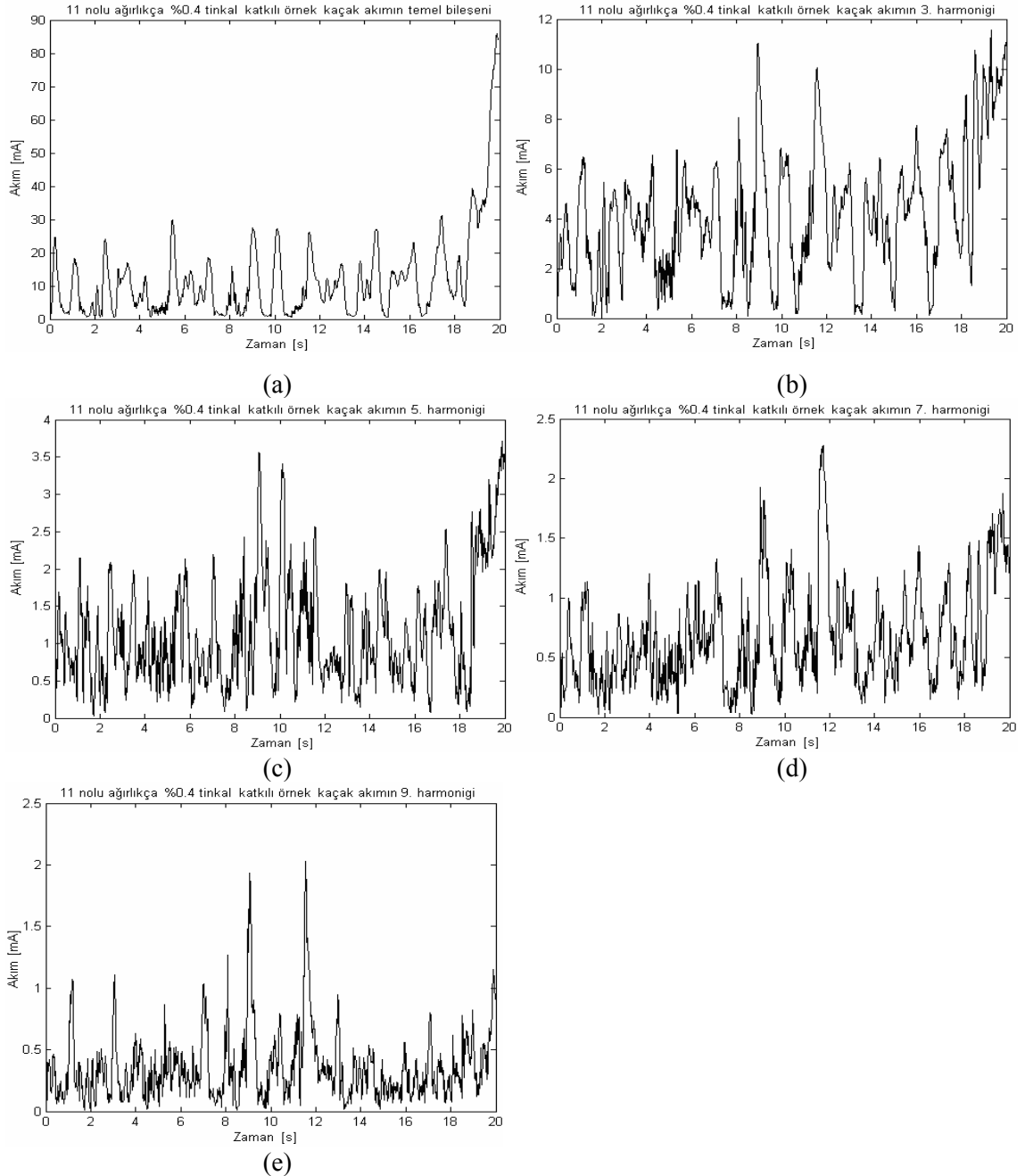


Şekil 4.26: Ağırlıkça % 0.3 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA’i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.

Tablo 4.6: Ağırlıkça % 0.3 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.

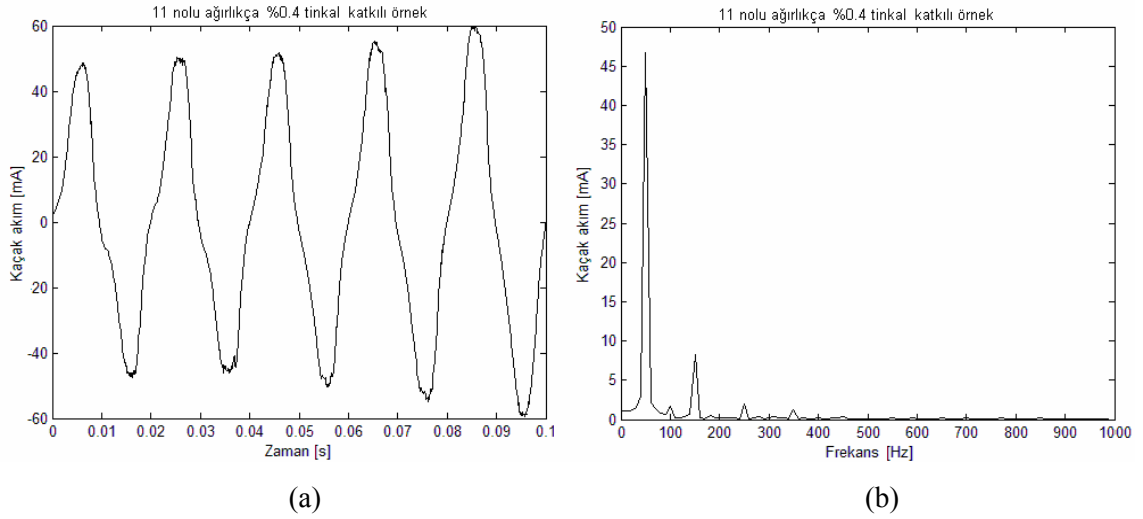
İz oluşumu sırasında gözlenen dalga şekline ait HD (60 mA’i geçmeden önceki), [%]	HD _{I3}	HD _{I5}	HD _{I7}	HD _{I9}	THD
	30.81	4.73	3.89	0.59	31.41
Ortalama, [%]	24.072	5.569	2.981	0.968	24.906

Ağırlıkça % 0.4 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde iz oluşumu gerçekleşirken ve iz oluşumu tamamlanırken elde edilen kaçak akımın temel ve harmonik bileşenleri Şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.27 a-e: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.

Ağırlıkça % 0.4 tinkal katkıli polyester örnek yüzeyinden elde edilen kaçak akımın genlik değerinin 60 mA’i geçmeden önceki son 100 ms ve alınan bu işarete ait FFT Şekil 4.28’de verilmiştir. Ayrıca Tablo 4.7’de temsilci örnek ve ağırlıkça % 0.4 tinkal katkıli örneklerden elde edilen kaçak akımın tek harmonik distorsiyonlarının ortalamaları verilmiştir.

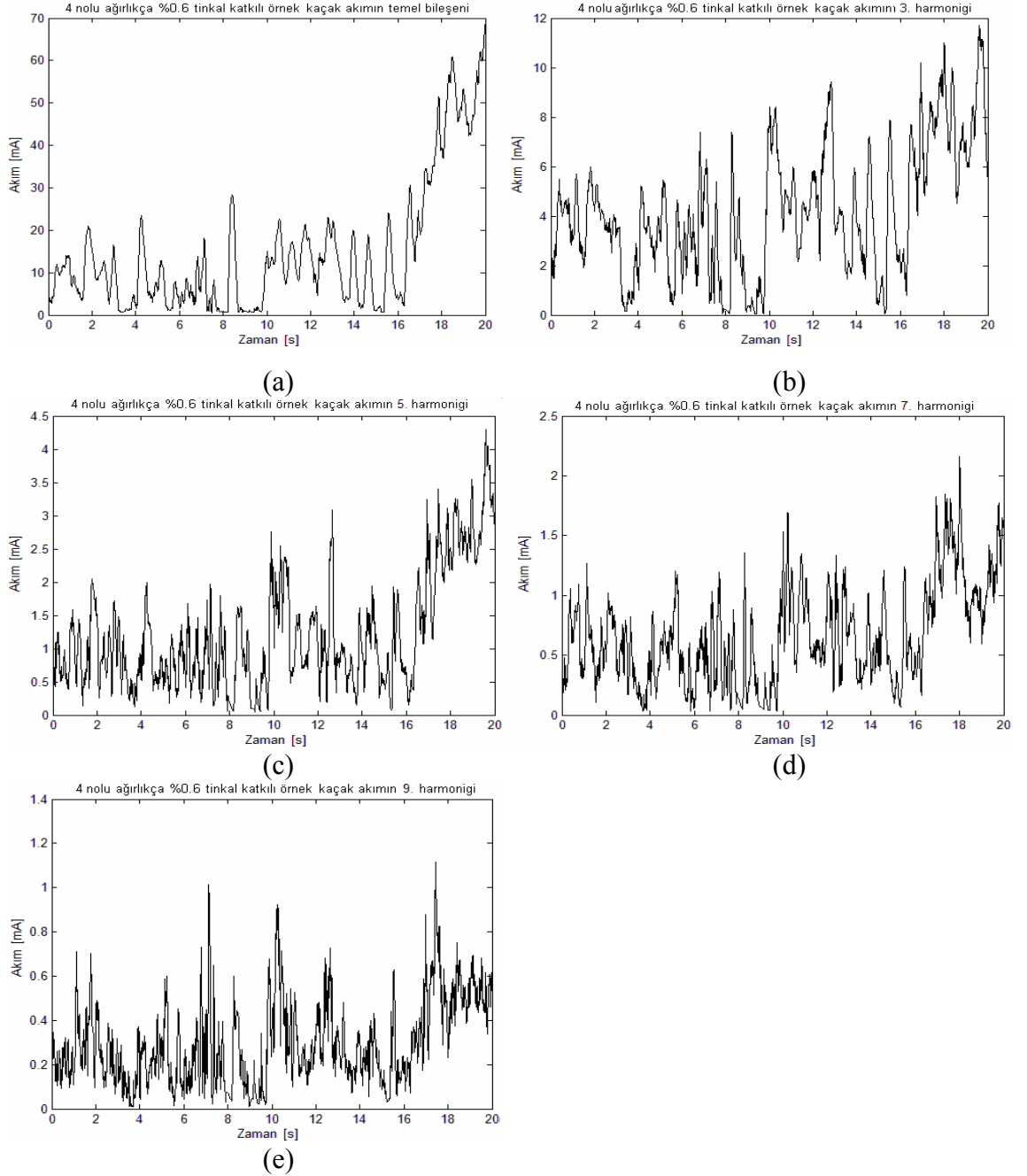


Şekil 4.28: Ağırlıkça % 0.4 tinkal katkıli polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA’i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.

Tablo 4.7: Ağırlıkça % 0.4 tinkal katkıli polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.

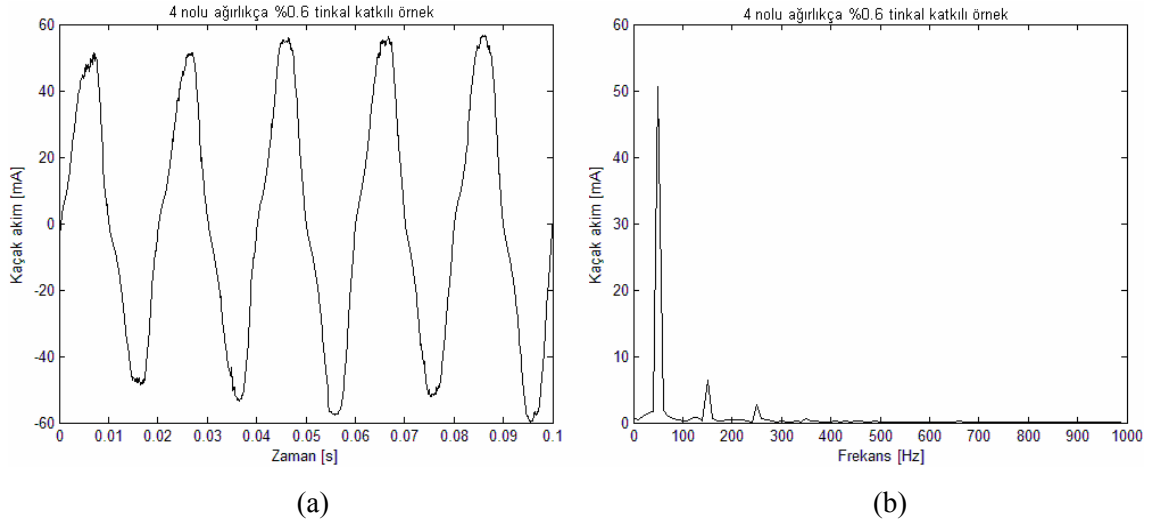
İz oluşumu sırasında gözlenen dalga şekline ait HD (60 mA’i geçmeden önceki), [%]	HD _{I3}	HD _{I5}	HD _{I7}	HD _{I9}	THD
	17.58	4.26	2.67	0.81	18.30
Ortalama, [%]	18.137	4.688	2.487	1.101	18.930

Ağırlıkça % 0.6 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde iz oluşumu gerçekleşirken ve iz oluşumu tamamlanırken elde edilen kaçak akımın temel ve harmonik bileşenleri Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.29 a-e: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.

Ağırlıkça % 0.6 tinkal katkıli polyester örnek yüzeyinden elde edilen kaçak akımın genlik değerinin 60 mA’i geçmeden önceki son 100 ms ve alınan bu işarete ait FFT Şekil 4.30’da verilmiştir. Ayrıca Tablo 4.8’de temsilci örnek ve ağırlıkça % 0.6 tinkal katkıli örneklerden elde edilen kaçak akımın tek harmonik distorsiyonlarının ortalamaları verilmiştir.

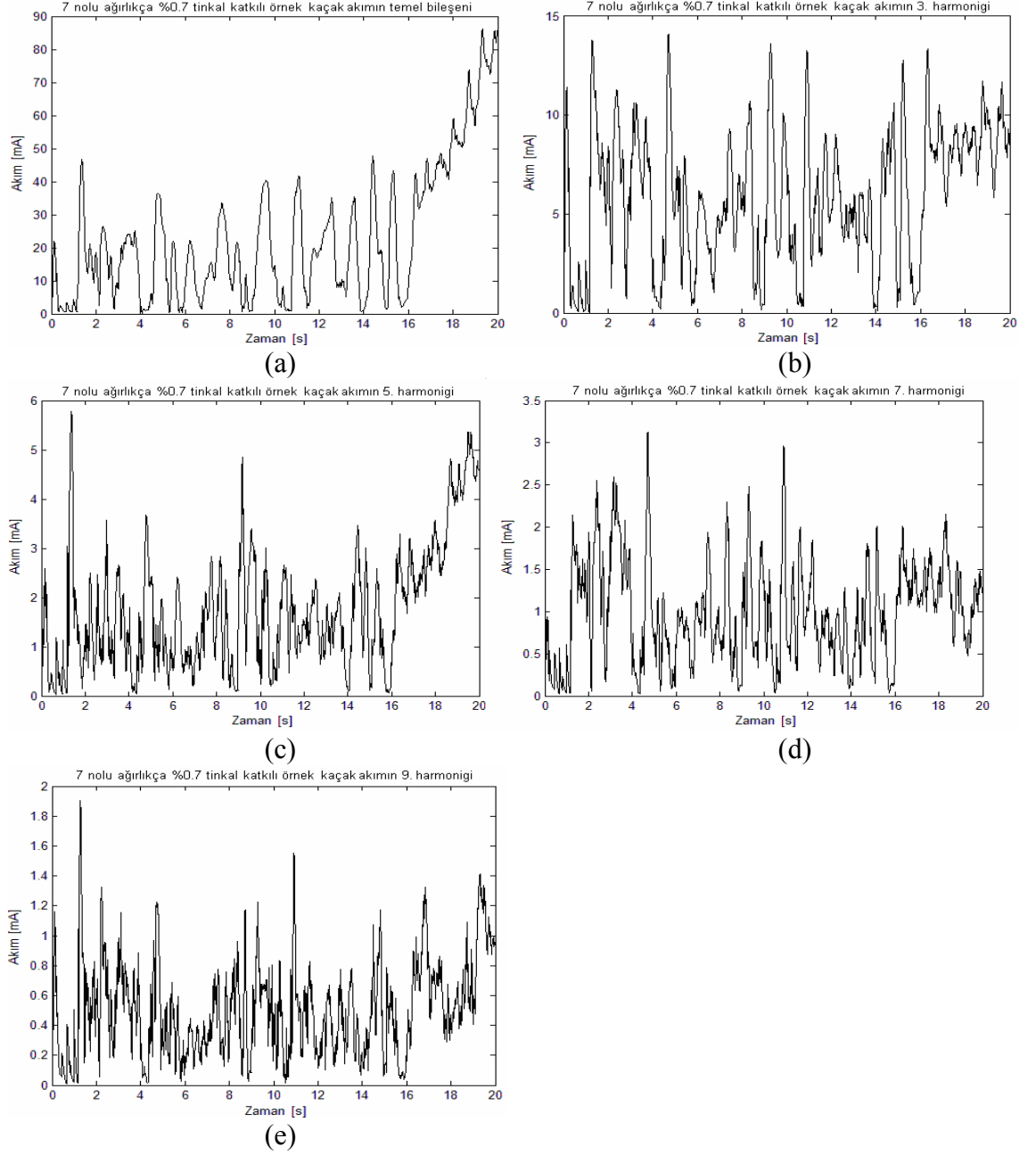


Şekil 4.30: Ağırlıkça % 0.6 tinkal katkıli polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA’i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.

Tablo 4.8: Ağırlıkça % 0.6 tinkal katkıli polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.

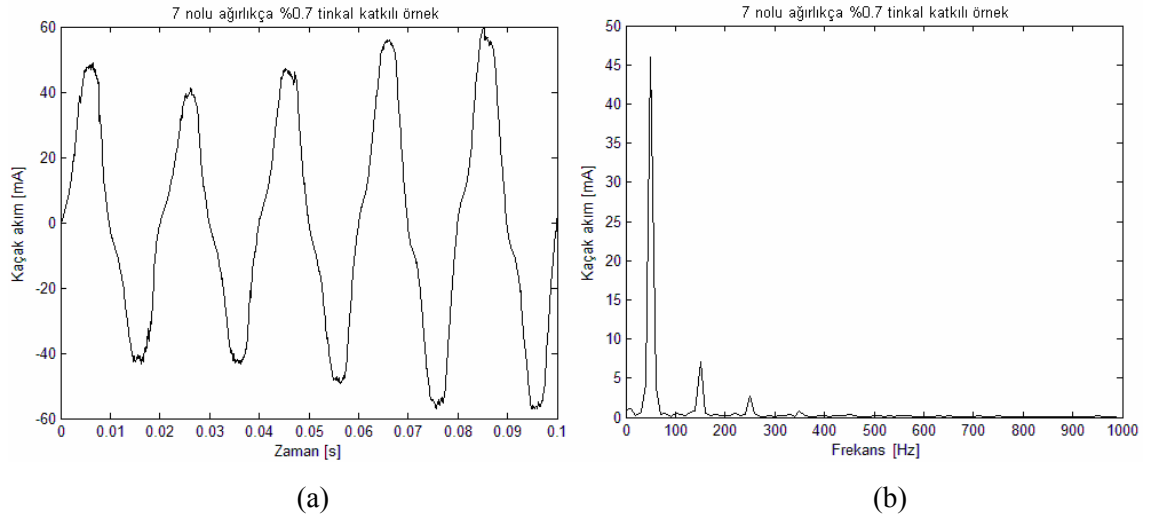
İz oluşumu sırasında gözlenen dalga şekline ait HD (60 mA’i geçmeden önceki), [%]	HD ₁₃	HD ₁₅	HD ₁₇	HD ₁₉	THD
	12.66	5.51	1.25	0.58	13.97
Ortalama, [%]	15.459	5.227	1.915	0.859	16.454

Ağırlıkça % 0.7 tinal katkılı polyester örnek yüzeyinde iz oluşumu gerçekleşirken ve iz oluşumu tamamlanırken elde edilen kaçak akımın temel ve harmonik bileşenleri Şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.31 a-e: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.

Ağırlıkça % 0.7 tinkal katkıli polyester örnek yüzeyinden elde edilen kaçak akımın genlik değerinin 60 mA’i geçmeden önceki son 100 ms ve alınan bu işarete ait FFT Şekil 4.32’de verilmiştir. Ayrıca Tablo 4.9’da temsilci örnek ve ağırlıkça % 0.7 tinkal katkıli örneklerden elde edilen kaçak akımın tek harmonik distorsiyonlarının ortalamaları verilmiştir.

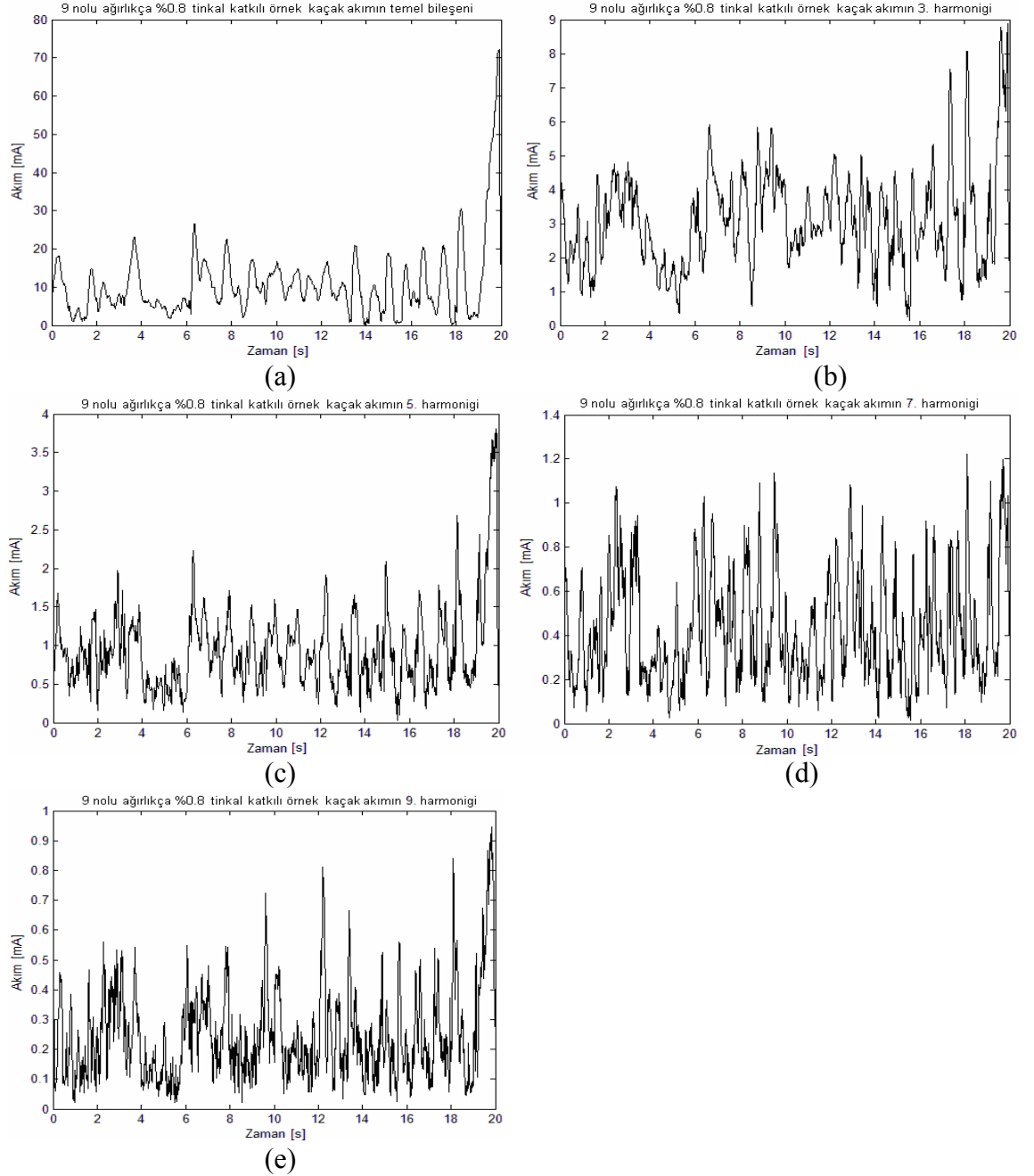


Şekil 4.32: Ağırlıkça % 0.7 tinkal katkıli polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA’i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.

Tablo 4.9: Ağırlıkça % 0.7 tinkal katkıli polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.

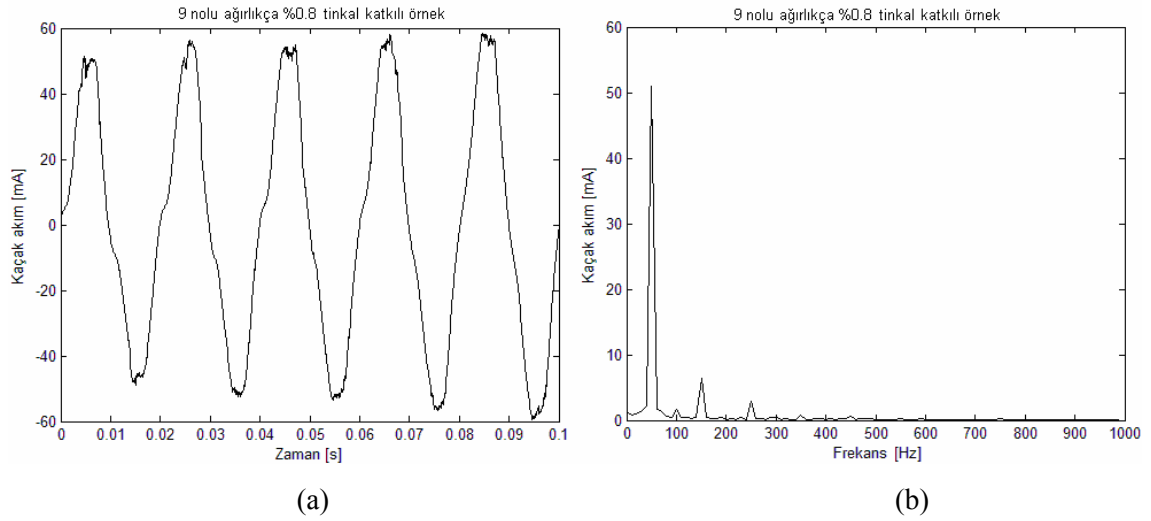
İz oluşumu sırasında gözlenen dalga şekline ait HD (60 mA’i geçmeden önceki), [%]	HD ₁₃	HD ₁₅	HD ₁₇	HD ₁₉	THD
	15.42	5.91	1.91	0.95	16.68
Ortalama, [%]	18.658	6.862	2.295	0.944	20.035

Ağırlıkça % 0.8 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde iz oluşumu gerçekleşirken ve iz oluşumu tamamlanırken elde edilen kaçak akımın temel ve harmonik bileşenleri Şekil 4.33’de verilmiştir.



Şekil 4.33 a-e: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.

Ağırlıkça % 0.8 tinal katkı polyester örnek yüzeyinden elde edilen kaçak akımın genlik değerinin 60 mA’i geçmeden önceki son 100 ms ve alınan bu işarete ait FFT Şekil 4.34’de verilmiştir. Ayrıca Tablo 4.10’da temsilci örnek ve ağırlıkça % 0.8 tinal katkı örneklerden elde edilen kaçak akımın tek harmonik distorsiyonlarının ortalamaları verilmiştir.

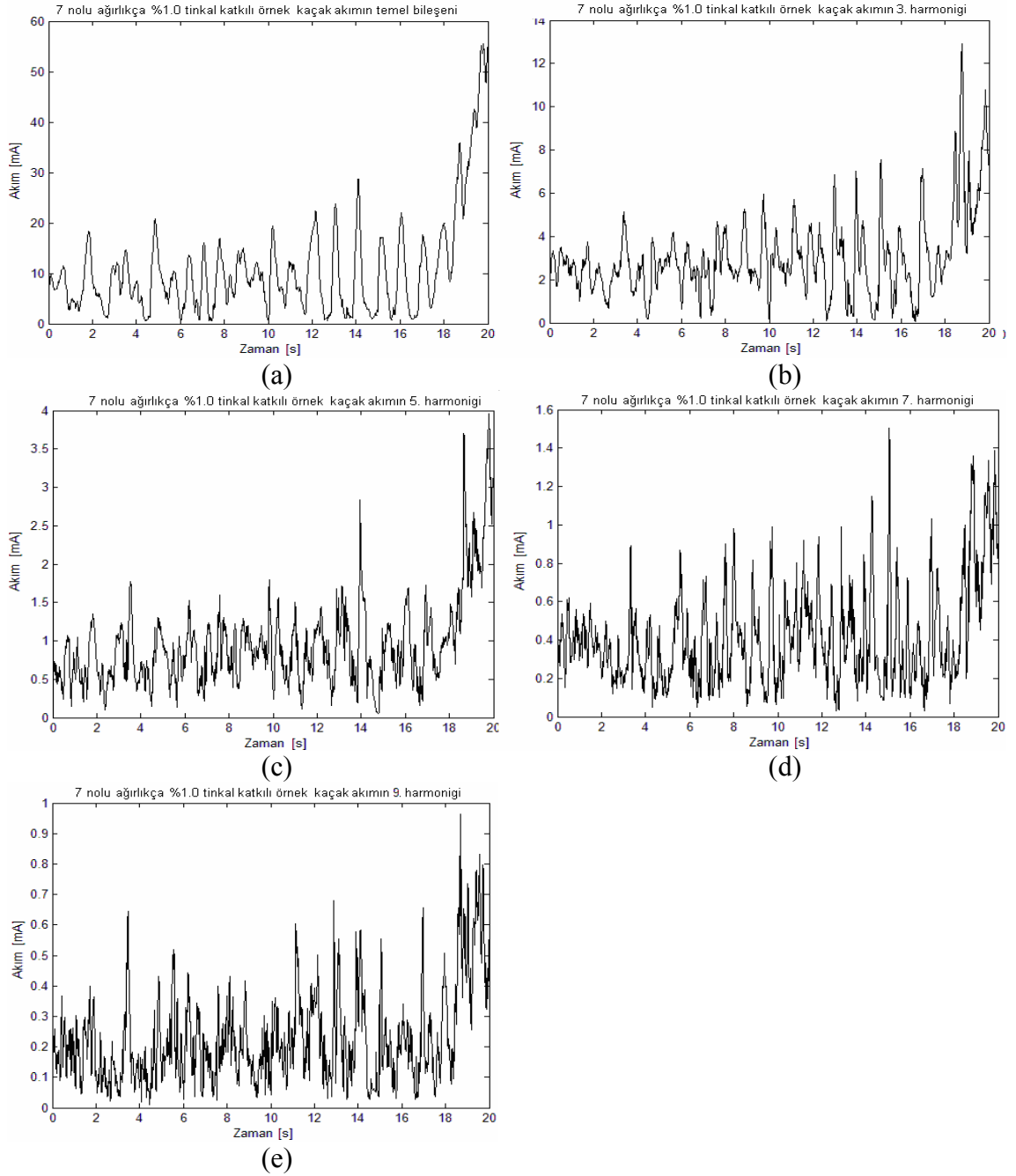


Şekil 4.34: Ağırlıkça % 0.8 tinal katkı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA’i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.

Tablo 4.10: Ağırlıkça % 0.8 tinal katkı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.

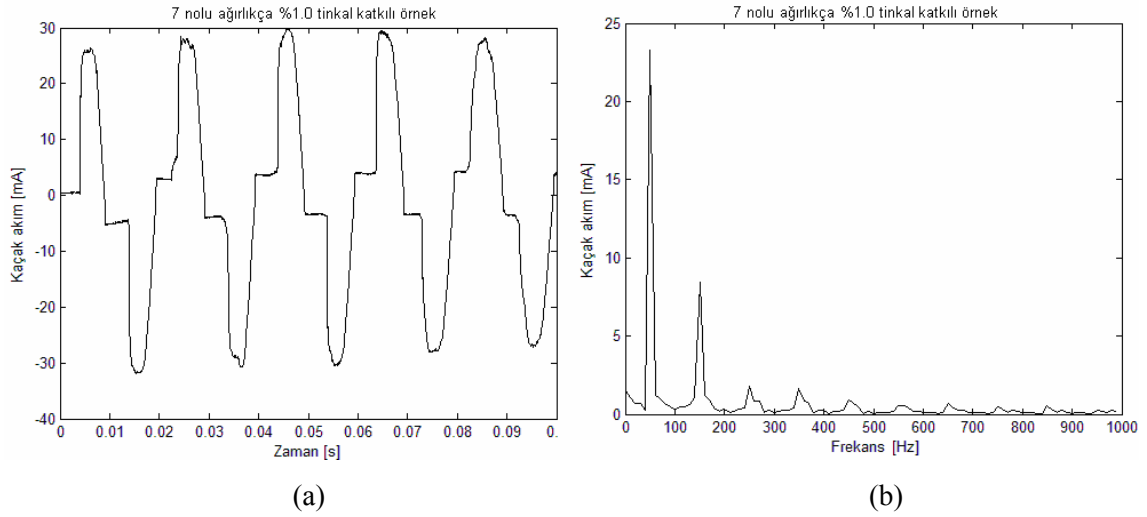
İz oluşumu sırasında gözlenen dalga şekline ait HD (60 mA’i geçmeden önceki), [%]	HD _{I3}	HD _{I5}	HD _{I7}	HD _{I9}	THD
	12.41	5.79	1.47	1.13	13.85
Ortalama, [%]	17.147	5.515	2.386	0.993	18.197

Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde iz oluşumu gerçekleşirken ve iz oluşumu tamamlanırken elde edilen kaçak akımın temel ve harmonik bileşenleri Şekil 4.35’de verilmiştir.



Şekil 4.35 a-e: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.

Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinden elde edilen kaçak akımın genlik değerinin 60 mA'i geçmeden önceki son 100 ms ve alınan bu işarete ait FFT Şekil 4.36'da verilmiştir. Ayrıca Tablo 4.11'de temsilci örnek ve ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örneklerden elde edilen kaçak akımın tek harmonik distorsiyonlarının ortalamaları verilmiştir.

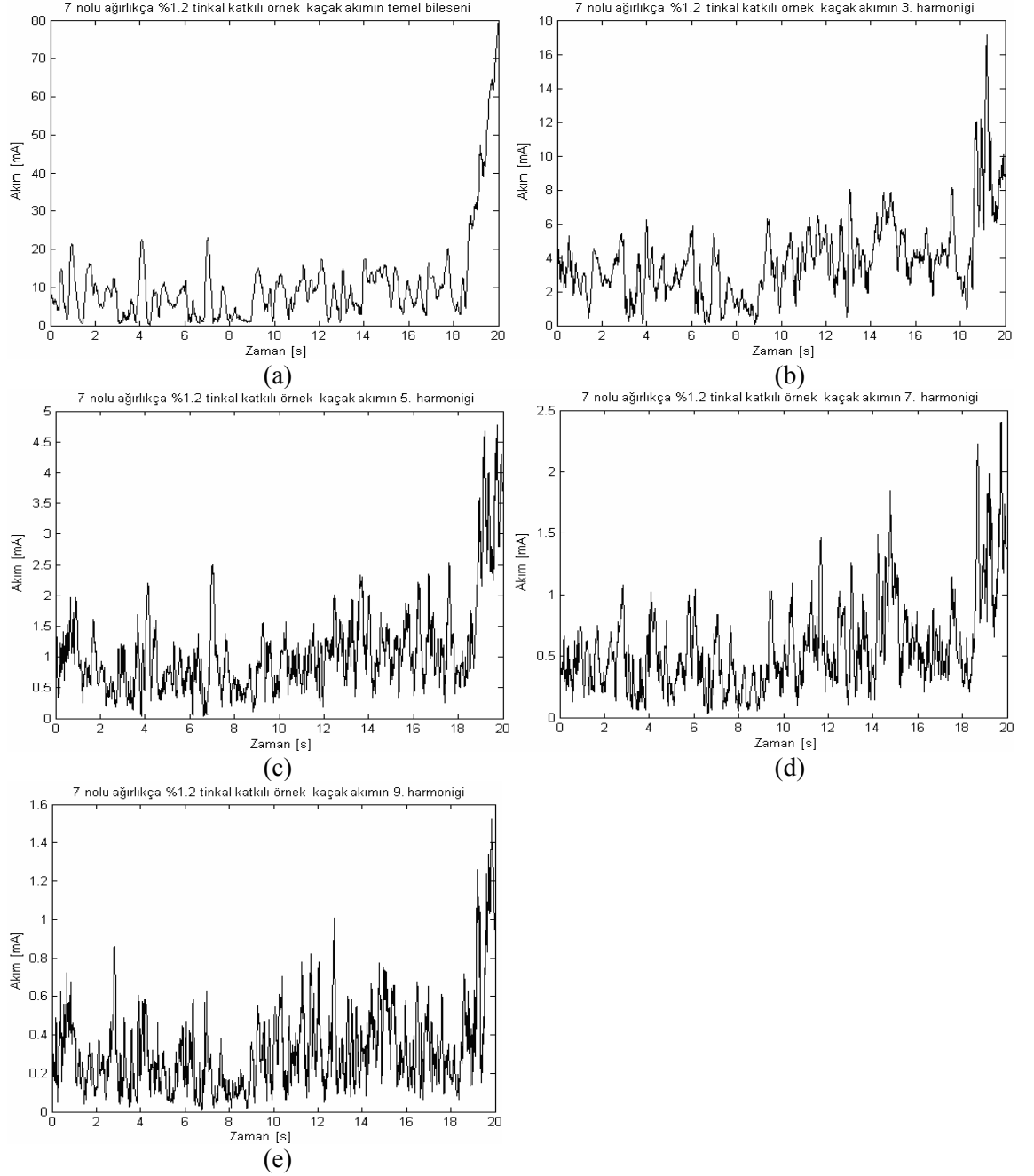


Şekil 4.36: Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA'i geçmeden önceki son 100 ms ve buna ait FFT işareti.

Tablo 4.11: Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri

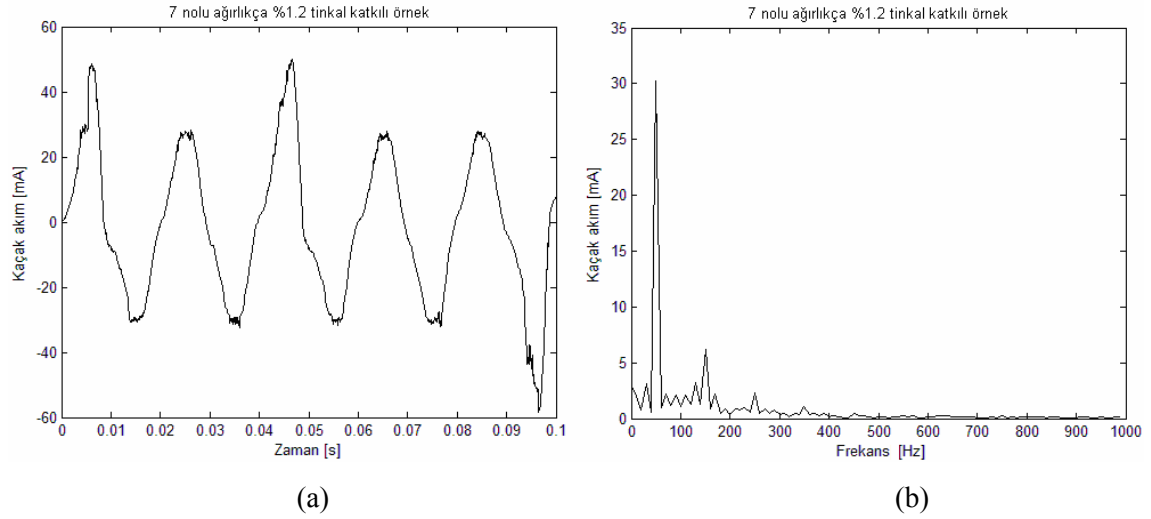
İz oluşumu sırasında gözlenen dalga şekline ait HD (60 mA'i geçmeden önceki), [%]	HD ₁₃	HD ₁₅	HD ₁₇	HD ₁₉	THD
	18.44	12.12	3.46	0.39	22.34
Ortalama, [%]	19.461	6.863	2.893	0.898	20.857

Ağırlıkça % 1.2 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde iz oluşumu gerçekleşirken ve iz oluşumu tamamlanırken elde edilen kaçak akımın temel ve harmonik bileşenleri Şekil 4.37’de verilmiştir.



Şekil 4.37 a-e: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.

Ağırlıkça % 1.2 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinden elde edilen kaçak akımın genlik değerinin 60 mA’i geçmeden önceki son 100 ms ve alınan bu işarete ait FFT Şekil 4.38’de verilmiştir. Ayrıca Tablo 4.12’de temsilci örnek ve ağırlıkça % 1.2 tinkal katkılı örneklerden elde edilen kaçak akımın tek harmonik distorsiyonlarının ortalamaları verilmiştir.

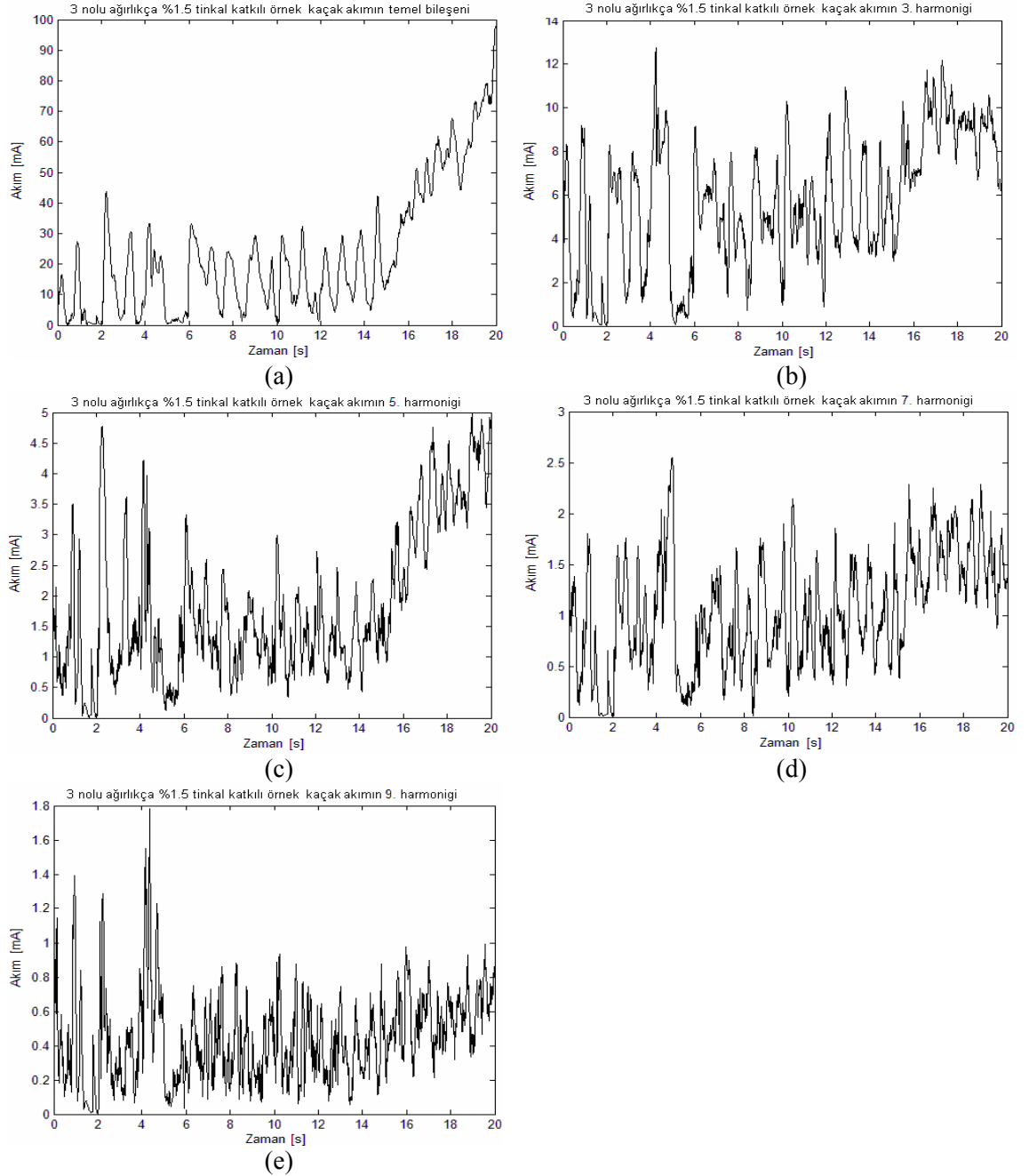


Şekil 4.38: Ağırlıkça % 1.2 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA’i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.

Tablo 4.12: Ağırlıkça % 1.2 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.

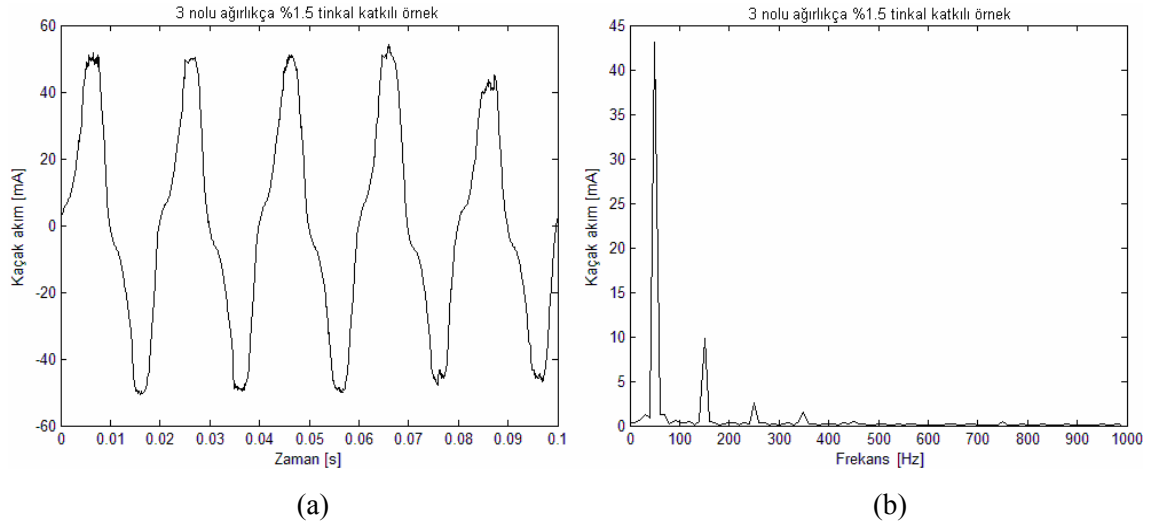
İz oluşumu sırasında gözlenen dalga şekline ait HD (60 mA’i geçmeden önceki), [%]	HD _{I3}	HD _{I5}	HD _{I7}	HD _{I9}	THD
	20.31	7.55	3.39	1.42	21.98
Ortalama, [%]	19.659	8.021	2.406	1.045	21.394

Ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örnek yüzeyinde iz oluşumu gerçekleşirken ve iz oluşumu tamamlanırken elde edilen kaçak akımın temel ve harmonik bileşenleri Şekil 4.39'da verilmiştir.



Şekil 4.39 a-e: Yüzeyde iz oluşumu deneyleri sırasında örnekler bozulmadan önceki 20 saniyede gözlenen kaçak akımın (a) temel bileşeni (b) 3. harmonik bileşeni, (c) 5. harmonik bileşeni, (d) 7. harmonik bileşeni ve (e) 9. harmonik bileşeni.

Ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinden elde edilen kaçak akımın genlik değerinin 60 mA’i geçmeden önceki son 100 ms ve alınan bu işarete ait FFT Şekil 4.40’da verilmiştir. Ayrıca Tablo 4.13’de temsilci örnek ve ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneklerden elde edilen kaçak akımın tek harmonik distorsiyonlarının ortalamaları verilmiştir.



Şekil 4.40: Ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı polyester örnek yüzeyinde kaçak akım genliği değerinin 60 mA’i geçmeden önceki (a) son 100 ms ve (b) buna ait FFT işareti.

Tablo 4.13: Ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı polyester örnekleri için tek harmoniklerin oluşturduğu ortalama HD ve THD değerleri.

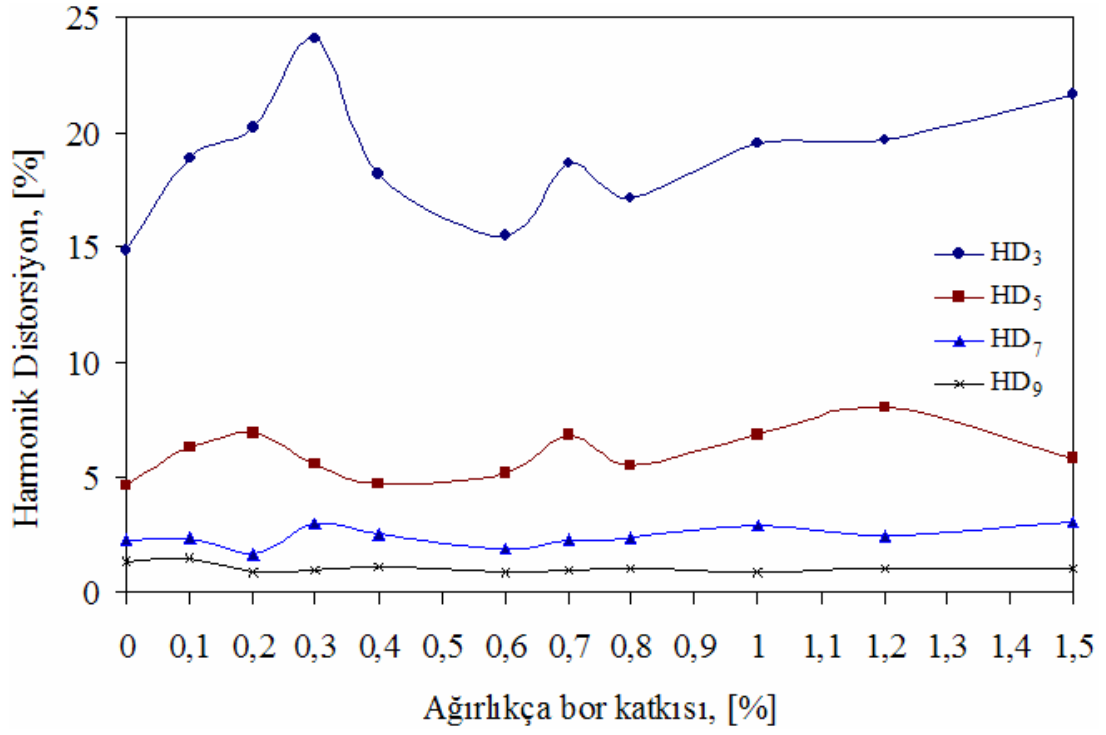
İz oluşumu sırasında gözlenen dalga şekline ait HD (60 mA’i geçmeden önceki), [%]	HD _{I3}	HD _{I5}	HD _{I7}	HD _{I9}	THD
	22.75	5.88	3.54	1.01	23.78
Ortalama, [%]	21.606	5.792	3.063	1.004	22.600

Katkısız ve tinkal katkılı polyester örneklerin bozulma davranışındaki değişimin kaçak akım harmonik bileşenleri kullanılarak incelendiği çalışmanın bu bölümünde tekil harmonik distorsiyonlar kullanılmıştır. Örnek üzerinden alınan kaçak akım işaretinin 60 mA’i geçmeden önceki son 100 ms kullanılarak harmonik distorsiyonlar çıkarılmış ve bu harmonik distorsiyonlardan 3., 5., 7. ve 9. harmoniğe ait harmonik

distorsiyonların bozulma davranışını tanımlamada uygun olduğu gözlenmiştir. Katkısız ve tinkal katkılı polyester örneklerin tekil harmonik distorsiyonları için elde edilen ortalama değerler Tablo 4.14 ve Şekil 4.41’de verilmiştir. 3. harmonik bileşen için HD değeri katkı oranı ağırlıkça % 0.3 değerinde iken bir artış gözlenmiş ve sonrasında yine azalmış fakat yinede katkısız örneklerden daha büyük değerler almıştır. 5. tek harmonik bileşen için katkı oranı % 0.2 değerinde iken yine bir yükselme gözlenmiş sonrasında HD değeri azalsa da katkısız örneğin HD değerinden daha yüksek değerler ölçülmüştür. 7. harmonik bileşen için 3. harmonik bileşene benzer olarak yine katkı oranı % 0.3 iken bir artış gözlenmiş sonrasında katkısız polyester örneklerden daha yüksek değerler ölçülmüştür. 9. harmonik bileşen için HD değişimine bakıldığında katkılı örneklerdeki HD değerinin katkısız örneklerden daha az olduğu gözlenmiştir.

Tablo 4.14: 3., 5., 7. ve 9. tek harmonik bileşenlere ait HD değerlerinin ortalamalarının katkı oranı ile değişimi

Ağırlıkça bor konsantrasyonu, [%]	HD _{I3} , [%]	HD _{I5} , [%]	HD _{I7} , [%]	HD _{I9} , [%]	THD, [%]
0	14.864	4.663	2.318	1.351	15.808
0.1	18.881	6.328	2.396	1.505	20.113
0.2	20.171	6.921	1.677	0.827	21.407
0.3	24.072	5.569	2.981	0.968	24.906
0.4	18.137	4.688	2.487	1.101	18.930
0.6	15.459	5.227	1.915	0.859	16.454
0.7	18.658	6.862	2.295	0.944	20.035
0.8	17.147	5.515	2.386	0.993	18.197
1	19.461	6.863	2.893	0.898	20.857
1.2	19.659	8.021	2.406	1.045	21.394
1.5	21.606	5.792	3.063	1.004	22.600

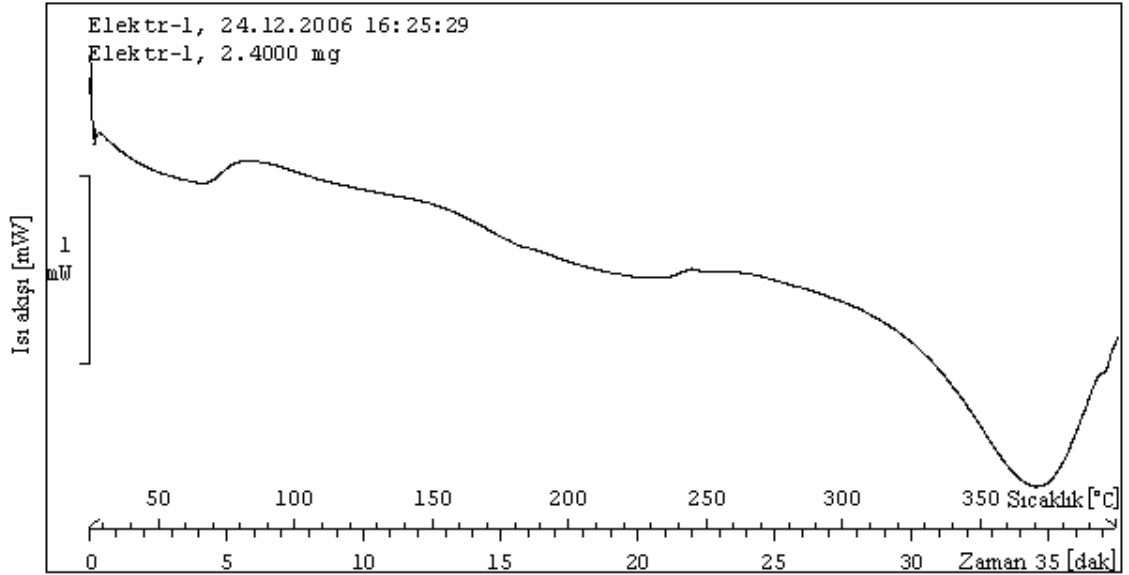


Şekil 4.41: Akımın tek harmonik bileşenleri için ağırlıkça % katkı oranı ile harmonik distorsiyonlar arasındaki değişim.

4.4. DİFERANSİYEL TARAMALI KALORİMETRE ANALİZİ SONUÇLARI

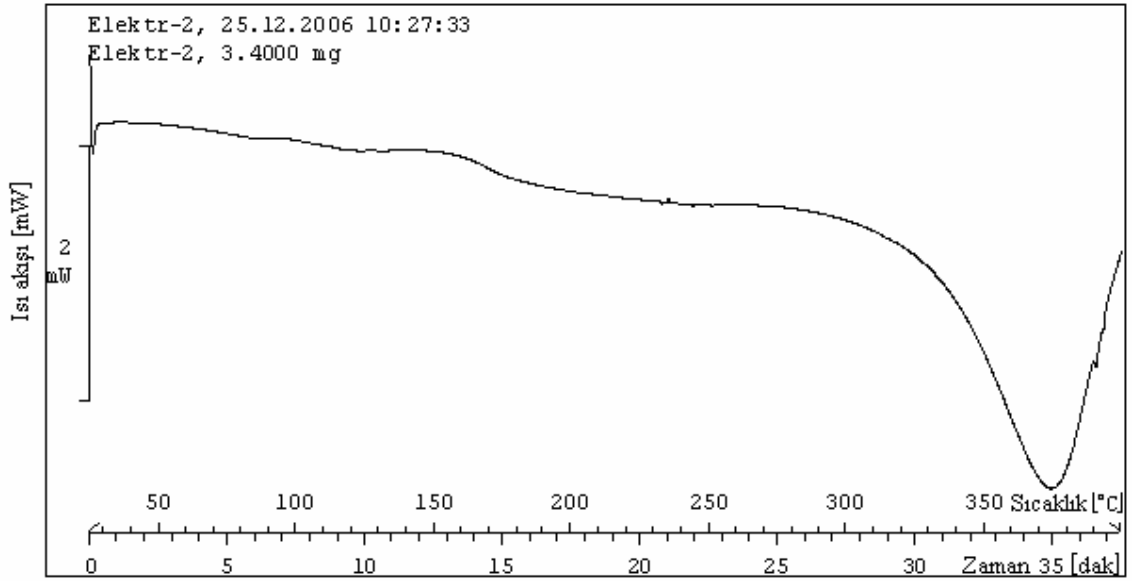
Çalışmanın bu bölümünde gerçekleştirilen DSC analizleri ile polyester örnek için tinkal katkılanması sonrası camsı geçiş sıcaklığındaki ve bozulma sıcaklığındaki değişimin çıkarılması amaçlanmıştır. Bu amaçla katkısız ve ağırlıkça % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 tinkal katkılı örnekler hazırlanmıştır.

Katkısız polyester örnek için yapılan DSC analizine ait elde edilen grafik Şekil 4.42’de verilmiştir. Polyesterin camsı geçiş sıcaklığı 166.03 °C ve bozulma sıcaklığı 370.0 °C olarak ölçülmüştür.



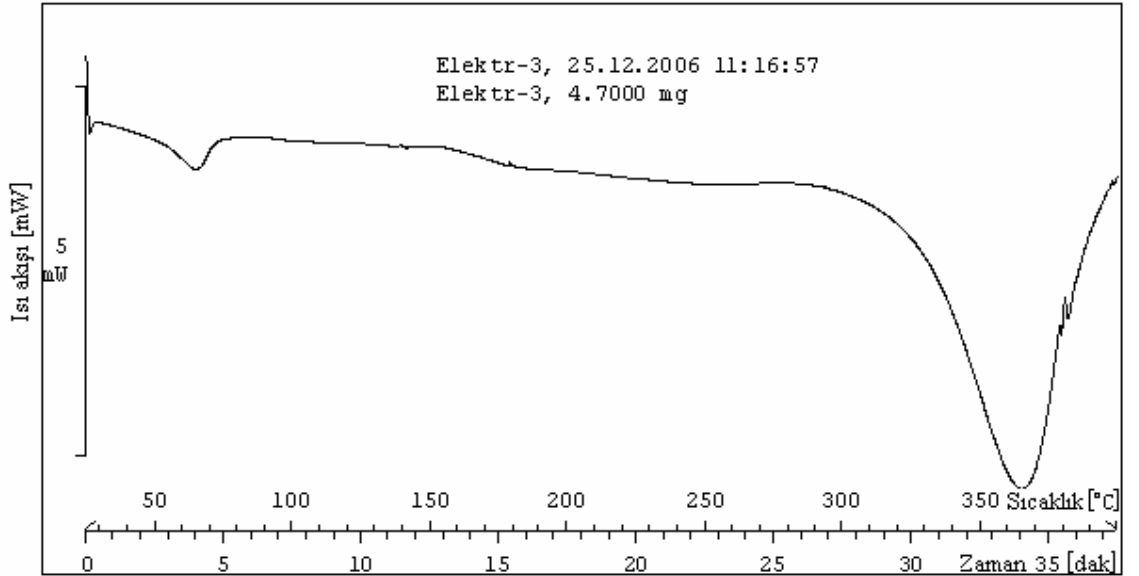
Şekil 4.42: Katkısız polyester örneğin DSC analizi sonucu

Ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı polyester örneğin DSC analizi Şekil 4.43’de verilmiştir. Örneğin camsı geçiş sıcaklığı 167.99 °C ve bozulma sıcaklığı 374.1 °C olarak ölçülmüştür.



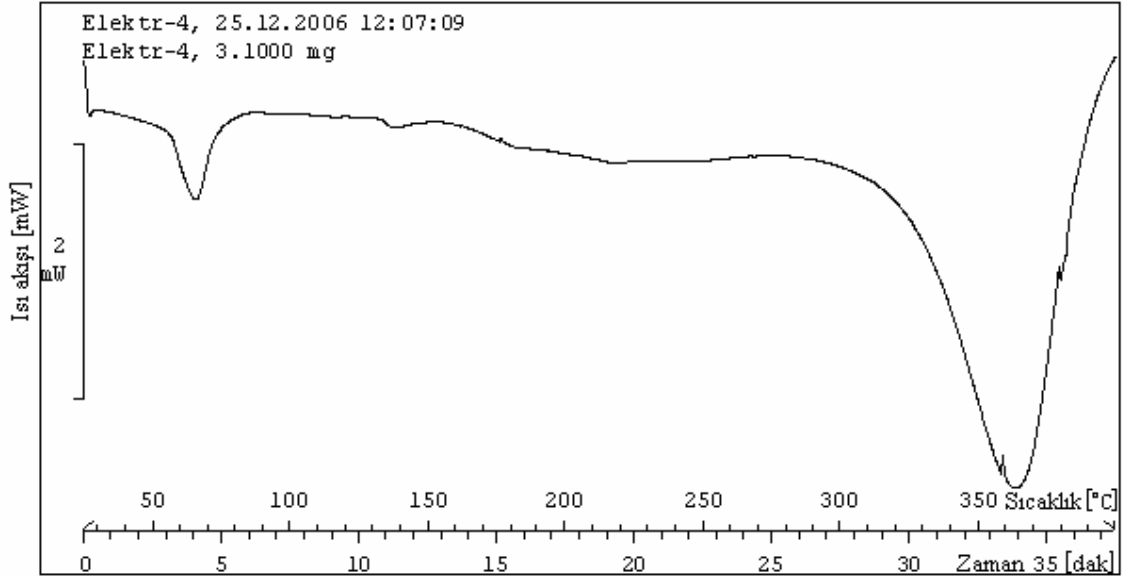
Şekil 4.43: Ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı polyester örneğin DSC analizi sonucu

Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılanan polyester örnek için yapılan DSC analizi Şekil 4.44’de verilmiştir. Katkı oranının ağırlıkça % 1.0 çıkarılması ile camsı geçiş sıcaklığı 168.97 °C ve 364.76 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.44: Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı polyester örneğin DSC analizi sonucu

Polyester yalıtıkana yapılan katkı oranı % 1.5 olduğu durumda yapılan DSC analizine ait elde edilen grafik Şekil 4.45’de verilmiştir. Camsı geçiş sıcaklığı 170.25 °C ve bozulma sıcaklığı 363.6 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.45: Ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı polyester örneğin DSC analizi sonucu

Tablo 4.15’de katkısız ve tinkal katkılı örneklerin camsı geçiş sıcaklığı ve bozulma sıcaklığındaki değişim verilmiştir. Tablo 4.15’den de görülebileceği gibi örneğe yapılan tinkal katkısı ile camsı geçiş sıcaklığı artmıştır. Polyester örneğe % 0.5 tinkal katkılanarak elde edilen örneğin DSC analizi ile elde edilen camsı geçiş sıcaklığı değeri 1.99 °C ötelenmiş 167.99 °C olarak bulunmuştur. Ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneklerde bozulma sıcaklığı 4.1 °C artmıştır. Polyester yalıtkan içerisindeki tinkalin katkı oranı % 1.0 olduğunda camsı geçiş sıcaklığı 2.97 °C kayarak 168.97 °C ve bozulma sıcaklığı 5.24 °C azalarak 364.76 °C olarak ölçülmüştür. Son olarak ağırlıkça katkı oranı % 1.5 değerine çıkarıldığında Tg değeri 4.25 °C artarak 170.25 °C ve bozulma sıcaklığı 6.4 °C azalarak 363.6 °C olarak elde edilmiştir.

Katkılı örneklerde diğer örneklerden farklı olarak 30-90 °C sıcaklık aralığında katkısız örnekten farklı bir davranış olduğu görülmektedir. % 0.5 tinkal katkılı örnek için 31-80 °C, % 1.0 tinkal katkılı örnek için 44-75 °C ve % 1.5 tinkal katkılı örnek için 45-86 °C sıcaklık aralığında bir endotermik reaksiyon gözlemlemek mümkündür.

Tablo 4.15: Katkısız ve tinkal katkılı polyester örnekler için camsı geçiş sıcaklığı ve bozulma sıcaklığının değişimi.

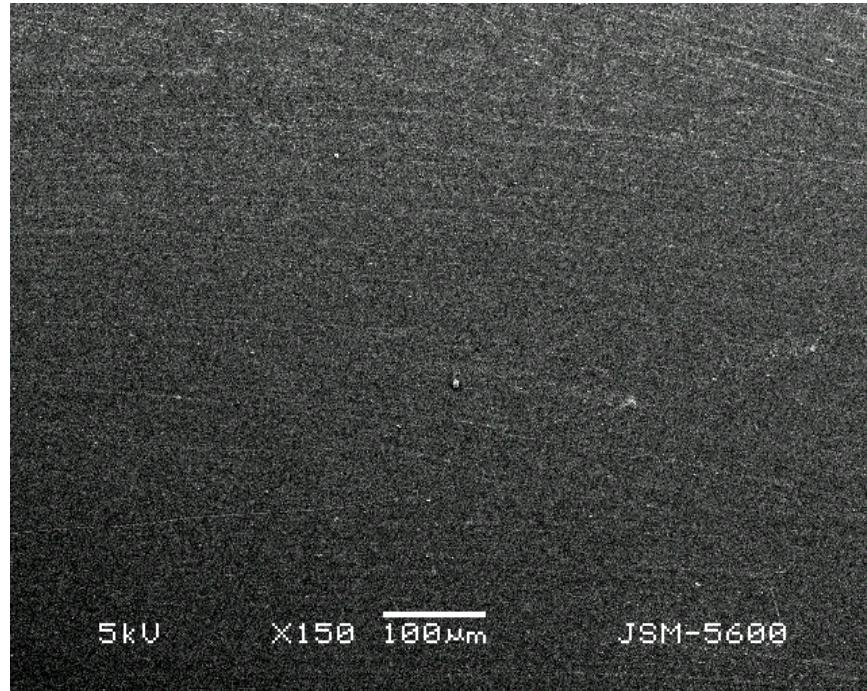
	Camsı geçiş sıcaklığı, T _g (°C)	Bozulma sıcaklığı, (°C)
Katkısız polyester örnek	166.00	370.00
Ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örnek	167.99	374.10
Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örnek	168.97	364.76
Ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örnek	170.25	363.60

4.5. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) ANALİZLERİ

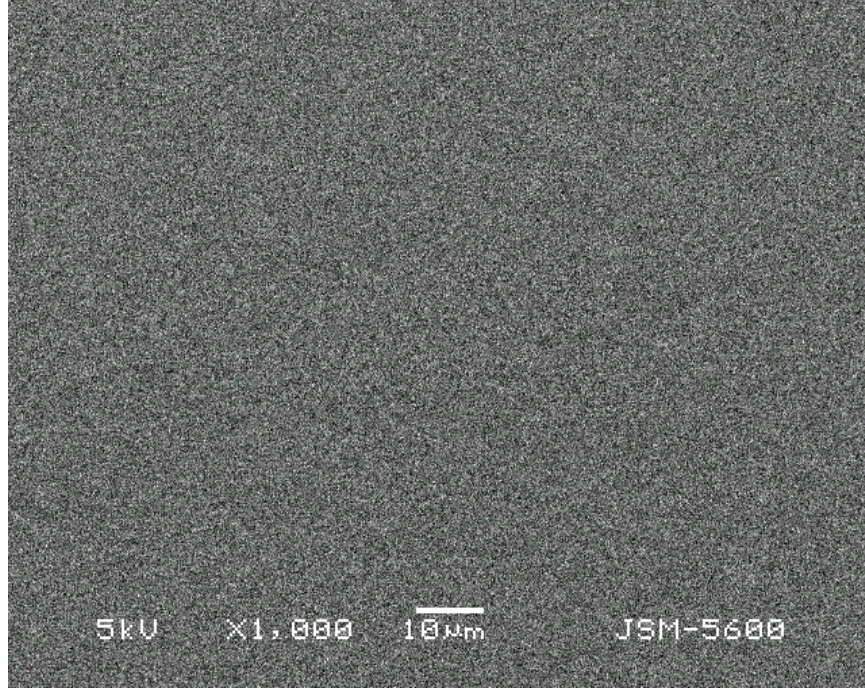
Eğik düzlem yüzeyde iz oluşumu deneyleri öncesi ve sonrası örnek yüzeyindeki iz oluşumu davranışındaki değişimler taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla katkısız ve ağırlıkça tinkal katkı oranı % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 olarak değişen örnekler kullanılmıştır. Kullanılan örnek yüzeyleri yapılan katkı oranındaki bozulmayı temsil edebilecek örnek yüzeylerinden alınmıştır. İncelemede kullanılan örnek yüzeyleri örneğin alt kısmından 65 mm yukarıdaki iz oluşumunun gerçekleştiği bölgeden 10 mm genişliğinde kesilerek alınmıştır.

Katkısız örnek

Taramalı elektron mikroskobunda, kullanılan katkısız örneğin deneyler gerçekleştirilmeden önce yapılan SEM görüntüsünde örnek yüzeyinin görüntüsü Şekil 4.46’da 150 kat büyütülerek ve Şekil 4.47’de 1000 kat büyütülerek verilmiştir. Her iki şekilden de görülebileceği gibi örnek yüzeyi pürüzsüzdür.

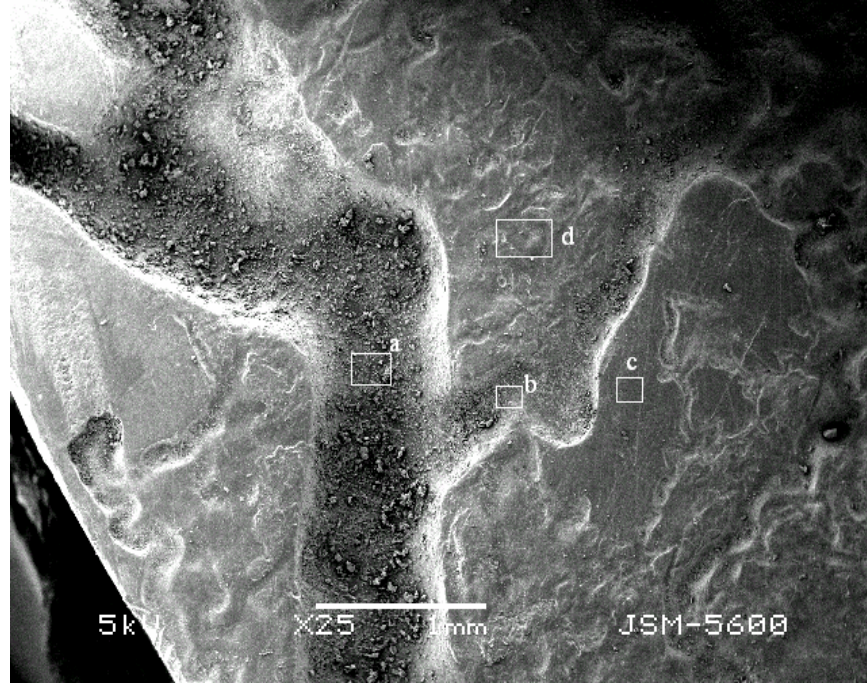


Şekil 4.46: Deneyler gerçekleştirilmeden önceki katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 150 kat)



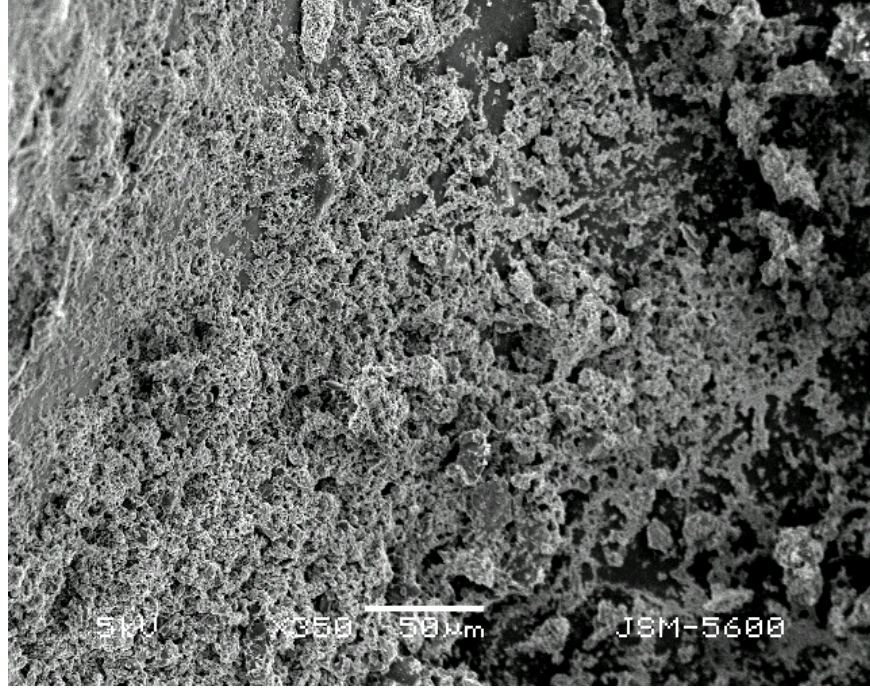
Şekil 4.47: Deneyler gerçekleştirilmeden önceki katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat)

ASTM D2303 standartına göre yapılan deneyden sonra elde edilen örnek yüzeyinin 25 kat büyütülmüş görüntüsü Şekil 4.48’de görülmektedir. Burada örnek yüzeyinde gerçekleşen ize ait bir kesit verilmiştir. Şekilde a, b, c ve d ile gösterilen noktalar sırasıyla Şekil 4.49-4.55’de büyütülerek verilmiştir. Katkısız örnekler incelenirken iz oluşumunun gerçekleştiği yol (a) ve ondan ayrılan küçük yollar (b) ile bunların arasında kalan alanlar (c) ve (d) olarak isimlendirilmiş ayrı ayrı incelenmiştir.

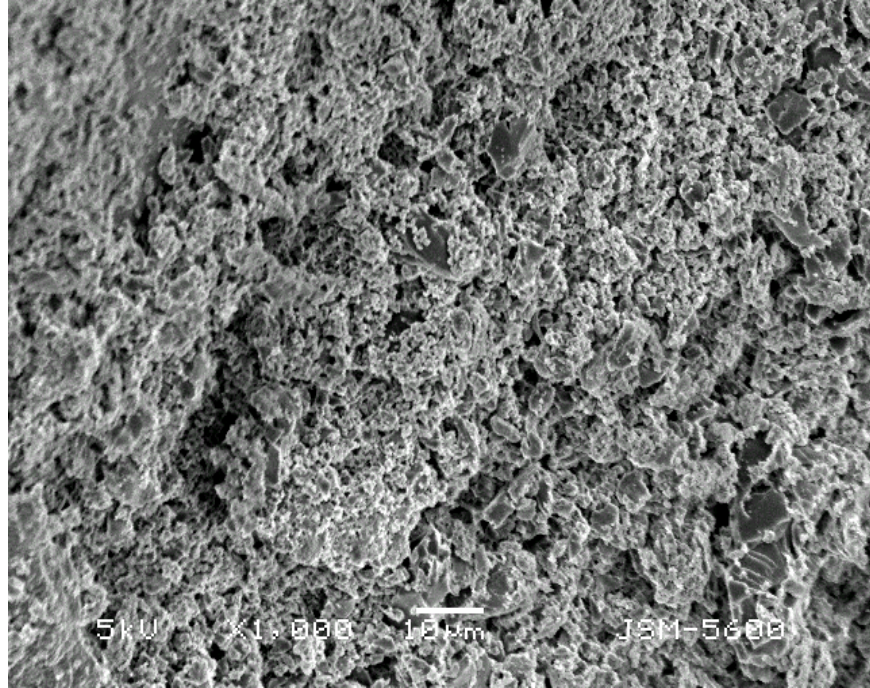


Şekil 4.48: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 25 kat)

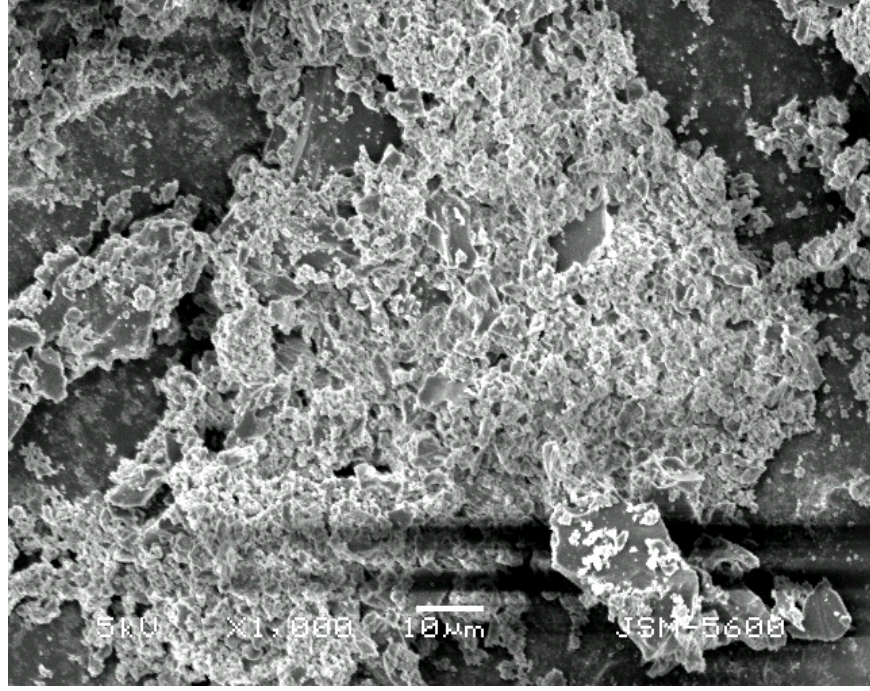
(a) bölgesi Şekil 4.49’da 350 kat ve Şekil 4.50’de 1000 kat büyütülmüştür. (a) bölgesi iz oluşumunun gerçekleştiği ana yolda yer almaktadır. Yol içerisindeki karbonlaşmış alan net olarak görülmektedir. (b) bölgesi, iz oluşumu sonrası izin daha az derin olarak gerçekleştiği bir yolda yer almaktadır. Bu bölgede 2 farklı alanda inceleme yapılmıştır. Elde edilen görüntüler Şekil 4.51’de 1000 kat ve Şekil 4.52’de 1500 kat büyütülerek verilmiştir. Yol içerisindeki süngerimsi görünüşlü karbonize alan burada da gözlenmiştir. (c) bölgesi çıplak gözle yapılan kontrolde iz oluşumunun gözlenmediği bir alana aittir. Bu alan 250 kat büyütüldüğünde Şekil 4.53’de 1500 kat büyütüldüğünde Şekil 4.54’de görülen görüntüler elde edilmiştir. Şekil 4.53 ve Şekil 4.54 incelendiğinde katkısız örneğin bozulma sonrası iz oluşumu gerçekleşmemiş olduğu alanlarda da deformasyona uğradığı görülmüştür. (d) bölgesi iz oluşumunun gerçekleştiği iki iz arasında kalan bir alana aittir. Bu bölge 200 kat büyütülerek ve Şekil 4.55’de verilmiştir.



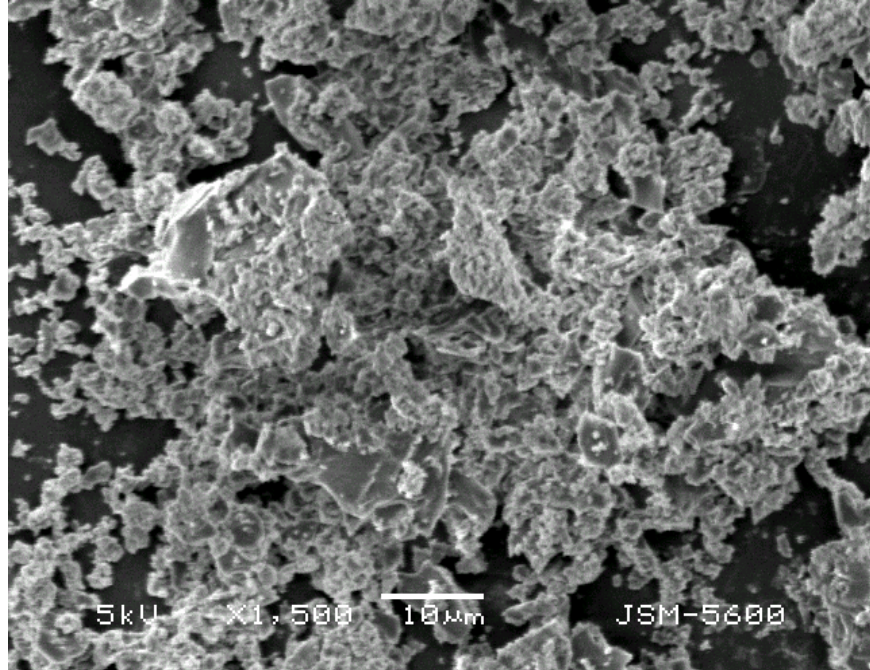
Şekil 4.49: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 350 kat)



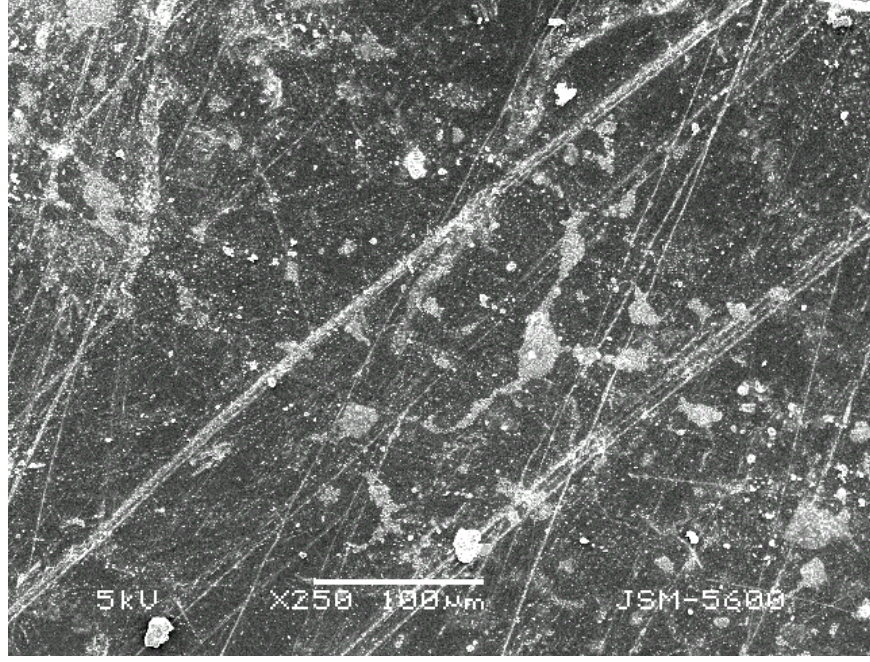
Şekil 4.50: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat)



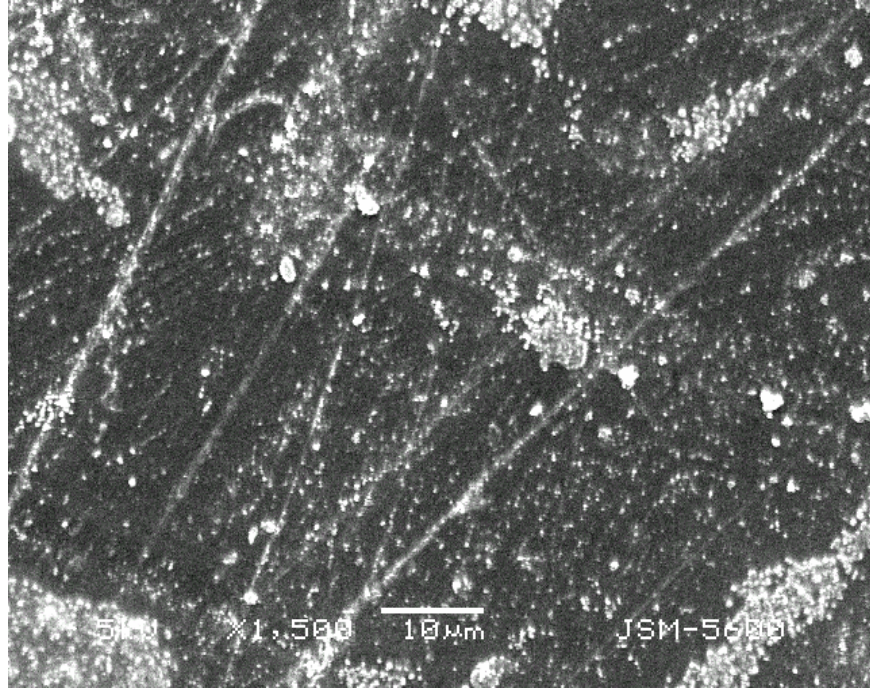
Şekil 4.51: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat)



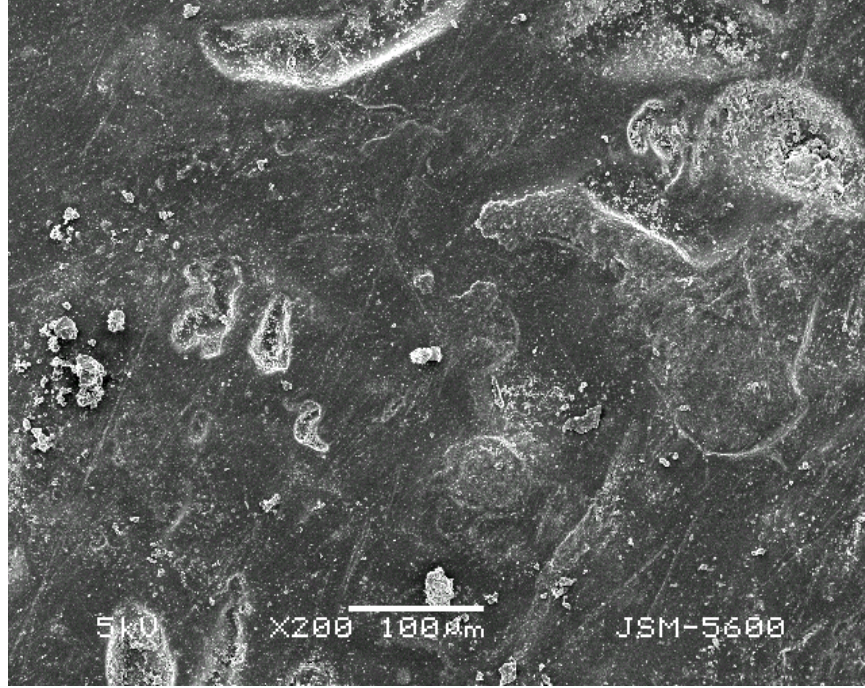
Şekil 4.52: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1500 kat)



Şekil 4.53: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 250 kat)



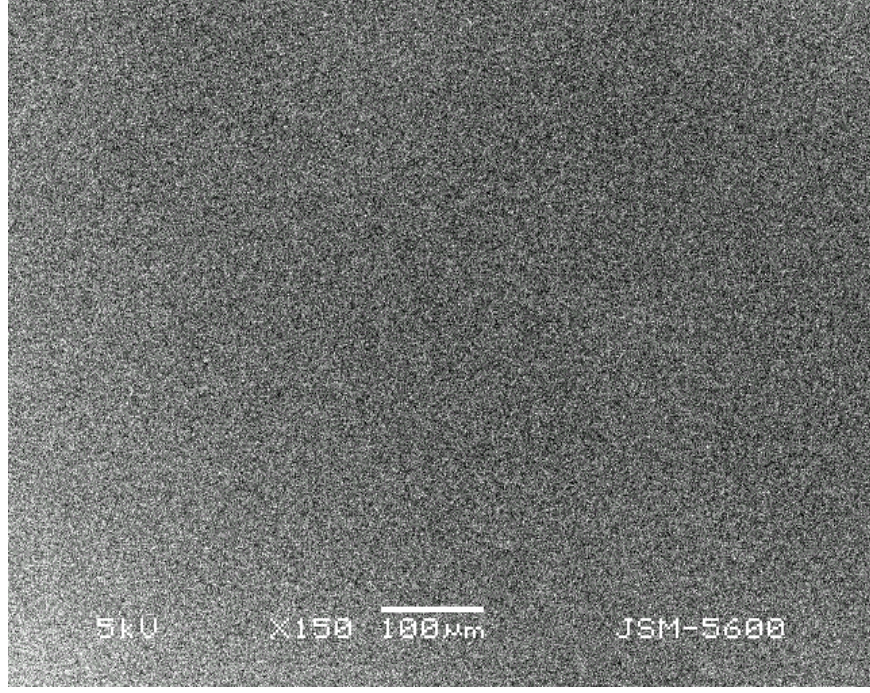
Şekil 4.54: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1500 kat)



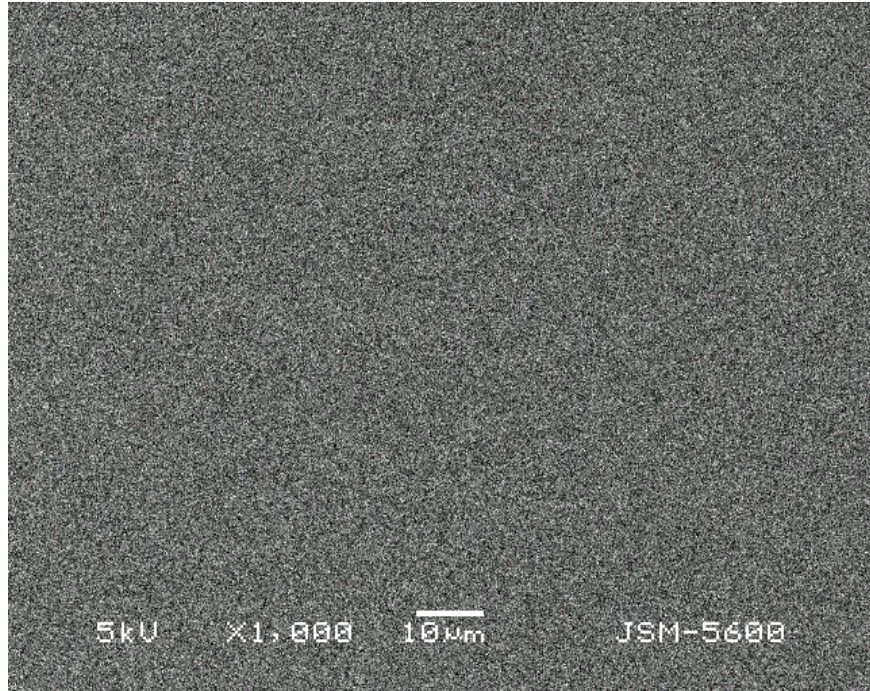
Şekil 4.55: İz oluşumu deneyi sonrası katkısız örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 200 kat)

Ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örnek

Polyester örneklerle ağırlıkça % 0.5 oranında tinkal katkılanması yapılarak elde edilen örneklerin deney yapılmadan önceki yüzeylerinin durumu 150 kat ve 1000 kat büyütülerek sırasıyla Şekil 4.56 ve Şekil 4.57’de verilmiştir. Burada tıpkı katkısız örnek yüzeyinde olduğu gibi pürüzsüz bir yüzey gözlenmiştir.

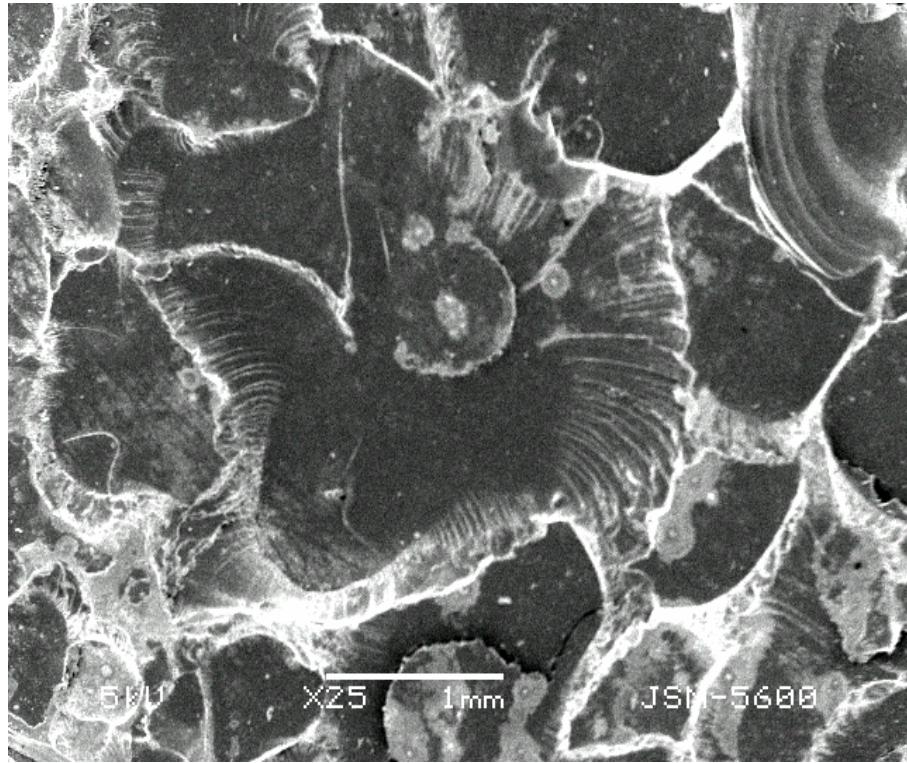


Şekil 4.56: Deneyler gerçekleştirilmeden önce ağırlıkça % 0.5 tinal katkılı polyester örneğin yüzeyi (Büyütme 150 kat).



Şekil 4.57: Deneyler gerçekleştirilmeden önce ağırlıkça % 0.5 tinal katkılı polyester örneğin yüzeyi (Büyütme 150 kat).

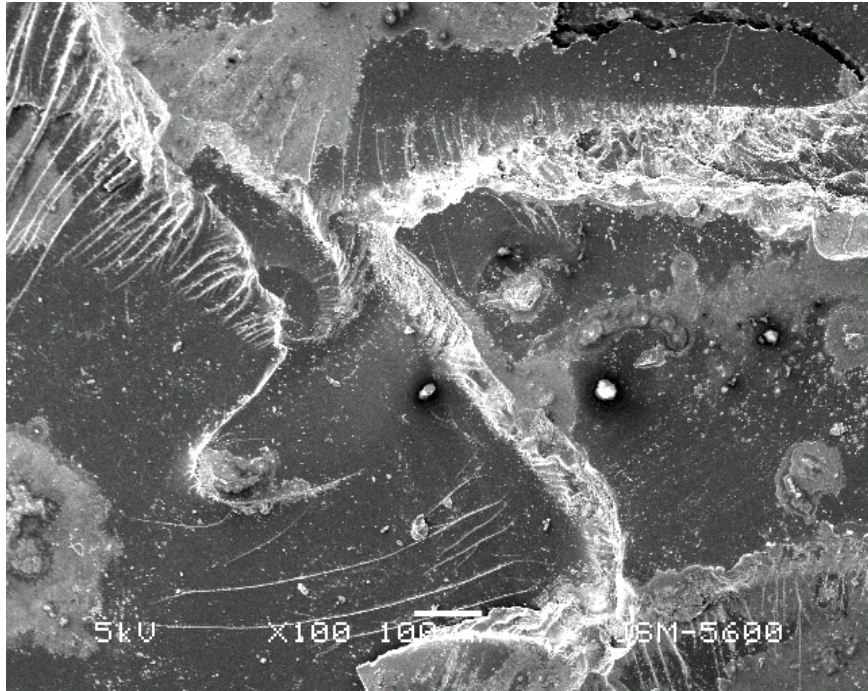
Katkısız örneklerden farklı olarak ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılanan örneklerin ömür süresi yaklaşık olarak 2 kat artmış, yüzey davranışı da oldukça değişmiştir. Bu değişim yollar şeklindeki iz oluşumundan farklı olarak yüzeyde küçük kraterler şeklinde erozyon olarak bozulmalar şeklindedir. Bölüm 4.2’de verilen bu değişim, bu bölümde taramalı elektron mikroskobu altında incelenmiştir. Şekil 4.58’de ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğin iz oluşumu deneyleri sonrası yüzeyinden alınan kesit 25 kat büyütülerek verilmiştir. Aynı kesit Şekil 4.59’da 35 kat büyütülerek verilmiştir. Yan yana pek çok kraterin bir araya gelmesi şeklindeki bozulma biçiminde kraterlerin birleşme yeri Şekil 4.60’da 100 kat büyütülerek verilmiştir. Şekil 4.61’de bu birleşme alanı 1000 kat büyütülmüştür. Bu şekilden de görülebileceği gibi birleşme noktasında birbiri üzerine katlanmış krater kenarları net olarak gözlenebilmektedir.



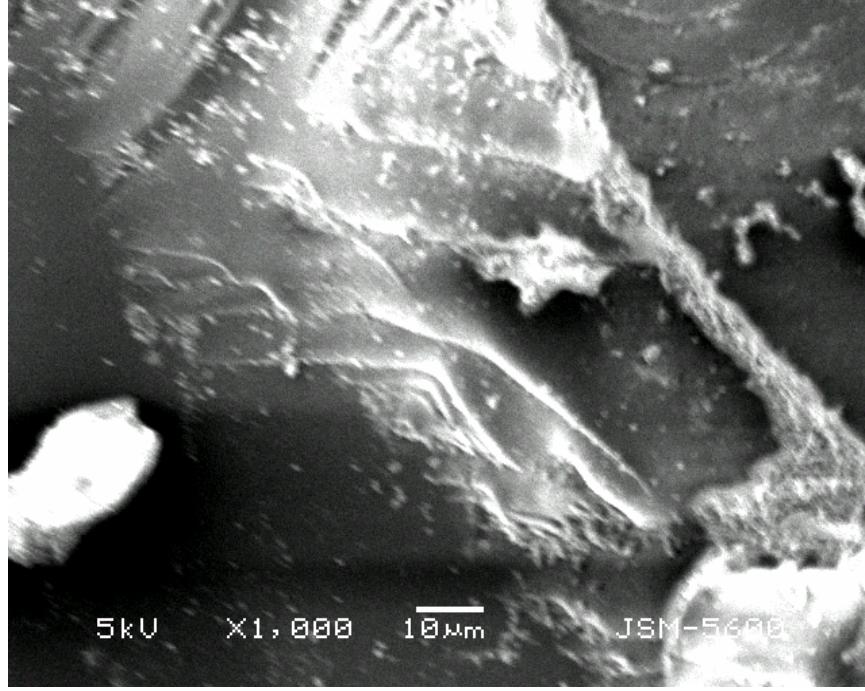
Şekil 4.58: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 25 kat)



Şekil 4.59: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 35 kat)

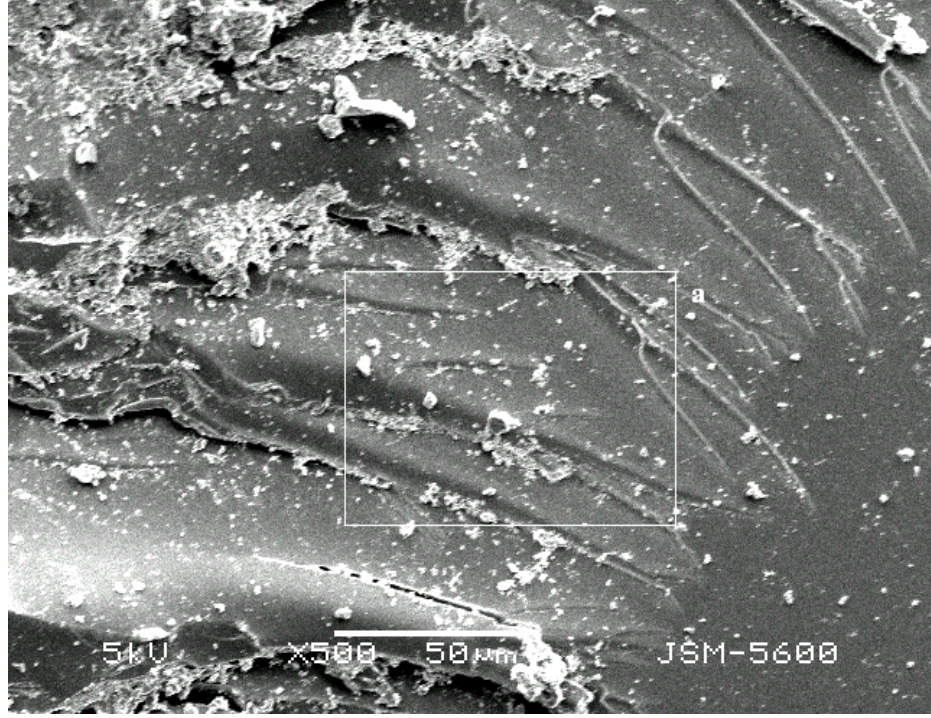


Şekil 4.60: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 100 kat)

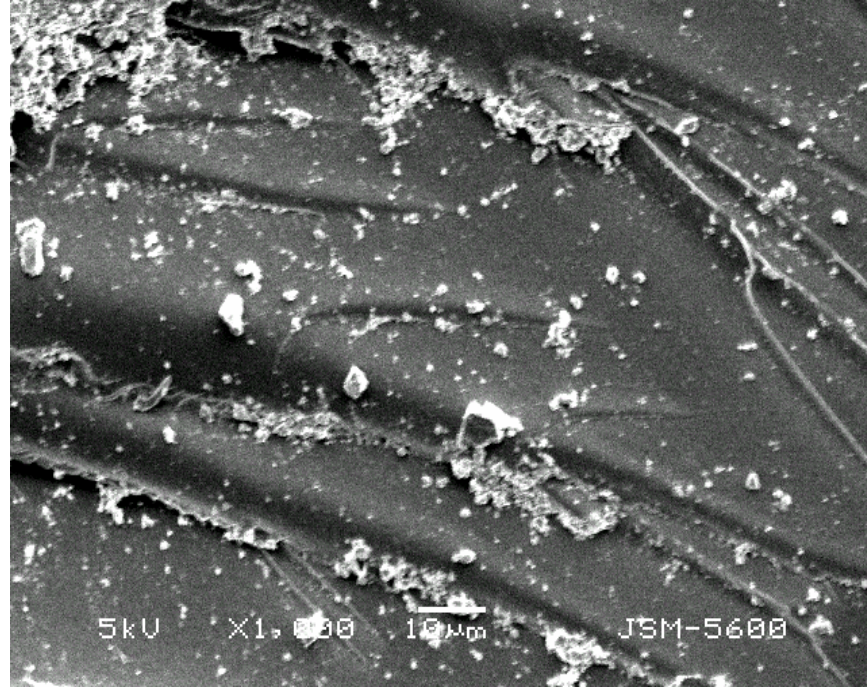


Şekil 4.61: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat)

Şekil 4.62’de ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örnek yüzeyindeki krater şeklindeki bozulmanın kenarı verilmiştir. Şekil 4.62’de (a) ile gösterilen alan büyütülmüş ve krater kenarındaki katmanlar Şekil 4.63’de netleştirilmeye çalışılmıştır. Her iki şekilden de görüleceği gibi bozulma gerçekleştiği alanlarda karbonize olmuş alanlardan farklı olarak tabakalı ve düzgün camsı alanlar gözlenebilmektedir.



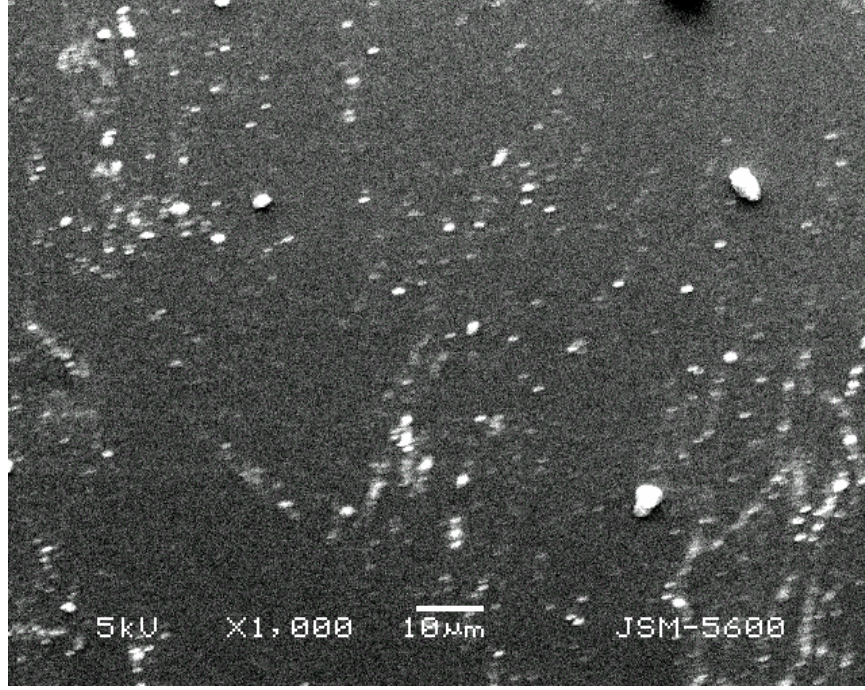
Şekil 4.62: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 500 kat)



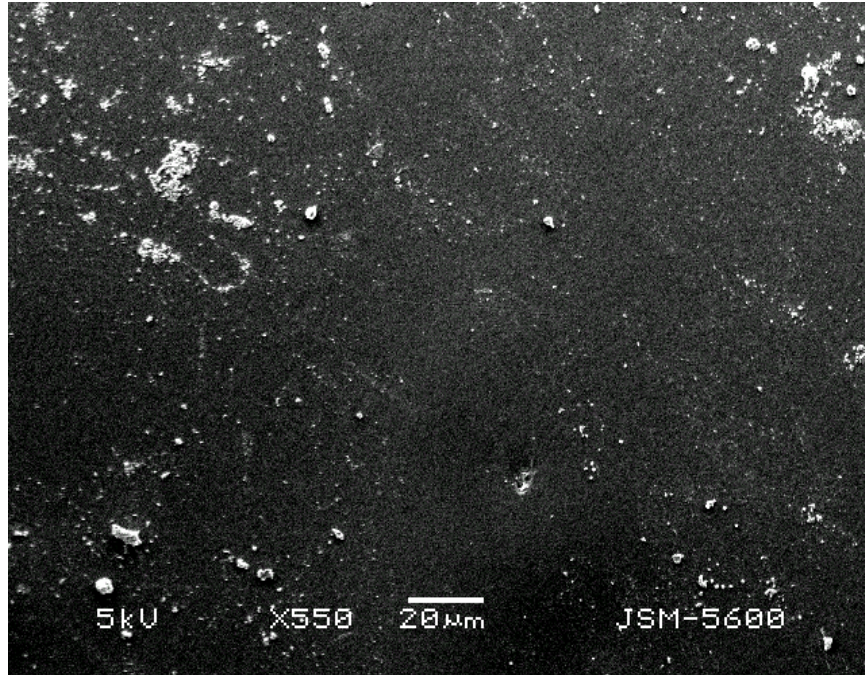
Şekil 4.63: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 500 kat)

Krater kenarından alınan 1000 kat büyütülmüş bir alan Şekil 4.64’de verilmiştir. Krater iç kısmından alınan bir alan ise 550 kat büyütülmüş olarak Şekil 4.65’de verilmiştir. Her

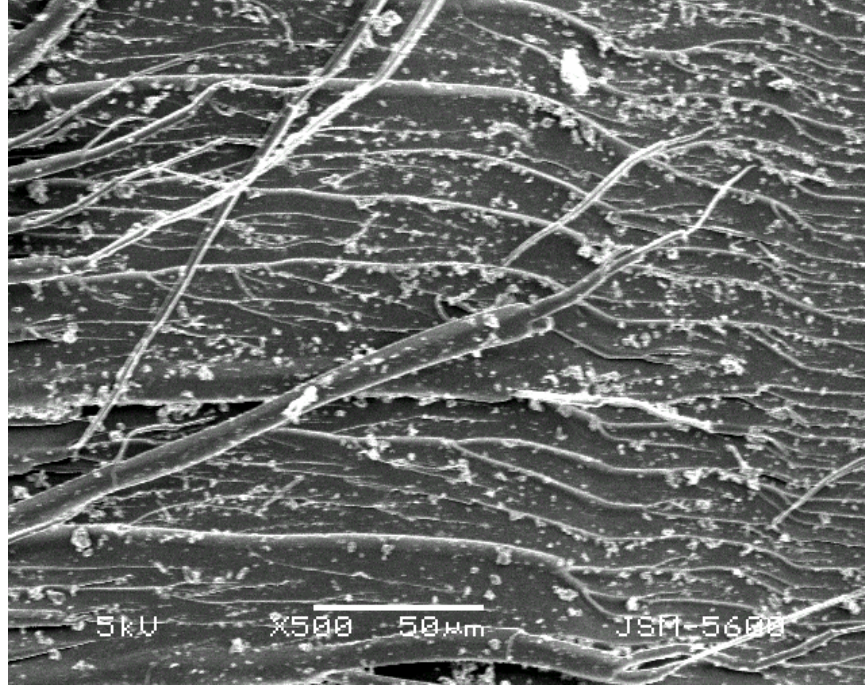
iki şekilde de iz oluşumu sonrası yüzeyin pürüzsüz camsı görünüşü görülmektedir. Krater kenarındaki katmanlı bozulmayı gösteren bir diğer görüntü Şekil 4.66'da verilmiştir.



Şekil 4.64: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat)



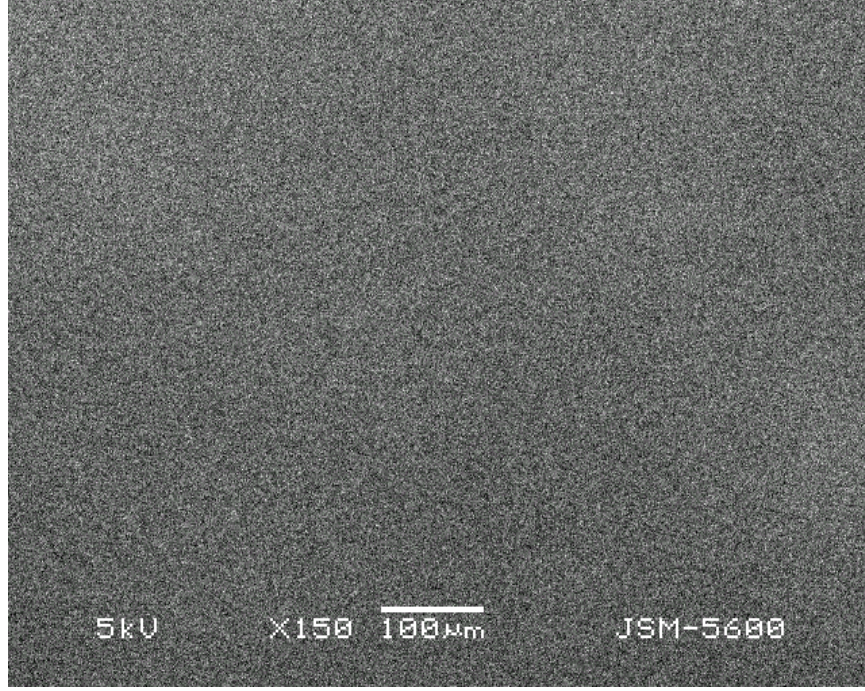
Şekil 4.65: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 550 kat)



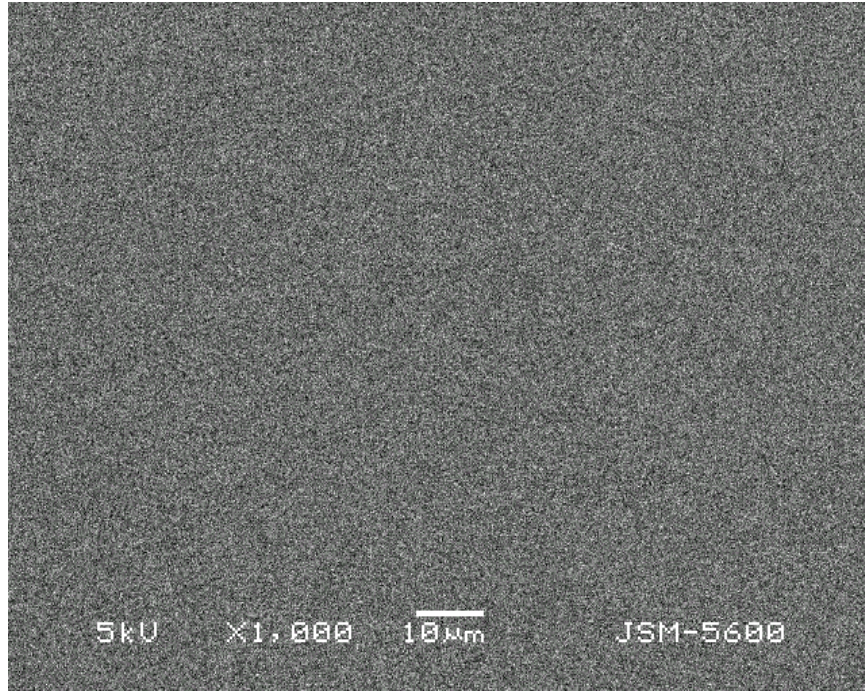
Şekil 4.66: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 0.5 tinal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 500 kat)

Ağırlıkça % 1.0 Tinal Katkılı Örnek

Deneyler gerçekleştirilmeden önce ağırlıkça % 1.0 tinal katkılı örnek yüzeyinden alınan SEM görüntüleri Şekil 4.67’de 150 kat ve Şekil 4.68’de 1000 kat büyütülerek verilmiştir. Bu şekillerden de görüleceği gibi örnek yüzeyi pürüzsüzdür. Polyester örneğe ağırlıkça % 1.0 tinal katkılama sonrası yüzey davranışı ağırlıkça % 0.5 tinal katkılı örneklerde olduğu gibi erozyon şeklinde gerçekleşmiştir. Bu katkılama oranını temsilen seçilen örneğin taramalı elektron mikroskobu ile yapılan inceleme sonucu elde edilen görüntüler Şekil 4.69-4.74’de verilmiştir.

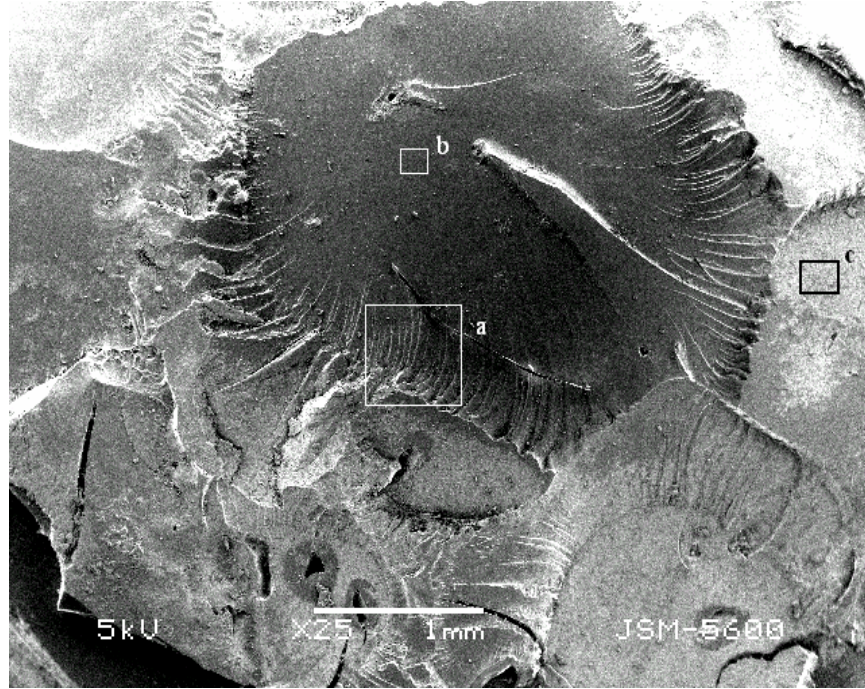


Şekil 4.67: Deneyler gerçekleştirilmeden önce ağırlıkça % 1.0 tinal katkılı polyester örneğin yüzeyi (Büyütme 150 kat).

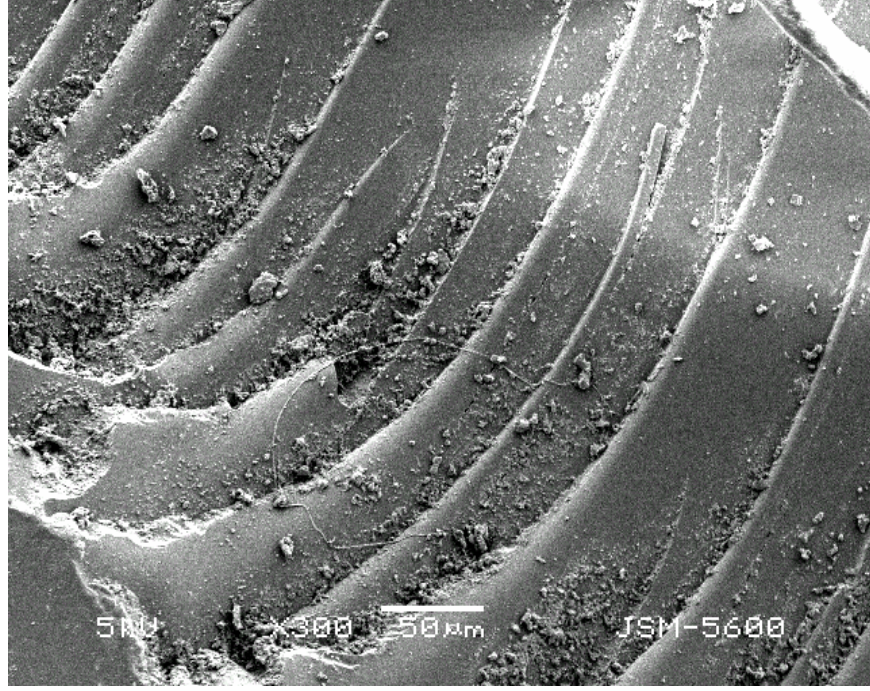


Şekil 4.68: Deneyler gerçekleştirilmeden önce ağırlıkça % 1.0 tinal katkılı polyester örneğin yüzeyi (Büyütme 150 kat).

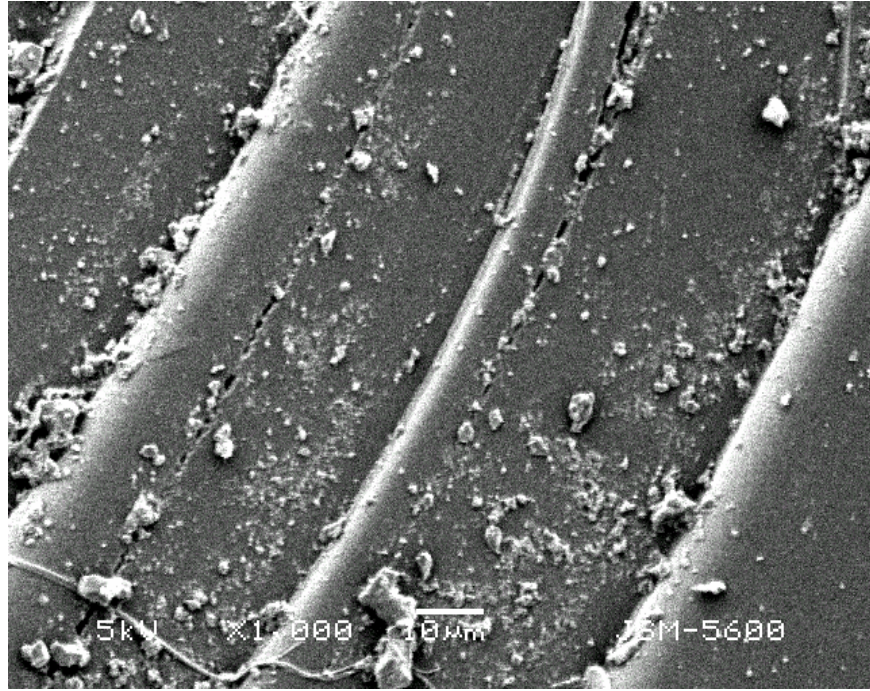
Şekil 4.69’da temsilci örnek yüzeyinde gözlenen bozulma verilmiştir. Şekil 4.69’da (a), (b) ve (c) şeklinde belirtilen bölgeler daha sonra büyütülmüştür. (a) bölgesi krater kenarı olup Şekil 4.70’de verilmiştir. Tabakalanma ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı olan örneklerle benzer olarak gözlemiştir. Daha sonra (a) bölgesi Şekil 4.71’de 1000 kat büyütülerek verilmiştir. Şekil 4.70 ve 4.71’de kenarları incelenen kraterin görüntüleri 300 kat ve 1000 kat büyütülerek elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 4.72’de kraterin orta kısmı olan (b) bölgesi ile işaretlenen alan 1000 kat büyütülerek verilmiştir. Bu alanda pürüzsüz camsı bir yüzey gözlenmiştir. Şekil 4.73 ve 4.74’de erozyonun gerçekleştiği (c) bölgesi ile işaretlenen bölgedeki tepelere ait görüntüler verilmiştir.



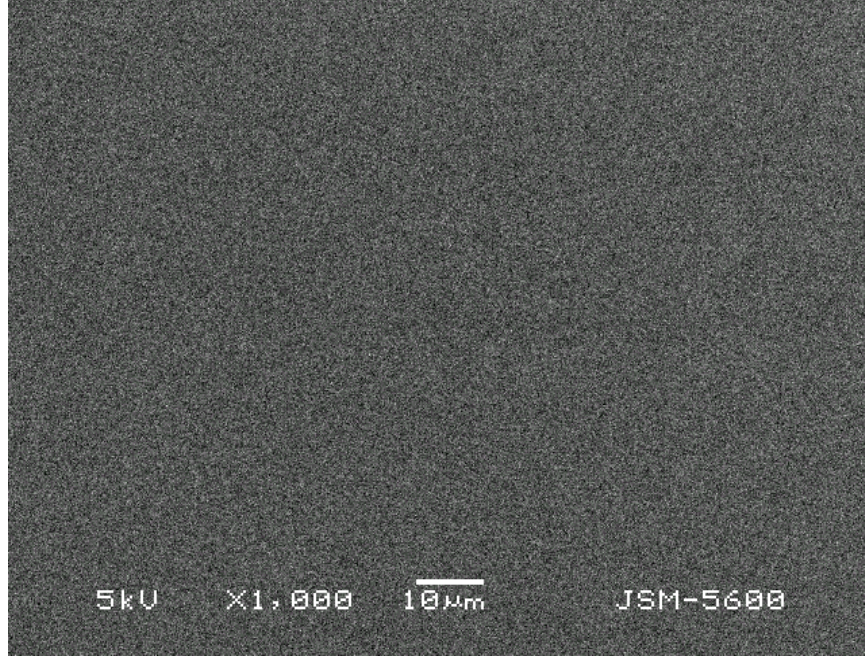
Şekil 4.69: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 25 kat)



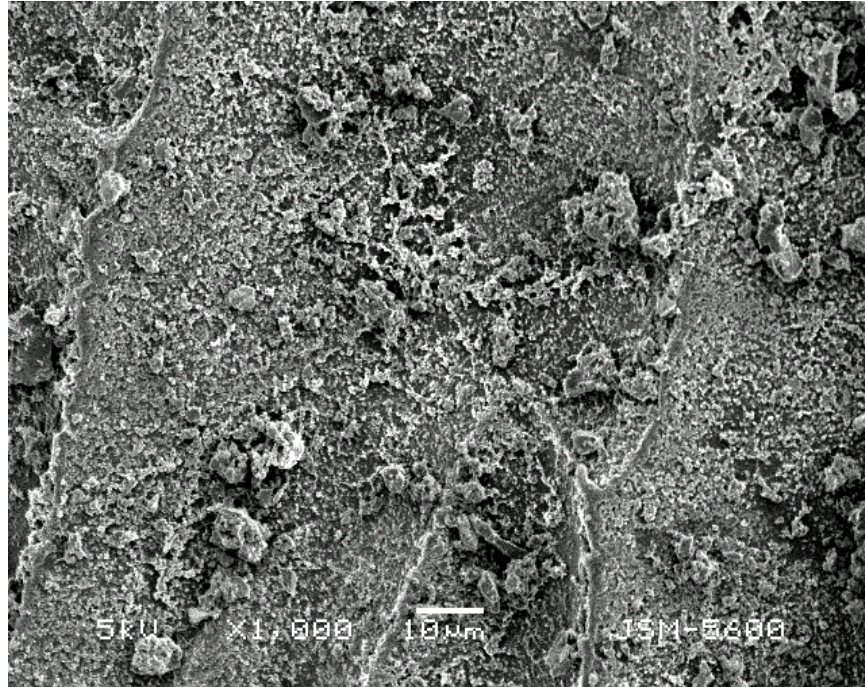
Şekil 4.70: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 300 kat)



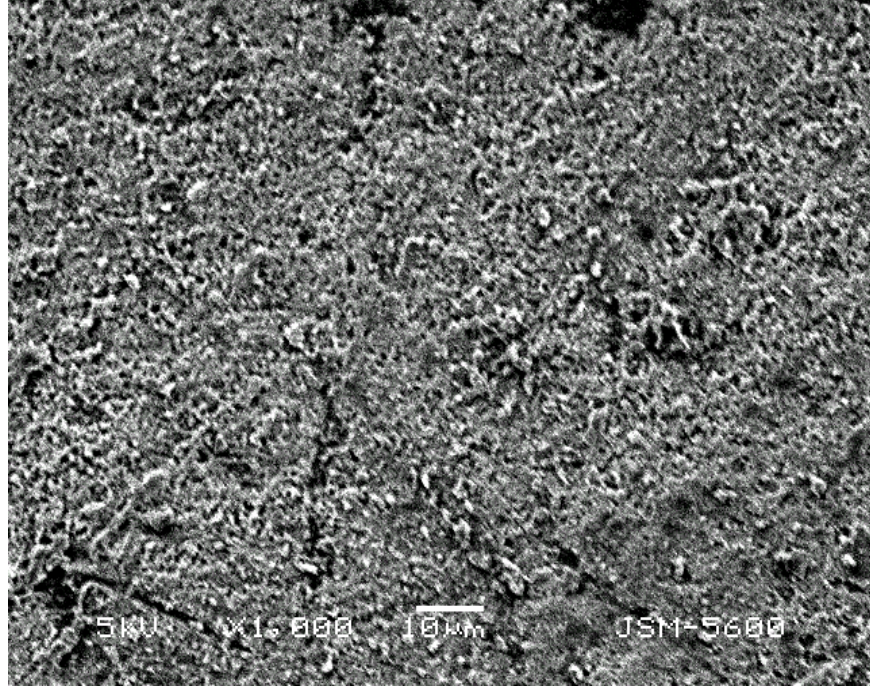
Şekil 4.71: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat)



Şekil 4.72: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat)



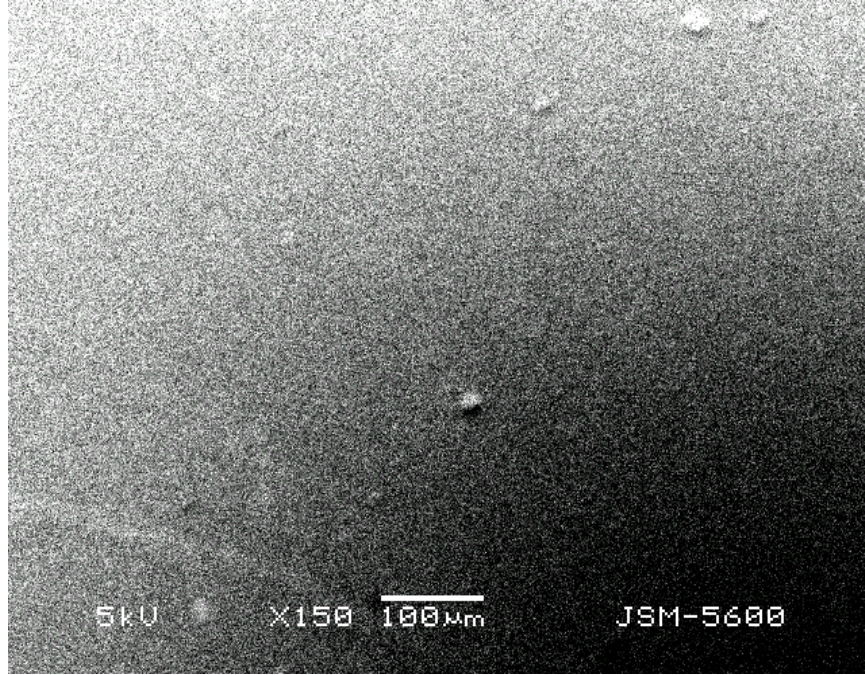
Şekil 4.73: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat)



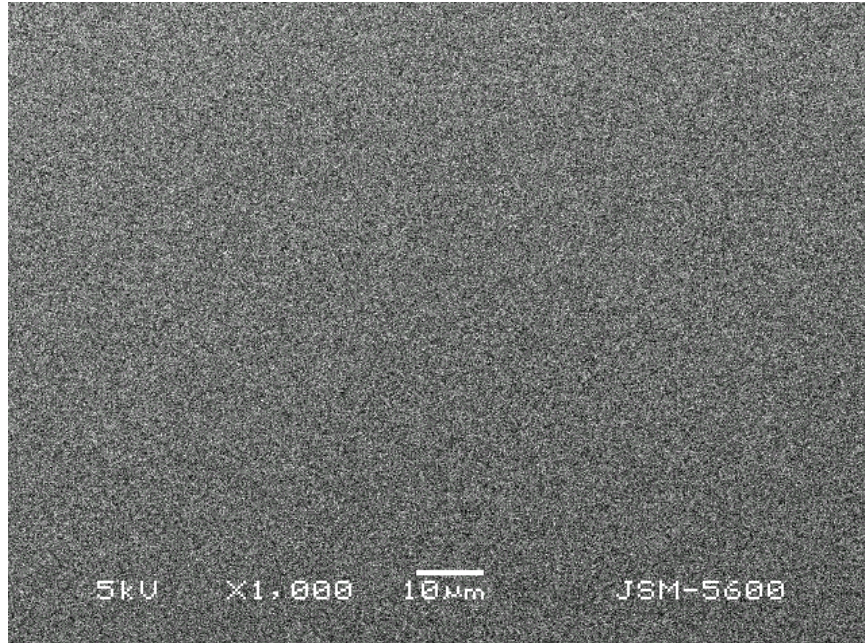
Şekil 4.74: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.0 tincal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat)

Ağırlıkça % 1.5 Tincal Katkılı Örnek

Ağırlıkça % 1.5 tincal katkılı örnekler ile deneyler gerçekleştirilmeden önce yapılan taramalı elektron mikroskobu analizlerinde yüzeyin 150 kat büyütülmüş hali Şekil 4.75’de ve 1000 kat büyütülmüş hali Şekil 4.76’da verilmiştir.



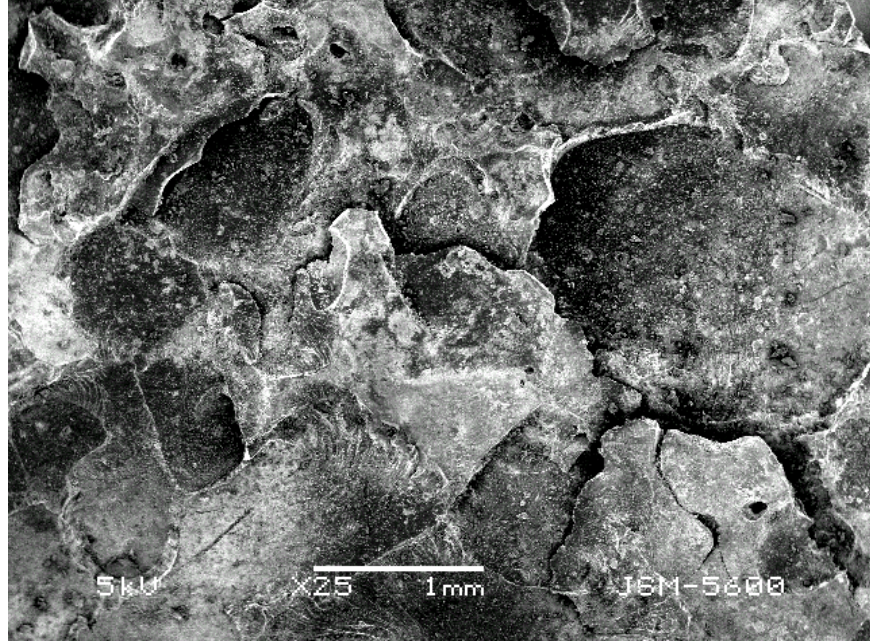
Şekil 4.75: Deneyler gerçekleştirilmeden önce ağırlıkça % 1.5 tinal katkılı polyester örneğin yüzeyi (Büyütme 150 kat).



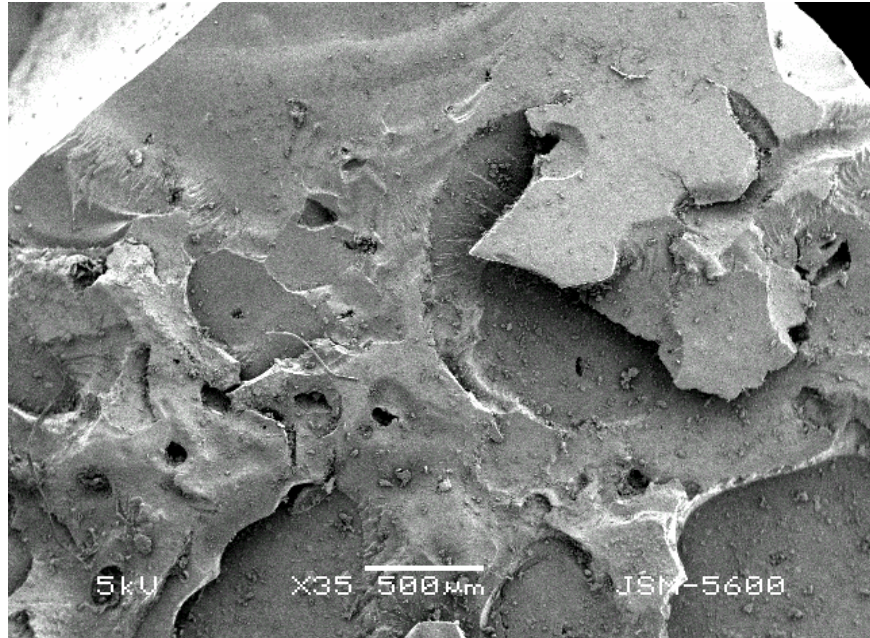
Şekil 4.76: Deneyler gerçekleştirilmeden önce ağırlıkça % 1.5 tinal katkılı polyester örneğin yüzeyi (Büyütme 1000 kat).

Gerçekleştirilen iz oluşumu deneyinin sonucunda elde edilen örnek yüzeyinin kesiti 25 kat büyütülerek Şekil 4.77’de verilmiştir. Aynı yüzey Şekil 4.78 ve Şekil 4.79’da

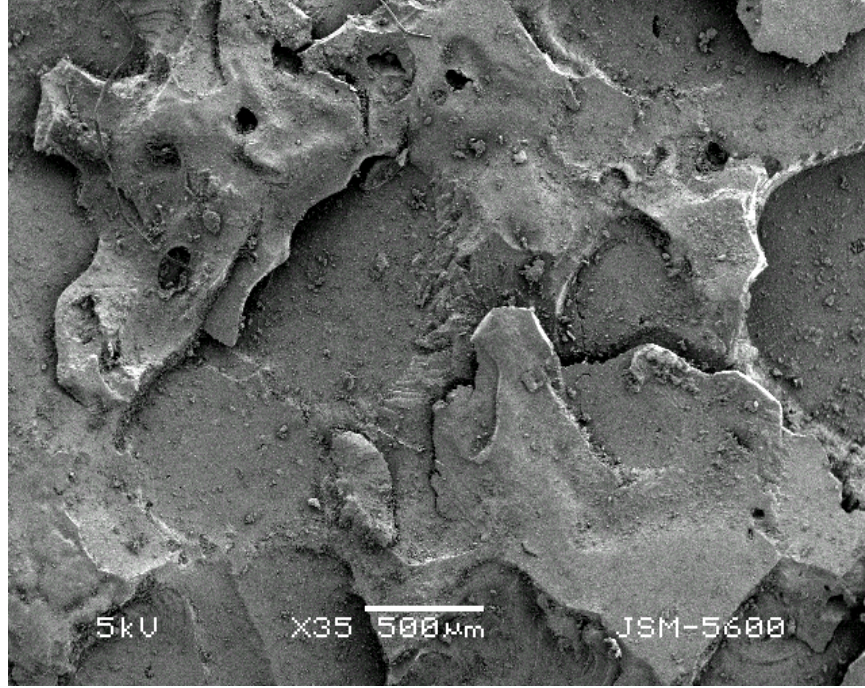
35 kat büyütülerek erozyon şeklindeki tabakalı izler detaylandırılmıştır. İzler ağırlıkça % 0.5 ve % 1.0 tinkal katkıli örneklerden farklıdır. Bu katkı oranında iz oluşumu daha kalın tabakalara sahiptir.



Şekil 4.77: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkıli örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 25 kat)

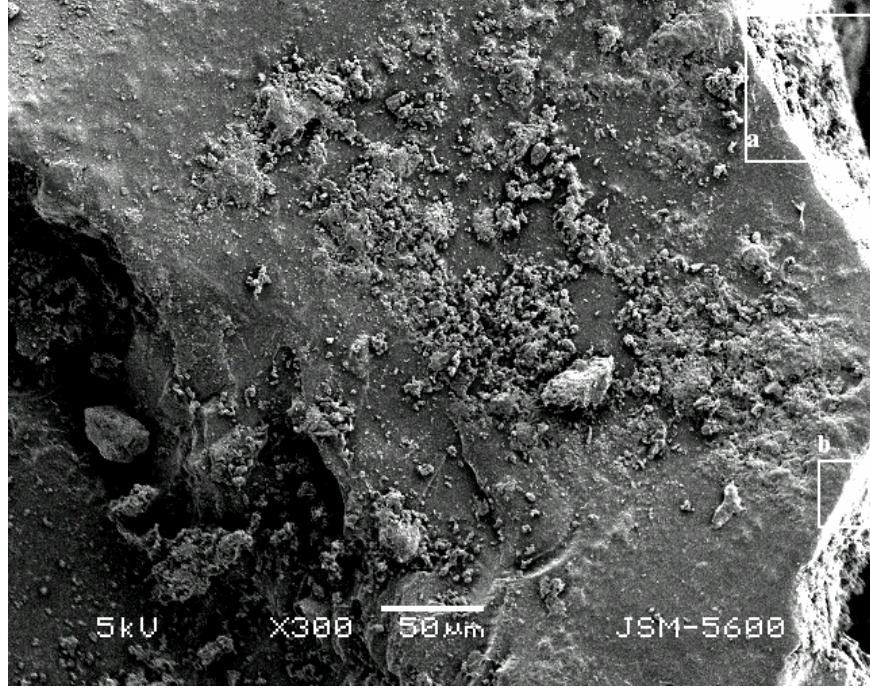


Şekil 4.78: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkıli örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 35 kat)

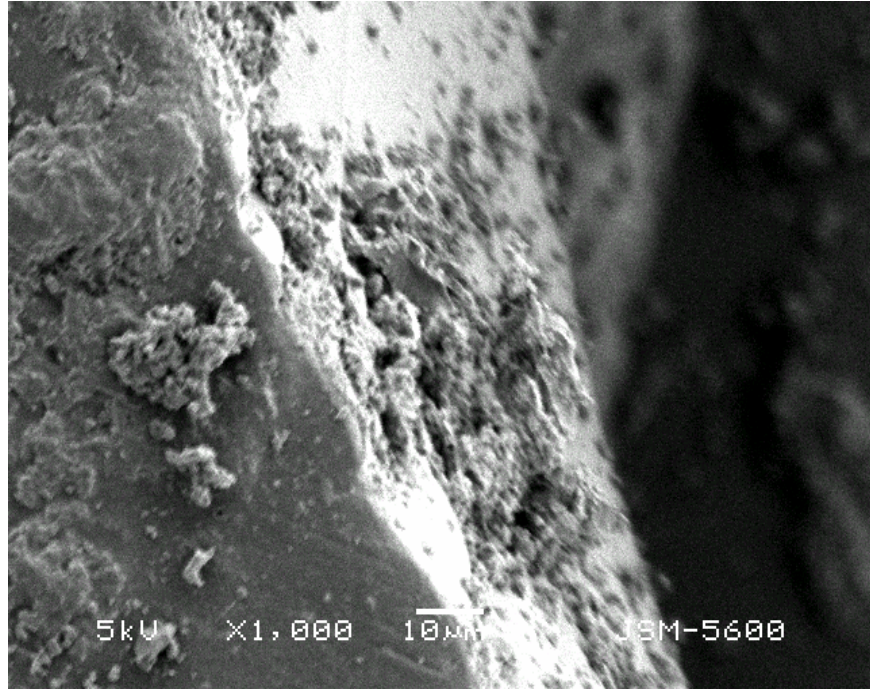


Şekil 4.79: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 35 kat)

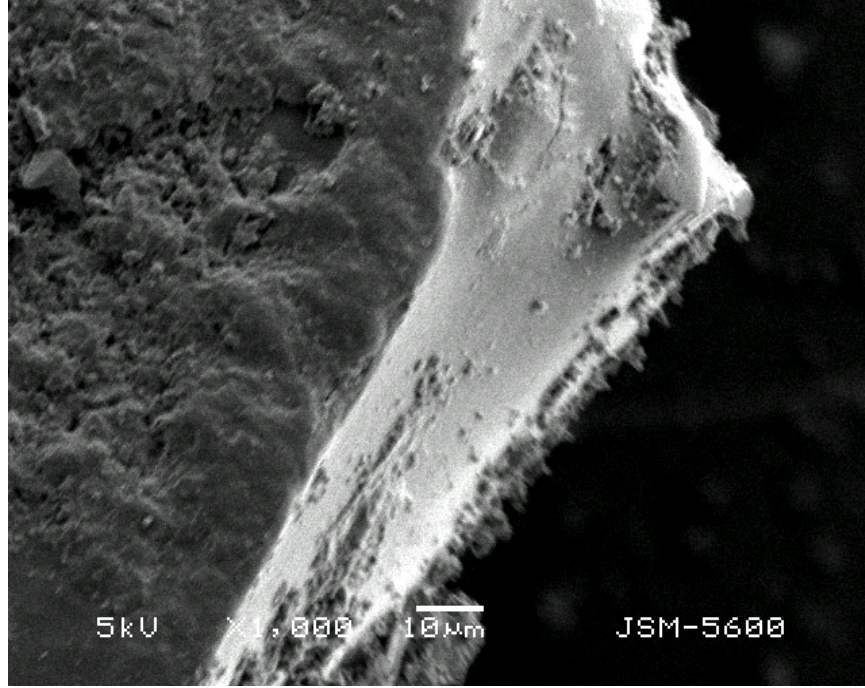
Şekil 4.80’de tabakalı bozulmalardan birinin üst yüzeyi görülmektedir. Şekil 4.80’de (a) ve (b) ile gösterilen alanlar sırasıyla Şekil 4.81 ve Şekil 4.82’de büyütülerek verilmiştir. Şekil 4.83 ve Şekil 4.84’de kalın tabakalar halinde gözlenen bozulmaların üst kesitlerinden alınan herhangi alanlar 1000 kat büyütülerek verilmiştir. Şekil 4.84’de örnek yüzeyinde pürüzsüz bir yüzey gözlenirken Şekil 4.83’de bölgesel tabakalanmalar yer almaktadır.



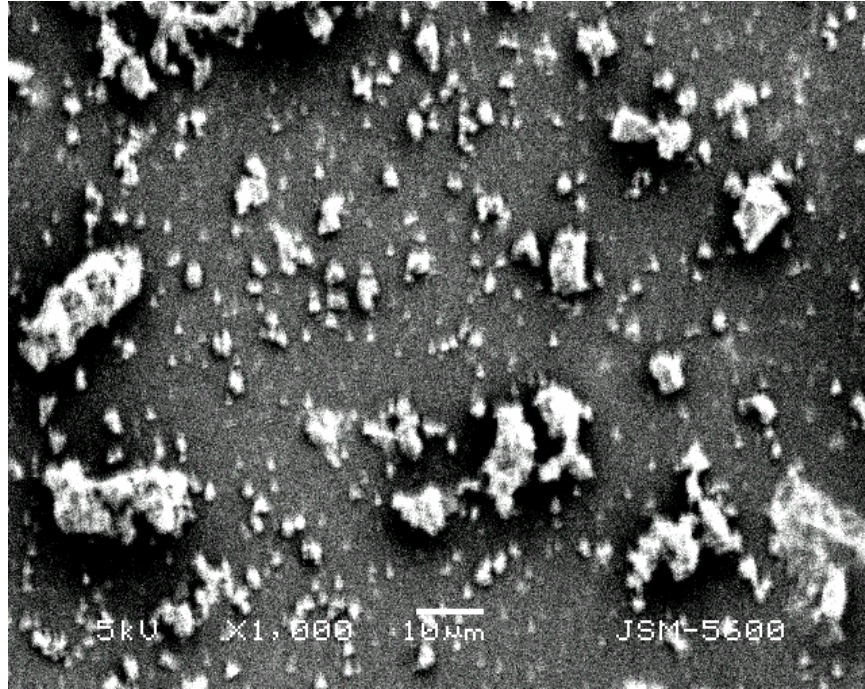
Şekil 4.80: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 300 kat)



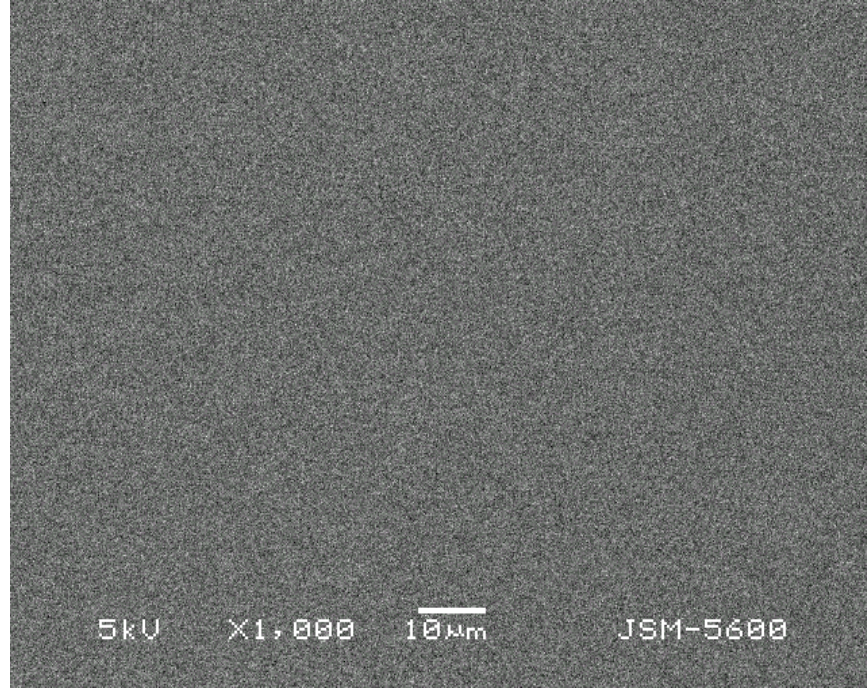
Şekil 4.81: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat)



Şekil 4.82: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat)



Şekil 4.83: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat)

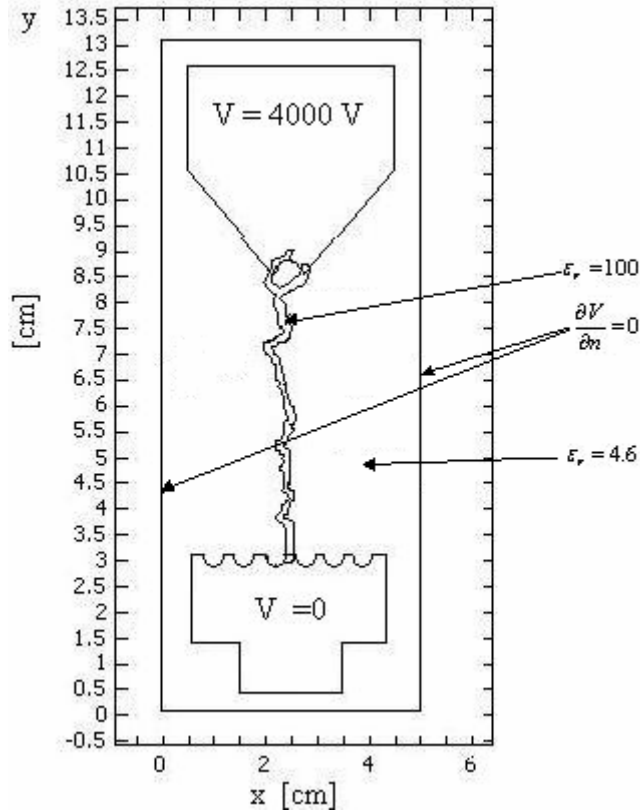


Şekil 4.84: İz oluşumu deneyi sonrası ağırlıkça % 1.5 tinal katkılı örneğe ait SEM görüntüsü (Büyütme 1000 kat)

Bu bölümde gerçekleştirilen SEM analizi ile katkısız ve katkılı örneklerin yüzeylerinde bozulma sonrası elde edilen iz oluşumu farklılıkları incelenmiştir. Katkılı örnek yüzeylerinde katkısız örnek yüzeyinden farklı olarak camsı bir tabaka gözlenmiştir. Gözlenen bu camsı tabakanın katkı oranının % 0.5'den % 1.5'a çıkarılması ile arttığı yapılan analiz ile belirtilmiştir.

4.6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ELEKTRİK ALAN DAĞILIMI ANALİZİ

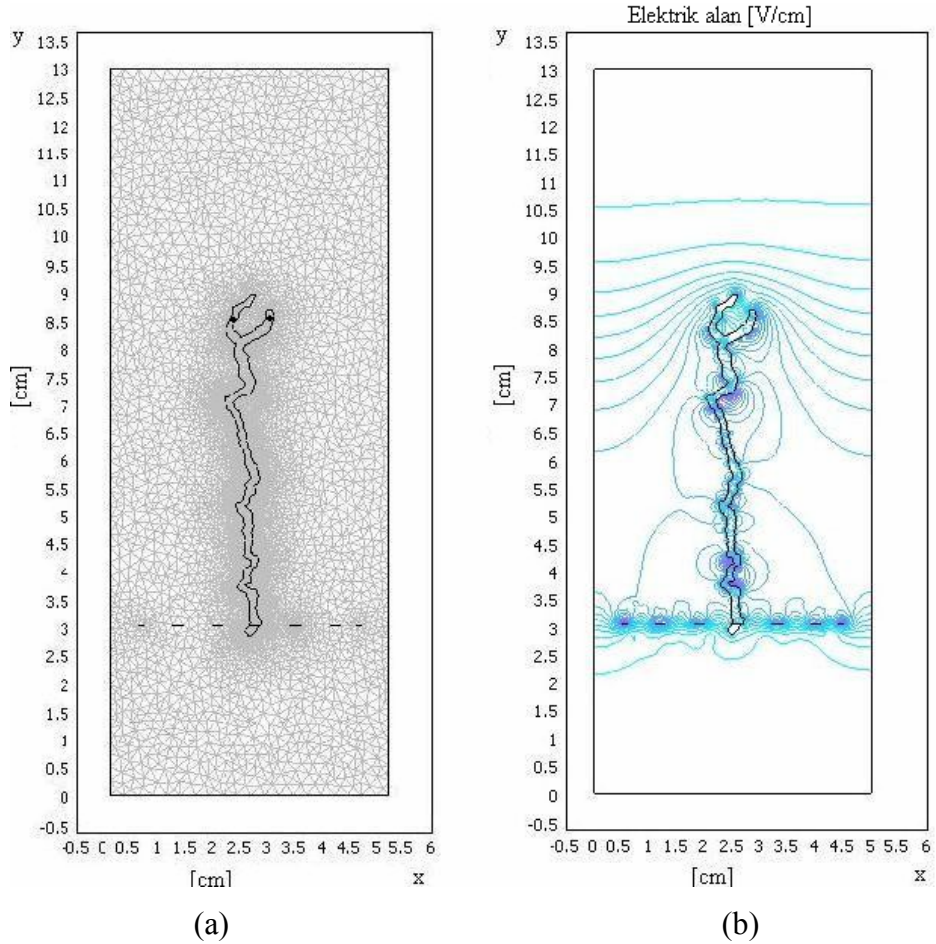
Bu bölümde katkısız ve tinkal katkılı polyester örnek yüzeyindeki elektrik alan dağılımı teorik olarak elde edilmeye çalışılmıştır. Örnek yüzeyinde gözlenen iz oluşumları daha önce Bölüm 3.5’de belirtilen yarı statik elektrik alan uygulamasından yararlanılarak 2 boyutlu olarak FEMLAB 3.2 programında modellenmiştir. Örnek yüzeyleri tarayıcıda taratıldıktan sonra bilgisayar ortamına aktarılmıştır. FEMLAB 3.2’ye aktarılan görüntüler üzerinde sınır ve bölgesel koşullar tanımlanmıştır. Yüksek gerilim elektrodunun ve toprak elektrodunun temas ettiği noktalarda Dirichlet sınır koşulu ve yalıtkan örneği temsil eden polyesterin kenarlarına Neumann sınır koşulu uygulanmıştır. Katkısız ve tinkal katkılı örnek yüzeyleri ile yapılan çalışma sonucunda katkısız ve tinkal katkılı örnek yüeylerinden elde edilen elektrik alan değişimleri Şekil 4.87-4.97’de verilmiştir. Tablo 4.16’da her bir katkı oranı için örnek üzerinden okunan maksimum elektrik alan değeri verilmiştir. Şekil 4.85’de katkısız polyester örneğin modeli verilmiştir.



Şekil 4.85: Katkısız polyester örneğin iz oluşumu sonrası modeli

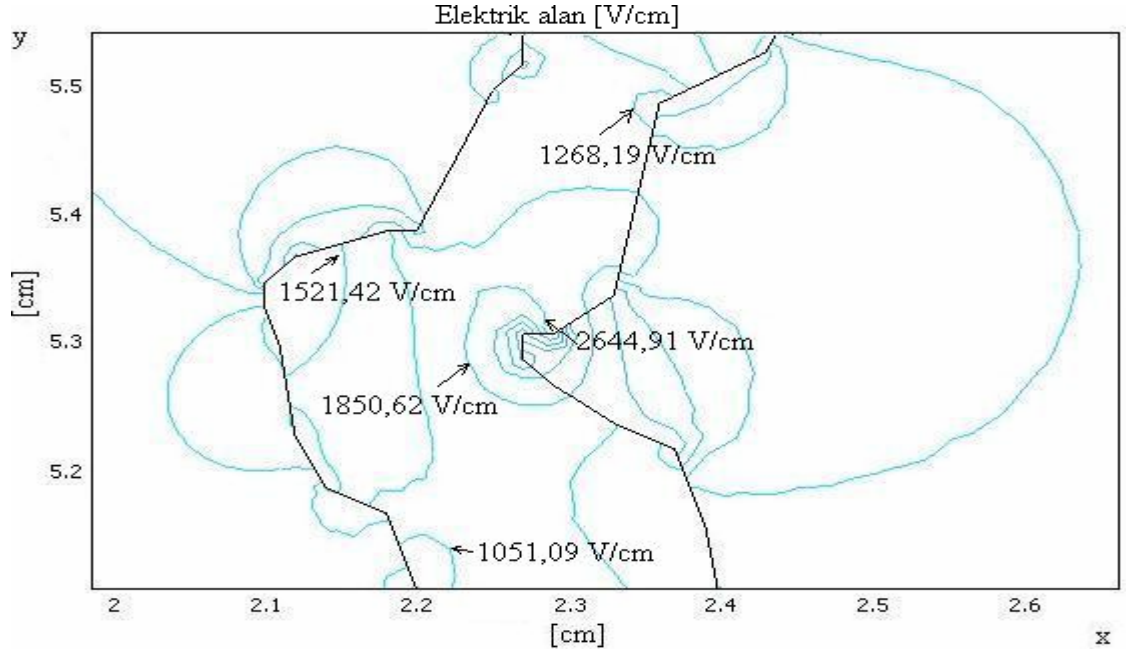
Şekil 4.85’de çizilen modelde yüksek gerilim elektrodu 2 noktadan nokta şeklinde ve toprak elektrodu 7 noktadan polyester yalıtıkana temas etmektedir. Şekil 4.86. (a)’da Şekil 4.85’de çizilen şekil üçgen biçimli sonlu elemana bölünmüştür. Oluşturulan ağ yapıda sınır ve bölgesel koşulların değiştiği noktalarda örnekleme sayısı arttırılmıştır. Şekil 4.86 (b)’de Şekil 4.85’de verilen şekil için elektrik alan dağılımı yüzeyde kontürler halinde çizdirilmiştir. Daha sonra elektrik alan şiddetini gösteren bölge büyütülerek Şekil 4.87’de verilmiştir.

Katkısız polyester örneğe ait iz oluşumunun 2 boyutlu modelinin ağ yapısı Şekil 4.86.a’da ve elektrik alan dağılımı Şekil 4.86.b’de verilmiştir. Şekil 4.87’de örnek yüzeyinde elektrik alan dağılımını gösteren bölge büyütülerek verilmiştir.



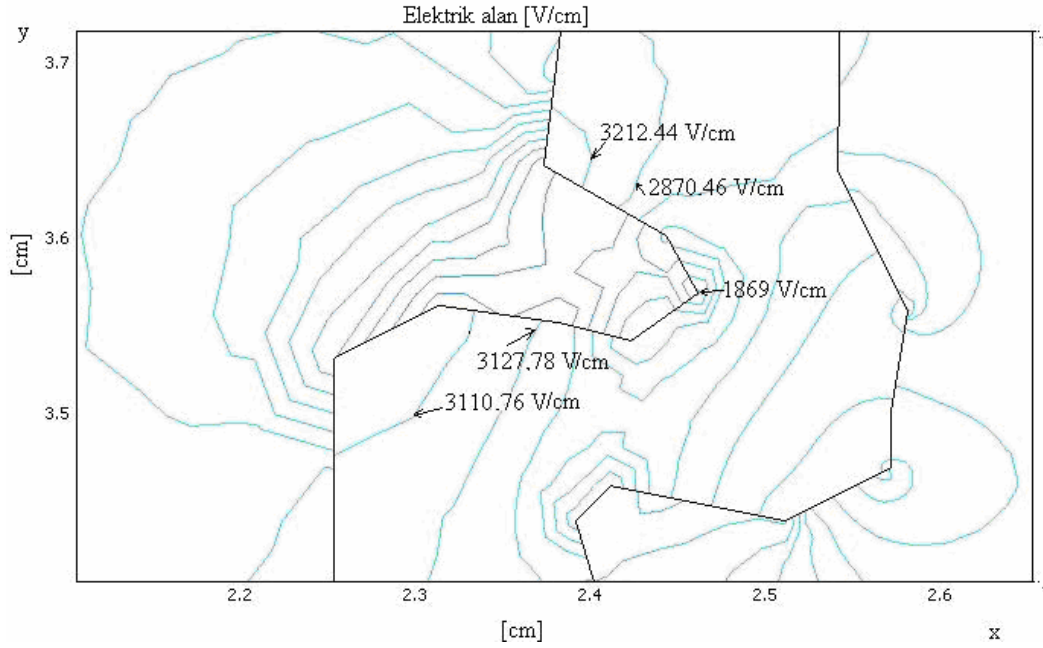
Şekil 4.86: Katkısız polyester örneğe ait iz oluşumu sonrası çizilen modelin

(a) ağ yapısı (b) elektrik alan dağılımı.



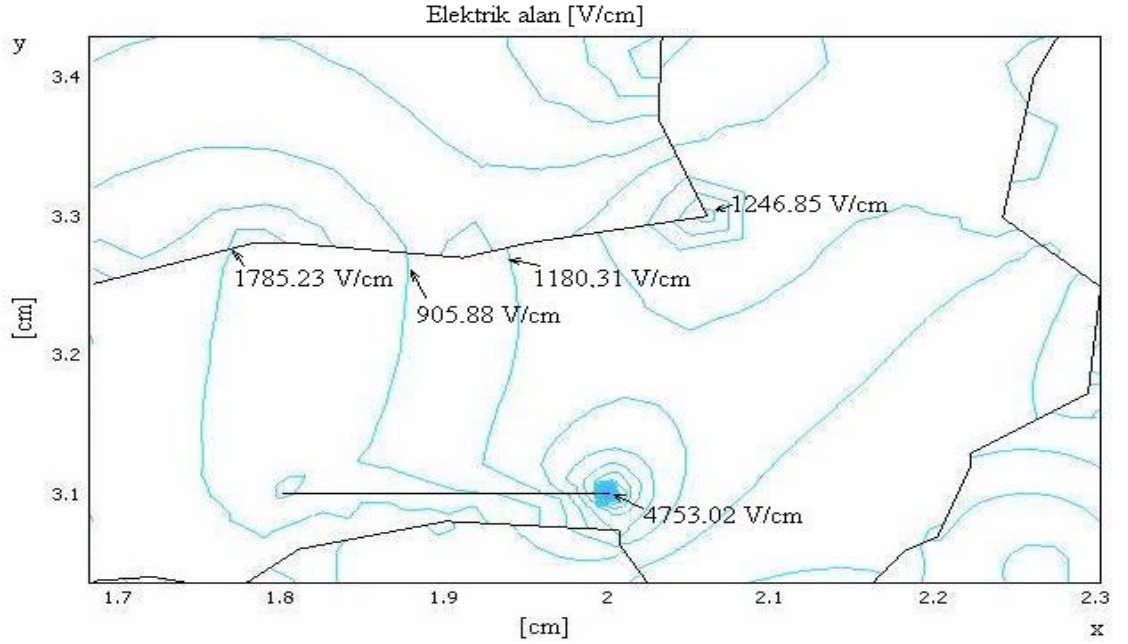
Şekil 4.87: Katkısız örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.

Sonlu elemanlar yöntemi ile incelenen ağırlıkça % 0.1 tinkal katkıli polyester örneğin yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı büyütülerek Şekil 4.88’de verilmiştir.



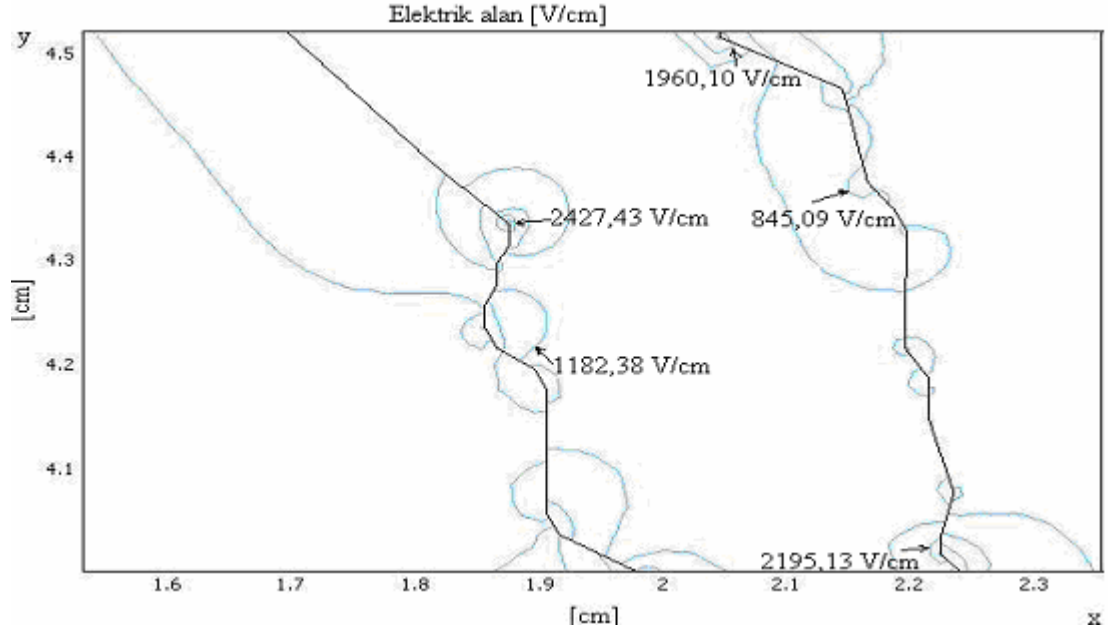
Şekil 4.88: Ağırlıkça % 0.1 tinkal katkıli örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.

Sonlu elemanlar yöntemi ile incelenen ağırlıkça % 0.2 tinkal katkıli polyester örneğin yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılım büyütülerek Şekil 4.89’da verilmiştir.



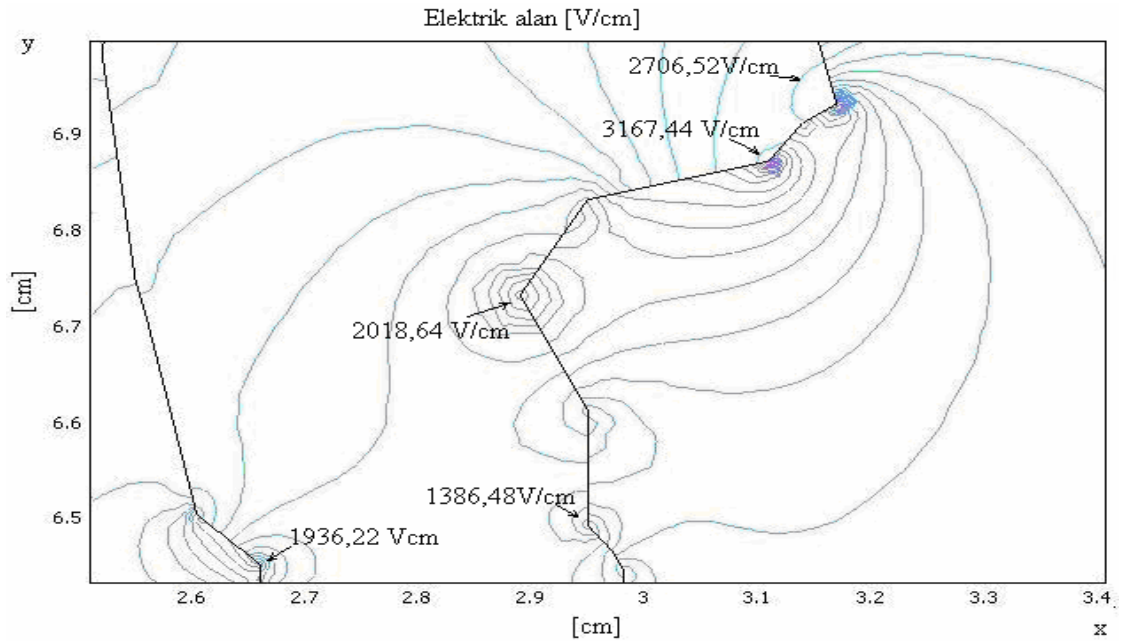
Şekil 4.89: Ağırlıkça % 0.2 tinkal katkıli örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.

Sonlu elemanlar yöntemi ile incelenen ağırlıkça % 0.3 tinkal katkıli polyester örneğin yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılım büyütülerek Şekil 4.90’da verilmiştir.



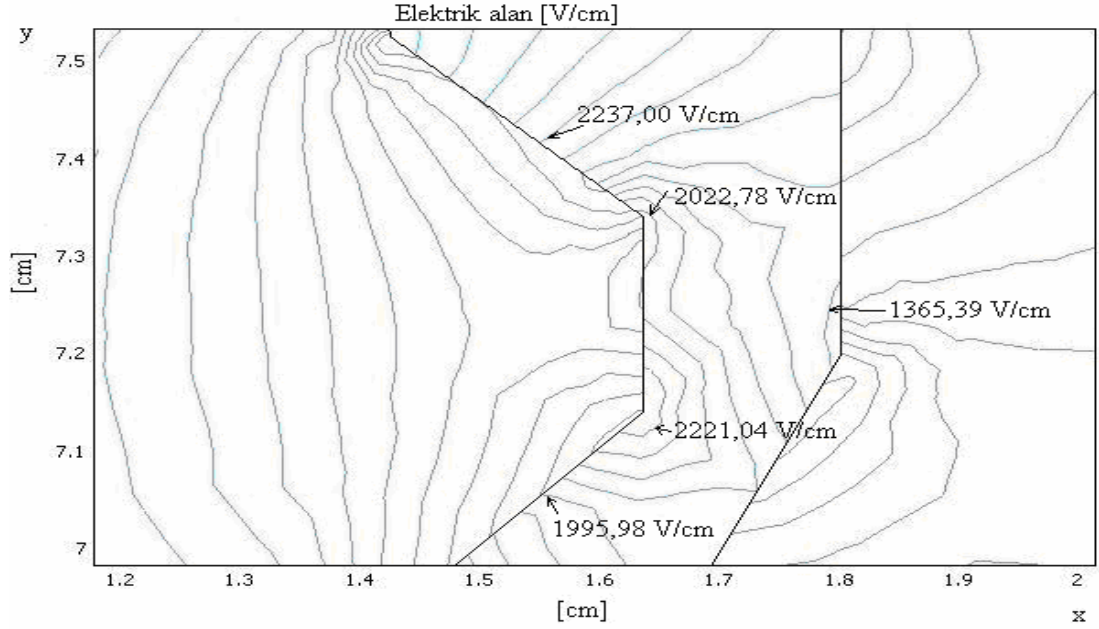
Şekil 4.90: Ağırlıkça % 0.3 tinkal katkılı örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı

Sonlu elemanlar yöntemi ile incelenen ağırlıkça % 0.4 tinkal katkılı polyester örneğin yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı büyütülerek Şekil 4.91’de verilmiştir.



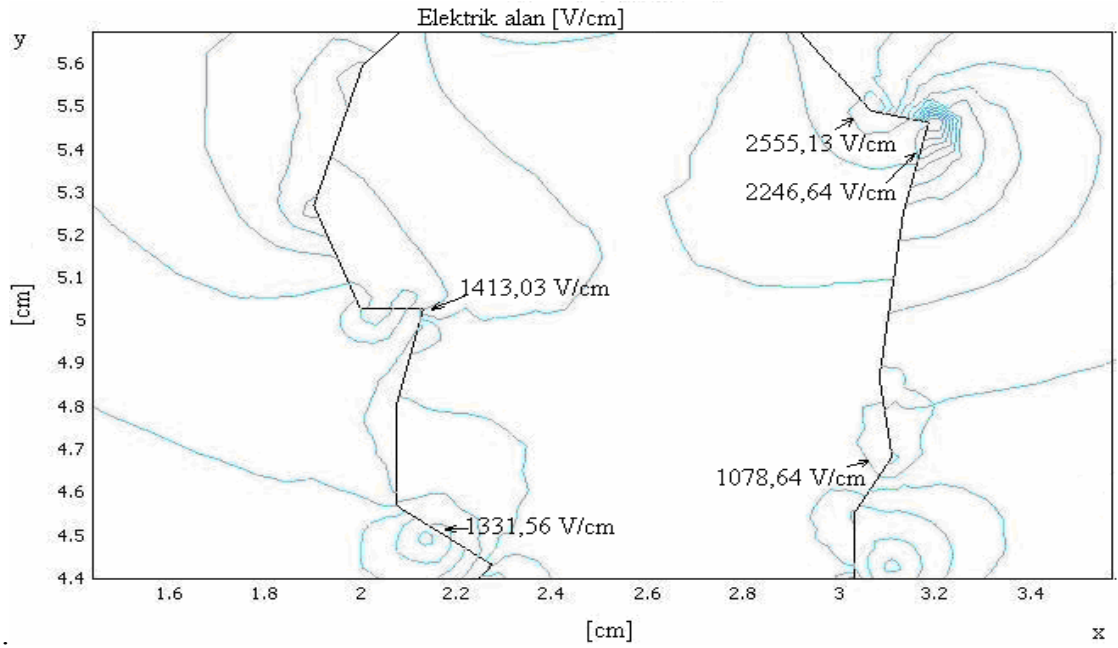
Şekil 4.91: Ağırlıkça % 0.4 tinkal katkılı örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.

Sonlu elemanlar yöntemi ile incelenen ağırlıkça % 0.6 tinkal katkıli polyester örneğin yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı büyütülerek Şekil 4.92’de verilmiştir.



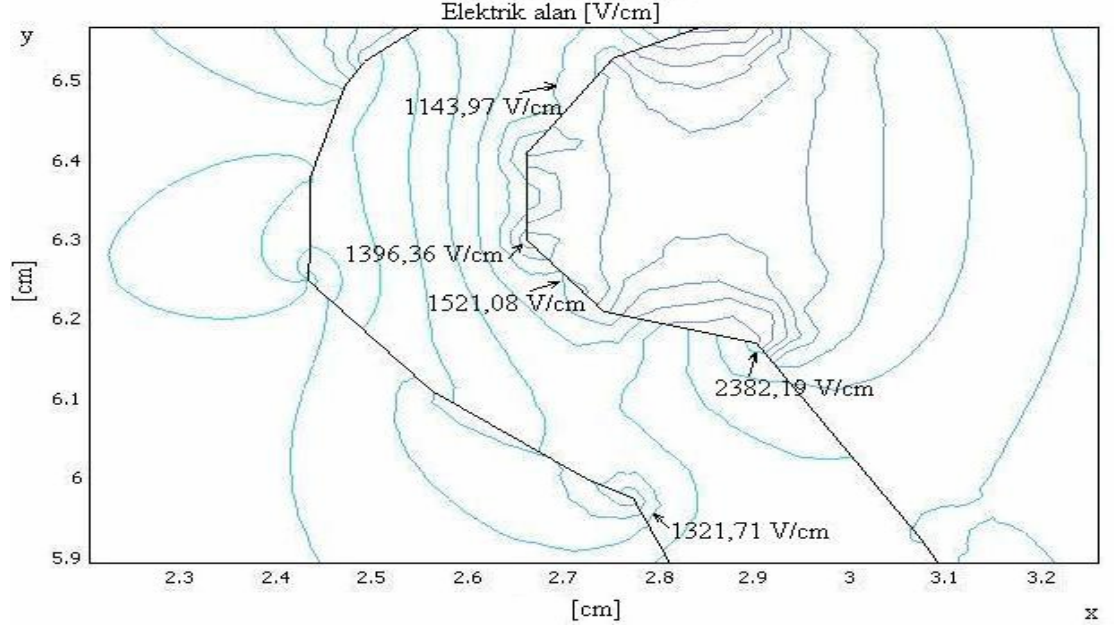
Şekil 4.92: Ağırlıkça % 0.6 tinkal katkıli örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.

Ağırlıkça % 0.7 tinkal katkıli polyester örneğin yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı büyütülerek Şekil 4.93’de verilmiştir.



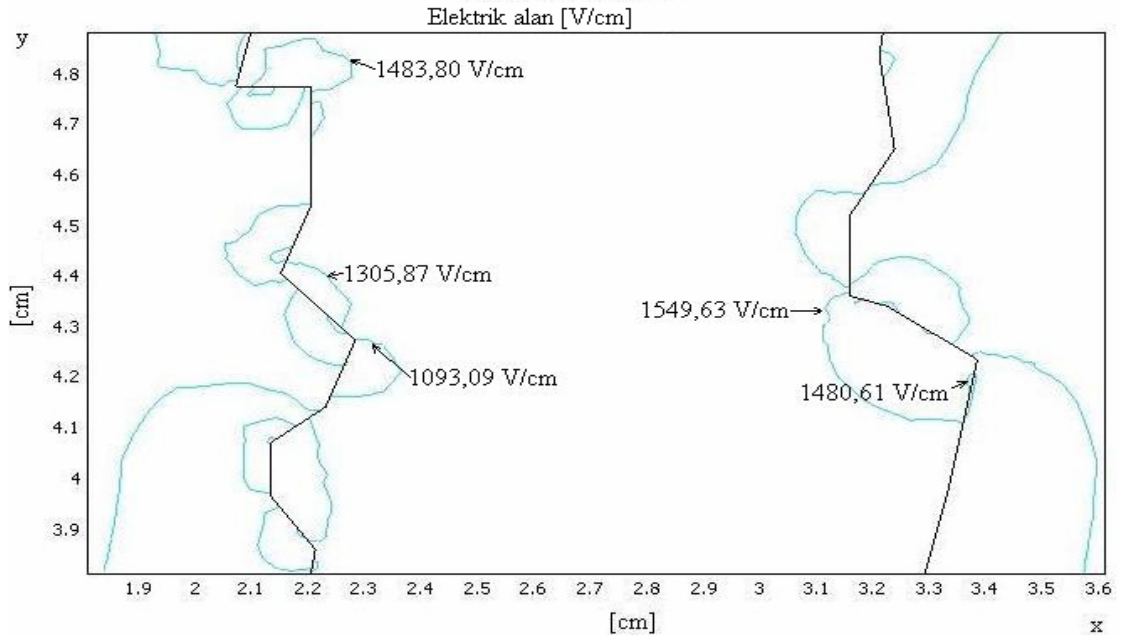
Şekil 4.93: Ağırlıkça % 0.7 tinkal katkıli örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.

Sonlu elemanlar yöntemi ile incelenen ağırlıkça % 0.8 tinkal katkıli polyester örneğin yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı büyütülerek Şekil 4.94’de verilmiştir.



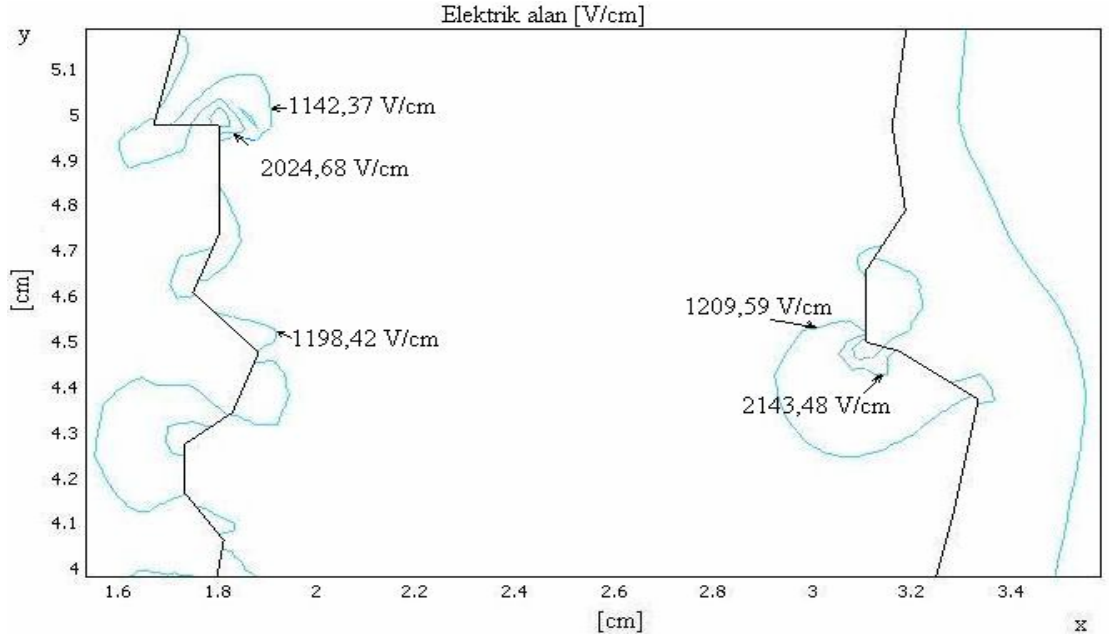
Şekil 4.94: Ağırlıkça % 0.8 tinkal katkıli örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.

Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkıli polyester örneğin yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı büyütülerek Şekil 4.95’de verilmiştir.



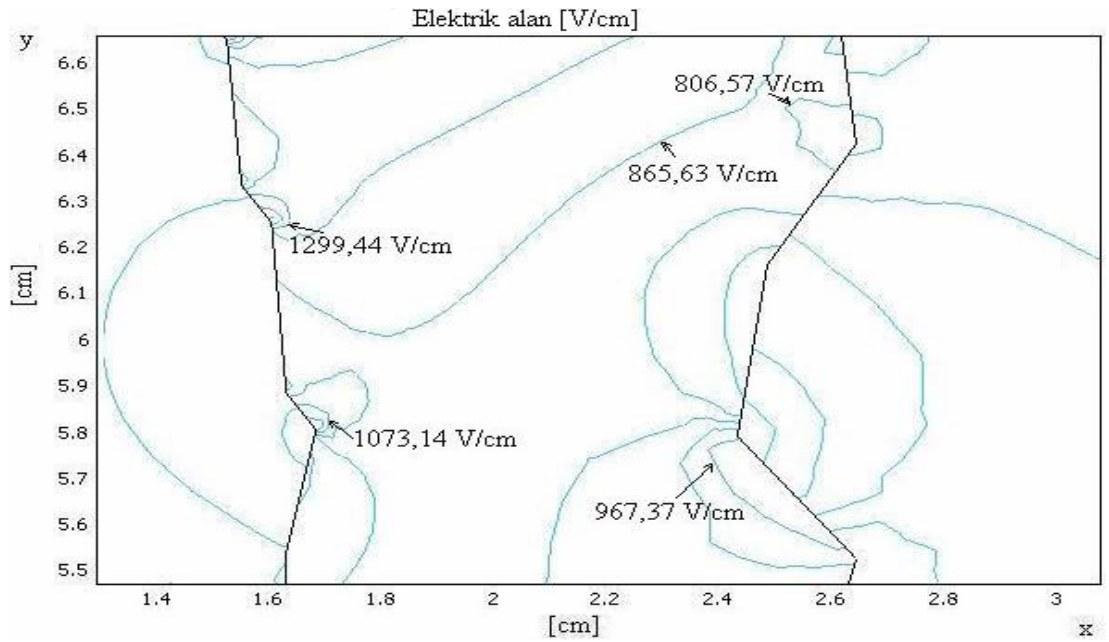
Şekil 4.95: Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkıli örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.

Ağırlıkça % 1.2 tinal katkılı polyester örneğin yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı büyütülerek Şekil 4.96'da verilmiştir.



Şekil 4.96: Ağırlıkça % 1.2 tinal katkılı örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.

Ağırlıkça % 1.5 tinal katkılı polyester örneğin yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı büyütülerek Şekil 4.97'de verilmiştir.



Şekil 4.97: Ağırlıkça % 1.5 tinal katkılı örnek yüzeyinden elde edilen model üzerindeki elektrik alan dağılımı.

Polyester yalıtıkana yapılan tinkal katkısı ile değişen yüzey davranışı ve iz oluşumunun genişlemesi sonrası yüzeydeki elektrik alan değerindeki değişim bu bölümde teorik olarak gösterilmiştir. Femlab 3.2 ile kullanılarak katkısız ve farklı oranda tinkal katkılı örnek yüzeyi üzerinden elde edilen modellerdeki maksimum alan şiddeti değerinin katkı oranına göre değişimi Tablo 4.16’da verilmiştir.

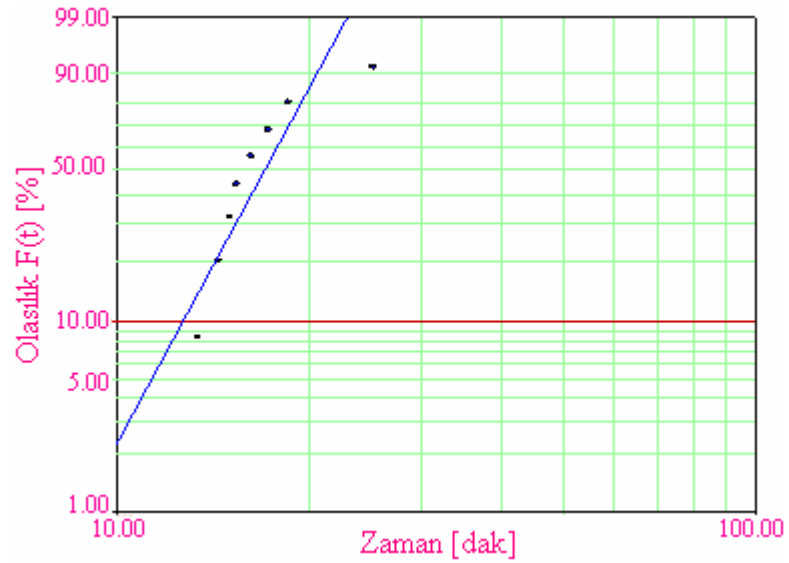
Tablo 4.16: Femlab 3.2 ile modellenen farklı oranda tinkal katkılı temsilci örneğin yüzeyi üzerinden elde edilen yüzeydeki maksimum alan şiddeti değerinin katkı oranına göre değişimi

Ağırlıkça tinkal konsantrasyonu, [%]	$E_{\max}$, [V/cm]
0	2644.91
0.1	3212.44
0.2	4753.02
0.3	2427.43
0.4	3167.44
0.6	2237.00
0.7	2555.13
0.8	2382.19
1.0	1549.63
1.2	2143.48
1.5	1295.44

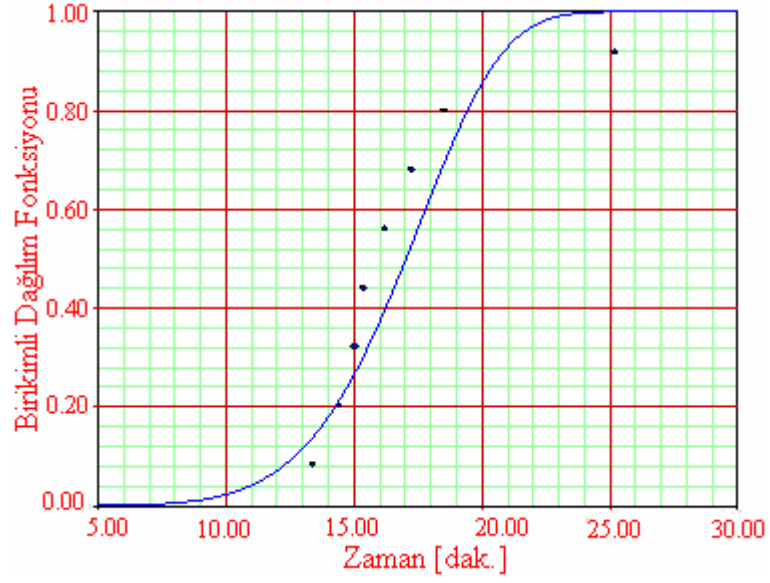
4.7. GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

Bu bölümde tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen 132 adet tinkal katkılı örneğe ait deneylerin her bir katkı oranı için ayrı ayrı ve tüm deneyler için katkı oranına bağlı olarak güvenilirlik analizi yapılmıştır. Güvenilirlik analizi yapılırken Weibull 7++ programından yararlanılmıştır. Yapılan istatistiksel analiz sonucu her bir katkı oranı için ayrı ayrı ve katkı oranına bağlı olarak güvenilirliği veren güvenilirlik bağıntıları çıkarılmıştır.

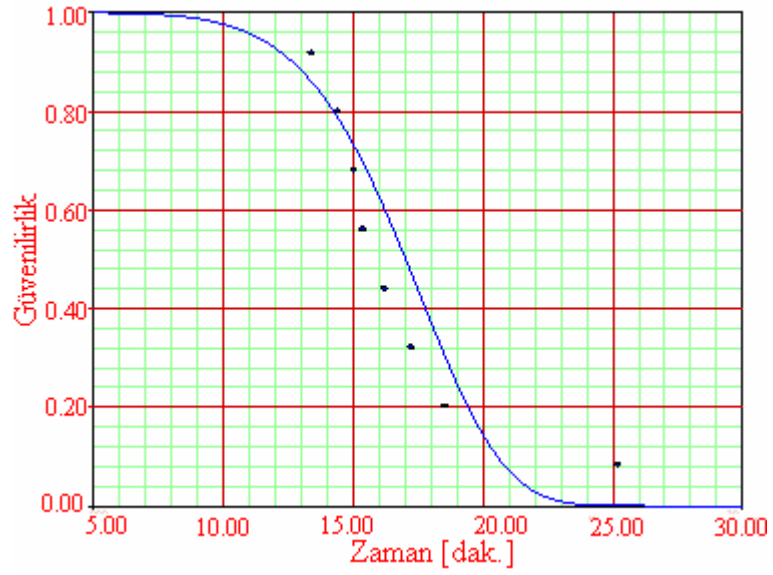
Katkısız polyester örnekler ile 8 adet deney gerçekleştirilmiş deneyler sonrası elde edilen ömür sürelerinin Weibull Dağılımına uygunluğu Şekil 4.98’de verilmiştir. Şekil 4.99’da katkısız polyester örnekler için birikimli dağılım fonksiyonu ve Şekil 4.100’de güvenilirlik eğrisi çıkarılmıştır.



Şekil 4.98: Katkısız polyester örnekler ile yapılan deneyler sonrası elde edilen ömür sürelerinin Weibull dağılımına uygunluğu

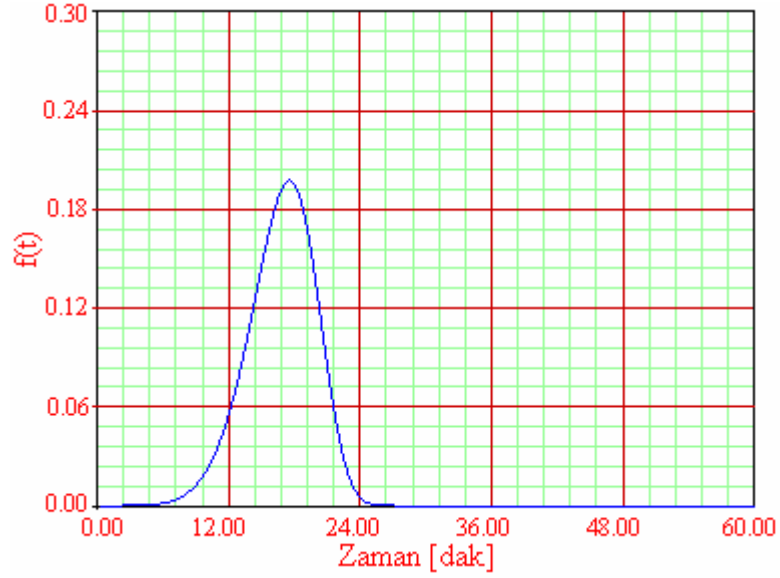


Şekil 4.99: Katkısız polyester örnekler için birikimli dağılım fonksiyonu

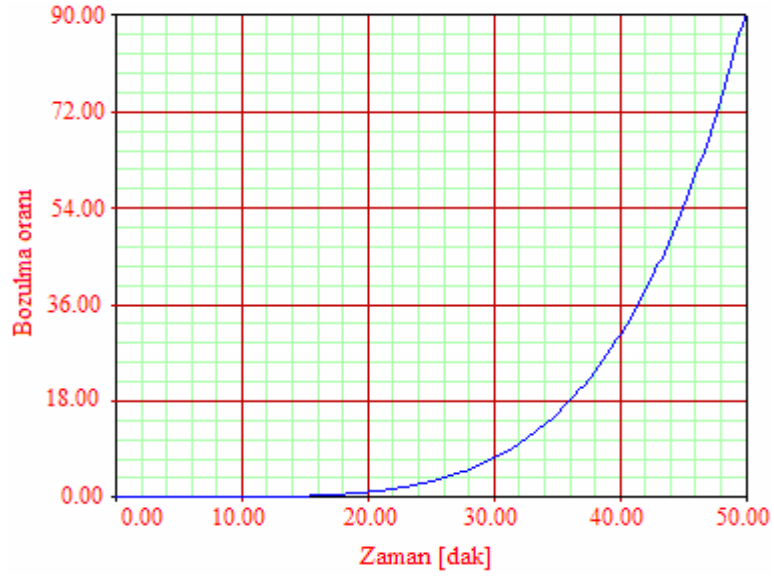


Şekil 4.100: Katkısız polyester örnekler için güvenilirlik eğrisi

Katkısız polyester örnekler için gerçekleştirilen deneyler sonucunda ortalama ömür süresi 18:24 dakika olarak bulunmuştur. Şekil 4.101'deki olasılık yoğunluk fonksiyonu incelendiğinde katkısız polyester örnekler için güvenilirliğin bozulduğu değer olarak ortalama ömür 17:23 dakika olarak bulunmaktadır.



Şekil 4.101: Katkısız polyester örnekler için olasılık yoğunluk fonksiyonu



Şekil 4.102: Katkısız polyester örnekler için bozulma oranı–zaman eğrisi

Polyester yalıtıkana yapılan tinkal katkısı ile ömür süresi arasındaki değişimi bulmak için gerçekleştirilen deneyler sonrası elde edilen sonuçların Weibull dağılımına uygunluğu, güvenilirlik eğrisi ve olasılık yoğunluk fonksiyonuna ait grafikler Ek-A da verilmiştir. Yapılan istatik çalışma sonucunda her bir katkı oranı için ömür süresi (iz oluşumu başlangıç süresi) ve Weibull dağılımı ile bulunan ortalama ömür süresi Tablo 4.17’de verilmiştir. Şekil 4.101’de Weibull programından elde edilen parametrelerle bulunan güvenilirlik fonksiyonunun eğrisi verilmiştir.

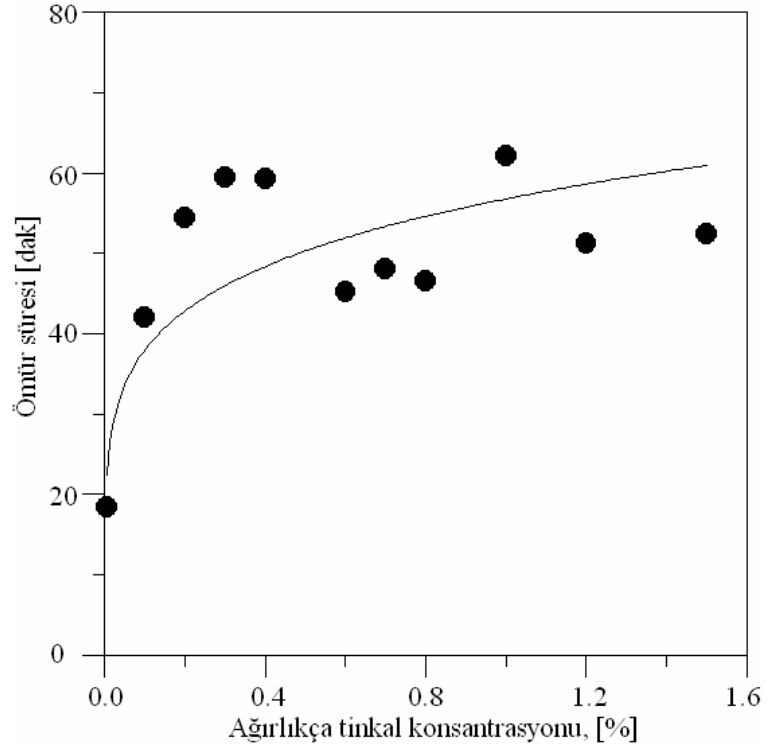
Tablo 4.17: Ağırlıkça % tinkal katkısının ortalama ömür süresine etkisi.

Ağırlıkça % tinkal katkısı	Ortalama ömür süresi [dak.]	Weibull analizi ile bulunan ortalama süresi [dak.]
0	18:24	17:51
0.1	42:06	50:14
0.2	54:34	54:06
0.3	59:41	56:27
0.4	59:29	55:31
0.6	45:12	58:17
0.7	48:01	44:51
0.8	46:51	46:17
1.0	62:17	62:27
1.2	52:11	55:19
1.5	52:43	54:36

Tablo 4.17 kullanılarak ağırlıkça tinkal katkısının iz oluşumu başlangıç süresi ile değişimi eşitlik (4.1)'de verilmiştir.

$$\ln(t) = 0.175996 * \ln(N) + 4.02897 \quad (4.1)$$

Burada N; tinkal konsantrasyonu ve t ağırlıkça farklı oranda tinkal katkılı örneklerin ömür süresini göstermektedir.

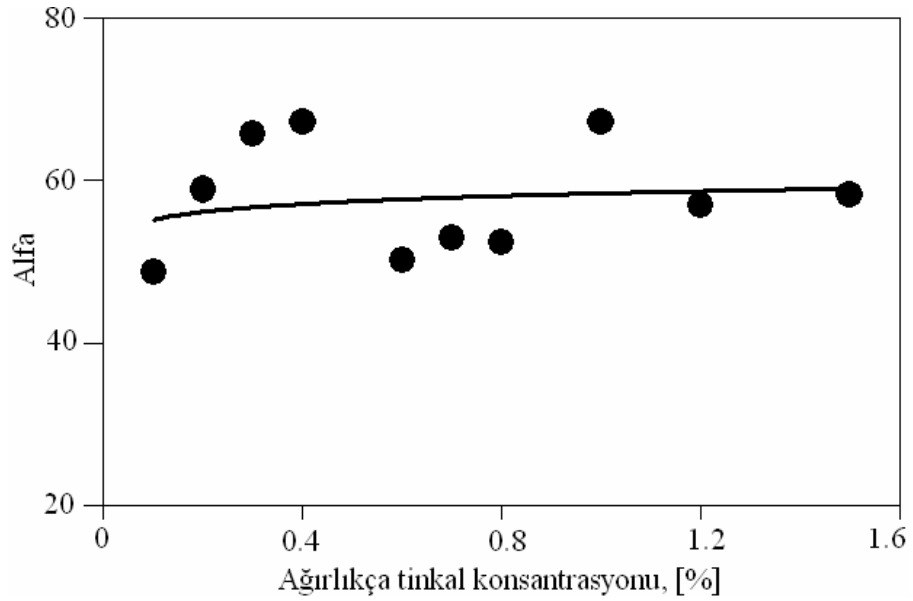


Şekil 4.103: Ağırlıkça % tincal katkısının iz oluşumu başlangıç süresine etkisi.

Tablo 4.18: Ölçek parametresinin ağırlıkça tincal katkısı, [%] ile değişimine ait alt ve üst limit değerleri

Ağırlıkça tincal katkısı, [%]	α ölçek parametresi		
	Alt sınır	α	Üst sınır
0	15.50	18.55	20.99
0.1	37.26	58.35	63.79
0.2	52.52	61.01	65.97
0.3	56.02	61.01	77.18
0.4	53.86	67.24	83.77
0.6	39.57	50.89	63.87
0.7	43.85	54.16	64.02
0.8	42.69	53.05	64.44
1	57.7	67.17	75.54
1.2	50.84	59.18	63.81
1.5	50.50	59.60	67.32

Ölçek parametresinin (α) ağırlıkça % tinkal katkısı ile % 90 güvenirlik seviyesi için yapılan 2 taraflı uygunluk analizi sonrasında Fisher matrisi kullanılarak elde edilen alt ve üst sınır değerleri Tablo 4.18’de verilmiştir. α , ölçek parametresinin katkı oranı ile değişimi ise Şekil 4.104’de verilmiştir.



Şekil 4.104: Ölçek (α) parametresinin ağırlıkça % tinkal katkısı ile değişimi.

Ölçek parametresinin, ağırlıkça % tinkal katkısı ile değişimi Tablo 4.18’deki değerler göz önüne alınarak eşitlik (4.2) ve (4.3)’de verilmiştir.

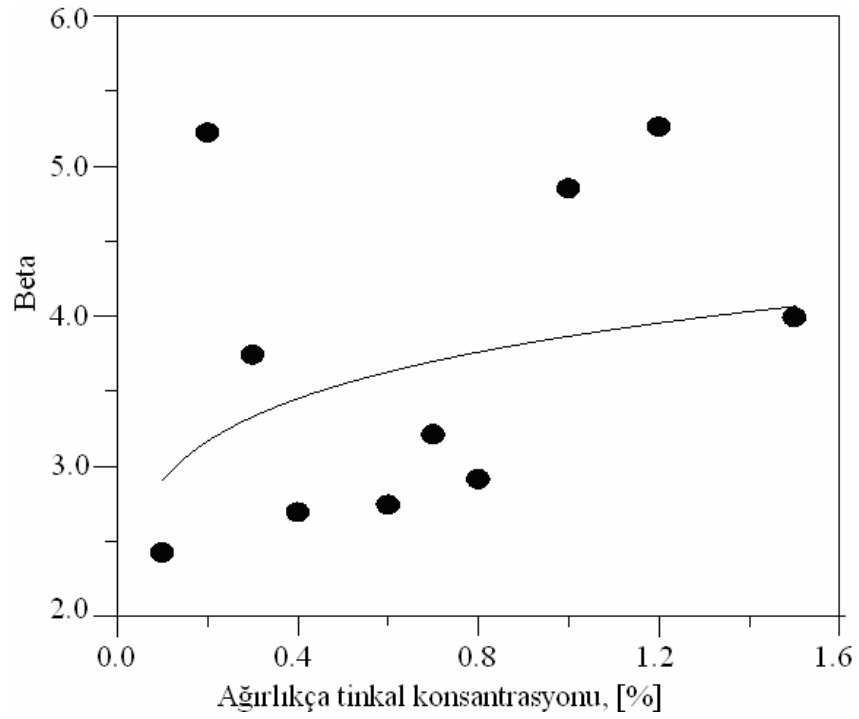
$$\ln(\alpha) = 0.0244 * \ln(N) + 4.0678 \quad (4.2)$$

$$\alpha = 58.42 N^{0.024} \quad (4.3)$$

Şekil parametresinin (β) ağırlıkça % tinkal katkısı ile % 90 güvenirlik seviyesi için yapılan 2 taraflı uygunluk analizi sonrasında Fisher matrisi kullanılarak elde edilen alt ve üst sınır değerleri Tablo 4.19’da verilmiştir. β , ölçek parametresinin katkı oranı ile değişimi ise Şekil 4.105’de verilmiştir.

Tablo 4.19: Şekil parametresinin ağırlıkça tinkal katkısı, [%] ile değişimine ait alt ve üst limit değerleri

Ağırlıkça tinkal katkısı, [%]	β , şekil parametresi		
	Alt sınır	β	Üst sınır
0	3.89	6.38	10.42
0.1	1.47	2.42	3.99
0.2	3.31	5.22	8.22
0.3	2.32	3.74	6.02
0.4	1.71	2.69	4.24
0.6	1.68	2.74	4.45
0.7	2.14	3.21	4.79
0.8	1.86	2.91	4.56
1	3.29	4.85	7.17
1.2	3.42	5.26	8.09
1.5	2.63	3.99	6.06



Şekil 4.105: Şekil (β) parametresinin ağırlıkça % tinkal katkısı ile değişimi.

Eşitlik (4.4) ve (4.5)'de şekil (β) parametresinin ağırlıkça % tinkal katkısı ile değişimi verilmiştir.

$$\ln(\beta) = 0.123955 * \ln(N) + 1.35202 \quad (4.4)$$

$$\beta = 3.87 N^{0.124} \quad (4.5)$$

Eşitlik (4.3 ve (4.5)'in Weibull güvenilirlik fonksiyonunda yerine yazılması ile eşitlik (4.6)'da verilen ağırlıkça % tinkal katkısının polyesterin ömür süresine etkisine ait güvenilirlik bağıntısı elde edilmiştir.

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{58.42 N^{0.024}} \right)^{3.87 N^{0.124}} \right] \quad (4.6)$$

Bu bağıntı kullanılarak yapılan hesaplamalarda deneysel bulgulara oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

1900’lü yılların ikinci yarısında elektrik endüstrisinde yaşanan gelişmeler yeni yalıtım malzemesi arayışına neden olmuştur. Bu arayışların sonucu olarak polimerik bileşikler ile oluşturulan yalıtkanlar ortaya çıkmıştır. Pratik olarak kendi başına kullanım alanı çok dar olan polimerler yapılan katkılarla ile elektrik endüstrisinde oldukça geniş bir yelpazede kendine kullanım alanı bulmaktadır. Polimerik yalıtkanların ilk kullanılmaya başladığı 1944 yılından günümüze kadar hem kullanılan polimer malzemeler hem de polimerlere yapılan katkı malzemeleri çeşitlenmiş ve iyileştirilmiştir.

Bu tezde elektriksel yalıtım sistemlerinde kullanılan polimerik yalıtkanlara bor katkısının bu yalıtkanların elektriksel özelliklerine etkisi incelenmiştir. Polimerik yalıtkan olarak polyester kullanılmıştır. Bor katkısı olarak ülkemizde yoğun miktarda rezervi bulunan tinkal, uleksit, kolemanit ve sassolit minerallerinden yararlanılmıştır.

Elektriksel özelliklerdeki değişim ASTM D2303 test standardına uygun olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile bulunmuştur. Deneysel çalışmalar sırasında polyester örneklerin kaçak akım bileşenleri deney boyunca kaydedilmiştir. Elde edilen kaçak akım işareti harmonik bileşenlerine ayrılmış ve bozulma davranışı ile arasındaki ilişki çıkarılmaya çalışılmıştır. Deney sonucunda örneklerin ömür süreleri tespit edilmiş tinkal minerali üzerine yoğunlaşarak bu mineral için güvenilirlik analizi gerçekleştirilmiştir.

Polyester yalıtkanına ağırlıkça % 0.1, % 0.3 ve % 0.5 oranlarında tinkal, uleksit, kolemanit ve sassolit mineralleri katkılanarak her bir katkı oranı için toplam 5 adet deney gerçekleştirilmiştir. ASTM D2303 eğik düzlem yüzeyde iz oluşumu test düzeneğinde gerçekleştirilen deneyler sonrası elde edilen örnek yüzeyleri Şekil 4.1-4.3’de verilmiştir. Deneyler sonucunda bor minerallerinin polyester yalıtkanın ömrünü uzattığı gözlenmiştir. Polyester yalıtkanına yapılan bor minerali katkı oranı ile ömür

süresindeki değişim Tablo 4.1’de verilmiştir. Katkısız polyester örneklerin ortalama ömür süreleri ile yapılan karşılaştırma sonrası ağırlıkça % 0.1 oranında yapılan katkılamada, tinkal ve kolemanit mineralleri polyesterin ömür süresini iki kat arttırırken uleksit ve sassolit, polyesterin ömrünü sırasıyla % 54 ile % 107 oranlarında arttırdığı gözlenmiştir. Ağırlıkça % 0.3 oranında yapılan katkılamada, tinkal, uleksit, sassolit ve kolemanit mineralleri, polyesterin ömrünü sırasıyla % 228.9, % 83.94, % 93.9 ve % 200.4 oranlarında arttırmıştır. Bu artma eğilimi ağırlıkça % 0.5 oranında katkılamada da devam etmiş ve katkısız polyester örneğe yapılan tinkal, uleksit, sassolit ve kolemanit katkılaması sonrası ömür süresi sırasıyla, % 204.6, % 178.7, % 145.1 ve % 299.1 oranlarında arttırmıştır.

Titreşim etkisi altında mekanik olarak yorulan ağırlıkça % 0.1, % 0.3 ve % 0.5 oranlarında tinkal, uleksit, kolemanit ve sassolit mineralleri katkılı örnekler ile deneylerde her bir katkı oranı için 5 adet örnek kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu örnek yüzeylerindeki iz oluşumları Şekil 4.4-4.7’de verilmiştir. Titreşim etkisi altında mekanik olarak yorulan katkısız polyester örnekler ile yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen ortalama ömür süresi ile katkılı örneklerin ortalama ömür sürelerindeki değişim Tablo 4.2’de verilmiştir. Ağırlıkça % 0.1 oranında yapılan katkılama sonrası yalnızca kolemanit mineralinin ömür süresi katkılama ile % 64.88 artmıştır. Tinkal, uleksit ve sassolit için ise ağırlıkça % 0.1 katkılama sonrası ömür sırasıyla % 25.68, % 16.15 ve % 35.1 azalmıştır. Katkılama oranı ağırlıkça % 0.3 olarak yapıldığında tinkal ve kolemanit mineralleri için ömür % 9.1 ve % 85.2.0 artarken uleksit ve sassolit için % 32.7 ve % 25.9 azalmıştır. Ağırlıkça % 0.5 bor minerali katkılaması sonrası ömür süresindeki değişim tüm mineraller için katkısız polyester yalıtkanına oranla artmıştır. Bu artış tinkal, kolemanit, uleksit ve sassolit mineralleri için sırasıyla % 36.5, % 121.6, % 55.9 ve % 18.3 oranında gerçekleşmiştir.

Yapılan incelemede polyester örneğin ömür süresinin bor minerali katkı oranı ile doğru orantılı olarak arttığı gözlenmiştir. Fakat titreşim etkisi altında mekanik olarak yorulan örnekler ile yapılan deneysel çalışmalar sonrasında ancak ağırlıkça % 0.5 katkı oranında tüm bor minerallerinin olumlu etki gösterdiği görülmüştür. Şekil 4.1-4.6 incelendiğinde mekanik olarak yorulmamış ve yorulmuş bor minerali katkılı polyester örneklerin

yüzeyindeki oluşan izin polyester örneklere yapılan katkı oranı arttıkça daha geniş bir alanda gerçekleştiğini söylemek mümkündür.

Sonuçta bor minerali ile yaşlandırılması geciktirilen polyester örneklere yapılan katkı oranı miktarını literatürde yer alan diğer polimerlere yapılan katkı oranı miktarı ile karşılaştırıldığında oldukça düşük miktarda olduğunu söylemek mümkündür. Halojen içermeyen silisyumlu bileşikler [23-36] ve ATH'lı bileşikler için [37-41] etkin bir alev geciktirme etkisi en az ağırlıkça % 30 katkılama gerektirirken bu çalışmada katkı oranı için tinkal mineralinde optimum katkılama oranı % 0.3 bulunmuştur.

Tablo 4.1 ve 4.2'de verilen polyesterin ömür süresine olumlu etkileri ve Tablo 3.2'de verilen yapısındaki borat ve su miktarının diğerlerine göre fazla oluşu ile çalışmanın bundan sonraki aşamalarının tinkal mineral ile gerçekleştirilmesi uygun görülmüştür.

Tinkal minerali kullanılarak yapılan inceleme 6 başlık altında yapılmış elde edilen bulgular Bölüm 4.2-4.7'de verilmiştir. Elektriksel özelliklerdeki değişim gözlemlemek için gerçekleştirilen deneylerde katkı oranı % 0.1 ile % 1.5 arasında tutulmuştur. ASTM D2303 test standartına uygun olarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen ortalama ömür süreleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.7'den görüleceği gibi tinkal minerali polyester örneğin ömür süresini olumlu olarak uzatmaktadır. Şekil 4.8-4.18 incelendiğinde polyester yalıtkan içersindeki tinkal katkı oranı arttıkça iz oluşumunun genişlediği ve derinleştiği gözlenmektedir. Özellikle ağırlıkça % 0.3 ve sonrasındaki tinkal katkılı örneklerdeki iz oluşumu davranışı değişerek erozyon şeklinde bozulmalar gözlenmiştir. Erozyon şeklindeki bozulmaların nedeninin polyester örnekte yer alan tinkal minerallerinin yüzeyde sıcak noktalar oluşturması sonucu olduğu düşünülmektedir. Oluşan sıcak noktalar polyester örnekte iz oluşumunun genişlemesine ve derinleşmesine neden olmaktadır.

Eğik düzlem yüzeyde iz oluşumu deneylerinde yapay olarak yaşlandırılan ağırlıkça % 0.1 ile % 1.5 arasında tinkal katkılı polyester örneklerin bozulması sırasında örnek yüzeylerinden toplanan kaçak akım işaretleri Fourier analizi ile harmonik bileşenlerine ayrılmıştır. Elde edilen temel, 3., 5., 7., ve 9. harmonik bileşenler Şekil 4.19, 4.21, 4.23, 4.25, 4.27, 4.29, 4.31, 4.33, 4.35, 4.37, 4.39'da verilmiştir. Elde edilen şekiller

incelendiğinde örneklerin tamamında iz oluşumu ilerleyip bozulma kendini tamamladığında kaçak akımın temel bileşeninin genliği artmaya devam etmiş, buna karşın tek harmonik bileşenlerin genlik değeri katkısız örneklerde azalmış, tinkal katkılı örneklerde ise artmıştır.

Katkılı örneklerde harmonik bileşen değerlerindeki bu artış yalıtıkana ilave edilen tinkal katkısının yalıtkanın yüzey davranışını değiştirmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Tinkal katkılanmış polyester örneklerde iz daha geniş bir alanda oluşmuş, örnekler erozyona uğramıştır. Erozyon şeklinde gerçekleşen bozulmalarda harmonik bileşenlerin bozulma kendini tamamlarken de artmaya devam ettiği daha önce yapılan çalışmalarda da gözlenmiştir [37, 80].

Bölüm 4.3’de deneylerin tamamlanmasında gözetilen koşullardan biri olan örnek yüzeyinden akan kaçak akımın genlik değerinin 60 mA’i geçmesi koşulu göz önünde tutularak FFT incelemesi yapılmıştır. Örnek yüzeyinde kaçak akımın genliğinin 60 mA geçmeden önceki son 100 ms deney boyunca toplanan sinyalden çıkarılmıştır. Sinyalden çıkartılan bu kısım için Fourier analizi ile FFTsi çıkarılarak frekansla kaçak akımın genlik değeri arasındaki değişimler Şekil 4.20, 4.22, 4.24, 4.26, 4.28, 4.30, 4.32, 4.34, 4.36, 4.38 ve 4.40’da verilmiştir. Böylece ağırlıkça % 0.1 ile % 1.5 tinkal katkısı ile hazırlanan polyester örneklerdeki harmonik distorsiyon değerleri elde edilmiştir. Temsilci örnek ve belirtilen katkı oranı ile gerçekleştirilen tüm örneklerin ortalaması alınarak Tablo 4.3-4.13’de HD ve THD değerleri verilmiştir. Tablo 4.14 ve Şekil 4.41’de tüm katkı oranları için 3., 5., 7. ve 9. tek harmonik bileşenlere ait harmonik distorsiyon değerlerinin değişimi verilmiştir.

Yapılan incelemede toplam harmonik distorsiyon (THD) değerinin artan tinkal konsantrasyonu ile arttığı gözlenmiştir. THD değeri katkı oranı ağırlıkça % 0.3 değerinde iken bir yükselme göstermiş sonrasında yine azalmış fakat yinede katkısız örneklerden daha büyük değerlerde sonuçlar elde edilmiştir. 3. ve 5. harmonik distorsiyon (HD) için tüm katkı oranlarında katkısız örneğe göre daha büyük değerler gözlenmiştir. Katkılı polyester örneklerin 7. harmonik distorsiyon değeri ile katkısız örneğin HD değeri karşılaştırıldığında belirgin bir artma ya da azalma gözlenmemiştir. 9. HD değişimine bakıldığında katkı oranından bağımsız fakat yapılan katkı ile azalan

bir değişim gözlenmektedir. Harmonik distorsiyon değerindeki en büyük artış ağırlıkça % 0.3 tinkal katkılı örneklerde görölmüştür.

Benzer olarak literatürde yapılan diğer çalışmalarda polimer içersindeki ATH oranı arttıkça tüm harmonik bileşenlerin doğru orantılı olarak arttığı rapor edilmiştir [88]. Porselen, silikon kauçuk, EPDM ve RTV kaplı kompozit polimer yalıtıkanda gerilim arttıkça kaçak akımın arttığı ve dalga şeklinin sinüsoidal olmayan bir form aldığı yapılan deneysel çalışmalarda gözlenmiştir [86]. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada deney belirli zaman aralıklarıyla ya da düşük örnekleme aralığında deney boyunca takip edilmemiştir. Bu çalışmada tüm deneylerde kaçak akım bileşeni hazırlanan düzenek ile deney boyunca 48 000 örnek/saniye ile ayrıntılı olarak kaçak akım kaydedilmiştir.

Yapılan çalışmanın sonucunda katkısız ve katkılı polyester yalıtkan örneklerin bozulma davranışını incelemeye kaçak akımın temel ve harmonik bileşenlerinin kullanılabilir olduğu gösterilmiştir. Bozulma davranışının en etkin biçimde 3. ve 5. harmonik bileşenler takip edilerek bulunabileceği ve yalıtıkanda daha büyük bir hasarın bu şekilde önlenebileceği belirtilmiştir.

Polimerik yalıtkanların kullanılabilir olduğu sıcaklık aralığı verilirken bozulma sıcaklığının yanı sıra camsı geçiş sıcaklığı değerine de dikkat edilir. Polimerlerde camsı geçiş sıcaklığı (T_g) civarında yalıtıkanda büyük kayıplar gerçekleşir. Camsı geçiş sıcaklığı her polimere özgü karakteristik bir sıcaklıktır. Bu çalışmada poliestere yapılan tinkal katkısı ile camsı geçiş ve bozulma sıcaklığındaki değişim DSC analizi ile incelenmiş elde edilen sonuçlar Şekil 4.42-4.45’de verilmiştir. Tablo 4.15’de de göröldüğü gibi tinkal katkısı ile polyester örneğın camsı geçiş sıcaklığı % 0.5 katkı için 1.99 °C, % 1.0 katkı için 3.92 °C ve % 1.5 katkı için 4.2 °C arttığı gözlenmiştir. Polyesterin bozulma sıcaklığı ise ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılандığı durumda 4.1 °C artmıştır. Katkı oranı arttırıldığında ağırlıkça % 1.0 ve % 1.5 tinkal katkılaması için bozulma sıcaklığı sırasıyla 5.24 °C ve 6.40 °C azalmıştır. Katkılı örneklerde katkısız örnekden farklı olarak 30-90 °C sıcaklık aralığında farklı bir davranış olduğu görölmektedir. % 0.5 tinkal katkılı örnek için 31-80 °C, % 1.0 tinkal katkılı örnek için 44-75 °C ve % 1.5 tinkal katkılı örnek için 45-86 °C sıcaklık aralığında bir endotermik

reaksiyon gözlemlemek mümkündür. Bunun nedenin Şekil 3.5'deki tinkal mineralinin termogravimetrik analizinden de görüleceği gibi tinkal minerali polyesterin bozulma sıcaklığından daha önce yapısındaki su moleküllerinden ayrılması olduğu düşünülmektedir. Tinkal $\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$ haline gelmektedir. Bu bileşik elektrik endüstrisinde kullanılan cam yalıtkanlarda değişik oranlarda kullanılan dielektrik özellikleri oldukça iyi olan bir malzemedir. Sonuç olarak yapıya tinkal katkılanması sureti ile polyesterin bazı özellikleri değişmiş, camsı geçiş sıcaklığı ve bozulma sıcaklığı değerleri yükselmiştir.

İji ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yapıya metal oksit katkılamanın yalıtkanın bozulma sıcaklığını arttırdığı ve fazla ısıyı emerek uzaklaştırdığı gözlemlemiştir [42]. Man ve arkadaşları yaptıkları benzer bir çalışmada EVA/LDPE'ye çinkostanate gibi bir metal oksit katkılanması ile bozulma sıcaklığı 330 °C den 350 °C'ye ötelemiştir [49]. Boratlar ile yapılan bir çalışmada Martin ve arkadaşları susuz boratın iki defa dehidrasyona uğratarak, geçirgensiz cam yapıda kabuk oluşturduğunu rapor etmiştir [61].

Polyester yalıtkan yapılan tinkal katkısı ile hazırlanan örneklerde katkı oranı arttıkça yüzeydeki iz oluşumu davranışı değişmiş özellikle % 0.3 katkı oranı sonrasında erozyon şeklinde gerçekleşmeye başlamıştır. Bu değişim yapılan taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile daha detaylı olarak Bölüm 4.4'de incelenmiştir. Elde edilen görüntüler Şekil 4.46–4.84 arasında verilmiştir. Katkısız polyester örneklerdeki yollar şeklinde gerçekleşen iz oluşumunu gösteren temsilci örnek Şekil 4.8'de verilmişti. Şekil 4.46 ve Şekil 4.47'de 150 kat ve 1000 kat büyütülmüş deney öncesi örnek yüzeyi verilmiştir. Eğik düzlem yüzeyde iz oluşumu test düzeneğinde yapay olarak yaşlandırılan örnek yüzeyi Şekil 4.48'de 25 kat büyütülerek incelenmiştir. Burada izin gerçekleştiği kalın bir yol ve bu yoldan ayrılan kollar görülebilmektedir. İzin gerçekleştiği yol içerisinden alınan görüntüler Şekil 4.49'da 350 kat ve Şekil 4.50'de 1000 kat büyütülerek verilmiştir. Burada termal olarak bozulan polyester örnek karbonize olmuş ve izin gerçekleştiği yol boyunca sünger şeklinde boşluklu yapı sergilediği gözlenmiştir. Yine izin gerçekleştiği katkısız örnek üzerindeki küçük kollar incelendiğinde de Şekil 4.50-4.51 benzer sünger şeklinde boşluklu karbonize yolları

gözlemlenmiştir. Aynı örnek üzerinde izin gerçekleşmediği alanlar Şekil 4.52-4.55’de verilmiştir.

Ağırlıkça % 0.5 tinkal katkılı örnek yüzeyi görüntüleri Şekil 4.56 ve 4.57’de verilmiştir. Bu şekillerden de görüleceği gibi örnek yüzeyi pürüzsüzdür. Örneklerde iz oluşumu davranışındaki değişim Şekil 4.58-4.66’da verilmiştir. Burada örnek yüzeyindeki bozulmalar Şekil 4.3’de görüldüğü gibi geniş bir alanda ve erozyon şeklinde olmuştur. Bu örnek yüzeyinden alınan kesit 500 kat büyütülerek Şekil 4.63 ve 4.66’da verilmektedir. Kraterler şeklinde gözlenen bozulma Şekil 4.66’de verildiği gibi bazı bölgelerinde oldukça yoğun damarlar içermektedir. Şekil 4.63’de aynı krater benzeri bozulmanın bir başka bölgesi verilmiştir. Burada damarlar şeklindeki bozulma sıklığını kaybetmiş yüzeydeki bozulma katkısız örnekdeki boşluklu sünger yapıdan farklı olarak örnek yüzeyinin bir cam filmle kaplanmış gibi olduğu görülmektedir. Şekil 4.63’deki bu yapısal farklılık incelenirken 3 farklı bölgeye ayrılmıştır. Şekil 4.64’de damarların yer aldığı bölge 1000 kat büyütülmüştür. Şekil 4.65’de ise damarların altında kalan alan 1000 kat büyütülerek verilmiştir. Şekil 4.66’da ise krater şeklindeki bölgenin ortasındaki bir alan 550 kat büyütülerek verilmiştir. Her iki şekilde de bozulmanın gerçekleştiği bölgenin pürüzsüz yapısını gözlemek mümkündür.

Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örneğin deney öncesi yüzeyinin pürüzsüzlüğü Şekil 4.67-4.68’de verilmiştir. İz oluşumu deneyleri sonrası örnek yüzeyindeki morfolojik değişimler ise Şekil 4.69-4.74’de verilmiştir. Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı örneğin iz oluşumu deneyleri sonrası elde edilen görüntüsü Şekil 4.69’da verilmiştir. Katkı oranını % 1.0 olduğunda gözlenen bozulma biçimi ağırlıkça % 0.5 katkı oranındaki bozulmaya benzer olarak kraterler şeklinde gerçekleşmiş ve bu krater şeklinde bozulma 25 kat büyütülerek Şekil 4.69’da verilmiştir. Bozulma biçimi benzetmekle birlikte krater şekilli bozulmanın kenarının 300 kat büyütüldüğü Şekil 4.70 ve 1000 kat büyütüldüğü Şekil 4.71 incelendiğinde burada sık damarsı bozulmalara ya da boşluklu süngerimsi bir bozulmadan farklı bir bozulma biçimi gözlenmektedir. Bu şekillerde krater kenarları aşınarak şekillenmiş gibi durmaktadır. Kraterin iç kısmının 1000 kat büyütülerek verildiği Şekil 4.72’de ise pürüzsüz camsı yapı gözlemlenebilmektedir. Krater şeklindeki bozulmanın üst kısımları 1000 kat büyütülerek Şekil 4.73 ve Şekil 4.74’de verilmiştir. Burada kraterin iç kısımlarındaki düzgün yapının yerini tinkal mineralinin

polyester içersindeki dağılımı göz önüne alınarak biraz daha pürüzlü fakat tamamıyla katkısız örnekteki süngerimsi karbonize tabakalanmadan farklı bir bozulma gözlenmiştir.

Ağırlıkça % 1.5 tinkal katkılı örneğin deney öncesi yüzey durumu Şekil 4.75-4.76'da verilmiştir. Örneklerin iz oluşumu deneyleri sonrası morfolojik incelemeleri sonucu elde edilen görüntüler Şekil 4.77-4.84'de verilmiştir. Bu oranda yapılan katkı ile yapay yaşlandırma testleri sonucu örnek yüzeyinde gözlenen iz Şekil 4.18'de verilmişti. Bu şekilden de takip edilebileceği gibi bozulma diğer iki katkı oranında olduğu gibi erozyon şeklinde gerçekleşmiştir. SEM görüntüsünde kullanılan örneğin 25 kat büyütülmüş hali Şekil 4.77 ve 35 kat büyütülmüş hali Şekil 4.78 ve 4.79'da verilmiştir. Burada bozulmanın katkı oranının da yüksek olduğu göz önüne alınarak tabakalanma şeklinde gerçekleştiği görülmektedir. Örnek yüzeyi 300 kat büyütüldüğünde tabakalanmanın diğer katkı oranlarına göre daha fazla olduğu katkısız polyesterin bozulması sonucu gözlenen karbonize yapılara benzer boşluklu sünger yapının bu tabakaların yüzeyinde az miktarda ve farklı bir biçimde yer alması dikkat çekicidir. Bir başka dikkat çekici etmen de oldukça kalın bir tabakalanmanın polyester yüzeyinde oluşmasıdır. Bu yapılanma 1000 kat büyütülerek Şekil 4.83 ve 4.84'de verilmiştir.

Yapılan incelenme sonucunda katkısız polyester örneklerin boşluklu süngerimsi yapılar şeklinde bozulduğu gözlenmiştir. Katkısız polyester örneğe yapılan tinkal katkısı ile yüzey özellikleri değişmiştir. Tinkal mineralinin termogravemetrik analizi Şekil 3.5'de verilmiştir. 217 °C de yapısındaki 10 molekül suyun tamamını kaybeden tinkal minerali içerisinde yapısal olarak yer alan Na_2O ve B_2O_3 bileşenleri polyester bozulmadan çok daha önce (polyesterin bozulma sıcaklığı 354 °C) ortaya çıkmıştır. Yapılan DSC analizlerinde de tinkal katkılı örneklerden 30-90 °C aralığında gözlenen endotermik reaksiyon Şekil 4.44-4.46'da gözlenmiştir.

Burada yapılan DSC analizi sonrası yapılan SEM görüntüsü ile polyester örnek yüzeyinde tinkal minerali ilavesi ile bozulma davranışı arasındaki ilişki daha net ortaya konmuştur. Yapılan katkı ile polyester yüzeyinde bozulma sonrası tinkal mineralinin bozularak yüzeyde cam bir tabaka oluşturduğunu söylemek mümkün hale gelmiştir. Yüzeyde oluşan bu cam kaplama ısı etkisi altında yüzey boyunca genişlemekte,

oksijenin içeri sızmasına engellemekte ve bozulmanın ilerlemesinin önüne geçmektedir. Endotermik bozulma ile oluşan su ise alevden termal enerjiyi emmekte ve alevi soğutmaktadır. Bor alev geciktirme etkisini polimerin termal bozulma sıcaklığından çok daha önce bozularak etkinleşmektedir. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda [56] da PVC'ye yapılan katkılama sonrası benzer pürüzsüzlük görülmüştür. [32]'de polipropilene melaminfosfat ve pentaeritrol katkılanarak yanma sonrası tabakalanmanın melamin fosfata bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. EVA/MH olarak hazırlanan polimere ağırlıkça % 8 SiO₂ katkılanarak yüzeyde düzgün bir kabuk oluşumu Fu ve arkadaşları tarafından sağlanmıştır [45].

Polyester yalıtkan tinal ilavesi ile yüzeyde iz oluşumu davranışı değişmiştir. Tinal ilavesi ile değişen örnek yüzeylerindeki elektrik alan dağılımı FemLab 3.2'de 2 boyutlu olarak modellenmiştir. Elde edilen modeller üzerindeki elektrik alan dağılımı Şekil 4.87-4.97'de verilmiştir. Ağırlıkça tinal katkı oranı arttıkça genişleyen iz oluşumu ile birlikte elektrik alan dağılımının örnek yüzeyindeki azalması teorik olarak da gösterilmiş elde edilen sonuçlar Tablo 4.16'da verilmiştir. Elektrik alan şiddeti maksimum değerini iz oluşumunun en dar olarak gerçekleştiği katkısız örneklerde elde edilmiştir. Ağırlıkça katkı oranının diğerlerine göre nispeten daha fazla olduğu ağırlıkça % 0.3, %0.6, % 0.7 , % 0.8, % 1.0, % 1.2 ve % 1.5 olduğu örneklerde gözlenen elektrik alanın düşük değerler aldığı yapılan modellemede gösterilmiştir.

Tinal minerali kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin sonucunda her bir katkı oranı için Weibull 7++ programı kullanılarak güvenilirlik analizi yapılmıştır. Katkısız polyester örnekler için elde edilen deneysel sonuçların Weibull dağılımına uygunluğu Şekil 4.98'de, güvenilirlik eğrisi Şekil 4.99'da ve olasılık yoğunluk fonksiyonu eğrisi ise Şekil 4.100'de verilmiştir. Polyester yalıtkan tinal katkısı ile örneklerden elde edilen ömür sürelerinin Weibull dağılımına uygunluğu, güvenilirlik eğrisi ve olasılık yoğunluk fonksiyonu Ek-A'da verilmiştir. Tablo 4.17'de her bir katkı oranı için ömür süresi (iz oluşumu başlangıç süresi) ve Weibull dağılımı ile bulunan ortalama ömür süreleri verilmiştir. Tablo 4.18 ve 4.19'da sırasıyla α ölçek ve β şekil parametrelerinin % tinal katkısı ile değişimi % 90 güvenilirlik seviyesi için 2 taraflı uygunluk analiz ile Fisher matrisi kullanılarak bulunan güvenilirlik aralığı verilmiştir. Ömrü belirleyen alfa katsayısındaki artış Şekil 4.104'de ve bozulmayı ifade eden beta katsayısındaki azalma

Şekil 4.105’de verilmiştir. Eşitlik 4.6’da yapılan katkı oranı ile ömür süresi arasındaki güvenilirliği veren bir bağıntı sunulmuştur.

Sonuç

Bu tezde yapılan deneysel ve teorik çalışmaların sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Polyester yalıtkanlara katkılanan farklı bor minerallerinin polyesterin kullanım ömrünü uzattığı gözlenmiştir.
- Titreşim etkisi altında mekanik olarak yorulan katkılı örneklerin ömür süresinde % 70 azalma gözlenirken katkısız örnekler için bu oran % 40 olarak bulunmuştur.
- Polyestere ağırlıkça % 0.3 ve sonrası tinkal katkılama oranlarında örneklerin yüzey bozulma davranışı değişmiş iz oluşumundan erozyona doğru değişerek gerçekleşmiştir. Tinkal minerali için yüzeyde iz oluşumu deneylerine bakılarak katkılama oranının ağırlıkça % 0.3’ün üzerinde tutulması durumunda örneklerin ömür sürelerinde belirgin bir artış gözlenmemiştir.
- Katkısız polyester örneklerde kaçak akımın temel bileşeni bozulma sırasında ve sonrasında artmaya devam etmiştir. Fakat harmonik bileşenler bozulma kendini tamamladıktan sonra azalmıştır. Katkılı örneklerde ise bozulma sırasında ve sonrasında kaçak akımın hem temel hem de harmonik bileşenlerin artmaya devam ettiği gözlenmiştir. Bu farklılığın bozulmanın iz oluşumundan erozyona dönüşmesi nedeni ile harmoniklerin artması sonucu olduğu belirtilmiştir.
- Yapılan harmonik ve FFT analizleri katkısız ve tinkal katkılı polyester örnekler için kaçak akım işaretindeki değişimin örneğin bozulması hakkında bilgi vermede kullanılabilir olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışma ile katkısız ve katkılı örnekler için HD ve THD’nin katkı oranı ile değişimi çıkarılmış, katkılı polyester örnekler için HD ve THD değerlerinin katkısız örneklerden daha fazla

olduğu ve bu nedenle bozulma sırasında daha fazla kapastif etki olduğu gösterilmiştir. Ayrıca özellikle ağırlıkça % 0.3 katkı oranında HD ve THD değerlerinde bir yükselmenin gerçekleştiği gözlenmiştir.

- DSC analizlerinde gözlenen endotermik reaksiyonlar ile tinkalin polyesterin bozulma sıcaklığından daha önce dehidrasyona uğradığı gözlenmiştir. Tinkal katkısı ile polyesterin bozulma sıcaklığı ağırlıkça % 0.5 katkı oranında artmış ağırlıkça % 1.0 ve % 1.5 tinkal katkısında azaldığı gözlenmiştir.
- Yapılan SEM analizleri DSC analizleri ile desteklenmiştir. Dehidrasyona uğrayarak cam haline gelen tinkal, örnek yüzeyinde ağırlıkça % 0.5 ve % 1.0 katkı oranlarında cam film tabakanın oluşmasını, daha yüksek oranda katkılmalarda kabuğa benzer yapıların oluşmasını sağladığı gözlenmiştir.
- Erozyon şeklinde gerçekleşen bozulmada tinkal minerali polyester yüzeyinde ısınarak dehidrasyona uğramıştır. Yapısındaki suyu kaybeden tinkal hacimce küçülmüş buda polyester yüzeyinin biraz altında boşlukların oluşmasına neden olmuş ve sonuçta örnek yüzeyinde krater şekilli erozyona neden olmuştur. Polyesterin daha da ısınması ile yüzeydeki Na_2O ve B_2O_3 bileşenleri cam film oluşturmuş ve yanmanın daha içerele gitmesinin önüne geçilmiştir.
- FEMLAB 3.2 ile yapılan 2 boyutlu modeller ile iz oluşumunun daha geniş bir alanda gerçekleşmesi ve elektrik alan değerinin azalması teorik olarak da verilmiştir. Polyester yalıtkanına tinkal ilavesi ile yüzeyde çok sayıda sıcak nokta oluşmuş ve bozulma sırasında gözlenen iz oluşumu geniş bir alanda gerçekleşmiştir. İz oluşumunun daha büyük bir alanda gerçekleşmesi yüzeyde meydana gelen elektrik alanın daha düşük değerler almasına neden olmuştur.
- Elde edilen deneysel sonuçların güvenilirliği Weibull 7++ ile incelenmiştir. Sonuçta polyester yalıtkanlar için ömür süresinin katkı oranı ile değişimini veren bir ifade elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. KUFFEL, E., ZAENGL, W.S., 1992, *High Voltage Engineering*, 1st ed., Pergamon Press, Oxford, 0-08-024213-8.
2. RAJU, G.G., 2003, *Dielectrics in Electric Fields*, 1st ed., Marcel Dekker, New York, 0-8247-0864-4.
3. MALIK, N.H., AL. QURESHI, A. ve QURESHI, M.I., 1998, *Electrical Insulation in Power Systems*, 1st ed., Marcel Dekker, New York, 0-8247-0106-2.
4. ÖZKAYA, M., 1979, *Yüksek Gerilim Tekniğinde Olayları*, 1st ed., İTÜ Matbaası, İstanbul, 1152.
5. GALLAGHER, T. J., PEARMAIN, A. J., 1984, *High Voltage Measurement, Testing and Design*, 1st ed., John Wiley and Sons, New York, 0-471-90096-6.
6. KREUGER, F.H., 1991, *Industrial High Voltage, 1. Fields, 2. Dielectrics, 3. Constructions*, 1st ed., Delft University Press, TheNetherland, 90-6275-561-5.
7. SHUGG, W.T., 1995, *Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials*, 2nd ed., IEEE Press, New York, 0-7803-1030-6.
8. NAIDU, M.S., KAMARAJU, V., 1996, *High Voltage Engineering*, 2nd ed., McGraw-Hill Inc., New York, 0-07-462286-2.
9. ZHU, W., WEIL, E.D., 1998, Influence of the molecular weight of PPO resins and Char-forming behaviour of polymeric additives on the flame retardancy of EPDM formulations, *Journal of Applied Polymer Science*, 67, 1405-1414.
10. CAMINO, G., COSTA, L., di CORTEMIGLIA, M.P., 1991, Overview of fire retardant mechanisms, *Polymer Degradation and Stability*, 33, 131-154.
11. MOSTAFA, N., MOHSEN, M., RASHAD, S., AIDO, A., SALEM, E., 2005, Study of the electrical properties of flame retardant Poly(vinylchloride) using positron annihilation lifetime spectroscopy, *Journal of Applied Polymer Science*, 96, 638-644.
12. ANTOS, K., SEDLAR, J., 2005, Influence of aromatic brominated flame retardants on alkane photo-oxidation: A model and polymer study, *Polymer Degradation and Stability*, 90, 180-187.

13. PRINS, M., MAROM, G., LEVY, M., 1976, Bromostyrene-crosslinked polyesters. I. Thermal stability and flame retardancy, *Journal of Applied Polymer Science*, 20, 2971-2978.
14. SATO, H., KONDA, K., TSUGE, S., OHTANI, H., SATO, N., 1998, Mechanisms of thermal degradation of a polyester flame retarded with antimony oxide/brominated polycarbonate studied by temperature-programmed analytical pyrolysis, *Polymer Degradation and Stability*, 62, 41-48.
15. STEVENTS, G.C., MANN, A.H., 1999, *Risks and Benefits in the use of Flame Retardants in consumer products*, DTI Report, Department of Trade and Industry, London.
16. LU, S.Y., HAMMERTON, I., 2002, Recent Developments in the Chemistry of halogen-free flame retardant polymers, *Progress in Polymer Science*, 27, 1661-1712.
17. IPCS, 1997. *Flame retardants: A general introduction. Environmental Health Criteria 192*, WHO, Geneva.
18. US Environmental Protection Agency, 2000, EPA/600, Vol: 1-3. US Government Printing Office, Washington, DC, USA.
19. WANG, X., LIN, J., 2005, A phosphate-based epoxy resin for flame retardance: synthesis, characterization and cure properties, *Colloid Polymer Science*, 283, 593-603.
20. BALABONOVICH, A.I., LEVCHIK, S.V., LEVCHIK, G.F., SCHNABEL, W., WILKIE, C. A., 1999, Thermal decomposition and combustion of gradiated polyamide 6 containing phosphorus oxynitride or phospham, *Polymer Degradation and Stability*, 64, 191-195.
21. CHEN, Y., LIU, Y., WANG, Q., YIN, H., AELMANS, N., KIERKELS, R., 2003, Performance of intumescent flame retardant master batch synthesized through twin screw reactively extruding technology: effect of component ratio, *Polymer Degradation and Stability*, 81, 215-224.
22. CHIANG, W.Y., HU, H.C., 2001, Phosphate-containing flame-retardant polymers with good compatibility to polypropylene. II. Effect of the flame-retardant polymers on polypropylene, *Journal of Applied Polymer Science*, 82(10), 2399-2403.
23. MA, Z.L., ZHAO, M., HU, H.F., DING, H.T., ZHANG, J., 2002, Compatibilization of intumescent flame retardant/polypropylene composites based on alpha-methacrylic acid grafted polypropylene, *Journal of Applied Polymer Science*, 83, 3128-3132.
24. PETREUS, O., 1993, Some aspects of reactivity of phosphonic dichlorides towards alkoxylic aromatic compounds: Phosphorus, Sulfur and Silicone; *Proceedings of the XIIIth International Conference on Phosphorus Chemistry, 6-10 July 1992*, 156.

25. PETREUS, O., POPESCU, F.I., BARBOIU, V. ROSESCU, L., 1988, *Synthesis of some flame retardants containing phosphorus and halogen*, *Journal of Macromolecular Chemistry*, 8, 1033-1041.
26. WANG, C.S., SHIEH, J.Y., SUN, Y.M., 1998, *Synthesis and Properties of Phosphorus containing PET and PEN*, *Journal of Polymer Science*, 70, 1959-1964.
27. LEE, E.O., 2002, Possible Phosphorus-Bromine Synergy in Polyester-Cotton Fabrics Treated with Tetrabromobisphenol-A and Diammonium Phosphate, *Journal of Applied Polymer Science*, 84, 172-177.
28. LEVCHIK, S.V., WEIL, E.D., 2005, Review Flame Retardancy of Thermoplastic Polyesters- A review of the recent literature, *Polymer International*, 54, 11-35.
29. PETREUS, O., VLAD-BUBULAC, T., HAMCIUC, C., 2005, Synthesis and Characterization of new polyesters with enhanced phosphorus content, *European Polymer Journal*, 41, 2663-2670.
30. ZHANG, S., HORROCKS, A.R., 2003, A Review of Flame Retardant Polypropylene fibres, *Journal of Progress in Polymer Science*, 28(11), 1517-1538.
31. SEN, A.K., MUKHERJEE, B., BHATTACHARYA, A.S., SANGHI, L.K., DE, P.P., BHOWMICK, K., 1991, Preparation and characterization of low-halogen and nonhalogen fire-resistant low-smoke (FRLS) cable sheathing compound from blends of functionalized polyolefins and PVC, *Journal of Applied Polymer Science*, 43(9), 1673-1684.
32. LV, P., WANG, Z., HU, K., FAN, W., 2005, Flammability and thermal degradation of flame retarded polypropylene composites containing melamine phosphate and pentaerythritol derivatives, *Polymer Degradation and Stability*, 90, 523-534.
33. KASHIWAGI, T., SHIELDS, J.R., 2003, Flame Retardant Mechanism of Silica: Effects of resin molecular weight, *Journal of Applied Polymer Sciences*, 87, 1541-1550.
34. EL-HAG, A., SIMON, L.C., JAYARAM, S.H., CHENEY, E.A., 2006, Erosion Resistance of Nano-filled Silicone Rubber, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 13(1), 122-128.
35. MAROSI, G., MARTON, A., ANNA, P., BERTALAN, G., MAROSFOI, B., SZEP, A., 2002, Ceramic Precursor in Flame Retardant Systems, *Polymer Degradation and Stability*, 77, 259-265.
36. LOMAKIN, S.M., ZAIKOV, G.E., ARTISIS, M.I., 1996, New Types of Ecologically Safe Flame Retardant Systems for Polymethyl-methacrylate, *Journal of Polymer Materials*, 32, 213-220.
37. MEYER, L., JAYARAM, S., CHENEY, E.A., 2004, Thermal conductivity of filled silicone rubber and its relationship to erosion in the Inclined Plane Test, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 11(4), 620-630.

38. MEYER, L., GRISHKO, V., JAYARAM, S., CHENEY, E.A., DULEY, W.W., 2002, Thermal Characteristics of Silicone Rubber Filled with ATH and Silica under Laser Heating, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 848-852.
39. TUNCER, E., GUBANSKI, S.M., BARSCH, R., LAMBRECHT, J., 1998, Thermally stimulated depolarization currents of silicone rubbers immerse in water, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, June 22-25, Swedeen, 193-197.
40. JAHROMI, A.N., EL-HAG, A.H., JAYARAM, S.H., CHERNEY, E.A., PASAND, M.S., MOHSENI, H., 2005, Effect of acid immersion on RTV Silicone Rubber coatings in Inclined Plane Tests, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 313-316.
41. DENG, H., HACKAM, R., CHENEY, E.A., 1995, Role of the size of particles of alumina trihydrate filler on the life of RTV silicone Rubber Coating, *IEEE Transactions on dielectrics and electrical Insulation*, 10(2), 1012-1024.
42. IJI, M., KIUCHI, Y., 2004, Flame resistant glass-epoxy printed wiring boards with no halogen or phosphorus compounds, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 15, 175-182.
43. WANG, Z.Z., QU, B.J., FAN, W.C., HUANG, P., 2001, Combustion characteristics of halogen-free flame-retarded polyethylene containing magnesium hydroxide and some synergists, *Journal of Applied Polymer Science*, 81, 206-214
44. LI, Z.Z., QU, B., 2003, Flammability characterization and synergistic effects of expandable graphite with magnesium hydroxide in halogen-free flame-retardant EVA blends, *Journal of Polymer Degradation and Stability*, 81, 401-408.
45. FU, M.Z., QU, B., 2004, Synergistic flame retardant mechanism of fumed silica in ethylene-vinyl acetate/magnesium hydroxide blends, *Polymer Degradation and Stability*, 85, 633-639.
46. COSTA, L., CAMINO, G., di CORTEMIGLIA, M.P., 1986, Effect of the Metal on the Mechanism of Fire Retardance in Chloroparaffin-metal compound-polypropylene mixtures, *Polymer Degradation and Stability*, 14, 113-123.
47. KIM, K.Y., LEE, C., KIM, P.J., RYU, R.H., 2004, Radiation effects on Fire Retardant Properties of Polychloroprene, 2004, *International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse, France*.
48. COSTA, L., LUDA, M.P., TROSSARELLI, L., 2000, Mechanism of Condensed Phase Action in Flame Retardants. Synergistic Systems Based on Halogen-metal Compounds,, *Polymer Degradation and Stability*, 68, 67-74.

49. MAN, X., WANG, L., DARONG, X., XIAOLONG, C., 2005, Influence of Zinc Stannate to Halogen Free Flame Retardant Polymer, *International Symposium on Electrical Insulating Materials, 5-9 June 2005, Japan*, 608-611.
50. ATKINSON, P.A, HAINES, P.J., SKINNER, G.A., 2001, The mechanism of action of tin compounds as flame retardants and smoke suppressants for polyester thermosets, *Polymer Degradation and Stability*, 71, 351-360.
51. LIU, J., HU, Y., WANG, S., SONG, L., CHEN, Z., FAN, W., 2004, Preparation and characterization of nylon 6/ Cu^{2+} -exchanged and Fe^{3+} -exchanged montmorillonite nanocomposite, *Journal of Colloid & Polymer Science*, 282, 291-294.
52. LEU, T.S., WANG, C.S., 2004, Synergistic Effect of a Phosphorus–Nitrogen Flame Retardant on Engineering Plastics, *Journal of Applied Polymer Science*, 92, 410–417.
53. GARBA, B., 1999, Effect of zinc borate as flame retardant formulation on some tropical woods, *Polymer Degradation and Stability*, 64, 517-522.
54. LEEUWENDAL, R., SHEN, K., FERM, D., 2002, New Application Developments in Halogen free flame retardant polyolefin and polyamide engineering plastics using firebrake zinc borates, *Flame Retardants, Interscience Communications*, London, 95-106.
55. BOURBIGOT, S., Le BRAS M., LEEUWENDAL, R., SHEN, K.,SCHUBERT, D., 1999, Recent Advances in the use of zinc borates in flame retardancy of EVA, *Polymer Degradation and Stability*, 64, 419-425.
56. TIAN, C., WANG, H., LIU, X., MA, Z., GUO, H., XU, J., 2003, Flame retardant flexible poly(vinyl chloride) compound for cable application, *Journal of Applied Polymer Science*, 89, 3137-3142.
57. O'CONNELL, S., WHITLEY, A., BRADY, T., CHING, S., FONG, A., BERGMAN, R., BURKITT, J., 2004, Enviromental Assessment of Halogen-Free Printed Circuit Boards, A Design for Enviroment (DfE) Project with the High Density Packaging User Group (HDPUG), *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 10-13 May 2004*, 40–45.
58. MORASI, G., ANNA, P., BALOGH, I., BERTALAN, G., TOHL, A., MAATONG, M.A., 1997, Thermoanalytical Study of Nucleating Effects in Polypropylene Composites, *Journal of Thermal Analysis*, 48, 717-726.
59. WU, Z., SHU, W., HU, Y., 2007, Synergist Flame Retarding Effect of Ultrafine Zinc Borate on LDPE/IFR System, *Journal of Applied Polymer Science*, 103, 3667–3674.
60. COWAN, J., MANLEY, T. R., 2006, The effects of inorganic borates on the burning of PVC, *British Polymer Journal*, 8, 44-47.

61. MARTIN, C., RONDA, J.C, CNOLIZ, V., 2006, Boron-containing novolac resins as flame retardant materials, *Polymer Degradation and Stability*, 91, 747-754.
62. ISHII, T., KOKAKU, H., NAGAI, A., NISHITA, T., KAKIMOTO, M., 2006, Calcium Borate Flame Retardation System for Epoxy Molding Compounds, *Polymer Engineering & Science*, 46(6), 799 – 806.
63. KODOLOV, V. I., SHUKLIN, S. G., KUZNETSOV, A. P., MAKAROVA, L. G., BYSTROV, S. G., DEMICHEVA, O. V., RUDAKOVA, T. A., 2002, Formation and investigation of epoxy intumescent compositions modified by active additives, *Journal of Applied Polymer Science*, 85, 1477-1483.
64. KREUGER, F.H., 1992, *Industrial High Voltage*, 4. Coordinating, 2. Testing, 3. Measuring, Delft University Press, The Netherlands, 90-6275-562-3.
65. GÜNEŞ, İ., ERSOY, A., UĞUR, M., KUNTMAN, A., 2005, Mekanik Olarak Yorulan Polimerik Yalıtkanların Yaşlanma Sürecinin İncelenmesi, *II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, 17-19 Kasım 2005, İstanbul*.
66. GÜNEŞ, İ., ERSOY, A., UĞUR, M., KUNTMAN, A., 2005, Polimerik yalıtkanlarda yaşlanma sürecine titreşimin etkisi, *I. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 17-18 Mayıs 2005, Kocaeli*.
67. KUNTMAN, A., ERSOY, A., GÜNEŞ, İ., UĞUR, M., 2003, Polimerik Yalıtkanların Yaşlanma Sürecine Nemin Etkisinin İncelenmesi, *XVII. Ulusal Kimya Kongresi, 8-11 Eylül 2003, İstanbul*.
68. UĞUR, M., KUNTMAN, A., ERSOY, A., 2003, A Study on the Ageing Process for Polyester Resin Using improved Weibull Statistics, *Electrical Engineering, Springer-Verlag Heidelberg*, 85(5), 283-288.
69. BARSCH, R. JHON, H., LAMBRECHT, J., SCHMUCK, F., 1999, Test methods for Polymeric Insulating materials for outdoor HV insulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 6(5), 668-675.
70. SARATHI, R., RAO, U.M., 2001, Investigation of surface modifications in ethylene Polypropylene Diene Monomer (EPDM) Rubber due to tracking under A.C. and D.C. voltages, *Bull. Matter. Sci. Indian Academy of Sciences*, 24(6), 587-593.
71. CAVALLINI, A., CONTI, M., MONTANARI, G.C., ARLOTTI, C., CONTIN, A., 2004, PD Inference for the early detection of electrical Treeing in Insulating Systems, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 11(4), 724-735.
72. MONTANARI, G.C., MAZZANTI, G. SIMONI, L., 2002, Progress in Electrothermal Life Modeling of Electrical Insulation during the Last Decades, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 9(5), 730-745,
73. BILLINGS, M.J., SMITH, A., WILKINS, R., 1967, Tracking in Polymeric Insulation, *Electrical Insulation*, 2(3), 131-137.

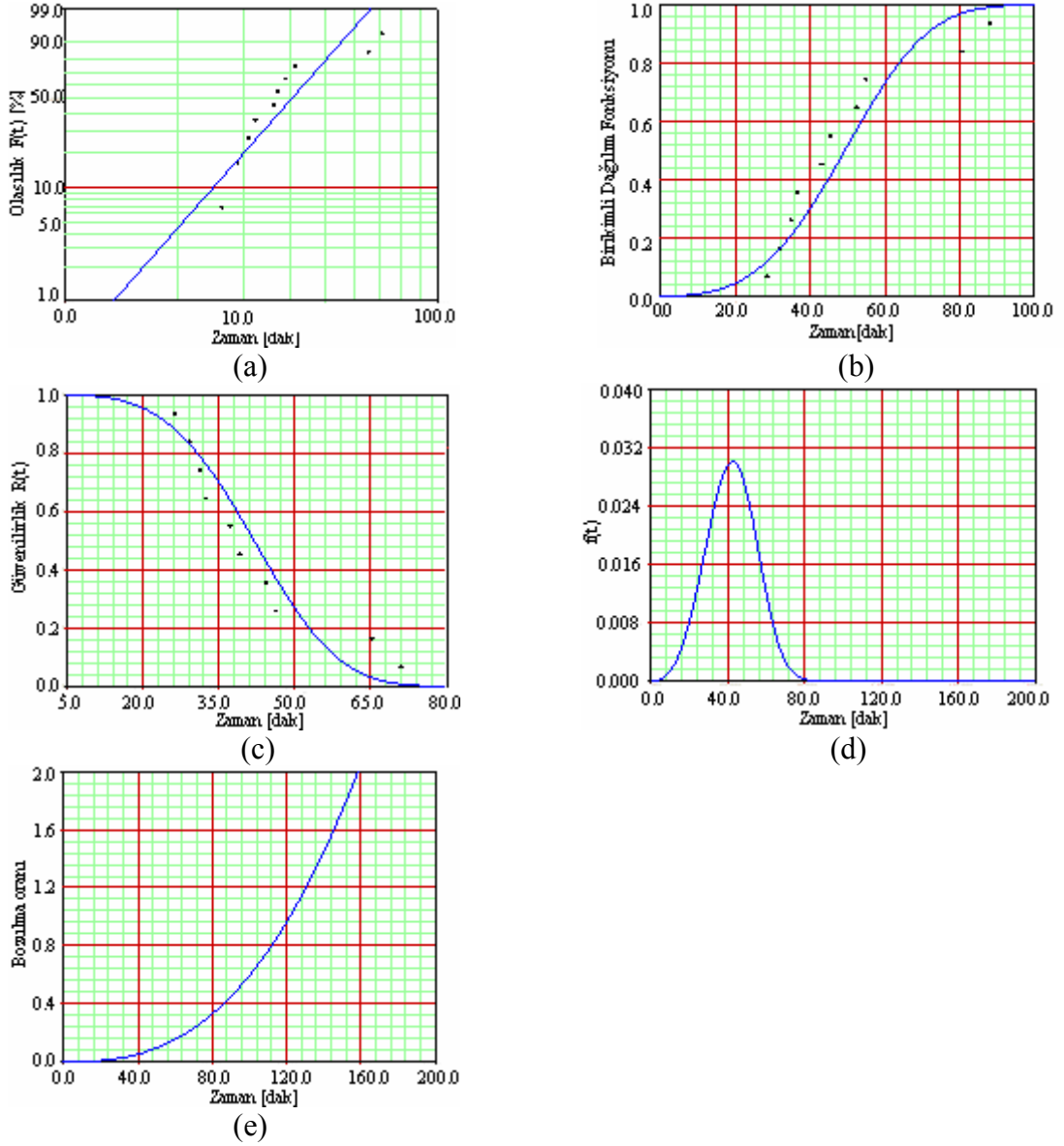
74. WATSON, J.F., MASON, J.H., LYNCH, A.C, 1979, Assesing Materials for Use as Outdoor Insulation, *3rd International Symposium on high Voltage Engineering, Milan*, 1-3.
75. Standard test methods for liquid contaminant, inclined plane tracking and erosion of insulating materials, 2004, *ASTM (D2303-97)*, 1-10.
76. IEC 587, 1984, *Inclined Plane Tracking Test Method*.
77. MASON, J.H., 1983, Summary of Factors which affect the results of Inclined Plane Tests, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1-3, 1983.
78. PİŞKİN, S., 1983, *Hidrate Bor Minerallerinin Termik Özellikleri*, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
79. BREUSCH, F.L., ULUSOY, E., 1974, *Genel Anorganik Kimya*, İstanbul Üniversitesi Yayınları, İstanbul, Sayı:1873.
80. ŞEKER, S., AYAZ, E., Feature extraction related to bearing damage in electric motors by wavelet analysis, *Journal of the Franklin Institute*, 340(2), 125-134.
81. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems IEEE Std 519-1992, 1993, *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, USA*, 1-55937-239-7.
82. MAZEIKA, L., CHANG, R.J., 2000, Analysis of Electrical Activity Associated with Inclined Plane Tracking and Erosion of Insulating Materials, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 7(3), 394-400.
83. EL-HAG, A., JAYARAM, S.H. ve CHENEY, E.A., 2003, Fundamental and Low Frequency Harmonic Components of Leakage Current as a Diagnostic Tool to Study Aging of RTV and HTV Silicone Rubber in Salt-Fog, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 10(1), 128-136.
84. FERNANDO, M.A.R.M., GUBANSKI, S.M., 1997, Analysis of Leakage Current Waveforms for Field-aged and New Composite Insulators, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Minneapolis, 19-22 Oct., 350-353.
85. FERNANDO, M.A.R.M., GUBANSKI, S.M., 1996, Leakage Current Patterns on Artificially Polluted Composite Insulators, *IEEE Conference on Electrical Insulation and ielectric Phenomena*, San Fransisco, 20-23 Oct., 394-397.
86. FERNANDO, M.A.R.M., GUBANSKI, S.M., 1999, Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 6(5), 688-694.

87. GUSTAVSSON, T. G., GUBANSKI, S.M., HILLBORG, H., KARLSSON, S., GEDDE, U.W., 2001, Aging of Silicone Rubber under AC or DC Voltages in a Coastal Enviroment, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 8(6), 1029-1039.
88. TOKORO, T., IWASAKI, T., KOSAKI, M., 2004, Diagnosis of Hydrophobic Condition of Polymer Materials Using Dielectric Measurement and Image Analysis, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 627-630.
89. KOCATEPE, C., UZUNOĞLU, M., YUMURTACI, R., KARAKAŞ, A., ARIKAN, O., 2004, *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
90. EROL, G., ERSOY, A., KUNTMAN, A., 2006, Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Polimerik Yalıtkanlarda Hızlandırılmış Yüzey Bozunma Testleri için Elektrik Alan Hesabı, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO2006), Bildiri Kitabı-Elektrik, Aralık 2006, Bursa, 112-115.
91. ASENJO, S.E., MORALES, O.N., VALDENEGRO, E.A., 1997, Solution of Low Frequency Complex Fields in Polluted Insulators by means of the Finite Element Method, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 4(1), 10-16.
92. ASENJO, S.E., VALDENEGRO, E.A., MORALES, O.N., 2004, Solution of Low Frequency Complex Fields in Insulating Systems, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 11(6), 1014-1025.
93. SIMA, W., YANQ, Q., SUN, C., GUO, F., 2006, Potential and electric-field calculation along an ice-covered composite insulator with Finite Element Method, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 153(3), 343-350.
94. NIKOLOVA, N.K., ZHU, J., LI D., BAKR, M.H., BANDLER, J.W., 2006, Sensitivity Analysis of Network Parameters With Electromagnetic Frequency-Domain Simulators, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, 54(2), 670-671.
95. BARKANOV, E., 2001, *Introduction To The Finite Element Method*, Institute of Materials and Structures, Faculty of Civil Engineering, Riga Technical University.
96. MOAVENI, S., 2003, *Finite Element Analysis: Theory and Applications with ANSYS*, 2nd ed, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 0-1311-1202-3.
97. JOHNSON, C, 1988, *Numerical Solutions of Partial Differantial Equations by The Finite Element Method*, Cambridge University Press, Cambridge, New York, New Rochelle, Melbourne, 0-5213-4758-0.
98. VOLAKIS, J.L., CHATTERJEE, A., KEMPEL, L.C., 1998, *Finite Element Method for Electromagnetics*, IEEE Press, Piscataway, 0-780-334-256.

99. SERDYUK, Y.V., PODOLTSEV, A.D., GUBANSKI, S.M., 2002, Dielectric Properties of 3D Composite Structures: Simulation versus Experiments, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 142-145.
100. ZIMMERNAN, B., WILLIAM J., 2005, *Process Modelling and Simulation With Finite Element Methods*, Singaopre by World Scientific Printers (S) Pte Ltd, 9-81-238-793-5.
101. KALENDERLİ, Ö., 1996, *Sonlu Elemanlar Yöntemi Ders Notları*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, İstanbul.
102. HERBERT, P., NEFF, JR., 1990, *Introductory Electromagnetics*, John Wiley and Sons Ltd, New York, 0-4715-1769-0.
103. CHATFIELD, C., 1991, *Statistics for Technology*, 3rd edition, Chapman and Hall, London, 0 412 25340 2.
104. WEIBULL, W., *Fatigue Testing and Analysis of Results*, Pergamon Press, New York, 1961.
105. ERSOY, A., KUNTMAN, A., UĞUR, M., 2004, Polyester izolatörlerin güvenilirliğine Bor katkısı ve Weibull istatistiği ile incelenmesi, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO2004)*, 8-12 Aralık 2004, Bursa, 193-197.
106. ERSOY, A., GÜNEŞ, İ., UĞUR, M., KUNTMAN, A., 2005, Polimerik Yalıtkanların Yaşlanma Sürecine Titreşimin Etkisinin Weibull İstatistiği İle İncelenmesi, *II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, MBGAK 2005*, 17-19 Kasım 2005, İstanbul
107. UĞUR, M., 1997, *Modelling and analysis of surface tracking phenomena of solid insulating materials*, University of Manchester, Doktora tezi, 270.
108. STONE, G.C., HEESWJIK, R.G.V., 1977, Parameter estimation for the Weibull Distribution, *Electrical Insulation*, 12, 253-261.

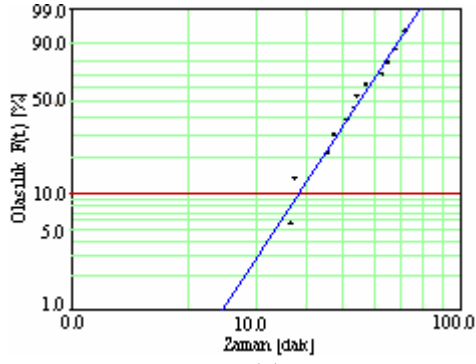
EKLER

Ek-A

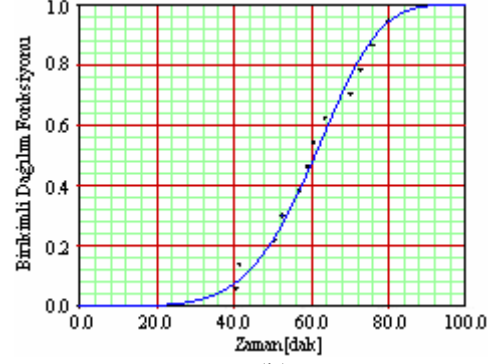


Şekil Ek-1: Ağırlıkça % 0.1 tinal katkılı polyester örnek için yapılan güvenilirlik analizi ile elde edilen

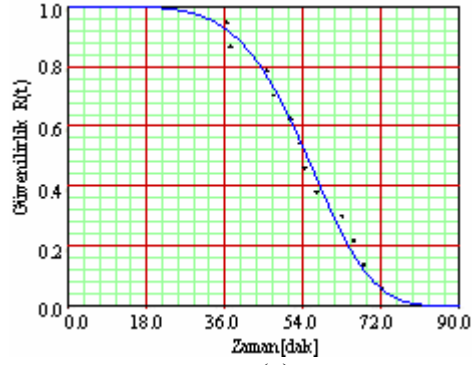
- (a) Deneysel olarak elde edilen ömür sürelerinin Weibull dağılımına uygunluğu
- (b) Birikimli dağılım fonksiyonu
- (c) Güvenilirlik eğrisi
- (d) Olasılık yoğunluk fonksiyonu
- (e) Bozulma oranı-zaman eğrisi



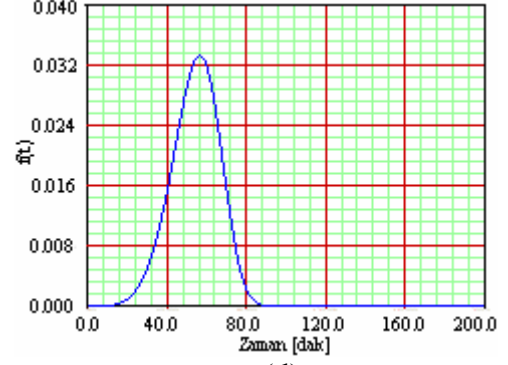
(a)



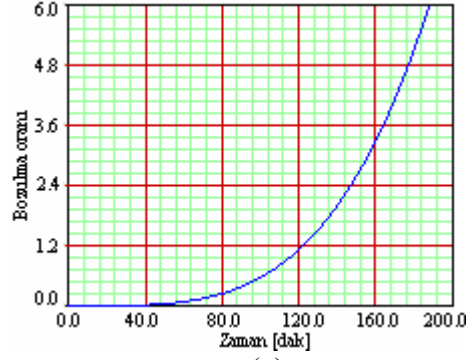
(b)



(c)



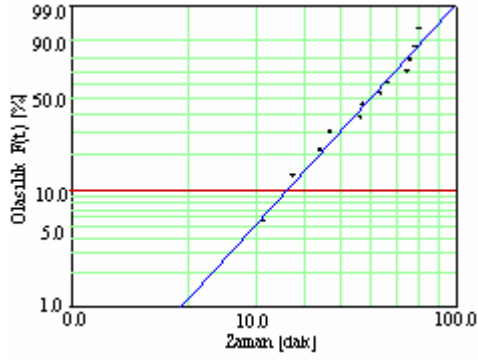
(d)



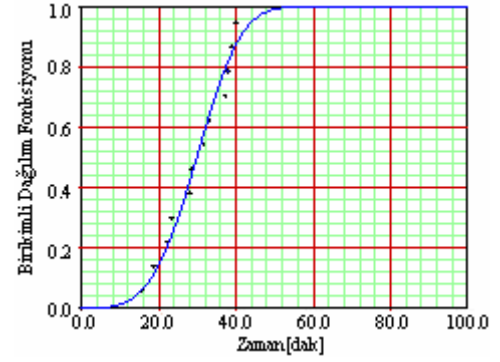
(e)

Şekil Ek-2: Ağırlıkça % 0.2 tinkal katkılı polyester örnek için yapılan güvenilirlik analizi ile elde edilen

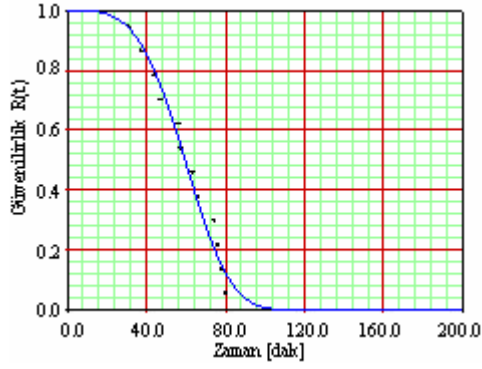
- (a) Deneysel olarak elde edilen ömür sürelerinin Weibull dağılımına uygunluğu
- (b) Birikimli dağılım fonksiyonu
- (c) Güvenilirlik eğrisi
- (d) Olasılık yoğunluk fonksiyonu
- (e) Bozulma oranı-zaman eğrisi



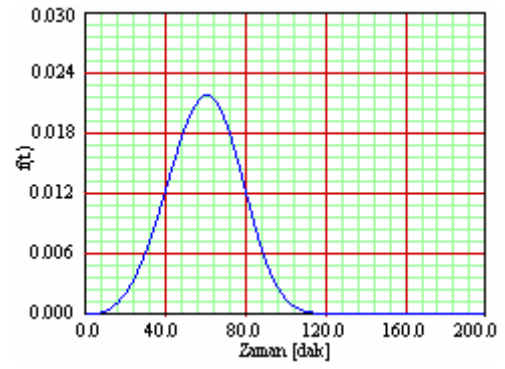
(a)



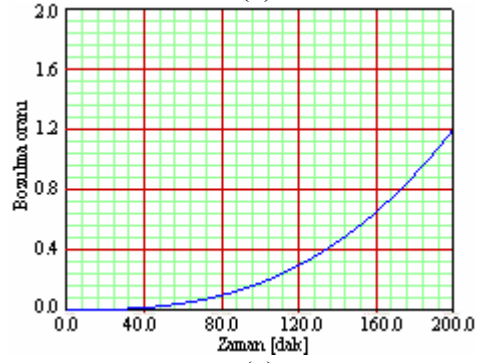
(b)



(c)



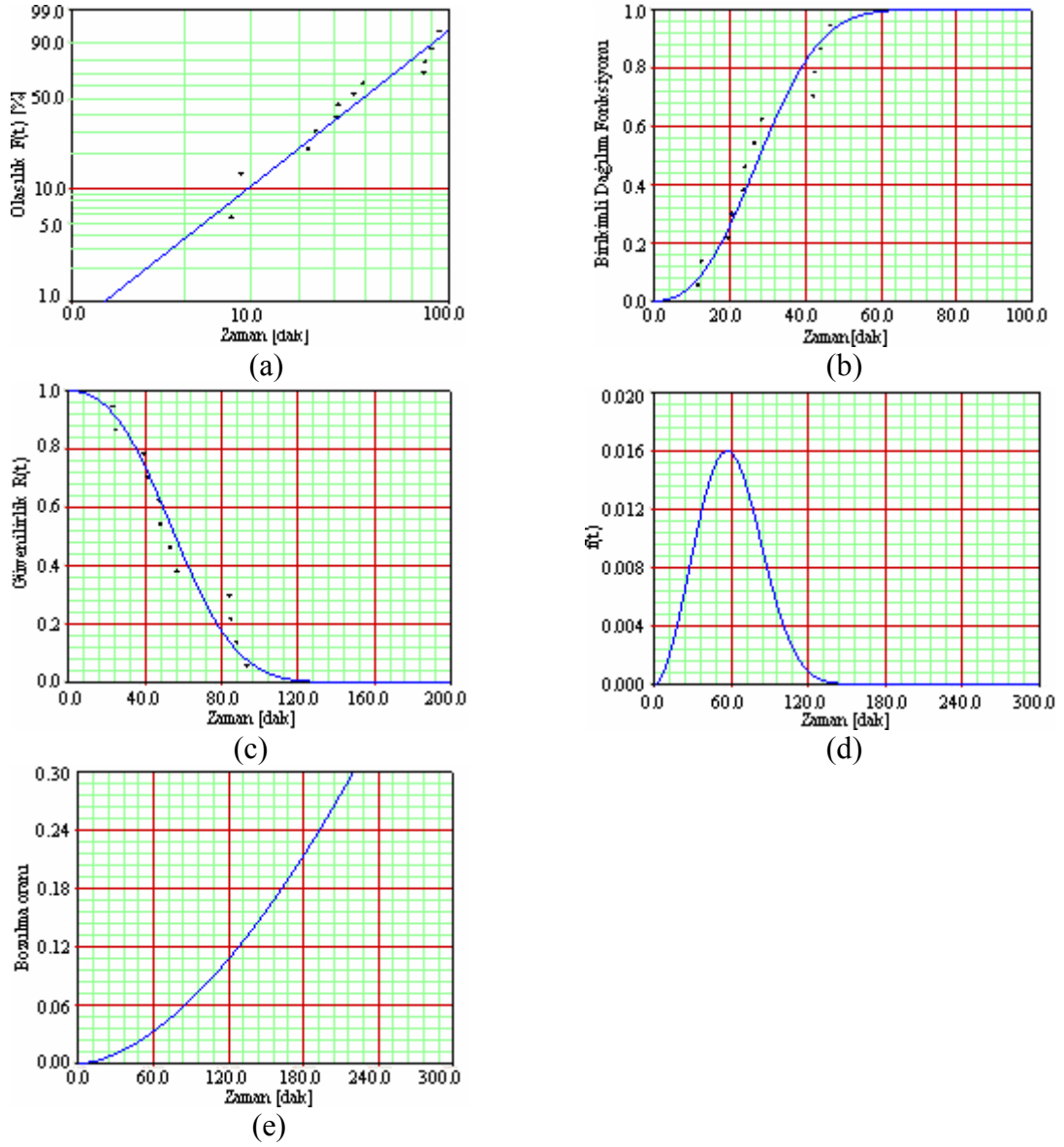
(d)



(e)

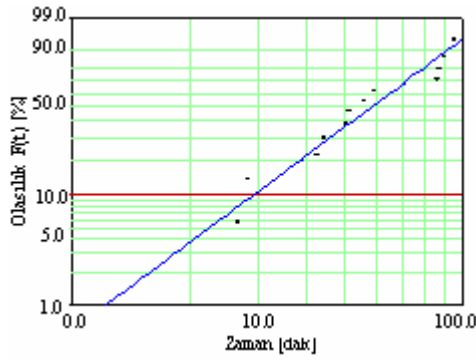
Şekil Ek-3: Ağırlıkça % 0.3 tinkal katkılı polyester örnek için yapılan güvenilirlik analizi ile elde edilen

- (a) Deneysel olarak elde edilen ömür sürelerinin Weibull dağılımına uygunluğu
- (b) Birikimli dağılım fonksiyonu
- (c) Güvenilirlik eğrisi
- (d) Olasılık yoğunluk fonksiyonu
- (e) Bozulma oranı-zaman eğrisi

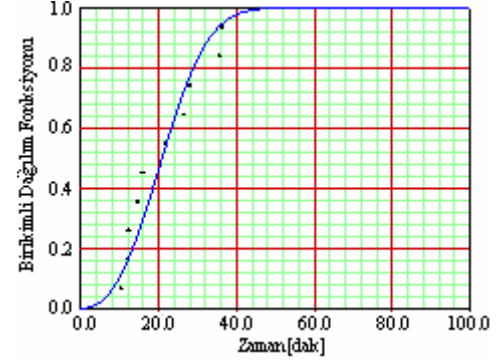


Şekil Ek-4: Ağırlıkça % 0.4 tıncal katkılı polyester örnek için yapılan güvenilirlik analizi ile elde edilen

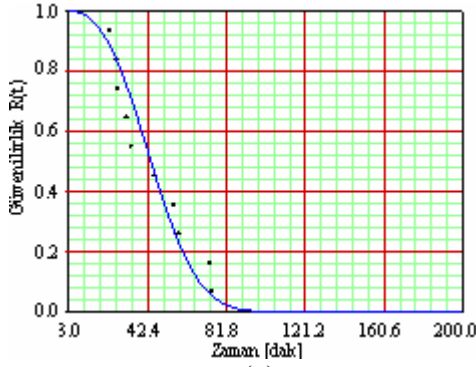
- (a) Deneysel olarak elde edilen ömür sürelerinin Weibull dağılımına uygunluğu
- (b) Birikimli dağılım fonksiyonu
- (c) Güvenilirlik eğrisi
- (d) Olasılık yoğunluk fonksiyonu
- (e) Bozulma oranı-zaman eğrisi



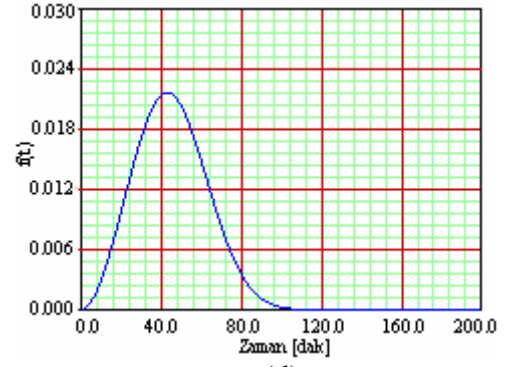
(a)



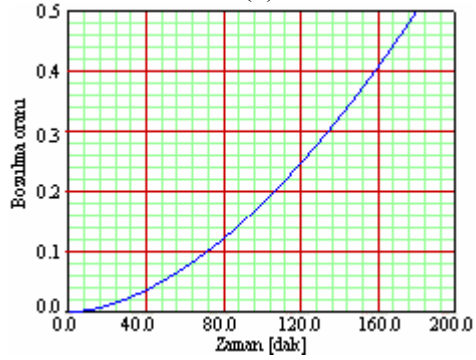
(b)



(c)



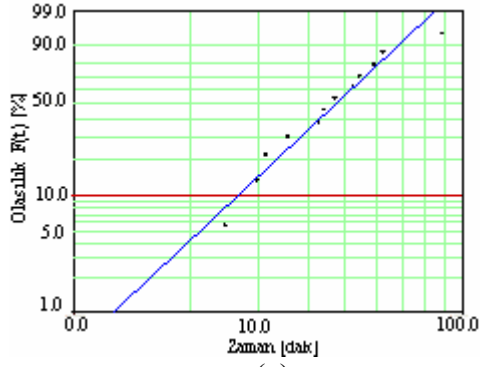
(d)



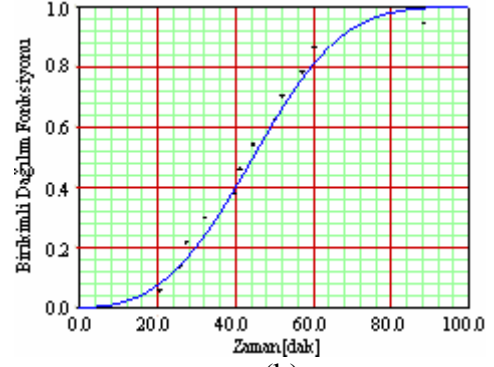
(e)

Şekil Ek-5: Ağırlıkça % 0.6 tinkal katkılı polyester örnek için yapılan güvenilirlik analizi ile elde edilen

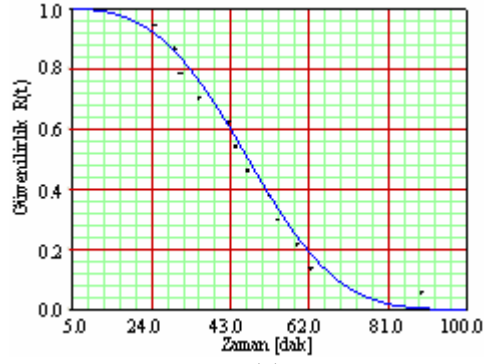
- (a) Deneysel olarak elde edilen ömür sürelerinin Weibull dağılımına uygunluğu
- (b) Birikimli dağılım fonksiyonu
- (c) Güvenilirlik eğrisi
- (d) Olasılık yoğunluk fonksiyonu
- (e) Bozulma oranı-zaman eğrisi



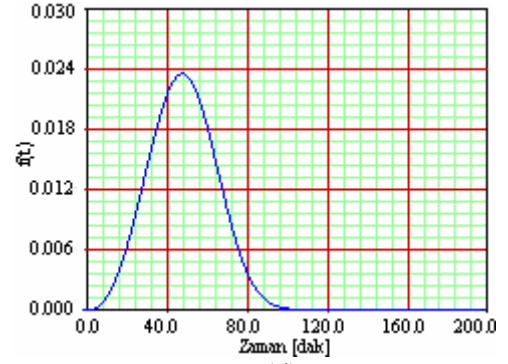
(a)



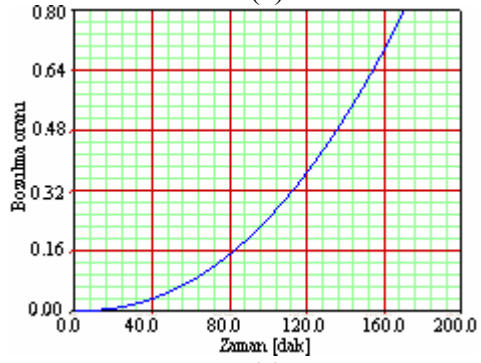
(b)



(c)



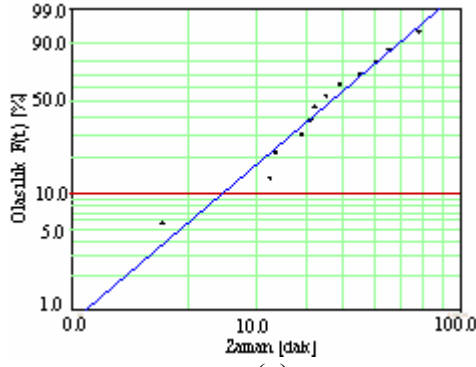
(d)



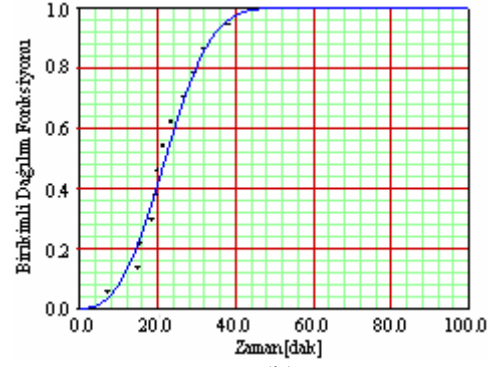
(e)

Şekil Ek-6: Ağırlıkça % 0.7 tinkal katkılı polyester örnek için yapılan güvenilirlik analizi ile elde edilen

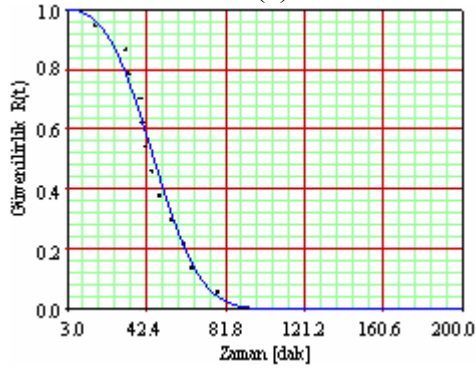
- (a) Deneysel olarak elde edilen ömür sürelerinin Weibull dağılımına uygunluğu
- (b) Birikimli dağılım fonksiyonu
- (c) Güvenilirlik eğrisi
- (d) Olasılık yoğunluk fonksiyonu
- (e) Bozulma oranı-zaman eğrisi



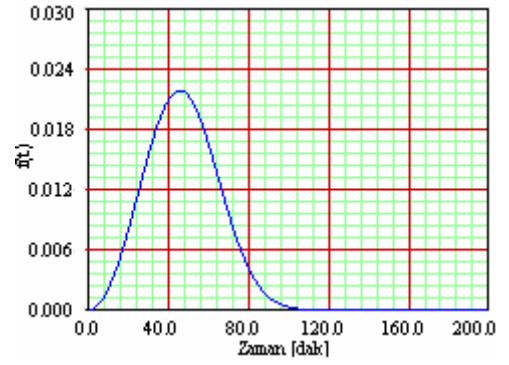
(a)



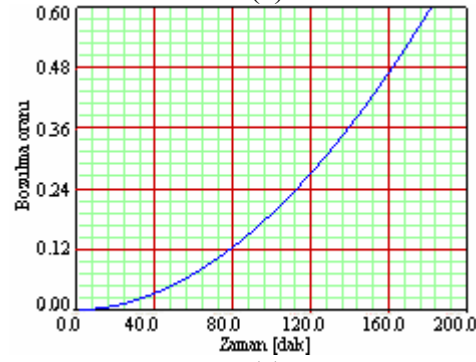
(b)



(c)



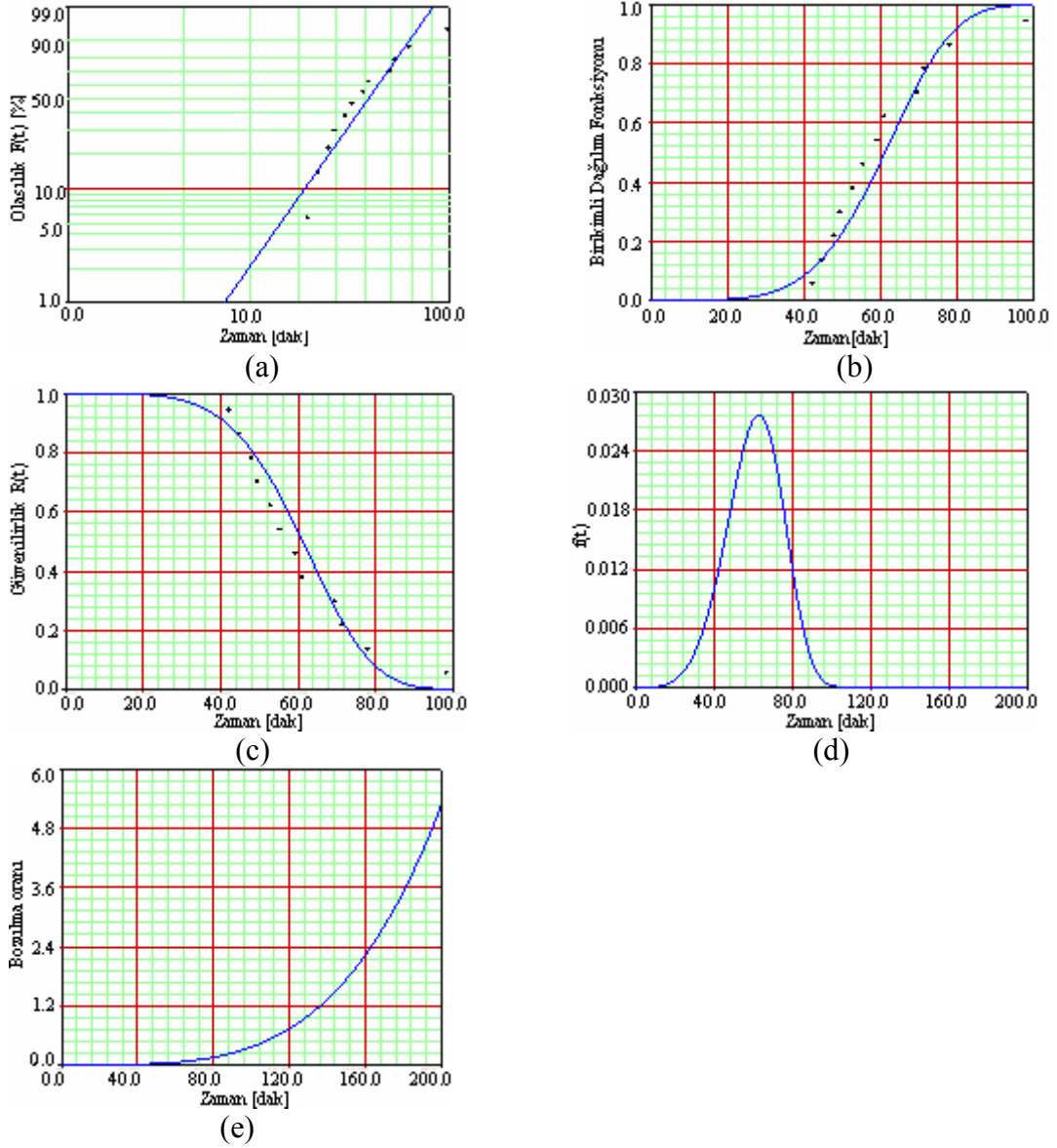
(d)



(e)

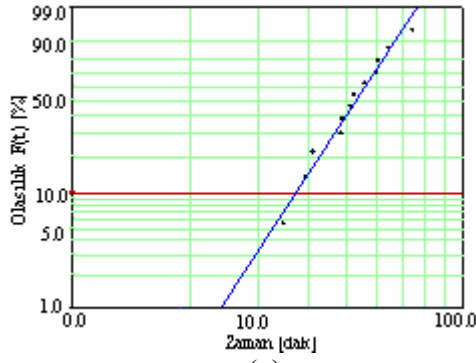
Şekil Ek-7: Ağırlıkça % 0.8 tinkal katkıli polyester örnek için yapılan güvenilirlik analizi ile elde edilen

- (a) Deneysel olarak elde edilen ömür sürelerinin Weibull dağılımına uygunluğu
- (b) Birikimli dağılım fonksiyonu
- (c) Güvenilirlik eğrisi
- (d) Olasılık yoğunluk fonksiyonu
- (e) Bozulma oranı-zaman eğrisi

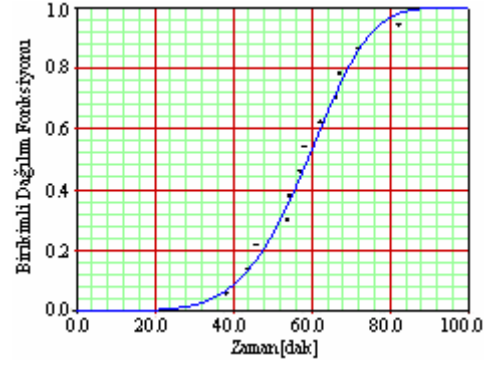


Şekil Ek-8: Ağırlıkça % 1.0 tinkal katkılı polyester örnek için yapılan güvenilirlik analizi ile elde edilen

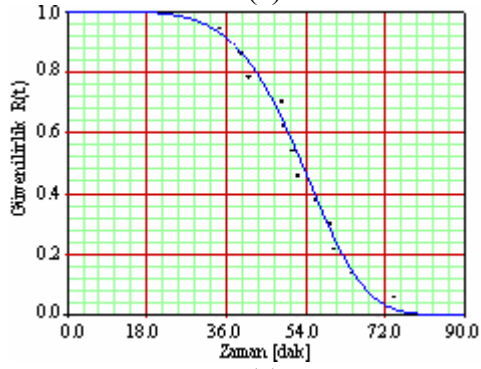
- (a) Deneysel olarak elde edilen ömür sürelerinin Weibull dağılımına uygunluğu
- (b) Birikimli dağılım fonksiyonu
- (c) Güvenilirlik eğrisi
- (d) Olasılık yoğunluk fonksiyonu
- (e) Bozulma oranı-zaman eğrisi



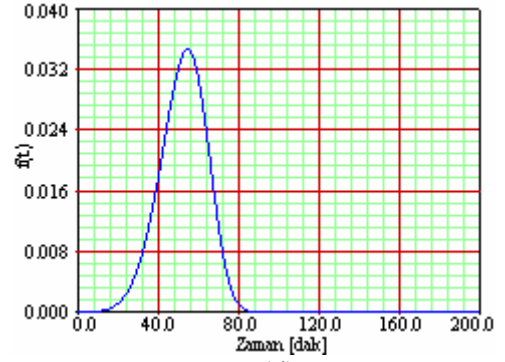
(a)



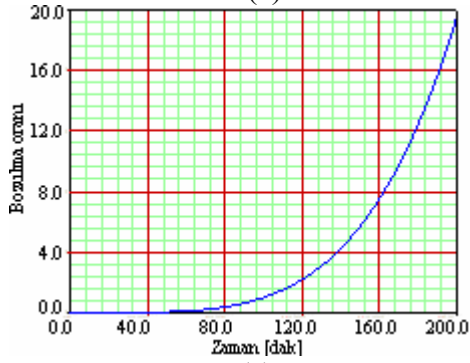
(b)



(c)



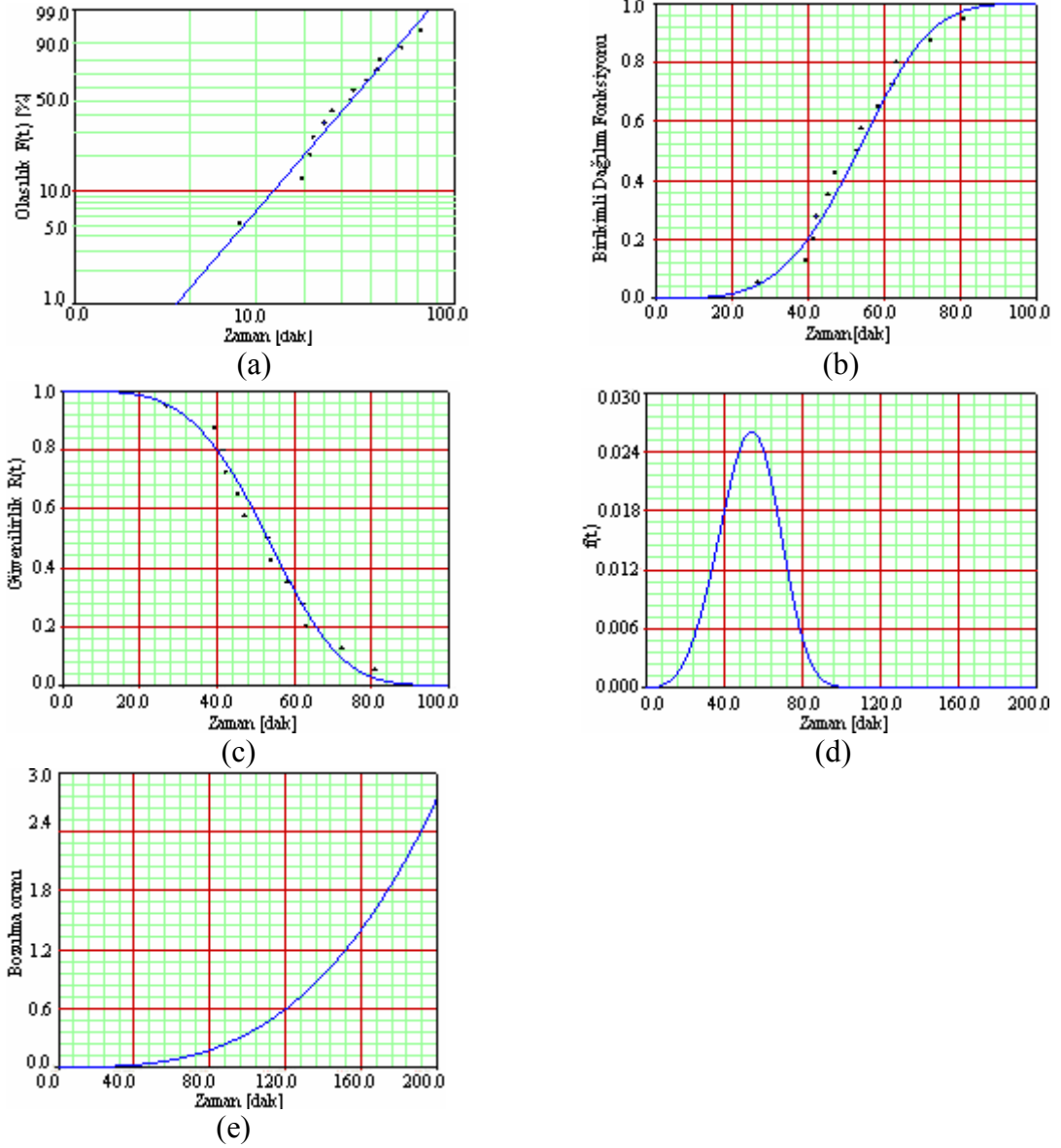
(d)



(e)

Şekil Ek-9: Ağırlıkça % 1.2 tinkal katkılı polyester örnek için yapılan güvenilirlik analizi ile elde edilen

- (a) Deneysel olarak elde edilen ömür sürelerinin Weibull dağılımına uygunluğu
- (b) Birikimli dağılım fonksiyonu
- (c) Güvenilirlik eğrisi
- (d) Olasılık yoğunluk fonksiyonu
- (e) Bozulma oranı-zaman eğrisi



Şekil Ek-10: Ağırlıkça % 1.5 tinal katkılı polyester örnek için yapılan güvenilirlik analizi ile elde edilen

- (a) Deneysel olarak elde edilen ömür sürelerinin Weibull dağılımına uygunluğu
- (b) Birikimli dağılım fonksiyonu
- (c) Güvenilirlik eğrisi
- (d) Olasılık yoğunluk fonksiyonu
- (e) Bozulma oranı-zaman eğrisi

ÖZGEÇMİŞ

1978’de Eskişehir’de doğan Aysel Ersoy, 2000’de İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2003 yılında İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Doktora eğitimine başladı ve halen doktora öğrenimini sürdürmektedir. 2001 yılında İstanbul Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Elektrik Tesisleri Ana Bilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak girdi ve halen bu kurumda Araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. 2001’den itibaren Institute of Electrical and Electronics Engineering (IEEE) üyesi ve 2000’den itibaren Elektrik Mühendisleri Odası üyesidir. İlgi duyduğu konular yüksek gerilim tekniği, yüksek gerilim yalıtkanları, aydınlatma ve elektrik iç tesisat konularıdır.