



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**SICAKLIK ve NEM ETKİSİ ALTINDA DİELEKTRİK SIVILARIN DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

Alper AYDOĞAN

DANIŞMAN

Doç. Dr. Aysel ERSOY

(danışman imzalı olacaktır)

II. DANIŞMAN

Dr. Fatih ATALAR

Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Doktora Programı

Temmuz, 2024

TEZ KABUL VE ONAYI

Alper AYDOĞAN tarafından, Doç. Dr. Aysel ERSOY danışmanlığında hazırlanan "SICAKLIK ve NEM ETKİSİ ALTINDA DİELEKTRİK SIVILARIN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 17/07/2024 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

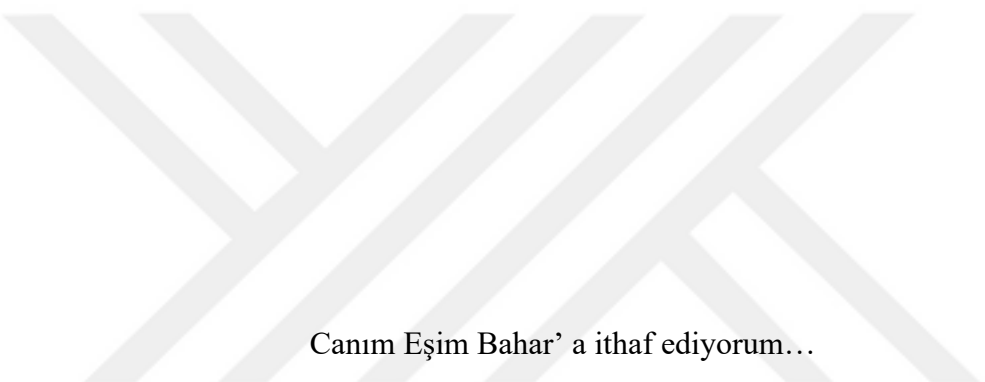
	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Doç. Dr. Aysel ERSOY	☒
	İstanbul Üniversitesi -Cerrahpaşa	Kabul
	Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim	☐
	Dalı	Ret
ÜYE	Doç. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU	☒
	İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa	Kabul
	Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim	☐
	Dalı	Ret
ÜYE	Prof. Dr. Mukden UĞUR	☒
	Türk- Alman Üniversitesi	Kabul
	Robotlar ve Akıllı Sistemler Anabilim Dalı	☐
		Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Rana ORTAÇ KABAOĞLU	☒
	İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa	Kabul
	Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim	☐
	Dalı	Ret
ÜYE	Doç. Dr. Emrah DOKUR	☒
	Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi	Kabul
	Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim	☐
	Dalı	Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Alper AYDOĞAN

(İmza)



Canım Eşim Bahar' a ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

**TRAFO SIVI YALITKANLARININ FARKLI NEM ve SICAKLIK SEVİYELERİNDE DELİNME
DAYANIMI KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ**

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon
Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 37284

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ile başlayan sürecimde beni doktora da teşvik eden, yüksek lisans ve doktora sürecimde bilgisi, tecrübesi ve ışığıyla her karanlığa düştüğümde yolumu aydınlatan, her daim yanımda olan çok değerli hocam Doç. Dr. Aysel ERSOY' a, her daim bütün süreçte beni doğru yönlendiren ve desteklerini her daim hissettiğim sayın hocam Dr. Fatih ATALAR' a, sonsuz şükranlarımı sunarım.

Hayatımın her döneminde desteğini hissettiğim ve zorlu süreçlerde yanımda olan canım eşim Dr. Bahar BALCI AYDOĞAN' a minnetlerimi sunarım. Hayatım boyunca yanımda olan desteklerini kalbimde hissettiğim aileme çok teşekkür ederim.

Temmuz 2024

Alper AYDOĞAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI.....	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ.....	xviii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxiii
ABSTRACT	xxv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	4
3. YÖNTEM.....	21
3.1. SIVI DİELEKTRİK MALZEMELER.....	21
3.2. ELEKTROT SİSTEMİ	22
3.3. SICAKLIK PARAMETRESİ DENEY DÜZENEĞİ	26
3.4. NEM PARAMETRESİ DENEY DÜZENEĞİ	29
3.5. KURTOGRAM YÖNTEMİ	32
4. BULGULAR	42
4.1. KURTOGRAM ANALİZİ.....	43
4.1.1. Sıcaklığın Değişken Olarak Kullanıldığı Deneylere Ait Sonuçlar.....	43
4.1.2. Nemin Değişken Olarak Kullanıldığı Deneylere Ait Sonuçlar	102
4.2. DELİNME GERİLİMİ DENEY BULGULARI.....	184
4.2.1. Delinme Geriliminin Sıvı Dielektriklerde Sıcaklıkla Değişimi	184
4.2.2. Delinme Geriliminin Sıvı Dielektriklerde Nemle Değişimi	190
4.3. SIVI DİELEKTRİKLERİN FTIR ANALİZİ	196
5. TARTIŞMA.....	199
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	204

KAYNAKLAR.....	207
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	214
ETİK KURUL İZİN YAZISI	215
KURUM İZNİ YAZILARI.....	216
ÖZGEÇMİŞ	217



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Cigre katılımcılarına göre 964 büyük arızaya dayalı trafo arızalarının nedenleri [1]	5
Şekil 2.2: Değişen sıcaklık değerleri için 10 mm elektrot açıklığında akım gerilim değerleri grafiği [10].	7
Şekil 2.3: Mineral yağdaki (dolgulu elmaslar şekli) ve oda sıcaklığındaki (25 °C) çeşitli yağ asidi esterlerindeki nem içeriğine karşı 2.5 mm elektrot açıklığında delinme gerilimi: C8-Me (dolu kareler), C12-Me (dolu daireler) C8-2EH (içi boş kareler) ve C12-2EH (içi boş daireler) [12].	8
Şekil 2.4: Farklı sıcaklıklarda trafo yağlarının su tutma seviyesi [31].	15
Şekil 2.5: Yeni yağ ve yağ numunesinin delinme gerilimi ile sıcaklığı arasındaki ilişki [41].	17
Şekil 2.6: 27 °C sıcaklık ve 57 °C sıcaklıkta transformatör yağı elektrotlar arası açıklık ve delinme gerilimi grafiği [43].	18
Şekil 2.7: 27-57 °C sıcaklıkta aralığında transformatör yağının delinme gerilimi ve sıcaklık ilişkisi [43].	19
Şekil 3.1: Elektrot tutucu ayakların 2D ve 3D tasarımı.	22
Şekil 3.2: (a)Bakır düzlem elektrot (b) İğne Elektrot tutacağı.	23
Şekil 3.3: Deney kazanı ve elektrotların yerleşim şeması tasarımı.	23
Şekil 3.4: İğne elektrot ve sabitleme aparatı.	24
Şekil 3.5: Elektrot tutacakları ve ölçüleri.	24
Şekil 3.6: Elektrot tutacakları ve iğne-düzlem elektrot.	25
Şekil 3.7: (a) Deney Kazanı (b) Deney kazanı ve elektrot konumu.	25
Şekil 3.8: Trafo yağı ısıtma cihazı.	27
Şekil 3.9: CEM DT-8820 çevresel ölçüm cihazı.	27
Şekil 3.10: Sıcaklık deneyleri deney seti şeması.	28
Şekil 3.11: Sıcaklık deneyleri gerçek deney düzeneği.	29
Şekil 3.12: Nem Odası.	29

Şekil 3.13: Delinme gerilimi nem deneyleri deney şeması.	30
Şekil 3.14: Havvaca HD-1349 ultrasonik buhar makinesi	31
Şekil 3.15: Delinme gerilimi nem deneyleri deney düzeneği.....	31
Şekil 3.16: Akım ölçümü için devre şeması [53].	32
Şekil 3.17: Seviye ve frekans bandı kurtogram gösterimi.....	39
Şekil 3.18: FK' nın bant bölümü	39
Şekil 4.1: Mineral yağ 20 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	43
Şekil 4.1 (devamı): Mineral yağ 20 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	44
Şekil 4.2: Doğal Ester Sıvı 20 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	44
Şekil 4.2 (devamı): Doğal Ester Sıvı 20 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	45
Şekil 4.3: Sentetik ester sıvı 20 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	45
Şekil 4.3 (devamı): Sentetik ester sıvı 20 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).....	46
Şekil 4.4: Mineral yağ 25 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	47
Şekil 4.4(devamı): Mineral yağ 25 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	48
Şekil 4.5: Doğal ester sıvı 25 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	48
Şekil 4.5 (devamı): Doğal ester sıvı 25 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	49
Şekil 4.6: Sentetik ester sıvı 25 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	49
Şekil 4.6 (devamı): Sentetik ester sıvı 25 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).....	50
Şekil 4.7: Mineral yağ 30 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	51

Şekil 4.8: Doğal ester sıvı 30 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	52
Şekil 4.9: Sentetik ester sıvı 30 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	53
Şekil 4.10: Mineral yağ 35 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	55
Şekil 4.11: Doğal ester sıvı 35 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	56
Şekil 4.12: Sentetik ester sıvı 35 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	57
Şekil 4.13: Mineral yağ 40 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	58
Şekil 4.13 (devamı): Mineral yağ 40 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	59
Şekil 4.14: Doğal ester sıvı 40 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	60
Şekil 4.15: Sentetik ester sıvı 40 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	61
Şekil 4.16: Mineral yağ 45 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	63
Şekil 4.17: Doğal ester sıvı 45 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	64
Şekil 4.18: Sentetik ester sıvı 45 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	65
Şekil 4.19: Mineral yağ 50 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=5 mm, elektrot açıklıkları)	67
Şekil 4.20: Doğal ester sıvı 50 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	68
Şekil 4.21: Sentetik ester sıvı 50 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	69
Şekil 4.22: Mineral yağ 55 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=4 mm, elektrot açıklıkları).....	70
Şekil 4.23: Doğal ester sıvı 55 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	71

Şekil 4.24: Sentetik ester sıvı 55 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	72
Şekil 4.25: Mineral yağ 60 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)	74
Şekil 4.26: Doğal ester sıvı 60 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	75
Şekil 4.26 (devamı): Doğal ester sıvı 60 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	76
Şekil 4.27: Sentetik ester sıvı 60 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	76
Şekil 4.27 (devamı): Sentetik ester sıvı 60 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	77
Şekil 4.28: Mineral yağ kurtogram değerleri eğrileri.	78
Şekil 4.29: Mineral yağ kurtogram değerleri eğrileri.	80
Şekil 4.30: Doğal ester sıvı kurtogram değerleri eğrileri.	82
Şekil 4.31: Doğal Ester sıvı kurtogram değerleri eğrileri.	84
Şekil 4.32: Sentetik Ester sıvı kurtogram değerleri eğrileri.	86
Şekil 4.33: Sentetik Ester sıvı kurtogram değerleri eğrileri.	87
Şekil 4.34: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri karşılaştırması (T= 20 °C).	89
Şekil 4.35: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 25 °C).	91
Şekil 4.36: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 30 °C).	92
Şekil 4.37 Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 35 °C).	94
Şekil 4.38: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 40 °C).	95
Şekil 4.39: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 45 °C).	97
Şekil 4.40: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 50 °C).	98
Şekil 4.41: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 55 °C).	100
Şekil 4.42: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 60 °C).	101
Şekil 4.43: Mineral yağ %40 nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	103

Şekil 4.43 (devamı): Mineral yağ %40 nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	104
Şekil 4.44: Doğal ester sıvı %40 nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	104
Şekil 4.44 (devamı): Doğal ester sıvı %40 nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	105
Şekil 4.45: Sentetik ester sıvı %40 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	106
Şekil 4.46: Mineral yağ %45 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	107
Şekil 4.47: Doğal ester sıvı %45 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	108
Şekil 4.47 (devamı): Doğal ester sıvı %45 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	109
Şekil 4.48: Sentetik ester sıvı %45 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	110
Şekil 4.49: Mineral yağ %50 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	111
Şekil 4.49 (devamı): Mineral yağ %50 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	112
Şekil 4.50: Doğal ester sıvı %50 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	113
Şekil 4.51: Sentetik ester sıvı %50 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	115
Şekil 4.52: Mineral yağ %55 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	116
Şekil 4.53: Doğal ester sıvı %55 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	117
Şekil 4.53 (devamı): Doğal ester sıvı %55 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	118
Şekil 4.54: Sentetik ester sıvı %55 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	119
Şekil 4.55: Mineral yağ %60 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	120

Şekil 4.55 (devamı): Mineral yağ %60 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).....	121
Şekil 4.56: Doğal ester sıvı %60 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	122
Şekil 4.57: Sentetik ester sıvı %60 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	123
Şekil 4.57 (devamı): Sentetik ester sıvı %60 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).....	124
Şekil 4.58: Mineral yağ %65 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	125
Şekil 4.59: Doğal ester sıvı %65 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	127
Şekil 4.60: Sentetik ester sıvı %65 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	128
Şekil 4.61: Mineral yağ %70 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	129
Şekil 4.62: Doğal ester sıvı %70 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	130
Şekil 4.62 (devamı): Doğal ester sıvı %70 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).....	131
Şekil 4.63: Sentetik ester sıvı %70 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	131
Şekil 4.63 (devamı): Sentetik ester sıvı %70 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).....	132
Şekil 4.64: Mineral yağ %75 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	133
Şekil 4.65: Doğal ester sıvı %75 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	134
Şekil 4.65 (devamı): Doğal ester sıvı %75 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).....	135
Şekil 4.66: Sentetik ester sıvı % 75Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	136
Şekil 4.67: Mineral yağ %80 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	137

Şekil 4.68: Doğal ester sıvı %80 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	138
Şekil 4.68 (devamı): Doğal ester sıvı %80 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	139
Şekil 4.69: Sentetik ester sıvı %80 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	139
Şekil 4.69 (devamı): Sentetik ester sıvı %80 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	140
Şekil 4.70: Mineral Yağ %85 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	141
Şekil 4.71: Doğal ester sıvı %85 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	142
Şekil 4.71 (devamı): Doğal ester sıvı %85 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	143
Şekil 4.72: Sentetik ester sıvı %85 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	144
Şekil 4.73: Mineral Yağ %90 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	145
Şekil 4.74: Doğal ester sıvı %90 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	147
Şekil 4.75: Sentetik ester sıvı %90 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	148
Şekil 4.76: Mineral Yağ %95 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	149
Şekil 4.77: Doğal ester sıvı %95 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	150
Şekil 4.77 (devamı): Doğal ester sıvı %95 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	151
Şekil 4.78: Sentetik ester sıvı %95 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).	152
Şekil 4.79: Mineral yağ nem seviyesi kurtogram değerleri eğrileri.	153
Şekil 4.80: Mineral yağ nem seviyesi kurtogram değerleri eğrileri.	155
Şekil 4.81: Doğal ester sıvı nem seviyesi kurtogram değerleri eğrileri.	157
Şekil 4.82: Doğal ester sıvı nem seviyesi kurtogram değerleri eğrileri.	159

Şekil 4.83: Sentetik ester sıvı nem seviyesi kurtogram değerleri eğrileri.	161
Şekil 4.84: Sentetik ester sıvı nem seviyesi kurtogram değerleri eğrileri.	163
Şekil 4.85: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %40).	165
Şekil 4.86: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %45).	167
Şekil 4.87: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %50).	169
Şekil 4.88: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %55).	170
Şekil 4.89: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %60).	172
Şekil 4.90: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %65).	173
Şekil 4.91: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %70).	175
Şekil 4.92: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %75).	176
Şekil 4.93: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %80).	178
Şekil 4.94: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %85).	179
Şekil 4.95: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %90).	181
Şekil 4.96: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %95).	183
Şekil 4.97: Mineral yağ delinme geriliminin sıcaklıkla değişimi.....	185
Şekil 4.98: Doğal ester sıvı için delinme geriliminin sıcaklıkla değişimi.....	187
Şekil 4.99: Sentetik ester sıvı için delinme geriliminin sıcaklıkla değişimi.....	188
Şekil 4.100: Dielektrik sıvıların delinme geriliminin sıcaklık ile değişiminin grafik karşılaştırması.....	189
Şekil 4.101: Mineral yağ için delinme geriliminin nem ile değişimi	190
Şekil 4.102: Doğal ester sıvı için delinme geriliminin nem ile değişimi	192

Şekil 4.103: Sentetik ester sıvı için delinme geriliminin nem ile değişimi	193
Şekil 4.104: Dielektrik sıvıların delinme geriliminin nem ile değişiminin grafik karşılaştırması	195
Şekil 4.105: Mineral yağ için ortam nemi ölçümleri sonrası alınan yağ numunesi FTIR analizi.	196
Şekil 4.106: Doğal ester sıvı için ortam nemi ölçümleri sonrası alınan yağ numunesi FTIR analizi	196
Şekil 4.107: Sentetik ester sıvı için ortam nemi ölçümleri sonrası alınan yağ numunesi FTIR analizi	197



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Çeşitli nem içeriğine sahip mineral ve hurma yağ asidi ester yağı numunelerinin ortalama delinme gerilimi [11].	8
Tablo 3.1: Sıvı dielektrik parametreleri.	21
Tablo 4.1: Mineral yağ kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	79
Tablo 4.2: Mineral yağ kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	81
Tablo 4.3: Doğal ester sıvı kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	82
Tablo 4.3 (devamı): Doğal ester sıvı kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	83
Tablo 4.4: Doğal Ester sıvı kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	84
Tablo 4.4 (devamı): Doğal Ester sıvı kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	85
Tablo 4.5: Sentetik Ester sıvı kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	86
Tablo 4.5 (devamı): Sentetik Ester sıvı kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	87
Tablo 4.6: Sentetik Ester sıvı kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	88
Tablo 4.7: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 20 °C).	89
Tablo 4.7 (devamı): Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 20 °C).	90
Tablo 4.8: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 25 °C).	91
Tablo 4.9: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 30 °C).	93
Tablo 4.10: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 35 °C).	94
Tablo 4.11: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 40 °C).	96
Tablo 4.12: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 45 °C).	97
Tablo 4.13: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 50 °C).	98
Tablo 4.13 (devamı): Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 50 °C).	99
Tablo 4.14: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 55 °C).	100

Tablo 4.15: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 60 °C).	102
Tablo 4.16: Mineral yağ nem seviyesi kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	154
Tablo 4.17: Mineral yağ nem seviyesi kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	156
Tablo 4.18: Doğal ester sıvı nem seviyesi kmaks., Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	158
Tablo 4.19: Doğal ester sıvı nem seviyesi kmaks., Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	160
Tablo 4.20: Sentetik ester sıvı nem seviyesi kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	162
Tablo 4.21: Sentetik ester sıvı nem seviyesi kmaks., Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.	164
Tablo 4.22: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %40).	166
Tablo 4.23: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %45).	167
Tablo 4.24: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %50).	169
Tablo 4.25: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %55).	171
Tablo 4.26: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %60).	172
Tablo 4.27: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %65).	174
Tablo 4.28: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %70).	175
Tablo 4.29: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %75).	177
Tablo 4.30: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %80).	178
Tablo 4.31: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %85).	180
Tablo 4.32: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %90).	181
Tablo 4.33: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %95).	183
Tablo 4.34: Mineral yağ sıcaklıkla değişen delinme gerilimi değerleri	186
Tablo 4.35: Doğal ester sıvı için sıcaklıkla değişen delinme gerilimi değerleri	187
Tablo 4.36: Sentetik ester sıvı için sıcaklıkla değişen delinme gerilimi değerleri	189
Tablo 4.37: Mineral yağ için nem ile değişen delinme gerilimi değerleri	191

Tablo 4.38: Doğal ester sıvı için nem ile değişen delinme gerilimi değerleri.....	192
Tablo 4.39: Sentetik ester sıvı için nem ile değişen delinme gerilimi değerleri	194



SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
kVA	: Kilo Volt Amper
mm	: milimetre
Hz	: Hertz
kHz	: kilo Hertz
kΩ	: kilo Ohm
MΩ	: Mega Ohm
K	: Kurtosis
x_i	: Sinyal örneği
x'	: Sinyal ortalaması
n	: Sinyal toplam örneklem sayısı
s	: Sinyal standart sapması
W_{sat}	: Nem doygunluğu
W_{reel}	: Bağlı nem
W_{abs}	: Su içeriği
mm^2/s	: Centistoke
cm^3	: Santimetreküp
g	: gram
kg	: kilogram
V	: Volt
kV	: kilo Volt

Kısaltmalar	Açıklama
ppm	: parts per million
FTIR	: Fourier-transform infrared spectroscopy
AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
GND	: Ground
Bw	: Bant genişliği

kmaks.	: K maksimum (Maksimum Mod Sayısı)
fc	: Frequency (Merkez Frekansı)
Wc	: Window Size (Pencere büyüklüğü)
SK	: Spektral Kurtosis (Spektral Basıklık)
FK	: Fast Kurtogram (Hızlı Kurtogram)
STFT	: Shot Time Fourier Transform
FTIR	: Fourier Transform Infrared Spectrophotometer
Cigre	: International Council on Large Electric Systems
RH	: Relative Humidity



ÖZET

DOKTORA TEZİ

SICAKLIK ve NEM ETKİSİ ALTINDA DİELEKTRİK SIVILARIN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Alper AYDOĞAN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Doktora Programı

Danışman : Doç. Dr. Aysel ERSOY

II. Danışman : Dr. Fatih ATALAR

Elektriğin iletim ve dağıtımında transformatörler en kritik görevlerden birini almaktadır. Yağlı tip transformatörler şebeke içinde elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımında %80-85 civarında kullanım ile büyük bir paya sahip olmaktadır. Bununla beraber transformatörlerin içinde kullanılan yağın önemi daha da artmaktadır. Trafoların korunması ve de uzun ömürlü olarak çalışmasında trafo yağlarına büyük iş düşmektedir. Trafo yağının yapısını çevresel etkenler bozmakta ve trafonun çalışmasını negatif yönde etkilemektedir. Bununla beraber trafonun ömrünü de kısaltmaktadır. Delinme gerilimi trafo yağının dielektrik dayanımının aşılması ile meydana gelir. Yağa ait izolasyonun bozulduğu noktada delinme gerilimi meydana gelmektedir. Delinme gerilimine etki eden çevresel faktörlerden ikisi sıcaklık ve nemdir. Bu faktörlerden ilki olan sıcaklık bir izolasyon yapı olan trafo yağlarının dielektrik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Yağın içinde bulunan hava kabarcıkları yüksek sıcaklık ile genişlemektedir. Bu hava kabarcıklarının hacminin değişmesine neden olarak delinme gerilimini de negatif yönde etkilemektedir.

Bir diğ er çevresel faktör olan nem, trafo yağlarının dielektrik özelliğini azaltan ve dielektrik özelliğini kaybetmesine neden olan bir parametredir. Bu nedenle delinme gerilimine etkisi de büyük olmaktadır.

Bu çalışmada çevresel faktörler olarak nem ve sıcaklığın trafo yağlarındaki delinme gerilimine olan etkisi ile trafo yağının verdiğı karakteristik cevaplar incelenmiştir. Bunun için ilk önce 3 adet trafo yalıtkan sıvısı seçilmiştir. Bu yalıtkan sıvılar trafolarda en çok kullanılan yağlardan olan mineral yağ, sentetik ester sıvı ve doğ al ester sıvılardır. Daha sonra trafo yağı içinde delinme geriliminin ger ekleştirileceğı bir iğne düzlem yatay elektrot tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarım ile sıcaklık ve nem için deneylerin yapılacağı bir deney seti oluşturulmuştur. Sıcaklık deneyleri 20  C ile 60  C arasında gerçekleştirilmiştir. Nem deneyleri ise %40 ile %95 nem seviyelerinde yapılmıştır. Sıcaklık deneyleri her 5  C de tekrarlanmıştır. Nem deneylerinde ise her %5 nem seviyesinde deneyler tekrar edilmiştir. Elektrotlar arası açıklık her deney için 1 mm' den 5mm' ye 1 mm artırılarak 5 farklı açıklık için her sıvı dielektrik için tekrar edilmiştir. Deneyler sonucunda her sıvı dielektrik için delinme gerilimi verileri elde edilmiştir.

Delinme gerilimi verilerinin doğ ru bir şekilde yorumlanabilmesi amacıyla çeşitli yöntemler değ rlendirilmiştir. Bu inceleme sürecinde kurtogram yöntemi tercih edilmiş ve elde edilen veriler, her deney için kurtogram yöntemiyle analiz edilmiştir. Kurtogram yönteminin sonuçları, sıcaklık ve nemin yağlar üzerindeki delinme gerilimlerine verdikleri tepkilerin karşılaştırılmasıyla incelenmiştir. Bu analiz ile yalıtkan sıvıların kendi aralarındaki gösterdikleri üstünlük ve farkların belirlenmesine olanak sağlamıştır. |

Temmuz 2024 , |243| sayfa.

Anahtar kelimeler: Dielektrik sıvı, iğne-düzlem elektrot, delinme gerilimi, sıcaklık, nem, Kurtogram yöntemi |

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

INVESTIGATION OF TEMPERATURE AND HUMIDITY EFFECT ON DIELECTRIC LIQUIDS BEHAVIOR

Alper AYDOĞAN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronics Engineering

Electrical and Electronics Engineering, PhD Program

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Aysel ERSOY

Co-Supervisor: Dr. Fatih ATALAR

Transformers play one of the most critical roles in the transmission and distribution of electricity. Oil-immersed transformers have a large share in the transmission and distribution of electrical energy in the network, with around 80-85% utilization. However, the importance of the oil used in transformers is even greater. Transformer oils play an important role in the protection and long-term operation of transformers. Environmental factors deteriorate the structure of transformer oil and adversely affect the operation of the transformer. It also shortens the life of the transformer. Breakdown voltage occurs when the dielectric strength of the transformer oil is exceeded. Puncture voltage occurs at the point where the insulation of the oil deteriorates. Two of the environmental factors that affect breakdown voltage are temperature and humidity. The first of these factors, temperature, adversely affects the dielectric properties of transformer oils, which is an insulating structure. Air bubbles in oil expand at high temperatures. This changes the volume of the air bubbles and negatively affects the breakdown voltage.

Moisture, another environmental factor, is a parameter that reduces the dielectric properties of transformer oils and causes them to lose their dielectric properties. Therefore, its effect on the breakdown stress is also large.

In this study, the effect of humidity and temperature as environmental factors on the puncture stress in transformer oils and the characteristic responses of transformer oils were investigated. For this purpose, 3 transformer insulating liquids were initially selected. These insulating liquids are mineral oil, synthetic ester liquid and natural ester liquid, which are the most commonly used oils in transformers. Then, a needle plane horizontal electrode design was made in which the puncture voltage is realized in the transformer oil. The design was used to create an experimental set for temperature and humidity experiments. Temperature experiments were carried out between 20°C and 60°C. Humidity experiments were carried out between 40% and 95% humidity. Temperature experiments were repeated every 5°C. Humidity experiments were repeated at each 5% humidity level. The distance between the electrodes was increased by 1 mm from 1 mm to 5 mm for each experiment and repeated for each liquid dielectric for 5 different distances. As a result of the experiments, puncture voltage data were obtained for each liquid dielectric.

In order to correctly interpret the puncture stress data, various methods were evaluated. The kurtogram method was preferred in this investigation and the data obtained for each experiment was analyzed using the kurtogram method. The results of the kurtogram method were analyzed by comparing the responses of temperature and humidity to the puncture stresses on oils. This analysis allowed the superiority and differences between the insulating liquids to be determined.

July 2024, 243 pages.

Keywords: Dielectric liquid, needle-plane electrode, temperature, humidity, kurtogram method

1. GİRİŞ

Günümüzde elektrik enerjisinin üretilmesi kadar iletim ve dağıtımı da hayati bir önem kazanmıştır. Elektrik iletimi ve dağıtımında baş aktörlerden biri de transformatörlerdir. Transformatörler elektrik enerjisinin nicelik değerlerinin istenilen değere dönüştürmek için kullanılan cihazlardır. Hareketli bir parçası bulunmayan bir elektrik makinesi olarak adlandırılan trafolar, çekirdek (nüve), kazan, kapak, sargı, terminal, buşing, kademe değiştirici, kablo kutuları ve diğer aksesuarları ile kompakt bir yapıda bulunmaktadır. Trafolarda verimlilik, işletmelerdeki maliyetlerin ve enerji tüketiminin belirlenmesi açısından çok önemli bir etkidir. Transformatör tipleri incelendiğinde yağlı tip transformatörlerin daha yüksek verimlilik ve daha düşük kayıplar ile çalıştığı gözlenmektedir. Bu durumun neticesinde yaygın olarak kullanılan yağlı trafolarda baş aktör olarak kullanılan trafo yağlarının önemi her geçen gün artmaktadır.

Bu tip trafolarda kullanılan transformatör yağı, yüksek düzeyde elektriksel yalıtım özelliklerine sahip bir yağ türü olarak tanımlanabilmektedir. Trafo yağları yüksek sıcaklıklara çıkan elektrik güç transformatörlerinde ark oluşumunun önlenmesinde ve ısı transferinin yapılarak sıcaklığın düşürülmesinde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca diğer bir özellik olarak yalıtım özelliklerine sahip olduğu için, transformatörün sargılarını ve çekirdeğini koruma görevi de görmektedir.

Trafo yağlarının sağlıklı çalışması, trafolar için elzem teşkil ederken trafonun çalışmasını bozabilecek dış etkilerin araştırılması da gün geçtikçe önem arz etmektedir. Trafo yağlarının çalışma performanslarını etkileyen çevresel faktörlerden olan sıcaklığın yükselmesi trafo yağının kimyasal yapısını bozabildiği gibi bu yapının bozulması ile yağın viskozitesini de değiştirebilmektedir. Viskozitesi değişen yağ ise trafonun soğutulmasında etkili bir şekilde çalışamaz ve trafonun ömrünün kısılmasına neden olur. Çevresel etkiler sonucu diğer bir parametre olan nemin trafo dielektrik sıvısına nüfuz etmesi nedeniyle yağın asit değeri artar ve bunun sonucunda da oksidasyon süreci hızlanabilir. Bunun sonucu olarak da yağın yalıtım özellikleri azalır.

Diğer çevresel parametreler incelendiğinde bunlardan biri olan oksijen ise yağın hava ve oksijen ile temasının kimyasal stabilitesini bozduğunu ve oksidasyonunu arttırdığı görülmektedir. Aynı

zamanda yağın içine toz, kir, metal parçacıkları gibi yabancı maddelerin karışması neticesinde de yağın yalıtım özellikleri azaltmakta ve bununla beraber mekanik aşınmaya neden olabilmektedir. Bu süreçte asit, tuz ve diğer kimyasallar da yağa karışabilmektedir. Ancak bunlar sıcaklık ve nem etkisi kadar yüksek olasılıkla görülmemekle birlikte çok uzun süreler periyodik bakımlarının aksatılması sonucu da ortaya çıkabilmektedir.

Delinme geriliminin çevresel faktörlerle değişimi hem trafo yağının bozulma hızını değiştirmekte hem de trafoların arızalanma zamanlarının tahminini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle çevresel faktörlerin delinme gerilimine olan davranışının incelenmesi trafoların arıza zamanlarını tahminine olan yaklaşımları önemli kılmaktadır. Yağın çevreye bağlı sıcaklığının artması ve ortamın neminin yağın delinme gerilimine ne gibi etkilerinin olduğunun araştırılması ve incelenmesi yağın dielektrik davranış karakteristiğini incelemede çok önemlidir.

Yapılan bu tez çalışmasında çevresel şartlardan nem ve sıcaklığın 3 tip transformatör dielektrik sıvısı üzerindeki delinme geriliminin karakteristiğine olan etkileri incelenmiştir. Yalıtkan sıvı olarak transformatörlerde yaygın olarak kullanılan yağlar mineral yağ, sentetik ester ve doğal ester sıvı deneysel olarak farklı sıcaklık ve nem koşulları altında test edilmişlerdir. Trafo yağının delinme gerilimine çevresel parametrelerin etkilerini daha iyi inceleyebilmek için düzgün olmayan elektrik alan düzeneği, iğne-düzlem elektrot konfigürasyonu ile sağlanmıştır. Delinme gerilimi deneyleri için seçilen iğne-düzlem elektrot tipi diğer elektrot tiplerine göre daha küçük bir yüzeye sahip olduğu için elektrik alanı yoğunlaştırabilmekte, keskin uçlar sayesinde elektrik alanın odaklanmasına yardımcı olmaktadır. Bununla beraber delinme noktası daha belirgin halde görülmektedir. Bu çalışmada ilk olarak sıcaklık çevresel parametre olarak seçilmiş ve yağın sıcaklığa karşı delinme davranışının incelemek amacı ile deneyler yapılmıştır. Yağların sıcaklıkları arttırılarak ilgili sıcaklıklarda delinme gerilimi uygulanmıştır. Benzer şekilde ortam neminin etkisinin delinme gerilimi üzerindeki etkilerini ölçmek için elektrotları da içine alan bir nem odası tasarlanmış ve ortam nemi bu nem odasında sabit aralıklarda tutulup arttırılarak delinme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda ilgili akım değerinin ölçülmesi için gerilim trafosunun ilk sargısına direnç bağlanmış ve direnç üzerinden geçen akım sinyalleri ölçülerek kaydedilmiştir. Bu akım sinyalleri kaydedilerek hızlı (fast) kurtogram yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. İlgili analizin sonuçları yardımı ile sıcaklık ve nem oranının, delinmeyi de kapsayan 400 milisaniye (ms)' lik durumu 3 farklı dielektrik sıvı tipi için analiz edilerek çevresel faktörlerin delinme gerilimine davranışının etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneyler ve çıktı alınan verilerin belirlenen analiz işlenmesinden sonra çıkan sonuçlarla ilgili

yalıtkan sıvıların delinme gerilimlerini birbirinden farklı kılan özellikleri hızlı (fast) kurtogram analizi ile ortaya konulmuştur.

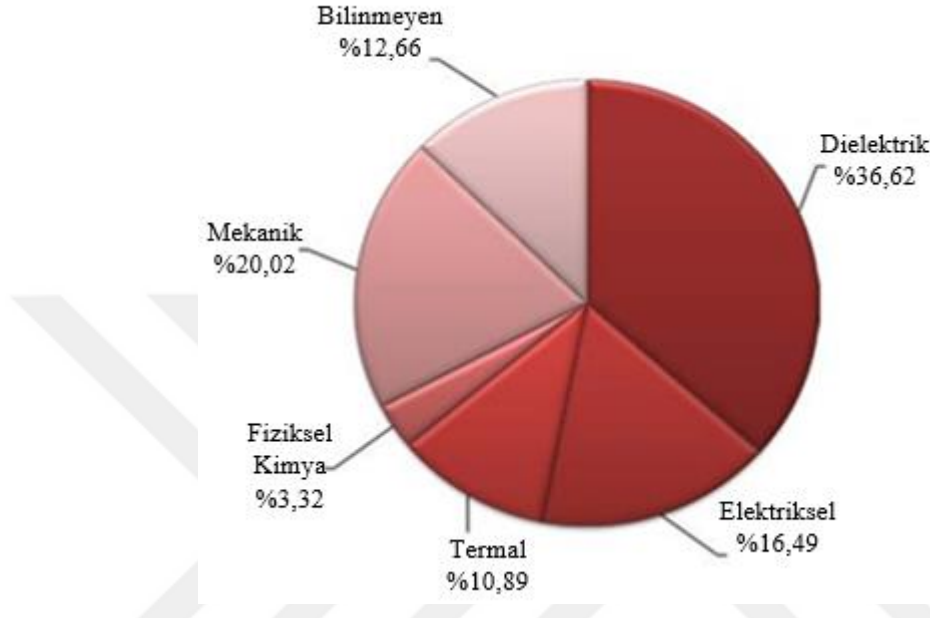


2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Transformatörler gerilim seviyelerini dönüştürmek ve güç akışını sürdürebilmek için enerji dağıtım sistemindeki neredeyse her yerde kullanılan önemli ekipmanlardan biridir. Transformatörler, ihtiyaçlara bağlı olarak gerilim seviyelerini düşürür veya yükseltir. Kritik görev yapan trafoların düzenli bakım ve önlemlerle işletme ömürleri boyunca doğru ve hatasız çalışması istenmektedir. Bu da son kullanıcıya elektrik enerjisinin sorunsuz ulaştırılması açısından önemlidir. Ancak, her elektrik makinası gibi trafolarda da çeşitli arızalar meydana gelmektedir. Uluslararası Büyük Elektrik Sistemleri Konseyi' nin (Cigre- International Council on Large Electric Systems) trafo arızalarının oluşum nedenlerinin verildiği istatistik verilerine ait Şekil 2.1' de verilen grafikte 964 büyük güçlü transformatöre ait arızaları içermektedir. Buna göre trafo arızalarının en yaygın nedeninin yalıtım arızası olduğu görülmektedir [1]. Sıcaklık ve nemin ise bütün arızalarda etkisi olduğunu söylemek mümkündür.

Güç transformatörlerinin işletme ömrü boyunca çalışma performansları bünyesinde bulunan yalıtım malzemelerinin, elektriksel ve mekanik stresler altında yalıtım performanslarını ne ölçüde kaybettikleriyle ilişkilidir [2]. Transformatörün genel yapısı incelendiğinde manyetik çekirdek üzerinde bulunan birincil ve ikincil sargılar, katı ve sıvı yalıtımlar malzemeleri ile kaplanmıştır. Sıvı ve katı yalıtım malzemeleri bu sargıları dış etkenlere karşı izole ederken aynı zamanda artan ısıyı düşürerek soğutma işlevi de görmektedir, Ab Ghani ve arkadaşları ise trafo yağına damıtılmış su ekleyerek 1ml' lik artışlar ile 1 ml' den 5 ml' ye kadar arttırarak nem içeriğinin trafo yağındaki delinme gerilimi ve dielektrik dayanımına etkisini incelemişlerdir. Trafo yağı sıcaklığını 40 °C' den 120 °C' ye 20 °C' lik artışlarla arttırarak sıcaklığın etkisini de araştırmışlardır. Aynı zamanda FTIR spektrumlarını kullanarak trafo yağlarının kimyasal bileşenlerinin nem ve sıcaklığın varlığından etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Bu sonuçlardan hareketle nem ve sıcaklığın trafo yağlarının dielektrik dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucu çıkarılabilmektedir [3]. Katı yalıtım malzemelerine örnek olarak gösterilen pressboardlar, selülozik bir malzeme olan ağartılmamış yumuşak ağaç hamuru ve ahşaptan oluşmaktadır [4]. Geniş bir kullanım alanı olan katı yalıtım malzemelerinden bir diğeri ise Kraft kağıttır. Bu kâğıt türü ise sülfat işlemine tutulmuş ağartılmamış yumuşak ağaç hamurundan yapılmaktadır. Güç trafolarında katı ve sıvı dielektrik malzemeler bir arada kullanıldığında her

iki malzemenin de delinme dayanımı artmaktadır [5]. Sıvı yalıtkan içerisinde girebilecek çok küçük parçacıklar pressboard tarafından hapsedilerek trafo yağının saflığını bir miktar korumasını sağlar. Ayrıca katı-sıvı yalıtım modeli katmanlı bir yapı sağlayarak genel dielektrik dayanımı arttırmaktadır.



Şekil 2.1: Cigre katılımcılarına göre 964 büyük arızaya dayalı trafo arızalarının nedenleri [1]

Trafo yağları yanıcı olmamasının yanı sıra sistemde meydana gelecek düşük ve yüksek enerjili elektriksel arkları ya da boşalmaları önleyerek iyi bir yalıtım ortamı sağlamaktadır. İyi bir sıvı dielektrik malzemenin fiziksel, kimyasal ve elektriksel parametrelerinin en iyi dayanımı sağlayacak şekilde olması gerekmektedir. Trafo yağları seçilirken bu parametreler dikkate alınarak kullanım alanı ve amacına göre ilgili parametreler incelenmelidir [6].

Sıvı dielektriklerin birim hacim başına bir elektrik kapasitansı bulunmaktadır. Bu elektrik kapasitansı sıvı dielektriğin çalışma sıcaklığına, onu oluşturan moleküllerin yapısına bağlı olan dielektrik sabiti tarafından belirlenmektedir. Transformatörler, devre kesiciler ve buna benzer elektrik iletim ve dağıtımında önemli olan ekipmanlarda sıvı yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır.

Transformatör yağlarının eldesi için kullanılan hidrokarbonların bir kısmının üretilmesi ham petrolün damıtılması ile yapılmaktadır. Toplanan fraksiyonun kaynama aralığı ile rafinasyon derecesi, işlemden önce tanımlanmıştır. Bu sebeple ortaya çıkarılan ürünler transformatör uygulamaları için uygun özelliklere sahip olmaktadır. Ham petrolden transformatör yağları

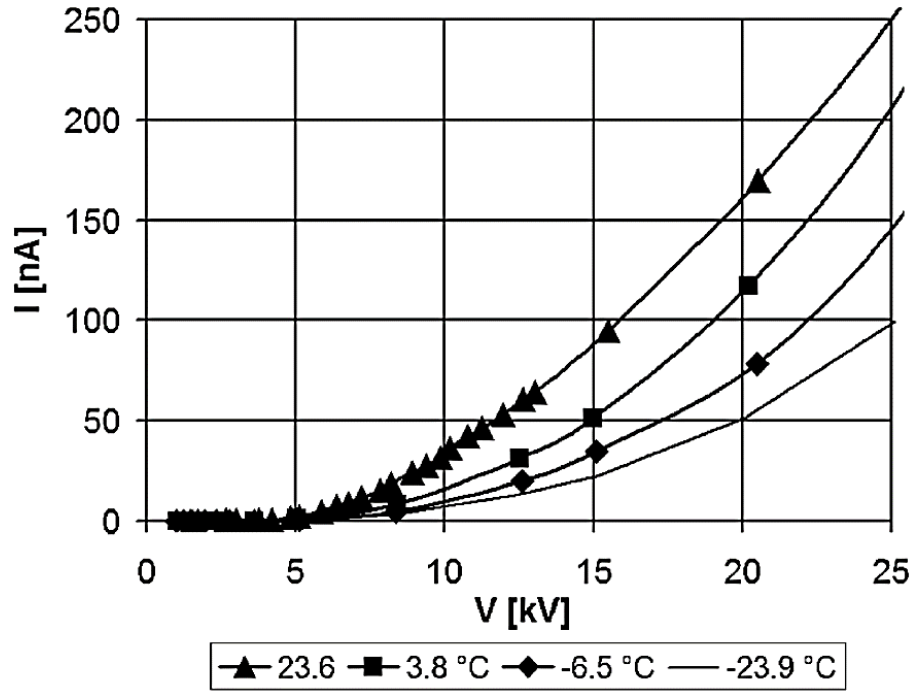
üretmek için birçok uluslararası rafineri şirketi çalışmaktadır. Transformatör yağlarının elektriksel özellikleri ile beraber fiziksel ve kimyasal özellikleri de bulunmaktadır. Bu özellikler belirlenirken trafo yağlarına ait standartlara uygun olması beklenmektedir [7,8].

Trafo yağlarında bulunan her özellik, trafo yağlarını üreten üreticiler ile ham petrol rafineleri arasında kararlaştırılan standartların spesifikasyonları ile karşılaştırılmaktadır. Bir transformatörde bulunan trafo yağının miktarı, transformatörün yükleme kapasitesi ve fiziksel boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Örnek verilirse 100 kVA'lık bir nominal dağıtım transformatöründe yaklaşık olarak 140 litre yağ içermesi gerekmektedir. Transformatör yağlarının viskozite parametresi de doğal konveksiyonla ısı transferi için önemli bir özelliktir ve tasarım hesaplamalarında kullanılan temel parametrelerden biridir. Trafo yağının viskozitesinin düşmesi ile akışkanlığı artacak ve buna bağlı olarak ısının dağıtılması ve uzaklaştırılması daha kolay halde gerçekleşecektir. Bu nedenle trafo yağının viskozitesi trafonun soğutulması aşamasında hayati önem taşıyan etkenlerden biridir. Transformatörler çalışırken içinde bulunan trafo yağının termal, elektriksel ve çevresel streslere maruz kaldığı bilinmektedir. Yalıtım yağı ile trafo sargıları arasında bulunan etkileşimler, yüksek çalışma sıcaklıklarına çıkıldığında kimyasal reaksiyonları hızlandıracak ve trafo yağının saflığını bozacak kirlenme ve değişmeye yol açabilmektedir [9].

Trafo yağları gibi yalıtkan sıvılar, yüksek gerilim ve darbeli güç sistemleri için kritik bileşenlerdir. Trafo yağlarında iletim ve delinme mekanizmaları bulunmaktadır. 50 yılı aşkın bir süredir, bu yalıtkan sıvıların delinmesinin gelişimi ile ilgili mekanizmalar üzerine yapılan çalışmalar, daha derin bir anlayışa yol açarken, ilk delinme sürecini açıklayan kesin bir modele hala ulaşamamaktadır. Sıvı dielektrik alanındaki araştırmaların miktarı son 10-15 yılda artmıştır. Kompakt darbeli güç sistemlerine duyulan istek, araştırmaları, yaklaşık bir asır önce gazlar için modelin tanıtımına benzer şekilde, sıvı delinmelerinin temel süreçlerini tanımlayabilen bir model geliştirmeye yönlendirmektedir.

Bu mekanizmalar da sıcaklığın yanında basınç tarafını da inceleyen Butcher ve arkadaşları trafo yağındaki iletim ve delinme mekanizmaları, uygulanan basınç ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelemişlerdir. Sıcaklık üzerine yapılan incelemelerde trafo yağlarında sıcaklığın azalmasının yağın viskozitesini güçlü bir şekilde etkilediğini görmüşlerdir. Trafo yağının akış hızı uygulanan alanla orantılıdır. Yağın sıcaklığının düşürülmesi ve viskozitesinin oda sıcaklığı değerine göre arttırılması sonucu yağın maksimum hızını 100 kat azaltabilmektedir. Yağın

soğutulması ve viskozitesinin oda sıcaklığı değerine göre artırılması, yağın maksimum hızını yüz kat azaltır. En düşük sıcaklık olan 240 Kelvin (-33.15 °C) sıcaklıkta yağ neredeyse katıdır. Univolt™ N 61B yağ kullanılarak yapılan testlerde iğne-düzlem elektrot düzeninde 10 mm elektrot açıklığında farklı sıcaklıklardaki akım gerilim değişimlerinin gösterildiği grafik şekil 2.2' de verilmektedir [10].



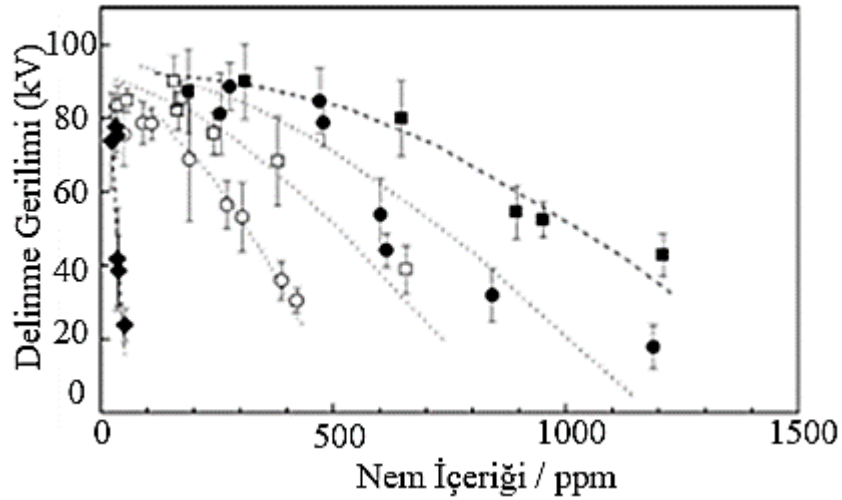
Şekil 2.2: Değişen sıcaklık değerleri için 10 mm elektrot açıklığında akım gerilim değerleri grafiği [10].

Ghani ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada yağ numunelerine eklenen distile su miktarı 1 ml' lik artışlarla 1 ml' den 5 ml' ye değiştirilerek nem içeriğinin etkileri araştırılmıştır. Yeni madeni yağ numunesi için ortalama delinme geriliminin yüksek olduğu ve 60 kV değerinde olduğu ölçülmüştür. Bu da yağın iyi trafo yağı gereksinimini karşıladığını gösterir. Ancak ortalama delinme gerilimi, 1 ml distile su ilavesiyle önemli ölçüde düşerek 18 kV ölçülmüş olup, madeni yağ örneğine 2 ml su ilave edildiğinde değer 14 kV' a kadar düşmüştür. Ancak 3 ve 4 ml distile su içeren mineral yağ numuneleri için ortalama delinme geriliminin 10 kV değerinde olduğu Tablo 2.1' de görülmektedir [11].

Tablo 2.1: Çeşitli nem içeriğine sahip mineral ve hurma yağ asidi ester yağları numunelerinin ortalama delinme gerilimi [11].

Nem (ml)	Mineral Yağ Delinme Gerilimi (kV)	PFAE Yağ Delinme Gerilimi (kV)
0	60	60
1	18	14
2	14	12
3	10	11
4	10	12
5	8	13

Bununla beraber Kasahara ve arkadaşlarının yaptığı deneylerde ester yağ asidi esterlerinin dielektrik bozulmaya karşı mineral yağa göre daha yüksek nem oranına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Yağ asidi esterlerinin, elektriksel bozulmaya karşı daha yüksek dirence sahip olduklarını raporlamışlardır [12].



Şekil 2.3: Mineral yağdaki (dolgu elmaslar şekli) ve oda sıcaklığındaki (25 °C) çeşitli yağ asidi esterlerindeki nem içeriğine karşı 2.5 mm elektrot açıklığında delinme gerilimi: C8-Me (dolgu kareler), C12-Me (dolgu daireler) C8-2EH (içi boş kareler) ve C12-2EH (içi boş daireler) [12].

Suleiman ve arkadaşları ise yalıtım yağı olarak kullanılan palm yağlarında nemin delinme gerilimine etkisi üzerine ampirik bir ilişki geliştirmiş ve fizikokimyasal yapısının nasıl etkilendiğini gözlemleyerek madeni yağlar ile karşılaştırmışlardır. Yağın moleküler yapısındaki kimyasal bağların yoğunluğunun, emdiği suya bağlı olarak zayıfladığı görülmüş olup nemin değiştikçe yağın davranışının daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamak için nem

artışının viskozite, parlama noktası ve akma noktası gibi yağların diğer fiziksel özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi gerektiği öngörülmüştür [13].

Transformatör yağlarının delinme gerilimlerine olan tepkileri incelendiğinde yağların türüne göre değişiklik gösterdikleri gözlenmektedir. Bununla beraber çevresel şartlar değiştiğinde yağların delinme gerilimine olan tepkileri de anlık ve hızlı bir biçimde değişmektedir. Bu değişimler yağın delinme gerilimine olan dayanımını da negatif yönde etkilemekte, lineer ve non-lineer olarak değiştirmektedir. Yine de standart testler baz alındığında bütün transformatör yağlarının AC dayanma gerilimi, anahtarlama darbesi ve yıldırım darbesi standartlarını karşılaması gerekmektedir. Birçok tedarikçiden alınan gerek çevre dostu bitkisel yağlar olsun gerek ise madeni yağlar olsun, transformatörlerde kullanılan ilgili yağların arıza gerilimi ve deşarj özellikleri için araştırmacılar tarafından birçok test yapılmıştır [14].

Her türlü trafo yağı için, delinme gerilimi, yağın öngörülen koşulda bir elektrik alana maruz kalması durumunda, yağa batırılmış iki elektrot arasında bozulmanın meydana geldiği değer olarak kabul edilir. Delinme geriliminin herhangi bir küçük değeri, yağ bozunma ürünleri, su ve selüloz yalıtım arıza ürünleri gibi kirleticilerin varlığı anlamına gelir. Tüm bu kirleticiler, serbest iyonların ve iyon oluşturan parçacıkların içeriğinin artmasına neden olur [15]. Delinme gerilimi, yağın sağlığının birincil göstergesi olduğundan ve sahada kolaylıkla uygulanabildiğinden, transformatör yağının çok önemli ve popüler bir testi olarak görülmektedir.

AC delinme gerilimi, partiküller, aşırı nem ve hava veya gaz kabarcıkları gibi bir transformatör sıvısında bulunan yabancı maddelere karşı son derece hassastır. Sonuç olarak, bir yalıtım sıvısı çoğunlukla yağ özelliklerinden ziyade esas olarak iki biçimde bulunabilir; sıvılarda serbest su veya çözünmüş su, polar sıvılar, su molekülleri ile hidrojen bağları oluşturma eğilimindedir [16].

Dielektrik sıvılarda asidite oranları trafoların kullanıldığı yıl ile doğru orantı göstermektedir. Aynı zamanda bu ara yüzey geriliminin ölçümü ile de ilişkilidir [17]. Ayrıca ara yüzey geriliminin ölçümü pahalı bir işlemdir bu nedenle yağdaki delinmeye bağlı olarak oluşan ara yüzey gerilimlerinin de ölçülmesi yağın durumunun incelenmesi açısından önem arz etmektedir. Çevresel parametrelerin incelenmesinde diğer bir hassas konu ise bu parametrelerin yağın yaşlanmasında oluşan durumlara direk etki etmesidir. Örnek verilecek olursa yağdaki sıcaklık artışı trafo için yük farkına bağlı olarak oluşabilir ve en sıcak nokta sıcaklığı ile uzun

sürekli çalışmaya bağlı yağ ömrü arasında direk ilişkiler araştırılmış ve yağın yaşlandırılmasında ortaya çıkan kimyasal, mekanik ve elektriksel özellikler incelenmiştir [18].

Çevresel parametreler birbirleri üzerinde de etkiler oluşturmaktadır. Buna en iyi örneklerden biri ise Abeysundara ve arkadaşlarının transformatör yağına alternatif olarak Hindistan cevizi yağı üzerine yapmış olduğu çalışmadır. Çalışmada yapılan testlerde Hindistan cevizi serbest yağ asitleri içerdiğini ve bunun da Hindistan cevizi yağının aşındırıcı yaptığını görmüşlerdir. Serbest yağ asitlerinin atmosferdeki bakteriler ile oksidasyon ve reaksiyonun birleşik bir sonucu olduğu görülmüştür. Bu nedenle saflaştırma yapılması gereği doğmuştur. Saflaştırmadan önceki Hindistan cevizi yağındaki serbest yağ asidi içeriğinin yaklaşık %5 olduğu tespit edilmiştir. NaOH (Sodyum hidroksit) eklenerek serbest yağ asitleri nötralize edilmiş, test yapılan örneğin serbest yağ asitlerinin yüzdesi %0,01~0,04' e düşmesi sağlanmıştır. Hindistan cevizi yağının aslında düşük bir kaynama noktasına sahip bileşikler içerdiği ve bu düşük kaynama noktasına sahip bileşiklerin dahil edilmesi ile sıcaklığın 60 °C' nin üzerine çıktığı çalışma sırasında bir basınç oluşturduğu görülmüştür [19]. Bu durumda basınç değerinin sıcaklığa bağlı olarak başka bir çevresel parametre olarak da değerlendirilmesi de önem kazanmaktadır.

Ayrıca Tim Cargol' un belirttiği gibi "Deneyimler göstermiştir ki, çoğu dahili trafo durumu problemi yağ analizi ile tespit edilebilmektedir [20]". Yağ kalitesini korumak için, yağ periyodik olarak test edilir ve her testin sonuçları belirtilen karşılık gelen değerlerle karşılaştırılır [21-23].

Yağ kalitesinin sürekli izlenmesi (çevrimdışı veya çevrimiçi), bir transformatörün genel durumu hakkında, ne kadar iyi yönetildiği ve büyük bir servis veya servis gerektirmeden önce ne kadar süre çalışması beklenebileceği gibi bilgiler sağlayan değerli bir teşhis yöntemidir. Belki de en önemlisi, bu sürekli izleme, ciddi arızaları önceden tahmin etmek için kullanılabilir ve bunlar oluşmadan önce önleyici tedbirlerin alınmasını sağlar. Çevresel faktörlerden olan sıcaklık ve yağ içindeki nem oranının transformatör yağlarının delinme gerilimi üzerine etkisinin incelenmesi gün geçtikçe daha büyük önem kazanmaktadır. Delinme gerilimin çevresel faktörlerle değişimi hem trafo yağının bozulma hızını değiştirmekte hem de trafoların arızalanma zamanlarının tahminini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle çevresel faktörler incelenirken bu değerlerin bir delinme geriliminin üzerinde etkisi olduğu kadar birbirleri üzerinde de etkisinin olacağı göz ardı edilmemelidir.

Bilindiği gibi trafo yağının oksidasyona uğramaması ve stabil durumda kalması, trafo yağının ve de trafo sağlığının en önemli bileşenlerinden biridir. Trafo yağının oksidasyondan etkilenmesinin temel parametrelerden biri sıcaklık parametresidir. Bir diğer parametre olan oksijen ile birlikte trafo yağında metallerin varlığı katalizör olarak çalışıp oksidasyon reaksiyonunu hızlandırmaktadır. Her türlü trafo yağında az miktar bir oksijen olmuş olsa dahi, (mühürlü ve kurutulmuş yeni bir trafoda hacimsel olarak %0.05 ila %0.25 arası oksijen bulunur) bu miktar oksidasyonun başlaması için yeterli olacaktır. Sıcaklığın oksidasyonu hızlandığı bilinmektedir. Yapılan hesaplara göre örnek verilecek olursa 8-10 °C bir sıcaklık artışının oksidasyon hızını iki katına çıkarabileceği söylenebilmektedir. Zira farklı sıcaklıklarda farklı oksidasyon durumları gözlenebilmektedir. Trafo yağında oksidasyon oluşması asit ve çamur oluşumuna neden olabilmektedir. Asit ve çamur oluşumu trafo yapısını bozmakta ve ömrünü kısaltmaktadır. Trafoda bulunan selülozik kâğıt katmanları asit oluşumu ile bozulurken selülozun bir kısmı da polimerizasyon reaksiyonları ile çamura dönüşür. Selülozun ömrü ile trafo ömrü birebir ilişkili bulunmaktadır. Hem yağ akışı hem de yağ-selüloz sisteminin elektrik yalıtım özelliği çamur oluşumu ile olumsuz etkilenmektedir. Bu sebeplerden dolayı trafo daha yüksek çalışma sıcaklıklarına çıkabilir ve yalıtım hatalarından kaynaklı arızalara yol açılabilmektedir [24].

Isınan yağın kendisi polarize olmaktadır. İçerisinde hiçbir yabancı madde bulunmasa dahi sıcaklığı yükselen trafo yağı polarize olduğu için daha düşük seviyelerde delinme gerçekleşmesi durumu yaşanacaktır. Bu durum daha fazla harmonik oluşumunu sağlayacaktır. Çünkü ısınan yağın içinde bulunan yabancı maddelerin küçük alan etkileri oluşturmalarına neden olacaktır. Bu alan etkileri sıcak nokta (hot spot) olarak adlandırılır. Bununla beraber sıcaklığı artan yağ hidroksit bileşeni oluşturmaya meyilli olmaktadır.

Trafo yağlarının içinde kendi yapısından da kaynaklanan su buharı ve nem bulunmaktadır. Trafoların gövdelerinde bulunan elyaf yapı sıcaklık artışı ile bozularak sıcak noktaların uyarılmalarına neden olmaktadır. Nem deneylerini yapılmasındaki motivasyon ise havanın su yüzeyinde oluşturduğu su buharının ne kadar soğurduğunun araştırılmasıdır. Trafo yağının üst kısmında bulunan C-H bağları ortamda bulunan nem oranı arttığında hidrojen oksijen ile bağ yapar. Oksijenin elektronegativitesi yüksektir bu nedenle yanıcıdır. Oksitleyici nitelikte bulunan yağın yanmaması için katkıların koyulması gerekmektedir. Katkılara örnek olarak silikonlar verilebilir. Silikon hidrojenin oksijen ile bağ kurmasının önüne geçerek yanıcılığın önüne geçmeye çalışır. Madeni yağlar (içerisinde son derece az karışım olan yağlar ile) sentetik

ester sıvıları karşılaştırsak, dış ortamda nem bulunduğunda yağın üst kısmı ne kadar O-H bileşiği oluşturduğunun analiz edilmesi oldukça önemlidir. Modelleneyecek olan durum incelendiğinde ise sargılar ile gövde arasındaki davranışın modelinin oluşturulması değil sargılar ve açık hava basıncı ile açık havada bulunan su bileşenlerinin nemin ne kadar etkileştiğinin araştırılması da yeni bir polaritenin incelenmesi açısından önem kazanmaktadır. Bu durum yağın üst kısmında bulunan oksitlenmenin incelenmesine olanak sağlamaktadır.

Trafo yağlarında delinme geriliminin yağın dielektrik performansını belirleyici en temel özelliklerinden biri olduğunu görmekteyiz. Delinme geriliminin ölçüm sebeplerinden biri de yağın elektrik yalıtım kapasitesinin öğrenilmesidir. Delinme geriliminin yüksek çıkması yağın yalıtım özelliğinin iyi olduğunu gösteren parametrelerden biridir. Delinme geriliminin değerini doğrudan etkileyen faktörlerden biri de trafo yağı içindeki su ve parçacık miktarıdır. Bu miktar ne kadar az ise yağın delinme gerilimi sonucu o kadar iyidir [25].

Yüksek gerilim sistemlerinin ana bileşenlerinden oluşan transformatörlerin güvenli bir şekilde çalışması, iletim sisteminin güvenli bir şekilde çalışmasını doğrudan etkilemektedir. Çevresel şartlardan olan sıcaklık ve nemin trafo yağının görevini yapmasını zorlaştırdığı ve trafo yağının yapısını bozduğu bilinmektedir. Jiantao Sun ve arkadaşları ise trafolar için tasarlanan bir yağlı kâğıt yalıtımının daha geniş bir sıcaklık aralığındaki performansının ölçümünü ele almışlardır. (-60 °C - 25 °C) aralığında transformatör yağı ve yağ emdirilmiş bir kâğıdın ana dielektrik parametrelerinin deneysel analiz yolu ile incelemişlerdir. Yapılan deneylerin sonucunda dielektrik parametrelerinin ve çalışma sıcaklığının doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği gözlemlenirken test aralığı sıcaklığında olan -10 °C ile 0 °C derece aralığında nispeten daha zayıf bir yalıtım performansı olduğu tespit edilmiştir. Bununla beraber yalıtım yağı ve yağ emdirilmiş pressboardun dielektrik sabiti sıcaklık azaldıkça monoton bir şekilde azalmaktadır. Bununla beraber -20 °C ile 20 °C aralığında ise trafo yağı ve yağ emdirilmiş pressboardun dielektrik sabitinin büyük değişim oranına sahip olduğu gözlenmiştir [26].

Sıcaklığın trafo yağlarındaki delinme gerilimine olan etkisinin incelenmesinde yapılan çalışmalardan bazıları nano partiküllerin trafo yağlarına eklenmesi ile birkaç sıcaklık değerinde (50 °C -80 °C- 130 °C) değerlendirilmiştir. Delinme gerilimi testleri bu sıcaklık değerlerinde nano partiküller eklenerek yapılmış ve yağdan ziyade nano partiküllerin ne tepki vereceği araştırılmış, bu araştırma sonucunda normalde nano partikül eklenen yağların delinme gerilimi

dayanımını arttırdığını, fakat sıcaklığın artması ile delinme gerilimine karşı dayanımın azaldığı gözlenmiştir [27].

Transformatörlerin ömrü, yalıtım yağının üzerinde bulunan termal gerilimden dolayı yalıtım malzemelerinin bozulmasından önemli ölçüde etkilenmektedir. Nem ile birlikte sıcaklık da yaşlanma sürecini etkileyen ve hızlandıran temel faktörlerden biridir. Sıcaklığın etkisi, hemen hemen hiç tahmin edilemeyen dış çevre koşullarına bağlı olarak açık trafolarla daha belirgin görülmektedir. Sıcaklığın bir diğer etkisi incelendiğinde ise trafolarla yağların nem üzerindeki dielektrik davranışına doğrudan etkisi olduğu görülmektedir. Bir transformatörde çözünmüş halde bulunan suyun trafo yalıtım kâğıdı ile yağ arasında dağılım bulunmakta ve bu dağılımın dengesi de sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklık yükseldiğinde su kâğıttan yağa doğru hareket eder. Bu durumun tersi de olabilmektedir. Bu sebepten sıcaklıktaki küçük bir artış ya da azalış miktarı, kâğıdın ve yağın bağıl su içeriğini de değiştirebilmektedir. [28].

Ortamdaki nem oranının delinme gerilimine etkilerinin incelendiği bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri de mineral yağa alternatif bir transformatör yağı olarak gösterilen Sri Lanka' nın bölgesel yağlarından biri olan Hindistan cevizi yağının delinme gerilimlerinin karşılaştırıldığı bir çalışma olmuştur. Bu çalışmada ortam neminin %78 olduğu durumda yapılan delinme gerilimi testleri sonucunda Hindistan cevizi yağının dielektrik dayanımındaki zamanla azalmanın mineral yağa göre oldukça düşük olduğu bulunmuştur [29]. Yapılan çalışmada sadece bir nem seviyesinin ölçülmesi çalışmanın doğruluğu açısından yeterli olmayabilir. Çünkü ortam nemi seviyesi mevsimsel olarak değişiklik göstermektedir.

Nemin varlığının dielektrik dayanımın üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Sıcaklığın sabit olduğu durumda yağ ile genel olarak sülfat selülozundan oluşan trafo kâğıdının arasında bir nem dengesi bulunmaktadır. Yük koşullarının değişmesi, sıcaklığın değişmesine de neden olmaktadır. Bunun sonucunda da yağ ile trafo panosu denilen selülozik kâğıdın arasında bir nem geçişi meydana gelmektedir. Yağ-selüloz yalıtımı için bu etkileşimler çok önemlidir. Mevcuttaki nem dengesinin bozulması sonucunda örneğin transformatör kâğıdında %2,5' den fazla su içeriğinin bulunması durumunda, yağın elektrik dayanımında önemli bir azalmaya neden olmaktadır [30].

Sıcaklığın stabil olduğu durumda trafo yağı ile kâğıt arasında her zaman bir nem dengesi bulunmaktadır. Yağda ve trafo kâğıdı bağıl nem aynı olduğu için bir nem dengesi sağlanmaktadır. Bağıl nem hesabı eşitlik (1)' deki gibi yapılabilir.

$$W_{reel} = \frac{W_{abs}}{W_{sat}} \quad W_{sat} = f(T) \quad (1)$$

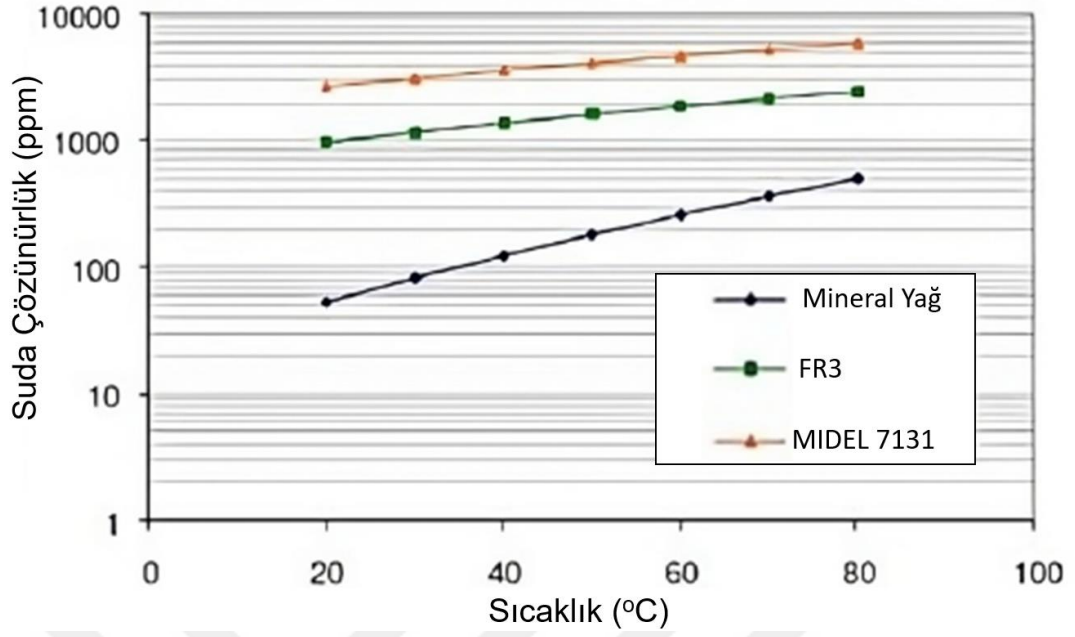
W_{sat} : sıcaklığın bir fonksiyonu olan nemin doygunluğudur.

W_{reel} : bağıl nem

W_{abs} : Su içeriğini göstermektedir.

Trafo yağları içinde bulunan su miktarı ile dielektrik dayanımı ters orantılıdır. Bu durum yalıtım karakteristiği için de aynı ters orantıya sahiptir. Yapılan çalışmalarda en çok kullanılan 3 sıvı dielektrik tipi için farklı sıcaklıklarda yağların su doygunluk oranları incelenmiştir. Bu inceleme Şekil 2.4' de gösterilmektedir. Grafik de görüleceği üzere mineral yağın 20 °C 'de doğal ester ve sentetik ester sıvılardan yaklaşık 20 kat daha fazla su tutabildiği görülmektedir. Bu nedenle mineral yağın su tutma seviyeleri 20 °C ile 80 °C arasında en iyi sonucu vermektedir. Bu duruma ester yağlardaki polar moleküler yapının sebep olduğu bilinmektedir [31].

Martin ve Wang dielektrik sıvıların AC delinme gerilimlerinin istatistiksel analizini incelerken transformatör yağlarındaki nem oranlarının etkilerini baz almışlar ve trafo yağlarının delinme gerilimlerinin parametrik bir dağılım izlediğini varsayarak yağların delinme dayanımı gerilimlerini içeren verilerin dağılımından Weibull ve Gauss yöntemi kullanarak tahmin yöntemine uyumlu olup olmadığını araştırmışlardır. Bunun sonucunda esterlerde gözlenen en düşük delinme geriliminin sadece 1 kV fark ile mineral yağ ile karşılaştırılabildiğini görmüşler ve esterlerin de trafolarla izolasyon yağı olarak güvenilir bir şekilde kullanılabileceği sonucunu çıkarmışlardır [32].



Şekil 2.4: Farklı sıcaklıklarda trafo yağlarının su tutma seviyesi [31].

Yalıtım özelliklerini uygun olarak karşılayabilmesi ve de selüloz kâğıt ile birlikte kullanılabilir olması yanında maliyet olarak karşılaştırıldığında düşük olması sebebiyle mineral yağlar trafo yağları olarak 100 yıldan daha fazladır trafolarla yaygın olarak kullanılmaktadır. Mineral yağın kimyasal yapısı incelendiğinde aromatik ile parafinik ve naftenik hidrokarbonların bir karışımı olduğu görülmektedir. Yanma noktası incelendiğinde ise 160 °C ile trafolarla düşük yanma noktası olmasından dolayı patlama riskini artırmaktadır. Maliyet olarak düşük olsa da kimyasal içeriği biyoloji olarak parçalanmamakla beraber kaza durumların yağın toprağa ve suya karışması ile çevre kirlenmesine neden olmakta ve uzun bir süre etkilemektedir [33]. Mineral yağların aynı zaman maliyetlerinin düşük olmasının yanı sıra yalıtım performanslarının yüksek olmasına rağmen parlama noktaları düşüktür. Bununla beraber düşük tutuşma noktasına sahiptirler. Aynı zamanda doğada biyolojik olarak parçalanabilme özelliği çevrenin korunmasına karşı negatif bir tutum içinde bulunmaktadır. Aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda performansının düşük olmasından dolayı ve çevresel sorunlardan dolayı ester yağlar mineral yağların yerini alacak bir seçenek olarak değerlendirilmektedir [34].

Doğal ester sıvıların ileride mineral yağlara en iyi alternatif olarak yer alması amaçlanmaktadır. Fakat bu amaçlanırken transformatörlerde güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için parametrelerinin, örneğin dielektrik özellikleri hakkında ayrıntılı bir şekilde bilgi sahibi olunması ve performansının mineral yağlar karşısında kendini karşılaştırmalı olarak kanıtlanması gerekmektedir. Hamid ve arkadaşları yaptığı çalışmada 5 farklı doğal ester sıvının

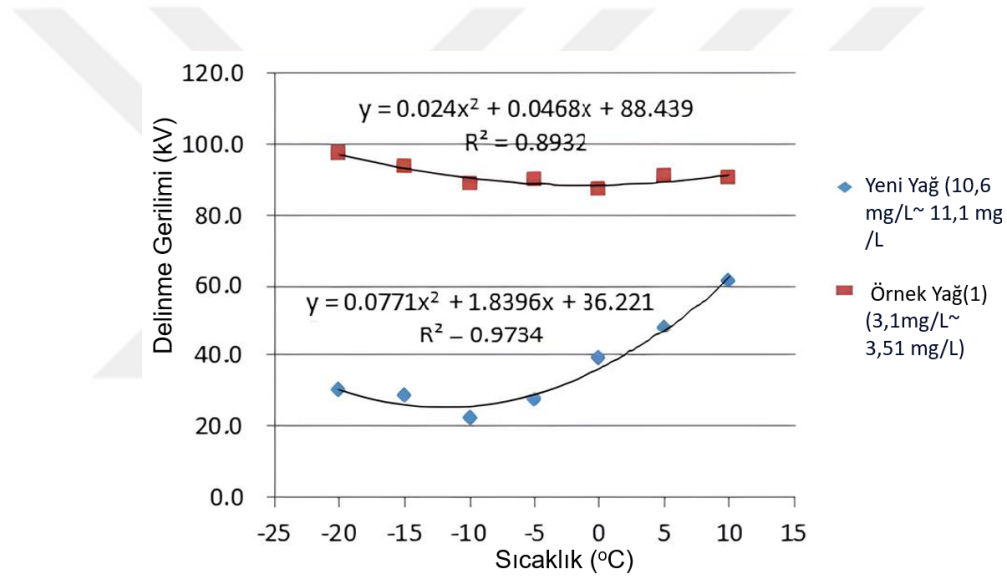
sıcaklığa karşı öz direnci ve dielektrik sabitinin verdiği cevabı incelemişlerdir. Yapılan deneylerde sıcaklığın artması ile doğal ester sıvılarıdaki öz direnç ve dielektrik sabiti azalmıştır. Doğal ester sıvıların delinme gerilimlerini karşılaştırdıkları çalışmada doğrudan alınan trafo yağları ile kurutulup filtrelenmiş yağlar arasındaki delinme gerilimlerinde yaklaşık 2 kat fark olduğunu gözlemlemişlerdir. [35] Bunun nedeni yağ numunelerinin verimliliğini etkileyecek yağı kirleten parçacıkların ve nem içeriğinin bulunması ve bu durumun filtrelenerek ortadan kaldırılmasıdır [36,37]. Sıcaklığın aynı zamanda yağın viskozitesine de etkisi olduğu bilinmektedir. Sıcaklığın artması ile yağın hareketli bölümlerin kinetik enerjisinde de bir artışa neden olmakta ve bununla beraber daha büyük bir rastgele harekete neden olmaktadır. Bunun sonucunda da yağın dipol yönelimi azalır ve bu da daha düşük bir dielektrik sabitinin oluşmasına sebep olur [35].

Naidu ve arkadaşları ise yalıtkan sıvılarda her bir delinme geriliminin yalıtkan yağın kendini iyileştirmesinden dolayı birbirinden bağımsız bir durum olayı olduğunu varsaymaktadır [38]. Fakat delinme gerilimi sonrasında oluşan gaz ve diğer bileşenlerin dağılması ve yağın kendini toparlaması için bir belirli bir süre geçmesi gerekmektedir. [39].

Nem ve sıcaklığın bir yalıtım sisteminin dielektrik özellikleri üzerine etkisini inceleyen Zbojovský ve arkadaşları, Mogul Trafo CZ-A trafo yağı ve Shell Diala S4 ZX-I yağı ile emprenye edilmiş TR ve KREMPEL kâğıt izolasyon numunelerini emprenye edilmemiş numunelerle karşılaştırarak analiz etmişlerdir. Yapılan çalışmada yalıtım kağıdına trafo yağının emprenye edilmesi sonucu delinme gerilimine karşı dayanımının yükseldiği ve 10 kV/mm' lik bir artış meydana geldiği gözlenmiştir. Esas olarak trafolarda sıcaklığın arttığı durumlarda yalıtım kağıdının içinden çevrede bulunan yağa nem transferinin olması muhtemel bulunmaktadır. Bu nedenle yalıtım kağıdının da mümkün olduğu kadar nem içermemesi çok önemlidir. Ayrıca sıcaklığın nem transferinde de etkisi olduğu gözlenmiştir [40].

Trafo yağlarının düşük sıcaklıklarda çalışma şartlarının ve delinme geriliminin incelendiği durumlar için Gao, -20 °C ile 10 °C arasında 5 °C artırarak trafo yağının dielektrik dayanımını istatistiksel olarak analiz etmiştir. Yapılan deneylerde Karamay DB-45 marka mineral trafo yağı kullanılmış ve nem içerikleri değiştirilerek farklı sıcaklıklarda delinme gerilimlerinin değişimi gözlenmiştir. Şekil 2.5' de görüldüğü gibi yeni yağın sıcaklığı 10 °C' den -10 °C' ye düştükçe delinme gerilimi de düşmektedir. Çalışmadaki (1) no' lu örnek yağ numunesi için ise 10 °C den -20 °C' ye kadar delinme geriliminin sıcaklık değişimi ile düştüğü gözlenirken -20

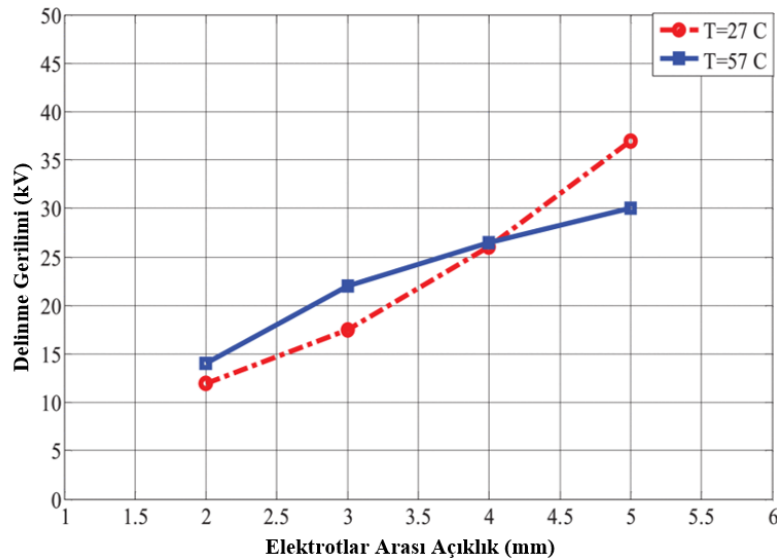
°C sıcaklıkta delinme geriliminin bir miktar yükseldiği tespit edilmiştir. Bu nedenle trafo yağlarının delinme gerilimlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi aynı zaman transformatör yağının içinde bulunan su içeriği ile de yakından ilişkili olmaktadır. Su içeriği ve yabancı madde içeriği az olduğunda ise sıcaklık düştükçe bunun yerine delinme gerilimi artmaktadır. Bu nedenle trafo yağlarında delinme gerilimini etkileyen ana faktörlerden birinin su içeriği olduğuna kanaat getirmiştir. Su içeriğinin yakın olduğu durumda ise yabancı madde içeriğinin delinme geriliminin sıcaklıkla değişimini etkilemektedir. Trafo yağlarında safsızlık durumu ne kadar fazla olursa delinme geriliminin sıcaklık ile değişim dereceleri o kadar belirgin olmaktadır [41].



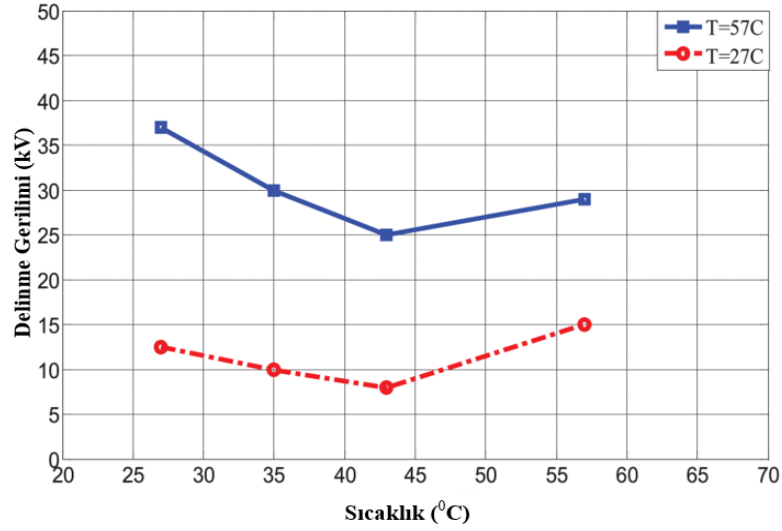
Şekil 2.5: Yeni yağ ve yağ numunesinin delinme gerilimi ile sıcaklığı arasındaki ilişki [41].

Degeratu ise trafo yağlarında termal analiz, Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) kullanılarak ve her bir parametre değerlendirilerek delinme gerilimi ile su içeriğinin değişimi izlemiştir. Yapılan gözlem ve çalışmalarda FTIR test sonuçlarının herhangi bir korona kıvılcımlanma veya da delinme ark oluşumuna dair bir kanıt oluşturmadığını göstermişlerdir. Aynı zamanda yalıtımın aşırı ısınması nedeniyle önemli derecede karbonizasyonu açığa çıkaran bir kusura neden olan bir durum bulunmamıştır. Termal izleme süresi boyunca trafonun çalışması sırasında ilgili sıcaklık aralığında kütle kaybı açısından trafo yağının termal stabilitesini koruduğu gözlenmiştir. FTIR sonuçlarının yağın kimyasal bileşimindeki stabiliteyi vurguladığını da tespit etmişlerdir [42].

Trafo yağlarındaki delinme geriliminin elektrot açıklığına bağlı olup olmadığı ve sıcaklığın delinme gerilimine olan etkisinin araştırılan Mohammed ve arkadaşları yapıları deneysel çalışmanın sonucunda delinme gerilimi ve elektrot açıklığının, sıcaklık farkına bağlı değişimini incelemişlerdir. Trafo yağının termal iletkenliğindeki artış, sıcak noktaların ve sıcaklık gradyanlarının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Bu durumun sonucunda ise elektrik alanının elektrot açıklığı boyunca daha dengeli bir şekilde dağılmasına neden olmaktadır. Böylece termal bozulma riskini azaltmakta ve delinme gerilimini artırmaktadır. Şekil 2.6' da görüldüğü üzere 2 mm ile 4 mm arasındaki elektrot açıklıklarında ısıtılmış olan trafo yağının delinme geriliminin sıcaklığı düşük olan trafo yağının delinme geriliminden daha yüksektir. Elektrotlar arası açıklık arttığında ise delinme geriliminin ısıtılmamış yağa oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Trafo yağının delinme geriliminin sıcaklık artışı altında karakteristik etkisi Şekil 2.7' de açıkça görülmektedir. Gazlarla karşılaştırıldığında bu ilişkinin Paschen yasasına benzer olduğu görülmektedir. Ayrıca iyi ısı dağıtım özelliklerine sahip olan trafo yağları, daha düşük sıcaklıklarda yağın kalmasını sağlamak ve termal bozulma riskini azaltarak delinme gerilimini yükselttiği de gözlenmiştir. Yaptıkları çalışmanın sonucunda düşük sıcaklıklarda delinme geriliminin çok yüksek olduğunu gözlemişlerdir. Fakat sıcaklık artmaya devam ettikçe yağdaki bozulmanın artmaya başladığı görülmüştür. Sabit delinme geriliminin özelliklerine ait detaylı bir çalışma sonucu, yüksek sıcaklıklarda trafo yağının delinme geriliminin çok dengesiz olduğunu ortaya koymuştur [43].



Şekil 2.6: 27 °C sıcaklık ve 57 °C sıcaklıkta transformatör yağı elektrotlar arası açıklık ve delinme gerilimi grafiği [43].



Şekil 2.7: 27-57 °C sıcaklıkta aralığında transformatör yağının delinme gerilimi ve sıcaklık ilişkisi [43].

Okundamiya ve arkadaşları ortam sıcaklığının değişiminin bir trafonun delinme gerilimi üzerindeki etkilerini belirlemek için deneyler yapmışlardır. 26 °C – 32 °C derece aralığında yapılan deneylerde naftanik bazlı mineral trafo yağı, parafin bazlı trafo yağı ve silikon bazlı bir trafo yağı karşılaştırması yapılmıştır. Delinme gerilimi deneyleri hazır bir sistem olan Megger OTS60PB taşınabilir trafo yağı test seti ile yapılmıştır. Yapılan deneylerde naftanik bazlı yağın delinme geriliminin 42.2 kV, parafin bazlı yağın delinme geriliminin 43.6 kV ve silikon bazlı trafo yağının delinme geriliminin ise 46.8 kV olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre silikon bazlı yağın delinme geriliminin en yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [44].

Transformatörlerde sargıların yalıtımı için yağlı kâğıt çok önemlidir. Yapılan araştırmalarda kağıttaki nem içeriğinin artmasının trafodaki yalıtım için en fazla negatif etkiyi içerdiği ve bunun da yalıtımın dielektrik dayanımının düşmesine neden olduğunu ortaya koymuşlardır [45-49]. Ghosh ve arkadaşları çevresel parametrelerden nemin yeni nesil trafo yalıtımında oluşan etkisini araştırmak için yıldırım darbe gerilimi parametrelerini kullanmışlardır. Transformatör yağlı kâğıt, pressboard ve diğer yalıtım prototipleri farklı nem içerikleri mineral yağ ve bitkisel yağlar ile emprenye edilmiştir. Bir yıldırım darbe üretici geliştirilerek deney düzeneği kurulmuş ve yağlı kâğıt numunelerin yıldırım darbe dalgaları uygulanarak darbe akımı tepkileri kaydedilmiş ve bununla beraber kâğıt içerisinde nem içeriğinin yüzdesinin tahmini için çalışmalar yapılmış ve kağıttaki nem yüzdesi tahmininin darbe gerilimi kullanılarak güvenilir olabileceğini göstermiştir [50].

Literatürde çokça araştırma kapsamı olan çevresel parametrelerin dielektrik sıvılara etkisi bu tez çalışmasında 3 farklı sıvının farklı nem ve sıcaklık koşulları altında delinme gerilimi ve kaçak akımların analiziyle incelenmiştir. Düzgün olmayan elektrik alan etkisini sağlayan iğne-düzlem elektrot geometrisi kullanılarak 5 farklı açıklıkta yapılan deneylerde hem delinme gerilimleri hem de deşarj anında yalıtkan üzerinden akan kaçak akım ölçümleri vasıtasıyla nem ve sıcaklık etkileri test edilerek araştırılmıştır. Kaçak akım sinyalleri, deşarjlar hakkında daha ayrıntılı analiz imkânı elde edebilmek adına hızlı kurtogram yöntemiyle işlenmiştir. Bu sayede çevresel etkilerin hem dielektrik sıvılar içerisindeki deşarjlara etkisi hem de farklı tip sıvıların bu parametreler kullanılarak karşılaştırma yapılması sağlanmıştır.



3. YÖNTEM

Bu bölümde elektrik endüstrisinden trafolarla yalıtım sıvısı olarak en çok kullanılan üç farklı yalıtım sıvısının İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Yüksek Gerilim Laboratuvarında yapılan deneysel çalışmalarına ait bilgiler verilmiştir. İlk olarak deneylerde kullanılan yağ tipleri daha sonra da deneylerde kullanılan elektrotlar ve diğer süreçler açıklanmıştır. İlerleyen bölümlerde elde edilen deneysel verilerin ne şekilde işlendiğini açıklamak üzere kullanılan matematiksel model ve program açıklanmıştır.

3.1. SIVI DİELEKTRİK MALZEMELER

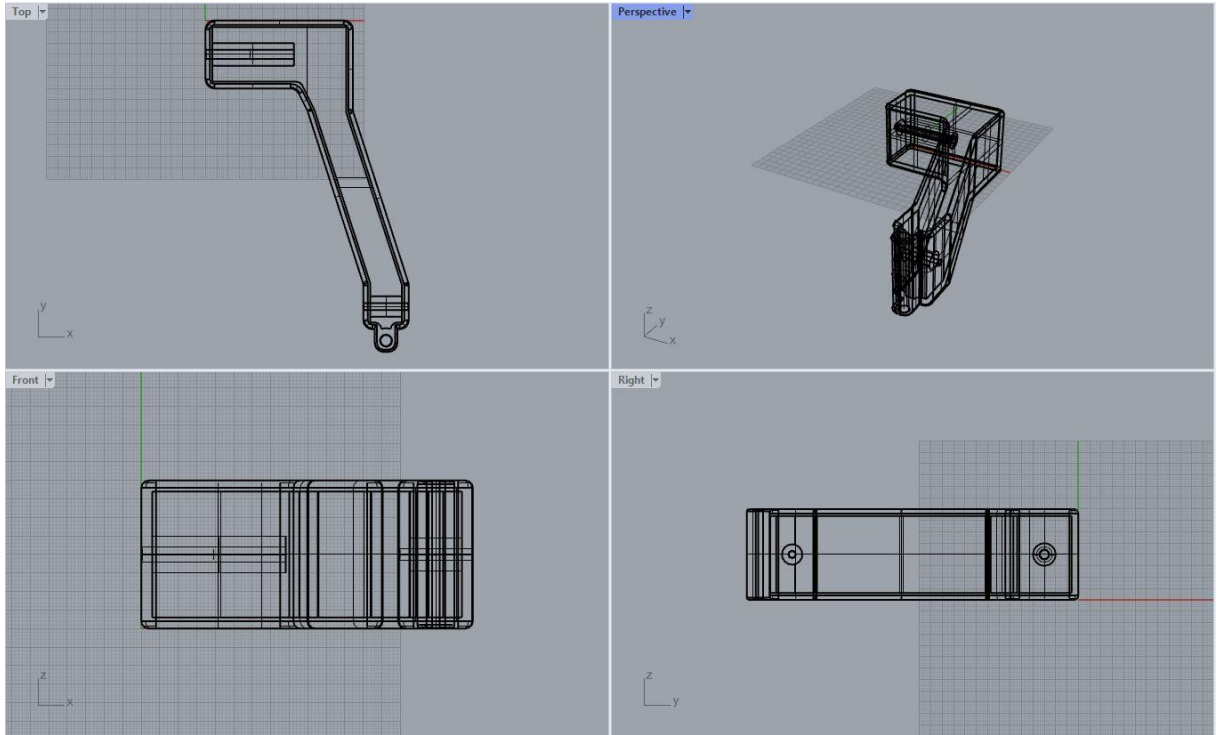
Çevresel parametrelerden olan sıcaklık ve nem etkisi güç transformatörlerinde uzun yıllardan beri kullanılan madeni yağ ve ester sıvılar üzerinde deneysel olarak ölçülmüştür. Petrol bazlı olan naftenik tabanlı Prodel Nytro Lyra X markalı trafo yağı seçilen ilk sıvı dielektrik malzemedir. Son zamanlarda organik ve inorganik yollarla elde edilen ester sıvıların trafolarla yalıtım sıvısı olarak kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu tez kapsamında yapılan deneylerde sentetik ester bazlı MİDEL 7131 ve organik ester bazlı MİDEL en1204 sıvıları test edilmiştir. Deneylerde test edilen sıvılara ait fizikokimyasal ve elektriksel parametreler Tablo 3.1' de verilmiştir [51,52].

Tablo 3.1: Sıvı dielektrik parametreleri.

Parametre / Birim	Sıvı Dielektrik			
	Prodel Nytro Lyra X	MİDEL en1204	MİDEL 7131	
Kinematik Viskozite (40°C) [mm ² /s]	8,7	37	29	
Yoğunluk (20°C) [g/cm ³]	0,88	0,92	0,97	
Parlama Noktası [°C]	160	315	260	
Akma Noktası [°C]	-51	-31	-56	
Su İçeriği [mg/kg]	13	50	50	

3.2. ELEKTROT SİSTEMİ

Yapılan deneylerde düzgün olmayan elektrik alan oluşturabilmek için iğne-düzlem elektrot konfigürasyonu kullanılmıştır. Her iki elektrotu sabit ve yatay hizada tutabilmek için paslanmaz çelik malzemeden iki adet elektrot tutucu/destekleyici parça kullanılmıştır. Bu parçaların 2 boyut ve 3 boyut tasarım şekilleri şekil 3.1’de gösterilmiştir. Elektrotların deney kazanının tam ortasına konumlandırılması için tasarımı yapılp temin edilen elektrot tutucuların boyutları 8 cm olacak şekilde eğimli olarak oluşturulmuştur.

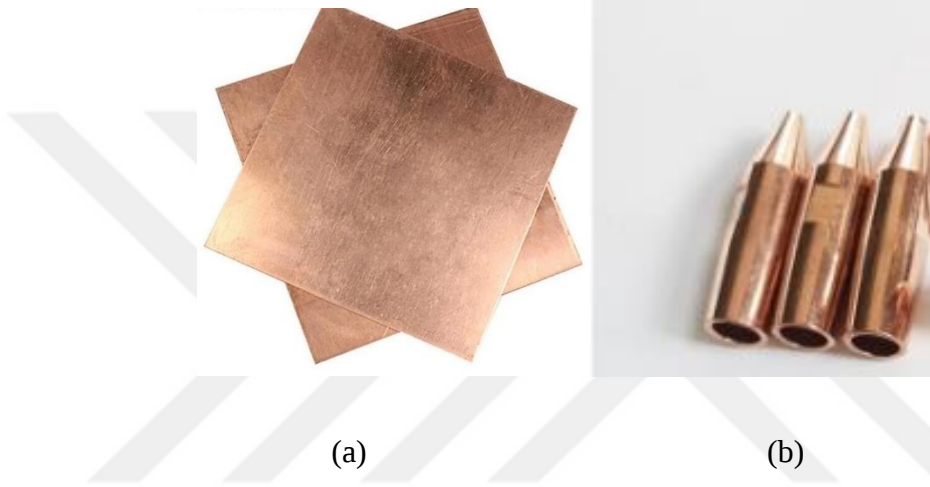


Şekil 3.1: Elektrot tutucu ayakların 2D ve 3D tasarımı

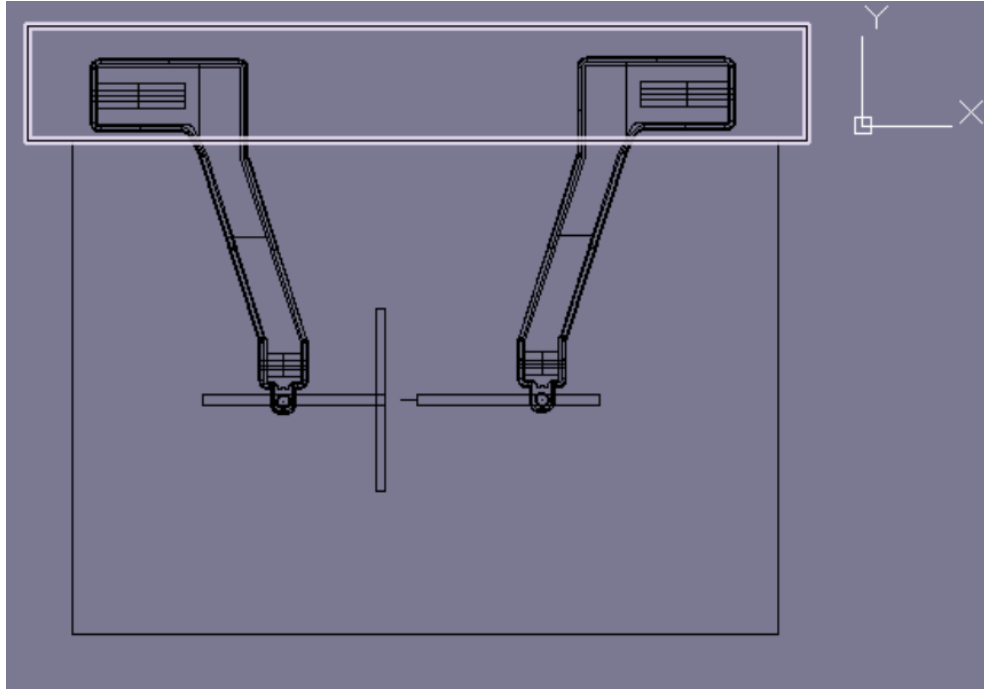
Elektrot tutucuların üzerine konumlandırılacak olan elektriksel toprak olan düzlem elektrot 5x5 cm boyutlarında ve 3 mm kalınlığa sahip bakır malzemeden yapılmıştır. Düzlem elektrotun tutucuya sabitlenebilmesi için 3 mm kalınlıkta ve 5 cm uzunlukta silindirik yapıda bir destekleme çubuğu arka yüzeyin tam orta noktasından itibaren iletkenliği bozmayacak şekilde kaynak edilmiştir. Elektrotların, tutma kollarına sabitleme işlemi vidalar yardımı ile yapılmıştır.

Yüksek gerilim ucu olarak kullanılan iğne elektrot tasarımı ise yine 5 cm uzunluğunda 3 mm kalınlığında silindir boru kullanılarak iğne elektrotun ucu sabitlenerek, silindir boru ile bakır iğne elektrot tutuculara sabitlenecek şekilde tasarlanmıştır. Deneylerde kullanılacak olan bakır düzlem elektrotlar ve iğne elektrot tutucular Şekil 3.2’ de verilmiştir. Boş bakır tutucunun içine

iğne elektrot oturtularak sabitlenmiştir. Deney kazanındaki elektrot tutucular 5 cm yüksekliğinde ve 25 cm uzunluğunda iki adet kompozit sabitleyiciye vidalanmıştır. Bu şekilde deney kazanı içinde bulunan elektrotların sabit olması ve yapılan tasarım ölçümleri sonucu elektrotların deney kazanının ortasına konumlandırılması sağlanmıştır. Deney kazanı içindeki konumlanması Şekil 3.3’ deki yatay elektrot düzlemi olarak yerleştirilecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.2: (a)Bakır düzlem elektrot (b) İğne Elektrot tutacağı.



Şekil 3.3: Deney kazanı ve elektrotların yerleşim şeması tasarımı.

İğne elektrot 0,1 μm uç kalınlığında 5 cm uzunluğunda ve 2 mm kalınlığında üretilmiştir. Elektrot tutacağına aşağıda üretilen tak-çıkart aparat yardımı ile sabitlenmiştir.



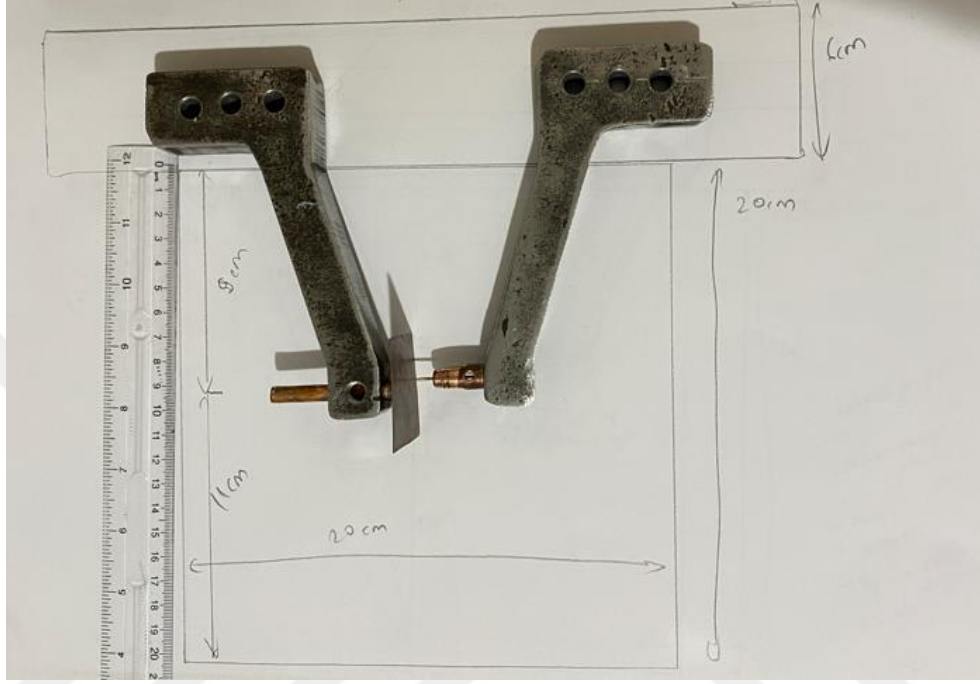
Şekil 3.4: İğne elektrot ve sabitleme aparatı

Kullanılacak olan elektrot tutacakları çelik malzemeden imal edilmiş olup boyutları şekil 3.5’ da görüldüğü gibidir.



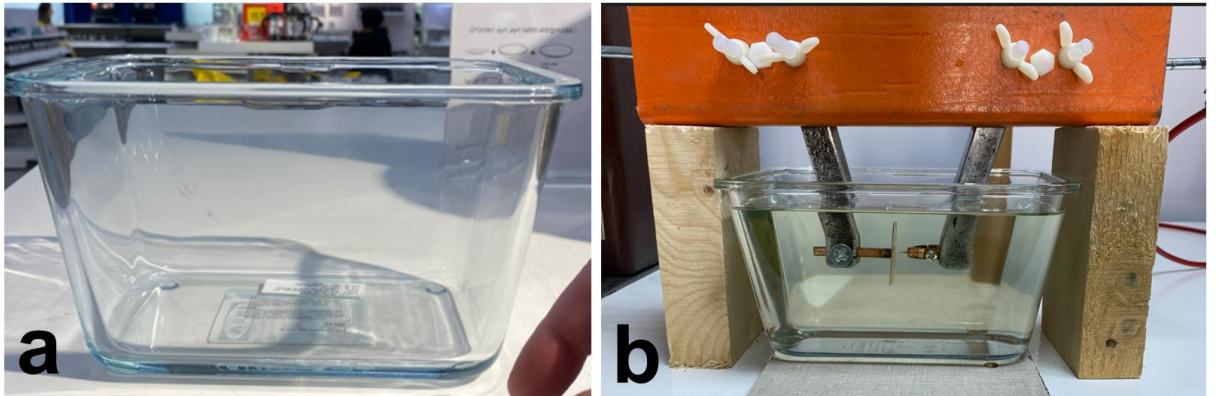
Şekil 3.5: Elektrot tutacakları ve ölçüleri.

Elektrot tutacakları üzerinde elektrotların yerleştirilmesi ve sabitlenmesi için delikler açılmıştır. Deney kazanı üstüne sabitlenmesi ve kablo girişleri için belirlenen aralıklarla delikler açılmıştır. Bu delikler açıldıktan sonra elektrot tutacaklarının son hali şekil 3.6’ da verilmiştir



Şekil 3.6: Elektrot tutacakları ve iğne-düzlem elektrot.

Deney kazanının yapılacak sıcaklık deneylerine dayanıklı olması gerekmektedir. Bu yüzden delinmenin takip edilmesi için şeffaf cam bir deney kazanında karar kılınmıştır. Elektrot tutacaklarına uygun seçilen deney kazanı şekil 3.7’de görülmektedir. Deney kazanının hacmi 1,8 litre olarak belirlenmiştir.



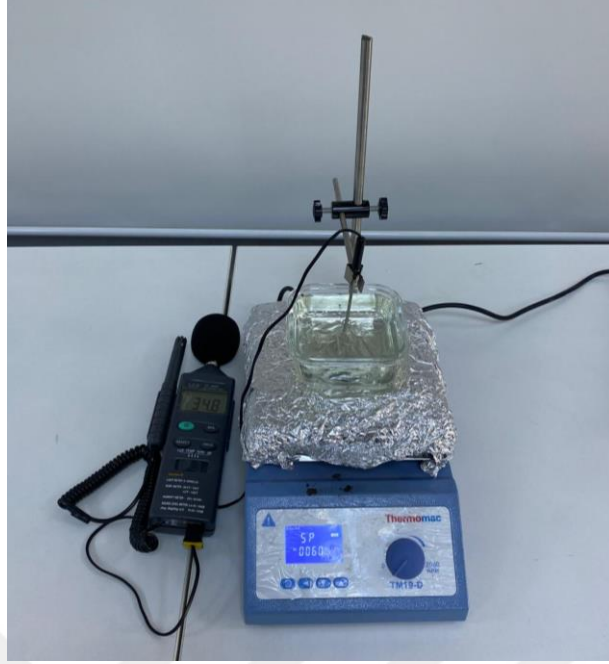
Şekil 3.7: (a) Deney Kazanı (b) Deney kazanı ve elektrot konumu.

3.3. SICAKLIK PARAMETRESİ DENEY DÜZENEGİ

Sıvı dielektrik malzemeler harici bir kaynakla 20 °C' den 60 °C ye kadar (20 °C -25 °C -30 °C -35 °C -40 °C -45 °C -50 °C -55 °C -60 °C) sıcaklık değeri her kademede +5°C olacak şekilde artırılmıştır. Bu şekilde elektrotlar arası açıklık 1mm' den 5 mm' ye kadar (1mm-2mm-3mm-4mm-5mm) her açıklıkta 9 farklı sıcaklık değeri için deneyler yapılmıştır. Dielektrik sıvı, deneyin yapılacağı yağ sıcaklığına erişilince deney başlatılmıştır.

20 °C sıcaklıkta bütün elektrot açıklıkları için deneyler yapıldıktan sonra trafo yağı 5 °C ısıtılarak deneyler 25 °C de bütün elektrot açıklıkları için tekrarlanmıştır. Bütün deneyler yapıldıktan sonra yağ atık yağ kategorisine alınıp kullanılmamıştır. Her deney öncesi ve sonrasında yağın sıcaklığı ölçülerek ilgili deney sıcaklığının korunup korunmadığı gözlenmiştir. Sıcaklığın düştüğü durumlarda yağ tekrar deney yapılan ilgili sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Her deney sonrasında yağ karıştırılarak beklenmiştir. Böylece yağda görülmesi düşük de olsa homojenite bozukluğunun önüne geçilmiştir. En son olarak 60 °C sıcaklık için yapılan deneyin ardından yağ atık yağ olarak konumlandırılmış ve tekrar kullanılmamıştır.

Deney kazanı ve elektrot tutacakları belirlendikten sonra sıcaklık deneylerine başlamak için yağın ısıtılması gerekmektedir. Deneyler yapılırken sıcaklığın deney kazanı içinde bulunan termokupl sensörü ile izlenmesi bazı sakıncaları doğurabilir. Termokupl sensörleri iletken maddelerden yapılmaktadır. Yüksek gerilim delinme deneylerinde aynı deney kazanı içinde bulunan termokupl sensörünün delinmenin yapısını ve karakteri ile zamanını bozabileceğinden endişe duyulmaktadır. Bu nedenle deney başlangıcında transformatör yağının sıcaklığının deney kazanı dışından ölçülmesi deneylerin sağlıklı ve daha güvenilir yapılması ve daha doğru sonuçlar alınabilmesine olanak sağlayabilmektedir. Yağın ısıtılması için kullanılacak Thermomac TM19-D cihazı şekil 3.8' de verilmiştir.



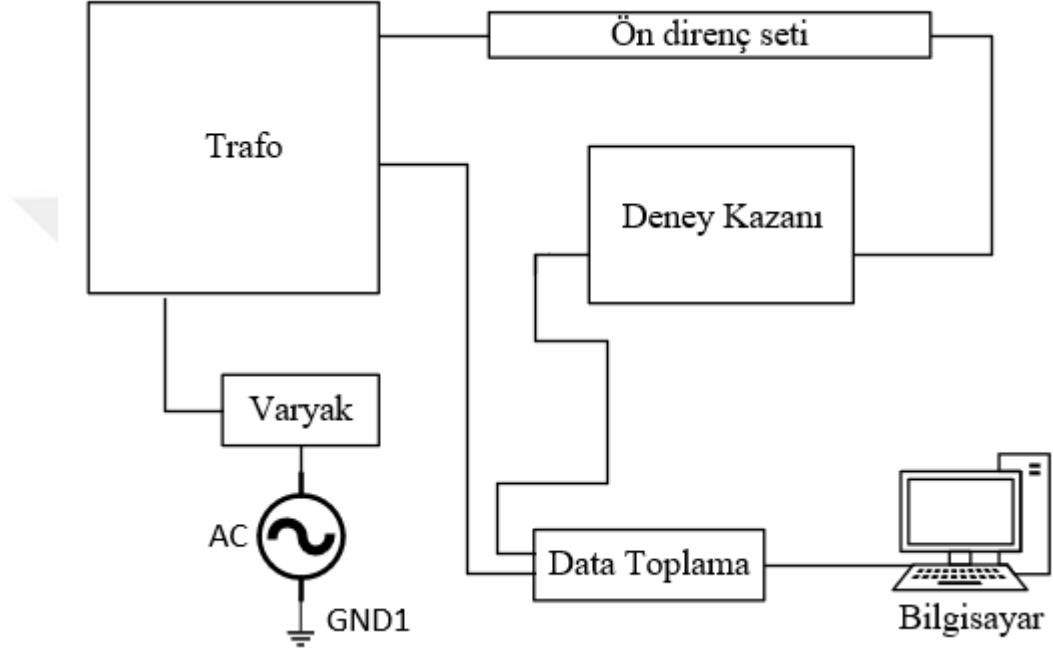
Şekil 3.8: Trafo yağı ısıtma cihazı.

Dielektrik sıvıların ısıtılması esnasında kullanılan manyetik ısıtıcının yüksek doğruluğu olan metal probu dikey bir şekilde sıvı içerisine daldırılmıştır. Korozyona uğrama ihtimali olmayan bu prob yağın yapısını değiştirecek herhangi bir etkiye neden olmamaktadır. Yüksek gerilim stresi altında deneyler yapılırken ara ara dielektrik sıvının sıcaklığı Şekil 3.9’ da belirtildiği gibi CEM DT-8820 çevresel ölçüm cihazı ile ölçülmüştür



Şekil 3.9: CEM DT-8820 çevresel ölçüm cihazı.

Sıcaklık deneyleri için ilgili sıcaklık aralığı 20 °C- 60 °C olarak belirlenmiştir. Sıcaklık değeri 5 °C arttırılarak toplamda 9 farklı sıcaklık değeri için (20 °C – 25 °C- 30 °C -35 °C- 40 °C - 45 °C - 50 °C - 55 °C - 60 °C) delinme deneyleri yapılmaya devam etmektedir. Sıcaklık deneyleri için kurulacak olan deney şeması Şekil 3.10’ de gösterildiği gibidir.



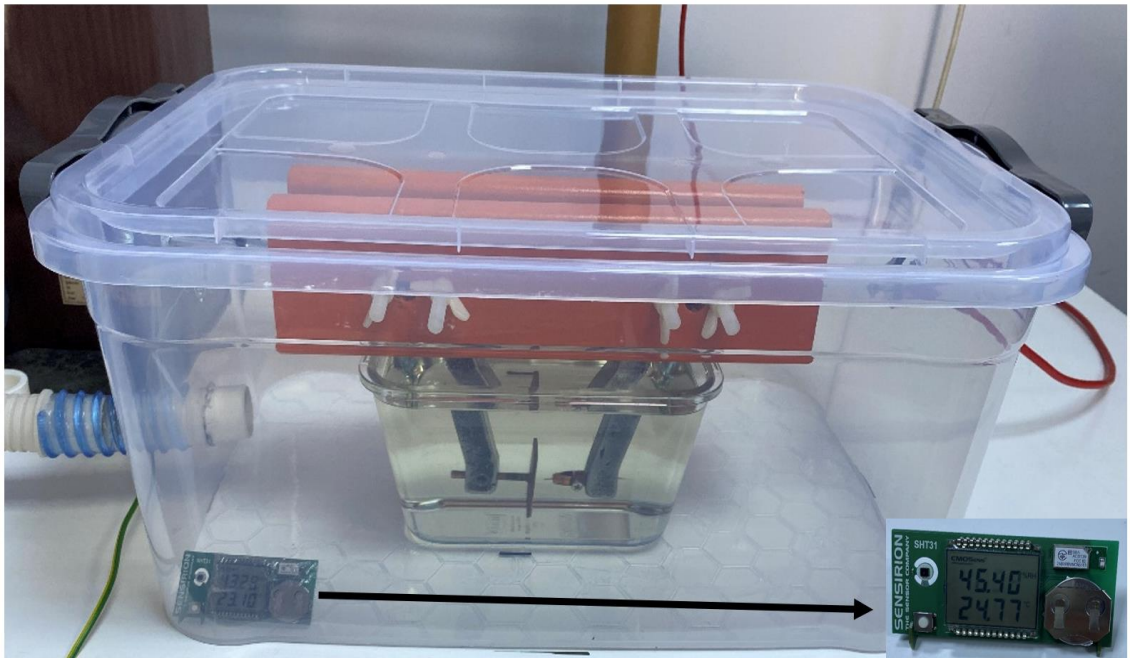
Şekil 3.10: Sıcaklık deneyleri deney seti şeması.



Şekil 3.11: Sıcaklık deneyleri gerçek deney düzeneği.

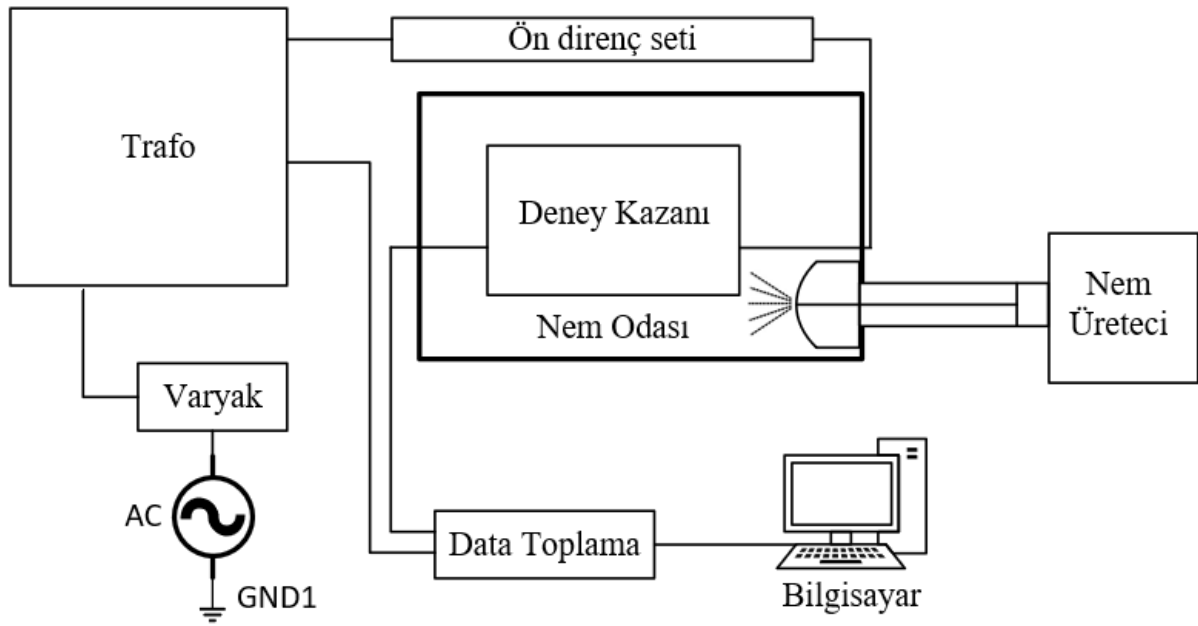
3.4. NEM PARAMETRESİ DENEY DÜZENEĞİ

Nem deneyleri için ilk önce nem değerinin sabitleneceği şekil 3.12’ de gösterildiği gibi bir nem odası oluşturulmuştur. Nemin içeride sabit olduğu ve ne kadar sabit kaldığı ölçülerek deney ön hazırlıkları yapılmıştır. Deneyler yapılırken ortamın nem oranının anlık olarak ölçüldüğü ve korunduğu yapılan ölçümler ile görülmüştür.



Şekil 3.12: Nem Odası.

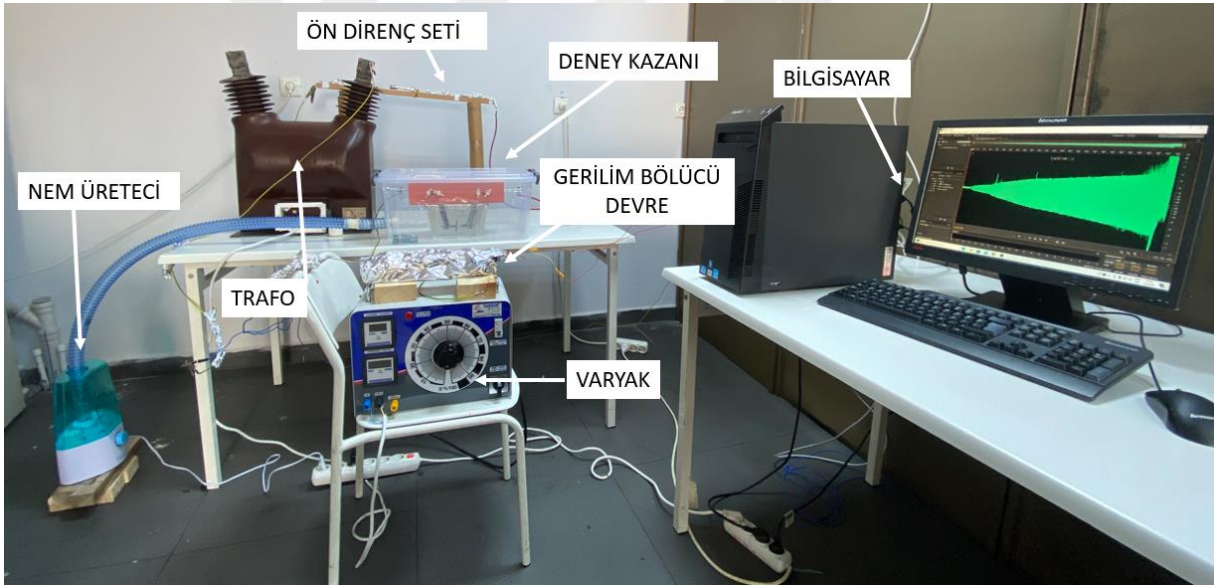
Nemin anlık olarak ölçülebilmesi için şekil 3.12’ de verilen Sensirion sht31 kullanılmıştır. Nem odasına açılan bir delik yardımı ile ortam nemi anlık olarak takip edilerek kontrollü bir şekilde arttırılmıştır. Arttırılan ortam nemi anlık ve sürekli ölçülerek ne kadar süre stabil olarak kaldığı da gözlenmiştir. Delinme gerilimi nem deneyleri deney şeması şekil 3.13’ de gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Ortam neminin arttırılması için şekil 3.14’ de verilen Havvaca HD-1349 ultrasonik buhar makinesi Şeffaf Oda Nemlendirici cihazından yararlanılmıştır [10]. Soğuk buhar verilerek nem ortamı değiştirilmiştir. Gerçek deney düzeneği şekil 3.15’ de gösterildiği gibi kurulmuştur. Nem deneyleri 40%RH-95%RH nem seviyeleri arasında 5%RH arttırılarak yapılmıştır. Toplamda 12 farklı nem seviyesi için (40%RH- 45%RH- 50%RH- 55%RH- 60%RH- 65%RH- 70%RH- 75%RH- 80%RH- 85%RH- 90%RH- 95%RH) deneyler yapılmıştır. Her kademede nem deneyi tekrarları yapılmıştır. Nem seviyeleri ölçülürken tekrarlar sonunda ilgili nem seviyelerinde yüzeyden yağ numuneleri alınmış ve FTIR analizleri için saklanmıştır. Bu çalışmada hem ölçülen değerlerin analizi yapılmış hem de FTIR analizi için alınan numunelerden elde edilen sonuçlar da ayrı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.13: Delinme gerilimi nem deneyleri deney şeması.

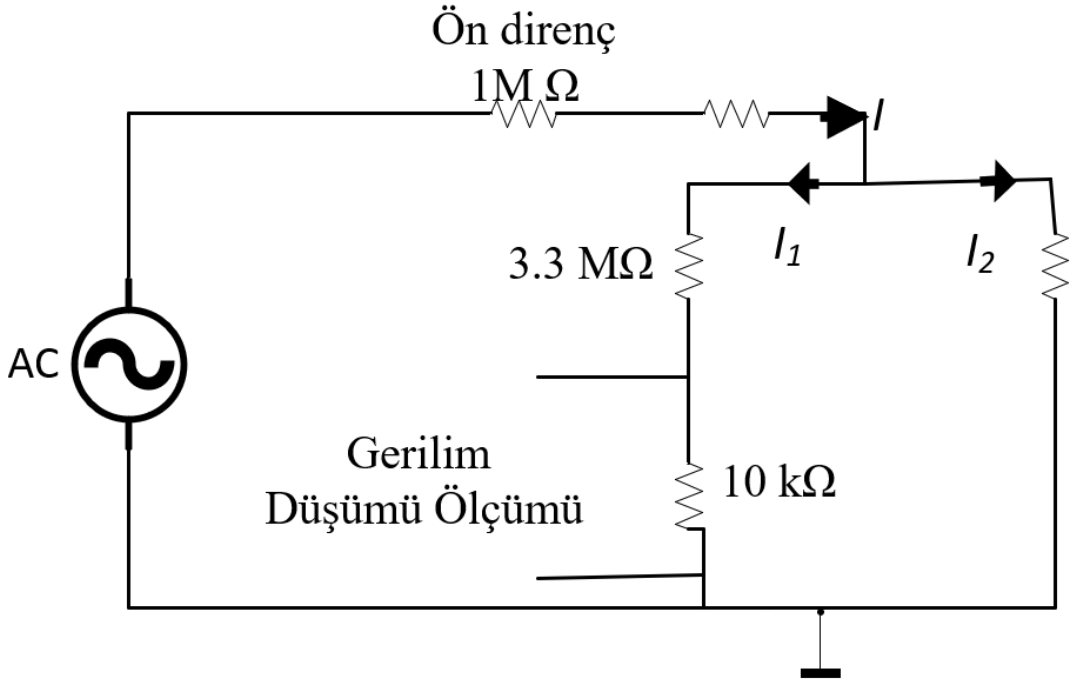


Şekil 3.14: Havvaca HD-1349 ultrasonik buhar makinesi



Şekil 3.15: Delinme gerilimi nem deneyleri deney düzeneği.

Deneylerin yapılması sonrası ilgili verinin toplanması için gereken rezistif gerilim bölücü devre Şekil 3.16'daki gibi tasarlanmıştır. İlgili delinme gerilimine ilişkin verinin alınabilmesi için toprak elektrotuna sonradan bağlanan bir gerilim bölücü devre kullanılmıştır [53]. Delinme gerilimi için gereken ölçümler $10\text{ k}\Omega$ direnç üzerinden I_2 akımı alınarak hesaplanmıştır. Akım değerleri bilgisayara aktarılmış ve deney sonuçları kaydedilmiştir. Deney tekrarları standartlara uygun olarak yapılmıştır.



Şekil 3.16: Akım ölçümü için devre şeması [53].

3.5. KURTOGRAM YÖNTEMİ

Hızlı Kurtogramın ilk tanımı incelendiğinde, arızanın tespit edilmesinde yaygın olarak kullanılan kısa zamanlı fourier dönüşümüne (STFT- Short Time Fourier Series) dayanmaktadır. Sürecin durağan olmadığı varsayılırsa, Cramer- Wold ayrıştırma formu eşitlik (1)' de verilmiştir [54].

$$x(n) = \int_{-\frac{1}{2}}^{+\frac{1}{2}} H(n, f) e^{j2\pi f n} dZ_x(f) \quad (1)$$

Eşitlik (1)' de görüleceği üzere ortonormal bir spektral artış bulunmaktadır. Bununla beraber karmaşık zarfı temsil etmektedir. Spektral basıklık (SK- Spektral Kurtosis) 4. Dereceden spektral kümülant olarak tanımlanabilmektedir.: $dZ_x(f)H(n, f)x(n)$ [55].

$$K_x(f) = \frac{s_4(f)}{(s_2(f))^2} - 2, f \neq 0 \quad (2)$$

(2) eşitliğinde sinyallerin n . dereceden spektral momentini temsil etmektedir. $S_n(f) = E(|H(n, f)|^n)$

Spektral basıklığın önemli özelliklerin biri de durağan süreçler için SK frekansın bir fonksiyonudur. Durağan olmayan süreç için gürültü eklendikten sonra spektral basıklık eşitlik (3) formunda ifade edilir.

$$K_y(f) = \frac{K_v(f)}{(1+1/\gamma(f))^2} \quad (3)$$

(3) eşitliği incelendiğinde f sinyal-gürültü oranını temsil etmektedir. Durağan olmayan bir süreç için $y(t) = v(t) + n(t)$, olarak bulunur. $n(t)$ durağan gürültüdür.

Antoni ve arkadaşları kısa zaman fourier transformuna (STFT) dayalı olarak SK' yı hesaplamak için yeni bir yöntem önermişlerdir [9]. STFT tabanlı SK ile tüm olası seçeneklerde SK' yı maksimuma çıkararak merkez frekansı ve pencere uzunluğu bulunabilir. f ve N_w çiftlerinin her biri için SK değerlerini gösteren 2 boyutlu renkli bir haritalama tekniği oluşturulmuştur. SK' nın hesaplama süresini azaltmak ve hızlı bir şekilde algoritmanın uygulanmasını sağlamak için her alt bandın SK' sını kule diyagramı ile temsil eden bir filtreleme hesabına dayalı FK' yı geliştirmiştir. Frekansı x eksenini ile temsil edildiği yerde, y eksenini katman sayısını göstermektedir. Frekans çözünürlüğü ise $\Delta f = 2^{-(k+1)}$ ile ifade edilir.

Kurtogram yöntemini açıklamadan önce kurtosis' in ne olduğunun iyi kavranılması gerekmektedir. Kurtosis kelime olarak basıklık anlamına gelmektedir. Kurtosis, bir sinyalin belirli bir ölçekte (pencere uzunluğu-window length) ne kadar sivri ya da tepe noktalı olduğunu ifade eden bir ölçüdür. Kurtosis değerleri, kurtogram grafiğinde farklı frekans bileşenlerinin nonlineerlik düzeyini görselleştirmek için kullanılır. Kurtosis değerleri, genellikle sinyalin özelliğine bağlı olarak farklı ölçeklerde pencere uzunlukları hesaplanır. Kurtogram hesaplamalarında kurtosis değerlerini belirlemek için genellikle eşitlik (4)'deki formül kullanılır:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{(n-1).s^4} \quad (4)$$

Burada:

- K , kurtosis değerini temsil eder.
- x_i sinyalin her bir örneğini (veri noktasını) temsil eder.
- $\bar{x}$, sinyalin ortalamasıdır.
- n , sinyalin toplam örneklemelerinin sayısını temsil eder.
- s , sinyalin standart sapmasıdır.

Yukarıdaki ifade, sinyalin kurtosis değerini hesaplamak için kullanılır. Kurtosis değeri, sinyalin dördüncü merkezi momentinin, varyansın dördüncü kuvvetine bölünmesiyle elde edilir. Yüksek kurtosis değerleri, sinyalin daha dik ya da tepe noktalı olduğunu, düşük kurtosis değerleri ise sinyalin daha düz veya yayılmış olduğunu gösterir. Sivri noktalar sinyalde ani ve keskin oluşan değişikliklerin varlığını göstermektedir. Frekans spektrumunda incelendiğinde kısa süreli oluşan ve yüksek genlikli anormalliklere karşılık gelmektedir. Tepe noktalı durumların varlığı ise frekans spektrumunda belirli frekanslarda yüksek genlikli olan yoğun ve belirgin noktaları ifade etmektedir. Düz ve yayılmış durumun incelendiği kısımda ise düz noktalarda incelenen sinyalin frekans bileşenlerinin tekdüze ve homojen bir dağılım göstererek belirgin tepe noktalarının olmadığı görülür. Yayılmış durumda ise sinyalin belirli frekanslarda yoğunlaşma olmadığı ve geniş bir alana yayıldığı görülmektedir.

Kurtogramlar, bir sinyalin nonlinear özelliklerini analiz etmek için kullanılan güçlü bir araçtır. Temel olarak, kurtogram, sinyalin çeşitli ölçeklerdeki kurtosis değerlerini görselleştiren bir grafik veya analiz yöntemidir. Kurtosis değerleri, sinyalin belirli bir ölçekteki ani değişimler veya atılımlarının ölçüsüdür.

Darbe frekansları veya diğer nonlinear özelliklere sahip sinyaller, genellikle belirgin kurtosis değerlerine sahip oldukları için kurtogram analizinde öne çıkabilir. Yüksek ve düşük dereceli deşarjlar (veya atılımlar), bu analizlerde dikkate alınan önemli özelliklerden biridir. Ancak, kurtogramlar doğrudan yüksek ve düşük dereceli deşarjları temsil etmez; bunun yerine, bu deşarjlar genellikle kurtogramda yüksek veya düşük kurtosis değerlerine karşılık gelir.

Yüksek kurtosis değerleri, sinyalin belirli bir ölçekte (pencere uzunluğu veya frekans) ani, belirgin atılımlar veya değişiklikler içerdiğini gösterir. Bu atılımlar, genellikle yüksek enerjiye

sahip impulsif veya nonlinear özelliklere işaret eder. Bu tür deşarjlar, kurtogramda belirli bir ölçekte daha yüksek kurtosis değerleri olarak görünebilir.

Düşük kurtosis değerleri ise, sinyalin daha düzgün veya daha yayılmış olduğunu, ani atılımların veya değişikliklerin daha az olduğunu gösterir. Bu, sinyalin daha az impulsif veya daha lineer özelliklere sahip olduğunu gösterebilir. Kurtogramda düşük kurtosis değerleri, yüksek veya ani değişikliklerin daha az olduğu ölçeklerde gözlemlenebilir.

Dolayısıyla, kurtogramda yüksek ve düşük dereceli deşarjlar, sinyalin kurtosis değerleri üzerinden yorumlanmaktadır. Yüksek kurtosis değerleri, yüksek enerjili veya impulsif özelliklerle ilişkilendirilirken, düşük kurtosis değerleri daha düşük enerjili veya daha lineer özelliklerle ilişkilendirilir. Bu özellikler, sinyalin analiz edilen ölçeğine (pencere uzunluğu veya frekans) bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Delinme gerilimi deşarjları, genellikle yüksek enerjili ve ani değişimlerdir. Bu tür deşarjlar, kurtogram analizinde yüksek kurtosis değerlerine neden olabilir. Kurtogramda yüksek kurtosis değerleri, sinyalin belirli bir ölçekteki (pencere uzunluğu veya frekans) yüksek enerjili veya impulsif özelliklerini gösterir.

Dolayısıyla, delinme gerilimi deşarjları ve kurtogram arasındaki ilişki, delinme gerilimi deşarjlarının yüksek kurtosis değerlerine ve dolayısıyla kurtogram analizinde önemli özelliklere işaret etmesidir. Kurtogram analizi, bu tür deşarjların sinyaldeki etkilerini belirlemek ve analiz etmek için kullanılabilir.

Kurtogramda temel terimleri aşağıdaki gibi açıklayabiliriz:

Ölçek (Scale): Ölçek, analizde kullanılan pencere uzunluğunu temsil eder. Farklı ölçeklerde kurtosis değerleri hesaplanır ve bu değerler genellikle bir grafik üzerinde gösterilir. Ölçek, sinyalin belirli frekans veya zaman aralıklarındaki nonlinear özelliklerini belirlemeye yardımcı olur.

Basıklık (Kurtosis): Kurtosis, bir olasılık dağılımının kuyrukluluğunu ölçen bir istatistiksel terimdir. Bir sinyalin kurtosis değeri, sinyalin dağılımının ne kadar kuyruklu veya uç değerlere sahip olduğunu gösterir. Darbe sinyalleri genellikle belirgin uç değerlere sahiptir, bu nedenle kurtosis değerleri genellikle yüksektir.

Spektral Basıklık (Spectral Kurtosis): Spektral basıklık, kurtogram analizinde kullanılan bir ölçüdür ve bir sinyalin belirli bir frekans aralığındaki nonlinear özelliklerini değerlendirmeye yöneliktir. Spektral basıklık, sinyalin frekans bileşenlerinin kurtosis değerlerini gösterir. Kurtogram analizi, bir sinyalin farklı ölçeklerdeki kurtosis değerlerini hesaplayarak nonlinear özellikleri ortaya çıkarmayı amaçlar. Spektral basıklık, bu kurtosis değerlerini belirli frekans aralıklarında inceleyerek, sinyalin hangi frekanslarda daha belirgin nonlinear özelliklere sahip olduğunu belirler. Yüksek spektral basıklık değerleri, belirli bir frekans aralığındaki sinyalin nonlinear özelliklere sahip olduğunu gösterir. Bu özellikte transients (geçişkenler) veya impulsive (darbe benzeri) özelliklere odaklanmada kullanışlıdır. Sonuç olarak, spektral basıklık, kurtogram analizinde sinyalin frekans bileşenlerindeki nonlinear özellikleri değerlendirmek için kullanılan bir ölçüdür. Kısaca, kurtogramdaki basıklık (kurtosis) değerleri, sinyalin nonlinear özelliklerini ve özellikle darbe sinyallerindeki belirgin frekansları belirlemeye yardımcı olabilir. Yüksek kurtosis değerleri, belirli frekanslarda sinyalin nonlinear özelliklere sahip olduğunu gösterirken, bu frekanslar darbe frekanslarına karşılık gelebilir. Ancak, bu ilişki sinyalin özelliklerine ve analiz koşullarına bağlı olarak değişebilir.

Bw (Bant Genişliği): Kurtogram bağlamında, bant genişliği analizde belirli bir frekans bileşeni veya mod tarafından kapsanan frekans aralığını ifade eder. Analiz edilen sinyal içindeki frekans bileşenlerinin ne kadar yayıldığını gösterir. Daha büyük bir bant genişliği, daha geniş bir frekans aralığını işaret eder. Optimum bant geçiren filtre için önerilen bant genişliği de denebilir. Bu değer, belirli bir frekans aralığındaki nonlinear özellikleri vurgulamak için kullanılabilir. Örneğin 6000 Hz, belirli bir modun kurtogramda kapladığı frekans aralığını temsil eder. 6000 Hz'lik bir Bw, belirli bir frekans aralığındaki bileşenlerin geniş bir spektruma yayıldığını gösterir.

Wc: Kurtogram analizinde, maksimum spektral basıklığın bulunduğu pencere boyutunu ifade eder. Kurtogram analizinde kullanılan pencere boyutlarını temsil eder. Kurtogram analizi, sinyali belirli pencere boyutlarına böler ve her bir bölüm üzerinde nonlinear özellikleri değerlendirmek için kurtosis hesaplar. Analiz sırasında kullanılan farklı pencere boyutları arasında en belirgin nonlinear özelliklere sahip olan boyutu ifade eder.

fc: (Merkez Frekansı): Kurtogram analizinde, sinyalin maksimum spektral basıklığının (kurtosis değeri) bulunduğu frekansı temsil eder. Yani, sinyalin en belirgin nonlinear özelliklerini gösteren frekansı ifade eder. Bu vektör, sinyalin farklı ölçeklerdeki frekans

bileşenlerini ifade eden bir dizidir. Kurtogram analizi genellikle belirli bir frekans aralığında veya merkez frekans etrafında yapılır. f_c değeri, bu analizin odaklandığı frekansı belirtir. İdeal olarak, f_c değeri, incelenen sinyalin karakteristiğine ve analiz amacına bağlı olarak seçilir.

$k_{maks.}$ değeri de belirli bir f_c değeri için analizin kapsamını belirler. Örneğin, daha geniş bir frekans aralığının analiz edilmesi gerekiyorsa, $k_{maks.}$ değeri daha yüksek bir değer olarak seçilebilir.

f_c frekansı aynı zamanda analizin odaklandığı merkezi frekansı temsil eder. Analizin hangi frekans etrafında yoğunlaştığını belirtir. Örneğin, eğer f_c 9000 Hz ise, analiz genellikle 9000 Hz civarındaki frekanslara odaklanmış demektir. Bu değerler, kurtogram analizin genel bir resmini sunar, ancak daha spesifik yorumlar için analizin yapıldığı sistem ve uygulamanın özel koşulları dikkate alınmalıdır.

Kurtogram analizi genellikle belirli bir frekans aralığında veya merkez frekans etrafında yapılır. f_c değeri, bu analizin odaklandığı frekansı belirtir.

$k_{maks.}$ (Maksimum Mod Sayısı): $k_{maks.}$, kurtogram analizinde dikkate alınan maksimum mod numarasını temsil eder. Analizde dahil edilen en yüksek frekans bileşeni veya modu belirler. Daha yüksek bir $k_{maks.}$ değeri, daha fazla frekans modunun analiz edildiği ve daha geniş bir frekans aralığının kullanıldığı anlamına gelir. Örneğin, daha geniş bir frekans aralığının incelenmesi gerekiyorsa, $k_{maks.}$ değeri daha yüksek bir değer olarak seçilebilir. Ancak, daha dar bir frekans aralığı veya belirli frekans bileşenlerinin incelenmesi gerekiyorsa, $k_{maks.}$ değeri daha düşük bir değer olarak seçilebilir. Kurtogramda $k_{maks.}$ ve f_c (merkez frekans) arasındaki ilişki, analizde dikkate alınacak maksimum frekans bileşenlerini belirleme açısından önemlidir.

Örneğin $k_{maks.} = 1030$ olduğu durumda analizde dikkate alınacak maksimum mod sayısını ifade eder. Bu durumda, analizde 1030 adet frekans modunun incelendiği anlamına gelir. Yüksek bir $k_{maks.}$ değeri, daha fazla frekans modunun analiz edildiği ve dolayısıyla daha geniş bir frekans aralığının göz önüne alındığı anlamına gelir. Yüksek $k_{maks.}$ ve geniş Bw, analizin geniş bir frekans aralığını kapsadığını ve daha detaylı frekans modlarını içerdiğini gösterebilir.

Kurtogramda $k_{maks.}$ ve f_c (merkez frekans) arasındaki ilişki, analizde dikkate alınacak maksimum frekans bileşenlerini belirleme açısından önemlidir. f_c ve $k_{maks.}$ değerleri birlikte

kullanılarak, analizde odaklanılan frekans aralığının ve analizin kapsamının belirlenmesine yardımcı olur. Bu parametrelerin uygun şekilde seçilmesi, kurtogram analizinin doğru bir şekilde yapılmasını sağlar.

Pencere Seviyesi: Pencere seviyesi, kurtogramda gösterilen enerji seviyesini belirtir. Farklı seviyeler, analiz edilen sinyalin farklı enerji seviyelerini temsil eder. Örneğin, daha yüksek bir pencere seviyesi, belirli frekans bileşenlerinde daha yüksek enerji veya aktiviteyi işaret edebilir.

Bu terimler, özellikle titreşim analizi, hata teşhisi ve sinyal işleme gibi alanlarda kurtogram analizinin sonuçlarını anlamak ve yorumlamak için önemlidir. Bu terimler, farklı ölçekler ve frekanslar boyunca analiz edilen sinyallerin doğrusallığı ve frekans özellikleri hakkında bilgi sağlar.

Kurtogram Grafiği: Kurtosis değerlerinin ölçeklere göre görsel olarak temsil edildiği grafiklerdir. Genellikle bu grafikte renk skalası kullanılır. Farklı renkler, farklı kurtosis seviyelerini belirtir. Örnek verecek olursak bir darbe sinyali ele alalım. Bu sinyalin kurtogram analizi yapılırken, farklı ölçeklerde (pencere uzunluklarında) kurtosis değerleri hesaplanır. Örneğin, küçük ölçeklerde yüksek kurtosis değerleri, darbenin belirli frekanslarda belirgin nonlineer özelliklere sahip olduğunu gösterebilir. Kurtogram grafiği, bu ölçeklere göre kurtosis değerlerini renklerle göstererek bu nonlineer özellikleri görsel olarak temsil eder.

Örneğin seviye 2 olarak belirtilmiştir. Seviye, kurtogramdaki gösterilen enerji düzeyini ifade eder. 2. seviye, belirli frekanslardaki bileşenlerin orta düzeyde enerjiye sahip olduğunu gösterir.

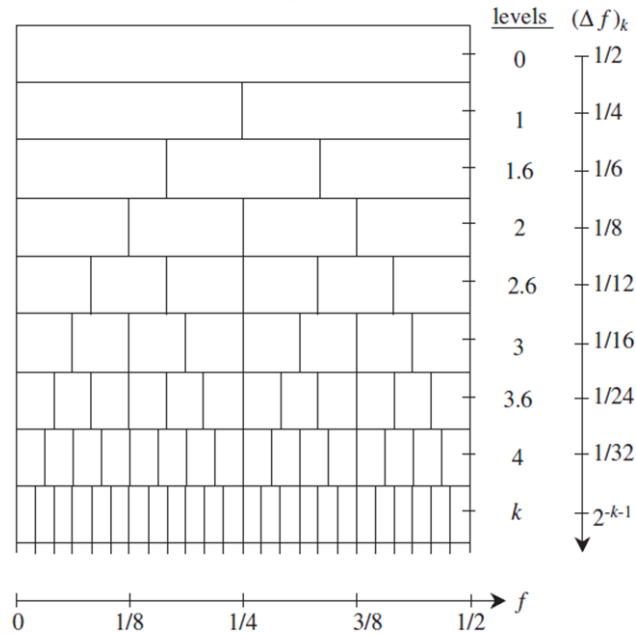
Hızlı kurtogram algoritması, bir sinyali kullanıcının belirlediği seviyede piramidal bir şekilde böler. Seviye 0, sinyalin klasik kurtosisini verir. Seviye 1, kurtosisi 2 spektral bandına böler, seviye 1.6, 3 spektral bandına böler ve genellikle seviye n , kurtosisi 2^n bandına böler. Şekil 3.17'de seviye arttıkça $[0; F_s/2]$ frekans bandının nasıl bölündüğünü gösteren bir örnek bulunmaktadır.



Şekil 3.17: Seviye ve frekans bandı kurtogram gösterimi

Şekil 3.17' nin nasıl oluştuğu ile ilgili biraz daha açıklama yapılırsa yöntem aşağıdaki ana adımları içermektedir:

(1) Sinyalin frekans alanını bölmek için bir filtre grubu oluşturulur. Filtre grubu ilk önce ikili ağaç bant geçiren bir filtre ile oluşturulur ve daha zengin bir $1/3$ ikili ağaç yapısına genişletilir. Daha sonra sinyal frekans alanı Şekil 3.18' de gösterildiği gibi $1/2, 1/3, 1/4, 1/6, \dots$ bölünür.



Şekil 3.18: FK' nın bant bölümü

(2) eşitliğindeki Alt bandın spektral basıklık değerinin hesaplanması (5) eşitliği ile elde edilir.

$$K(f_i, \Delta x f_i) = \Delta \frac{E[|c_k^i(n)|^4]}{\{E[|c_k^i(n)|^2]\}^2} - 2 \quad (5)$$

(3) eşitliği maksimum basıklığın elenmesi ve bileşenin yeniden oluşturulması sağlanır. Daha sonra merkez frekansı ve bant genişliği (6) eşitliğine göre elde edilir.

$$(f_0, \Delta f_0, c_0(n)) = \operatorname{argmax} \{K(f_i, \Delta f_i)\} \quad (6)$$

Eşitlik (6)' da bulunan $f_0, \Delta f_0, c_0(n)$, sırasıyla maksimum SK' ya karşılık gelen merkez frekansı, bant genişliğini ve çıkarılan sinyal bileşenini temsil eder.

(4) eşitliği ile son olarak çıkarılan bileşenler daha ileri düzeyde işlenebilir. Uygulamalarda arıza durumunun analizini ve değerlendirmesini ile gerçekleştirebilecek arıza karakteristik frekansını elde etmek için analiz edilebilir.

Kurtogram, her seviyede ve her frekansta kurtosisi renkli bir harita üzerinde gösterir. Yüksek bir kurtogram değeri, sinyalin impulslarının bulunduğu frekans bandını gösterir. Örneğin, seviye 1'de 2. frekans bandı seçildiğinde, $F_s/4$ bant genişliğine ve $0.375 \cdot F_s$ merkez frekansına sahip bir bant geçiren filtre ile sinyalin filtrelenmesi, sinyaldeki tüm impulsları artırır. Bu, filtrelenmiş sinyalin kurtosisini maksimize eden bant geçiren filtre çiftini seçmek için kullanılabilir. Ayrıca, " $c = \text{Fast_Kurtogram}(x, nlevel, F_s)$ " komutu, seçilen frekans bandında filtrelenmiş sinyalin kompleks zarfını ' c ' değişkeni olarak da döndürmektedir. Giriş Değişkenleri:

- x : İlgili sinyal
- $nlevel$ seviye: Sinyalin piramidal ayrışımı için seviye sayısı; iyi bir seçenek genellikle $nlevel = \log_2(N) - 6$ 'dır, burada N sinyal uzunluğudur.
- F_s : Hz cinsinden örnekleme frekansını vermektedir

Çıkış Değişkenleri: Kurtogram, her seviyede ve her frekansta kurtosisi renkli bir harita üzerinde gösterir. Yüksek bir kurtogram değeri, sinyalin impulsların bulunduğu frekans bandını gösterir. Örneğin, seviye 1'de 2. frekans bandı seçildiğinde, $F_s/4$ bant genişliğine ve $0.375 \cdot F_s$ merkez frekansına sahip bir bant geçiren filtre ile sinyalin filtrelenmesi, sinyaldeki tüm impulsları

artırır. Bu, filtrelenmiş sinyalin kurtosisini maksimize eden bant geçiren filtre çiftini seçmek için kullanılabilir.

Ayrıca, "`c = Fast_Kurtogram(x, nlevel, Fs)`" komutu, seçilen frekans bandında filtrelenmiş sinyalin kompleks zarfını 'c' değişkeni olarak da döndürür [56].



4. BULGULAR

Elektrik güç sistemlerinin gelişmesi ile birlikte transformatörlerin kapasiteleri sürekli olarak artmıştır. Bu nedenle transformatörlerin çevresel koşullardan etkilenmeden sağlıklı ve uzun süreli çalışması elzem olmuştur. Çevresel faktörlerden trafuyu koruyan trafo yağları en önemli çevresel faktörlerden sıcaklık ve nemden büyük ölçüde etkilenmektedir.

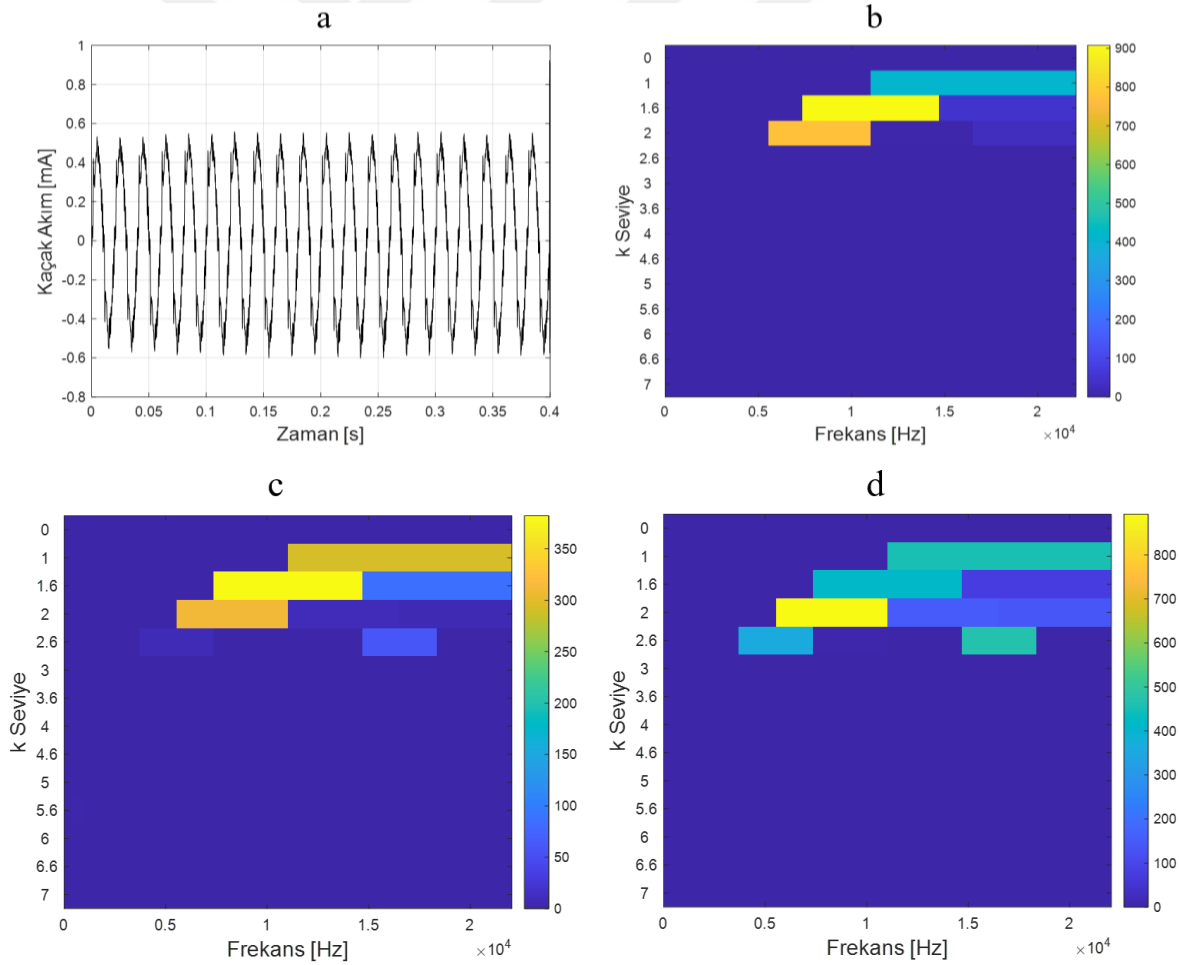
Çevresel faktörlerden sıcaklık için yapılan delinme gerilimi deneylerinde sıcaklık seviyeleri 20 °C’ den başlayarak 5 °C arttırılarak 60 °C’ ye kadar sıcaklık arttırılmıştır. 1mm’ den 5 mm’ ye kadar elektrot açıklıkları 1mm artırılarak 1 mm- 2 mm – 3 mm – 4mm – 5mm elektrot açıklıkları için deneyler yapılmıştır. Seçilen yağ tiplerine ait delinme gerilimlerinin analizleri için hızlı kurtogram yöntemi kullanılmıştır. Nem deneyleri için ise %40 nem oranı yine %5 arttırılarak deneyler yapılmış, %95 nem oranında deneyler bitirilmiştir. Aynı şekilde mineral, doğal ester ve sentetik ester sıvı yalıtkan tipleri için elektrot açıklıklarına göre delinme gerilimlerine ait analizler kurtogram yönetimi ile hesaplanmıştır.

Kurtogram grafiğinde ne kadar fazla renkte bileşen varsa o kadar çeşitli frekans değerinde deşarj olduğu görülmektedir. Kurtogram değerlerinde farklı frekanslardaki deşarj değerleri farklı renkler ile gösterilmektedir. Sarı turuncu renkler yüksek frekans derecelerini gösterirken yeşil renk tonları orta seviye frekans değerlerini temsil etmektedir. Kurtogram grafiklerinde mavi ve tonlarında oluşan renkler ise düşük frekans değerlerini göstermektedir. Sarı renk desen ve kutusunun uzun veya kısa olmasına göre en yüksek deşarjın görüldüğü kısımdaki uzun çubuk rengi deşarjın daha uzun sürdüğü söylenebilir. Desenin daha kısa olduğu durumlarda ise ani deşarjlar olduğu görülmüştür. Kurtogram grafikleri düşük, orta ve yüksek dereceli frekansları k seviye pencere boyutları ile birlikte detaylı olarak göstermektedir. Bu üç farklı yalıtım sıvısı için delinmenin hemen öncesinde ve delinme anını da kapsayan örnek kaçak akım sinyalleri karşılaştırıldığında neredeyse birbirinin aynısı olarak görülmektedir. Bunun sonucu olarak da kaçak akım sinyalinin bulunduğu grafikleri yorumlamak ve farklılıkları ortaya koymak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle kurtogram grafiklerindeki farklı renklerin, desen ve seviyeleri önemi daha fazla meydana çıkmaktadır.

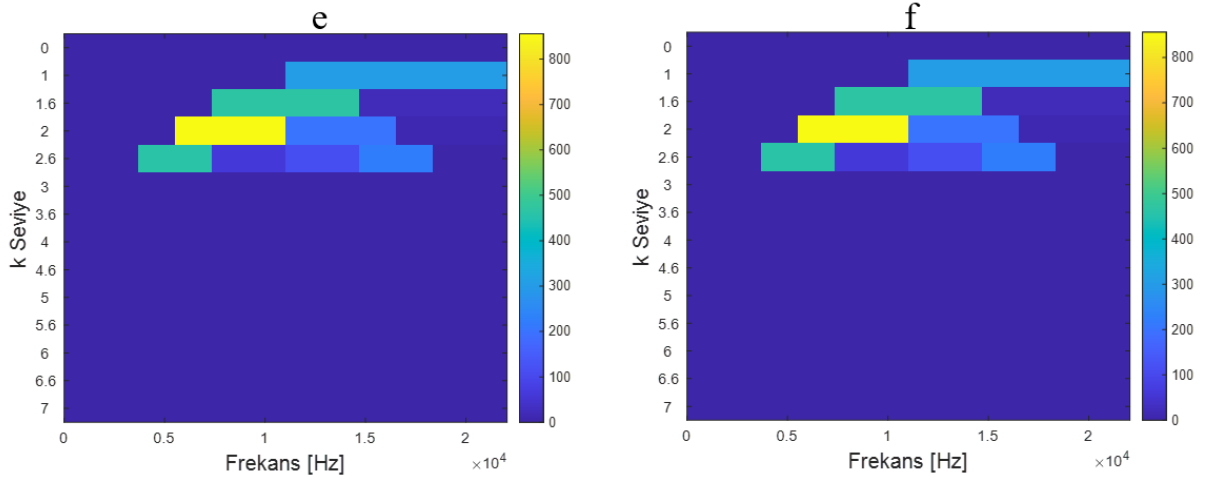
4.1. KURTOGRAM ANALİZİ

4.1.1. Sıcaklığın Değişken Olarak Kullanıldığı Deneylere Ait Sonuçlar

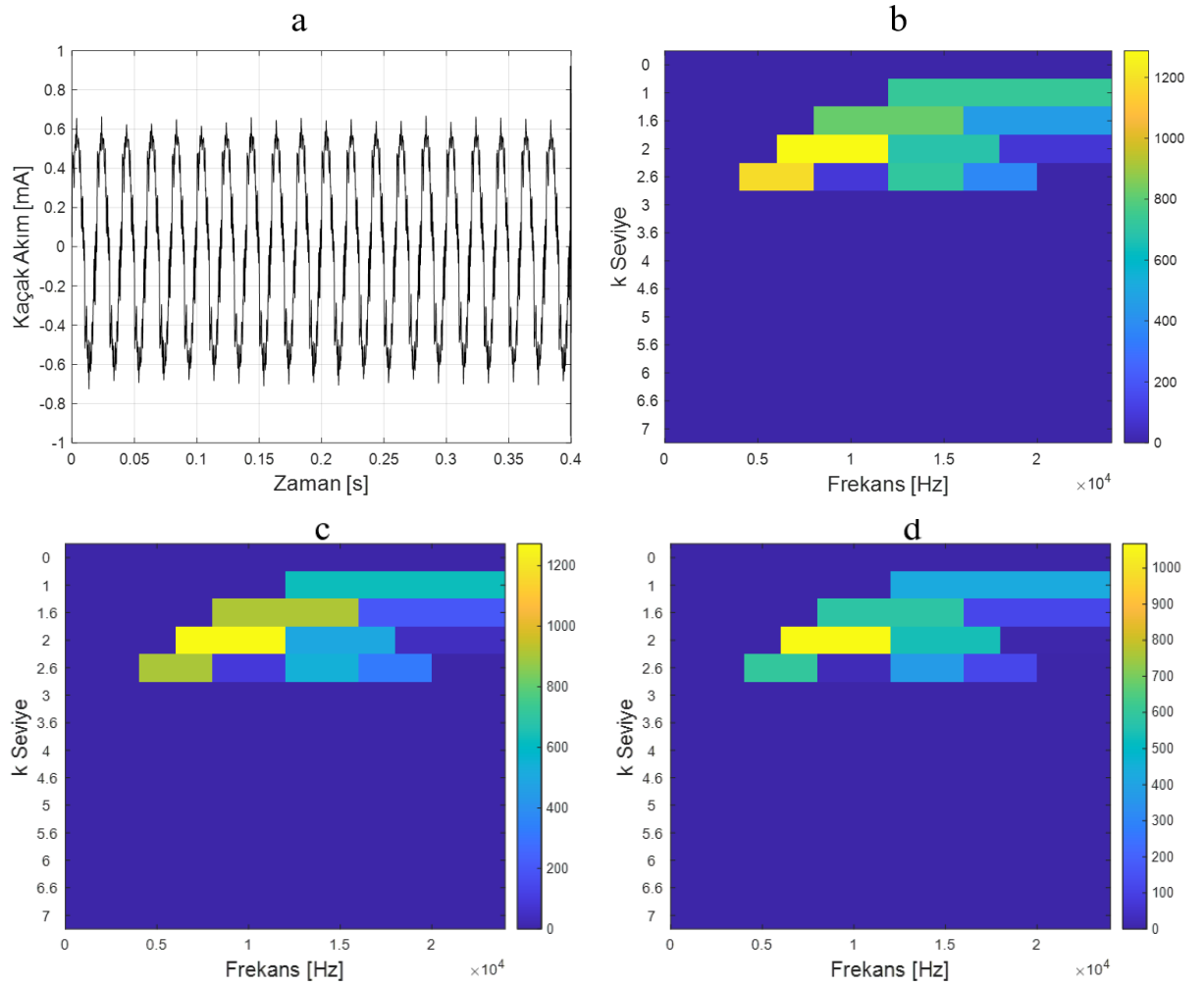
Şekil 4.1’ de 20 °C’ de mineral yağın 1 mm 2. deney tekrarından alınan kaçak akım örnek sinyali ile 1mm’ den 5 mm’ ye kadar elektrot açıklığında delinme gerilimlerine ait kurtogram grafikleri verilmiştir. Mineral yağın ilgili sıcaklıklardaki delinme gerilimlerine ait kurtogram desenleri incelendiğinde 1 mm ve 2 mm için k pencere seviyesinin 1,5 ' de kaldığı görülürken delinme anında 3-4 ve 5 mm elektrot açıklıkları için pencere seviyesinin (k Seviye) 2’ ye geçtiği görülmektedir. Bu da farklı seviyelerdeki kurtosis değerlerini, delinme geriliminin farklı ölçeklerdeki lineer olmayan özelliklerini göstermektedir. Özellikle, belirli bir pencere uzunluğundaki yüksek basıklık değerleri, sinyalin o ölçekte belirgin lineer olmayan özelliklere sahip olduğunu gösterir. Bu, sinyalin çeşitli ölçeklerde nasıl davrandığını anlamak için önemlidir.



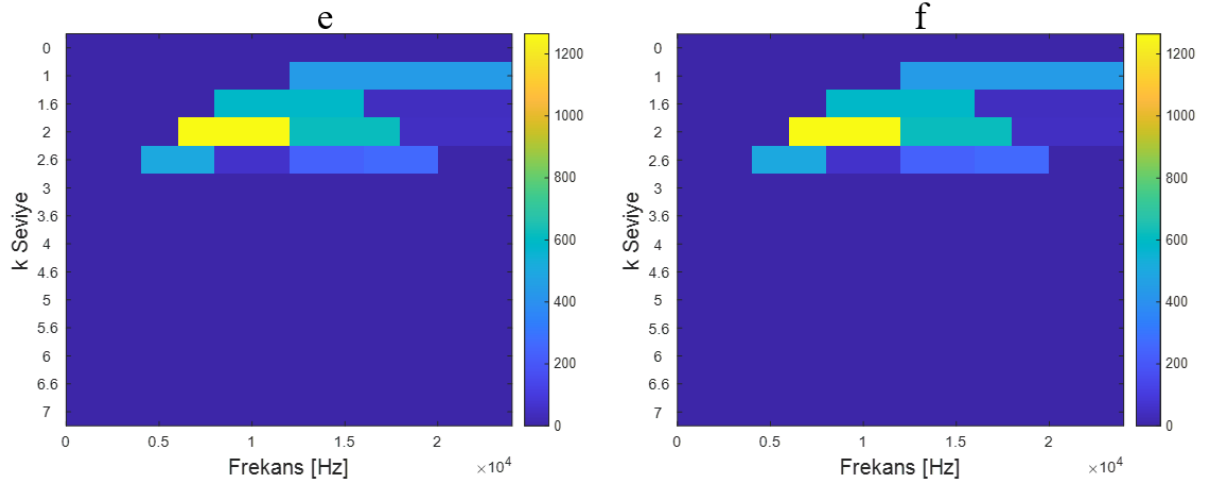
Şekil 4.1: Mineral yağ 20 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)



Şekil 4.1 (devamı): Mineral yağ 20 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)

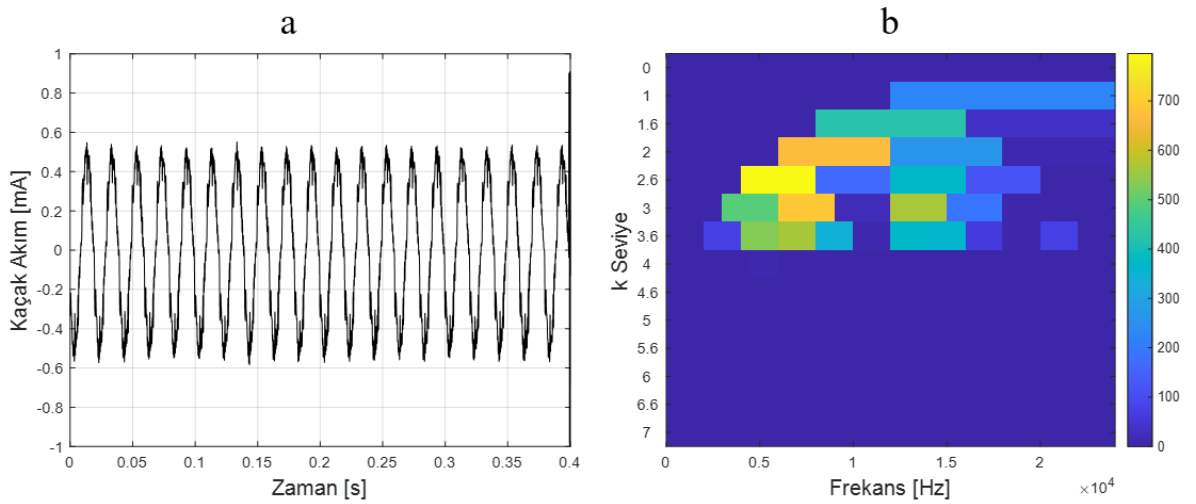


Şekil 4.2: Doğal Ester Sıvı 20 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)

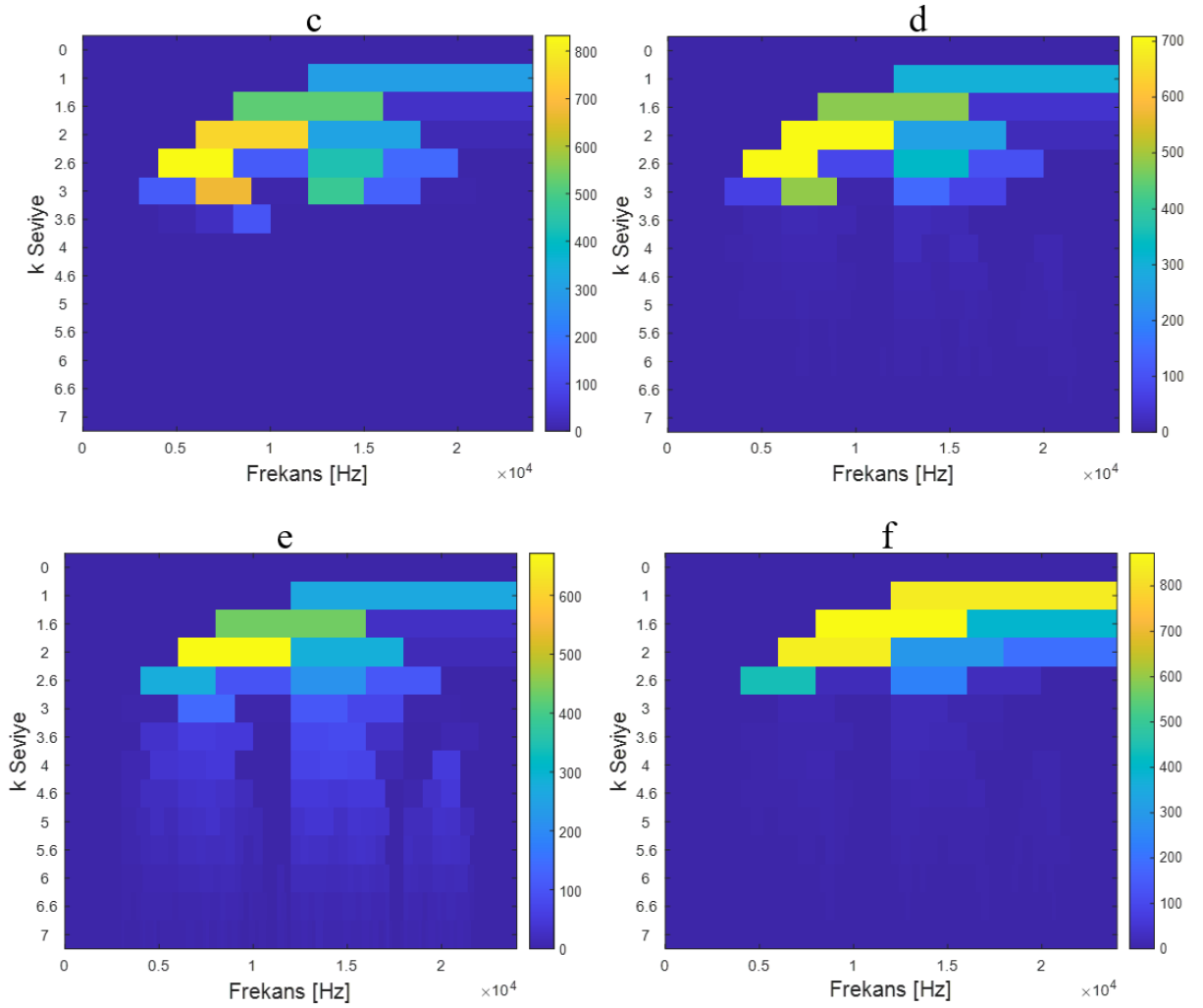


Şekil 4.2 (devamı): Doğal Ester Sıvı 20 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)

20 °C sıcaklık için doğal ester sıvının kurtogram grafikleri ve 3mm elektrot açıklığında 4. Deney için örnek kaçak akım grafiği şekil 4.2' de verilmiştir. Doğal ester sıvının kurtogram grafiklerindeki desenler incelendiğinde hepsinin k seviye 2,5' da deşarjlarının bittiği görülmektedir. 3mm elektrot açıklıkta görülen desenlerde bulunan renk farklılıkları daha yüksek seviye deşarjların olduğunu göstermektedir.



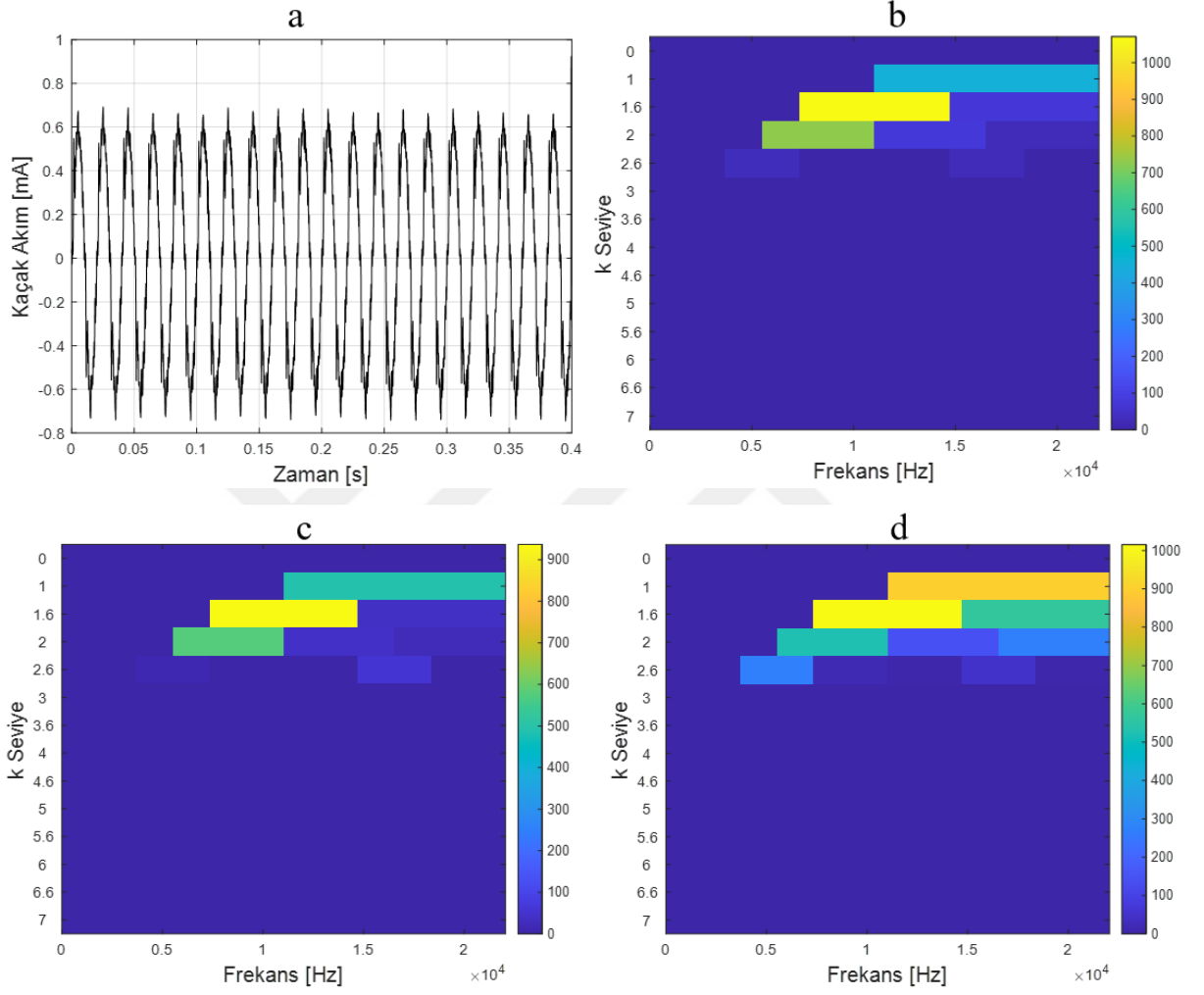
Şekil 4.3: Sentetik ester sıvı 20 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)



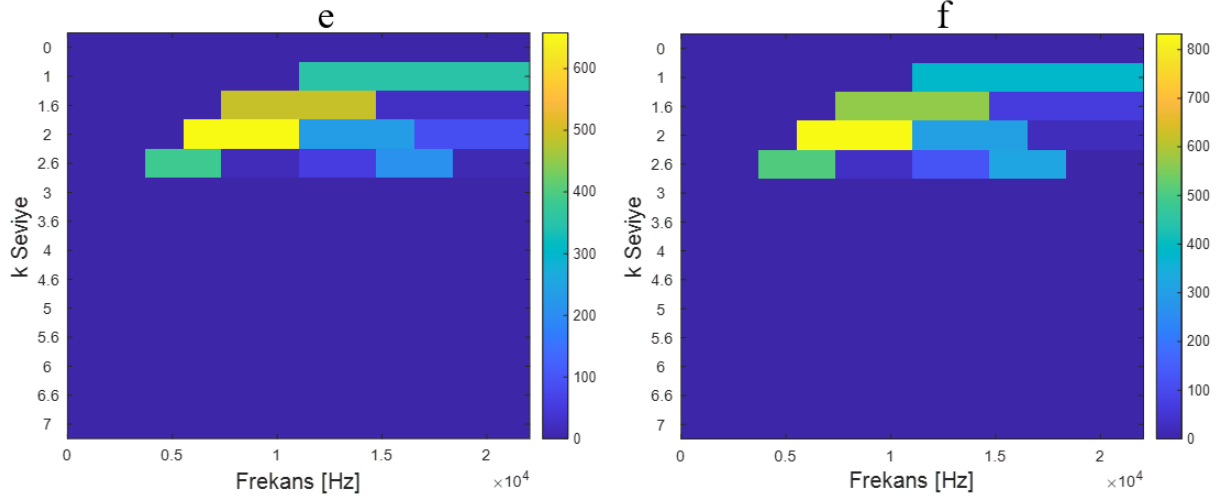
Şekil 4.3 (devamı): Sentetik ester sıvı 20 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)

Şekil 4.3' de sentetik ester sıvı için alınan örnek kaçak akım grafiği 3 mm elektrot açıklığı ve 3. deneyden alınmıştır. Sentetik ester sıvı için en uzun deşarjın 5 mm elektrot açıklığında elde edildiği görülmektedir. 4 mm elektrot açıklığında ise deşarjların 7. Seviyeye kadar devam ettiği gözlenmektedir. 1mm elektrot açıklığında da ise farklı renk skalalarının olduğu görülmekte ve en fazla farklı frekanslarda deşarjların olduğu görülmektedir. 20 °C' de delinme gerilimlerine ait kurtogram grafiklerinin verildiği bu 3 yalıtım sıvısı için için şekil 4.1, 4.2 ve 4.3' de bulunan kurtogram grafiklerindeki renk skalaları değerlendirildiğinde ise doğal ester sıvılardaki deşarj frekanslarının diğer yağlara göre en az olduğu ve sentetik ester sıvılardaki farklı frekanslardaki deşarjların en fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.4' de mineral yağ için 25 °C' de delinme gerilimlerine ait kurtogram grafikleri ve örnek kaçak akım sinyali verilmiştir. Elektrot açıklıklarına ait olan kurtogram grafiklerine göre 3 mm elektrot açıklığı için deşarjlarda

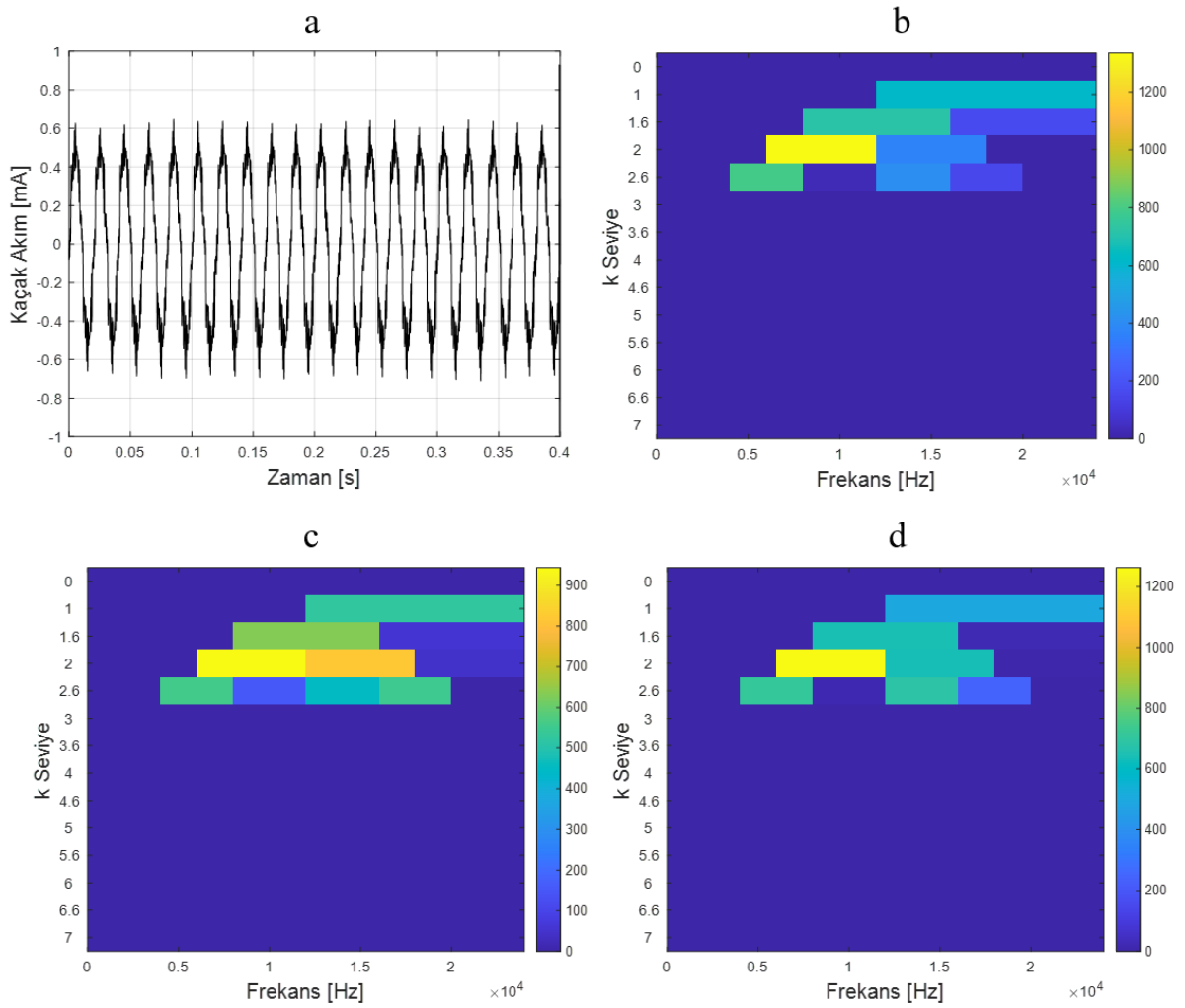
kurtogramdaki renk skalası çeşitliliğinin daha fazla olduğu görülmüştür. Bu nedenle diğer elektrot açıklıklarına göre 3mm elektrot açıklığında daha fazla frekansta deşarj olduğu söylenebilmektedir. Deşarj süresinin ise 1, 2 ve 3mm elektrot açıklıklarında aynı olduğu 4 ve 5 mm açıklıklarda ise daha kısa sürdüğü kurtogram grafiklerinden görülebilmektedir.



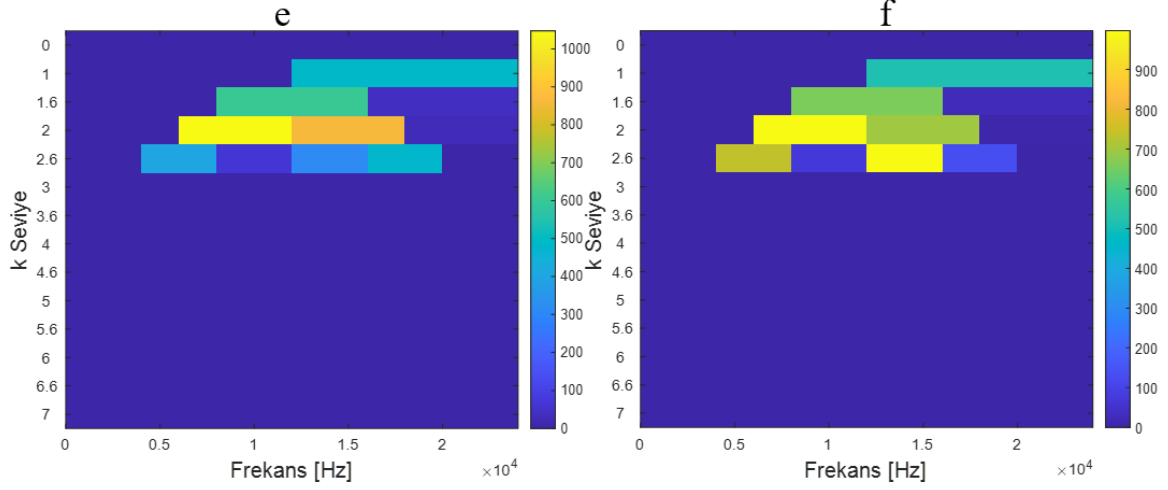
Şekil 4.4: Mineral yağ 25 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)



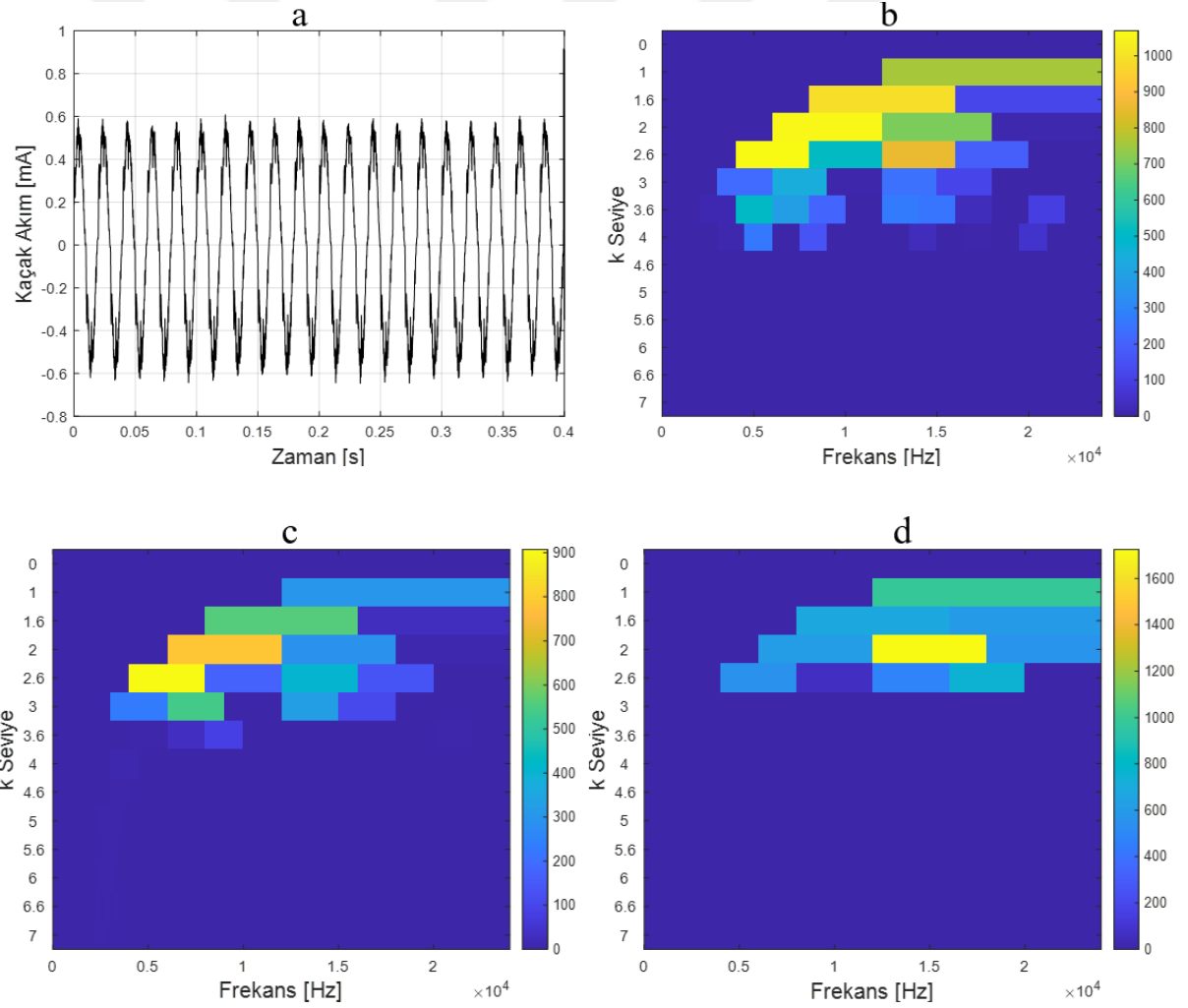
Şekil 4.4(devamı): Mineral yağ 25 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)



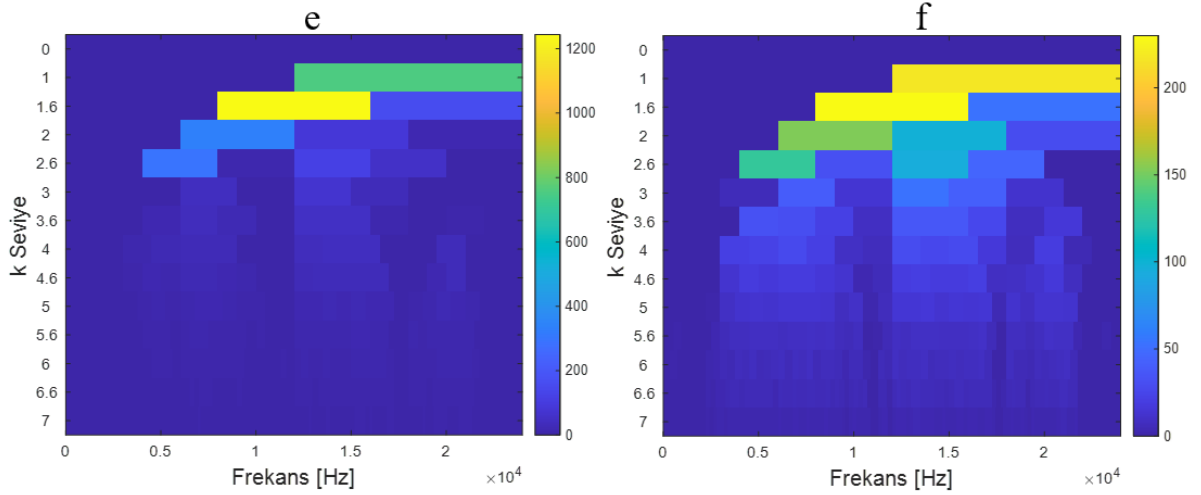
Şekil 4.5: Doğal ester sıvı 25 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)



Şekil 4.5 (devamı): Doğal ester sıvı 25 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)



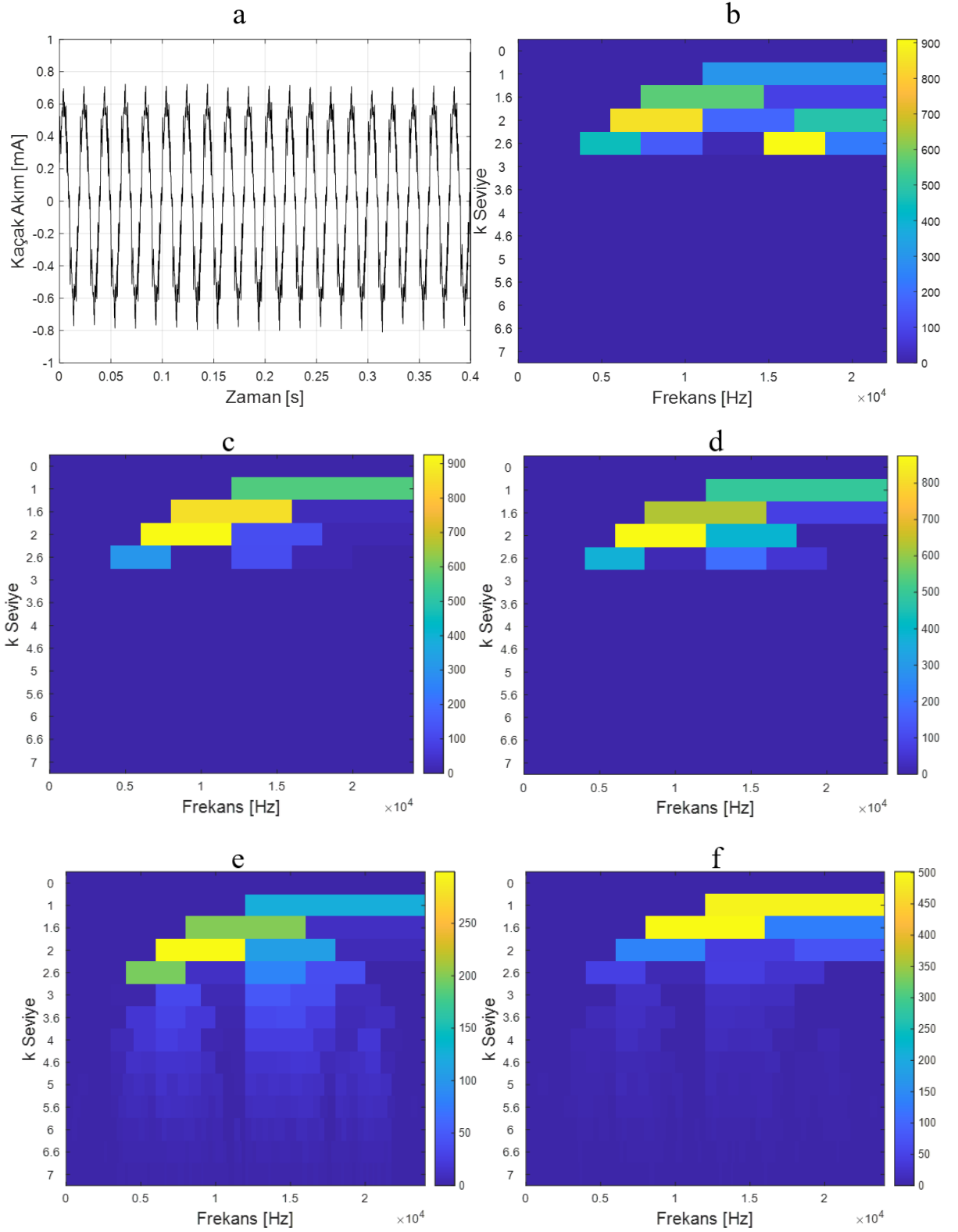
Şekil 4.6: Sentetik ester sıvı 25 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)



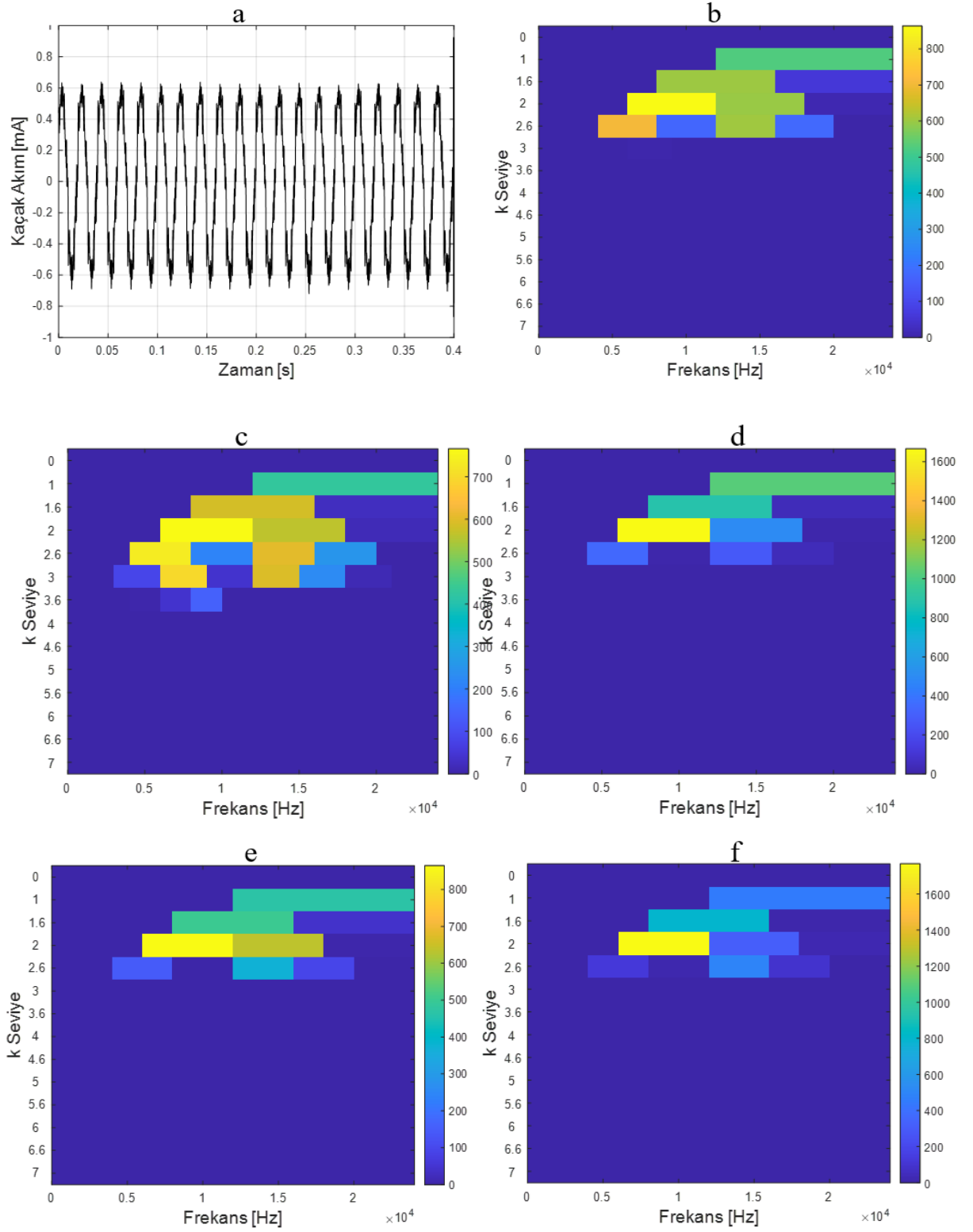
Şekil 4.6 (devamı): Sentetik ester sıvı 25 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)

Doğal ester sıvı için şekil 4.5’ de 25 °C elektrot açıklıkları için verilen kurtogram grafikleri incelendiğinde ise deşarj sürelerinin aynı olduğu görülmektedir. 5 mm elektrot açıklığında görülen 2 ve 2,5 seviyelerinde bulunan sarı renkli deşarjlar için delinmenin iki farklı seviye değerinde görüldüğü söylenebilir. Diğer elektrot açıklıklarına ait kurtogram grafikleri incelendiğinde ise delinme gerilimine ait olan deşarj renginin desenler üzerinde sarı renkte olduğu ve seviye 2 de olduğu görülmektedir.

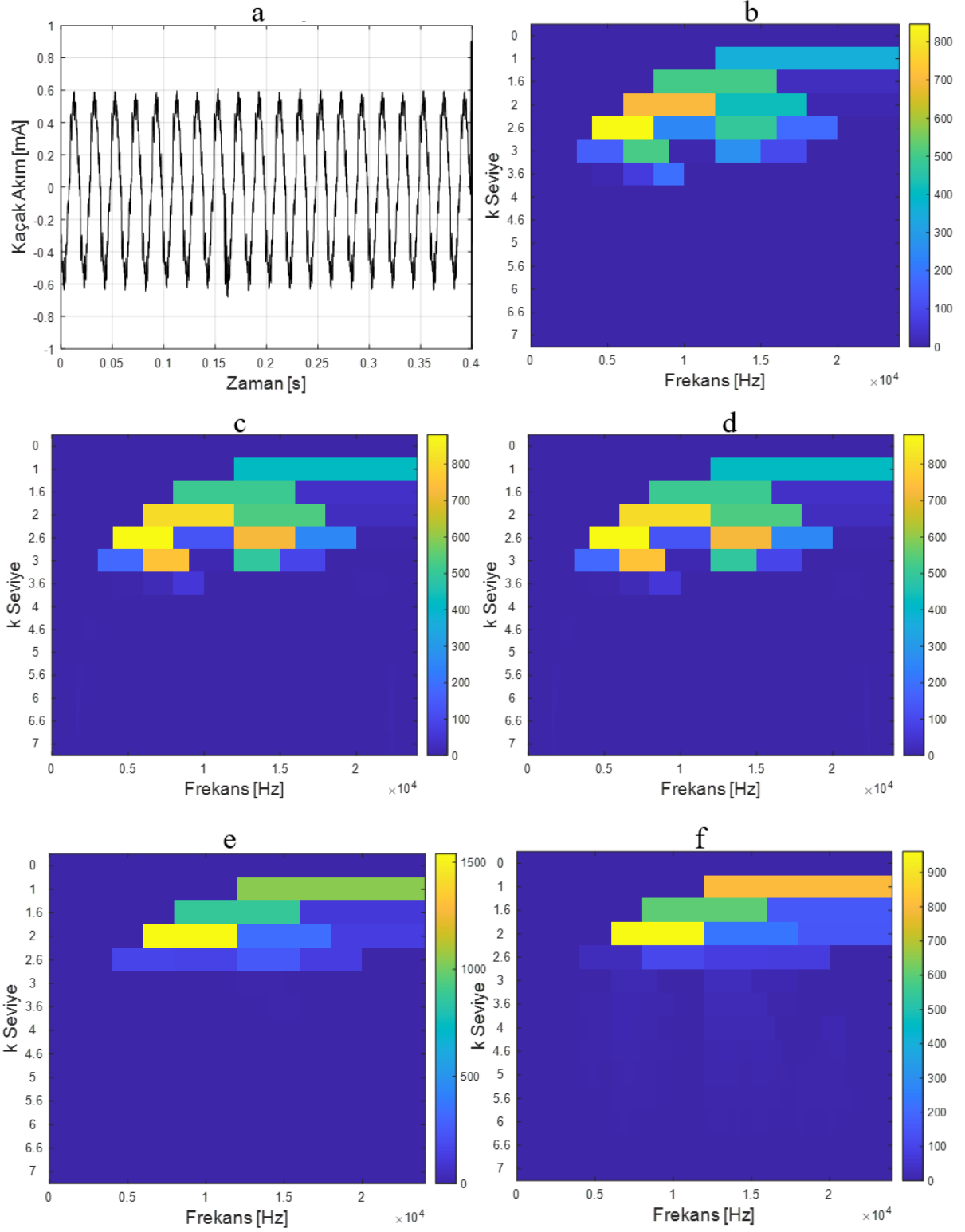
Sentetik ester sıvının 25 °C için elektrot açıklıklarına karşılık gelen delinme gerilimlerine ait kurtogram grafiklerine ait desenler şekil 4.6 da incelendiğinde, 4 ve 5 mm elektrot açıklıklarında deşarjların 7. seviyeye kadar devam ettiği görülmektedir. 3mm ve 4 mm ve 5mm elektrot açıklığı için farklı deşarj frekanslarının 1 mm ve 2 mm ye göre daha az olduğu da kurtogram grafiklerinde açıkça verilmektedir. 25 °C sıcaklıkta 3 farklı dielektrik sıvı için kurtogram desenleri incelendiğinde sentetik ester sıvının deşarj frekanslarının 7. Seviyeye kadar devam ettiği görülmektedir. Farklı frekanslarda deşarjların en fazla görüldüğü durum ise şekil 4.6’ da sentetik ester sıvının 1 mm delinme gerilimin olduğu kurtogram grafiğinde verilmiştir.



Şekil 4.7: Mineral yağ 30 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)



Şekil 4.8: Doğal ester sıvı 30 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



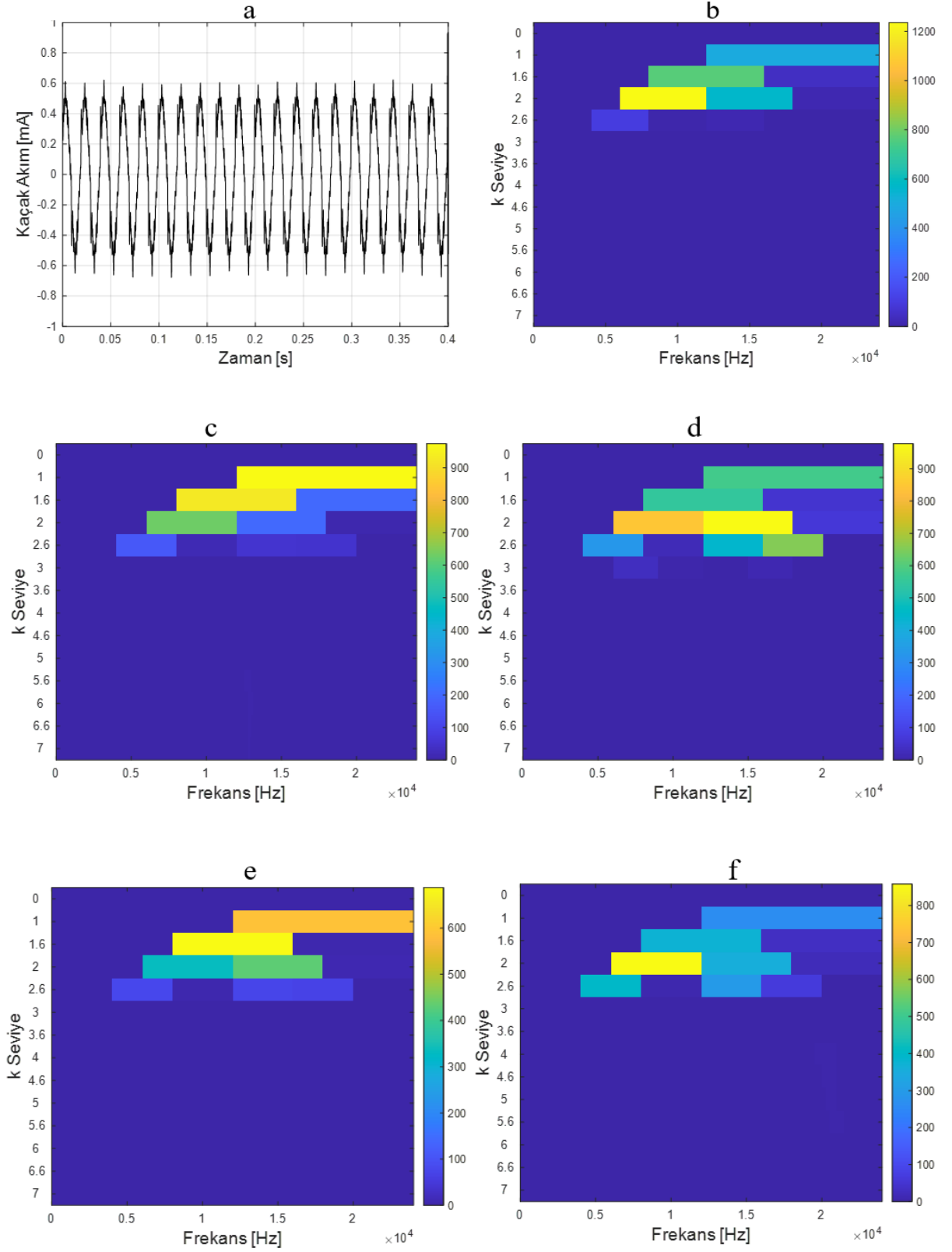
Şekil 4.9: Sentetik ester sıvı 30 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)

30 °C sıcaklıktaki yağlara ait kurtogram desenleri sırasıyla şekil 4.7, 4.8 ve 4.9’ da verilmiştir. Şekil 4.7’ de mineral yağ için delinme gerilimlerine ait kurtogram grafikleri incelendiğinde 4 mm ve 5 mm elektrot açıklıklarında düşük frekanslardaki deşarjların 7. seviyeye kadar devam ettiği görülmektedir. 1 mm elektrot açıklığında kurtogram grafiğindeki sarı desenden anlaşılağı üzere diğere elektrot açıklıklarına göre deşarj süresinin daha kısa olduğı gözlenmektedir. En uzun deşarj süresi ve delinmenin farklı frekanslarda olduğı durum ise 5 mm elektrot açıklığında oluşmuştur.

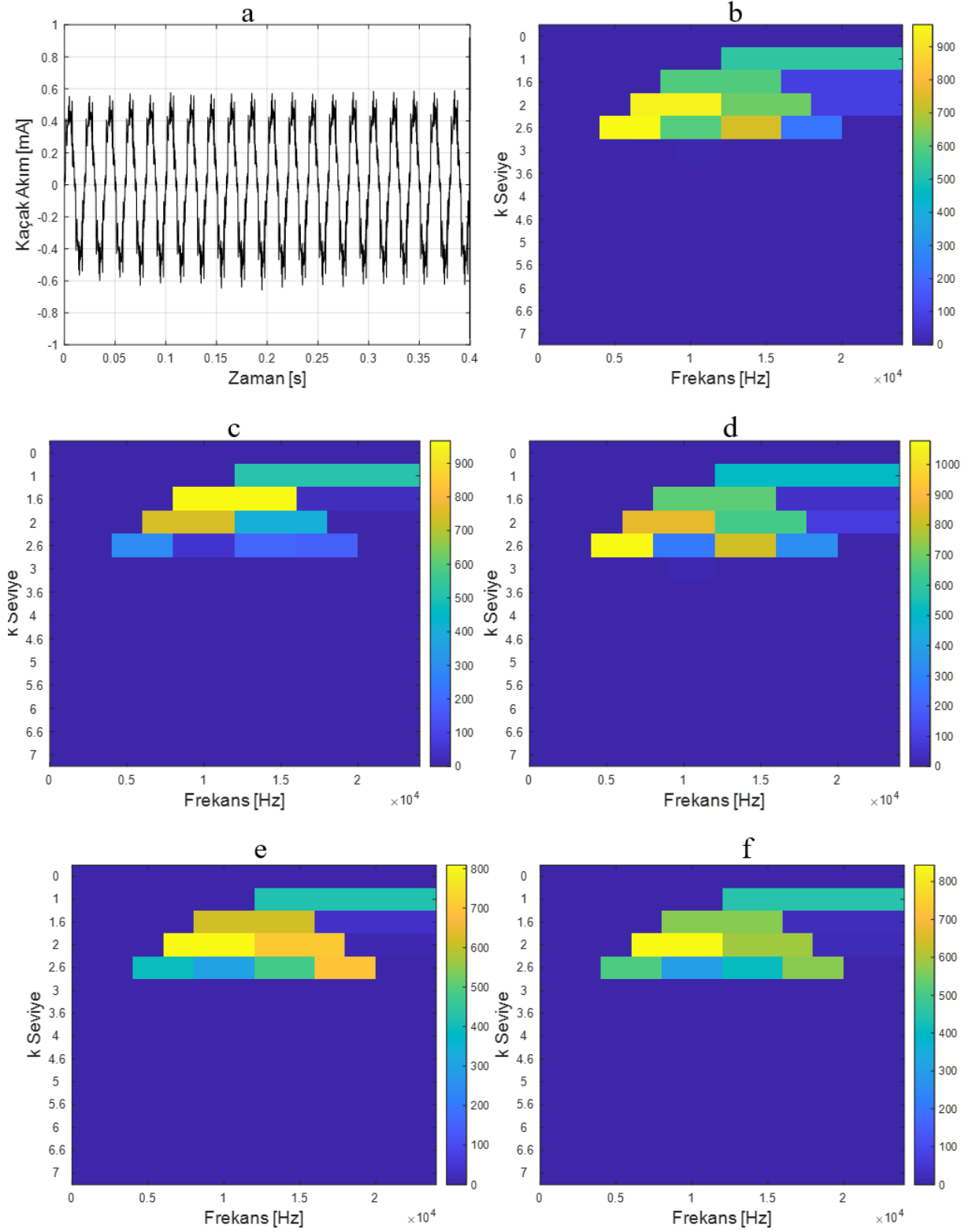
Doğal ester sıvının 30 °C sıcaklıkta 5 farklı elektrot açıklığına göre kurtogram grafikleri şekil 4.9’ da verilmektedir. Şekil 4.9.e’ de gösterildiğı gibi en az frekans çeşitliliğindeki deşarjın 5 mm elektrot açıklığında en fazla frekans çeşitliliğine sahip olan deşarjın ise 3mm elektrot açıklığında olduğı kurtogram grafiklerinden görülmektedir. Aynı zamanda 3 mm elektrot açıklığında deşarjların kurtogramın renk skalasından dolayı yüksek frekanslarda olduğı da söylenebilmektedir.

Yağların kendi arasındaki elektrot açıklıklarında ve ilgili sıcaklıklarda birbirleri arasında da karşılaştırılmaktadır. Sentetik esterin 30 °C’ de delinme gerilimine ait olan kurtogram incelendiğinde ise desenlerdeki renk çeşitliliğinin en az olduğı 4 mm elektrot açıklığı için en az sayıda farklı frekans seviyesinde deşarjların olduğı görülmektedir. 1 mm, 2 mm ve 3mm için deşarj süreleri 4 mm ve 5 mm elektrot açıklıklarına göre daha kısa sürmüştür.

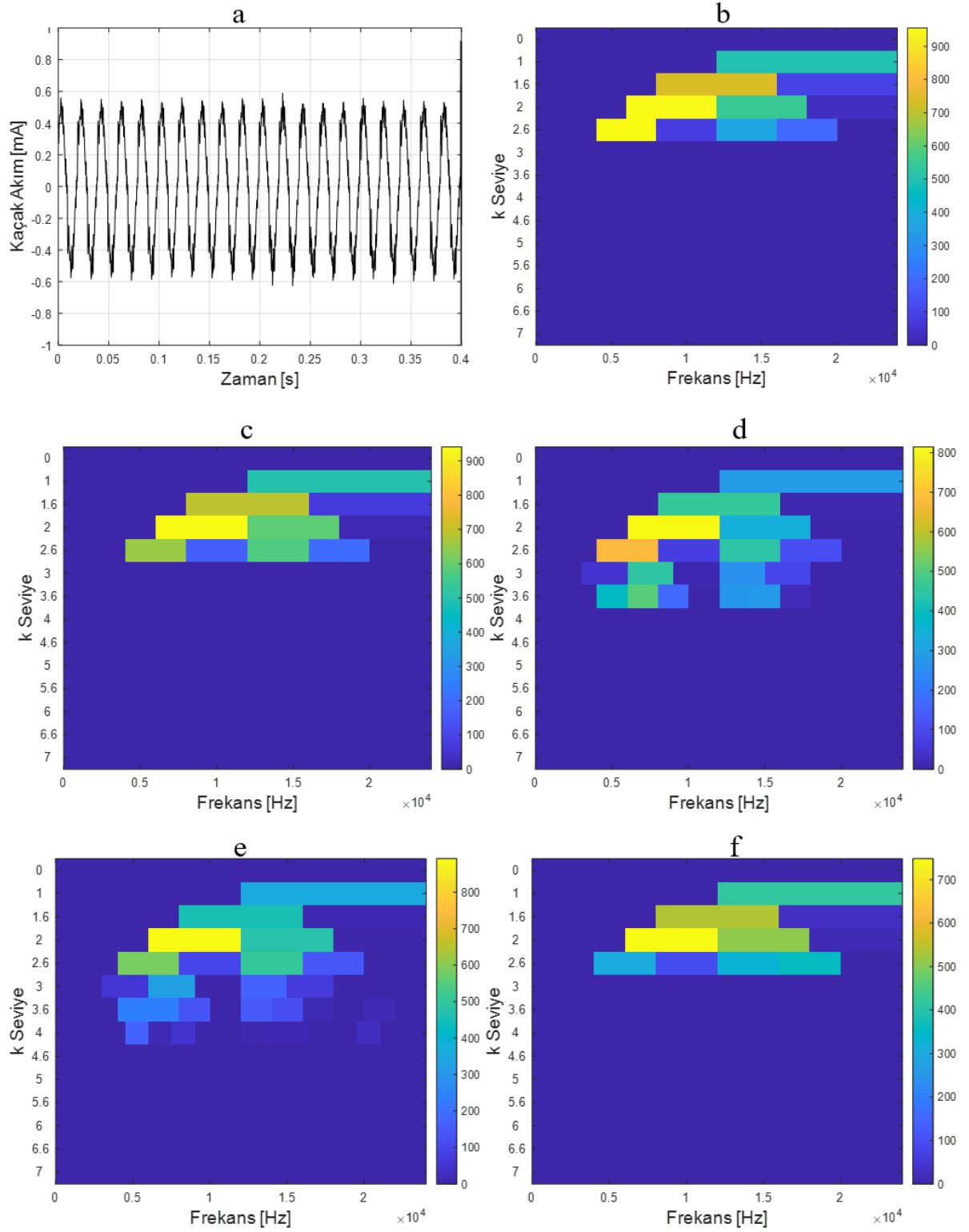
1 mm elektrot açıklığı için mineral yağ kurtogram grafiğı ile 5 mm doğal ester sıvı için kurtogram grafiğinde düşük sayıda farklı frekans değereeri için deşarjlar meydana gelirken, sentetik ester sıvı için 1mm, 2mm ve 3mm ile doğal ester sıvı 3 mm elektrot açıklığında diğere yağ seviyelerine göre en fazla farklı seviyelerde deşarjların olduğunu görmek mümkündür.



Şekil 4.10: Mineral yağ 35 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)



Şekil 4.11: Doğal ester sıvı 35 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)

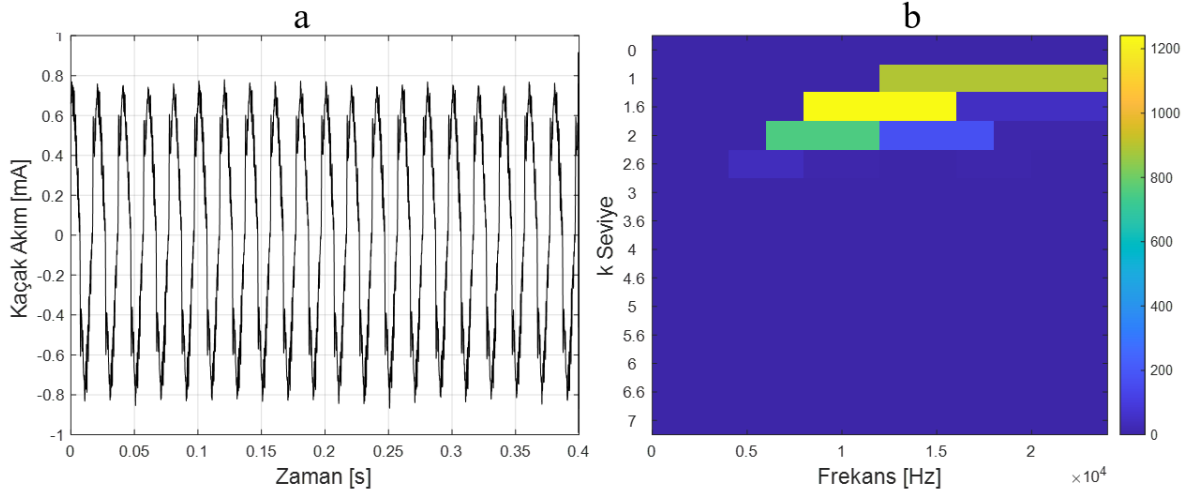


Şekil 4.12: Sentetik ester sıvı 35 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)

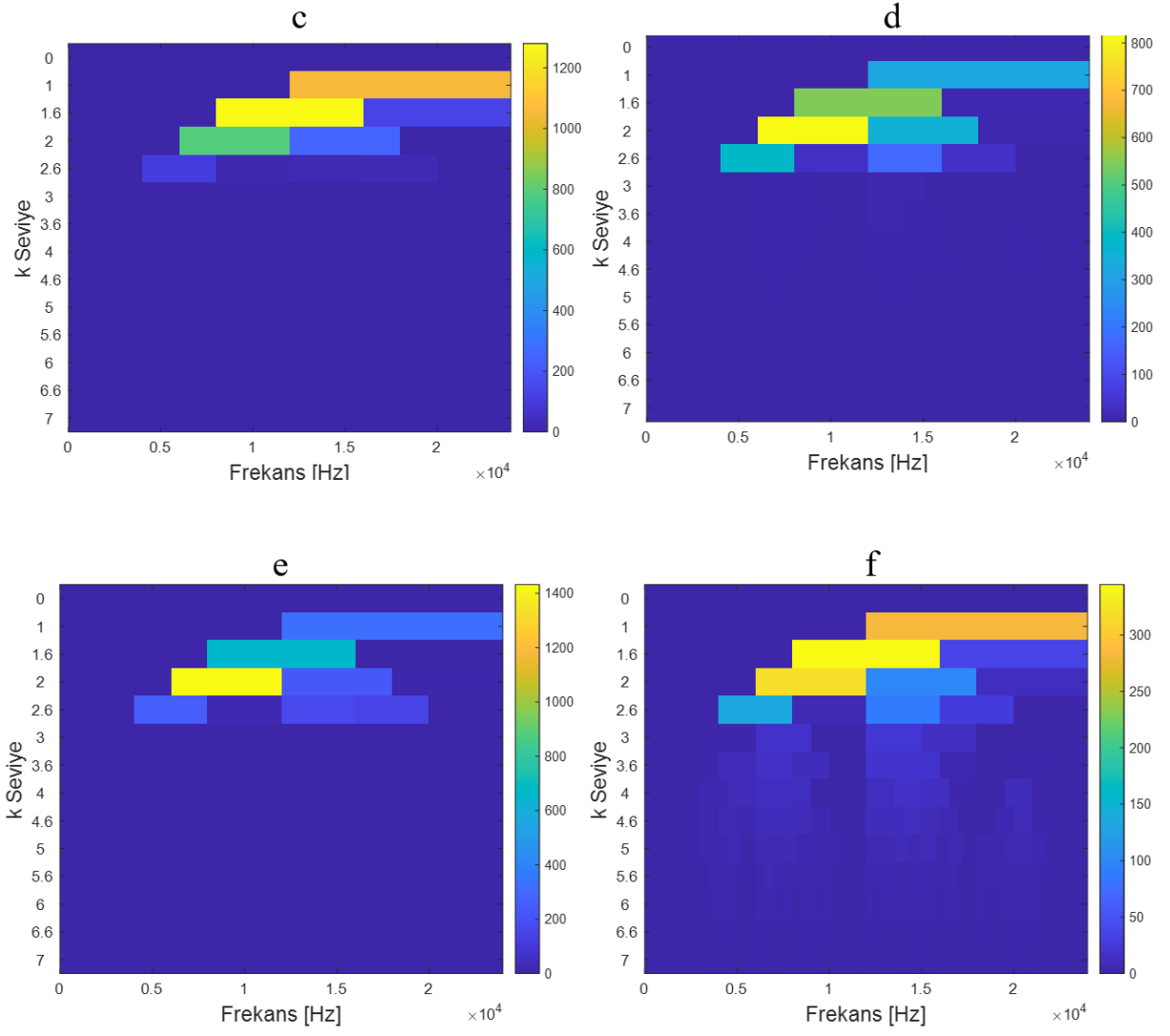
Mineral yağ için 35 °C sıcaklıkta kurtogram grafikleri şekil 4.10’ da sunulmuştur. En uzundeşarj süresinin 3 mm elektrot açıklığında verildiği gözlemlenmektedir. Deşarjların 3 mm elektrot açıklığı için 3. Seviye de devam ettiği diğer elektrot açıklıkları için ise seviye 2,5’ da sonlandığı kurtogram grafiklerinden görülebilmektedir.

Şekil 4.11’ de 35 °C için doğal ester sıvı kurtogram grafikleri incelendiğinde bütün elektrot açıklıkları içindeşarj seviyelerinin 2,5 da sonlandığı fark edilse de sarı renge ait delinme gerilimine ait olan frekansındeşarj süresinin 3 mm elektrot açıklığında en kısa, 2 mm elektrot açıklığında ise en uzun olduğu kurtogram grafiklerinde belirginleşmektedir.

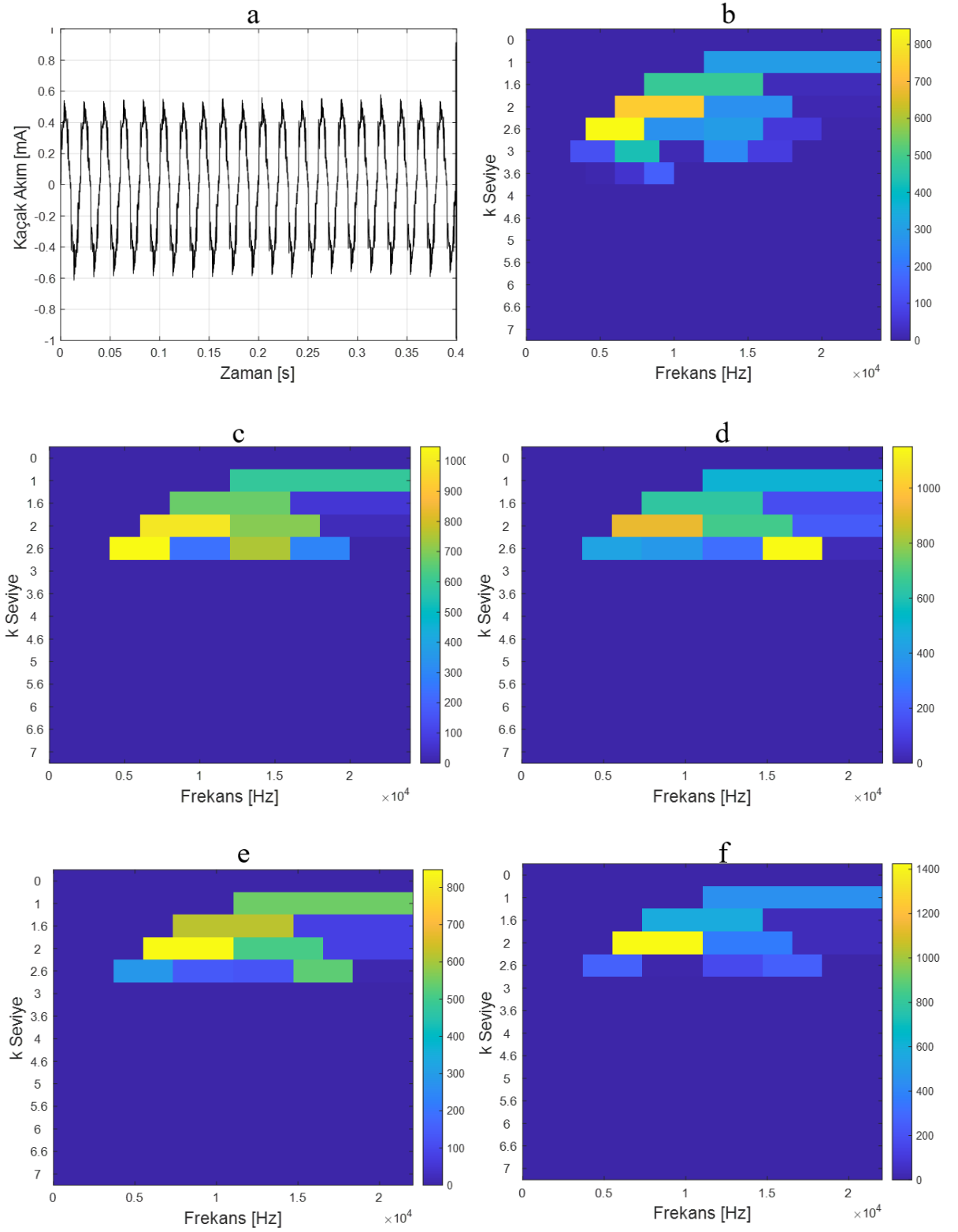
35 °C sıcaklıkta şekil 4.12’ de verilen sentetik ester sıvı için kurtogram grafikleri değerlendirildiğinde delinmenin farklı frekanslarda olduğu tek elektrot açıklığının 1mm olduğu görülmektedir. Diğer elektrot açıklıklarında delinme gerilimine ait frekanslar seviye 2 de iken 1 mm için delinme gerilimine ait frekansların seviyelerin 2 ve 2,5 olduğu şekil 4.11.a’ da görülebilmektedir. 35 °C için bütün yağ tiplerine aitdeşarj süreleri incelendiğinde mineral yağın 3 mm elektrot açıklığı için oluşandeşarj süresinin diğer yağ tiplerine ait kurtogram grafiklerine göre daha uzun olduğu görülmektedir.



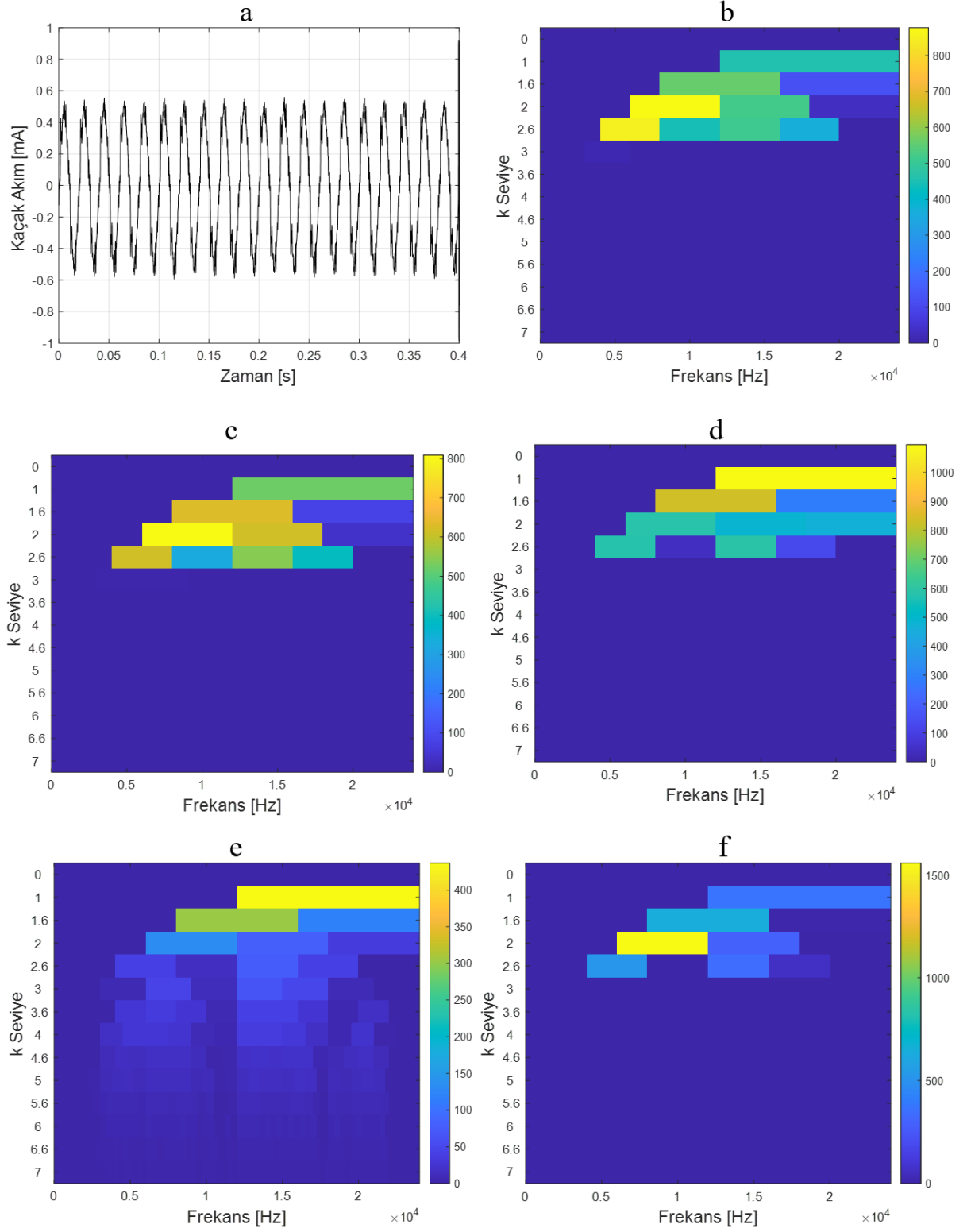
Şekil 4.13: Mineral yağ 40 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)



Şekil 4.13 (devamı): Mineral yağ 40 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)



Şekil 4.14: Doğal ester sıvı 40 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)

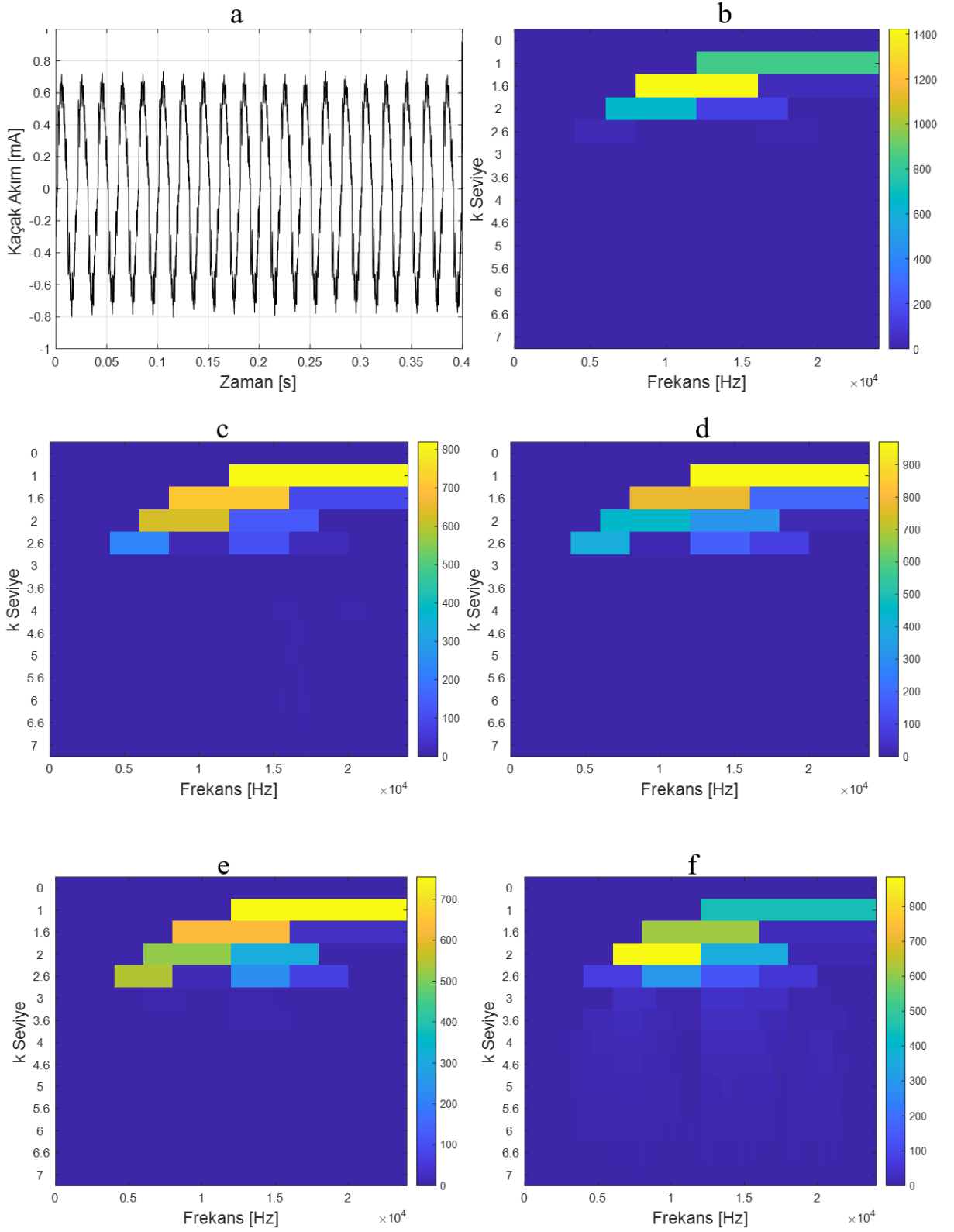


Şekil 4.15: Sentetik ester sıvı 40 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f:d=5mm, elektrot açıklıkları)

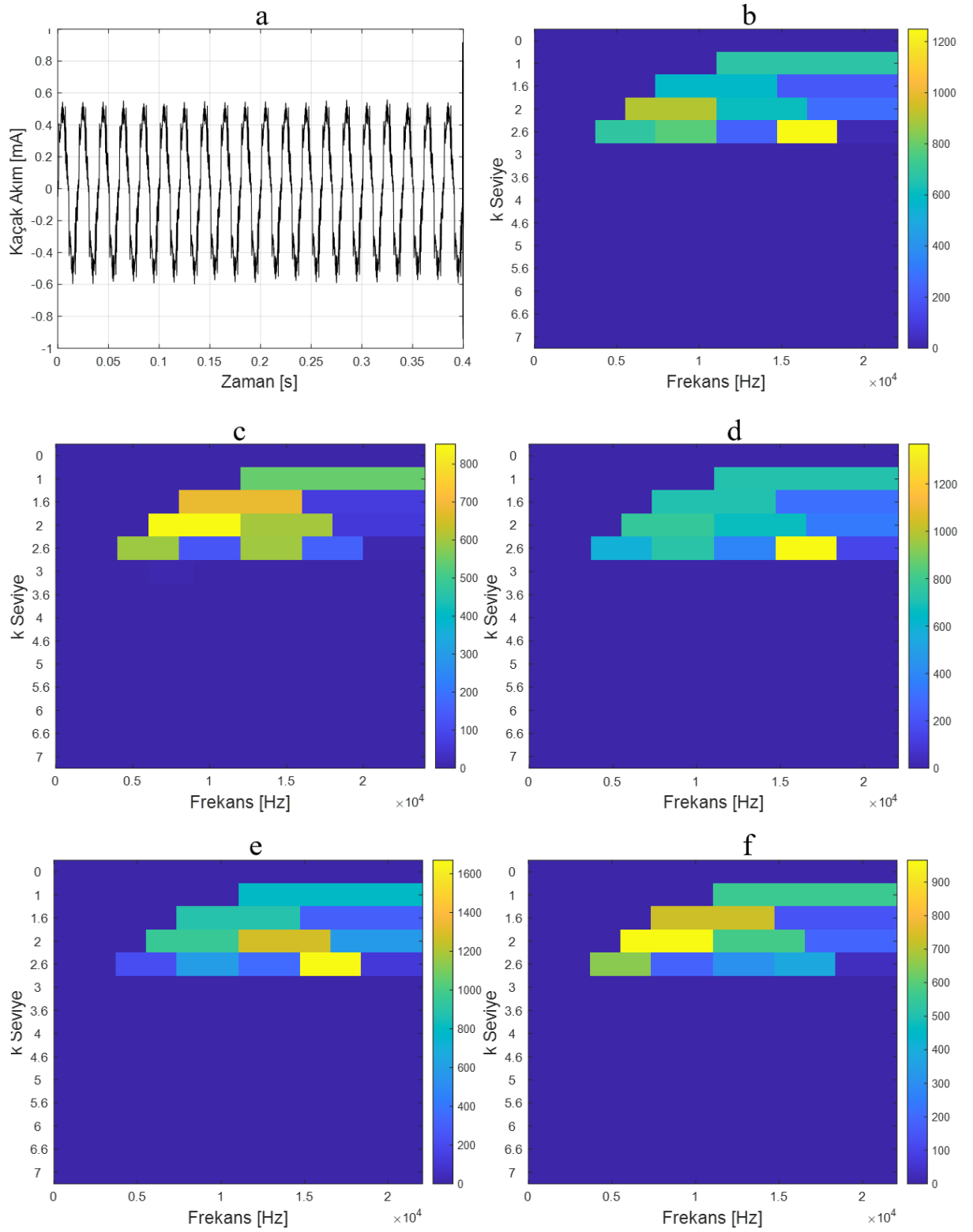
Mineral yağın 40 °C’ de de kurtogram grafikleri ve örnek kaçak akım değeri şekil 4.13’ de sunulmuştur. 4 mm elektrot açıklığında oluşan deşarjlar diğer elektrot açıklıklarındaki deşarjlara göre en düşük seviyede kalmıştır. 5mm elektrot açıklığında ise düşük seviyedeki deşarjlar 7 seviyeye kadar devam etmektedir. Delinmeyi gerilimine ait frekansları gösteren sarı renk deseni 4 mm elektrot açıklıklarında 2. Seviyede iken diğer elektrot açıklıklarında seviye 1,5’ da bulunmaktadır.

Şekil 4.14’ de görüleceği üzere doğal ester sıvıya ait deşarjların en düşük frekanslara ait olduğu elektrot açıklığı 5mm de bulunmaktadır. Bu elektrot açıklıklarında seviyenin en yüksek olduğu elektrot açıklığı 1 mm ile b grafiğinde verilmektedir. Diğer açıklıklarda deşarjlar 2. Seviyede kalırken 1mm elektrot açıklığında seviye 3,5’ da sonlanmıştır.

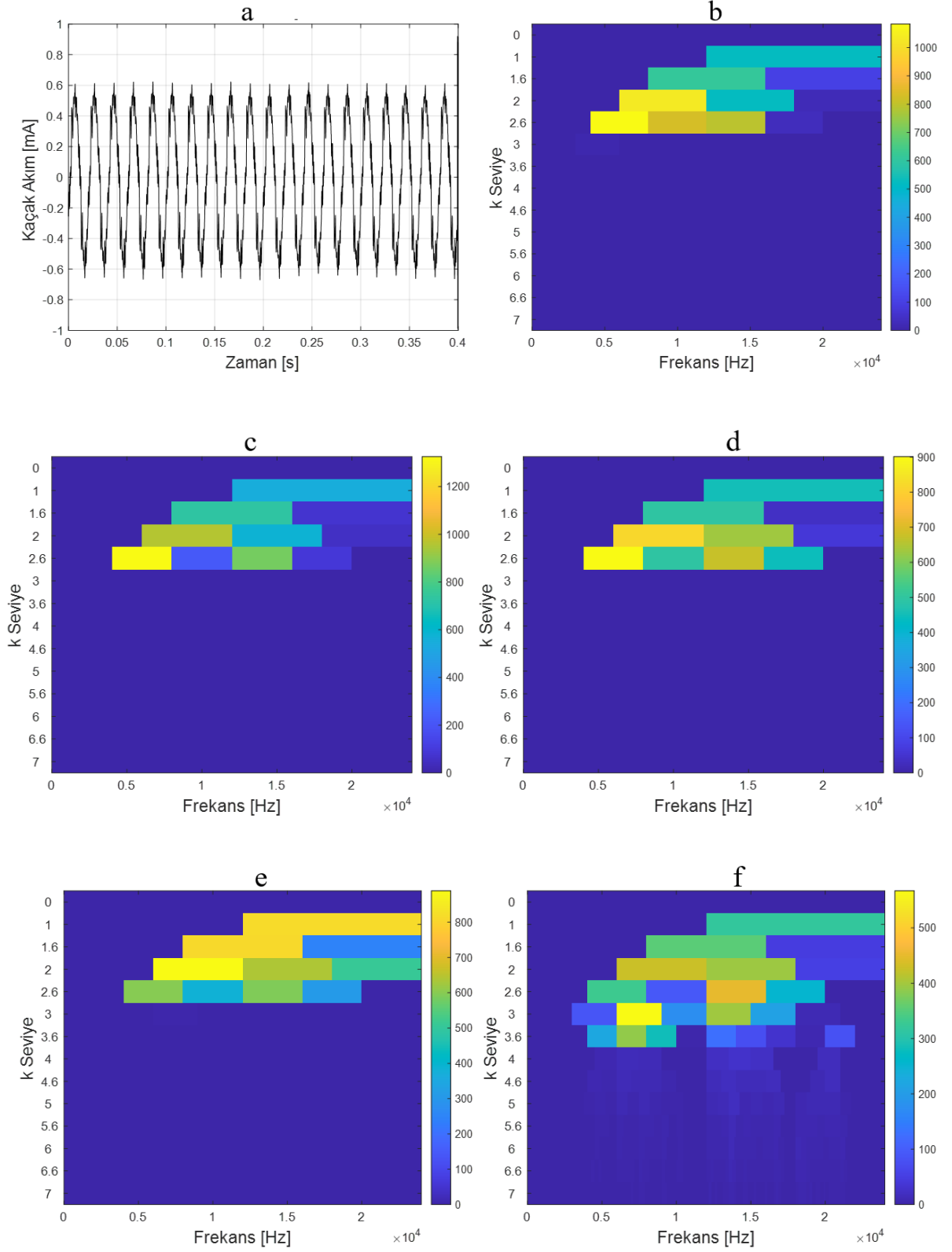
Sentetik ester sıvının şekil 4.15’ de verilen kurtogram grafiklerinden 4 mm elektrot açıklığında düşük frekanstaki deşarjların seviye 7’ ye kadar devam ettiği görülmüştür. Farklı frekanslarda deşarjların en az görüldüğü elektrot açıklığı ise 5 mm elektrot açıklığı ile f grafiğidir. 40 °C’ de 3 farklı sıvı dielektrik tipi için bütün grafikler incelendiğinde ise en uzun deşarj süresinin sentetik ester sıvının 3mm elektrot açıklığında olduğu grafiklerden görülmektedir.



Şekil 4.16: Mineral yağ 45 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



Şekil 4.17: Doğal ester sıvı 45 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



Şekil 4.18: Sentetik ester sıvı 45 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Mineral yağın kullanıldığı 45 °C’ de yapılan deneyler sonucu elde edilen kurtogram grafikleri şekil 4.16’ da görülmektedir. Elektrot açıklıklarına göre grafikler incelendiğinde en kısa deşarj 4.16.f grafiğinde verilen 5 mm elektrot açıklığında olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda düşük frekansta deşarjların diğer elektrot açıklıkları için 2 ve 2,5. seviyede sonlanırken 5 mm açıklık için seviye 7 ye kadar devam ettiği gözlenmektedir.

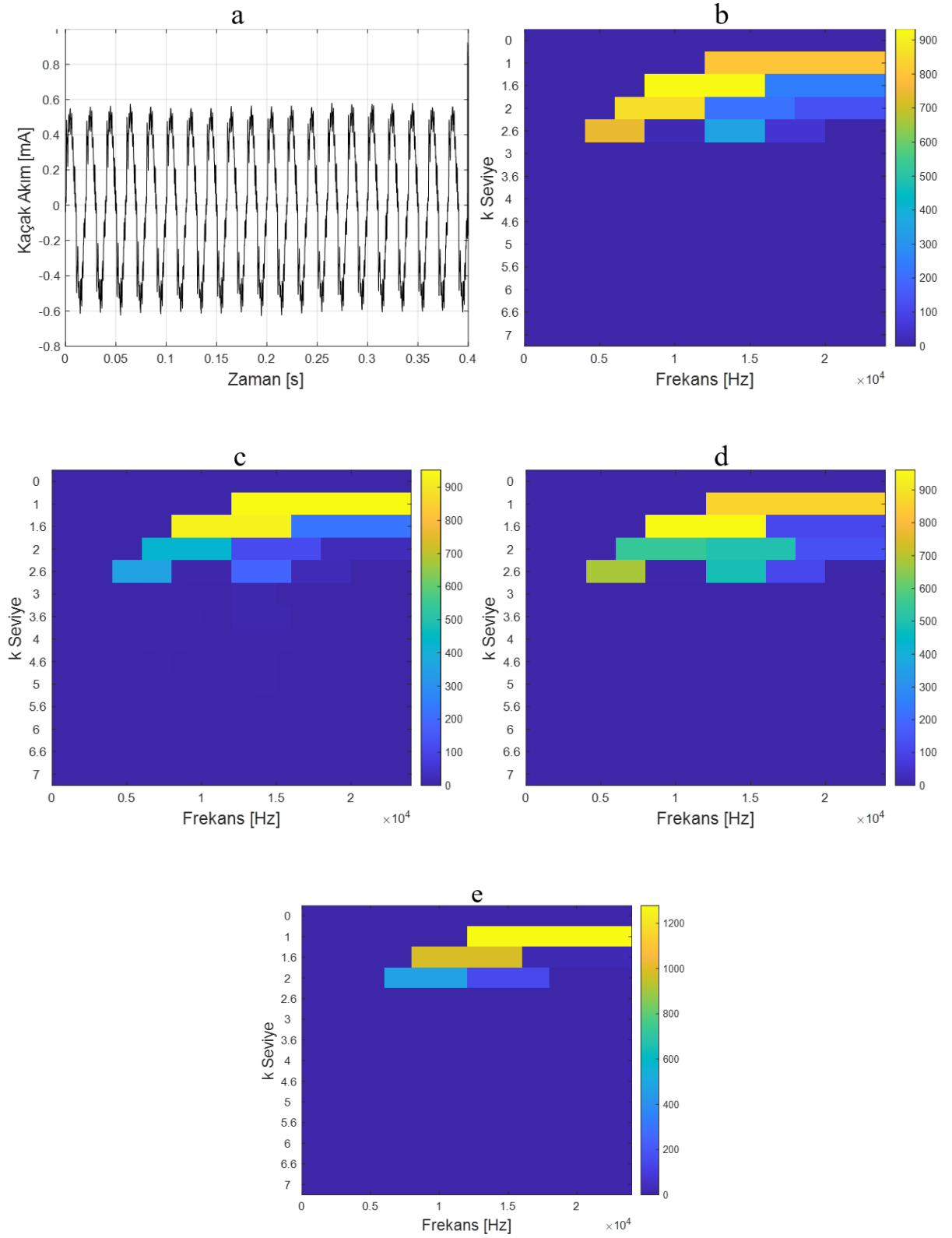
Şekil 4.17’ de doğal ester sıvıda 45 °C sıcaklıkta yapılan delinme gerilimi deneylerinden analiz edilen kurtogram grafikleri incelendiğinde ise yüksek frekanslı deşarjların en çok 2 mm elektrot açıklığında olduğu görülmektedir. Bütün elektrot açıklıklarında seviye 2,5’ da deşarjlar sonlanmıştır.

45 °C sıcaklıkta sentetik esterin kurtogram grafikleri Şekil 4.18’ de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde en kısa süreli delinme geriliminin 5 mm elektrot açıklığında oluşmuştur. Aynı zamanda 5 mm açıklıkta düşük frekanslardaki deşarjların seviye 7’ ye kadar devam ettiği şekil 18.f grafiğinde açıkça görülmektedir.

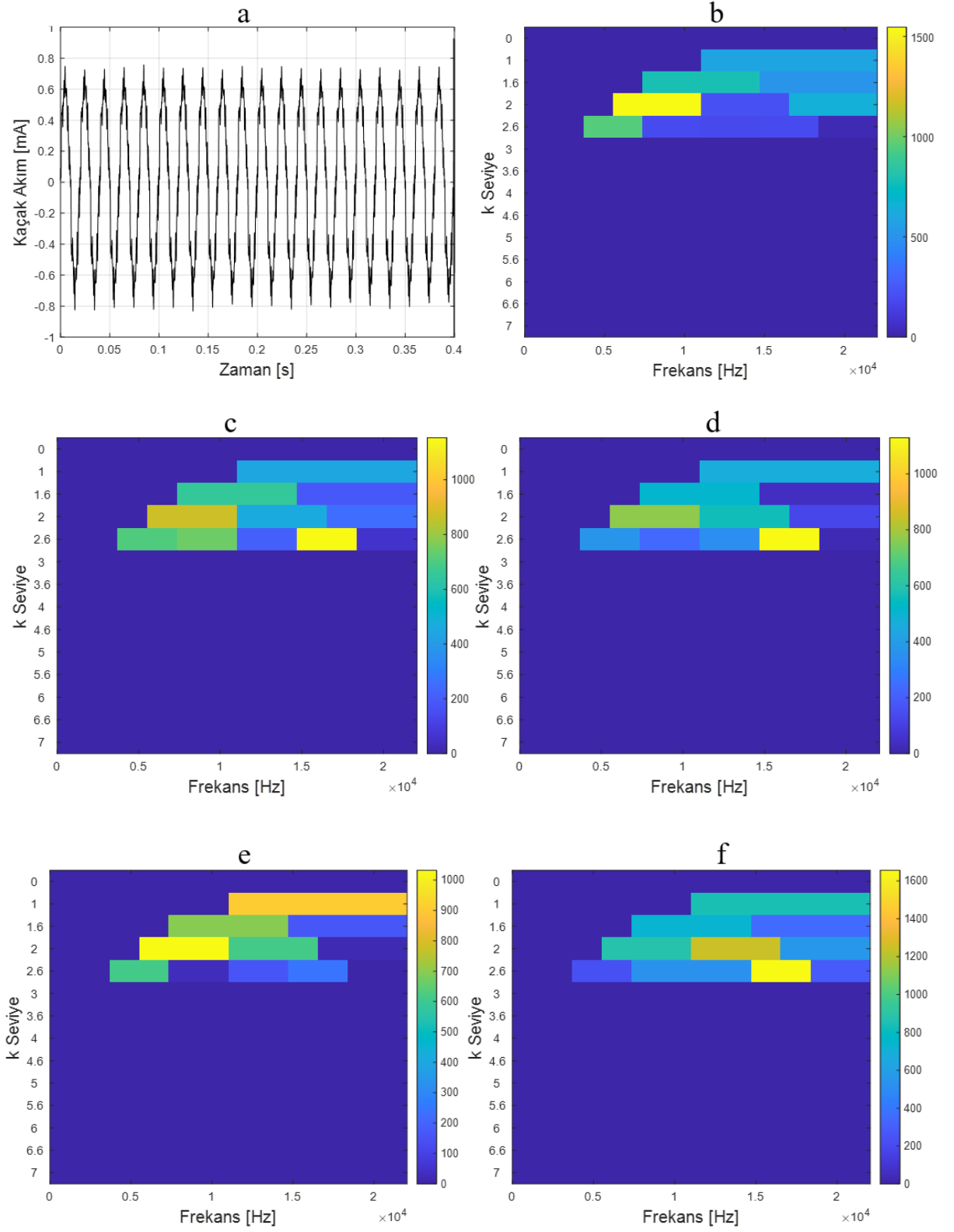
Bütün yağ tipleri için 45 °C sıcaklıkta bütün elektrot açıklıklarına bağlı grafikler incelendiğinde en uzun delinme gerilimi süresinin mineral yağda olduğu gözlenmektedir. En kısa delinme gerilimi süresinin ise sentetik ester sıvının 5 mm elektrot açıklığında olduğu görülmektedir.

Şekil 4.19’ da görüldüğü üzere mineral yağ 50 °C’ de 4 mm elektrot açıklığı için bir delinme meydana gelmemiştir. Diğer delinme seviyeleri incelendiğinde 1 ve 1,5 seviyelerinde olduğu görülmektedir. En kısa delinme geriliminin 3 mm elektrot açıklığında olduğu görülmektedir. En düşük frekans seviyeleri ise 2mm elektrot açıklığında oluşmuştur.

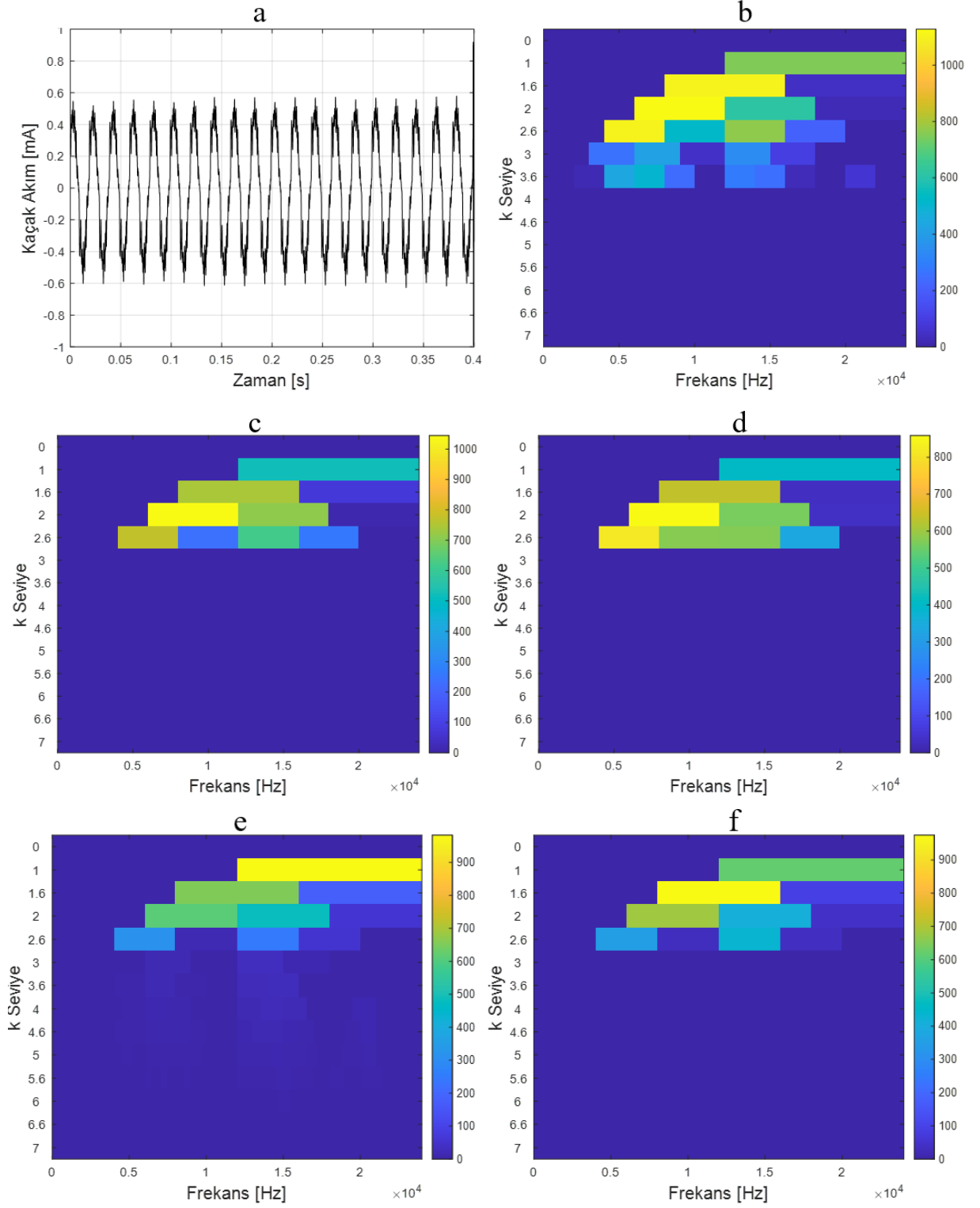
Doğal esterin yağın şekil 4.20’ de verilen kurtogram grafikleri detaylı olarak görülmektedir. Delinme gerilimleri incelendiğinde mineral yağa göre daha kısa süren delinme gerilimleri olduğu görülmüştür. Delinme seviyeleri ise 2 ve 2,5 seviyelerinde oluşmuştur.



Şekil 4.19: Mineral yağ 50 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=5 mm, elektrot açıklıkları).



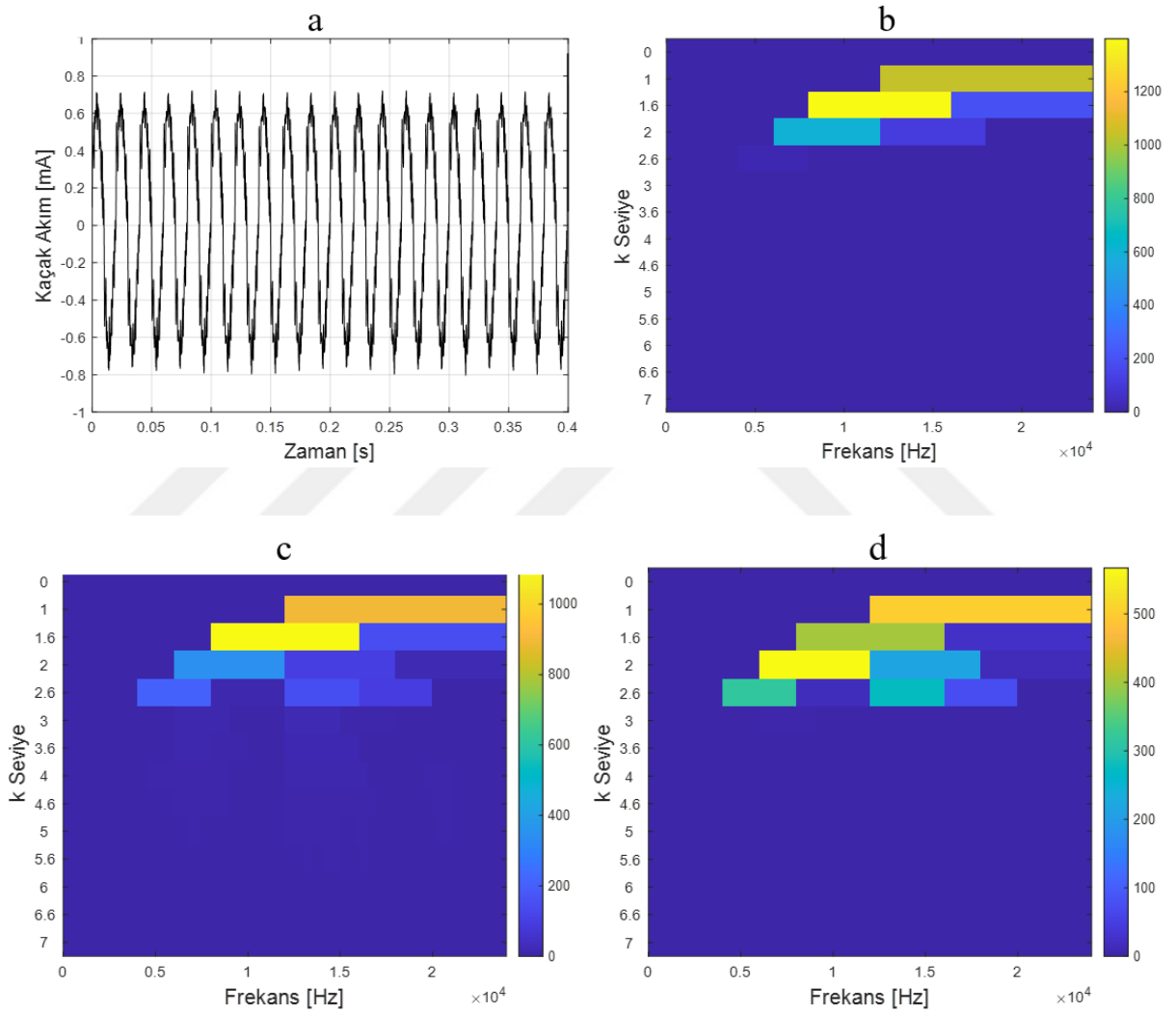
Şekil 4.20: Doğal ester sıvı 50 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)



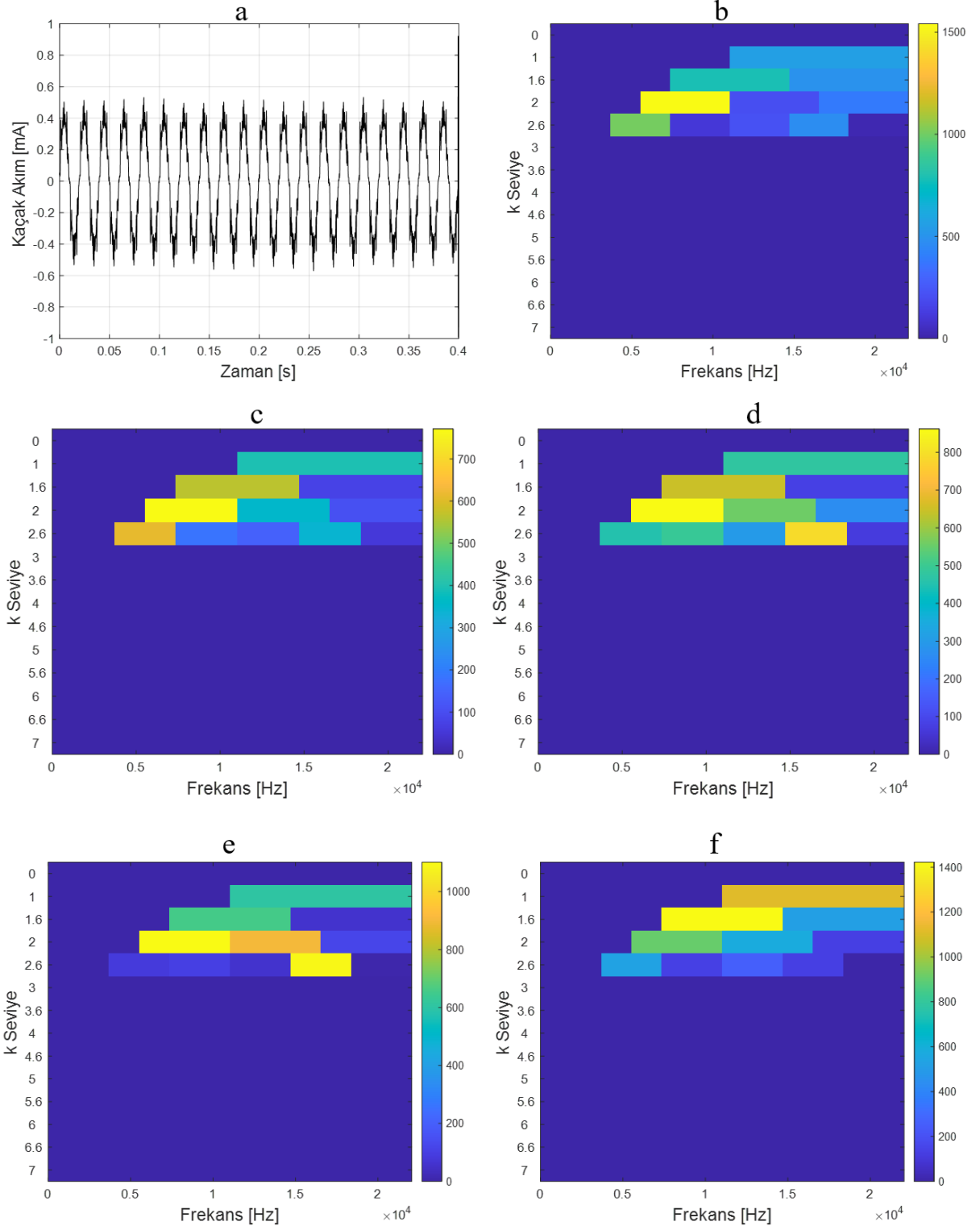
Şekil 4.21: Sentetik ester sıvı 50 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: $d=1$ mm, c: $d=2$ mm d: $d=3$ mm, e: $d=4$ mm, f: $d=5$ mm, elektrot açıklıkları).

Sentetik esterın delinme gerilimlerine bakıldığında 1 mm elektrot açıklığı için Şekil 4.21.a' da görülen grafikte delinme deşarjlarının 3 seviyede birden oluştuğu görülmüştür. 4 mm elektrot açıklıklarında düşük frekansta deşarjların devam ettiği e grafiğinde görülmektedir.

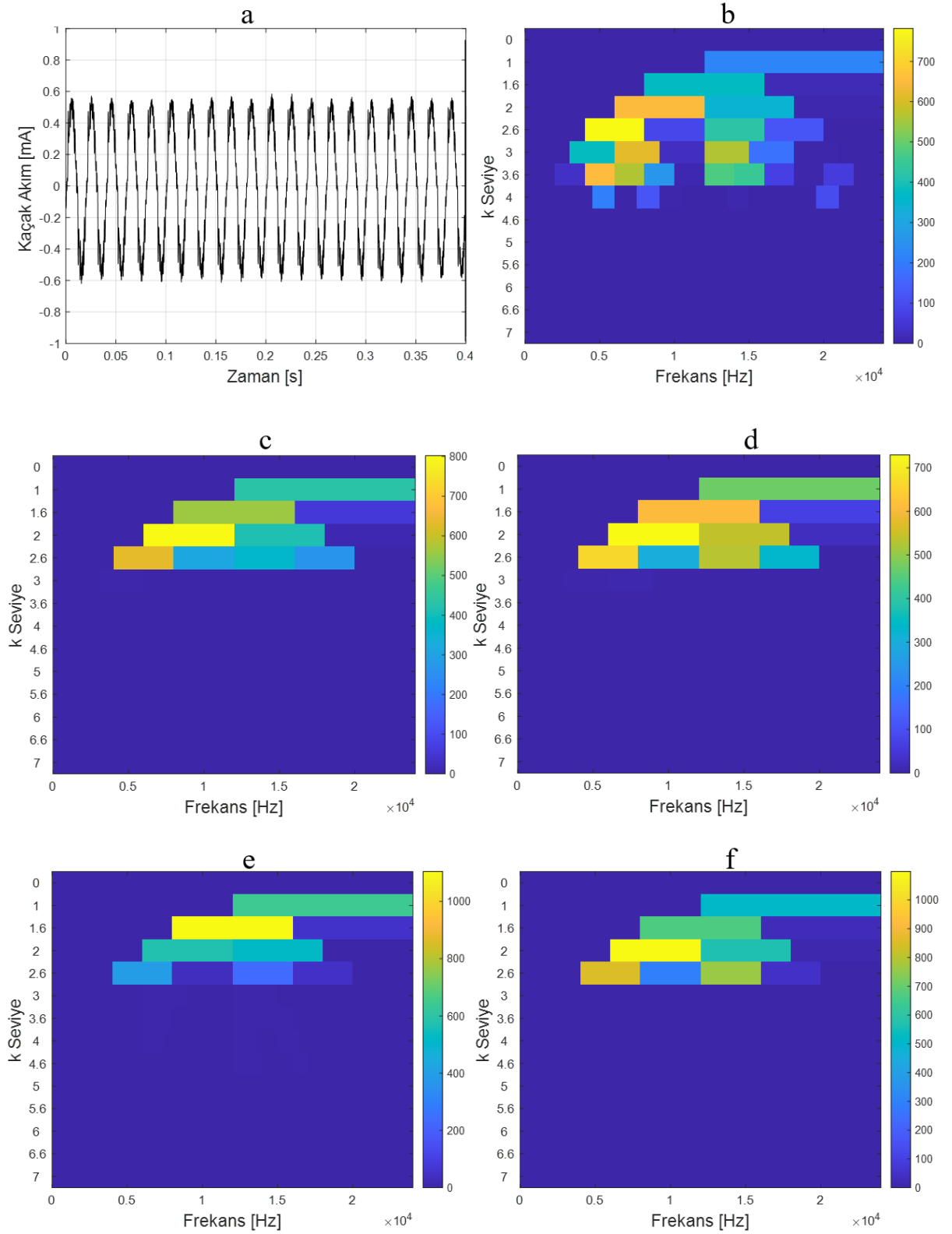
Sıcaklığın 50 °C olduğu durumda ise yüksek frekanslı deşarjların sentetik ester sıvılarda diğer yağlara göre daha az görüldüğü grafiklerden görülmüştür. Mineral yağ ve doğal ester sıvılarda yüksek frekanslı deşarjlar daha fazladır.



Şekil 4.22: Mineral yağ 55 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=4 mm, elektrot açıklıkları).



Şekil 4.23: Doğal ester sıvı 55 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

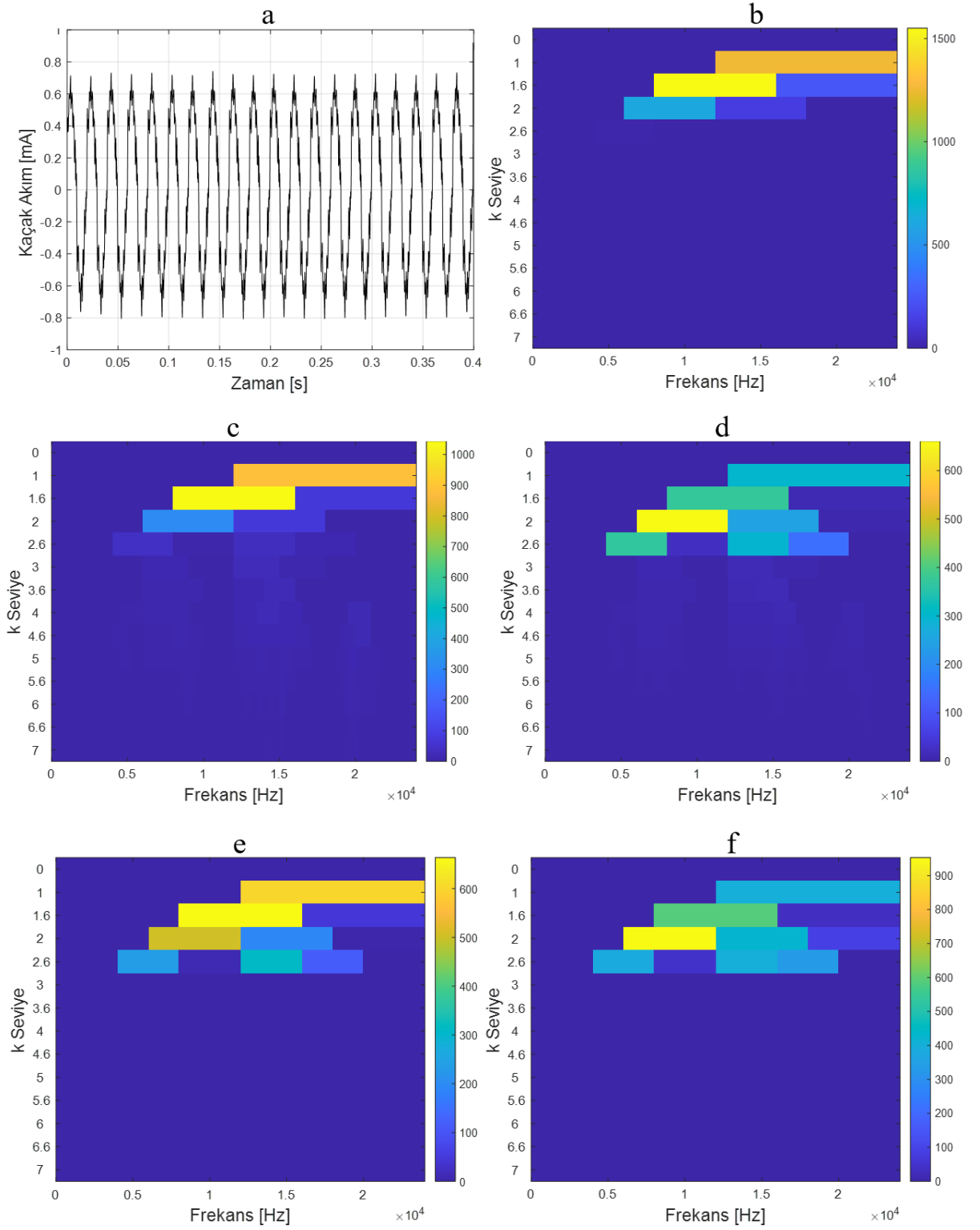


Şekil 4.24: Sentetik ester sıvı 55 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Mineral yağda 55 °C sıcaklıkta yapılan delinme gerilimi deneylerinde şekil 4.22' de de görüldüğü üzere 3 mm ve 5 mm elektrot açıklıkları için bir delinme gerçekleşmemiştir. Mineral yağda yapılan deneylerde yağın içinde yüksek frekansta deşarjlar görülmesine rağmen deşarj seviyeleri 1,5 ve 2 seviyelerinde kalmıştır. 2 mm elektrot açıklığında düşük frekanslı deşarjlar grafikten de görüleceği üzere 4. Seviyelere kadar devam etmektedir.

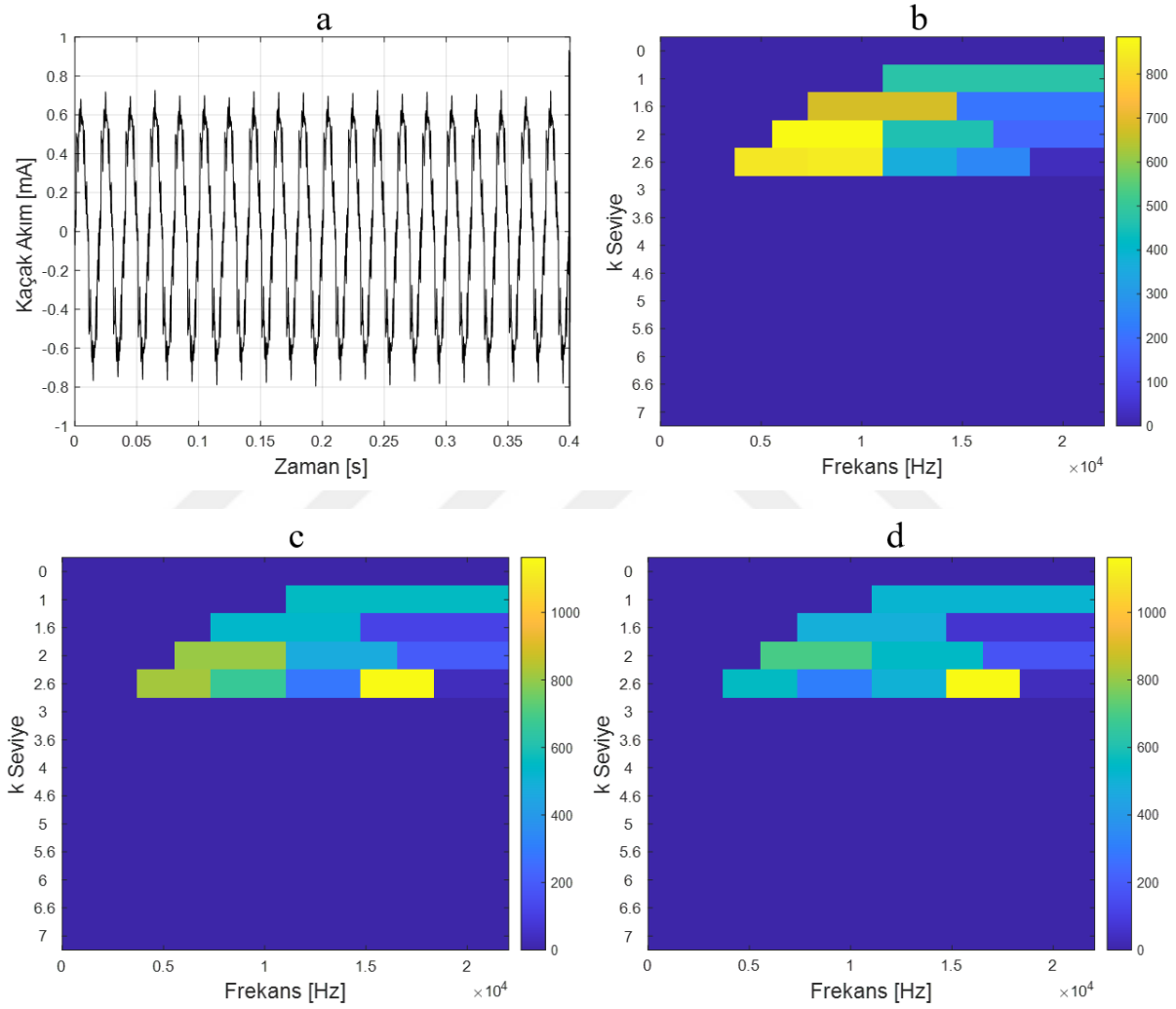
Doğal ester sıvıya ait 55 °C sıcaklıkta yapılan deneylere ait kurtogram verileri incelendiğinde ise Şekil 4.23.a' da diğer elektrot açıklıklarına göre daha düşük frekans seviyelerinde deşarjların olduğu gözlenmektedir. 5mm elektrot açıklığında seviye 1 de daha yüksek frekans seviyelerinde deşarjların daha uzun sürdüğü görülmektedir.

Sıcaklığın 55 °C olduğu durumda yapılan delinme deneylerinde sentetik ester sıvıya ait deney sonuçlarındaki kurtogram grafikleri şekil 4.24' de verilmiştir. 1 mm elektrot açıklığında diğer elektrot açıklıklarına göre daha yüksek frekanslı deşarjlar görülmesine rağmen delinme gerilimi süresi daha kısa oluşmaktadır. 4 mm elektrot açıklığına ait olan şekil 24.e' de kurtogram grafiği gözden geçirildiğinde düşük ve orta derece deşarj frekanslarının görüldüğü, yüksek deşarj frekanslarının görülmediği kurtogram grafiklerinde açıkça görülmektedir. 55 °C sıcaklıkta bütün yağlar için kurtogram grafikleri incelendiğinde ise en kısa delinme geriliminin sentetik ester sıvı için 1 mm elektrot açıklığında olduğu görülmektedir. Yine 1 mm elektrot açıklığı için düşük ve orta derece frekanslarda deşarjlar oluşurken sentetik ester sıvıya ait 1mm elektrot açıklıklarına bakıldığında daha yüksek derece frekanslarda deşarjların olduğu görülmektedir.

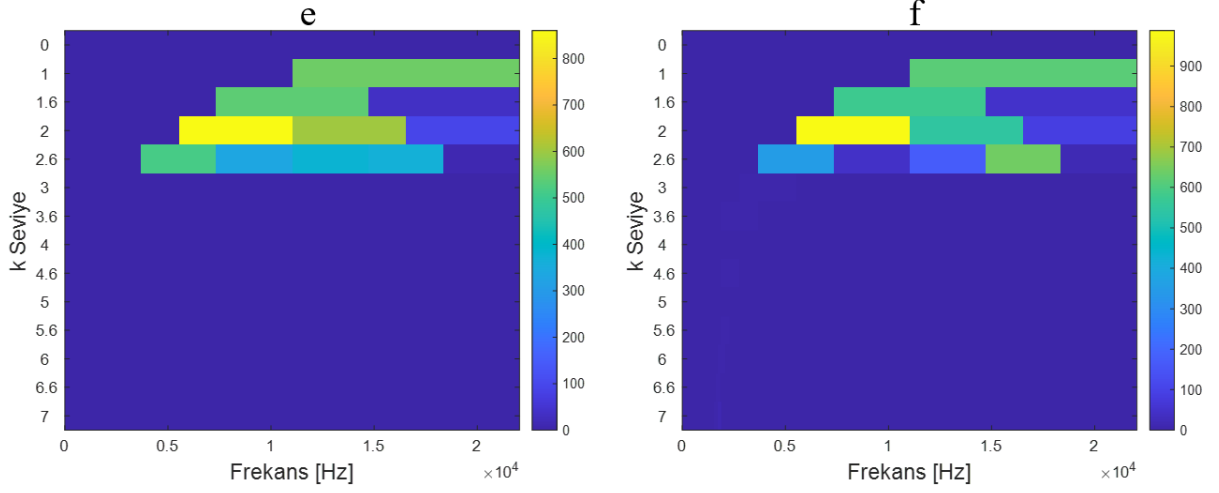


Şekil 4.25: Mineral yağ 60 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)

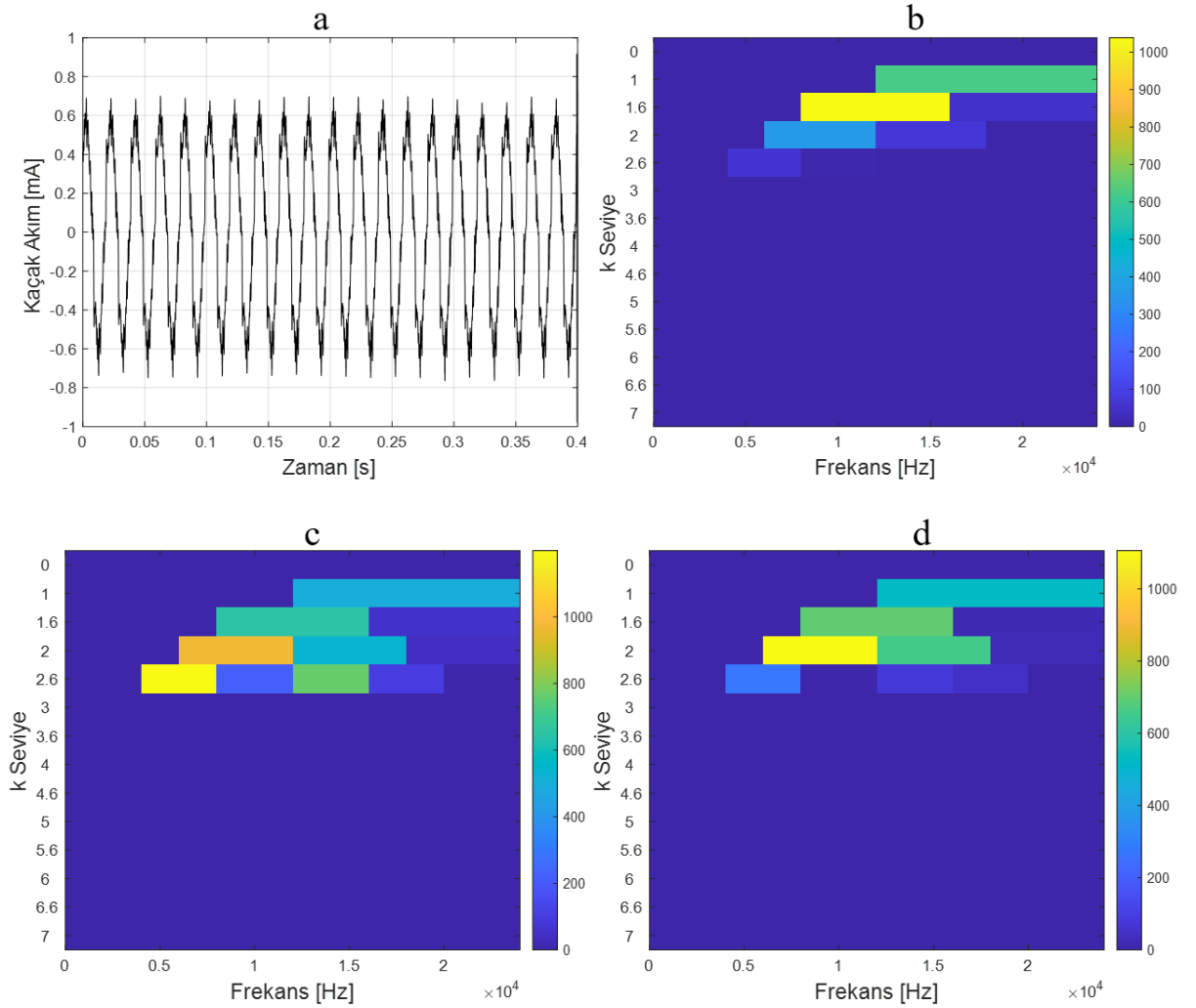
Mineral yağa ait 60 °C’ de 1mm’ den 5mm’ ye elektrot açıklıklarında yapılan delinme gerilimi deneylerine ait kurtogram grafikleri şekil 4.25’ de verilmiştir. 3mm ve 5mm elektrot açıklıkları için kurtogram grafiklerinden de görüldüğü üzere düşük ve orta derece frekanslarda deşarjlar oluşmuştur. 1mm, 2mm ve 4 mm için yüksek derece frekanslarda deşarjlar oluşurken, 2mm ve 3mm elektrot açıklıklarında düşük derece frekanslarda deşarjlar seviye 5’ e kadar devam etmiştir.



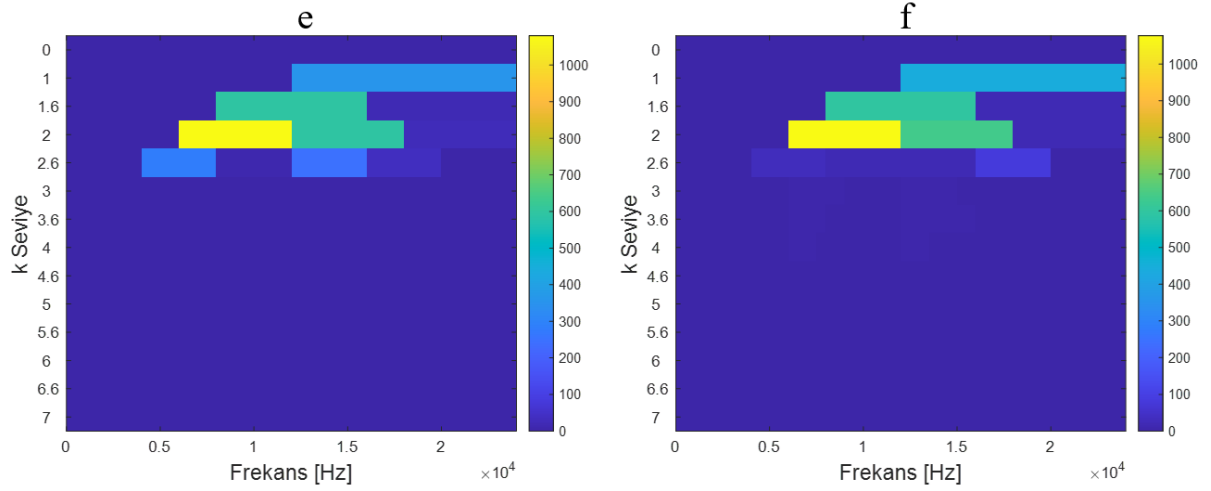
Şekil 4.26: Doğal ester sıvı 60 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



Şekil 4.26 (devamı): Doğal ester sıvı 60 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



Şekil 4.27: Sentetik ester sıvı 60 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



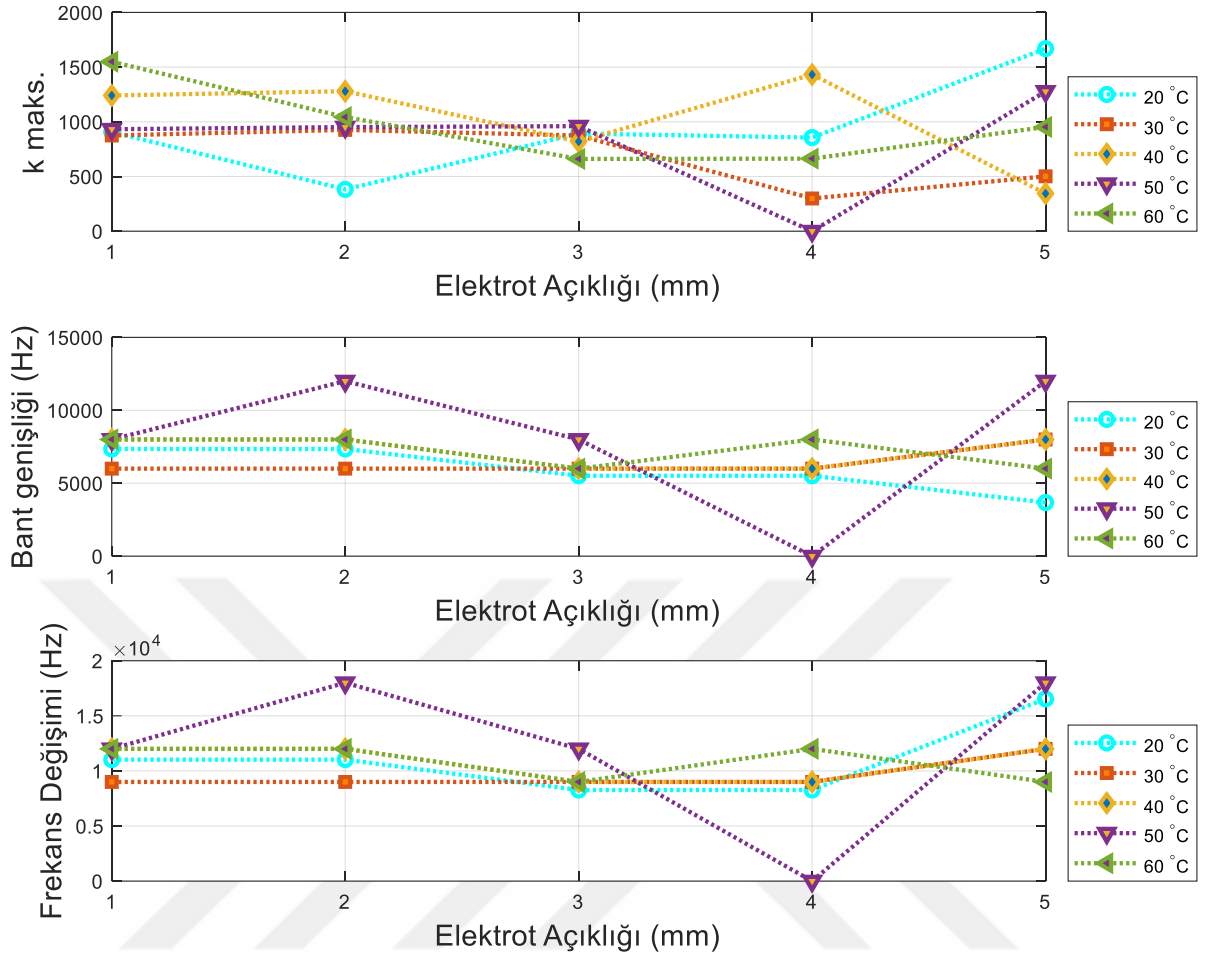
Şekil 4.27(devamı): Sentetik ester sıvı 60 °C kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Şekil 4.26’ da verilen kurtogram grafiklerinde doğal ester sıvı için 60 °C sıcaklıkta 1mm hariç diğer elektrot açıklıklarında yüksek dereceli frekanslarda deşarjlar görülmemektedir. Düşük ve orta derecede deşarjlar gözlenmektedir. 2mm ve 3mm elektrot açıklıklarında delinme geriliminin süreleri diğer elektrot açıklıklarına göre daha kısa sürmüştür.

Sentetik ester sıvının şekil 4.27’ de verilen kurtogram grafikleri incelendiğinde 3mm elektrot açıklığı için yüksek frekans deşarjları olduğu diğer elektrot açıklıkları için ise düşük ve orta derece frekans deşarjlarının olduğu görülmektedir

Sıcaklığın 60 °C’ye çıktığı durumda delinme gerilimine ait deşarj sürelerinin doğal ester sıvıda 2mm, 3mm ve sentetik ester sıvıda ise 2mm elektrot açıklığında üç farklı sıvı dielektrik tipine ait diğer elektrot açıklıklarındaki delinme gerilimi sürelerinden daha kısa olduğu görülmektedir.

Kurtogram değerlerine ait eğrilerin bütün sıcaklık değerlerini içerecek şekilde grafikte verildiğinde eğrilerde bulunan değerlerin ait olduğu noktalarını okunması çok zor olmaktadır. Bu nedenle sıcaklık değerleri iki parçaya bölünerek kurtogram değerlerine ait eğrilerin grafiklerini şekil 4.28 ve şekil 4.29’ da iki ayrı grafik olarak verilmiştir. Bununla beraber her bir sıvının sıcaklık ile ilgili olan delinme gerilimine ait ilişkisi sonucu elde edilen kurtogram değerleri de ayrıca yorumlanmıştır.



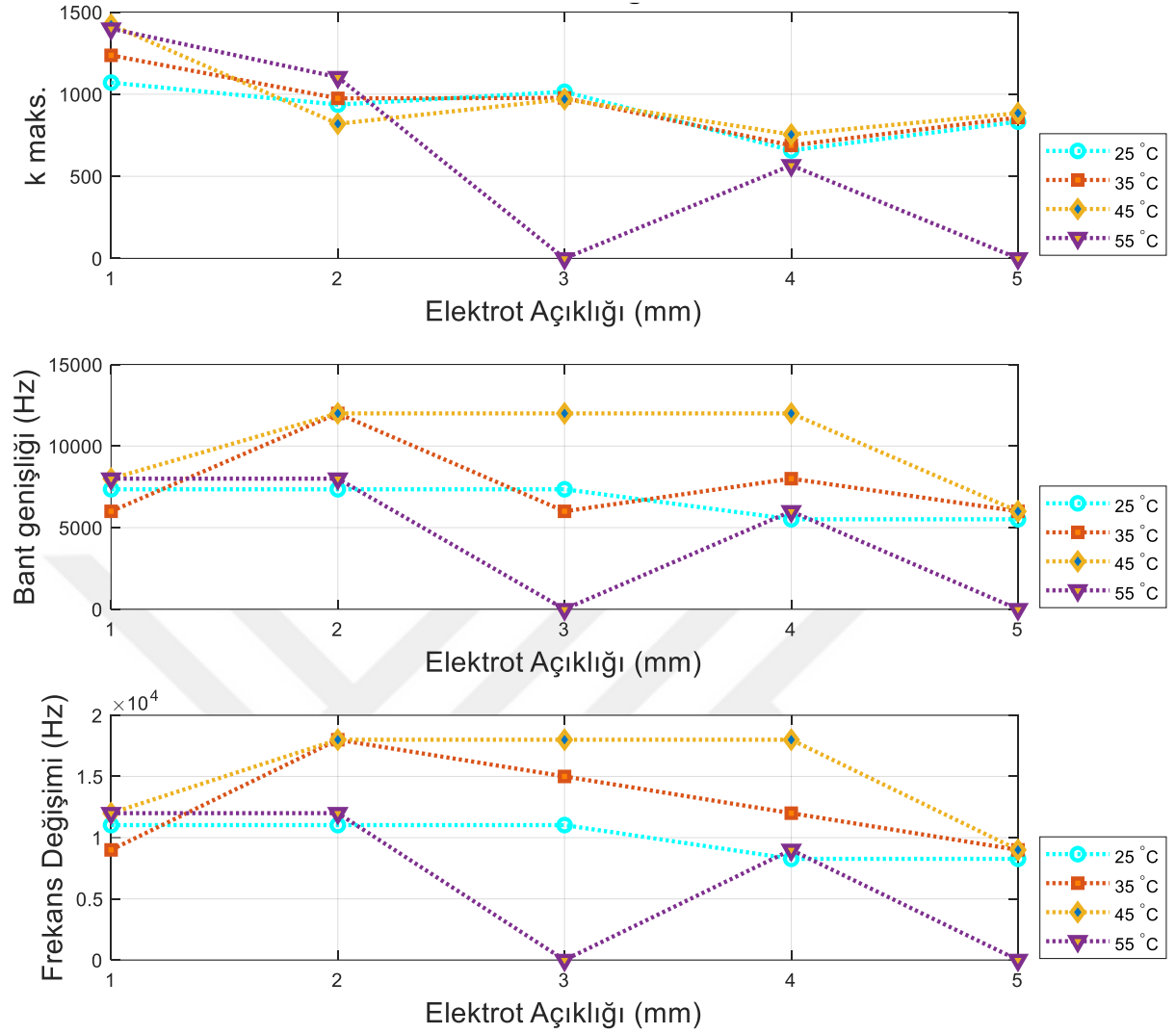
Şekil 4.28: Mineral yağ kurtogram değerleri eğrileri.

Mineral yağın bütün elektrot açıklıkları için 20 °C ile 60 °C arasındaki sıcaklık değişimleri 10 °C artırarak yapılan deneylere ait kurtogram sonuçları tablo 4.1’ de verilmektedir. 20 °C – 30 °C – 40 °C – 50 °C – 60 °C sıcaklıklarda oluşan değerleri incelediğimizde en yüksek k maks. değerinin 20 °C sıcaklıkta 5 mm elektrot açıklığı için 1668,6 ile görüldüğü şekil 4.28’ de grafikte de görülmektedir. Aynı zamanda en düşük k maks. seviyesi incelendiğinde ise 299,2 ile 30 °C sıcaklıkta 4 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde oluştuğu görülmektedir. 50 °C 4 mm elektrot açıklığı için delinme olmadığı için kurtogram grafiğinden değerler elde edilememiştir. Seviyelerin yine 1 -2,5 arasında bütün elektrot açıklıklarında değiştiği görülmektedir. Bant genişliğinin en düşük olduğu aralık 5 mm elektrot açıklığında 20 °C de yapılan deneyde elde edilmiştir. En yüksek bant genişlikleri ise 12000 Hz ile 50 °C sıcaklıktan 2mm ve 5 mm elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde görülmektedir. Frekans değişimi şekil 4.28’ deki grafik ve tablo 4.1 incelendiğinde ise yine 50 °C sıcaklıkta 2 mm ve 5 mm de elektrot

açıklıklarında yapılan deneylerde en yüksek çıkmıştır. 20 °C 3mm ve 4 mm elektrot açıklıklarında frekans değerleri 8268,75 Hz ile en düşük olarak görülmektedir.

Tablo 4.1: Mineral yağ kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.

Sıcaklık °C	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
20	1	907,7	1,5	7350	11025
20	2	382,2	1,5	7350	11025
20	3	892,6	2	5512,5	8268,75
20	4	855,9	2	5512,5	8268,75
20	5	1668,6	2,5	3675	16537,5
30	1	874,9	2	6000	9000
30	2	926	2	6000	9000
30	3	874,9	2	6000	9000
30	4	299,2	2	6000	9000
30	5	501,6	1,5	8000	12000
40	1	1240,8	1,5	8000	12000
40	2	1279,5	1,5	8000	12000
40	3	819,9	2	6000	9000
40	4	1431,9	2	6000	9000
40	5	344,7	1,5	8000	12000
50	1	932	1,5	8000	12000
50	2	951,6	1	12000	18000
50	3	960,2	1,5	8000	12000
50	4	0	0	0	0
50	5	1277,6	1	12000	18000
60	1	1549,4	1,5	8000	12000
60	2	1043,5	1,5	8000	12000
60	3	660,5	2	6000	9000
60	4	663,3	1,5	8000	12000
60	5	952,8	2	6000	9000



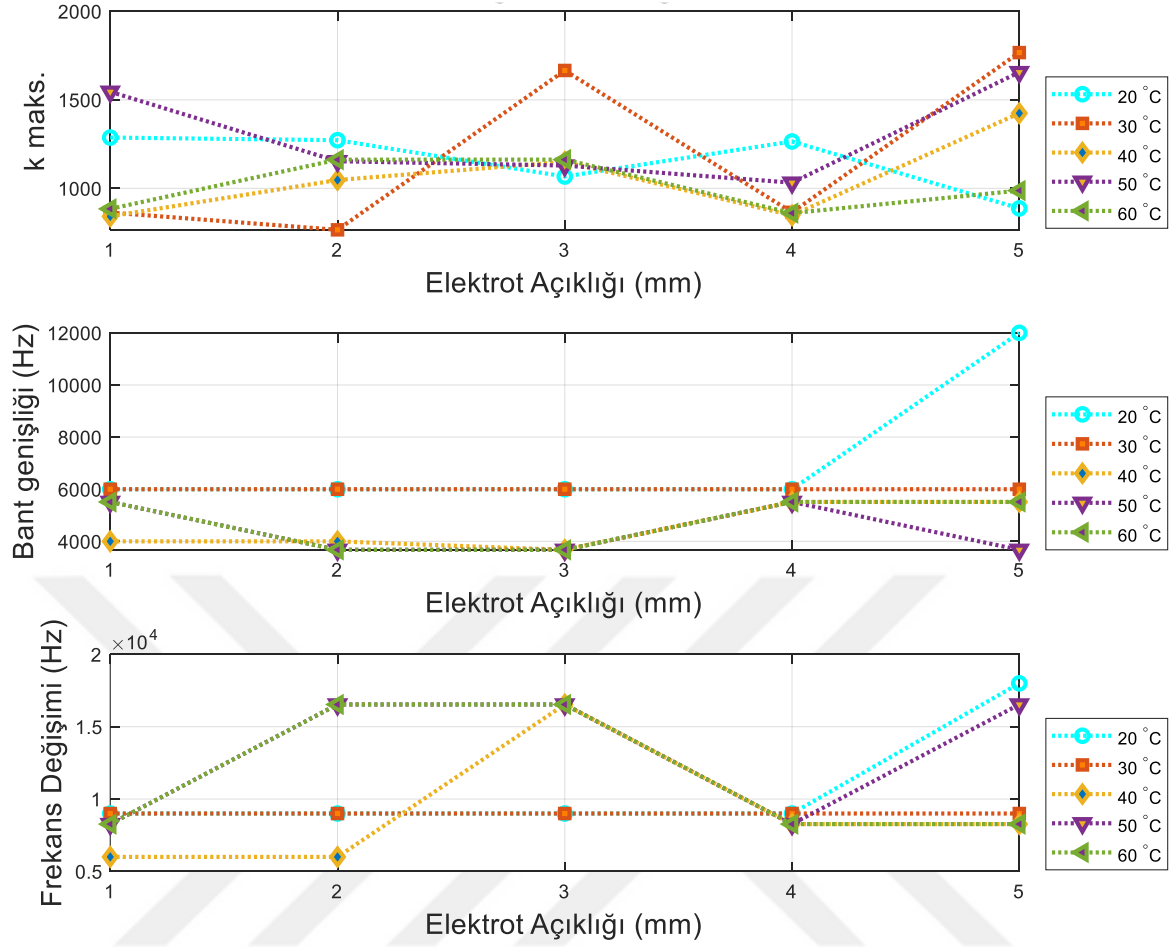
Şekil 4.29: Mineral yağ kurtogram değerleri eğrileri.

Mineral yağın ara değerler olan 25 °C -35 °C – 45 °C ve 55 °C sıcaklıklarda yapılan deneylere ait kurtogram grafikleri sonucu oluşan kmaks., bant genişliği ve frekans değişimleri incelendiğinde ise 55 °C için 3 mm ve 5mm elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde delinmenin olmadığı görülmektedir. Bu sıcaklıklardaki en yüksek kmaks. değerinin ise 1422 ile 1 mm elektrot açıklığındaki yapılan deneyde olduğu görülmektedir. Yine bant genişliklerinin 1 ve 2,5 arasında değiştiği bütün deneyler için görülmektedir. Frekans değişimleri incelendiğinde ise 25 °C’ de ki bütün elektrot açıklıklarındaki f_c değerlerinin diğer elektrot açıklıklarına göre birbirine daha yakın olduğu görülmektedir. En yüksek f_c değerlerinin 35 °C 2 mm elektrot açıklığında yapılan deney ve 45 °C 2mm- 3mm -4mm elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde olduğu şekil 4.29 ve tablo 4.2’ de verilmektedir.

Mineral yağ için bütün sıcaklıklarda ve bütün elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde kmaks. değerleri incelendiğinde 30 °C' de 4 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 299,2 olduğu görülmektedir. En yüksek kmaks. değeri ise 1668,6 ile 20 °C' de 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde elde edilmiştir. Bant genişlikleri 3675 Hz ile 12000 Hz arasında değişmektedir. fc frekansının ise 8268,75 Hz ile 18000 Hz aralığında bütün sıcaklık değerleri ve bütün elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde değiştiği gözlenmiştir.

Tablo 4.2: Mineral yağ kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.

Sıcaklık °C	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
25	1	1070,5	1,5	7350	11025
25	2	936,4	1,5	7350	11025
25	3	1014,9	1,5	7350	11025
25	4	657,8	2	5512,5	8268,75
25	5	832,1	2	5512,5	8268,75
35	1	1236,6	2	6000	9000
35	2	974,6	1	12000	18000
35	3	977,2	2	6000	15000
35	4	688	1,5	8000	12000
35	5	857,9	2	6000	9000
45	1	1422,8	1,5	8000	12000
45	2	819,6	1	12000	18000
45	3	969,5	1	12000	18000
45	4	754,6	1	12000	18000
45	5	884,8	2	6000	9000
55	1	1399	1,5	8000	12000
55	2	1103,4	1,5	8000	12000
55	3	0	0	0	0
55	4	567	2	6000	9000
55	5	0	0	0	0



Şekil 4.30: Doğal ester sıvı kurtogram değerleri eğrileri.

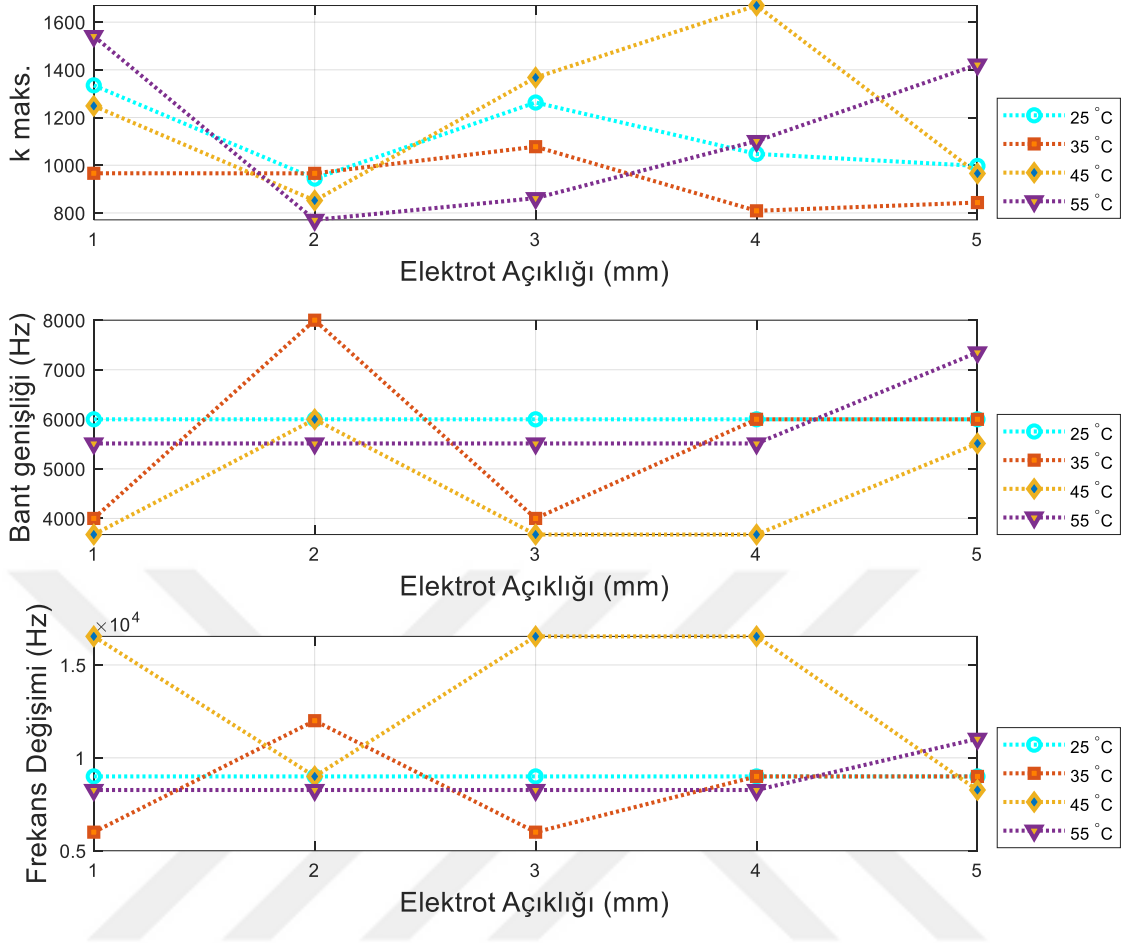
Tablo 4.3: Doğal ester sıvı $k_{maks.}$ Seviye Bw ve f_c (frekans değişimi) değerleri.

Sıcaklık °C	Elektrot Açıklığı (mm)	$k_{maks.}$	Seviye	Bw (Hz)	f_c (Hz)
20	1	1287	2	6000	9000
20	2	1272	2	6000	9000
20	3	1067,1	2	6000	9000
20	4	1264,8	2	6000	9000
20	5	887	1	12000	18000
30	1	863,4	2	6000	9000
30	2	765,8	2	6000	9000
30	3	1665,8	2	6000	9000
30	4	864,6	2	6000	9000
30	5	1766,8	2	6000	9000
40	1	842,1	2,5	4000	6000
40	2	1047	2,5	4000	6000
40	3	1150	2,5	3675	16537,5
40	4	847,5	2	5512,5	8268,75

Tablo 4.3 (devamı): Doğal ester sıvı kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.

Sıcaklık °C	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
40	5	1424,2	2	5512,5	8268,75
50	1	1545,6	2	5512,5	8268,75
50	2	1153,4	2,5	3675	16537,5
50	3	1128,9	2,5	3675	16537,5
50	4	1032,1	2	5512,5	8268,75
50	5	1656,3	2,5	3675	16537,5
60	1	884,2	2	5512,5	8268,75
60	2	1162,1	2,5	3675	16537,5
60	3	1162,4	2,5	3675	16537,5
60	4	860,2	2	5512,5	8268,75
60	5	987,5	2	5512,5	8268,75

Şekil 4.30 ve Tablo 4.3’ de görüldüğü üzere doğal ester sıvının 20 °C - 30 °C - 40 °C - 50 °C - 60 °C’ de delinme gerilimi deneylerinde oluşan kurtogram grafiklerinde elde edilen değerlerin karşılaştırmalı grafikleri ve kmaks., seviye, bant genişliği ve frekans değerleri bulunmaktadır. Buna göre en yüksek kmaks. değerinin 30 °C sıcaklıkta 5 mm elektrot açıklığında yapılan delinme deneyinde elde edildiği görülmektedir. Bant genişlikleri incelendiğinde ise en yüksek bant genişliğinin 20 °C sıcaklıkta 5 mm elektrot açıklığında yapılan delinme deneyinde 12000 Hz olarak elde edildiği Şekil 4.30 ve tablo 4.3’ de açıkça görülmektedir. Diğer elektrot açıklıkları ve sıcaklık değerleri için bant genişlikleri 3675 Hz ile 6000 Hz aralığında değişmektedir. Yine en yüksek frekans değerinin yine 5 mm elektrot açıklığında 20 °C de yapılan delinme deneyinde 18000 Hz olarak belirlendiği görülmektedir.



Şekil 4.31: Doğal Ester sıvı kurtogram değerleri eğrileri.

Tablo 4.4: Doğal Ester sıvı kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.

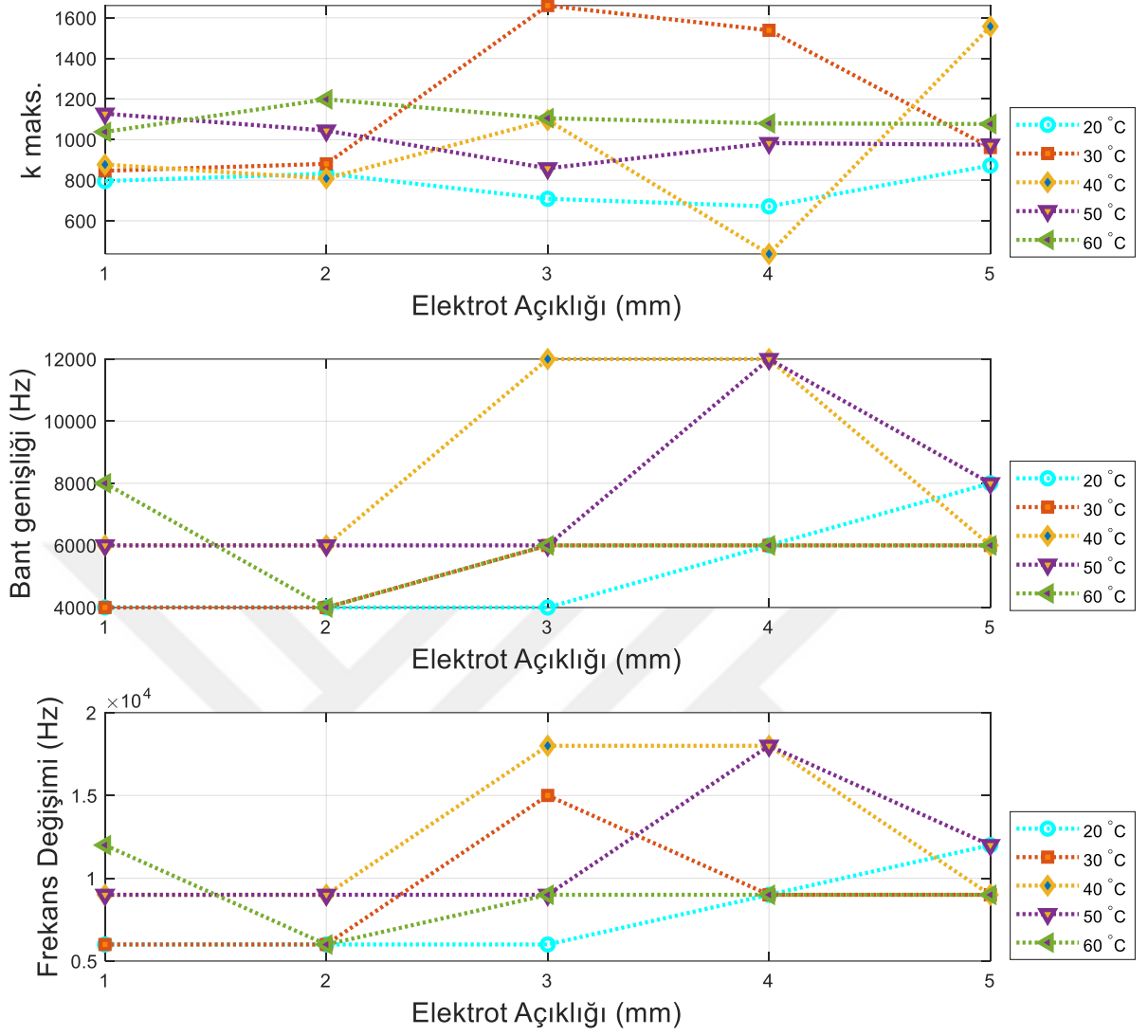
Sıcaklık (°C)	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
25	1	1334,9	2	6000	9000
25	2	944	2	6000	9000
25	3	1263	2	6000	9000
25	4	1047,5	2	6000	9000
25	5	997,2	2	6000	9000
35	1	966,3	2,5	4000	6000
35	2	966	1,5	8000	12000
35	3	1077,8	2,5	4000	6000
35	4	808,9	2	6000	9000
35	5	843,6	2	6000	9000
45	1	1248,7	2,5	3675	16537,5
45	2	852,2	2	6000	9000
45	3	1367,8	2,5	3675	16537,5
45	4	1669,7	2,5	3675	16537,5
45	5	965,4	2	5512,5	8268,75

Tablo 4.4 (devamı): Doğal Ester sıvı kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.

Sıcaklık °C	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
55	1	1541,5	2	5512,5	8268,75
55	2	771	2	5512,5	8268,75
55	3	862	2	5512,5	8268,75
55	4	1101,4	2	5512,5	8268,75
55	5	1422	1,5	7350	11025

Doğal ester sıvının ara sıcaklık değerleri olan 25 °C – 35 °C – 45 °C – 55 °C sıcaklıklarında bütün elektrot açıklıklarında yapılan deneylere ilişkin kurtogram değerleri incelendiğinde ise en yüksek kmaks. değerlerinin 16537,5 Hz ile 45 °C sıcaklıkta yapılan 1 mm, 3mm ve 4 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde elde edildiği görülmektedir. Kurtogram grafiklerinden elde edilen sonuçlarda en düşük bant genişliğin de yine 45 °C sıcaklıkta yapılan aynı elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde verildiği görülmektedir.

Doğal ester sıvıda yapılan yüksek gerilim altındaki elektriksel deşarj deneylerinde yağ 20-60 °C sıcaklık aralığında elektriksel delinmeye tabi tutulmuştur. Elektriksel olarak delinme gerilimleri farklı sıcaklık seviyelerinde birbirlerine yakın çıksa da önerdiğimiz kurtogram metodu ile yağ içerisindeki delinme anındaki yüksek akım seviyesindeki deşarj anı analiz edilmiştir. Buna göre tabloda 4.3’ den görüldüğü üzere 20 derecede 1 mm elektrot açıklığında kmaks. değeri 1287 iken 5 mm elektrot açıklığı için 887’ ye düştüğü sıcaklıkların karşılaştırıldığı grafiklerden de açıkça görülmektedir.



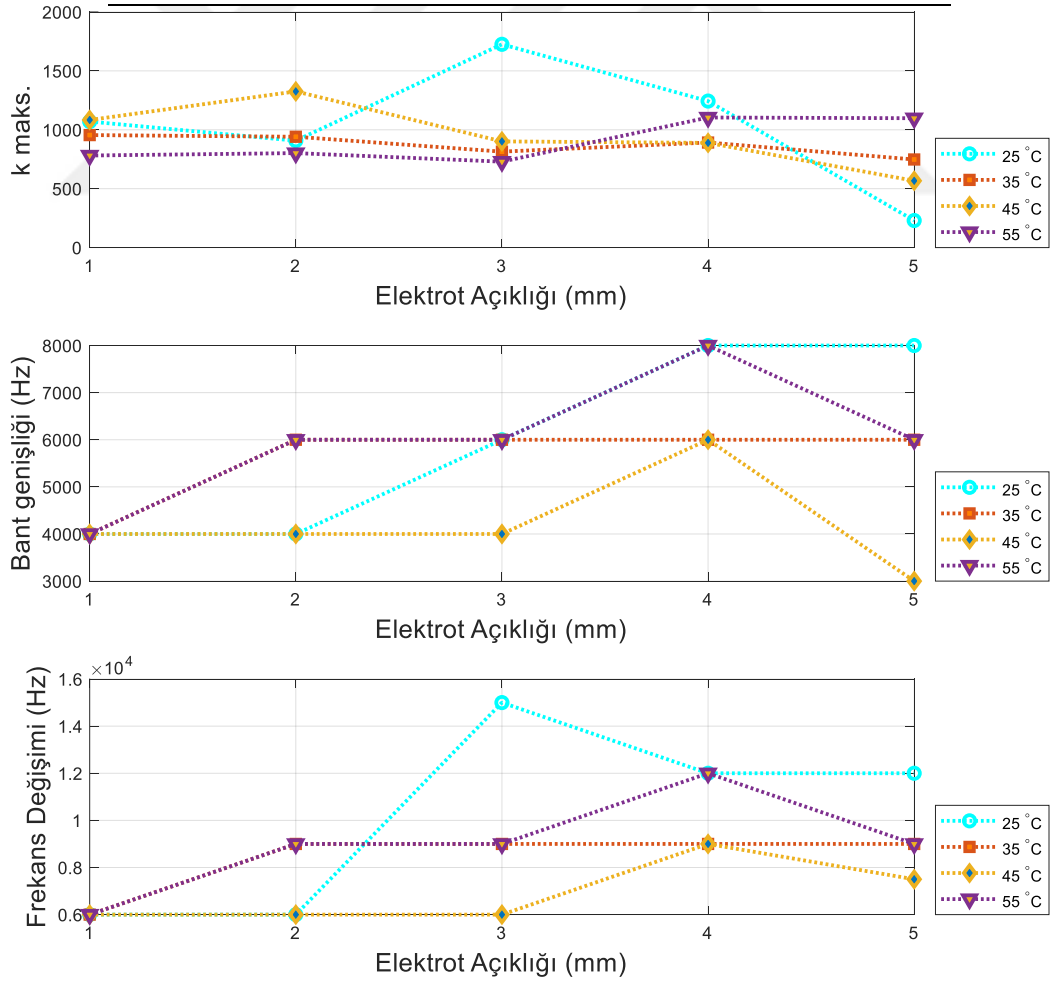
Şekil 4.32: Sentetik Ester sıvı kurtogram değerleri eğrileri.

Tablo 4.5: Sentetik Ester sıvı kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.

Sıcaklık (°C)	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
20	1	796	2,5	4000	6000
20	2	832,4	2,5	4000	6000
20	3	708,6	2,5	4000	6000
20	4	671,1	2	6000	9000
20	5	872,6	1,5	8000	12000
30	1	846,5	2,5	4000	6000
30	2	880,7	2,5	4000	6000
30	3	1660,6	2	6000	15000
30	4	1538,6	2	6000	9000
30	5	961,3	2	6000	9000

Tablo 4.5 (devamı): Sentetik Ester sıvı kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.

Sıcaklık (°C)	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
40	1	877,2	2	6000	9000
40	2	808,8	2	6000	9000
40	3	1096,2	1	12000	18000
40	4	436,9	1	12000	18000
40	5	1557,6	2	6000	9000
50	1	1127,9	2	6000	9000
50	2	1044,7	2	6000	9000
50	3	858,8	2	6000	9000
50	4	983	1	12000	18000
50	5	974,8	1,5	8000	12000
60	1	1038,2	1,5	8000	12000
60	2	1198,7	2,5	4000	6000
60	3	1105,7	2	6000	9000
60	4	1080,2	2	6000	9000
60	5	1077	2	6000	9000

**Şekil 4.33:** Sentetik Ester sıvı kurtogram değerleri eğrileri.

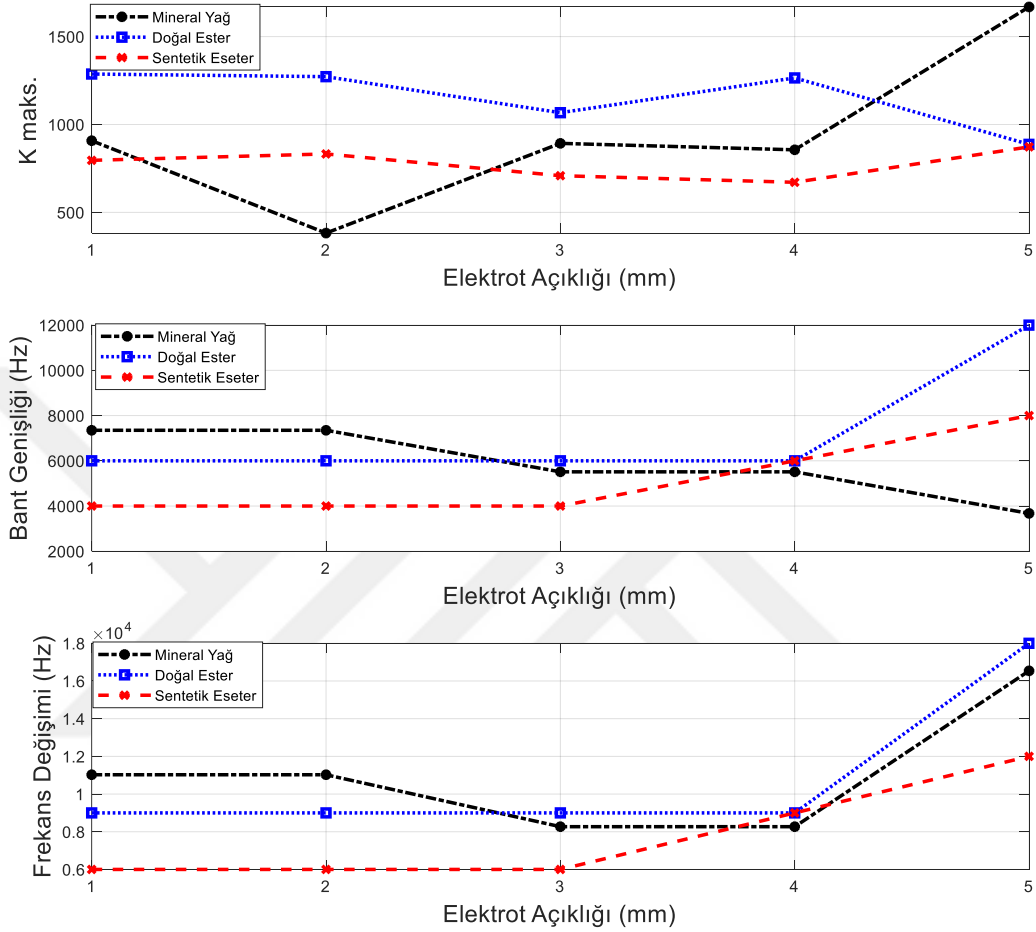
Tablo 4.6: Sentetik Ester sıvı kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.

Sıcaklık (°C)	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
25	1	1069,9	1,5	4000	6000
25	2	907,6	2,5	4000	6000
25	3	1725,8	2	6000	15000
25	4	1243,8	1,5	8000	12000
25	5	229,9	1,5	8000	12000
35	1	955,1	2,5	4000	6000
35	2	940,9	2	6000	9000
35	3	814,5	2	6000	9000
35	4	891,9	2	6000	9000
35	5	747,9	2	6000	9000
45	1	1083,4	2,5	4000	6000
45	2	1325,8	2,5	4000	6000
45	3	901,4	2,5	4000	6000
45	4	889	2	6000	9000
45	5	567,1	3	3000	7500
55	1	781,6	2,5	4000	6000
55	2	802,1	2	6000	9000
55	3	729,4	2	6000	9000
55	4	1104,3	1,5	8000	12000
55	5	1098,2	2	6000	9000

Şekil 4.32 ve tablo 4.5’ de sentetik ester sıvı için 1mm’ de 5 mm’ ye kadar 1mm elektrot açıklıkları arttırılarak yapılan deneylerden elde edilen kurtogram grafiklerindeki verilerin karşılaştırmalı grafikleri verilmiştir. 20 °C’ de başlayan delinme gerilimi deneyleri 60 °C’ de bitirilmiştir. 20 °C- 30 °C -40 °C -50 °C -60 °C’ de yapılan deneylerde elde edilen kurtogram grafiklerine ait sonuçlar incelendiğinde kmaks. değerinin en yüksek 1660,6 ile 3 mm elektrot açıklığı ve 30 °C sıcaklıkta yapılan delinme deneyinde elde edildiği görülmektedir. Frekans (fc) değerlerinin 6000 Hz ile 18000 Hz aralığında olduğu görülmektedir. Aynı şekilde bant genişlikleri ise tablo 4.5’ de verilen bütün elektrot açıklıkları için 4000 Hz ile 12000 Hz aralığında değişmektedir. En düşük kmaks. değerinin 4 mm elektrot açıklığında 40 °C sıcaklıkta yapılan delinme gerilimi deneyinde 436,9 olarak çıktığı görülmektedir.

Ara sıcaklık değerleri olan 25 °C -35 °C -45 °C -55 °C sıcaklıkta yapılan delinme deneyleri kendi içinde değerlendirildiginse ise kmaks. en küçük değerinin 25 °C sıcaklıkta ve 5 mm elektrot açıklığında el 229,9 ile elde edildiği görülmektedir. Bu değer sentetik ester için bütün sıcaklık

değerleri arasındaki en düşük kmaks. değeridir. Ara sıcaklık değerlerinde yapılan delinme gerilimi deneylerinde bant genişliklerinin 3000 Hz ile 8000 Hz aralığında olduğu ve 8000 Hz ‘i geçmediği görülmektedir.



Şekil 4.34: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri karşılaştırması (T= 20 °C).

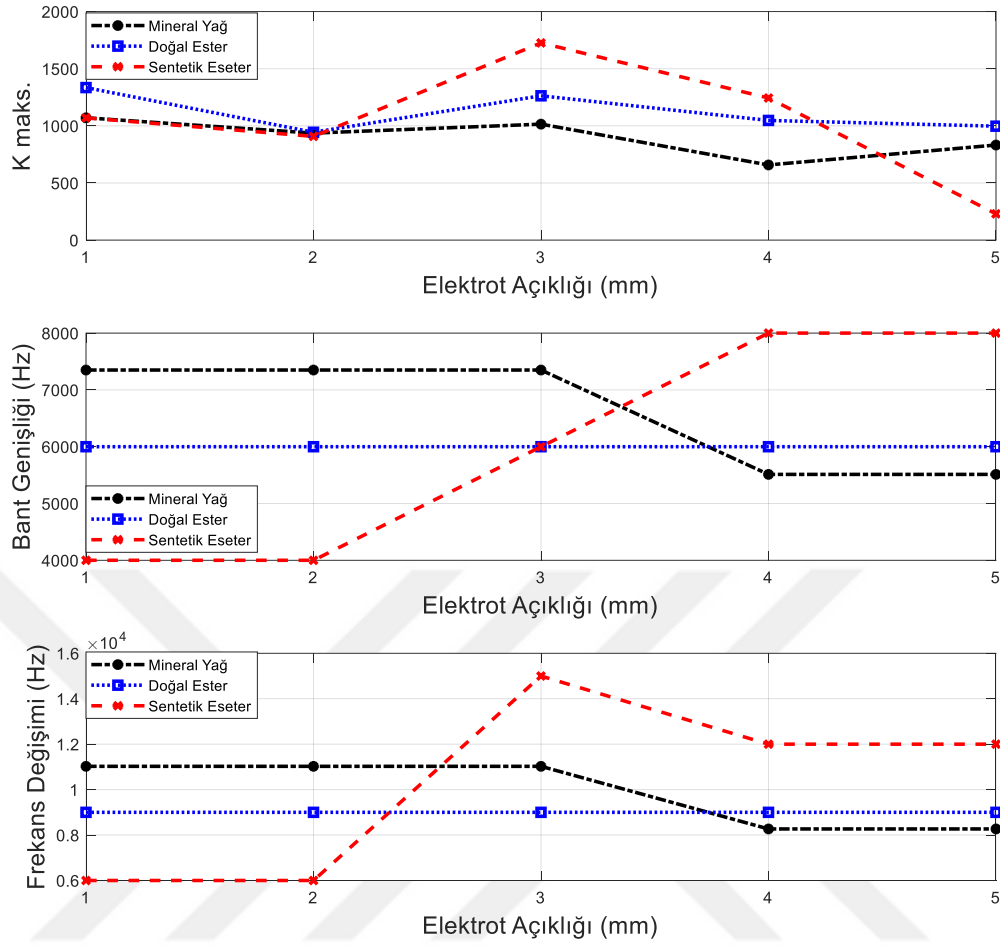
Tablo 4.7: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 20 °C).

Sıvı	Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral Yağ		1	907,7	1,5	7350	11025
		2	382,2	1,5	7350	11025
		3	892,6	2	5512,5	8268,75
		4	855,9	2	5512,5	8268,75
		5	1668,6	2,5	3675	16537,5
Doğal ester sıvı		1	1287	2	6000	9000
		2	1272	2	6000	9000
		3	1067,1	2	6000	9000
		4	1264,8	2	6000	9000
		5	887	1	12000	18000

Tablo 4.7 (devamı): Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 20 °C).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Sentetik ester sıvı	1	796	2,5	4000	6000
	2	832,4	2,5	4000	6000
	3	708,6	2,5	4000	6000
	4	671,1	2	6000	9000
	5	872,6	1,5	8000	12000

20 °C sıcaklıkta mineral, doğal ester ve sentetik ester sıvı için kurtogram hesaplamalarından elde edilen maksimum mod değerlerini (kmaks.), seviyeleri, bant genişliklerini ve merkez frekanslarını içeren veriler tablo 4.7' de, karşılaştırmalı değerlerin grafikleri ise şekil 4.34' de verilmiştir. Buna göre kmaks. değerleri incelendiğinde maksimum değer 5 mm elektrot açıklığı ile mineral yağda olduğu görülmektedir. Aynı şekilde mineral yağın 2 mm elektrot açıklığında maksimum değeri 382,2 olarak görülmektedir. Seviyelerin bütün yağ tipleri için 1 ile 2,5 arasında değiştiği tablodan açıkça belirlenmektedir. Bant genişlikleri incelendiğinde doğal ester sıvının 5 mm elektrot açıklığı için bant genişliği 12000 Hz seviyesindeyken en düşük bant genişliği mineral yağ için yine 5 mm elektrot açıklığında 3675 olarak verilmektedir. Delinme frekanslarını gösteren fc merkez frekanslarından en büyüğü doğal ester sıvının 5 mm elektrot açıklığında bulunmaktadır. Bütün yağlar için delinme frekansları incelendiğinde 6000 Hz ile 18000 Hz aralığında bir delinme frekansı olduğu tablo 4.7' de ve grafiksel gösterimi olan şekil 4.34' de görülmektedir.

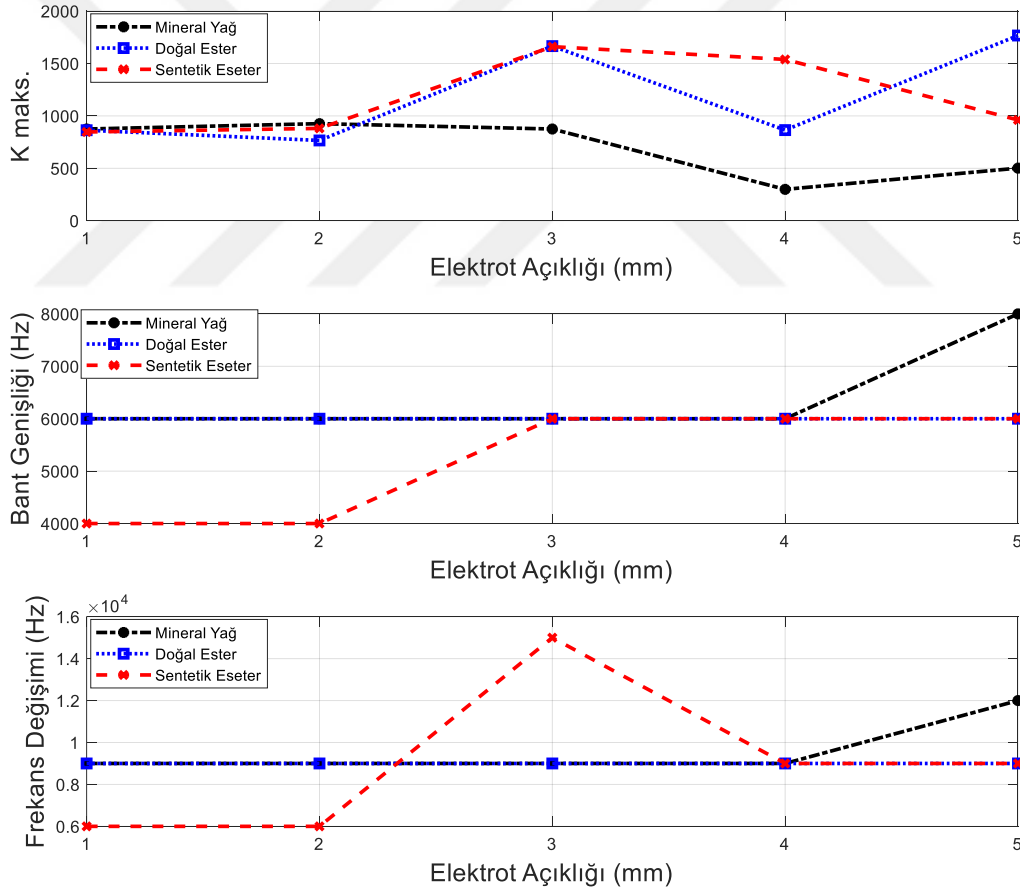


Şekil 4.35: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 25 °C).

Tablo 4.8: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 25 °C).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	1070,5	1,5	7350	11025
	2	936,4	1,5	7350	11025
	3	1014,9	1,5	7350	11025
	4	657,8	2	5512,5	8268,75
	5	832,1	2	5512,5	8268,75
Doğal ester sıvı	1	1334,9	2	6000	9000
	2	944	2	6000	9000
	3	1263	2	6000	9000
	4	1047,5	2	6000	9000
	5	997,2	2	6000	9000
Sentetik ester sıvı	1	1069,9	1,5	4000	6000
	2	907,6	2,5	4000	6000
	3	1725,8	2	6000	15000
	4	1243,8	1,5	8000	12000
	5	229,9	1,5	8000	12000

Sıcaklığın 25 °C' ye çıktığı durumda ise 3 tip yağ için kurtogram değerlerinin eğrilerini içeren şekil 4.35' de görüldüğü üzere bant genişliğini en düşük ve en yüksek olduğu sıvı dielektrik tipi 1mm ve 2 mm elektrot açıklığı ile 4000 Hz ve 4 mm ve 8 mm elektrot açıklığı ile 8000 Hz olarak sentetik ester sıvı tipidir. Delinme geriliminin olduğu merkez frekans değerleri incelendiğinde ise yine sentetik ester sıvının 15000Hz ile sentetik ester için yapılan 3 mm elektrot açıklığı deneyinde gözlenmektedir. kmaks. seviyeleri tablo 4.8 ve şekil 4.35' deki grafikte incelendiğinde 229,9 ile sentetik esterde görüldüğü söylenebilmektedir. Bant genişliği doğal ester sıvı tipinde yapılan denelerde 6000 Hz ile bütün elektrot açıklıklarında değeri değişmemiştir. Aynı şekilde merkez frekans ta bütün elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde 9000 Hz ile sabit kalmıştır. kmaks. seviyesinin en yüksek görüldüğü deney ise 1725,8 ile sentetik ester sıvının 4 mm elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneyleridir.

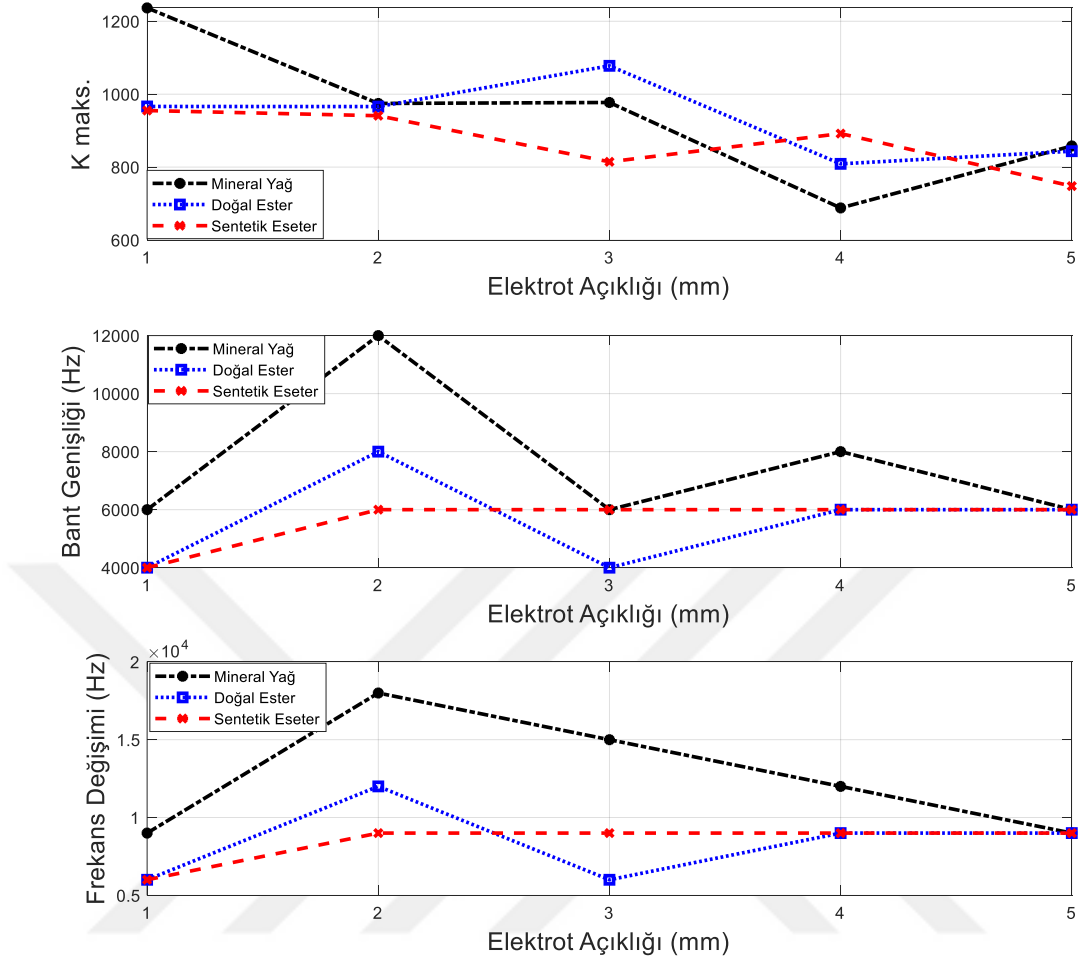


Şekil 4.36: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 30 °C).

Tablo 4.9: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 30 °C).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	874,9	2	6000	9000
	2	926	2	6000	9000
	3	874,9	2	6000	9000
	4	299,2	2	6000	9000
	5	501,6	1,5	8000	12000
Doğal ester sıvı	1	863,4	2	6000	9000
	2	765,8	2	6000	9000
	3	1665,8	2	6000	9000
	4	864,6	2	6000	9000
	5	1766,8	2	6000	9000
Sentetik ester sıvı	1	846,5	2,5	4000	6000
	2	880,7	2,5	4000	6000
	3	1660,6	2	6000	15000
	4	1538,6	2	6000	9000
	5	961,3	2	6000	9000

Üç farklı sıvı yalıtkan tipi için delinme gerilimi deneylerinin yapıldığı 30 °C sıcaklıkta elektrot açıklıklarına göre gösteren veriler şekil 4.36 ve tablo 4.9’ da gösterilmektedir. Buna göre karşılaştırmalı grafiklerde açıkça görüldüğü üzere doğal ester sıvı için yapılan deneylerde bütün elektrot açıklıklarında 30 °C sıcaklıkta bant genişliği 6000 Hz ile değişmemiştir. Aynı şekilde frekans değerleri ise 9000 Hz’ de kalmış bütün elektrot açıklıklarında aynı olduğu gözlenmiştir. Buna rağmen kmaks seviyesi 3mm ve 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde ani artış göstererek 1665,8 ve 1766,8 seviyelerine gözlenmiştir. Bununla beraber en düşük kmaks. seviyesi ise mineral yağda 4mm elektrot açıklığında yapılan deneyde elde edilmiştir. En düşük kmaks. değeri 299,6 olarak karşılaştırmalı grafikten de açıkça görülmektedir.

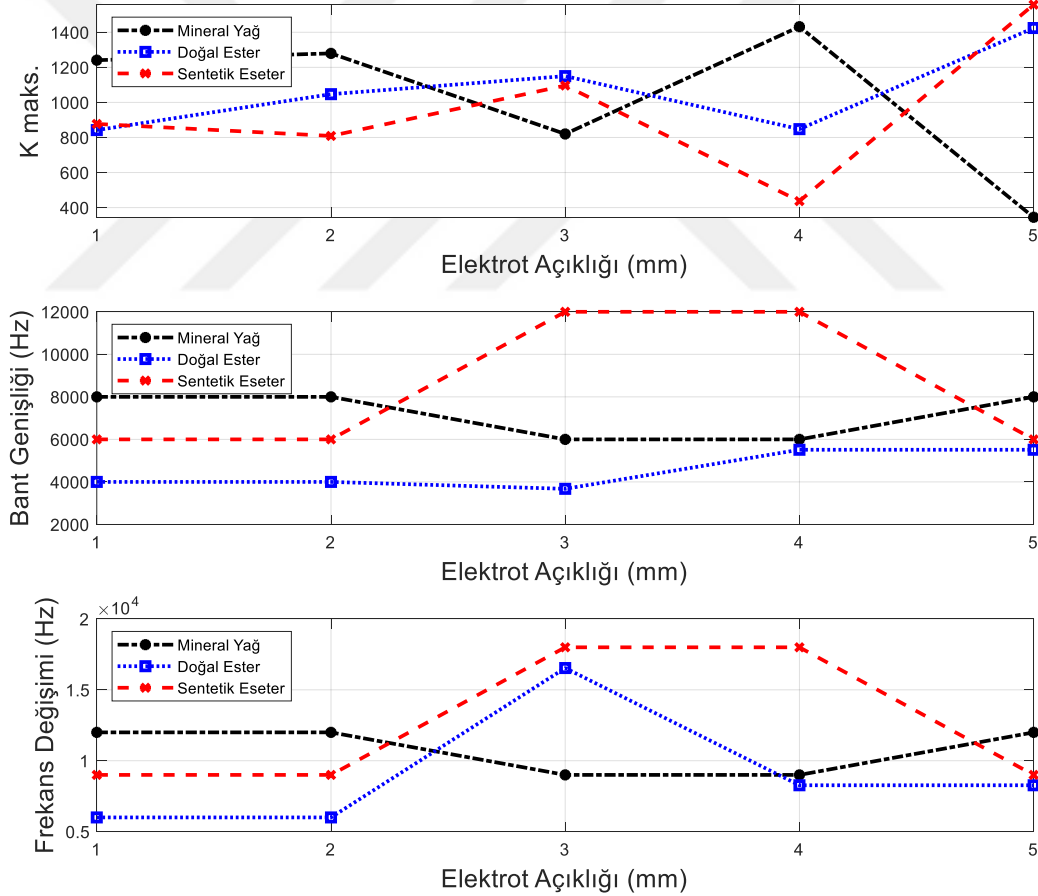


Şekil 4.37 Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 35 °C).

Tablo 4.10: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 35 °C).

Sıvı	Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ		1	1236,6	2	6000	9000
		2	974,6	1	12000	18000
		3	977,2	2	6000	15000
		4	688	1,5	8000	12000
		5	857,9	2	6000	9000
Doğal ester sıvı		1	966,3	2,5	4000	6000
		2	966	1,5	8000	12000
		3	1077,8	2,5	4000	6000
		4	808,9	2	6000	9000
		5	843,6	2	6000	9000
Sentetik ester sıvı		1	955,1	2,5	4000	6000
		2	940,9	2	6000	9000
		3	814,5	2	6000	9000
		4	891,9	2	6000	9000
		5	747,9	2	6000	9000

Sıcaklığın 35°C ye çıktığı üç sıvı yalıtım tipine ait yapılan delinme gerilimi deneylerine ait karşılaştırmalı kurtogram değerlerine ait veriler şekil 4.37’ de verilmektedir. Mineral yağ, doğal ester sıvı ve sentetik ester sıvıya ait kmaks. seviye, bant genişliği ve f_c frekans değerleri tablo ise tablo 4.10’ da bulunmaktadır. En düşük kmaks değerinin mineral yağ için 4 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde elde edildiği görülmektedir. Seviyeler 1 ve 2,5 aralığındadır. Bant genişliğinin 12000 Hz ile en yüksek elde edildiği deney yine mineral yağ için 2 mm elektrot açıklığında yapılan deneydir. Aynı zamanda bu deneyde 18000 Hz ile en yüksek frekans değeri elde edilmiştir. Bu sıcaklıkta en yüksek kmaks değerinin 123,6 ile 1 mm elektrot açıklığında mineral yağ deneyinde elde edildiği grafiklerden görülmektedir. Elektrot açıklığının 5 mm olduğu bütün yağ tipleri için yapılan deneylerde kmaks. değeri 9000 Hz olarak açıkça görülmektedir.

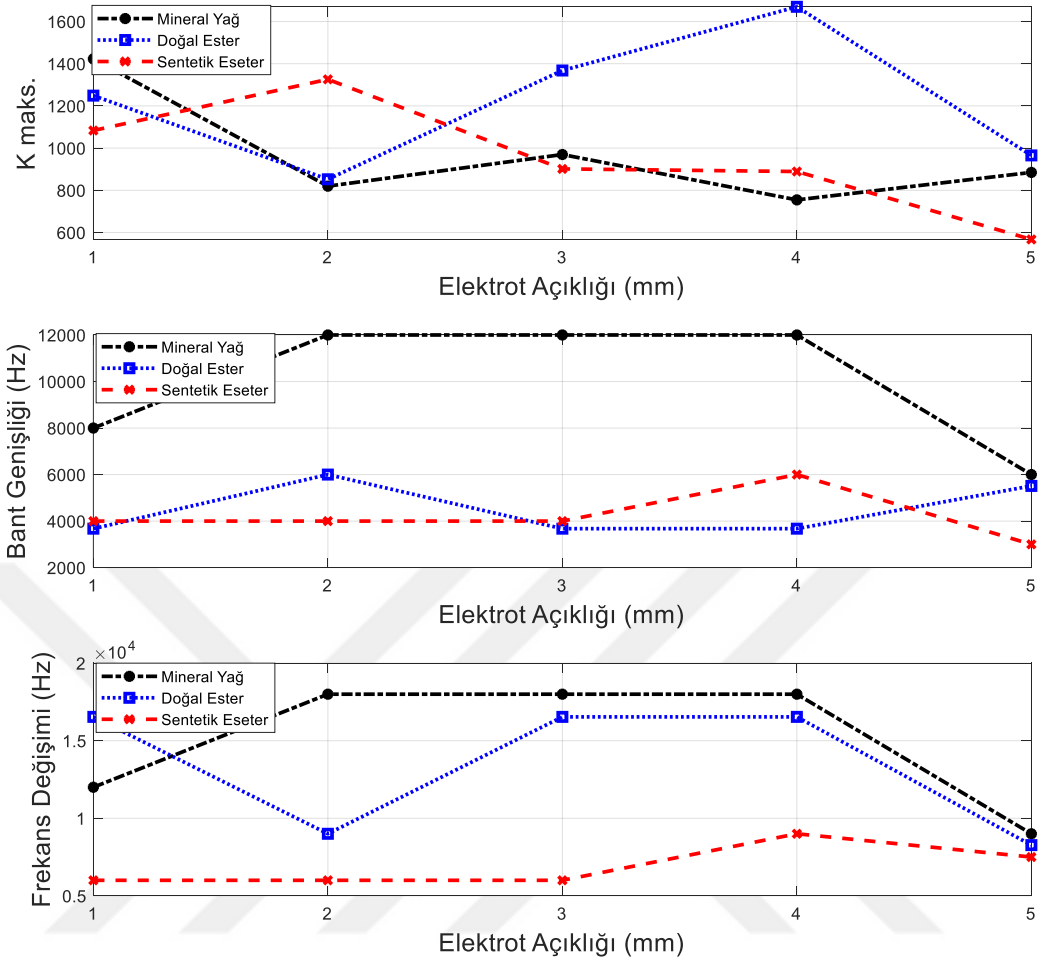


Şekil 4.38: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması ($T= 40^{\circ}\text{C}$).

Tablo 4.11: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 40 °C).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	1240,8	1,5	8000	12000
	2	1279,5	1,5	8000	12000
	3	819,9	2	6000	9000
	4	1431,9	2	6000	9000
	5	344,7	1,5	8000	12000
Doğal ester sıvı	1	842,1	2,5	4000	6000
	2	1047	2,5	4000	6000
	3	1150	2,5	3675	16537,5
	4	847,5	2	5512,5	8268,75
	5	1424,2	2	5512,5	8268,75
Sentetik ester sıvı	1	877,2	2	6000	9000
	2	808,8	2	6000	9000
	3	1096,2	1	12000	18000
	4	436,9	1	12000	18000
	5	1557,6	2	6000	9000

5 farklı elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneylerinde 40 °C’ de yapılan deneylerde doğal ester sıvı için bant genişliğinin 3675 Hz’ e düştüğü görülmektedir. kmaks. değerinin sıcaklıkta en düşük çıktığı değer 436,9 ile sentetik ester sıvının ile 4 mm elektrot açıklığında yapılan deney sonucu elde edilmiştir. Frekans (fc) değerlerinin 6000Hz ile 18000 Hz arasında değiştiği delinme gerilimi deneylerinde en yüksek kmaks. değeri ise sentetik esterinin 5mm elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneyinde 1557,6 olarak sentetik ester sıvıya ait olup Tablo 4.11’ de verilmektedir.

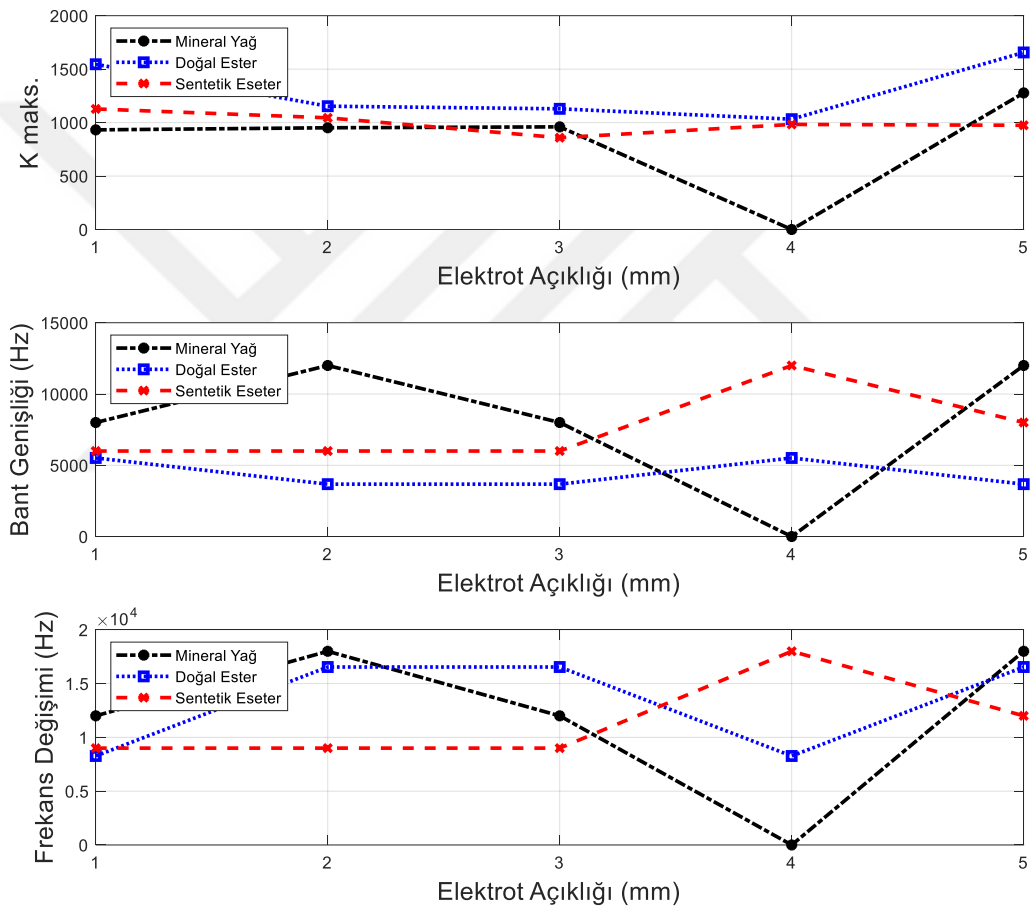


Şekil 4.39: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 45 °C).

Tablo 4.12: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 45 °C).

Sıvı	Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ		1	1422,8	1,5	8000	12000
		2	819,6	1	12000	18000
		3	969,5	1	12000	18000
		4	754,6	1	12000	18000
		5	884,8	2	6000	9000
Doğal ester sıvı		1	1248,7	2,5	3675	16537,5
		2	852,2	2	6000	9000
		3	1367,8	2,5	3675	16537,5
		4	1669,7	2,5	3675	16537,5
		5	965,4	2	5512,5	8268,75
Sentetik ester sıvı		1	1083,4	2,5	4000	6000
		2	1325,8	2,5	4000	6000
		3	901,4	2,5	4000	6000
		4	889	2	6000	9000
		5	567,1	3	3000	7500

45 °C’ de yapılan deneylere ait 3 farklı sıvı yalıtkan tipine ait kmaks., bant genişliği ve frekans (fc) değerlerini içeren karşılaştırmalı veriler şekil 4.39’da ve değerlerin bulunduğu verilen tablo 4.12’ de verilmiştir. Mineral yağın frekans değerleri incelendiğinde 2mm, 3mm, 4mm elektrot açıklıklarında 18000Hz olarak gösterilmektedir. Aynı elektrot açıklıklarında bant genişliklerinin de 12000Hz olarak üç sıvı dielektrik arasında en yüksek bant genişliğine sahip olduğu kurtogram analizlerinde görülmektedir. kmaks. değerleri incelendiğinde ise en düşük kmaks. değerinin 567,1 ile sentetik ester sıvıda 5 mm elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneyi sonucu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.40: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 50 °C).

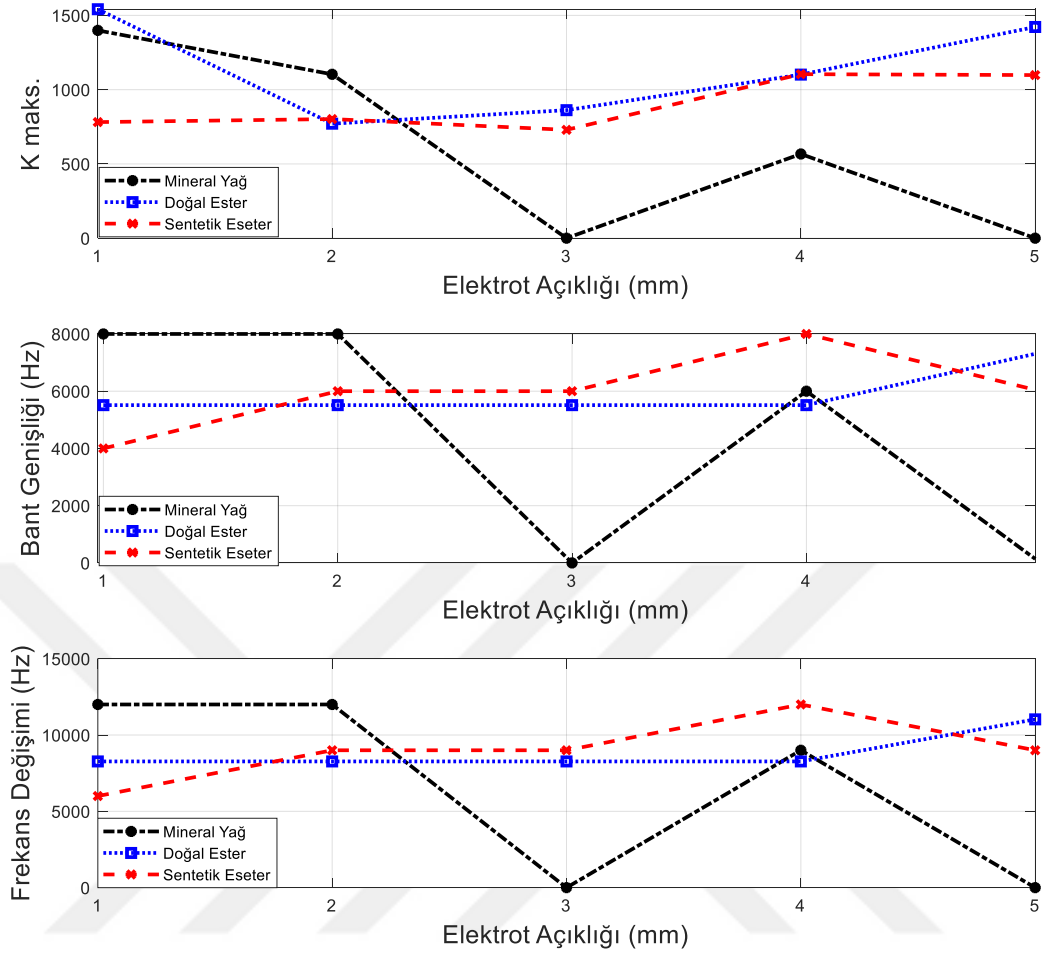
Tablo 4.13: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 50 °C).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	932	1,5	8000	12000
	2	951,6	1	12000	18000
	3	960,2	1,5	8000	12000
	4	-	-	-	-
	5	1277,6	1	12000	18000

Tablo 4.13 (devamı): Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 50 °C).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Doğal ester sıvı	1	1545,6	2	5512,5	8268,75
	2	1153,4	2,5	3675	16537,5
	3	1128,9	2,5	3675	16537,5
	4	1032,1	2	5512,5	8268,75
	5	1656,3	2,5	3675	16537,5
Sentetik ester sıvı	1	1127,9	2	6000	9000
	2	1044,7	2	6000	9000
	3	858,8	2	6000	9000
	4	983	1	12000	18000
	5	974,8	1,5	8000	12000

1 mm' den 5 mm' ye kadar elektrot açıklıkları 1mm arttırılarak yapılan delinme gerilimi deneylerinde 50 °C ta elde edilen kurtogram verilerinin karşılaştırmalı grafikleri Şekil 4.40' da ve değerler ise Tablo 4.13' de verilmiştir. Mineral yağ için 50 °C sıcaklıkta yapılan deneyde delinme olmamıştır. kmaks. seviyeleri incelendiğinde ise en düşük değerin 932 ile mineral yağ için 1 mm elektrot açıklığında elde edildiği Tablo 4.13' de görülmektedir. Bant genişliği değerlerinin en düşük doğal ester sıvı için görüldüğü deneylerde 50 °C de en düşük bant genişliği 3675 Hz olarak 2mm 3mm ve 5 mm' de görülmektedir. Doğal ester sıvı için bant genişlikleri 3675 Hz ile 5512,5 Hz aralığında değişmektedir. Frekans değerleri karşılaştırıldığında ise her üç sıvı yalıtkan için de 18000 Hz skalasında frekans değerleri görülmektedir.

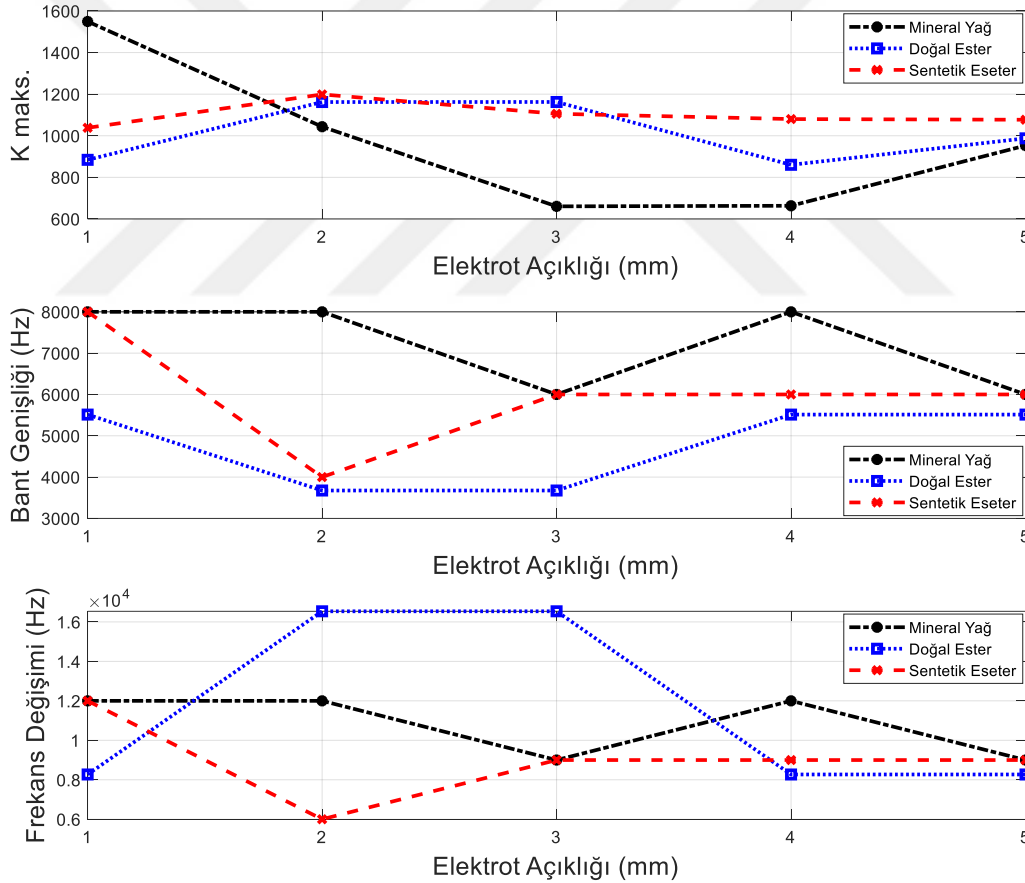


Şekil 4.41: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 55 °C).

Tablo 4.14: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 55 °C).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	1399	1,5	8000	12000
	2	1103,4	1,5	8000	12000
	3	-	-	-	-
	4	567	2	6000	9000
	5	-	-	-	-
Doğal ester sıvı	1	1541,5	2	5512,5	8268,75
	2	771	2	5512,5	8268,75
	3	862	2	5512,5	8268,75
	4	1101,4	2	5512,5	8268,75
	5	1422	1,5	7350	11025
Sentetik ester sıvı	1	781,6	2,5	4000	6000
	2	802,1	2	6000	9000
	3	729,4	2	6000	9000
	4	1104,3	1,5	8000	12000
	5	1098,2	2	6000	9000

Trafo yağı olarak en fazla kullanılan sıvılardan mineral yağ, doğal ester sıvı ve sentetik ester sıvının 55 °C’ de yapıldığı delinme gerilimi deneyleri sonucu oluşan değerlerin kurtogram yöntemi ile işlenmesi sonucu oluşan kmaks., seviye, bant genişliği ve frekans değerlerini içeren grafikler ve tablo şekil 4.41 ve tablo 4.14’ de verilmektedir. Grafik ve tablodaki veriler incelendiğinde mineral yağ için 3mm ve 5 mm elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneylerinden delinme olmadığı ve bu nedenle de kurtogram yöntemi ile işlenemediği tablo 4.14’ de görülmektedir. kmaks. değerleri incelendiğinde 4 mm elektrot açıklığında mineral yağ ile yapılan deneylerde 567 ile en düşük değerin çıktığı görülmüştür. Frekans değerlerinin ise 6000Hz ile 12000 Hz arasında değiştiği kurtogram verilerinden görülmektedir. Bu sıcaklıkta da seviyelerin 1,5 ve 2,5 aralığında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.42: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (T= 60 °C).

Tablo 4.15: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (T= 60 °C).

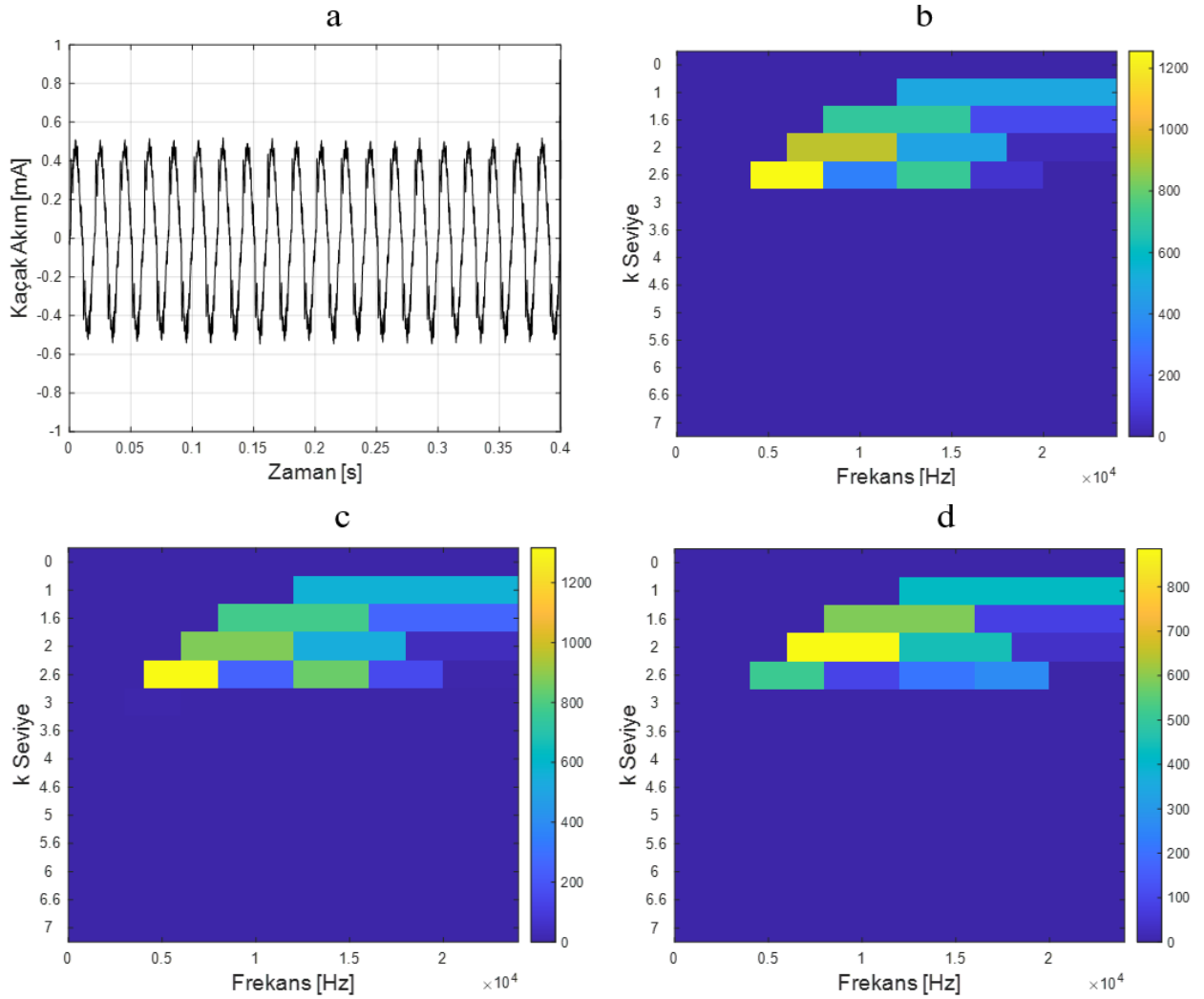
Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	1549,4	1,5	8000	12000
	2	1043,5	1,5	8000	12000
	3	660,5	2	6000	9000
	4	663,3	1,5	8000	12000
	5	952,8	2	6000	9000
Doğal ester sıvı	1	884,2	2	5512,5	8268,75
	2	1162,1	2,5	3675	16537,5
	3	1162,4	2,5	3675	16537,5
	4	860,2	2	5512,5	8268,75
	5	987,5	2	5512,5	8268,75
Sentetik ester sıvı	1	1038,2	1,5	8000	12000
	2	1198,7	2,5	4000	6000
	3	1105,7	2	6000	9000
	4	1080,2	2	6000	9000
	5	1077	2	6000	9000

Yapılan sıcaklık deneylerinden en yüksek sıcaklık değeri olarak 60 °C olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklıkta yapılan deneylerden elde edilen veriler kurtogram yöntemi ile işlenmiş ve yağlar arasındaki kmaks. değerleri, seviyeler, bant genişlikleri ve frekans (fc) değerleri şekil 4.42 ve tablo 4.15’ de sunulmuştur. Bu veriler incelendiğinde 60 °C sıcaklıkta en küçük kmaks. değerinin mineral yağ için yapılan 3mm elektrot açıklıklarında yapılan deneyde 660,5 olduğu görülmektedir. Yine en yüksek kmaks. değerinin ise 1 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 1549,4 olarak ölçülmüştür. Bant genişlikleri 60 °C sıcaklıkta yapılan deneylerde 8000 Hz üstüne çıkmamıştır. Frekans değerleri ise en yüksek doğal ester sıvı 2mm ve 3 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde 16537,5 Hz olarak tablo 4.15’ de verilmektedir.

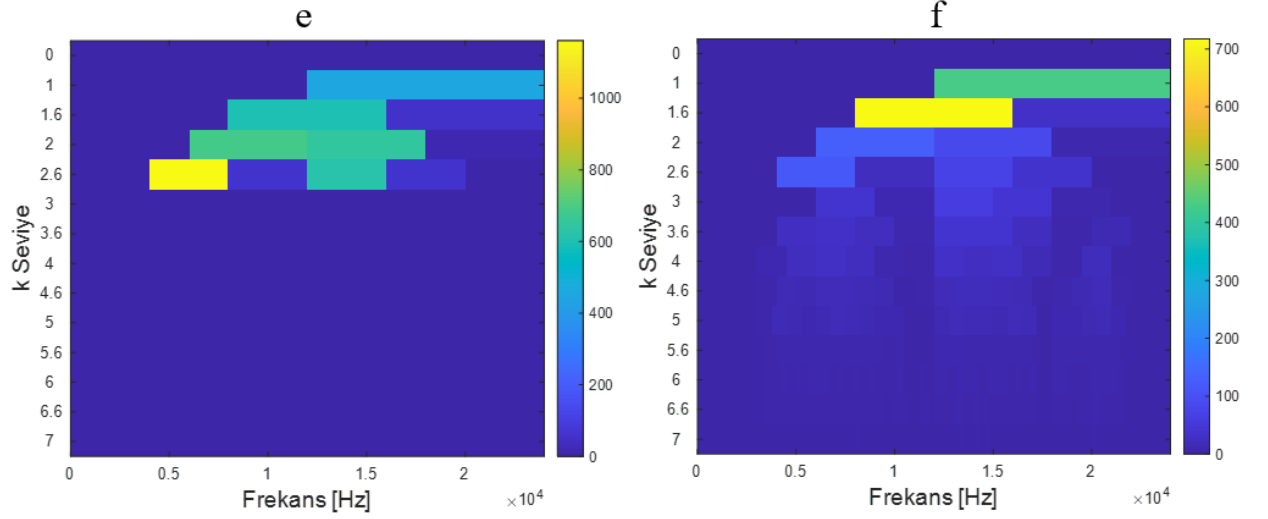
4.1.2. Nemin Değişken Olarak Kullanıldığı Deneylere Ait Sonuçlar

Çevresel faktörlerden bir diğeri olan nemin delinme gerilimine olan etkisinin incelenmesi için 1mm -2 mm – 3 mm – 4 mm ve 5 mm elektrot açıklıklarında deneyler yapılmıştır. Ortam nemi %40’ dan başlatılarak oluşturulmuş %5’ lik nem artışı ile %40- %45- %50- %55- %60- %65- %70- %75- %80- %85- %90 ve en son nem seviyesi %95 olarak deneyler bitirilmiştir. 12 farklı nem seviyesinde 5 farklı elektrot açıklığında 3 dielektrik sıvı kullanılarak deneyler yapılmıştır.

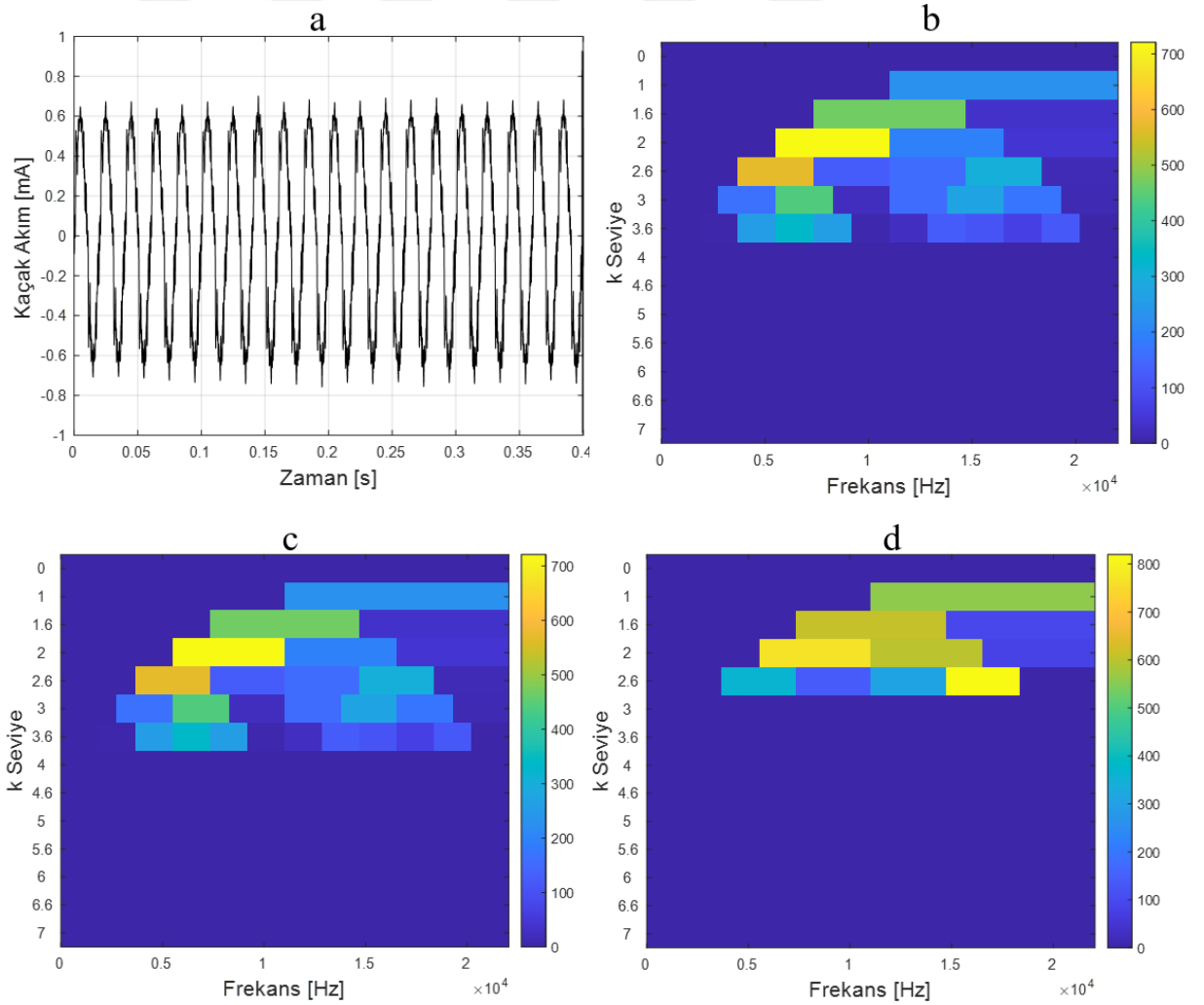
Ortam neminin %40 olduğu durumda belirlenen elektrot açıklıklarına göre yapılan delinme gerilimi deneylerinin analizi hızlı kurtogram yöntemi ile yapılarak kurtogram grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4.43’ de %40 nem için mineral yağın bütün elektrot açıklıklarında kurtogram verileri gösterilmektedir. Analiz verileri incelendiğinde bütün 5 mm elektrot açıklığı için delinme gerilim deşarjının en uzun sürdüğü şekil 4.43’ deki grafikten görülmektedir. Aynı zamanda düşük seviyedeki frekanslar da deşarjlar seviye 6 - 7 aralığına kadar devam etmektedir. Mineral yağa ait kurtogram grafiklerinden de görüldüğü üzere orta derece deşarjlar bulunmamaktadır. Düşük ve yüksek derece deşarjlar arasında geçişler vardır.



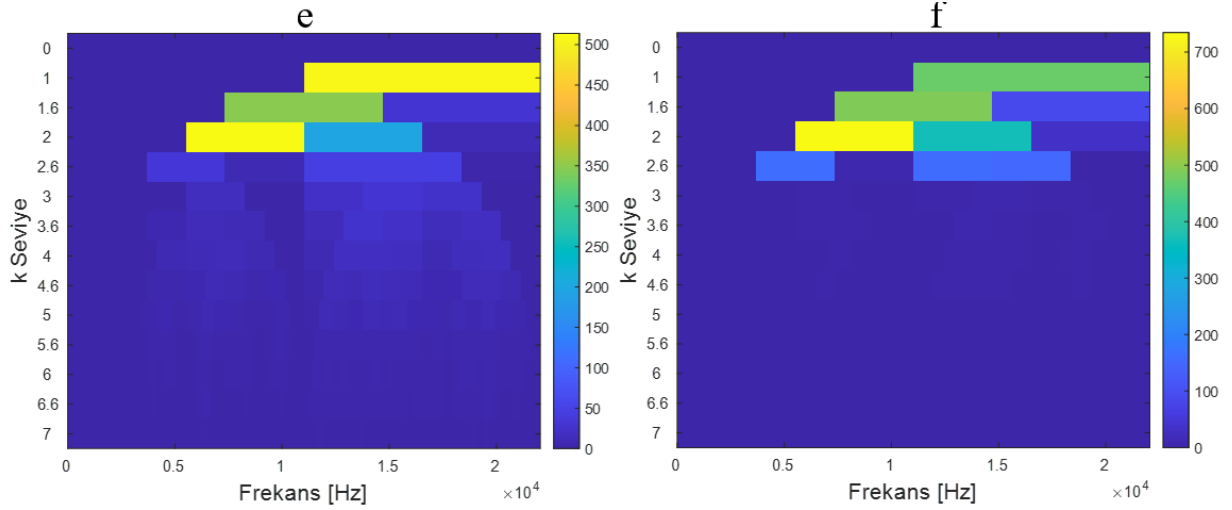
Şekil 4.43: Mineral yağ %40 nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



Şekil 4.43 (devamı): Mineral yağ %40 nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



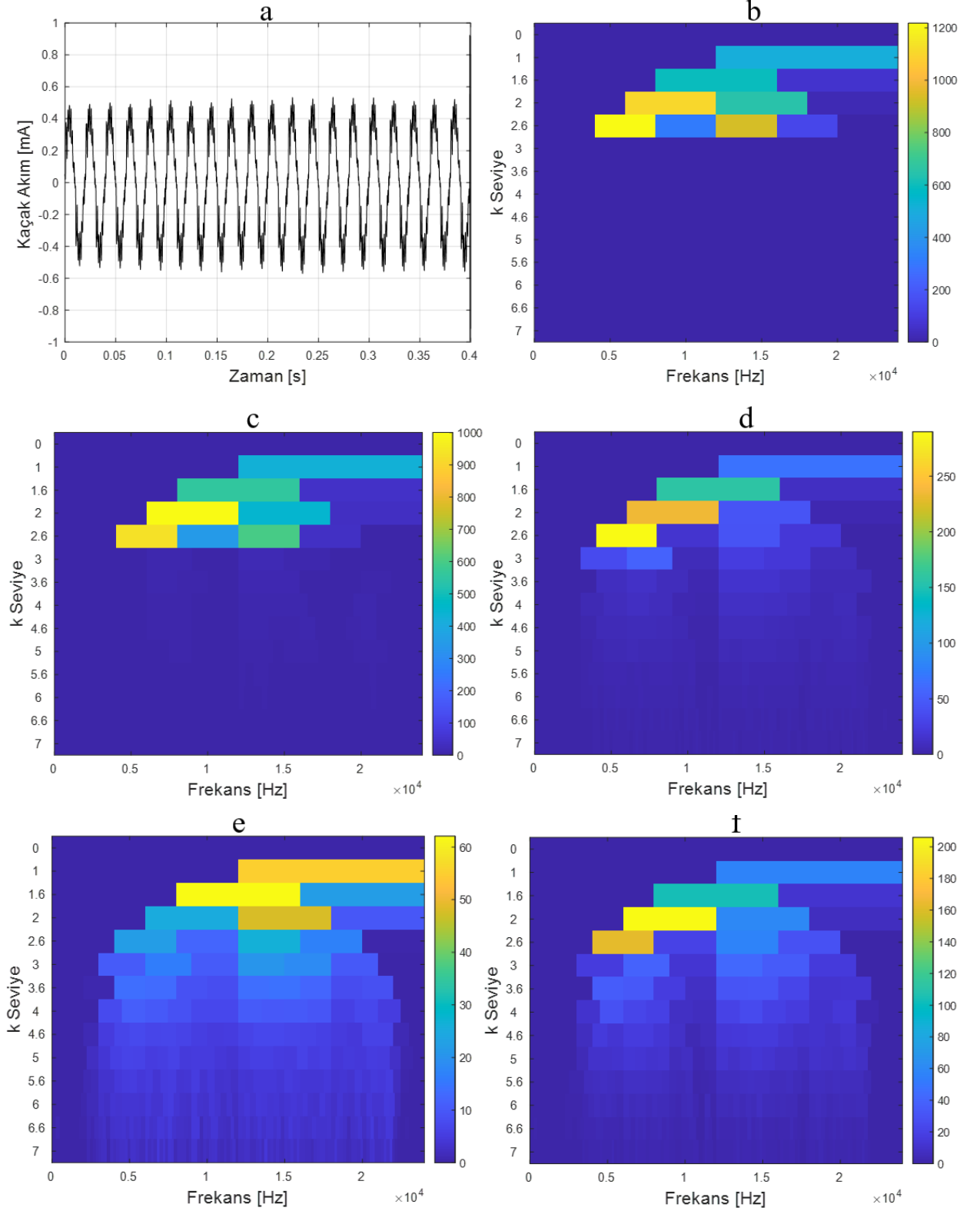
Şekil 4.44: Doğal ester sıvı %40 nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



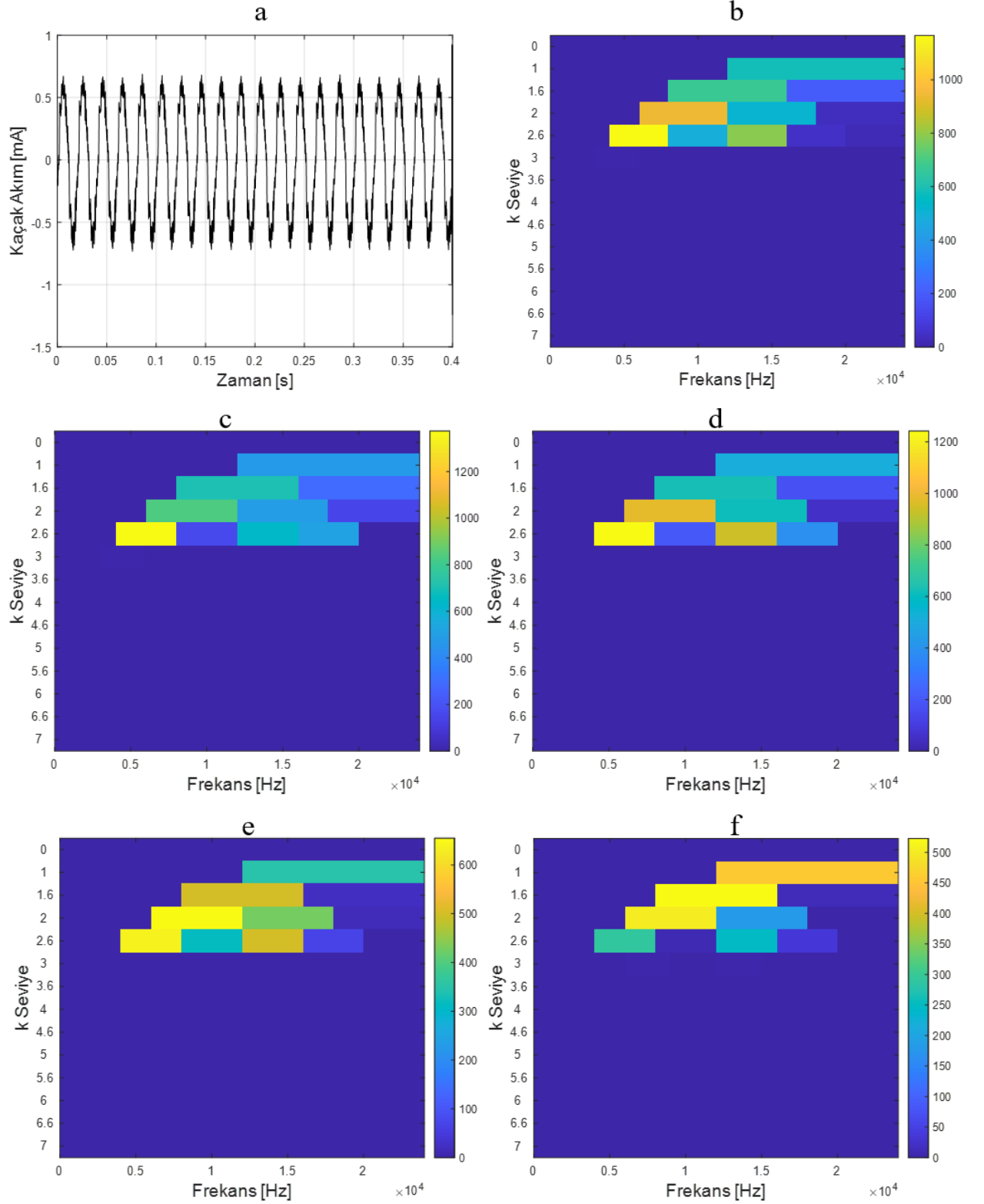
Şekil 4.44 (devamı): Doğal ester sıvı %40 nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Doğal ester sıvının %40 nem seviyesinde yapılan delinme gerilimini deney sonuçlarına göre analiz edilen kurtogram grafikleri şekil 4.44’ de gösterilmektedir. Elektrot açıklıklarına göre yapılan deneylerden elde edilen veriler incelendiğinde örnek kaçak akım sinyalinin 3 mm elektrot açıklığı için alındığı görülmektedir. Kaçak akım sinyalinden delinme geriliminin karakteristiği ile ilgili bir bilgi çıkarımı yapmak zor olacaktır. Bu nedenle kurtogram analizinden elde edilen grafikler frekans anlamında çok önemlidir. 5 mm elektrot açıklığı için şekil 4.44.f’ de elde edilen kurtogram analizi incelendiğinde delinme gerilimi hariç düşük frekansta deşarjların olduğu görülmektedir. 1 mm ve 2 mm elektrot açıklığını veren grafiklerde seviye 3,5’ a kadar ilerlerken 4 mm elektrot açıklığında düşük frekanslarda deşarjların daha yüksek seviyelere kadar devam ettiği görülmektedir.

%40 nem için sentetik ester sıvıda kurtogram analizlerine ait 3mm, 4 mm ve 5 mm elektrot açıklıklarına ait grafiklerde düşük seviye deşarjların yüksek seviyelere kadar devam ettiği açıkça gözlenmektedir. 1mm 3 mm elektrot açıklıklarında delinme geriliminin bant genişliği diğer elektrot açıklıklarına kıyasla daha kısa iken en uzun delinme gerilimi bant genişliğinin 4 mm elektrot açıklığında yapılan deney olduğu şekil 4.45’ de verilen kurtogram grafiğinde açıkça gözlenmektedir.

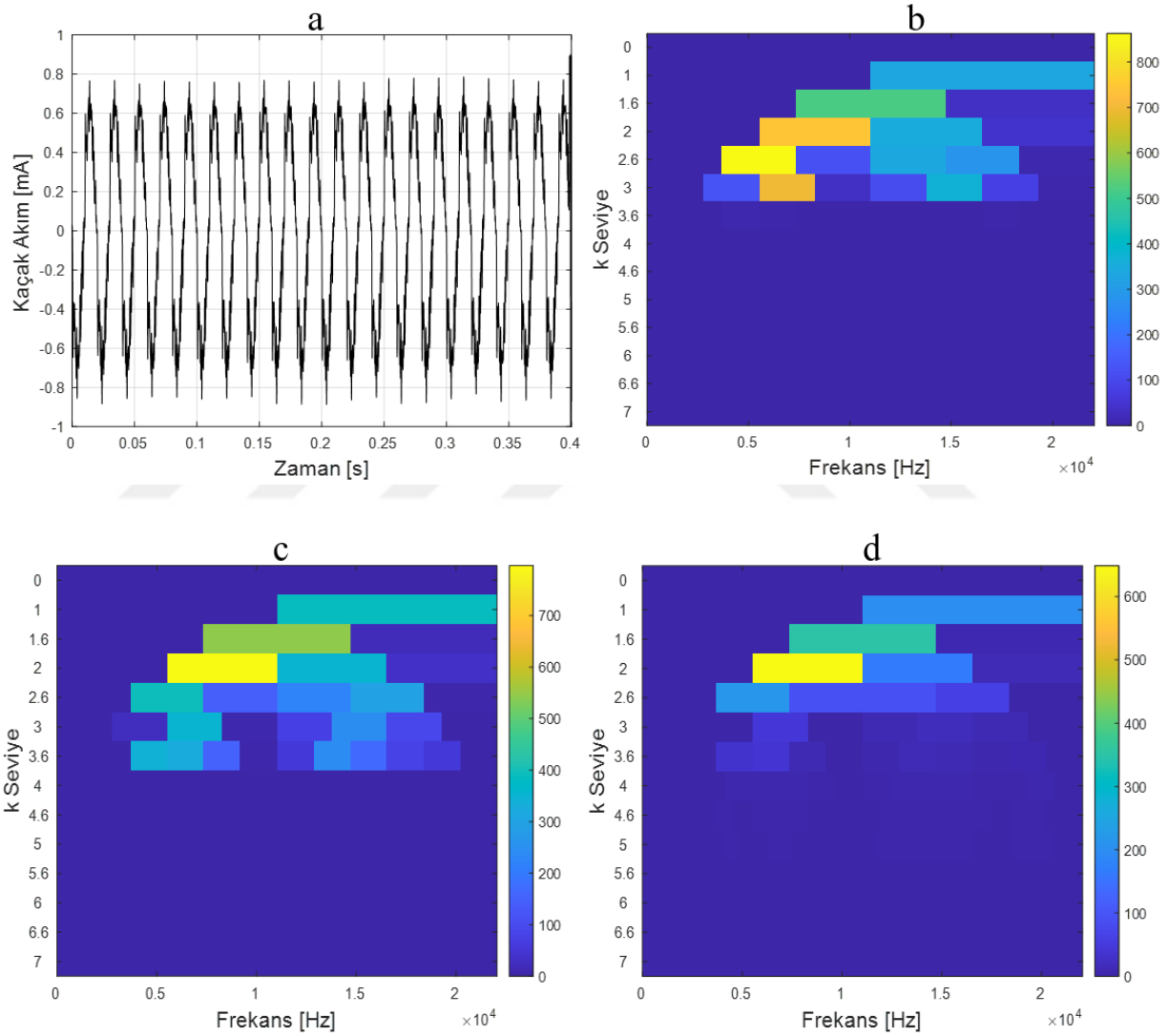


Şekil 4.45: Sentetik ester sıvı %40 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

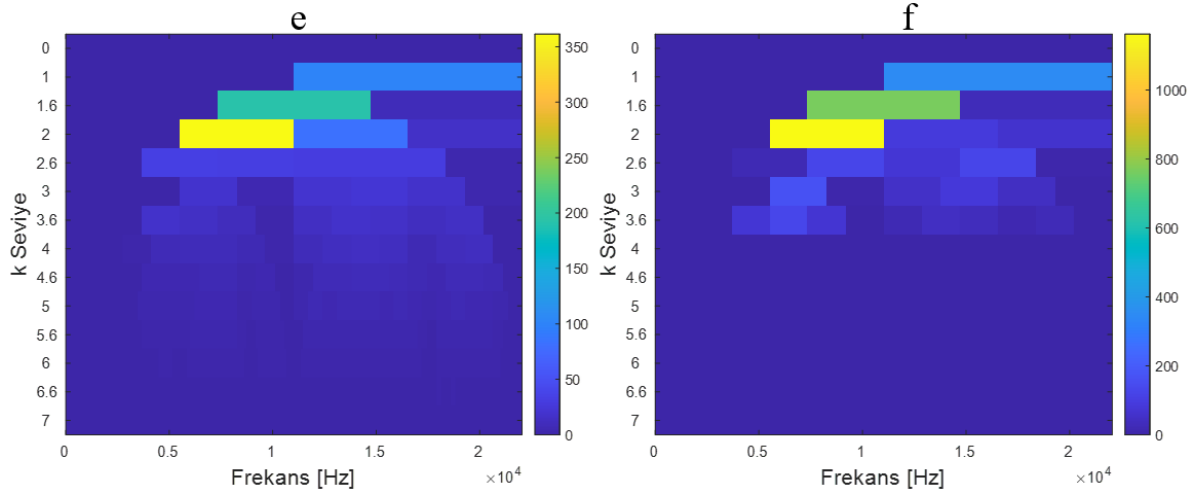


Şekil 4.46: Mineral yağ %45 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Mineral yağa ait %45 nem oranındaki yapılan delinme gerilimi deneylerine ait kurtogram grafikleri şekil 4.46’ da gösterilmektedir. Kurtogram grafiklerindeki desenler incelendiğinde 3 mm elektrot açıklığında diğer açıklıklara oranla daha düşük frekanslar gözlenmektedir. Seviye 1 için 5 mm elektrot açıklığında yüksek seviye deşarj frekansları bulunurken diğer açıklıklarda bulunan 1. Seviyede deşarjlar incelendiğinde düşük seviye deşarjların bulunduğu gözlenmiştir. Bütün frekanslardaki deşarjların seviye 2,5’ da sonlandığı elektrot açıklıklarına ait deneylerden elde edilen kurtogram verilerine göre söylenebilir.

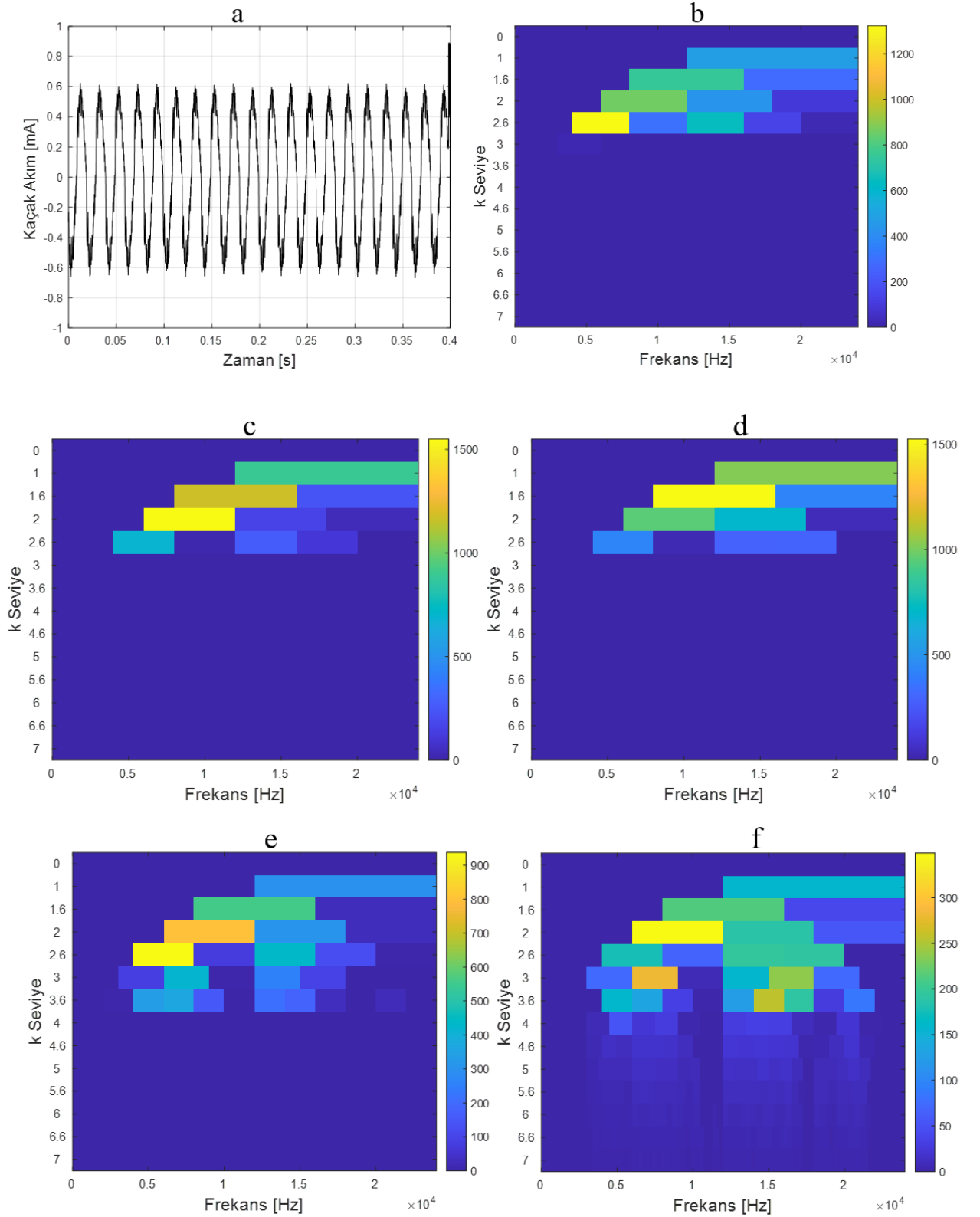


Şekil 4.47: Doğal ester sıvı %45 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



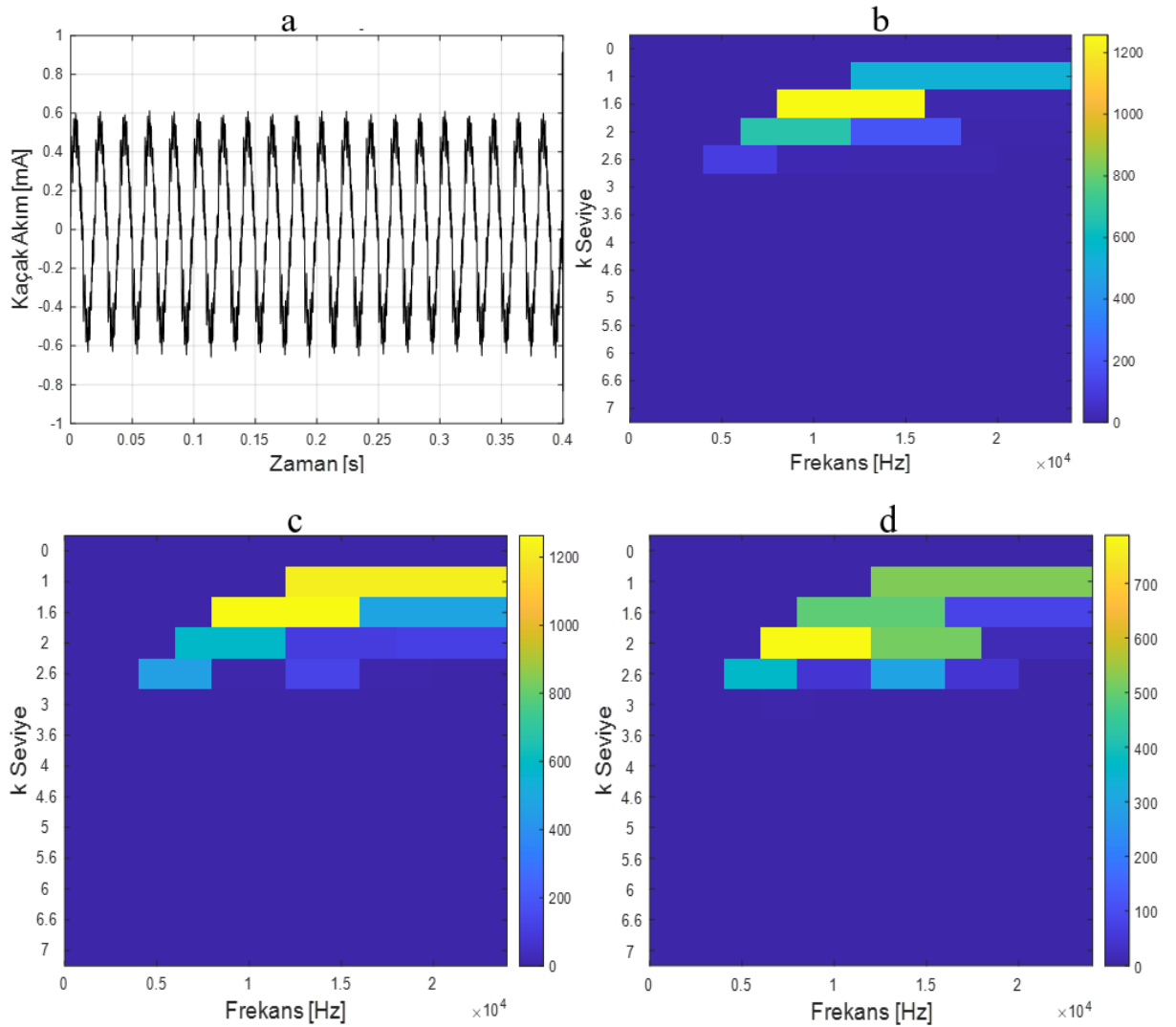
Şekil 4.47 (devamı): Doğal ester sıvı %45 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Daha önce de belirtildiği gibi delinme gerilimi zamanına ait kaçak akımların karşılaştırılmasında akım değerleri ve seviyeleri üzerinden bir fark gözlemlemek çok zordur. Şekil 4.47 doğal ester sıvının %45 nem seviyesinde 5 farklı elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneylerinden alınan verilerin kurtogram yöntemi ile işlenmesini temsil etmektedir. Bu grafiklerdeki desenler incelendiğinde doğal ester sıvıda 1 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde yüksek derecede deşarjlar görülürken, diğer elektrot açıklıklarında düşük ve orta seviye deşarjlar gözlenmiştir. 4 mm elektrot açıklığında düşük derece deşarjlar seviye 5' e kadar devam ederken diğer elektrot açıklıklarından bu görülmemektedir. En kısa deşarj bant genişliği 1 mm elektrot açıklığında bulunmaktadır. Doğal ester sıvı için 1 mm elektrot açıklığında delinme gerilimi deşarjı seviye 2,5 olarak oluşmuşken diğer elektrot açıklıklarında delinme gerilimi deşarjları seviye 2' de oluşmuştur.

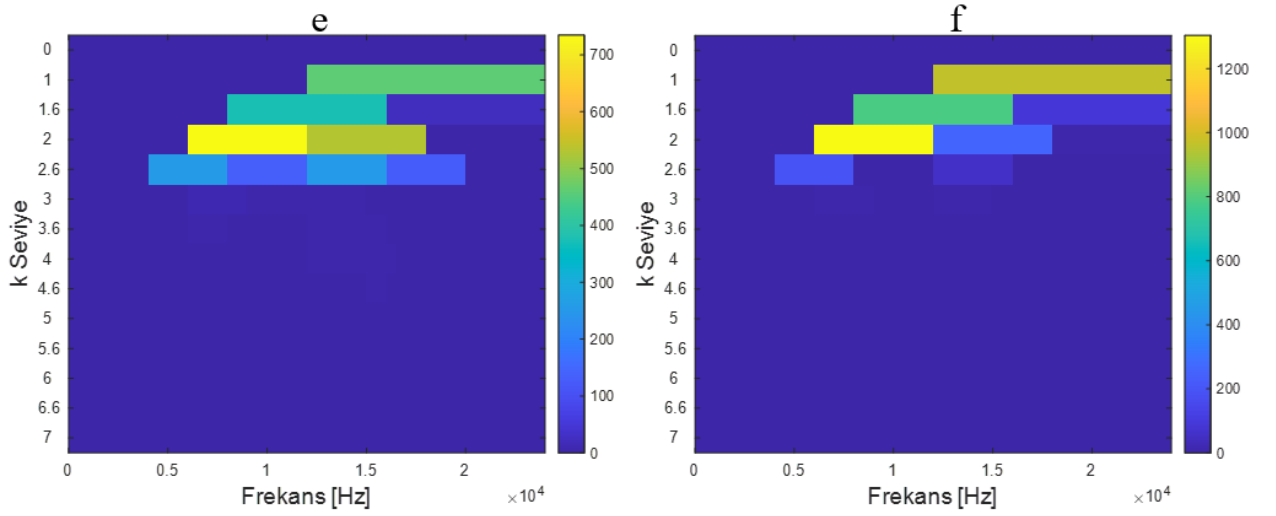


Şekil 4.48: Sentetik ester sıvı %45 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Şekil 4.48’ de sentetik ester sıvı için %45 nem oranında delinme gerilimi deşarjlarına ait kurtogram grafikleri incelendiğinde en uzun bant genişliğine sahip delinme gerilimi deşarjının 4.48.d grafiğinde seviye 1,5’ da oluşan sarı deşarj deseninde olduğu görülmektedir. En kısa deşarj bant genişlikleri ise 1 mm elektrot açıklığına sahip b grafiği ile ve 4 mm elektrot açıklığına sahip e grafiğinde gözlenmektedir. Bununla beraber düşük derece deşarjların 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde yüksek seviyelere kadar devam ettiği f grafiğinden görülmektedir. Aynı zamanda 4 mm ve 5 mm elektrot açıklığında yüksek derece deşarjlar grafik desenlerinde görülürken diğer elektrot açıklıklarında düşük ve orta derece deşarjlar grafiklerde belirgin bir şekilde görülebilmektedir.

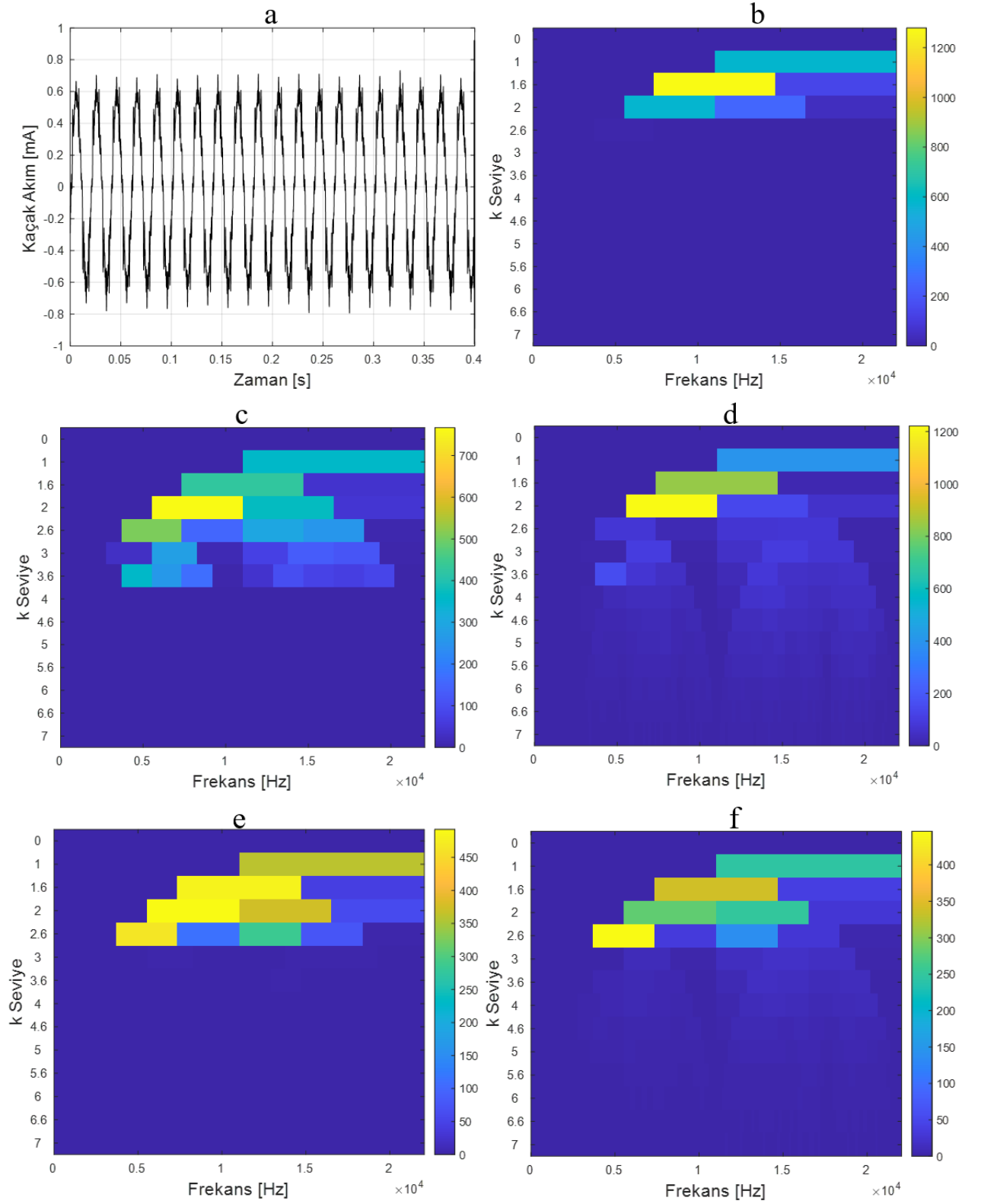


Şekil 4.49: Mineral yağ %50 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



Şekil 4.49 (devamı): Mineral yağ %50 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

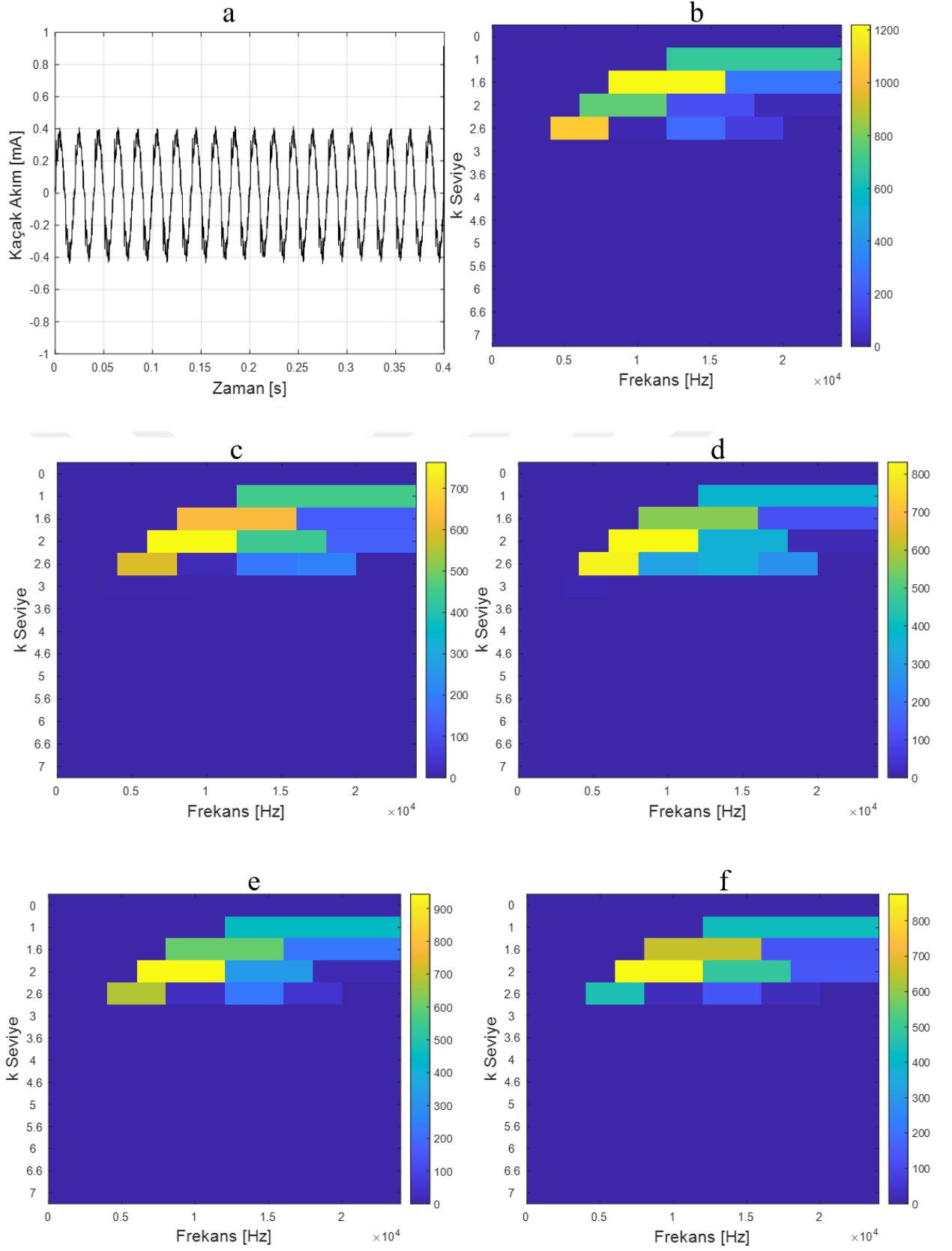
Şekil 4.49’ da nemin %50 seviyesine çıktığı delinme gerilimi deneyleri yapılmıştır. Mineral yağ kullanılarak yapılan bu deneylerde elektrot açıklıklarına göre analiz edilen kurtogram grafikleri incelendiğinde bütün elektrot açıklıkları için düşük ve orta derece deşarjların olduğu grafiklerdeki renklerden görülebilmektedir. Aynı zaman da bütün frekanslardaki deşarjlar seviye 2,5’ de sonlanmış ve daha yüksek seviyelerde görülmemiştir. 1 mm ve 2 mm elektrot açıklıklarından delinme geriliminin bant genişliği daha uzun iken 3 mm, 4mm ve 5mm elektrot açıklıklarından daha kısa olduğu kurtogram grafik desenlerinde görülmektedir.



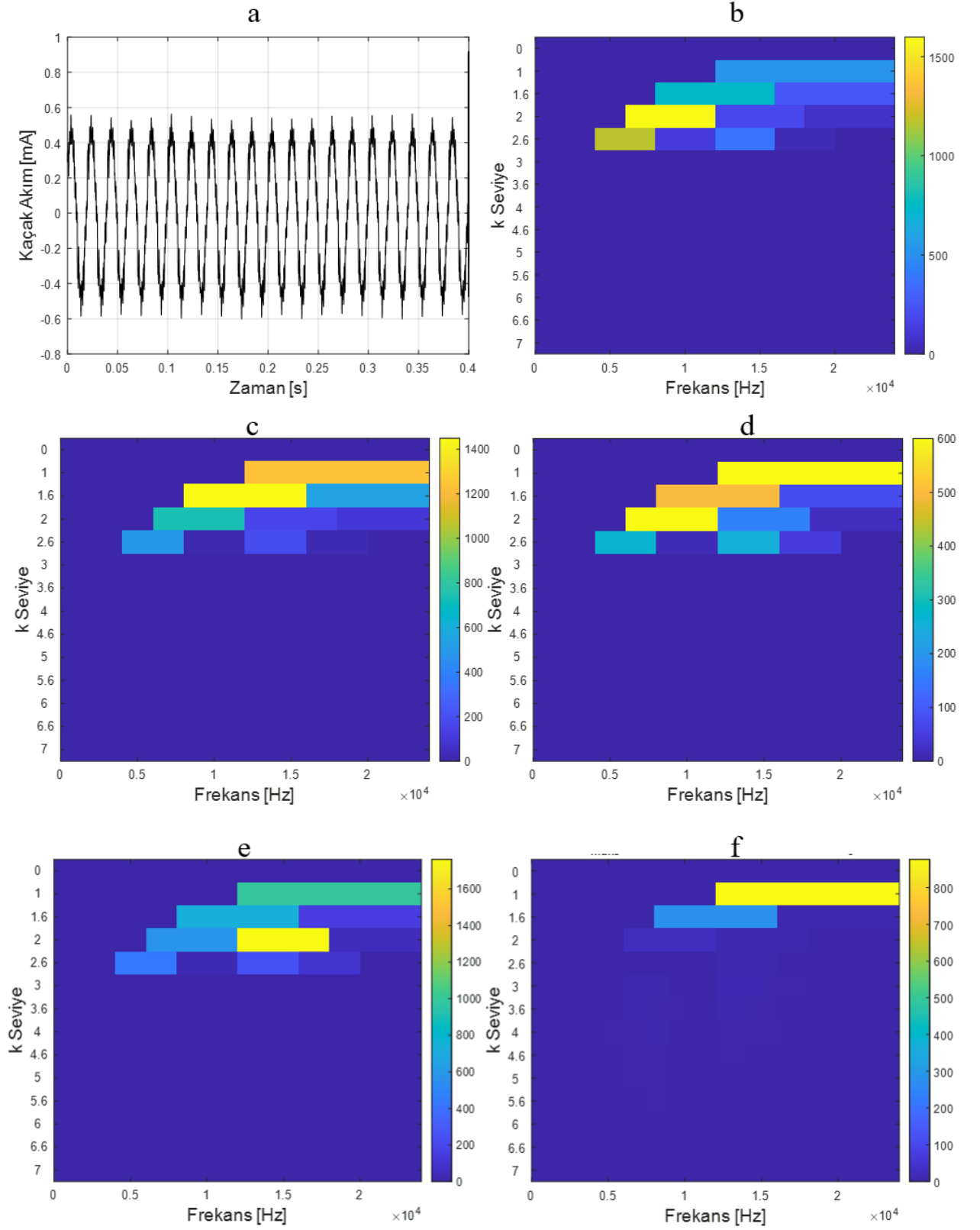
Şekil 4.50: Doğal ester sıvı %50 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Doğal ester sıvının %50 nem seviyesinde bütün elektrot açıklıklarında yapılan deneyler şekil 4.50' de verilmiştir. 3 mm elektrot açıklığına ait d grafiği ve 5 mm elektrot açıklığına ait f grafiği için yapılan deneylerde düşük derece frekansların yüksek seviyelerde devam ettiği grafik desenlerinden görülebilmektedir. En kısa süren delinme gerilimi deşarjı 5mm elektrot açıklığındadır. 1 mm elektrot açıklığında en düşük derecede deşarjlar görülmektedir.

Sentetik ester sıvıda aynı nem seviyesi olan %50' de yapılan deneylere ait kurtogram grafikleri şekil 4.51' de verilmektedir. Elektrot açıklıklarına ait deneylerdeki kurtogram grafikleri incelendiğinde 1mm ve 2 mm elektrot açıklıklarında yüksek deşarjlar grafik renklerinde gözlenirken diğer elektrot açıklıklarında düşük ve orta derecede deşarjların olduğu görülmektedir. Bununla birlikte 1 mm elektrot açıklığındaki delinme gerilimi deşarjının bant genişliğinin diğer elektrot açıklıklarında yaşanan delinme gerilimi bant genişliklerine göre daha uzun olduğu yine grafik desenlerinde açıkça ifade edilmektedir. Aynı zamanda bütün deşarjların seviye 2,5' da bittiği de açıkça görülebilmektedir.

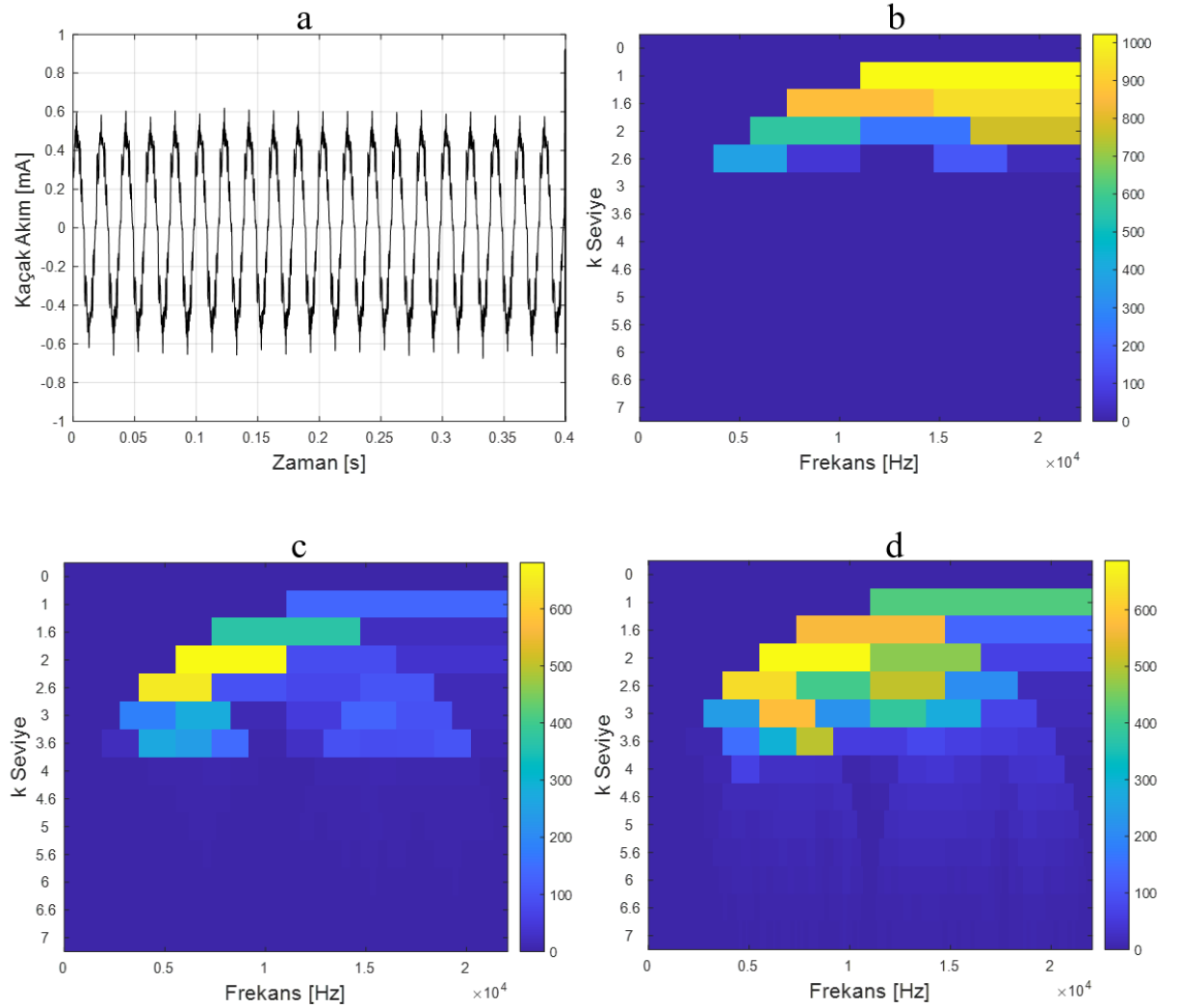


Şekil 4.51: Sentetik ester sıvı %50 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

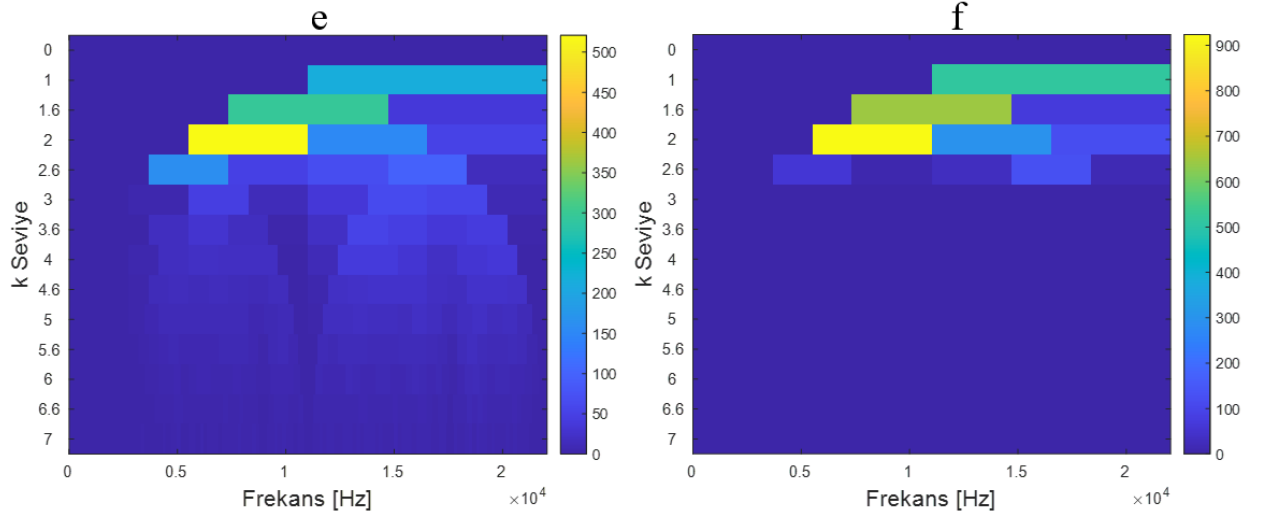


Şekil 4.52: Mineral yağ %55 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Nem seviyesinin %55 olduğu durumda seçilen üç tip sıvı dielektrik için yapılan deneylere ait kurtogram grafikleri ve örnek kaçak akım sinyalleri şekil 4.52, 4.53 ve 4.54’ de açıkça görülmektedir. Nem seviyesi %55 ‘e çıktığında mineral yağ için yapılan deneylere ait kurtogram desenleri incelendiğinde 1 mm, 4 mm ve 5 mm elektrot açıklıklarında yüksek derece deşarjlar görülmezken 2mm ve 3 mm elektrot açıklıklarında yapılan deneyler sonucu oluşturulan kurtogram desenlerinde seviye 1 ve seviye 2 de yüksek derece deşarjların bulunduğu kurtogram renklerinden görülmektedir. Delinme deşarjlarının bant genişlikleri ise 3mm ve 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde diğer elektrot açıklıklarına göre çok daha uzun çıkmıştır.

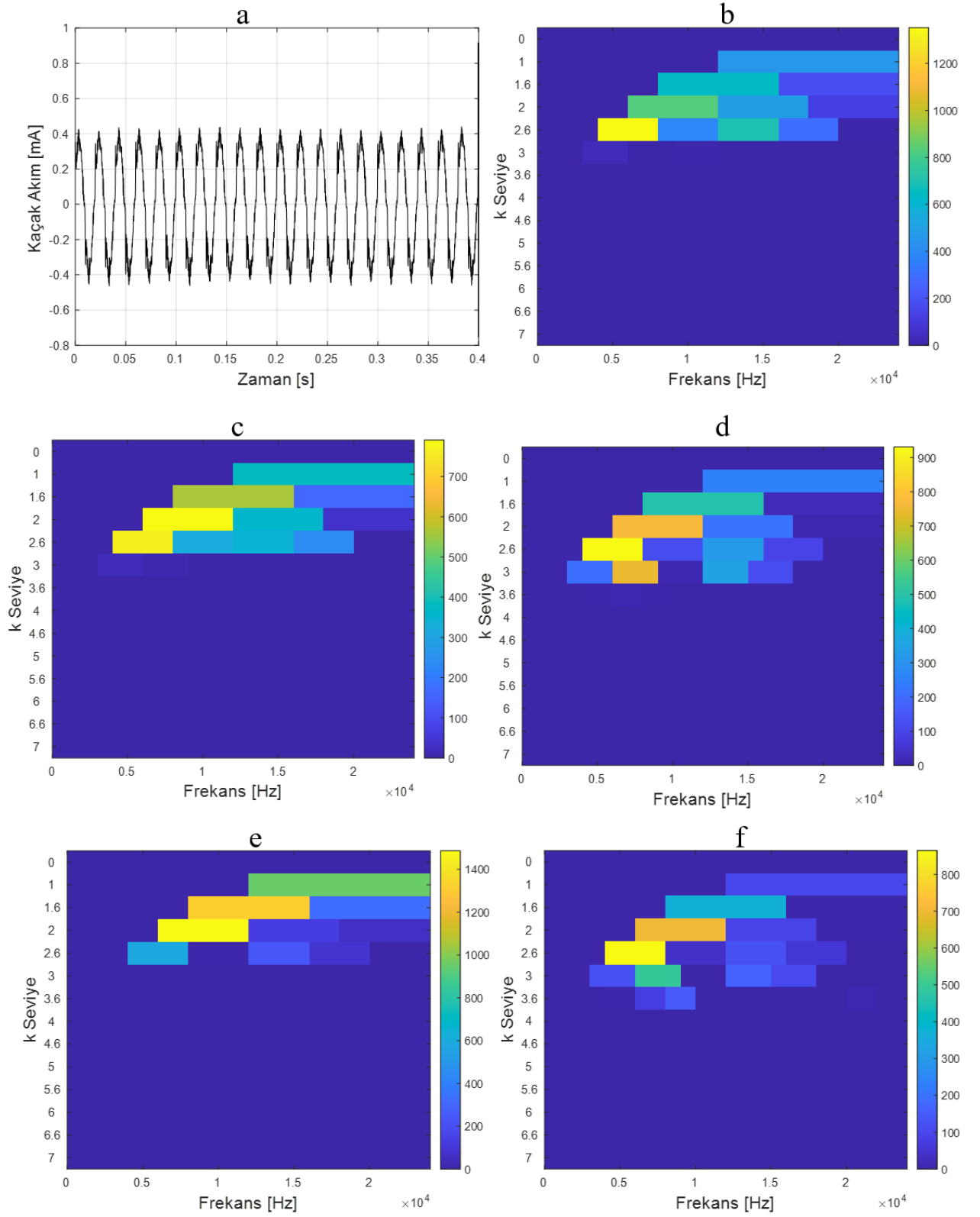


Şekil 4.53: Doğal ester sıvı %55 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



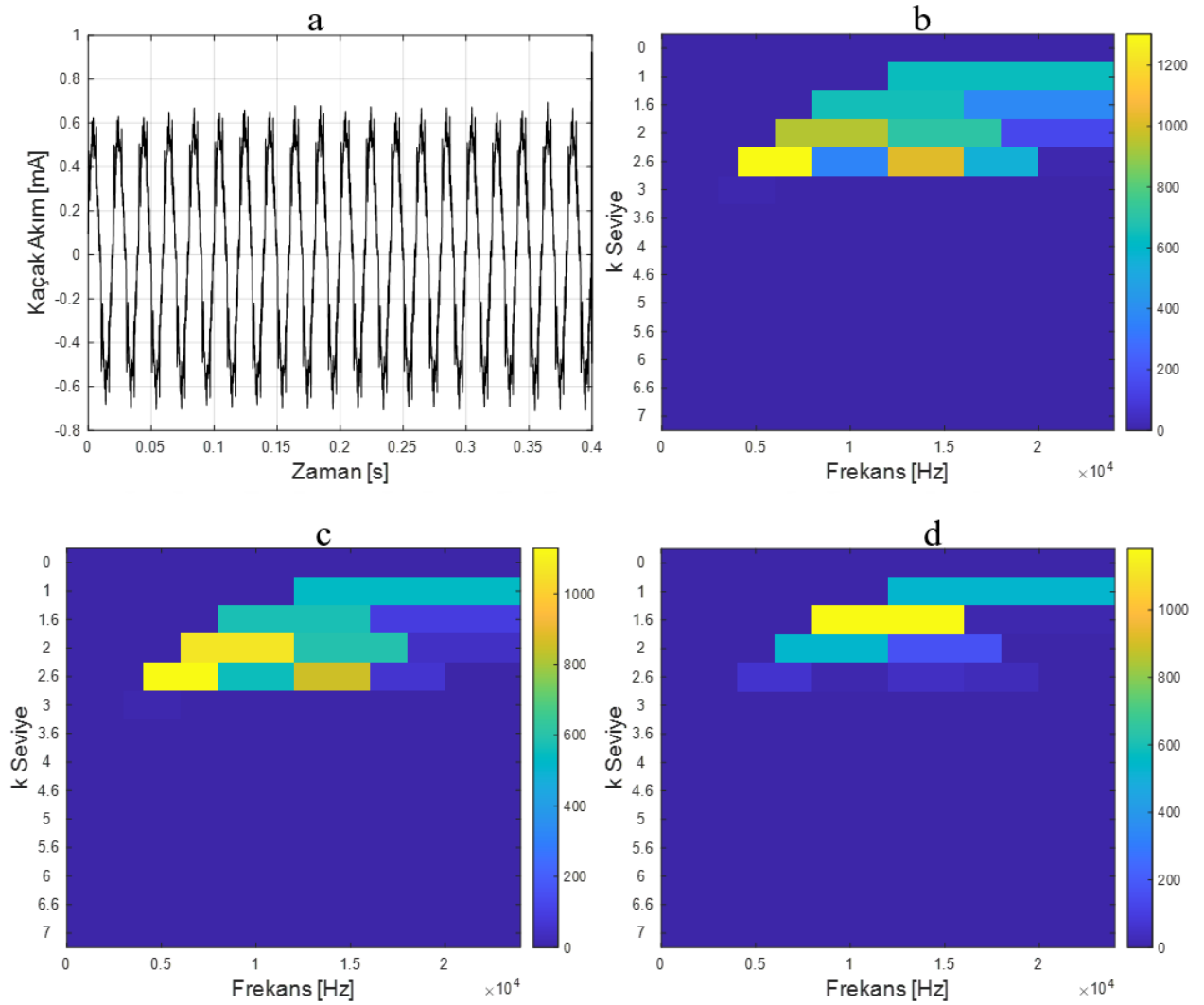
Şekil 4.53 (devamı): Doğal ester sıvı %55 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Doğal ester sıvı için aynı nem seviyesinde yapılan deneylere ait kurtogram grafikleri analiz edilecek olursa 3 mm ve 4 mm elektrot açıklıklarında düşük derece deşarjların yüksek seviyelere kadar devam ettiği kurtogram grafiklerinde görülmektedir. 3mm, 4mm ve 5 mm elektrot açıklıklarından ise yüksek deşarjlar görülmezken 1mm ve 3 mm elektrot açıklıklarında yüksek derece deşarjlar kurtogram grafiklerinde görülmektedir. 1 mm elektrot açıklığında delinme bant genişliği diğer elektrot açıklıklarındaki delinme gerilimlerine ait bant genişlikleri incelendiğinde çok daha uzun bir bant genişliğinde olduğu görülmektedir. Delinme gerilimi seviyeleri ise 1 mm elektrot açıklığında seviye 1 de gerçekleşirken diğer elektrot açıklıklarında 2. seviyede gerçekleşmiştir.

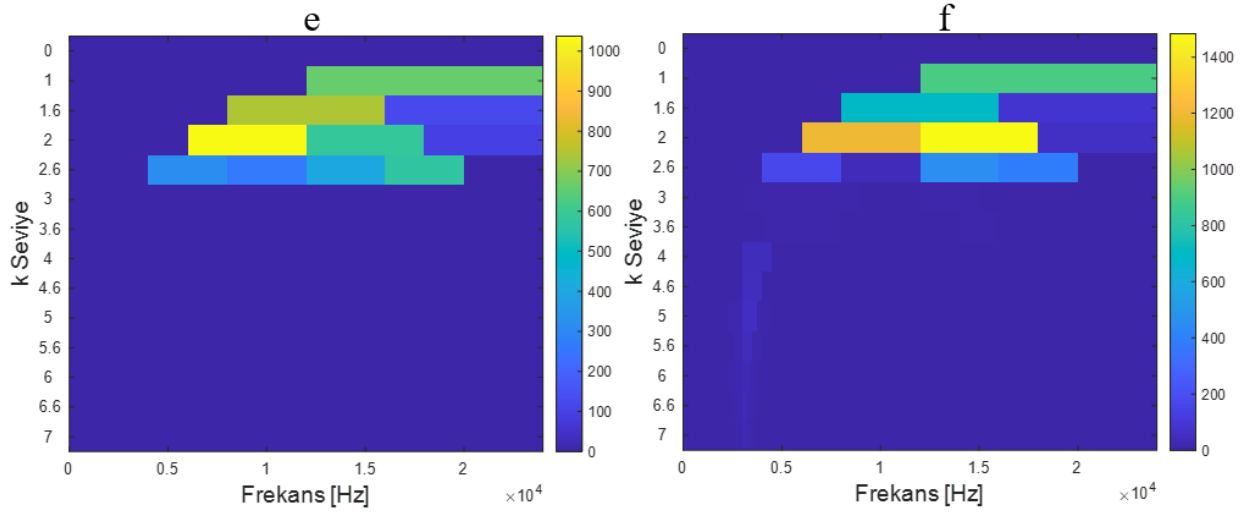


Şekil 4.54: Sentetik ester sıvı %55 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

%55 nem seviyesinde sentetik ester deneyleri için oluşturulan kurtogram grafiklerine bakıldığında yine 1 mm ve 2 mm’ de düşük ve orta dereceli deşarj frekanslarının bulunduğu görülmektedir. Fakat elektrot açıklığı 3mm ve üstüne çıktığında ise yüksek derece deşarjların görüldüğü şekil 4.54’ de bulunan d, e ve f grafiklerinde renk skalalarından görülebilmektedir. Delinme gerilimlerine ait bant genişliklerinin seviye 2 ve 2,5 da olduğu kurtogram desenlerinden açıkça görülmektedir. 5 mm elektrot açıklığında düşük seviye deşarjlar seviye 3,5 ‘a kadar devam ettiği gözlenmektedir.

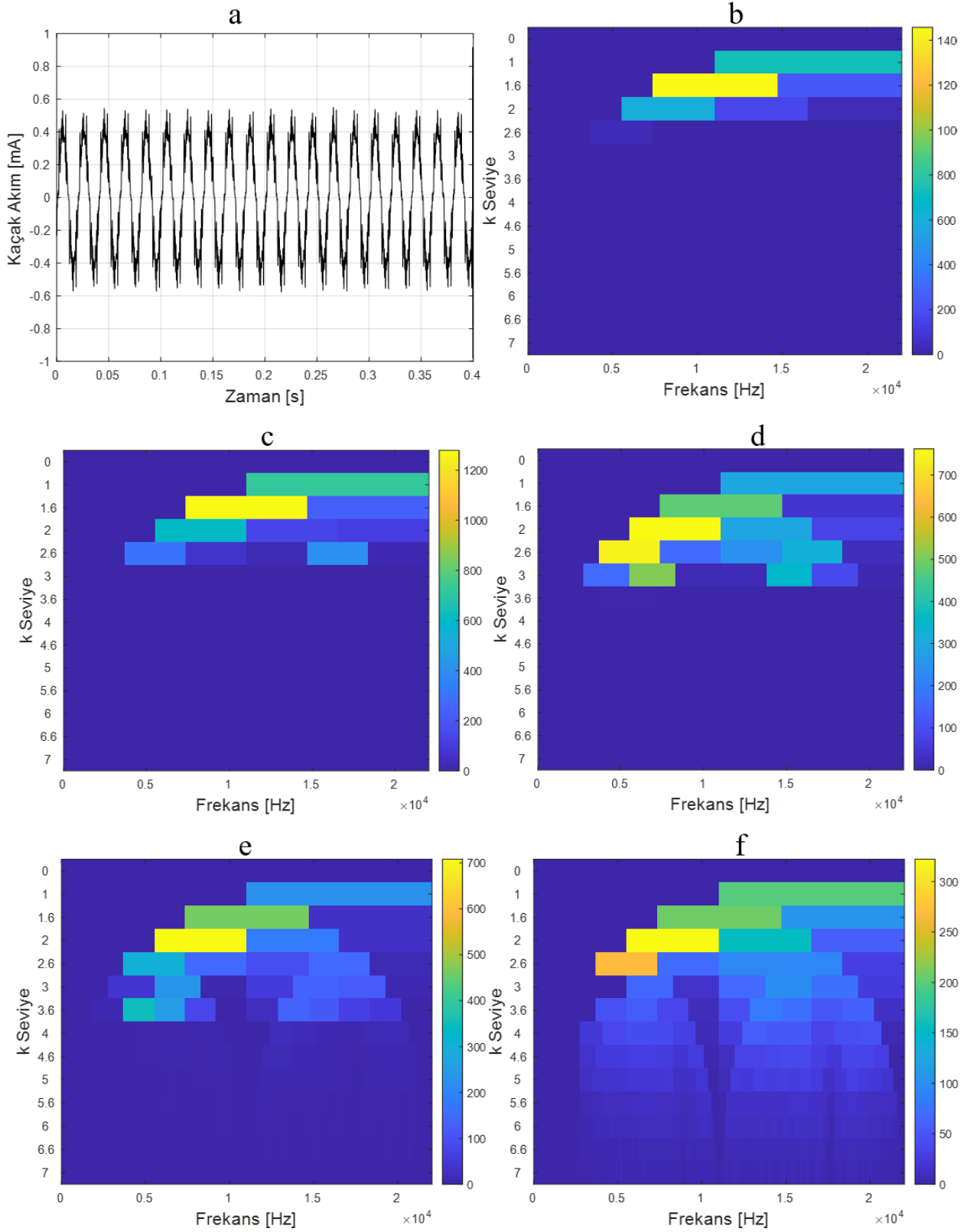


Şekil 4.55: Mineral yağ %60 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



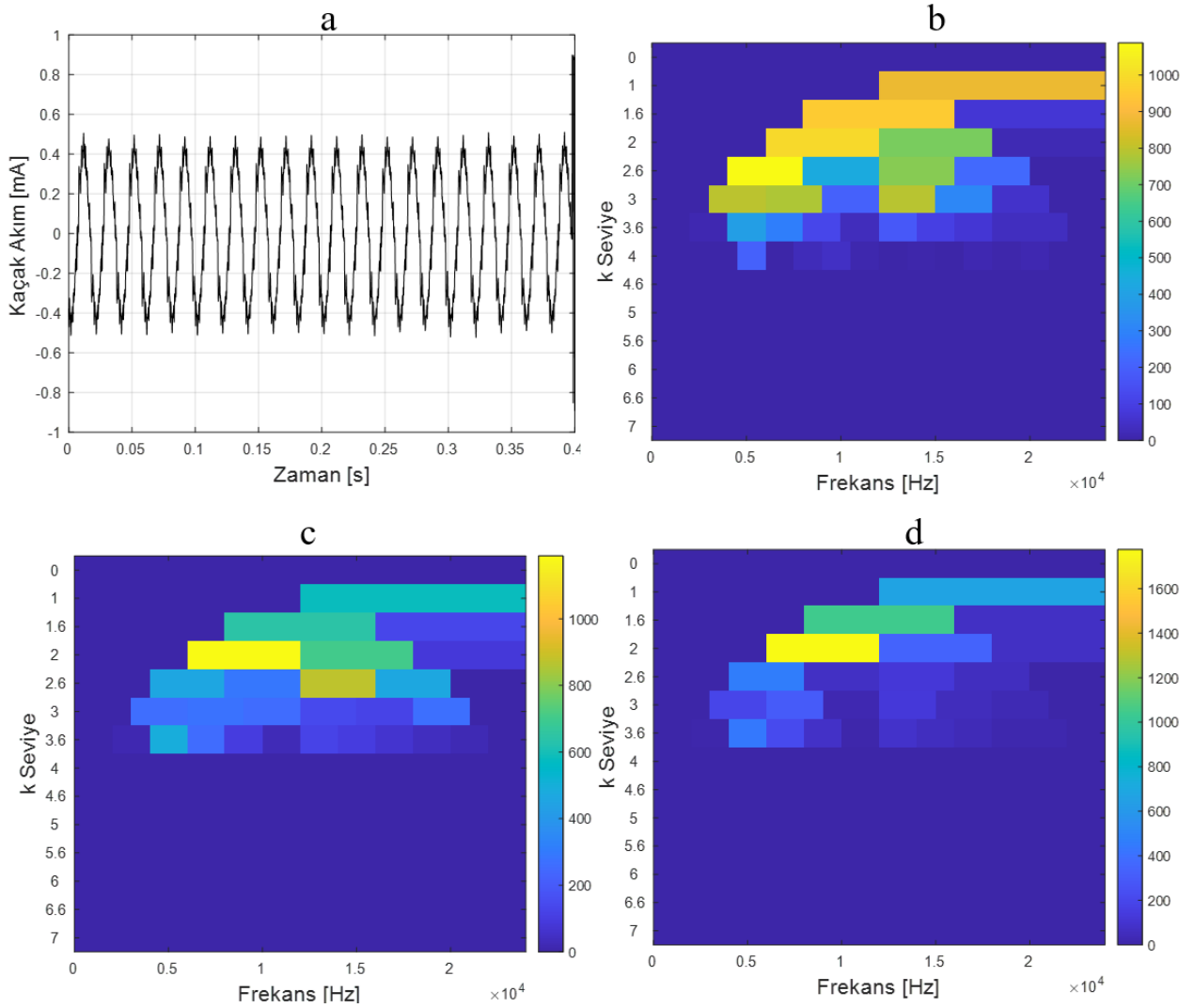
Şekil 4.55 (devamı): Mineral yağ %60 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Mineral yağa ait %60 nem seviyesinde yapılan deneylerin kurtogram analizleri şekil 4.55’ de verilmiştir. Delinme gerilimi deneylerine ait kurtogram grafikleri analiz edildiğinde delinme gerilimine ait bant genişliğinin 4.55.d grafiğinde gösterilen 3 mm elektrot açıklığında diğer elektrot açıklıklarına göre daha uzun oluşu desenden görülmektedir. Aynı zamanda 3mm elektrot açıklığında orta ve yüksek derece deşarjlar bulunmamaktadır. En kısa delinmeye ait bant genişlikleri b ve c grafiğinde 1 mm ve 2 mm elektrot açıklıklarında oluşmuştur.

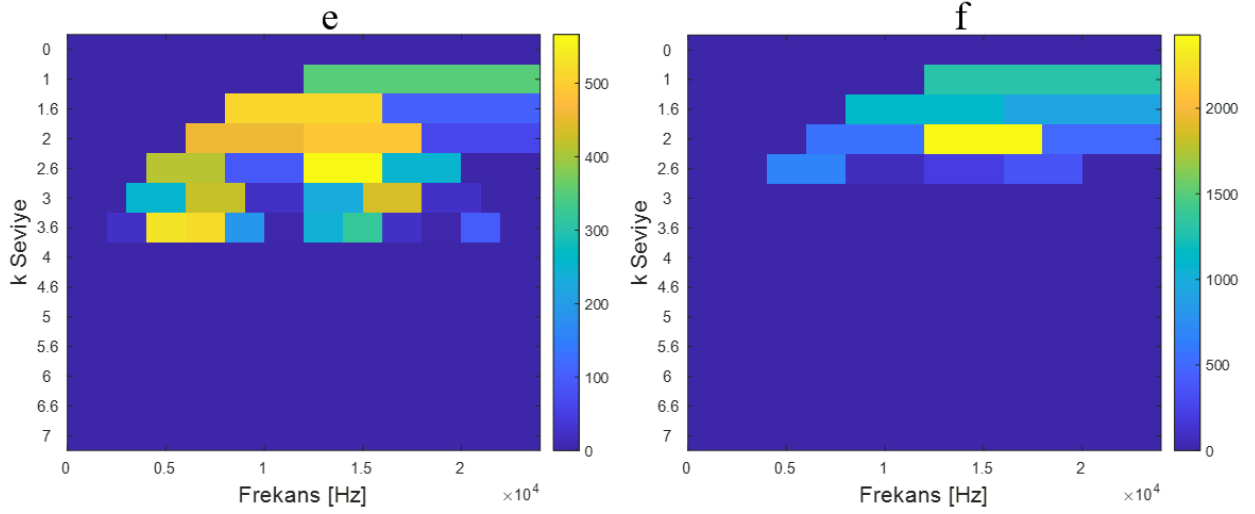


Şekil 4.56: Doğal ester sıvı %60 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

%60 nem seviyesindeki doğal ester sıvıya ait kurtogram grafikleri analiz edildiğinde 5 mm hariç diğer elektrot açıklıklarında yüksek derece deşarjların oluşmadığı gözlenmektedir. Bununla beraber aynı elektrot açıklığında yüksek seviyelere doğru düşük deşarjların devam ettiği kurtogram grafiklerindeki desenlerde açıkça görülmektedir. 1 mm ve 2 mm elektrot açıklığında oluşan delinme gerilimi bant genişlikleri diğer elektrot açıklıklarında oluşan delinme gerilimi bant genişliklerinden daha uzundur. Elektrot açıklıkları arttıkça deşarj seviyelerinin de yükseldiği görülmektedir.

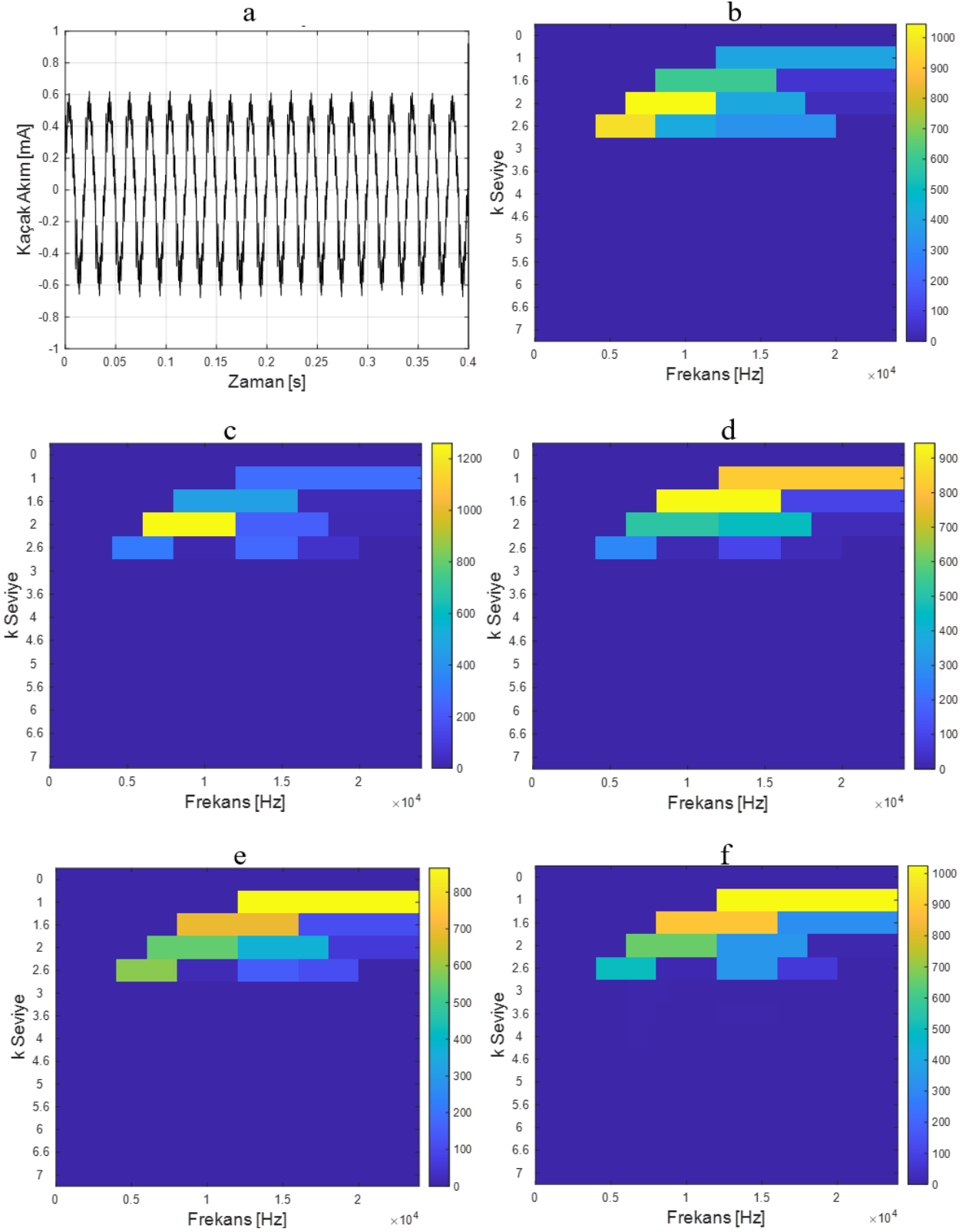


Şekil 4.57: Sentetik ester sıvı %60 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



Şekil 4.57 (devamı): Sentetik ester sıvı %60 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Sentetik ester sıvısının %60 seviyesindeki delinme gerilimi deneylerinin verileri ile analiz edilen kurtogram grafikleri şekil 4.57’ de görülebilmektedir. 1 mm ve 4 mm elektrot açıklıklarında yüksek derece deşarjlar görülürken diğer elektrot açıklıklarında düşük ve orta derece deşarjlar bulunmaktadır. 5 mm elektrot açıklığında deşarjlar seviye 2,5 da biterken 2 mm, 3 mm ve 4 mm elektrot açıklıklarında seviye 3’ e kadar sürmüştür, 1 mm elektrot açıklığında ise 4. seviyede deşarjlar sonlanmıştır.

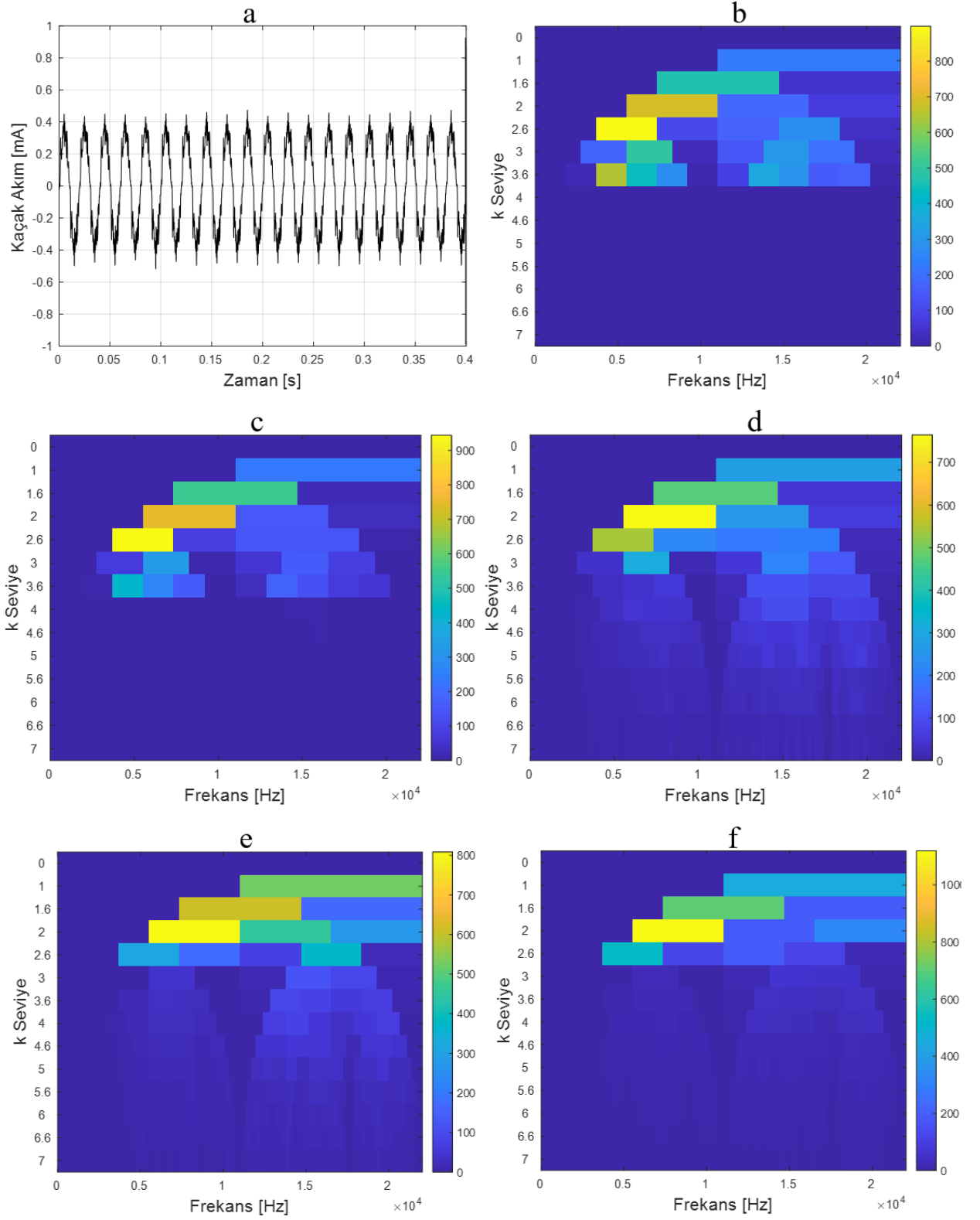


Şekil 4.58: Mineral yağ %65 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: $d=1$ mm, c: $d=2$ mm d: $d=3$ mm, e: $d=4$ mm, f: $d=5$ mm, elektrot açıklıkları).

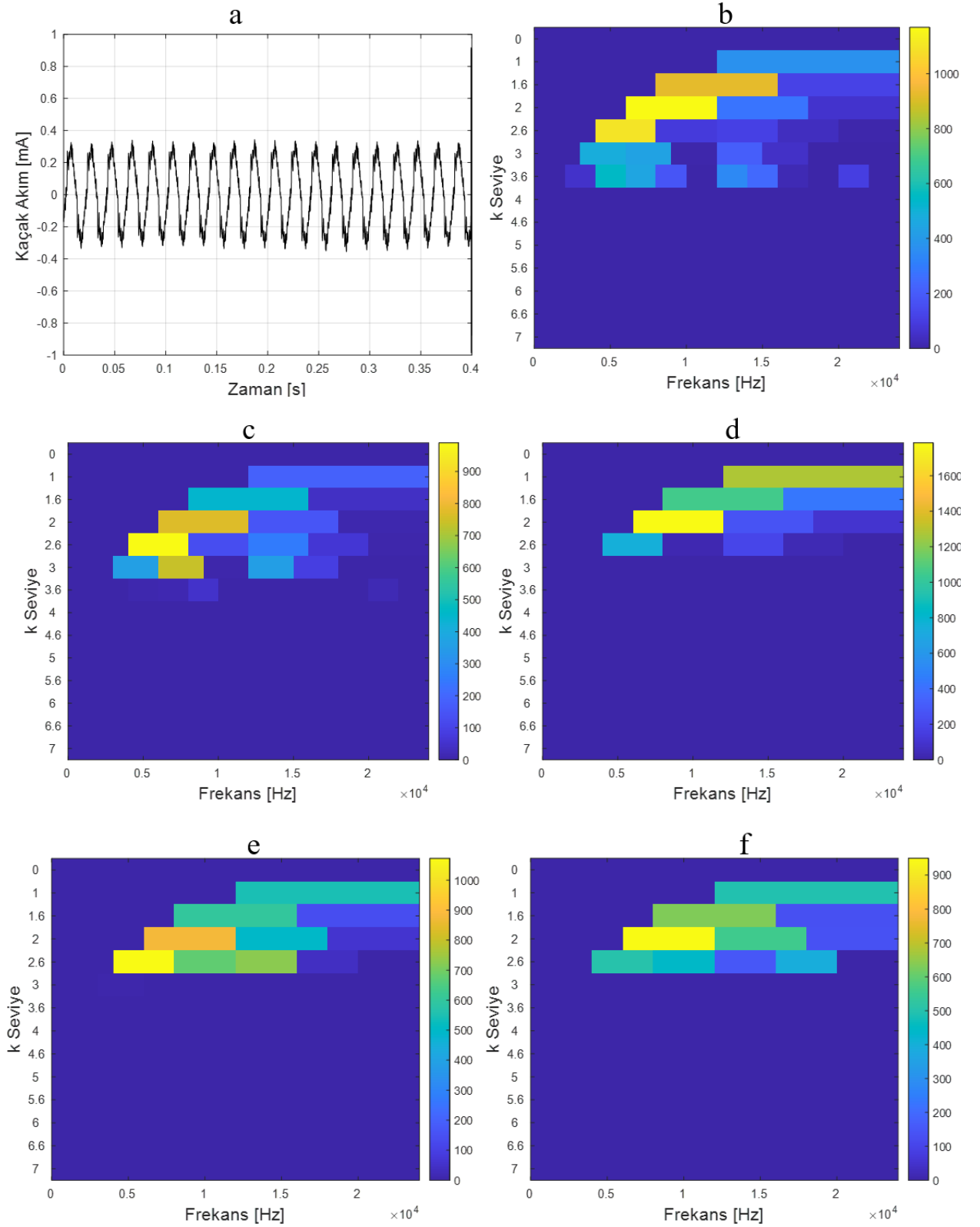
Ortam neminin %65 olarak ayarlandığı nem odasında yapılan delinme gerilimi deneylerine ait kurtogram grafikleri şekil 4.58, 4.59 ve 4.60' da gösterilmektedir. Şekil 4.58' de mineral yağa ait delinme gerilimlerinden elde edilen verilere ait kurtogram desenleri bulunmaktadır. Bu kurtogram desenleri incelendiğinde 1 mm ve 2 mm elektrot açıklıklarında düşük ve orta derece frekans deşarjları değerleri görülürken 3 mm, 4mm ve 5 mm açıklıkta seviye 1 ve 1,5' da yüksek derece frekans deşarjları açıkça gözlenmiştir. Delinme gerilimi deşarjlarını bant genişlikleri incelendiğinde ise 1 mm ve 2 mm elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde bant genişlikleri daha kısa iken diğer elektrot açıklıklarındaki bant genişliklerinde daha uzundur. Bütün elektrot açıklıklarında deşarjların seviye 2,5 'da bittiği grafiklerde belirgin bir şekilde görülmektedir.

Aynı nem seviyesinde doğal ester sıvıda yapılan delinme gerilimi deneyleri de şekil 4.59' da verilen grafiklerde görülmektedir. Düşük frekans deşarjları 1mm ve 2mm elektrot açıklıklarında seviye 3,5 da biterken kurtogram grafiklerindeki desenlerden de görüleceği üzere daha yüksek seviyelerde devam etmektedir. Delinme gerilimine ait deşarjların bant genişlikleri incelendiğinde ise 1 mm ve 2 mm de oluşan deşarjların bant genişlikleri diğer elektrot açıklıklarına göre daha kısadır.

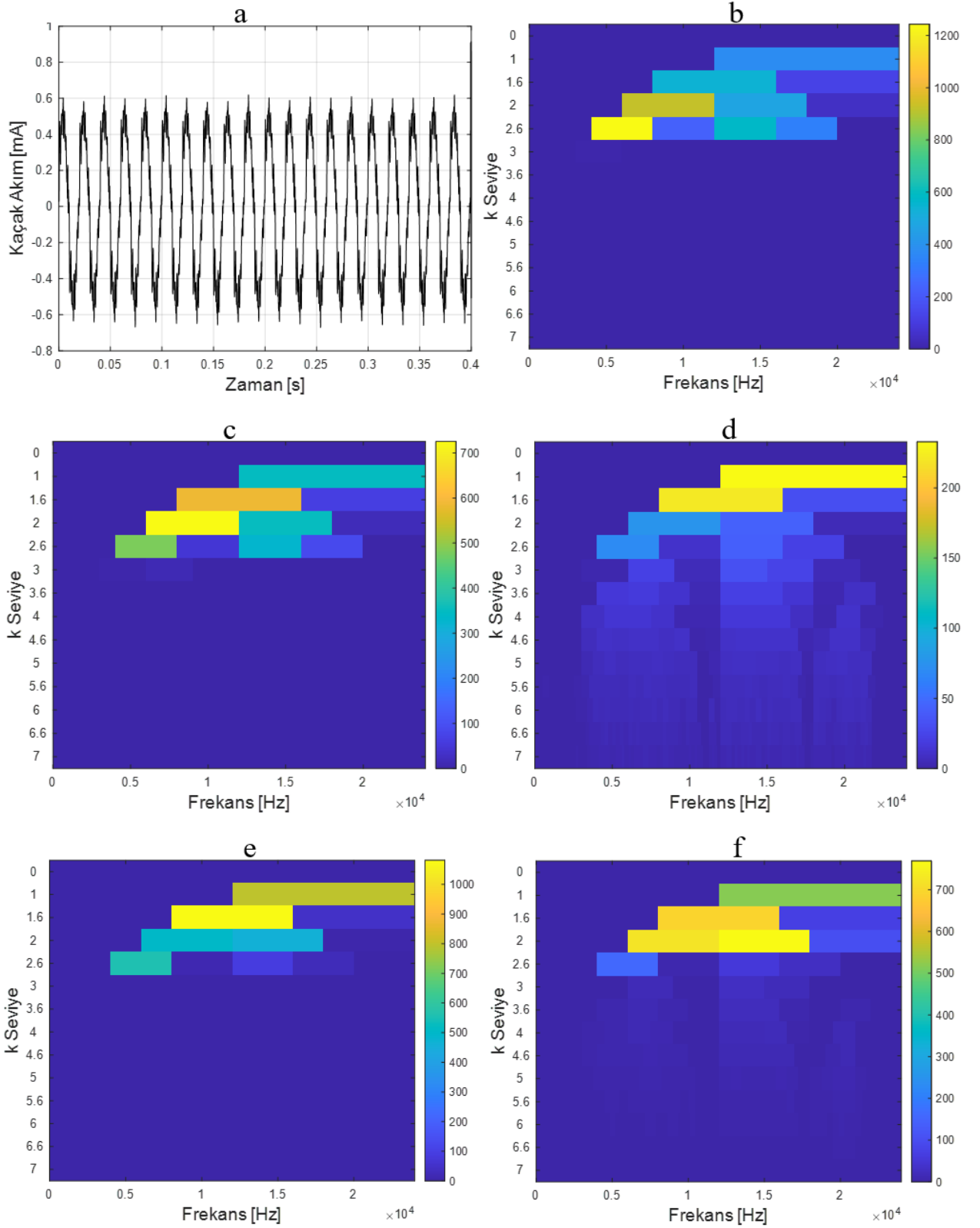
Sentetik ester sıvının %65 nem seviyesindeki delinme gerilimi deneylerindeki verilerden oluşturulan kurtogram grafikleri şekil 4.60' da görülmektedir. Kurtogram grafiklerindeki desen ve renkler analiz edildiğinde 3 mm ve 5 mm elektrot açıklıklarını gösteren 4.60.d ve 4.60.f grafiklerinde düşük ve orta derece deşarjların olduğu görülmekte ve yüksek derece deşarjların bulunmadığı gözlenmektedir.



Şekil 4.59: Doğal ester sıvı %65 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

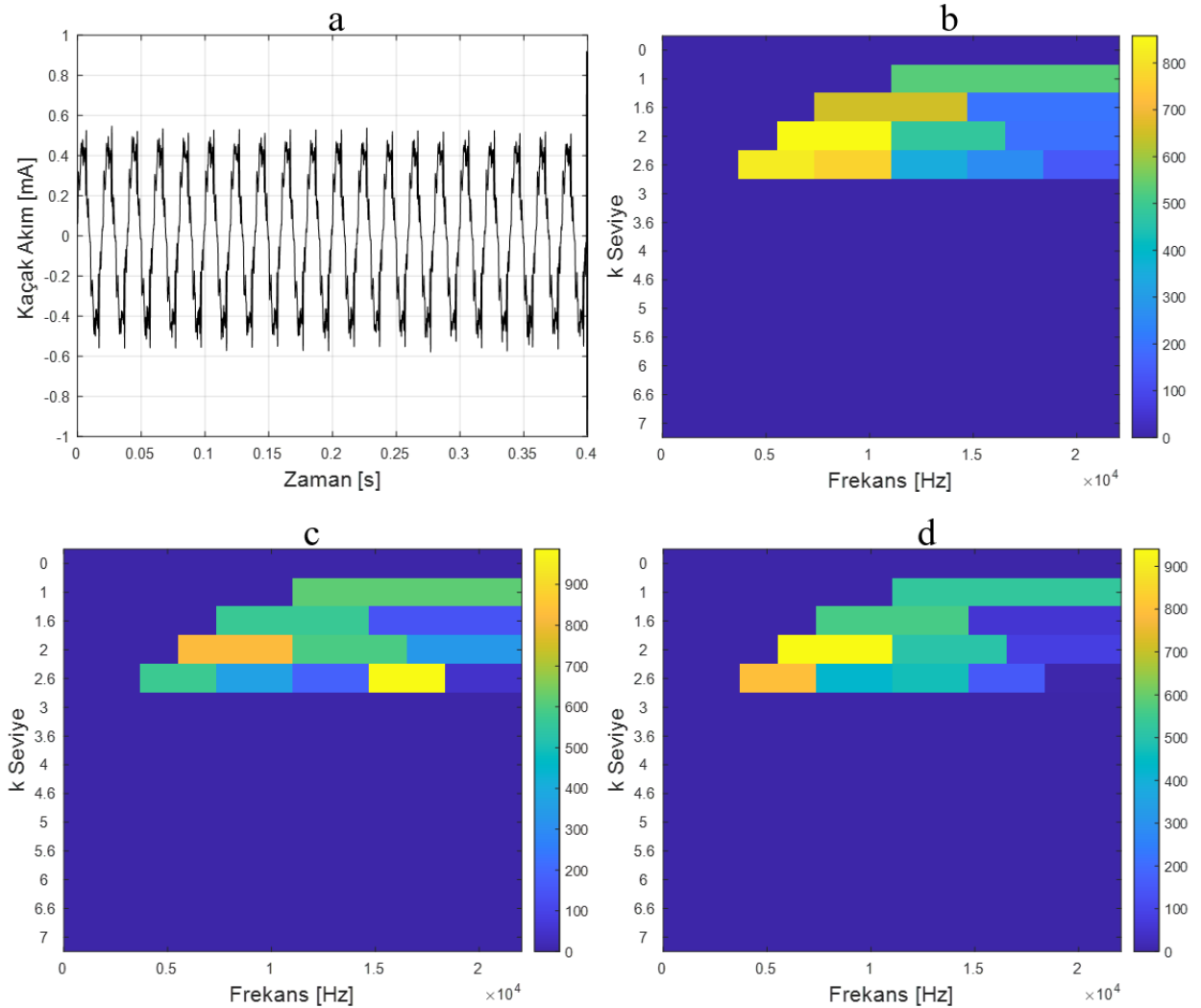


Şekil 4.60: Sentetik ester sıvı %65 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

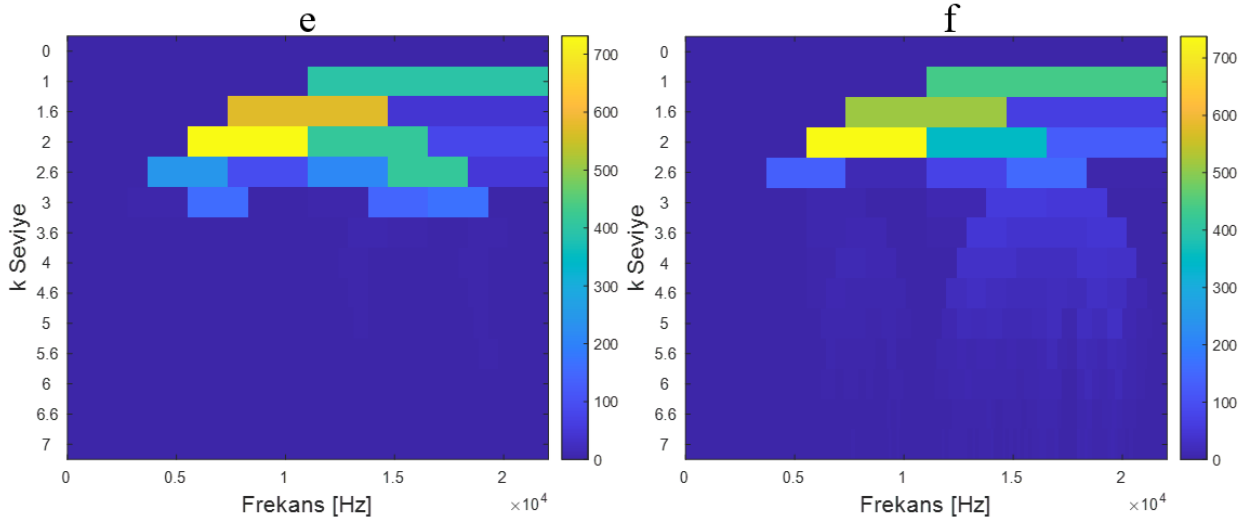


Şekil 4.61: Mineral yağ %70 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Nem değerinin %70' çıktığı durumlarda yağlar için yapılan delinme gerilimi deneylerine ait kurtogram grafikleri şekil 4.61, 4.62 ve 4.63' de gösterilmektedir. Mineral yağa ait delinme gerilimine ait bütün elektrot açıklıkları için yapılan deneylerine ait kurtogram grafikleri incelendiğinde en yüksek bant genişliğine sahip olan delinme geriliminin 3 mm elektrot açıklığında yapılan deneye ait 4.61.d grafiğinde olduğu görülmektedir. En kısa bant genişliği ise 4.61.b grafiğine ait 1 mm elektrot açıklığında gözlenmiştir. 3 mm ve 5 mm elektrot açıklığında düşük derece frekans deşarjları kurtogram desenlerinde görüldüğü üzere yüksek seviyelerde devam ederken diğer elektrot açıklıklarında deşarjların seviye 2,5' da sonlandığı görülmektedir.

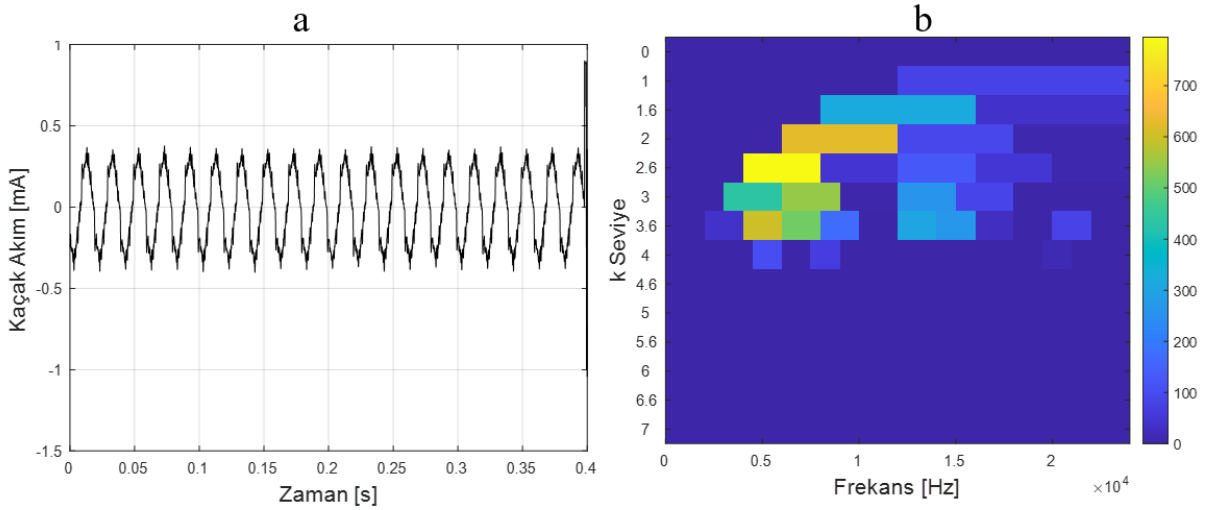


Şekil 4.62: Doğal ester sıvı %70 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)

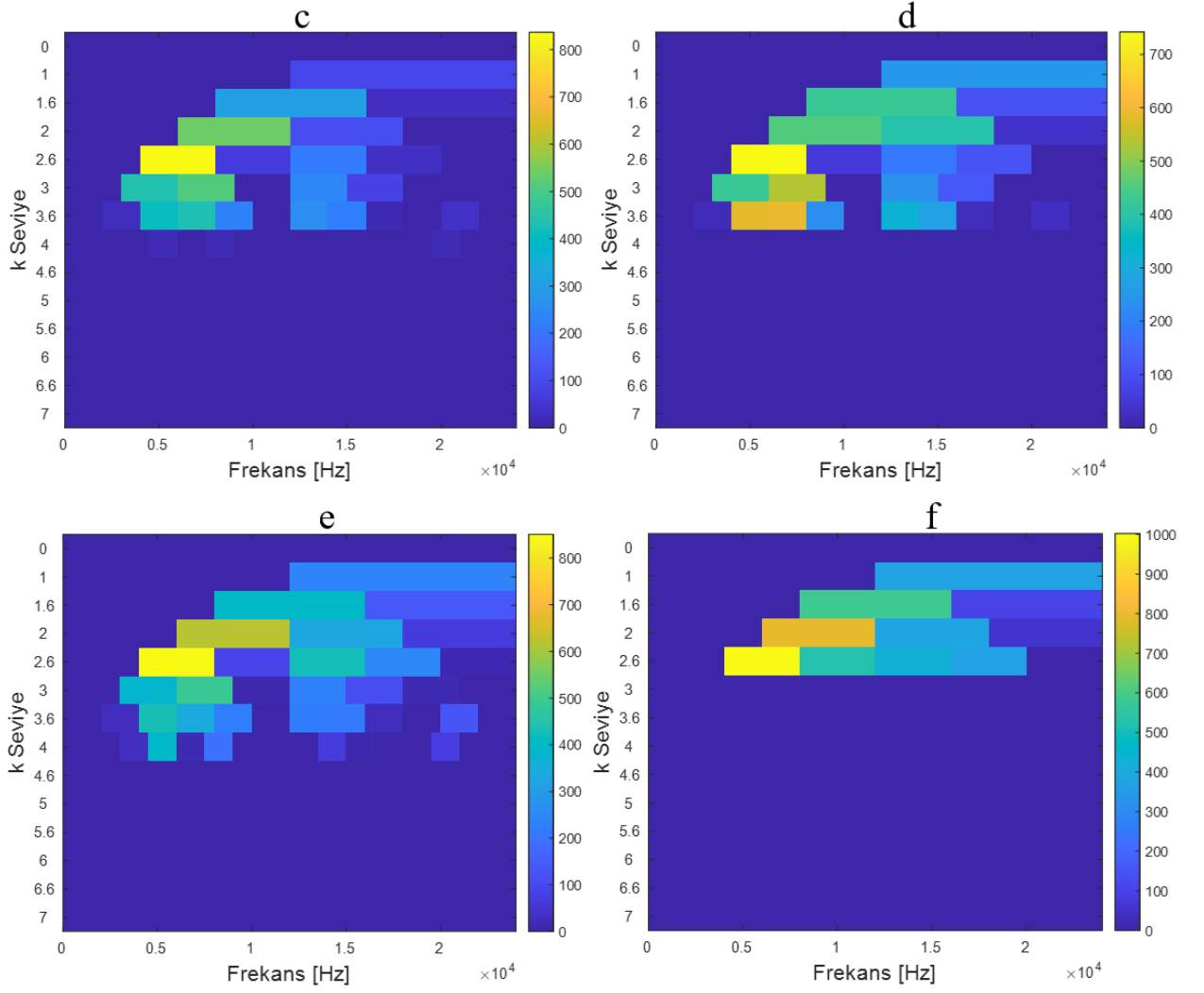


Şekil 4.62 (devamı): Doğal ester sıvı %70 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)

Şekil 4.62’ de doğal ester sıvıya ait nem seviyesinin %70 olduğu delinme deneylerinin kurtogram grafikleri görülmektedir. Doğal ester sıvıda da yüksek derece deşarjlar 1mm ve 4 mm aralığında yapılan deneylerde görülürken 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde yüksek derece frekanslar bulunmamaktadır. Fakat 5 mm elektrot açıklığı içini deşarjların yüksek seviyelere doğru devam ettiği görülmektedir.

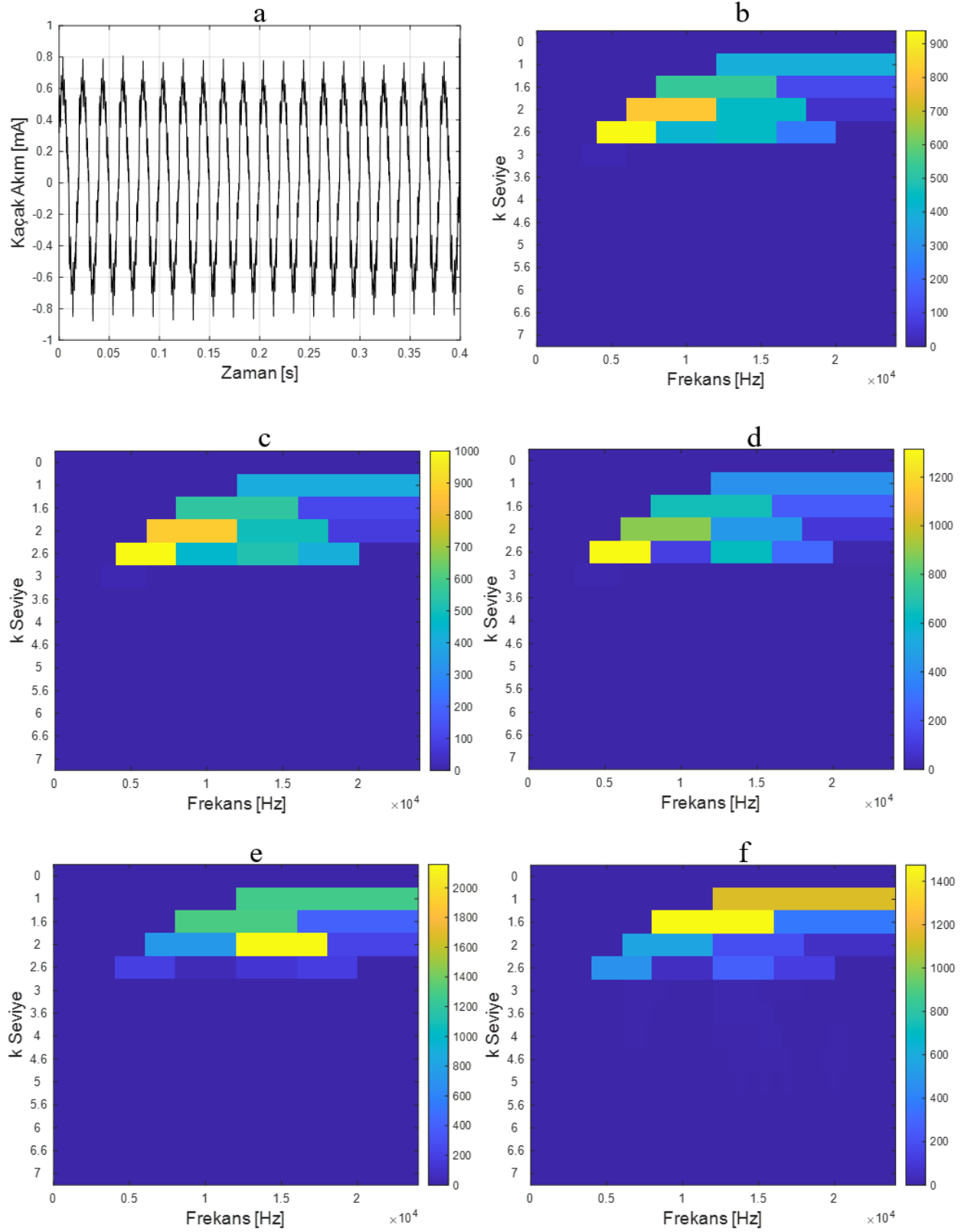


Şekil 4.63: Sentetik ester sıvı %70 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



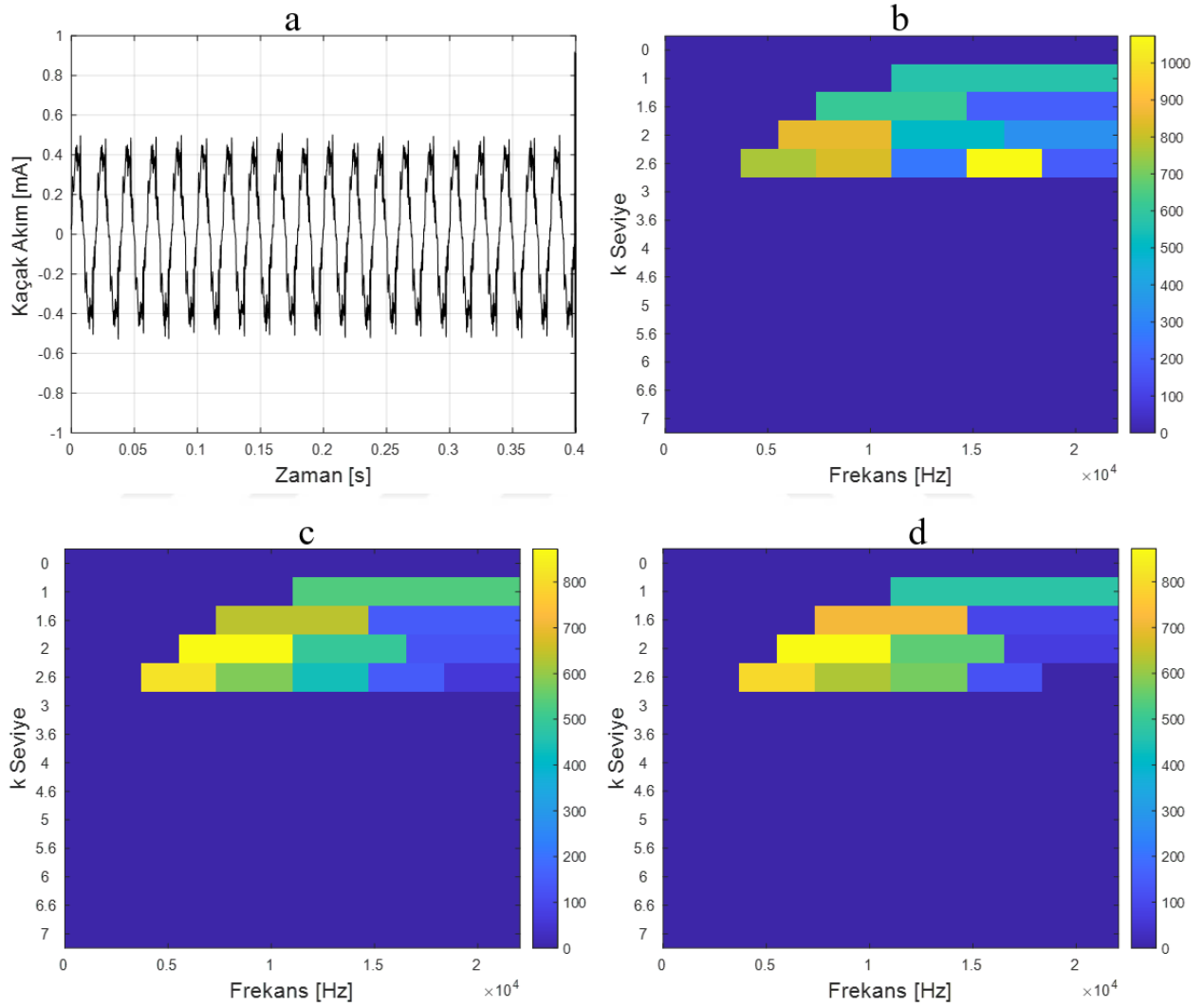
Şekil 4.63 (devamı): Sentetik ester sıvı %70 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Sentetik ester sıvı %70 nem seviyesinde yapılan deneylere ait kurtogram grafikleri incelendiğinde 2mm ve 4mm elektrot açıklıklarında yüksek deşarjlar görülmezken diğer elektrot açıklıklarında seviye 2 ve seviye 3,5’ da yüksek deşarjlar görülmektedir. Delinme gerilimi bant genişlikleri ise bütün elektrot açıklıklarındaki kurtogram grafiklerinin desenleri analiz edildiğinde aynı uzunluktadır. Aynı zaman frekans bileşenleri ve kurtogram renk skalası incelendiğinde birden fazla farklı frekans değerlerinde deşarjların olduğu açıkça görülmektedir.

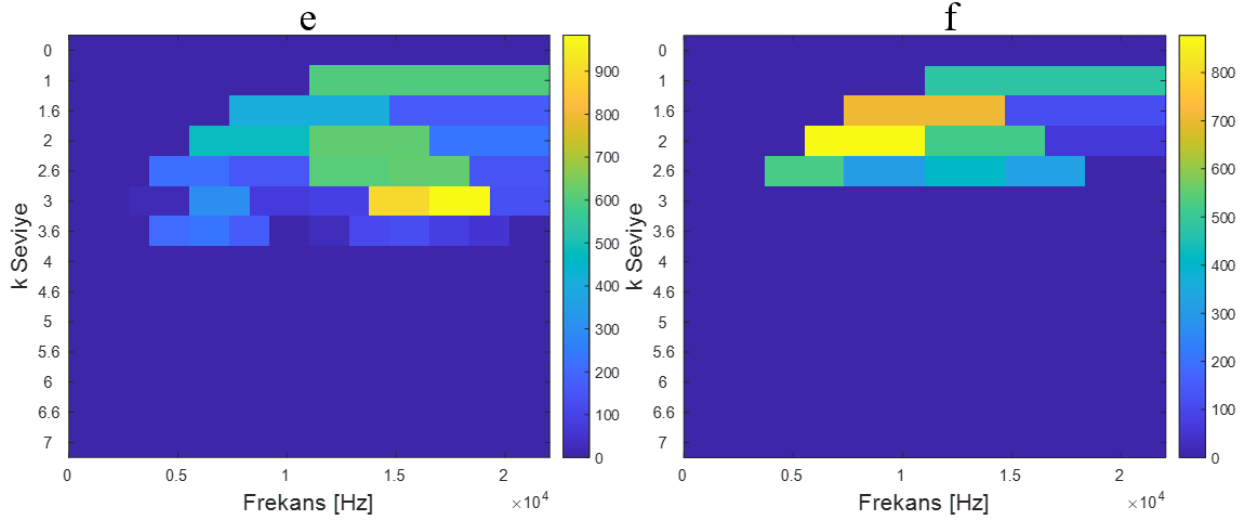


Şekil 4.64: Mineral yağ %75 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Yapılan delinme gerilimi deneylerinde %75 nem seviyesine çıkıldığında mineral yağda yapılan delinme gerilimi deneylerine ait kurtogram grafikleri şekil 4.64’ de verilmektedir. Düşük ve orta derece frekansların görüldüğü 3 mm ve 4 mm elektrot açıklıkları dahil olmak üzere bütün elektrot açıklıklarında deşarjların seviye 2,5 da bittiği kurtogram grafiklerindeki desenlerden görülmektedir. Bununla beraber delinme gerilimi deşarjlarının bant genişliklerini 1 mm’den 3 mm’ ye kadar aynı uzunlukta olduğu 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde ise en uzun olduğu şekil 4.64.f grafiğinde görülmektedir.



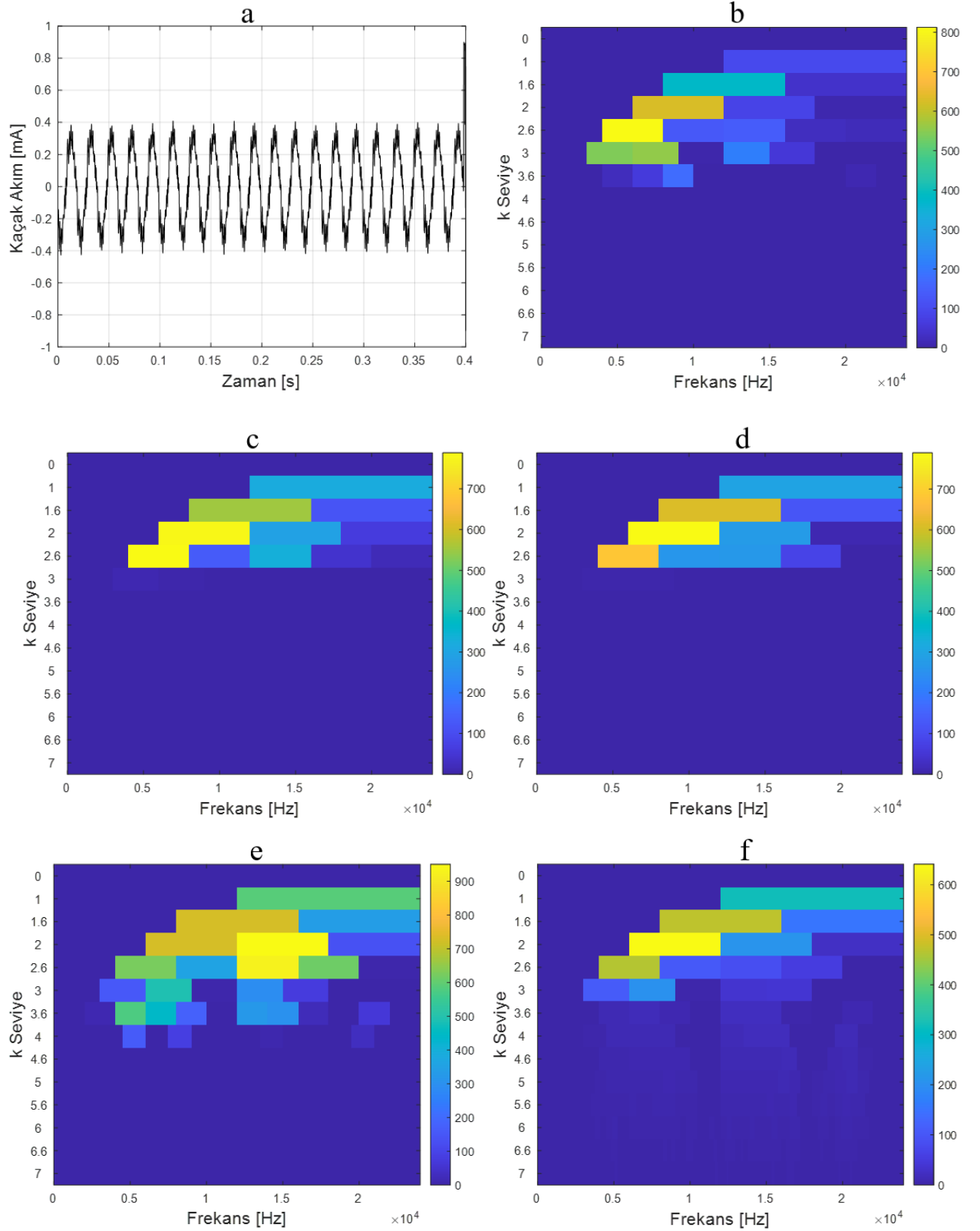
Şekil 4.65: Doğal ester sıvı %75 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



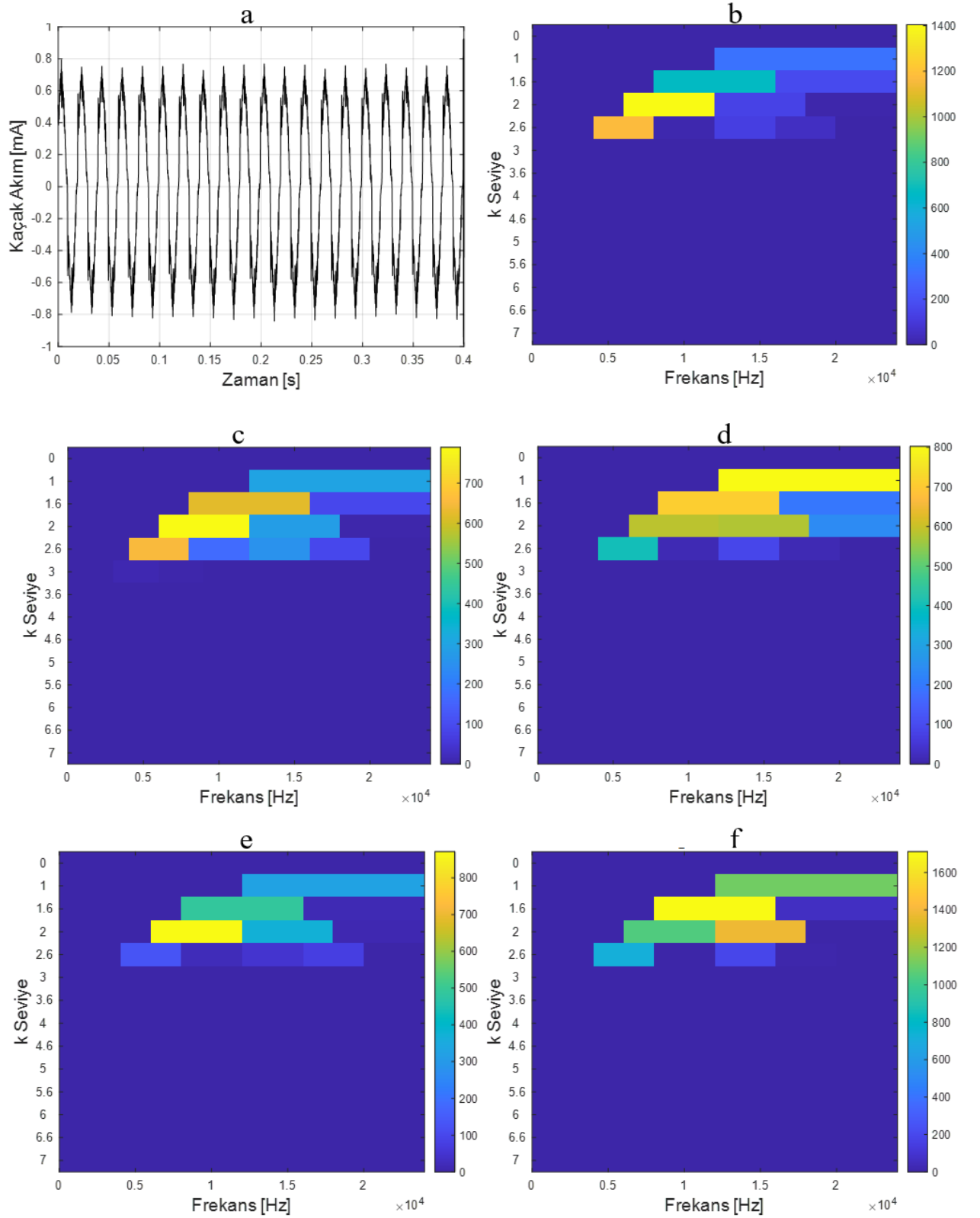
Şekil 4.65 (devamı): Doğal ester sıvı %75 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Şekil 4.65’de doğal ester sıvı için %75 nem seviyesinde yapılan deneylere ait kurtogram grafikleri verilmiştir. Kurtogram grafikleri incelendiğinde 4 mm elektrot açıklığı hariç diğer elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde deşarjların seviye 2,5 da sonlandığı fakat 4 mm elektrot açıklığında düşük derece deşarjların 3,5. seviyeye kadar devam ettiği görülmektedir

%75 nem oranında sentetik ester sıvıda yapılan delinme gerilimlerine ait kurtogram grafikleri aşağıdaki şekil 4.66’ da verilmiştir. 5 farklı elektrot açıklığında yapılan deneylerde 2 mm elektrot açıklığındaki kurtogram grafiği analiz edildiğinde yüksek derece deşarjların olmadığı görülmektedir. Delinme gerilimi frekanslarının 2 ve 2,5 seviyelerinde olduğu bütün grafiklerden görülmektedir. 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde düşük frekans deşarjlarının 6-7 seviye aralığına kadar devam ettiği f grafiğindeki desenlerde gözlenmektedir.

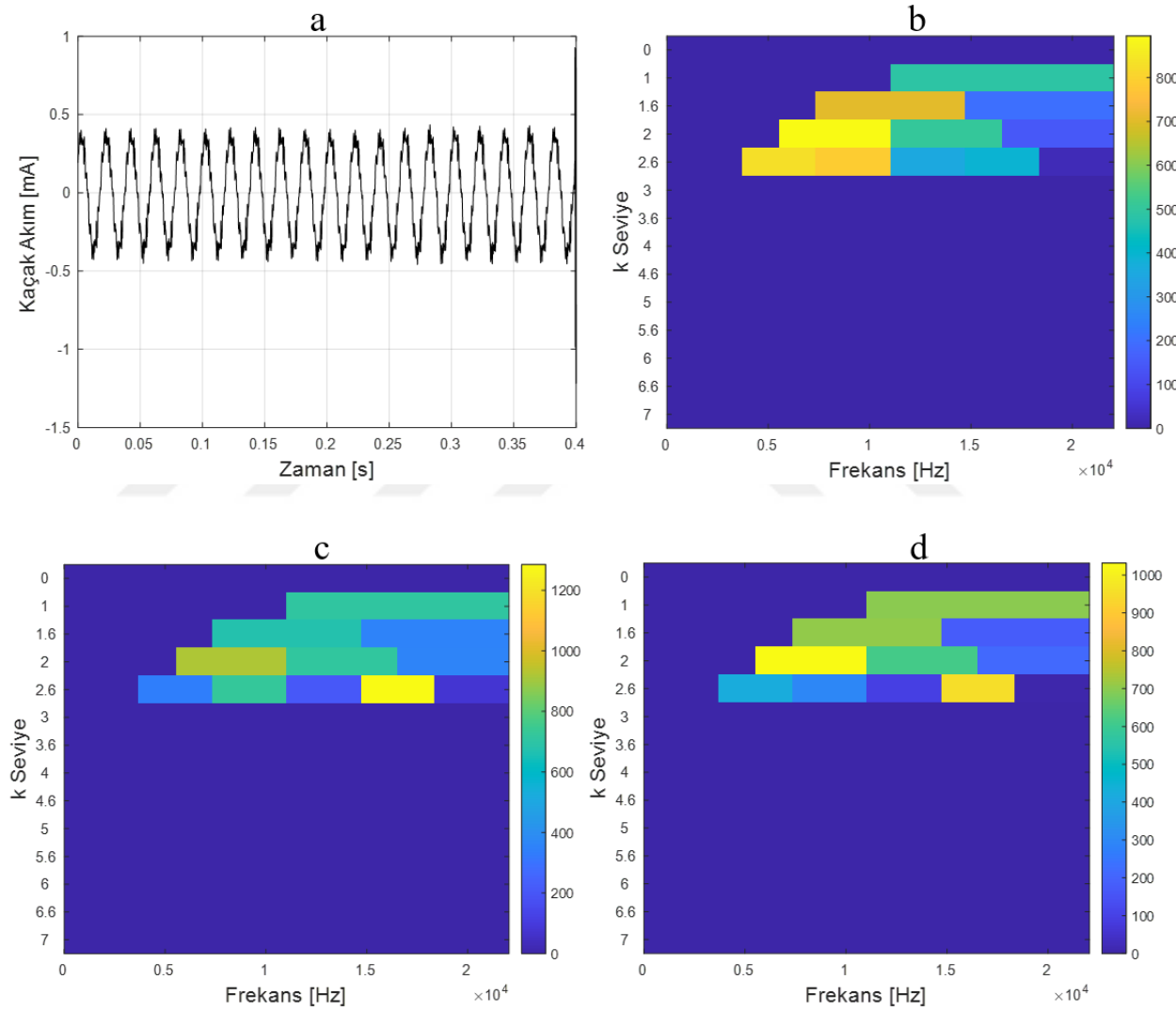


Şekil 4.66: Sentetik ester sıvı % 75Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

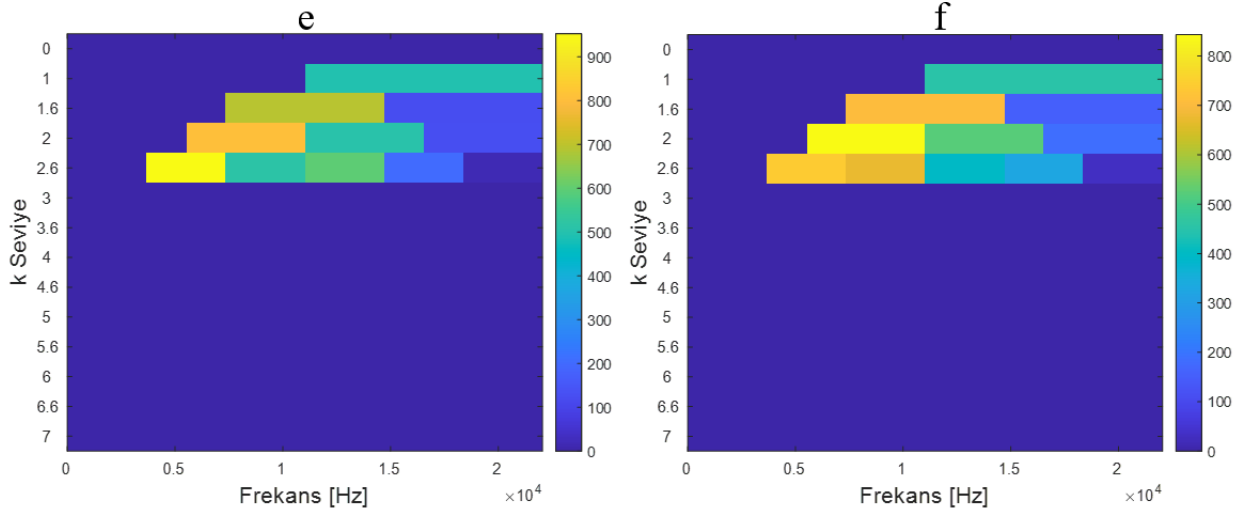


Şekil 4.67: Mineral yağ %80 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: $d=1$ mm, c: $d=2$ mm d: $d=3$ mm, e: $d=4$ mm, f: $d=5$ mm, elektrot açıklıkları).

Ortam nemi %80' e çıkarılarak üç farklı sıvı yalıtkan için yapılan delinme gerilimi deneylerinden elde edilen veriler kurtogram yöntemi ile analiz edilmiştir. Mineral yağa ait bütün elektrot açıklıklarında yapılan delinme gerilimi deneylerine ait kurtogram grafikleri şekil 4.67' de görülmektedir. Delinme gerilimine ait seviyelerin kurtogram grafikleri incelendiğinde 1 ile 2,5 aralığında olduğu görülmektedir. En uzun bant genişliğinin 3 mm elektrot açıklığında olduğu kurtogram desenlerinden gözlemlenmektedir. 4 mm elektrot açıklındaki kurtogram grafiği incelendiğinde düşük ve orta derece deşarjların olduğu görülmektedir.

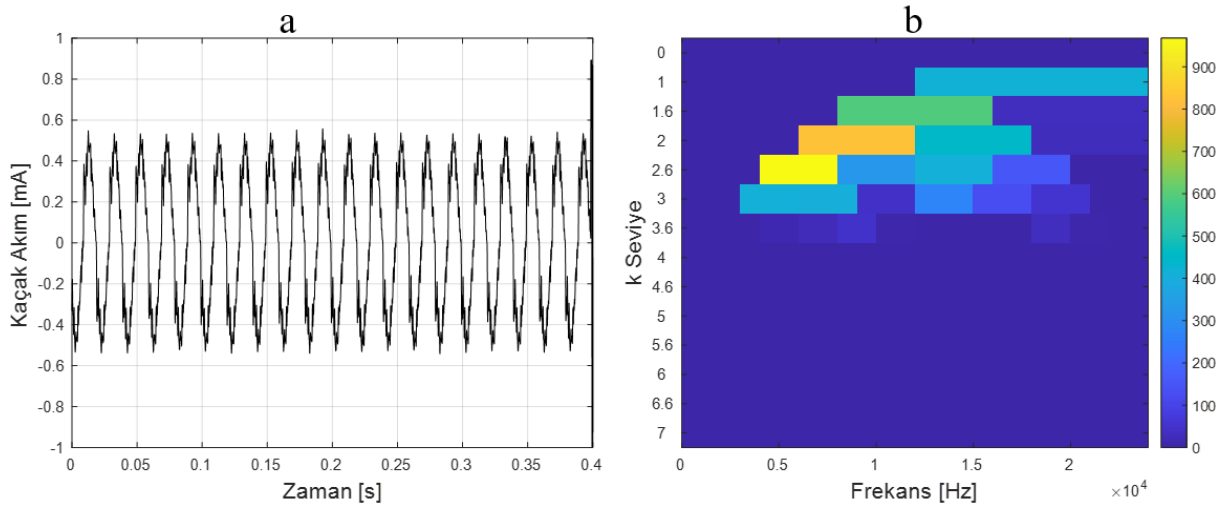


Şekil 4.68: Doğal ester sıvı %80 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

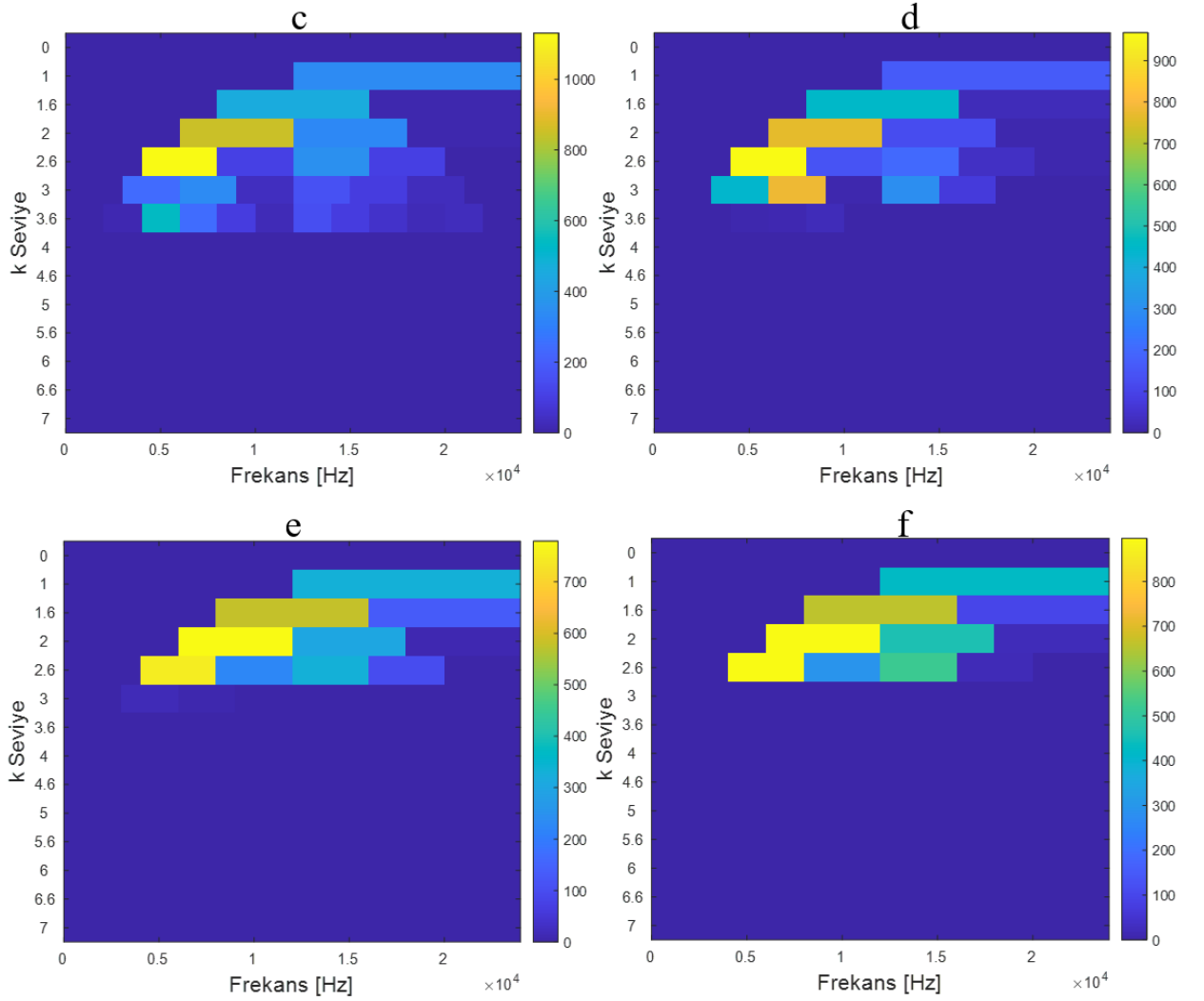


Şekil 4.68 (devamı): Doğal ester sıvı %80 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Doğal ester sıvıda yapılan %80 nem ortamındaki delinme gerilimi deneylerine ait kurtogram grafikleri şekil 4.68’ de verilmiştir. 2 mm ve 3 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde düşük ve orta derece frekans deşarjları görülürken diğer elektrot açıklıklarında yüksek derece frekans deşarjları gözlenmektedir. Bütün elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde deşarjlar seviye 2,5’ de sonlanmıştır.

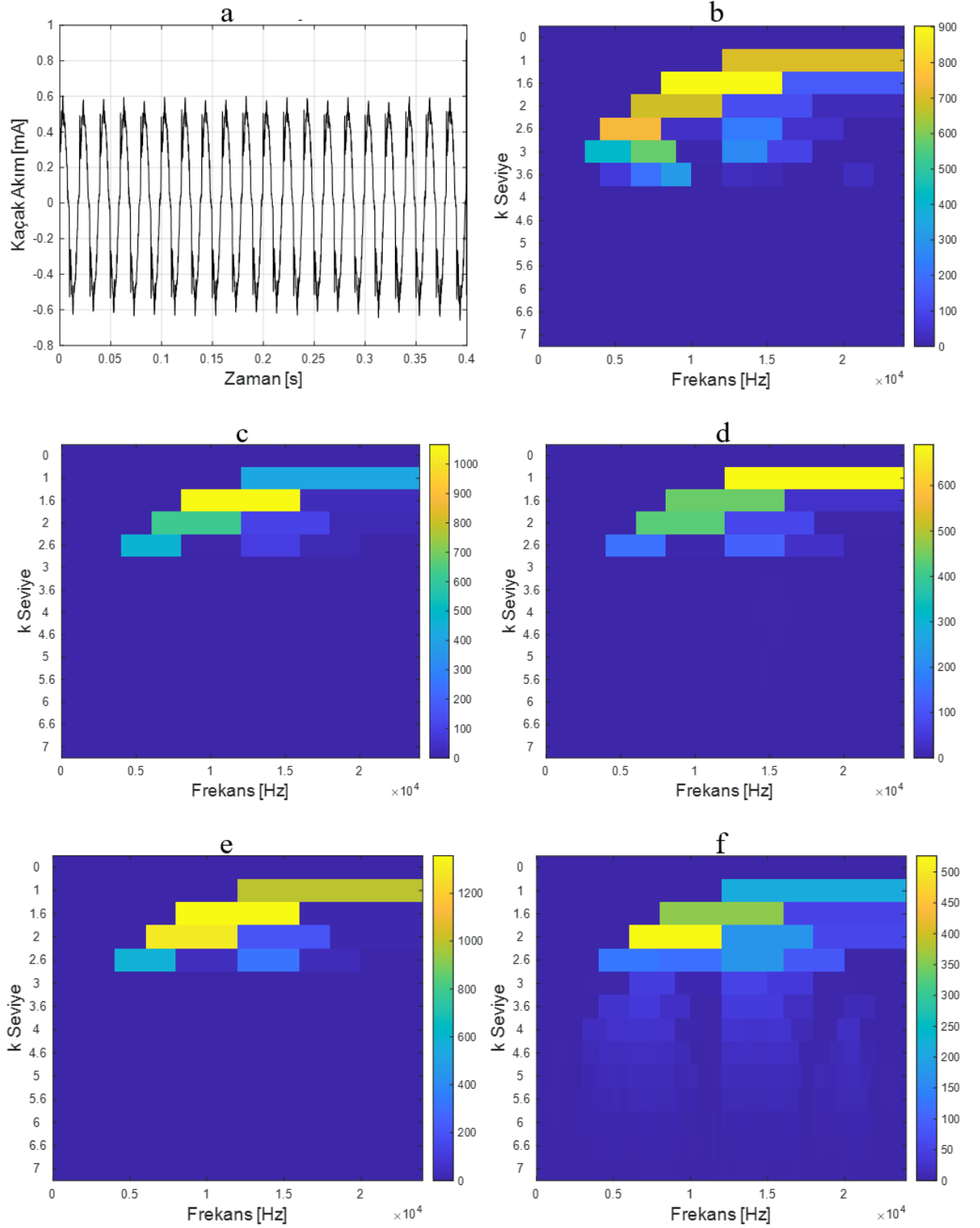


Şekil 4.69: Sentetik ester sıvı %80 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



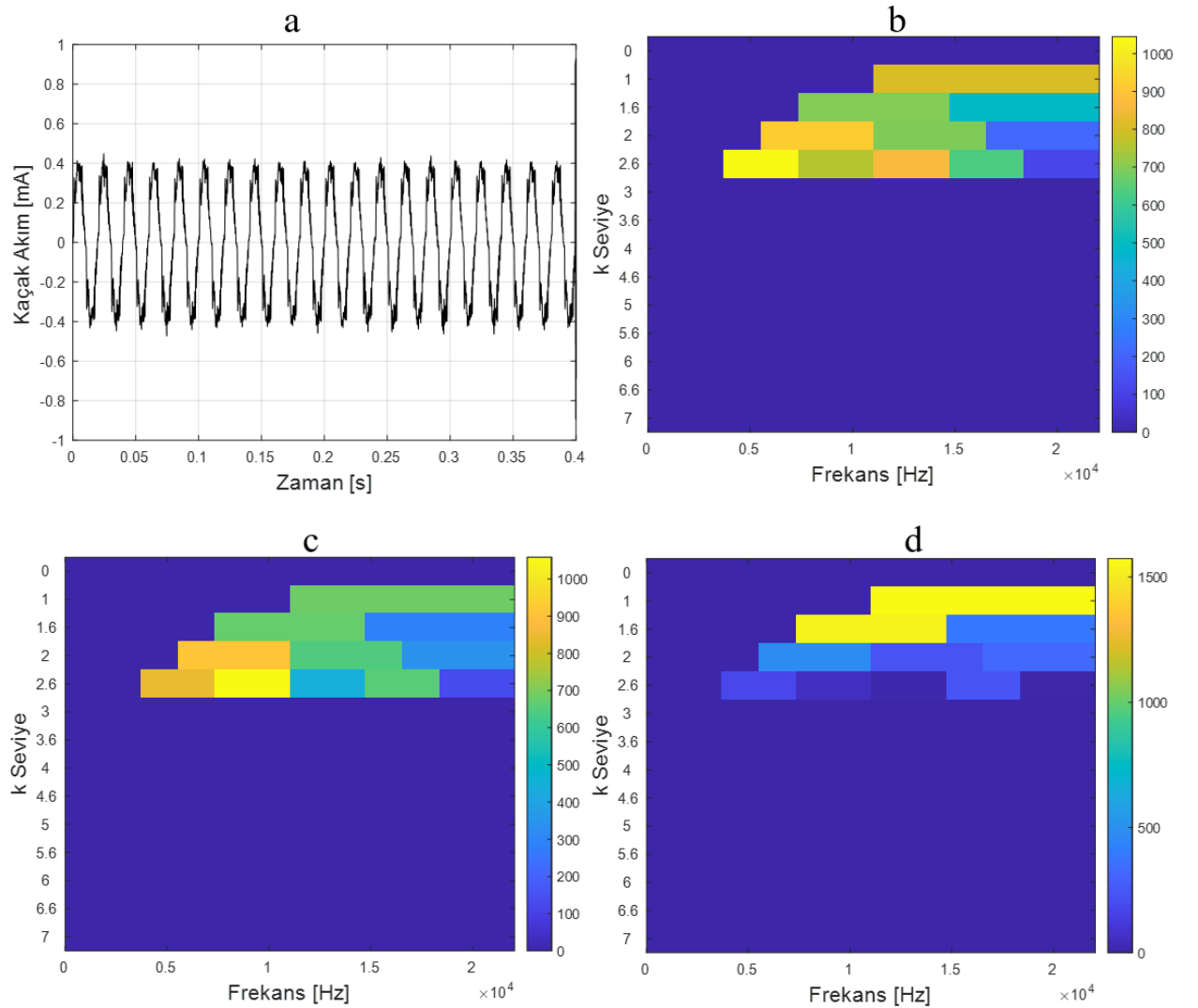
Şekil 4.69 (devamı): Sentetik ester sıvı %80 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Şekil 4.69' da sentetik ester için %80 nem oranında yapılan delinme gerilimi deneylerine ait kurtogram grafikleri bulunmaktadır. Kurtogram grafikleri incelendiğinde ilk 3 elektrot açıklığı için (1 mm – 2 mm – 3 mm) yüksek derece frekans deşarjları olduğu görülmektedir. 4 mm ve 5 mm elektrot açıklıklarında ise düşük ve orta derece deşarjlar bulunmaktadır. Yine ilk 3 elektrot açıklığı için seviye 3,5' a kadar deşarj frekansları devam ederken 4 mm ve 5 mm için deşarjlar seviye 2,5' da sonlanmış gözükmemektedir.

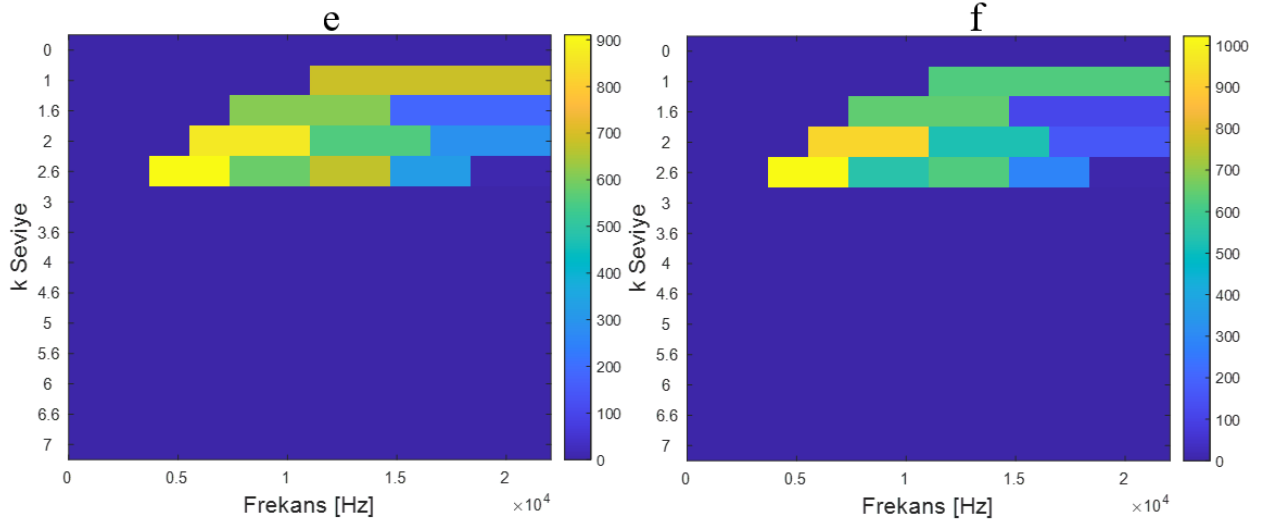


Şekil 4.70: Mineral Yağ %85 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Mineral yağ için %85 nem seviyesinde 5 farklı elektrot açıklığında yapılan deneylerden elde edilen kurtogram grafikleri incelendiğinde, 1mm elektrot açıklığında ise seviye 2,5 'de yüksek frekansta deşarjların olduğu görülmektedir. 3 mm elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneyindeki delinme gerilimine ait deşarjın bant genişliğinin diğer elektrot açıklıklarından daha uzun olduğu şekil 4.71.d grafiğinde açıkça görülmektedir. Aynı zamanda diğer elektrot açıklıklarında deşarjlar 1,5 -2 seviyelerinde gerçekleşirken 3 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde 1. Seviyede delinme gerilimi deşarjını gerçekleştirdiği kurtogram grafiğinden açıkça gözlenmektedir.



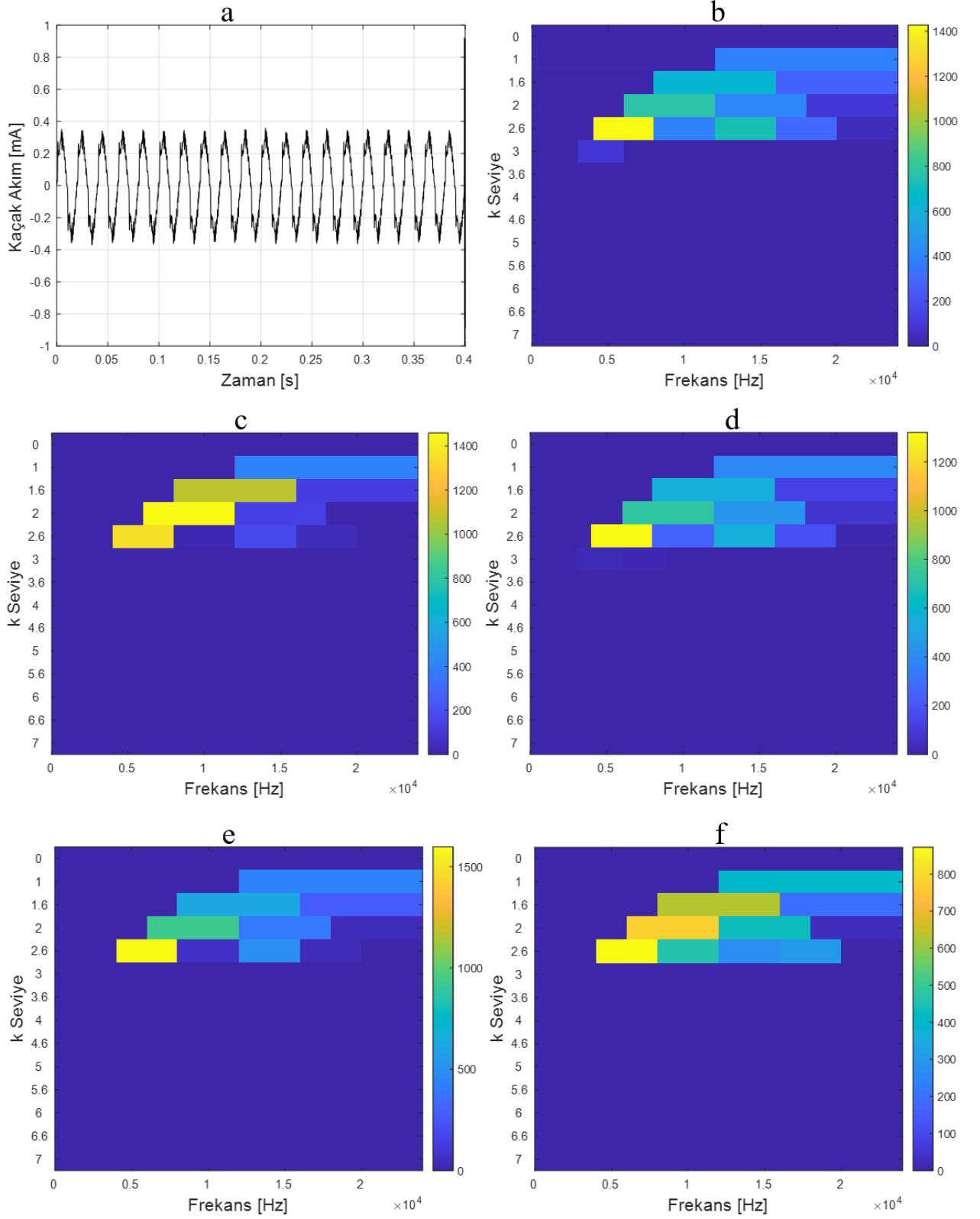
Şekil 4.71: Doğal ester sıvı %85 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



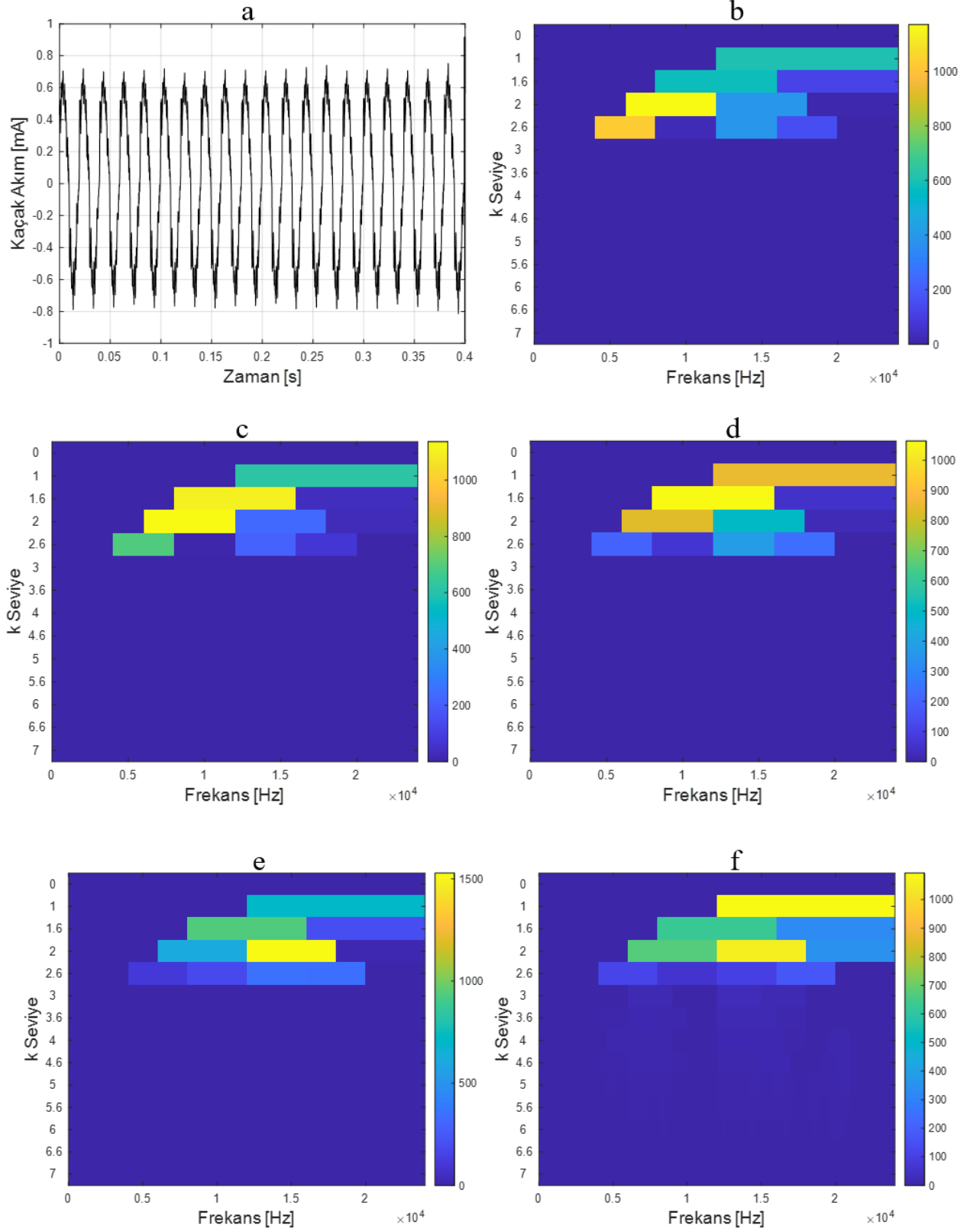
Şekil 4.71 (devamı): Doğal ester sıvı %85 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Şekil 4.71’ de doğal ester sıvı için %85 nem ortamında delinme gerilimlerine ait kurtogram grafikleri verilmiştir. Deşarjlar bütün elektrot açıklıklarında seviye 2,5’ de bitmektedir. Delinme gerilimi deşarjı 3 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde seviye 1’ de bulunurken diğer elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde ise 2,5 seviyesinde delinme gerilimi deşarjının olduğu kurtogram desenlerinde gözlenmektedir.

Sentetik ester sıvının %85 nem ortamında yapılan deneylerinde ise şekil 4.72’ de verilen kurtogram grafikleri incelendiğinde 1 mm, 2 mm, 3 mm ve 4 mm elektrot açıklıklarında düşük orta frekanslarda deşarjların görüldüğü 5 mm elektrot açıklığında ise seviye 2’ de yüksek frekansta deşarjın olduğu kurtogram grafiğinde açıkça gözlenmektedir. 2 mm elektrot açıklığında yapılan deneye ait kurtogram grafiği incelendiğinde delinme gerilimi deşarjının seviye 2’ de olduğu diğer elektrot açıklıklarında ise 2,5 seviyesinde olduğu kurtogram grafiklerindeki desenlerden açıkça görülmektedir.



Şekil 4.72: Sentetik ester sıvı %85 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: $d=1$ mm, c: $d=2$ mm d: $d=3$ mm, e: $d=4$ mm, f: $d=5$ mm, elektrot açıklıkları).



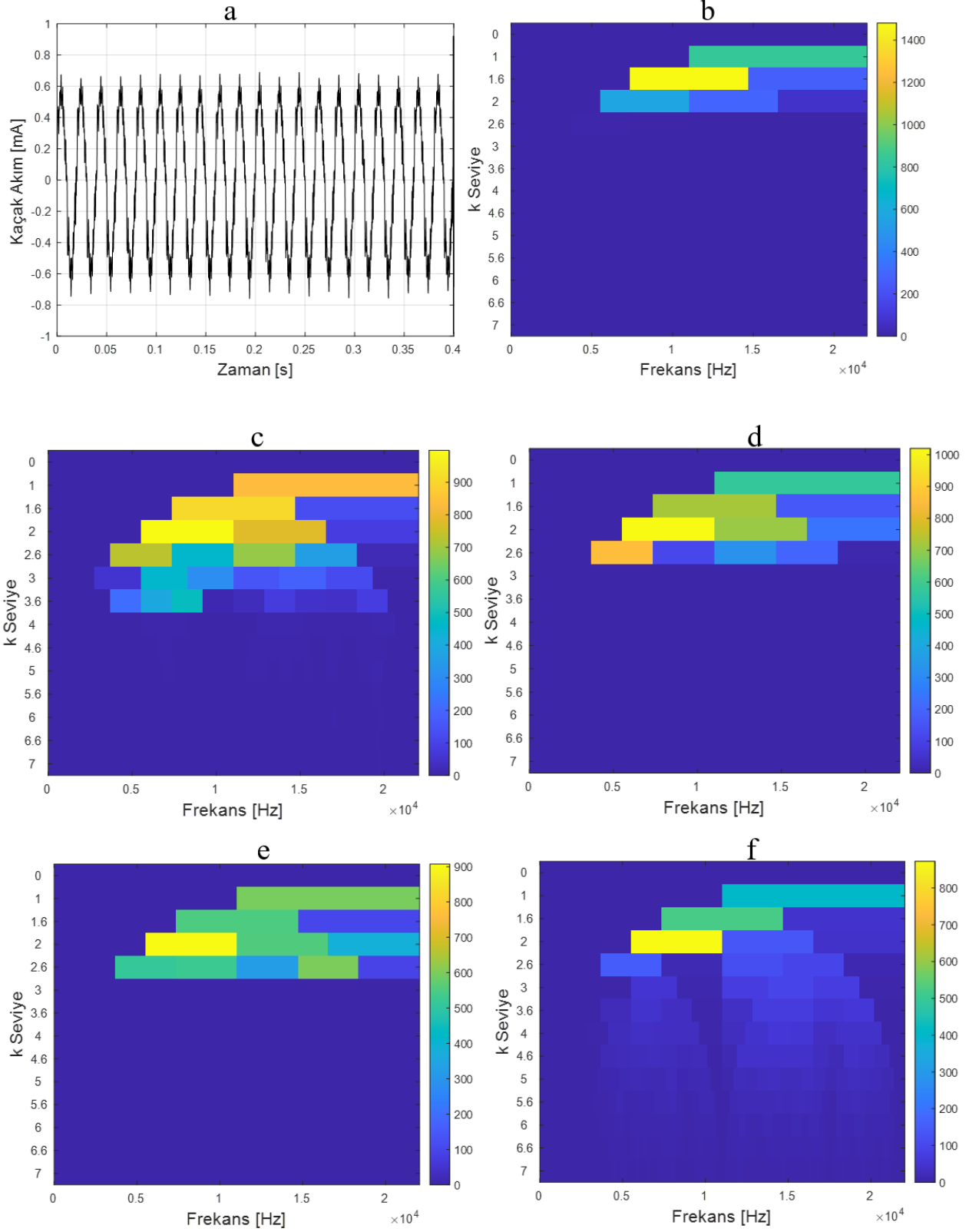
Şekil 4.73: Mineral Yağ %90 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

%90 nem seviyelerine çıkıldığında da kurtogram grafikleri ile verilen örnek kaçak akım sinyallerinde bir çıkarım yapmak zor olmaktadır. Frekans bandındaki değişikliklerin doğru analiz edilip gözlenmesi ve farkların ortaya konması için kurtogram yöntemi önemi burada karşımıza çıkmaktadır. Mineral yağ için %90 nem oranındaki şekil 4.73' de verilen grafikler incelendiğinde 5 mm elektrot açıklığında delinme gerilimi deşarjının seviye 1 de olduğu diğer elektrot açıklıklarında yapılan deneylerinde delinme gerilimi deşarjlarını 1,5 ve 2 seviyelerinde olduğu görülmektedir. En uzun bant genişliğine ait delinme gerilimi deşarjı 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde görülmektedir.

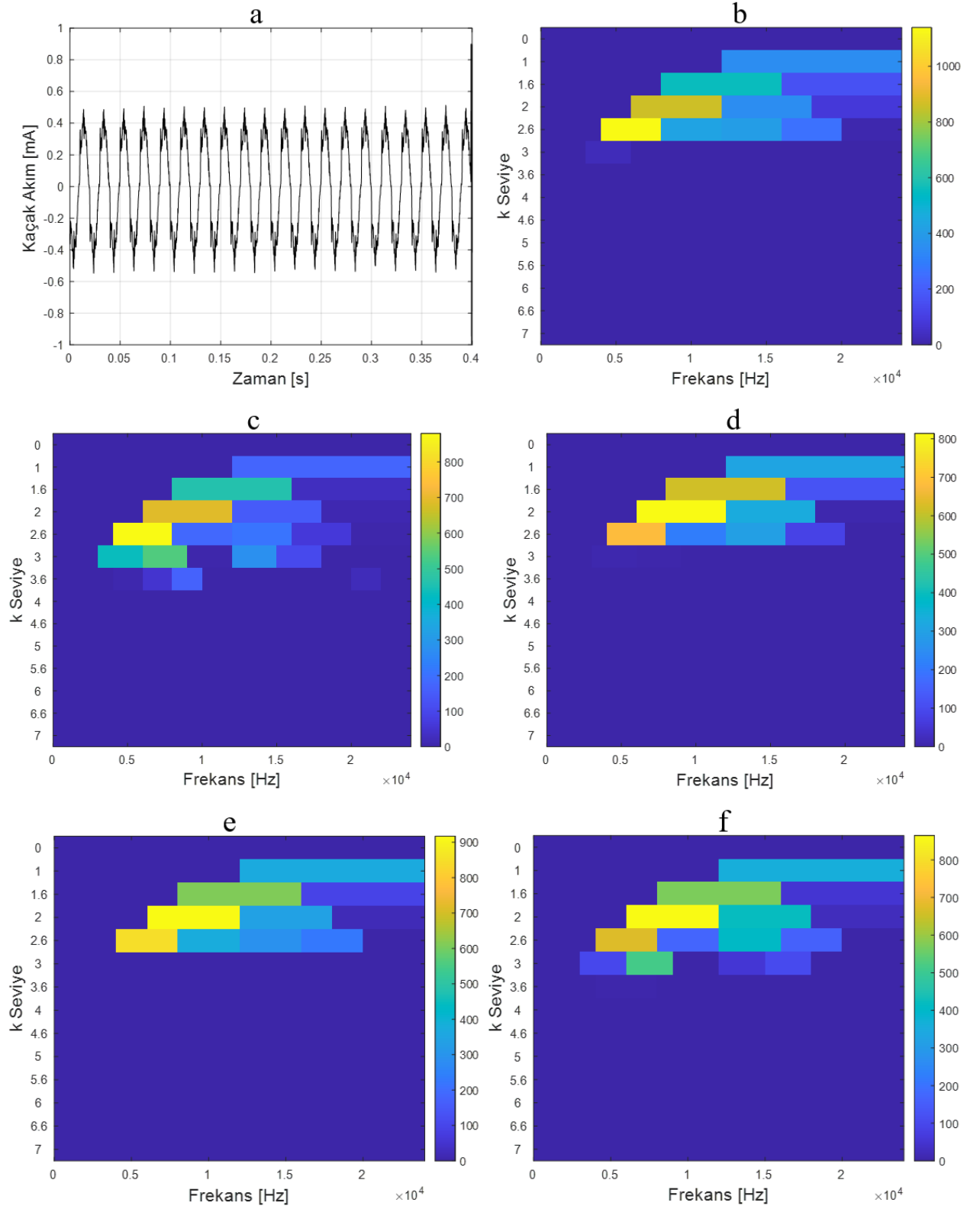
Doğal ester sıvının %90 nem seviyesi için yapılan delinme gerilimlerine ait verilerin kurtogram analizi sonrası grafikleri şekil 4.74' de verilmiştir. 5 mm elektrot açıklığında düşük frekanslarda deşarjların seviye 7' ye kadar devam ettiği kurtogram desenlerinden görülmektedir. 1 mm elektrot açıklığında delinme gerilimi deşarjına ait bant genişliği diğer elektrot açıklıklarına ait bant genişlikleri ile kıyaslandığında kurtogram grafiğinden de görüleceği üzere en uzundur. 1 mm elektrot açıklığında delinme deşarjı seviye 1 de gerçekleşirken diğer elektrot açıklıklarında seviye 2 de gerçekleşmiştir. 1 mm, 4 mm ve 5 mm elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde düşük ve orta derece frekans deşarjları kurtogram grafiklerinde açıkça gözlenmektedir. 2 mm ve 3 mm elektrot açıklıklarında ise yüksek derece deşarjlar görülmektedir.

Bütün elektrot açıklıklarına sentetik ester sıvı kullanılarak %90 nem oranına göre yapılan deneylere ait kurtogram grafikleri şekil 4.75' de verildiği gibidir. Delinme gerilimi deşarjı incelendiğinde bütün delinme deşarjlarının seviye 2 de olduğu görülmektedir. 4 mm elektrot açıklığında yüksek frekanslarda deşarjlar görülmezken diğer elektrot açıklıklarında görülmektedir.

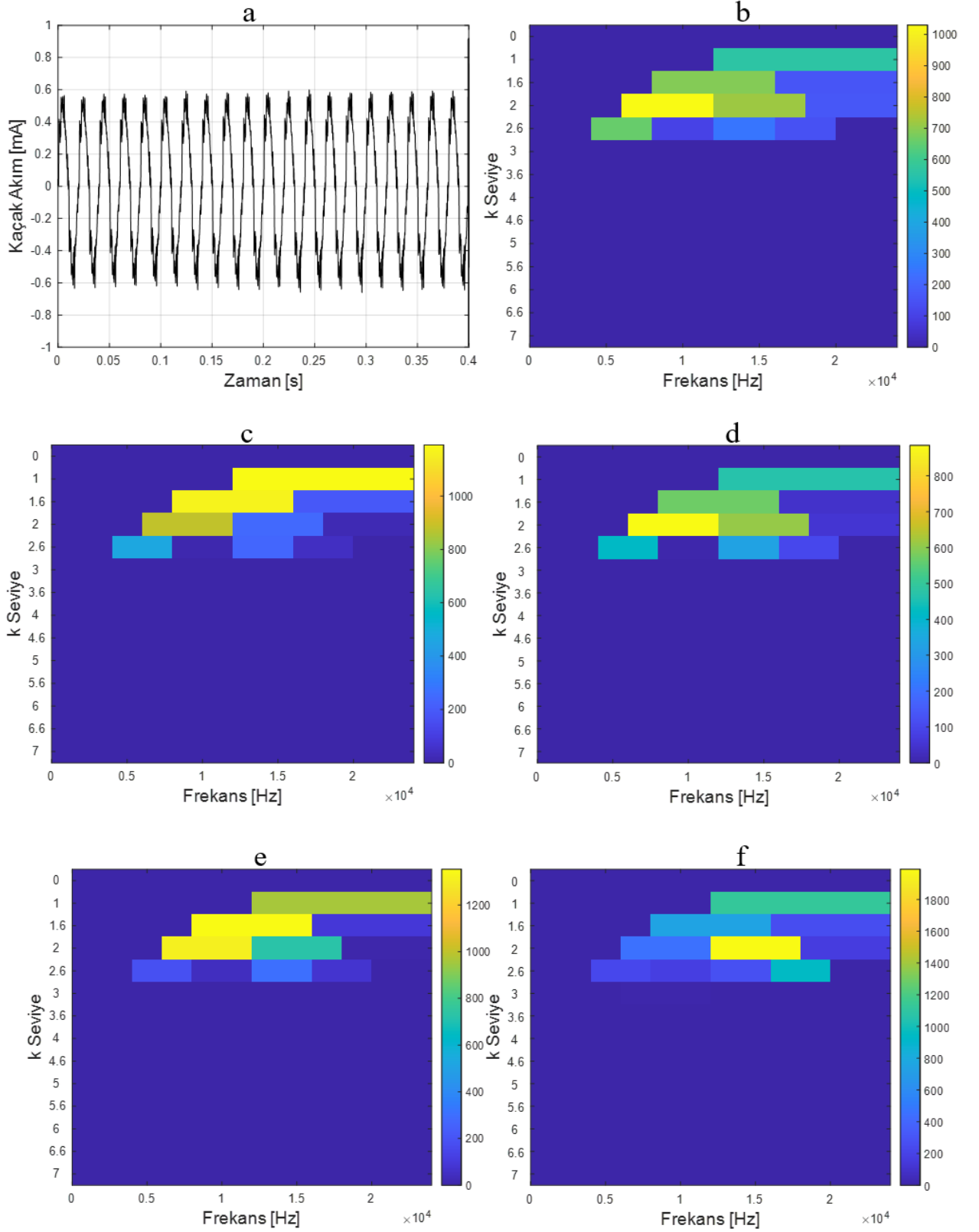
Farklı sıvı dielektriklere ait bütün grafikler incelendiğinde ise en uzun bant genişliğine sahip gelinme gerilimi deşarjının mineral yağda 5 mm elektrot açıklığında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.74: Doğal ester sıvı %90 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: $d=1$ mm, c: $d=2$ mm d: $d=3$ mm, e: $d=4$ mm, f: $d=5$ mm, elektrot açıklıkları).

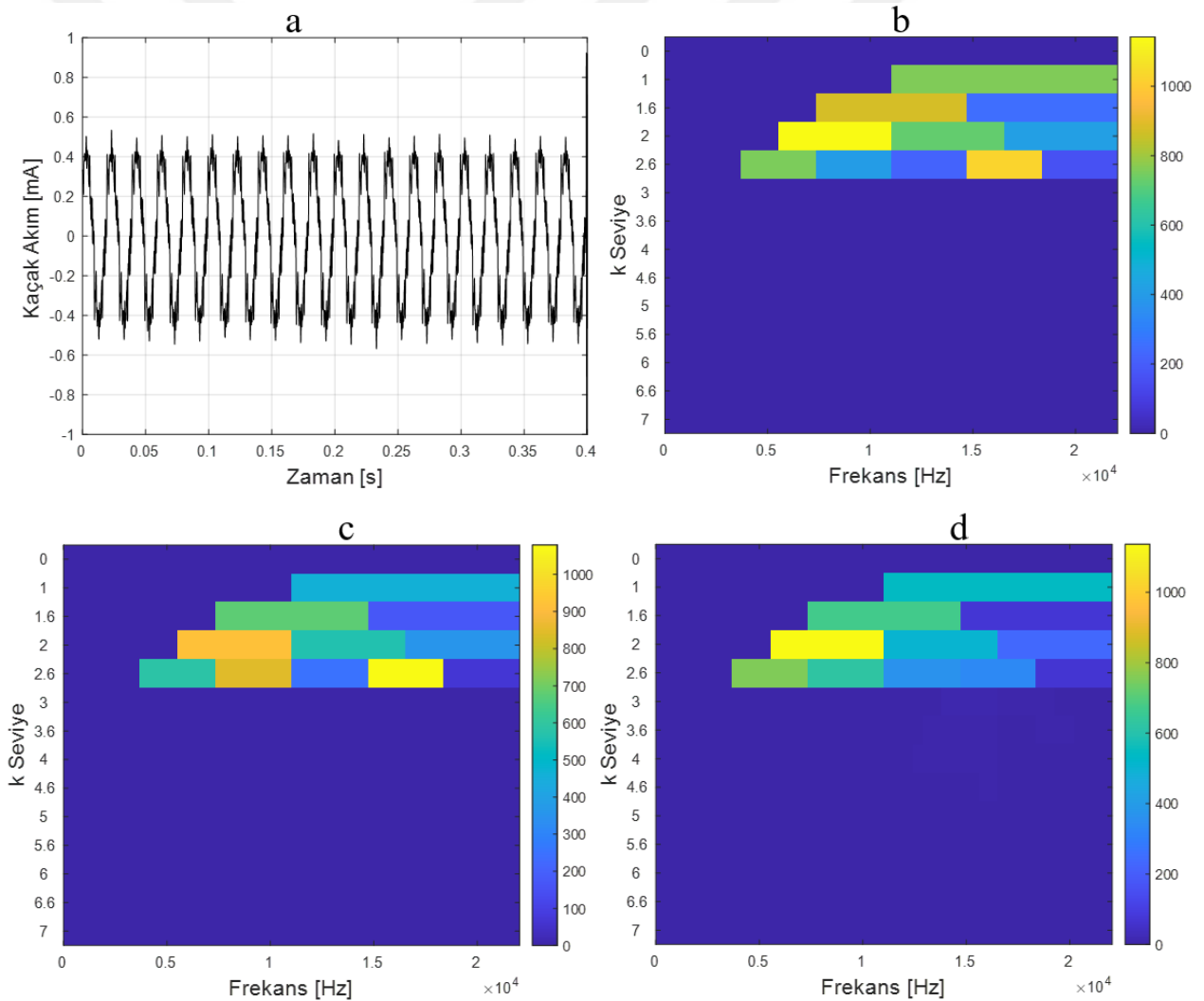


Şekil 4.75: Sentetik ester sıvı %90 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

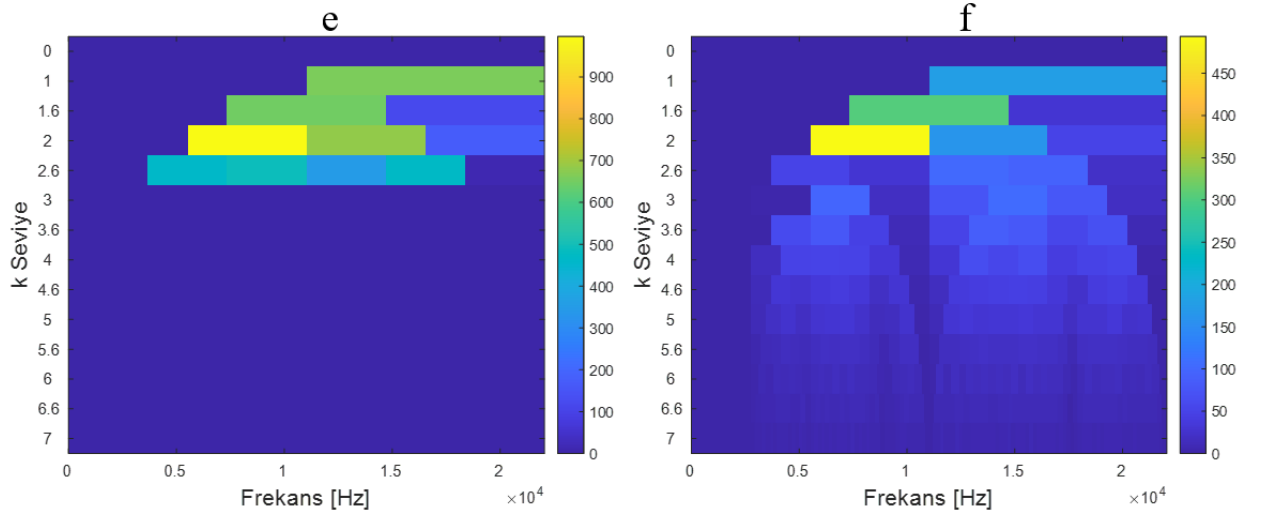


Şekil 4.76: Mineral Yağ %95 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

Nem deneylerinde maksimum nem seviyesi %95 olarak alınmış ve bu nem seviyesi ortam nemi oluşturularak delinme gerilimi deneyleri yapılmıştır. Mineral yağın kullanıldığı deneylerden elde edilen veriler işlenerek kurtogram grafikleri hazırlanmıştır. %95 nem seviyesinde mineral yağın delinme gerilimine ait olan kurtogram grafikleri şekil 4.76’ da verilmiştir. Bütün elektrot açıklıkları için yüksek frekansta deşarjların oluşmadığı görülmektedir. 2 mm elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deşarjının bant genişliğinin diğer bütün açıklıklarda oluşan delinme gerilimi deşarjlarının bant genişliklerinden daha büyük olduğu kurtogram grafikleri karşılaştırıldığında görülmektedir. Aynı zamanda diğer bütün elektrot açıklıklarında delinme gerilimi deşarjı 1,5 ve 2 seviyelerinde oluşmuşken 2 mm elektrot açıklığında delinme gerilimi deşarjı seviye 1 de oluştuğu gözlenmiştir.

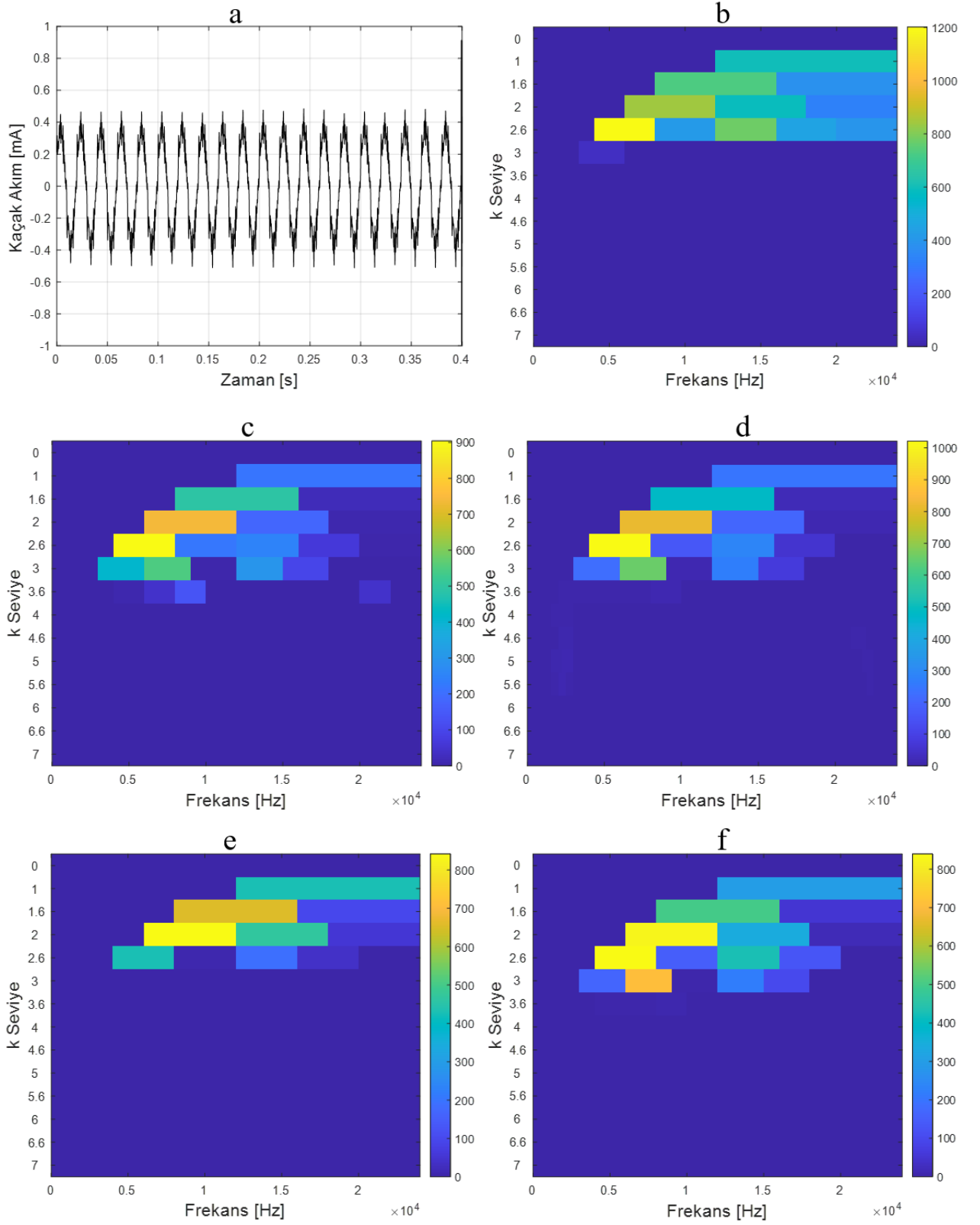


Şekil 4.77: Doğal ester sıvı %95 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).



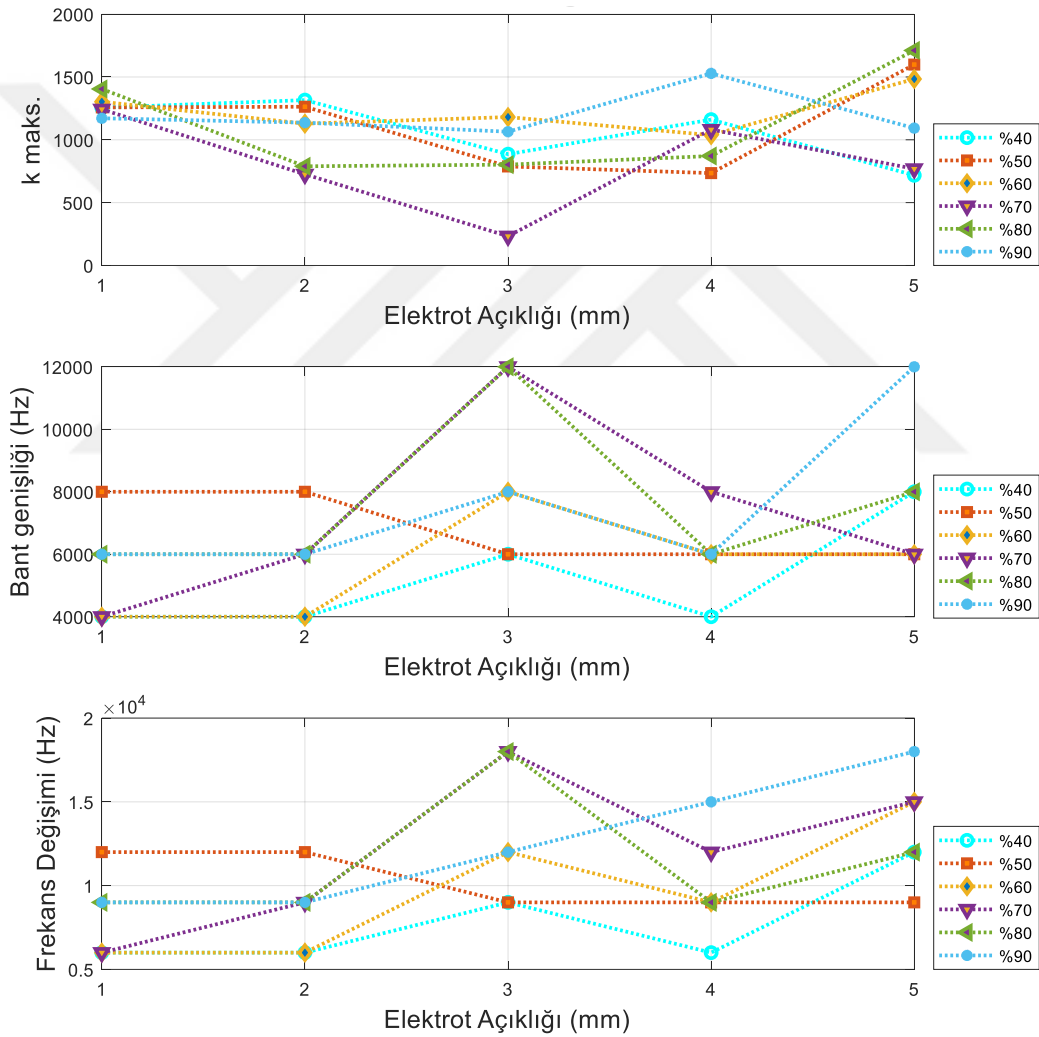
Şekil 4.77 (devamı): Doğal ester sıvı %95 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları).

En yüksek nem seviyesi olan %95 ortam neminde doğal ester sıvı kullanılarak yapılan delinme gerilimi deneyleri 5 farklı elektrot açıklığı kullanılarak yapılmıştır. Deneylerden elde edilen kaçak akım sinyalleri kurtogram yöntemi ile analiz edilerek deşarj büyüklükleri ve frekans değerleri çıkarılmış ve kurtogram grafikleri şekil 4.77’ de verilmiştir. 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyden elde edilen kurtogram grafiği incelendiğinde düşük frekans deşarjlarının seviye 7 ye kadar devam ettiği görülmektedir. 1 mm ve 2 mm elektrot açıklığında yüksek frekanslarda deşarjlar oluşurken diğer elektrot açıklıklarında doğal ester sıvı kullanılan deneylerde oluşmamıştır. En kısa bant genişliğine sahip delinme deşarjı 3 mm elektrot açıklığı kullanılarak yapılan deneyde elde edilmiştir.



Şekil 4.78: Sentetik ester sıvı %95 Nem kurtogram grafikleri (a: kaçak akım sinyali b: d=1 mm, c: d=2 mm d: d=3 mm, e: d=4 mm, f: d=5mm, elektrot açıklıkları)

Sentetik ester sıvı kullanılarak en yüksek nem seviyesinde yapılan delinme gerilimlerine ait deneylerdeki verilerin analiz edilmesiyle oluşturulan kurtogram grafikleri şekil 4.78’ de verilmiştir. Kurtogram grafikleri incelendiğinde delinme deşarjları içinde en uzun bant genişliğinin 4 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde olduğu gözlenmektedir. Aynı zamanda diğer delinme gerilimlerine ait deşarjların seviye 2,5 olduğu görülürken 4 mm elektrot açıklığında delinme deşarjının 2. seviyede olduğu görülmektedir. 1 mm elektrot açıklıklarında düşük ve orta frekans deşarjları oluşurken diğer elektrot açıklıklarında yüksek frekanslarda deşarjlar olduğu kurtogram grafiklerindeki renk değişimlerinden açıkça görülmektedir.



Şekil 4.79: Mineral yağ nem seviyesi kurtogram değerleri eğrileri.

Tablo 4.16: Mineral yağ nem seviyesi kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.

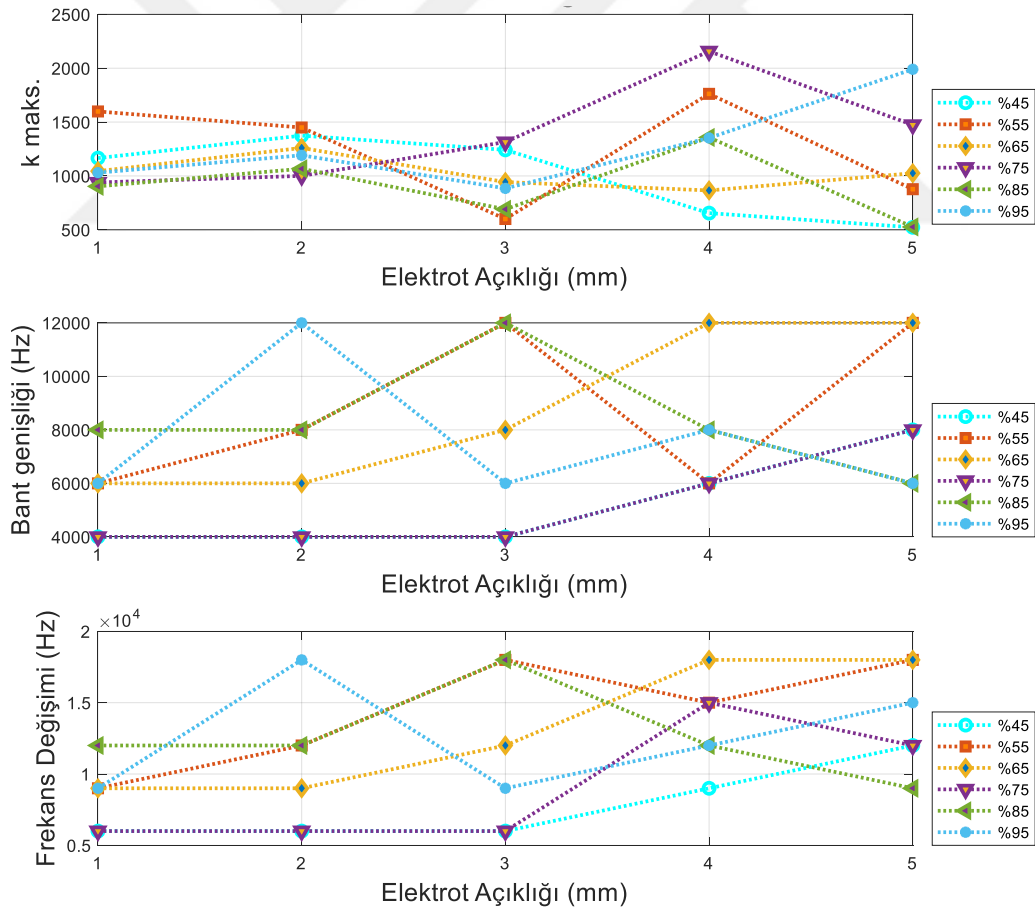
Nem (%)	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
40	1	1255,8	2,5	4000	6000
40	2	1316	2,5	4000	6000
40	3	885,6	2	6000	9000
40	4	1160,6	2,5	4000	6000
40	5	717,5	1,5	8000	12000
50	1	1257,7	1,5	8000	12000
50	2	1263,2	1,5	8000	12000
50	3	787,9	2	6000	9000
50	4	734,8	2	6000	9000
50	5	1598,7	2	6000	9000
60	1	1302,8	2,5	4000	6000
60	2	1128,6	2,5	4000	6000
60	3	1180,8	1,5	8000	12000
60	4	1037,2	2	6000	9000
60	5	1483,7	2	6000	15000
70	1	1243,2	2,5	4000	6000
70	2	725,6	2	6000	9000
70	3	232,9	1	12000	18000
70	4	1081,7	1,5	8000	12000
70	5	769	2	6000	15000
80	1	1038,2	1,5	8000	12000
80	1	1038,2	1,5	8000	12000
80	1	1038,2	1,5	8000	12000
80	1	1038,2	1,5	8000	12000
80	1	1038,2	1,5	8000	12000
90	1	1171,4	2	6000	9000
90	2	1136,3	2	6000	9000
90	3	1064,4	1,5	8000	12000
90	4	1528,4	2	6000	15000
90	5	1093	1	12000	18000

Bütün nem değerlerine ait kurtogram verileri tek grafikte verildiğinde grafiğin okunması güç olacaktır. Bu nedenle nem oranları bölünerek iki ayrı grafik olarak incelenmiş daha sonra ise bütün kurtogram değerleri birbiri ile karşılaştırılmıştır.

Mineral yağın kullanıldığı nem deneylerinde %40 nem oranından başlanarak %10 nem artışı ile %90' a kadar yapılan deneylerden elde edilen veriler kurtogram metodu ile analiz edilmiştir.

Şekil 4.79’ da kurtogram değerlerinin nem cinsinden birbiri ile karşılaştırmalı grafik verilmiştir. Tablo 4.16’ da ise değerler sayısal olarak gösterilmektedir.

kmaks. değerleri tablo 4.16’da karşılaştırıldığında %80 nem seviyesi için kmaks. değerinin 1038,2 ile sabit kaldığı görülmektedir. En düşük kmaks. değerinin %70 nem değerinde 3 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 232,9 olarak çıktığı görülmektedir. Bant genişlikleri incelendiğinde delinme gerilimi deşarjlarının 1 ile 2,5 seviyede olduğu tabloda belirgindir. Bant genişlikleri karşılaştırıldığında ise yine %80 nem seviyesinde bütün elektrot açıklıkları için yapılan deneylerde kmaks. değerlerinin yanında bant genişlikleri ve frekans değerlerinin de değişmediği görülmektedir. Bant genişliğinin 8000 Hz ve frekans değerlerinin 12000 Hz’ de kaldığı görülmektedir. Yapılan deneylerde bant genişliklerinin 4000 Hz ile 12000 Hz aralığında olduğu görülmektedir. Frekans değerinin ise en yüksek 18000 Hz ile %90 nem oranında 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde olduğu tablo 4.16’ da verilmektedir



Şekil 4.80: Mineral yağ nem seviyesi kurtogram değerleri eğrileri.

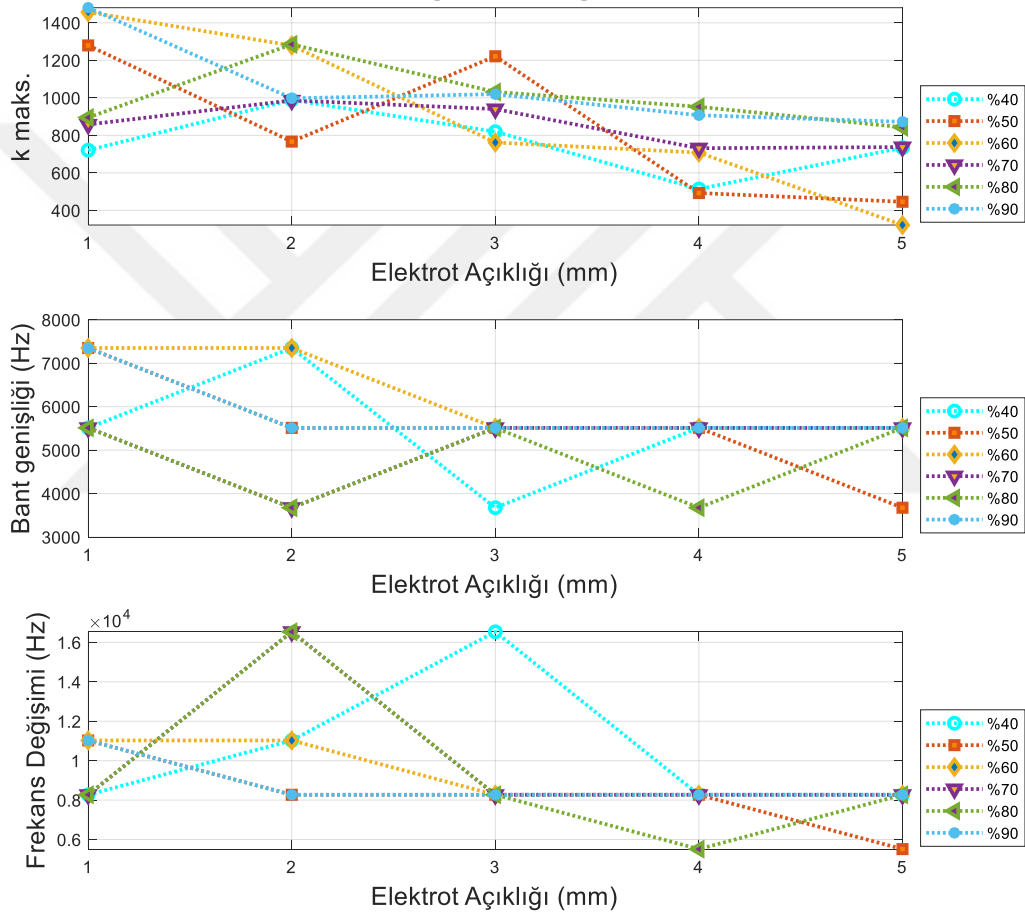
Tablo 4.17 Mineral yağnem seviyesi kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.

Nem(%)	Elektrot Açıklığı (mm)	k max	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
45	1	1165,8	2,5	4000	6000
45	2	1374,2	2,5	4000	6000
45	3	1241,9	2,5	4000	6000
45	4	654,8	2	6000	9000
45	5	522,7	1,5	8000	12000
55	1	1598,7	2	6000	9000
55	2	1449,5	1,5	8000	12000
55	3	600,1	1	12000	18000
55	4	1762	2	6000	15000
55	5	876,7	1	12000	18000
65	1	1044,5	2	6000	9000
65	2	1259,8	2	6000	9000
65	3	943,2	1,5	8000	12000
65	4	865,1	1	12000	18000
65	5	1025,2	1	12000	18000
75	1	939,1	2,5	4000	6000
75	2	1000,4	2,5	4000	6000
75	3	1314,8	2,5	4000	6000
75	4	2157,3	2	6000	15000
75	5	1474,2	1,5	8000	12000
85	1	903,2	1,5	8000	12000
85	2	1066,5	1,5	8000	12000
85	3	690,4	1	12000	18000
85	4	1357,2	1,5	8000	12000
85	5	526,2	2	6000	9000
95	1	1030,2	2	6000	9000
95	2	1191,6	1	12000	18000
95	3	884,4	2	6000	9000
95	4	1352,6	1,5	8000	12000
95	5	1990,3	2	6000	15000

Aynı sıvı dielektrik için ara nem değerleri olan %45-55-65-75-85 ve en yüksek nem değeri olan %95 nem seviyesinde yapılan deneylere ait kurtogram grafiklerinin değerleri ve grafik gösterimi şekil 4.80 ve tablo 4.17’ de bulunmaktadır. Ara nem değerleri birbirleri ile karşılaştırıldığında en yüksek kmaks. değerinin %75 nem ortamında 4 mm elektrot açıklığında 2157,3 olarak olduğu görülmektedir. Yine bütün delinme deşarjları için burada da seviye değeri 1 ile 2,5 arasında değişmektedir. Delinme deşarjlarına ait bant genişlikleri

incelendiğinde ise en yüksek bant genişliği değerlerinin 1200 Hz en düşük ise 4000 Hz olduğu görülmektedir. Aynı zamanda frekans değerleri de 6000 Hz ile 18000 Hz aralığında değişmektedir.

Mineral yağda bütün nem değerleri birbiri ile karşılaştırıldığında en düşük kmaks. değerinin en düşük tablo ve grafikten 232,9 olduğu en yüksek kmaks. değerinin ise yukarıda belirtildiği gibi 2157,3 olduğu bütün nem açıklıkları için kurtogram değerleri karşılaştırıldığında ortaya çıkmaktadır.



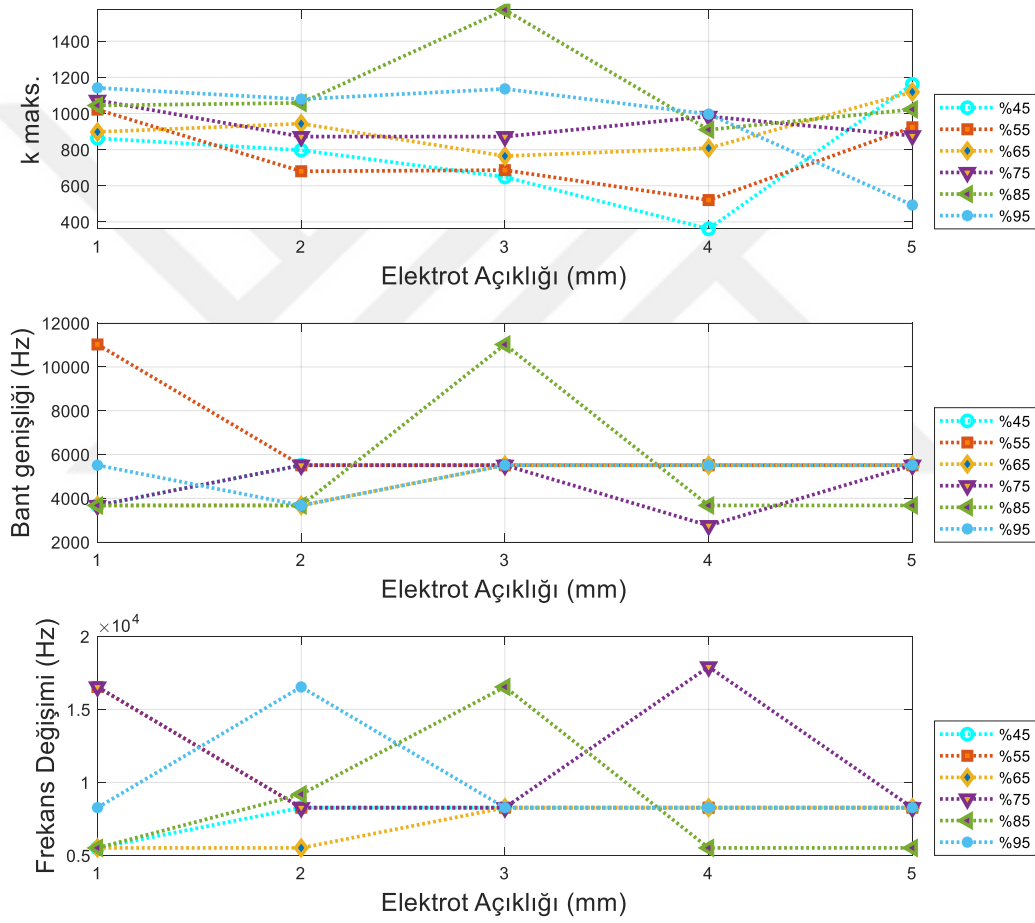
Şekil 4.81: Doğal ester sıvı nem seviyesi kurtogram değerleri eğrileri.

Tablo 4.18: Doğal ester sıvı nem seviyesi kmaks., Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri

Nem (%)	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
40	1	721	2	5512,5	8268,75
40	2	988,5	1,5	7350	11025
40	3	819,6	2,5	3675	16537,5
40	4	513,8	2	5512,5	8268,75
40	5	734,3	2	5512,5	8268,75
50	1	1279,4	1,5	7350	11025
50	2	766,7	2	5512,5	8268,75
50	3	1221,5	2	5512,5	8268,75
50	4	492,5	2	5512,5	8268,75
50	5	446,1	2,5	3675	5512,5
60	1	1457,2	1,5	7350	11025
60	2	1279,1	1,5	7350	11025
60	3	761,9	2	5512,5	8268,75
60	4	708	2	5512,5	8268,75
60	5	322	2	5512,5	8268,75
70	1	857,9	2	5512,5	8268,75
70	2	986,4	2,5	3675	16537,5
70	3	940,2	2	5512,5	8268,75
70	4	731,4	2	5512,5	8268,75
70	5	737,6	2	5512,5	8268,75
80	1	1038,2	1,5	8000	12000
80	1	1038,2	1,5	8000	12000
80	1	1038,2	1,5	8000	12000
80	1	1038,2	1,5	8000	12000
80	1	1038,2	1,5	8000	12000
90	1	1480,4	1,5	7350	11025
90	2	997,6	2	5512,5	8268,75
90	3	1019,6	2	5512,5	8268,75
90	4	907,2	2	5512,5	8268,75
90	5	872,2	2	5512,5	8268,75

Doğal ester sıvı kullanılarak yapılan deneylerde nem oranı değişiminin %40 ‘dan başlayarak %10 arttırılarak %90 da bitirilmiştir. %10 nem oranı artışı ile yapılan deneylerden elde edilen verilerin kurtogram analizi ile alındığı değerlerin birbirleri ile karşılaştırıldığı grafik ve değerlerin bulunduğu tablo şekil 4.81 ve tablo 4.18’ de gösterilmektedir. Grafik değerleri ve tablo incelendiğinde kmaks. değerlerinin en düşük %60 nem oranı ve 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 322 olarak çıktığı görülmektedir. En yüksek kmaks. değerine bakıldığında ise

%90 nem seviyesinde 1mm elektrot açıklığında 1480,4 olduğu tablo 4.18 ve şekil 4.81’ de verilen grafiklerde görülmektedir. Doğal ester sıvı kullanılarak yapılan deneylerde delinme gerilimi deşarjının seviyeleri 1,5 -2,5 aralığında olduğu görülmektedir. %80 nem seviyesinde delinme deşarjlarına ait bant genişliklerinin bütün elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde 8000 Hz ile sabit kaldığı frekans değerinin de aynı deneylerde 12000 Hz olduğu tablo 4.18’ de %80 nem seviyesi deney kurtogram sonuçlarında açıkça belirtilmektedir. İlgili nem değerlerine ait deneylerde en düşük bant genişlikleri 3675 Hz en yüksek bant genişlikleri ise 7350 Hz olarak gözlenmiştir. Frekans değerleri ise 5512,5 Hz ile 16537,5Hz aralığında verilmektedir.



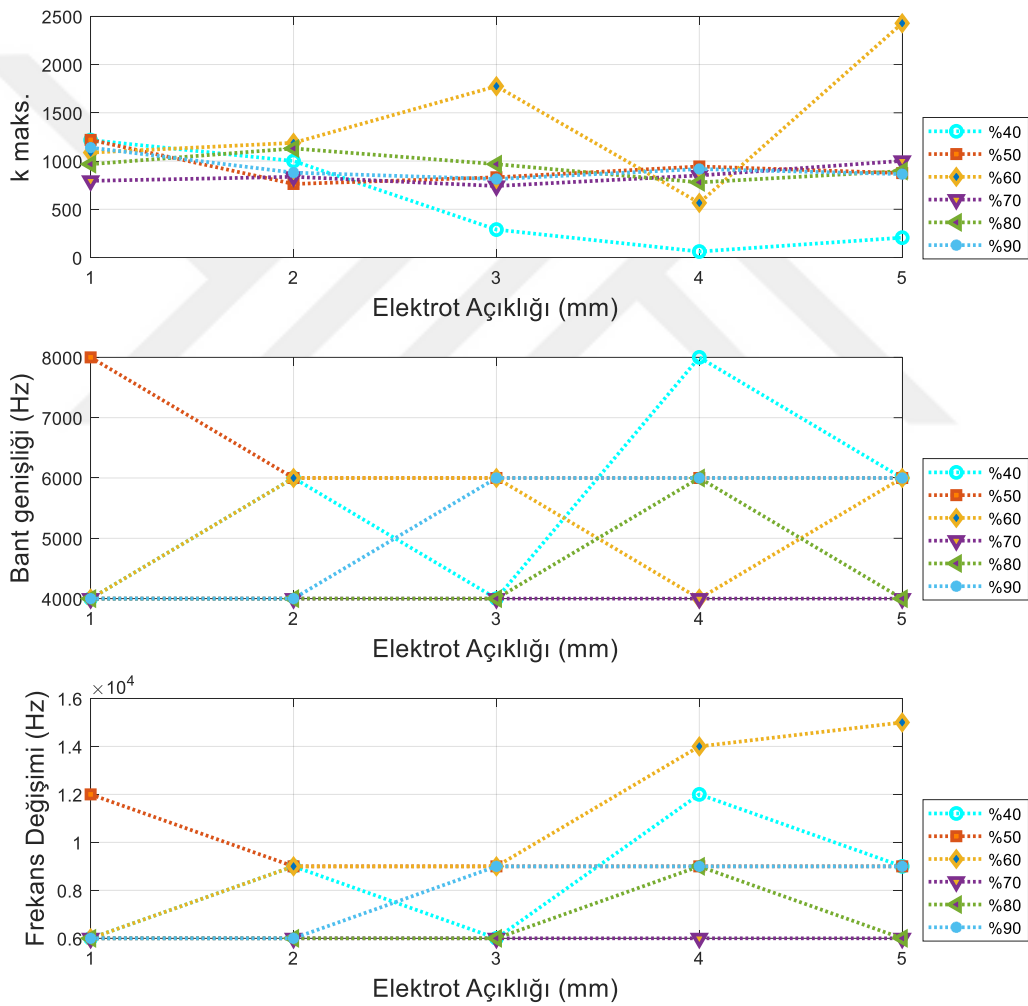
Şekil 4.82: Doğal ester sıvı nem seviyesi kurtogram değerleri eğrileri.

Tablo 4.19: Doğal ester sıvı nem seviyesi kmaks., Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri

Nem (%)	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
45	1	862,8	2,5	3675	5512,5
45	2	797	2	5512,5	8268,75
45	3	648,6	2	5512,5	8268,75
45	4	361,4	2	5512,5	8268,75
45	5	1162	2	5512,5	8268,75
55	1	1021,7	1	11025	16537,5
55	2	680,3	2	5512,5	8268,75
55	3	686,4	2	5512,5	8268,75
55	4	520,9	2	5512,5	8268,75
55	5	923,8	2	5512,5	8268,75
65	1	898,1	2,5	3675	5512,5
65	2	943,8	2,5	3675	5512,5
65	3	764,5	2	5512,5	8268,75
65	4	808,3	2	5512,5	8268,75
65	5	1119,2	2	5512,5	8268,75
75	1	1073,1	2,5	3675	16537,5
75	2	872,2	2	5512,5	8268,75
75	3	872,2	2	5512,5	8268,75
75	4	984,2	3	2756,25	17915,63
75	5	876,9	2	5512,5	8268,75
85	1	1044,5	2,5	3675	5512,5
85	2	1058,6	2,5	3675	9187,5
85	3	1573,7	1	11025	16537,5
85	4	910,3	2,5	3675	5512,5
85	5	1022,9	2,5	3675	5512,5
95	1	1141,9	2	5512,5	8268,75
95	2	1079,5	2,5	3675	16537,5
95	3	1136,2	2	5512,5	8268,75
95	4	996,6	2	5512,5	8268,75
95	5	493,5	2	5512,5	8268,75

Ara değerler olan %45-55-65-75-85-95 nem değerlerinde doğal ester kullanılarak yapılan deneylerin kurtogram verileri tablo 4.19’ da verilirken değerlerin karşılaştırılarak hazırlanan grafikler şekil 4.82’ de görülmektedir. kmaks. değerleri için grafik ve tablo değerleri incelendiğinde en düşük kmaks. değerinin 361,4 ile %45 nem oranında 4 mm elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneyinde çıktığı gözlenmektedir. En yüksek kmaks. değeri ise 3 mm elektrot açıklığında %85 nem oranında yapılan deneyde gözlenmiştir. Delinme

seviyeleri 1 ile 2,5 arasındadır. Bant genişlikleri ait değerler incelendiğinde ise %75 bant genişliğinde 4 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 2756,25 Hz olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu değer aynı zamanda doğal ester sıvı ile yapılan bütün nem değerleri ve elektrot açıklıklarına ait deneylerdeki en düşük bant genişliği değeridir. Bununla beraber aynı değere ait frekansı incelediğimizde ise frekans değerinin 17915,63 Hz değeri ile en yüksek frekans değerinde olduğu görülmektedir. Doğal ester ile yapılan bütün nem değerlerindeki frekans değerleri analiz edildiğinde bu frekans değeri en büyük frekans değeri olarak belirlenmektedir. Doğal ester sıvı için en delinme gerilimi deşarjların en çok görüldüğü bant genişliği değerinin 5512,5 Hz olduğu gözlenmektedir.



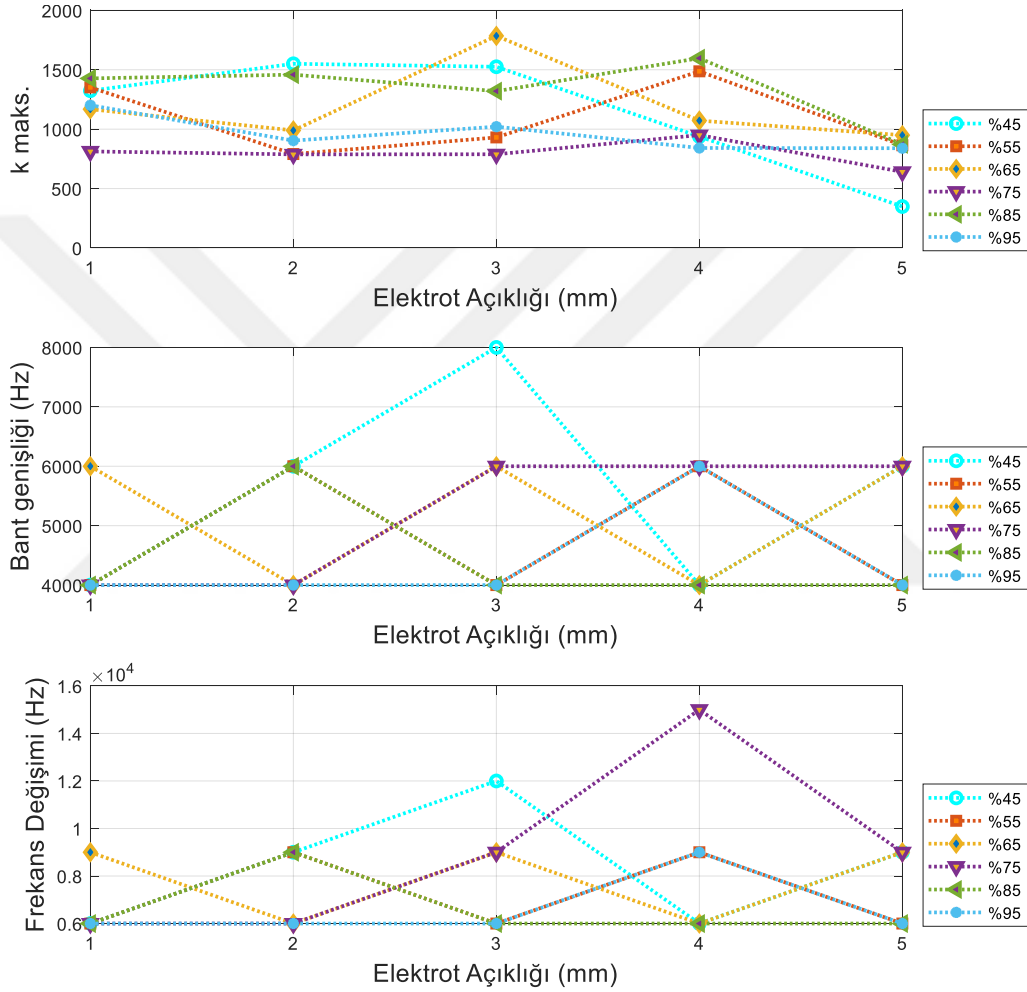
Şekil 4.83: Sentetik ester sıvı nem seviyesi kurtogram değerleri eğrileri.

Tablo 4.20: Sentetik ester sıvı nem seviyesi kmaks. Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri.

Nem(%)	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
40	1	62,1	1,5	8000	12000
40	2	205,9	2	6000	9000
40	3	289,8	2,5	4000	6000
40	4	1000,4	2	6000	9000
40	5	1217,4	2,5	4000	6000
50	1	762,5	2	6000	9000
50	2	831,6	2	6000	9000
50	3	875,2	2	6000	9000
50	4	943,6	2	6000	9000
50	5	1219,3	1,5	8000	12000
60	1	566,3	2,5	4000	14000
60	2	1087,7	2,5	4000	6000
60	3	1188,6	2	6000	9000
60	4	1775,5	2	6000	9000
60	5	2427,7	2	6000	15000
70	1	741,7	2,5	4000	6000
70	2	794,7	2,5	4000	6000
70	3	836,7	2,5	4000	6000
70	4	850,5	2,5	4000	6000
70	5	1001,8	2,5	4000	6000
80	1	779	2	6000	9000
80	2	896,1	2,5	4000	6000
80	3	967,6	2,5	4000	6000
80	4	967,7	2,5	4000	6000
80	5	1130,3	2,5	4000	6000
90	1	813,6	2	6000	9000
90	2	864,4	2	6000	9000
90	3	879,8	2,5	4000	6000
90	4	917,1	2	6000	9000
90	5	1139,1	2,5	4000	6000

Sentetik ester sıvı kullanılan deneylerde başlangıç olarak %40 nem alınmış ve %10 arttırılarak %90 nem seviyesinde sonlandırılarak delinme gerilimi deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen veriler kurtogram metoduyla işlenerek kurtogram verileri elde edilmiştir. Bu veriler şekil 4.83 ve tablo 4.20’ de gösterilmektedir. Verilerin durumu incelendiğinde kmaks. değerlerinin en düşük %40 nem oranı 4 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 62,1 çıktığı en büyük ise 5mm elektrot açıklığı ve %60 nem oranında 2427,7 olduğu tablo 4.20 ‘de görülmektedir. %70

nem değeriinde bütün elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde bant genişliği 4000 Hz olarak sabit kalmıştır. Seviye değeri incelenğinde 1. Seviyede delinme gerilimi deşarjı görülmemiş 1,5 ve 2,5 arasında oluştuğı tablo 4.20’ de verilmiştir. Delinme gerilimine ait frekans değeri ise en düşük 6000 Hz ve en yüksek ise 15000 Hz olarak kurtogram grafiklerinde ve tablo 4.20’ de görülmektedir. En yüksek delinme gerilimi frekansı yine %60 nem seviyesinde gözlenmiştir.



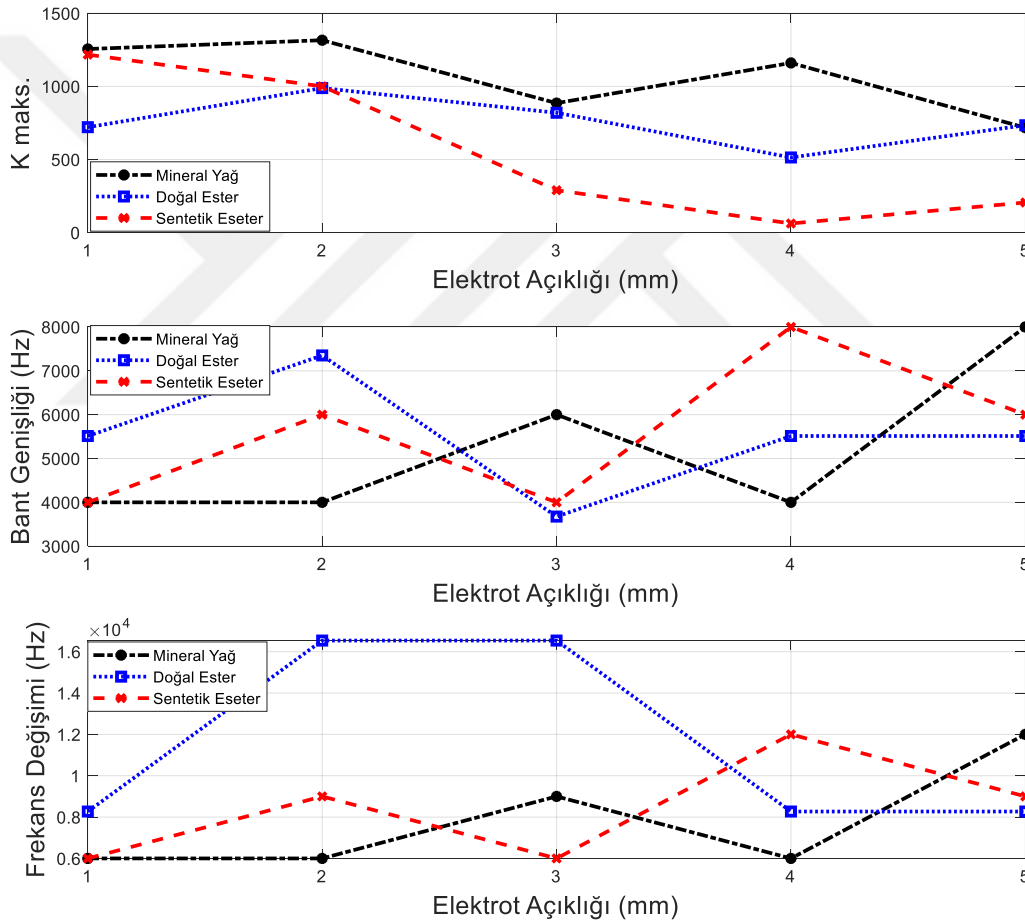
Şekil 4.84: Sentetik ester sıvı nem seviyesi kurtogram değeri eğrileri.

Tablo 4.21: Sentetik ester sıvı nem seviyesi kmaks., Seviye Bw ve fc (frekans değişimi) değerleri

Nem (%)	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
45	1	1323,4	2,5	4000	6000
45	2	1550,3	2	6000	9000
45	3	1525,2	1,5	8000	12000
45	4	937,9	2,5	4000	6000
45	5	348,9	2	6000	9000
55	1	1351,7	2,5	4000	6000
55	2	790,7	2	6000	9000
55	3	930,5	2,5	4000	6000
55	4	1486,9	2	6000	9000
55	5	864,6	2,5	4000	6000
65	1	1168,1	2	6000	9000
65	2	989,5	2,5	4000	6000
65	3	1785	2	6000	9000
65	4	1071,9	2,5	4000	6000
65	5	949,5	2	6000	9000
75	1	812,6	2,5	4000	6000
75	2	787,9	2,5	4000	6000
75	3	788,8	2	6000	9000
75	4	950,1	2	6000	15000
75	5	640,9	2	6000	9000
85	1	1427,3	2,5	4000	6000
85	2	1458,8	2	6000	9000
85	3	1319,9	2,5	4000	6000
85	4	1597,3	2,5	4000	6000
85	5	872	2,5	4000	6000
95	1	1201,5	2,5	4000	6000
95	2	903,7	2,5	4000	6000
95	3	1021	2,5	4000	6000
95	4	841,7	2	6000	9000
95	5	839,5	2,5	4000	6000

%45 nem seviyesinden başlayıp %10 artırılarak en yüksek nem seviyesi olan %95’ de sonlanan ve ester yağ kullanılarak yapılan delinme gerilimi deneylerine ait kurtogram grafikleri şekil 4.84’ de verilmiştir. Aynı kurtogram verilerine ait değerler ise tablo 4.21’ de paylaşılmıştır. Sentetik ester sıvı ile yapılan ara nem değerlerinin birbiri ile karşılaştırıldığı kurtogram grafikleri incelendiğinde kmaks. değerlerinin 348,9 ile 1597,3 arasında değiştiği gözlenmektedir. Delinme gerilimi deneyleri sadece %45 nem seviyesi 3 mm elektrot

açıklığında 1,5’ de kalmış diğer delinme gerilimi deşarjlarında 2-2,5 seviyelerinde oluşmuştur. Bununla beraber bant genişlikleri incelendiğinde ise en yüksek sadece %45 nem ve 3 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 8000 Hz olarak görülmekte diğer bütün ara nem seviyelerinde ve elektrot açıklıklarında ise 4000 Hz ile 6000 Hz aralığında görülmektedir. Frekans değerleri ise %45 nem 3 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 12000 Hz ve %75 nem seviyesinde 4 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 15000 Hz. olarak gözlenirken diğer bütün ara nem seviyelerine ait elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde 6000 Hz ve ile 9000 Hz arasında değiştiği tablo 4.21 ‘de ve şekil 4.84’ de verilmektedir.

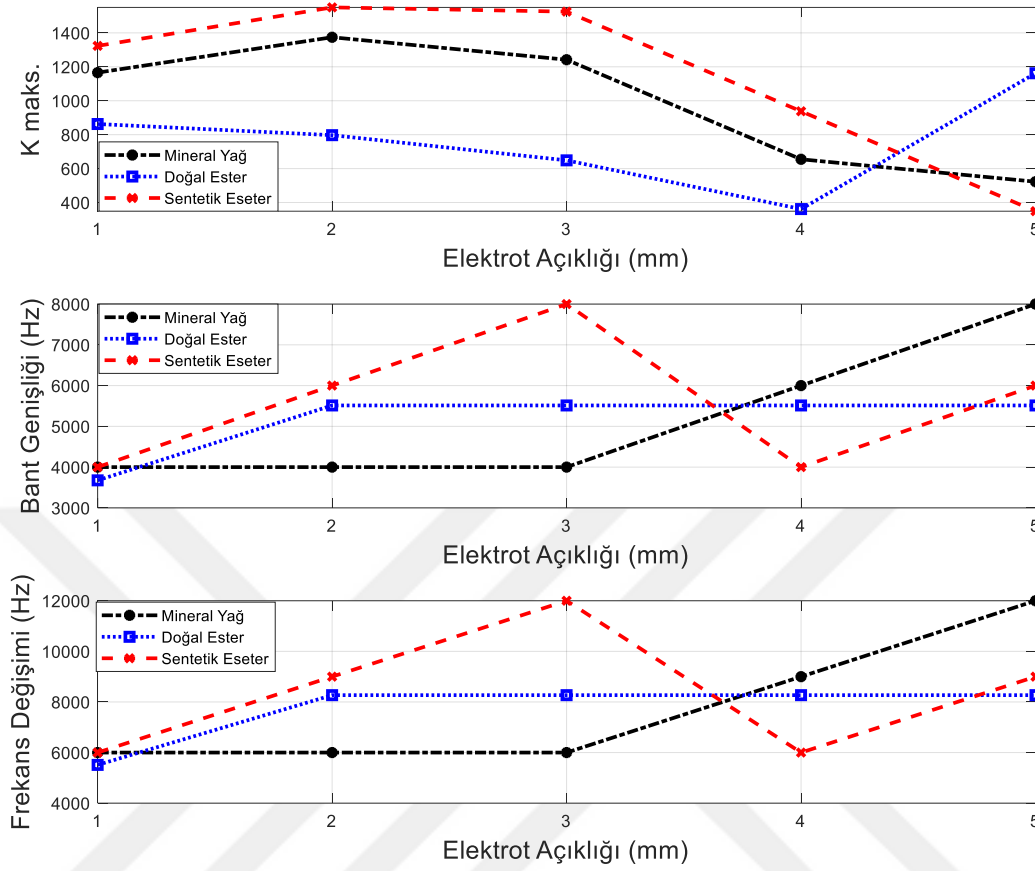


Şekil 4.85: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %40).

Tablo 4.22: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %40).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	1255,8	2,5	4000	6000
	2	1316	2,5	4000	6000
	3	885,6	2	6000	9000
	4	1160,6	2,5	4000	6000
	5	717,5	1,5	8000	12000
Doğal ester sıvı	1	721	2	5512,5	8268,75
	2	988,5	1,5	7350	11025
	3	819,6	2,5	3675	16537,5
	4	513,8	2	5512,5	8268,75
	5	734,3	2	5512,5	8268,75
Sentetik ester sıvı	1	1217,4	2,5	4000	6000
	2	1000,4	2	6000	9000
	3	289,8	2,5	4000	6000
	4	62,1	1,5	8000	12000
	5	205,9	2	6000	9000

%40 nem seviyesinde bütün elektrot açıklıklarında farklı yalıtım sıvıları için yapılan deneylerden elde edilen veriler kurtogram yöntemi ile analiz edilmiştir. Delinme gerilimi deneylerinden elde edilen kurtogram verileri şekil 4.84' ve tablo 4.22' de görülmektedir. %40 nem değerinde kmaks. değerleri incelendiğinde sentetik ester sıvıda 4 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde çıkan 62,1 değer ile en düşük kmaks. değeri olduğu görülmektedir. Bu nem seviyesinde en yüksek kmaks. değerinin ise 1316 ile 2 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde görülmektedir. Bütün yağ tipleri için seviyeler 1,5 ile 2,5 aralığında değişmektedir. Bant genişlikleri karşılaştırıldığında ise mineral yağ ve sentetik ester sıvıda 4000-6000-8000 Hz bant genişlikleri gözlemlenirken doğal ester sıvı için delinme gerilimi deşarjlarına ait bant genişlikleri 3675-5512,5-7350 Hz olarak tablo 4.22' de gözlenmektedir. Aynı şekilde frekans değerleri incelendiğinde mineral yağ ve sentetik ester sıvı için 6000-9000-12000 Hz frekans değerlerinde delinme gerilimi deşarjları görülürken doğal ester sıvı için frekans değerleri 8268,5-11025-16537 Hz olarak görülmektedir. En düşük bant genişliği ile en yüksek frekans değerine ait delinme gerilimi deneyi doğal ester sıvıda 3 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde gözlenmiştir.

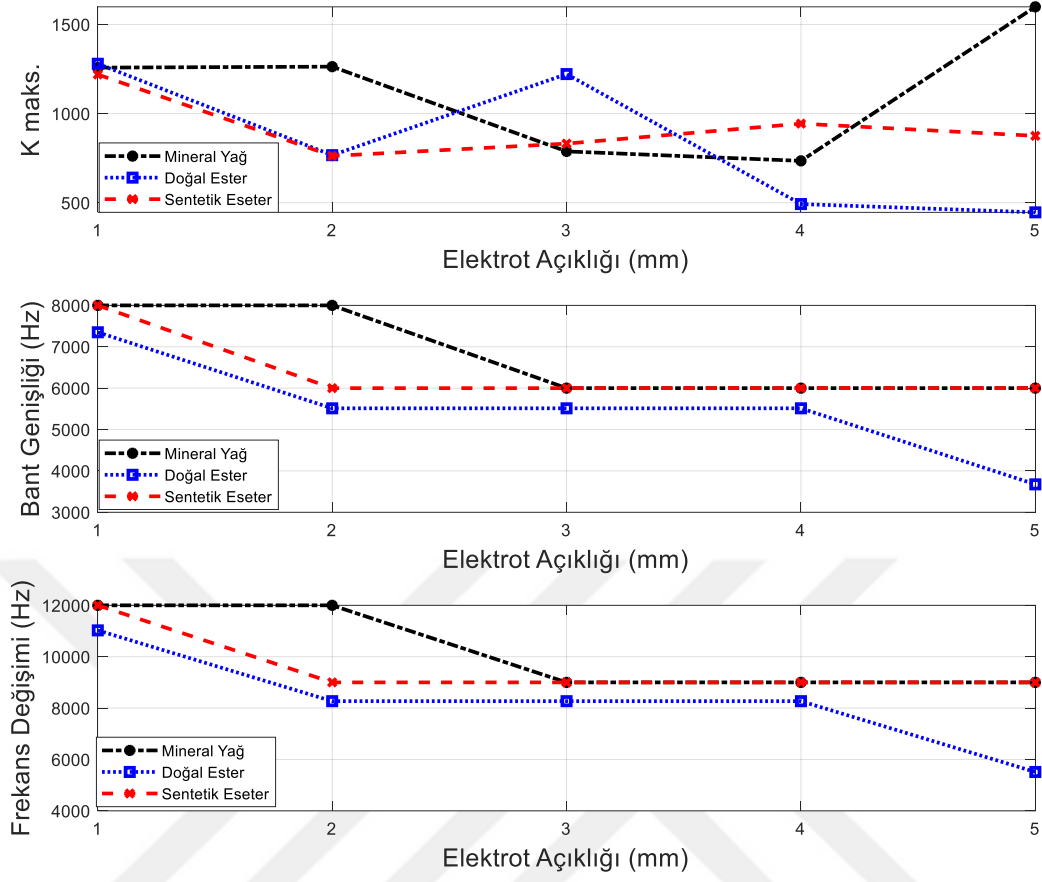


Şekil 4.86: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %45).

Tablo 4.23: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %45).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	1165,8	2,5	4000	6000
	2	1374,2	2,5	4000	6000
	3	1241,9	2,5	4000	6000
	4	654,8	2	6000	9000
	5	522,7	1,5	8000	12000
Doğal ester sıvı	1	862,8	2,5	3675	5512,5
	2	797	2	5512,5	8268,75
	3	648,6	2	5512,5	8268,75
	4	361,4	2	5512,5	8268,75
	5	1162	2	5512,5	8268,75
Sentetik ester sıvı	1	1323,4	2,5	4000	6000
	2	1550,3	2	6000	9000
	3	1525,2	1,5	8000	12000
	4	937,9	2,5	4000	6000
	5	348,9	2	6000	9000

Nem seviyesi %45 'e çıktığında farklı yalıtım sıvılarında bütün elektrot açıklıklarında yapılan deneylerden elde edilen kurtogram verilerine ait karşılaştırmalı grafikler şekil 4.86' da gösterilmektedir. Kurtogram verileri ise tablo 4.23' de görülmektedir. Grafik değerleri ve veriler incelendiğinde %45 nem seviyesinde en düşük kmaks. değerinin mineral yağda 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 522,7 olduğu görülmektedir. Delinme gerilim seviyeleri yoğun olarak 2 ve 2,5 da bulunmaktadır. Bant genişlikleri karşılaştırıldığında ise en delinme gerilimi bant genişliğinin 3675 Hz ile doğal ester sıvı kullanılarak 1 mm elektrot açıklığına yapılan deneyde olduğu tablo 4.23' de gözlenmektedir. Frekans değerleri %45 nem oranında yapılan deneylerde de bütün yağ tipleri için 6000 Hz ile 12000 Hz aralığında değiştiği görülmektedir. Doğal ester sıvı da yapılan deneylerde 1 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 3675 Hz ve bant genişliğinde ve 5512,5 Hz frekans da delinme gerilimi değerleri verilirken diğer bütün elektrot açıklıklarında delinme gerilimine ait bant genişlikleri 552,5 ve frekans değerleri de 8268,75 Hz olarak tablo 4.23' de verilmiştir. Burada bant genişlikleri ve frekans değerleri aynı çıkmasına rağmen kmaks. değerlerinin farklı olduğu tablo 4.23'de açıkça belirtilmiştir.

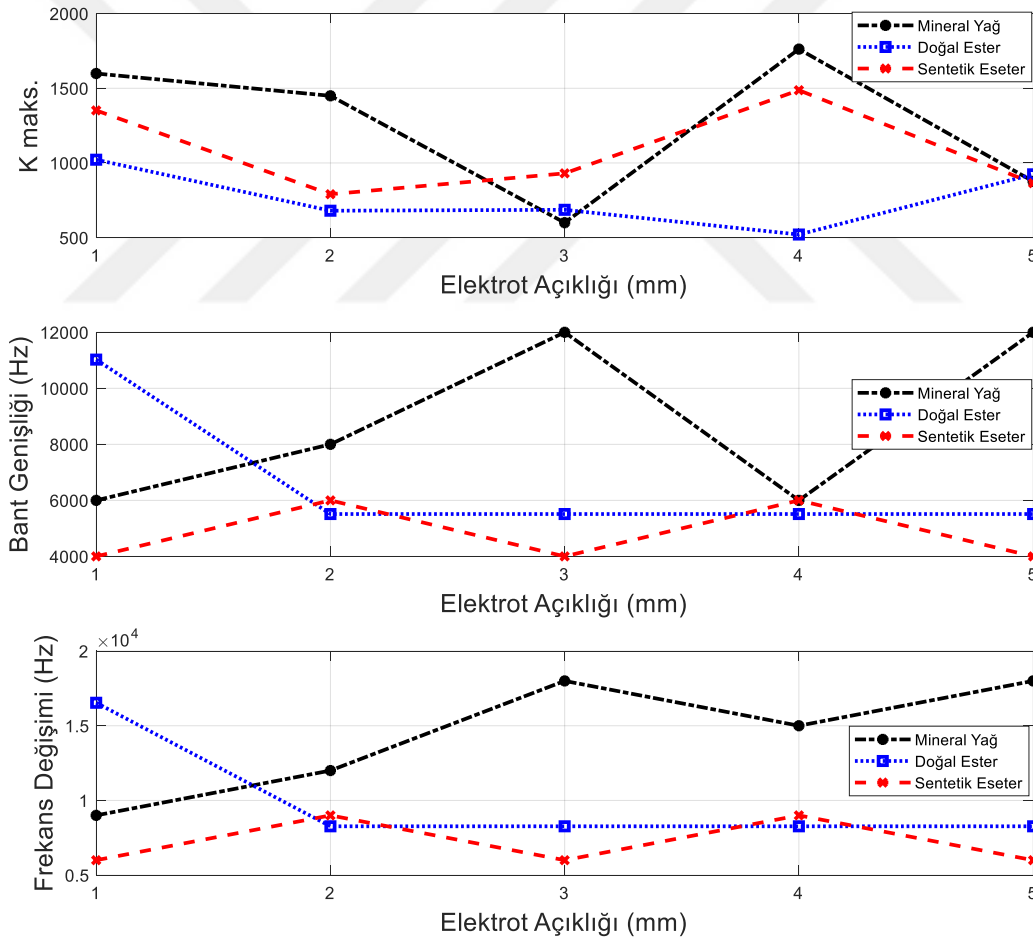


Şekil 4.87: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %50).

Tablo 4.24: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %50).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	1257,7	1,5	8000	12000
	2	1263,2	1,5	8000	12000
	3	787,9	2	6000	9000
	4	734,8	2	6000	9000
	5	1598,7	2	6000	9000
Doğal ester sıvı	1	1279,4	1,5	7350	11025
	2	766,7	2	5512,5	8268,75
	3	1221,5	2	5512,5	8268,75
	4	492,5	2	5512,5	8268,75
	5	446,1	2,5	3675	5512,5
Sentetik ester sıvı	1	1219,3	1,5	8000	12000
	2	762,5	2	6000	9000
	3	831,6	2	6000	9000
	4	943,6	2	6000	9000
	5	875,2	2	6000	9000

%50' nem seviyesinde bütün sıvı dielektriklerde yapılan deneylere ait kurtogram verilerinin grafiksel gösterimi şekil 4.87' de verilmiştir. Kurtogram verileri ise tablo 4.24' de paylaşılmıştır. Bütün elektrot açıklıklarına ait deneyler incelendiğinde en düşük kmaks. değerinin doğal ester ile 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 446,1 olduğu tablo 4.24' de görülmektedir. En yüksek kmaks. değeri ise 1598,7 ile mineral yağda 5 mm elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneyinde bulunmaktadır. Delinme gerilimi seviyeleri %50 nem seviyesi için bütün yağ tiplerinde 1,5-2 değerlerinde olurken doğal ester sıvıda 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 2,5 olarak gözlenmiştir. Bant genişlikleri mineral yağ ve sentetik ester sıvı için 6000-8000 Hz arasında değişmektedir. Delinme gerilimine ait en düşük bant genişliği 3675 Hz ile doğal ester sıvı ile 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde görülmektedir.

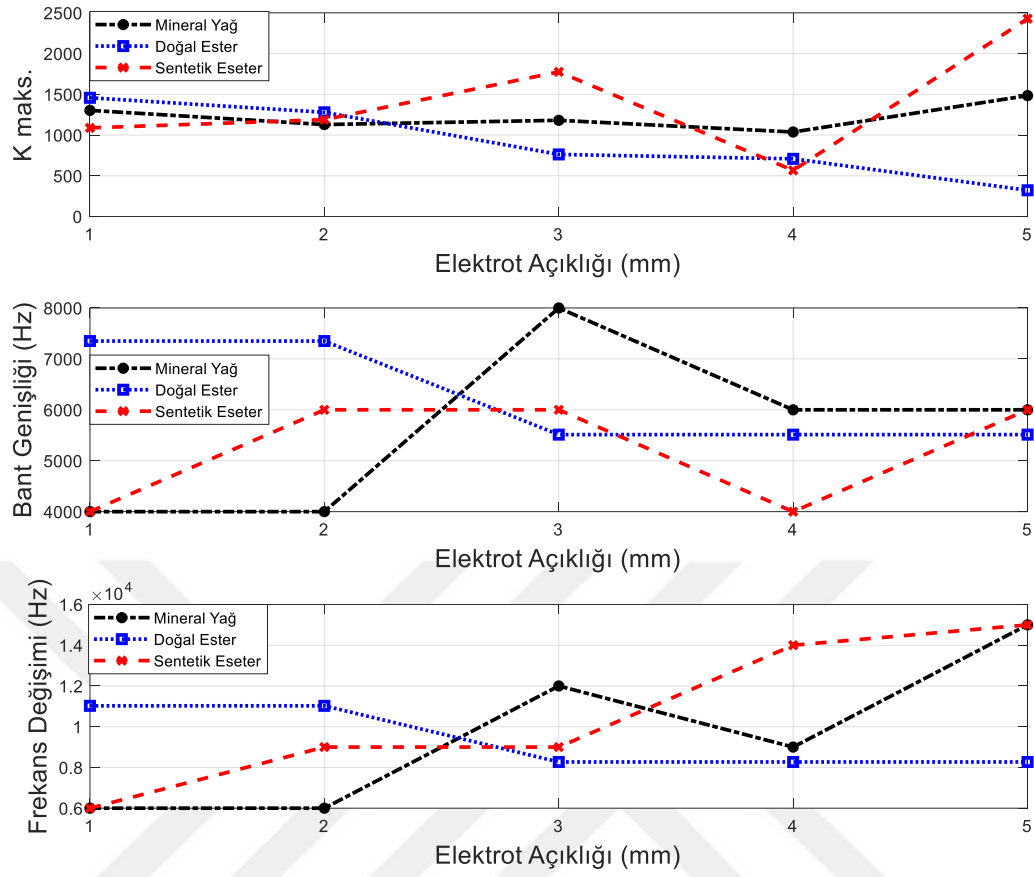


Şekil 4.88: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %55).

Tablo 4.25: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %55).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	1598,7	2	6000	9000
	2	1449,5	1,5	8000	12000
	3	600,1	1	12000	18000
	4	1762	2	6000	15000
	5	876,7	1	12000	18000
Doğal ester sıvı	1	1021,7	1	11025	16537,5
	2	680,3	2	5512,5	8268,75
	3	686,4	2	5512,5	8268,75
	4	520,9	2	5512,5	8268,75
	5	923,8	2	5512,5	8268,75
Sentetik ester sıvı	1	1351,7	2,5	4000	6000
	2	790,7	2	6000	9000
	3	930,5	2,5	4000	6000
	4	1486,9	2	6000	9000
	5	864,6	2,5	4000	6000

Delinme gerilimi deneylerinin %55 nem seviyesinde yapıldığı ve bu deneyler sonucunda alınan verilerin kurtogram metodu ile işlenmesi sonucu bütün elektrot açıklıklarında bütün yağ tipleri için elde edilen kurtogram verilerini içeren tablo 4.25’ de kmaks., seviye, bant genişlikleri ve frekans değerleri gösterilmektedir. Bu değerlerin karşılaştırmalı grafikleri ise şekil 4.88’ de verilmiştir. kmaks. değerleri karşılaştırıldığında da en düşük kmaks. değerinin doğal ester sıvıda 4 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 520,9 olarak elde edildiği tablo 4.25’ de görülmektedir. En yüksek kmaks. değerinin ise sentetik ester sıvıda 4 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 1486,9 verilmiştir. Bu nem seviyelerinde yapılan deneylerde delinme gerilimi seviyeleri 1 ve 2,5 aralığındadır. Bant genişlikleri karşılaştırıldığında sentetik ester için delinme gerilimi bant genişlikleri 4000 Hz 6000 Hz aralığında değişirken mineral yağ 6000-12000 Hz aralığında değişmektedir. Frekans değerleri ise en yüksek 18000 Hz ile mineral yağda yapılan 3 mm ve 5mm elektrot açıklıklarında gözlenmiştir. Doğal ester sıvı için 1 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde bant genişliği 11025 Hz ve frekans değeri 16537,5 çıksa da aynı yağ için diğer 4 elektrot açıklığında 5512,5 Hz ve 8268,75 Hz bant genişliği ile aynı kaldığı tablo 4.25’ de gözlenmektedir.

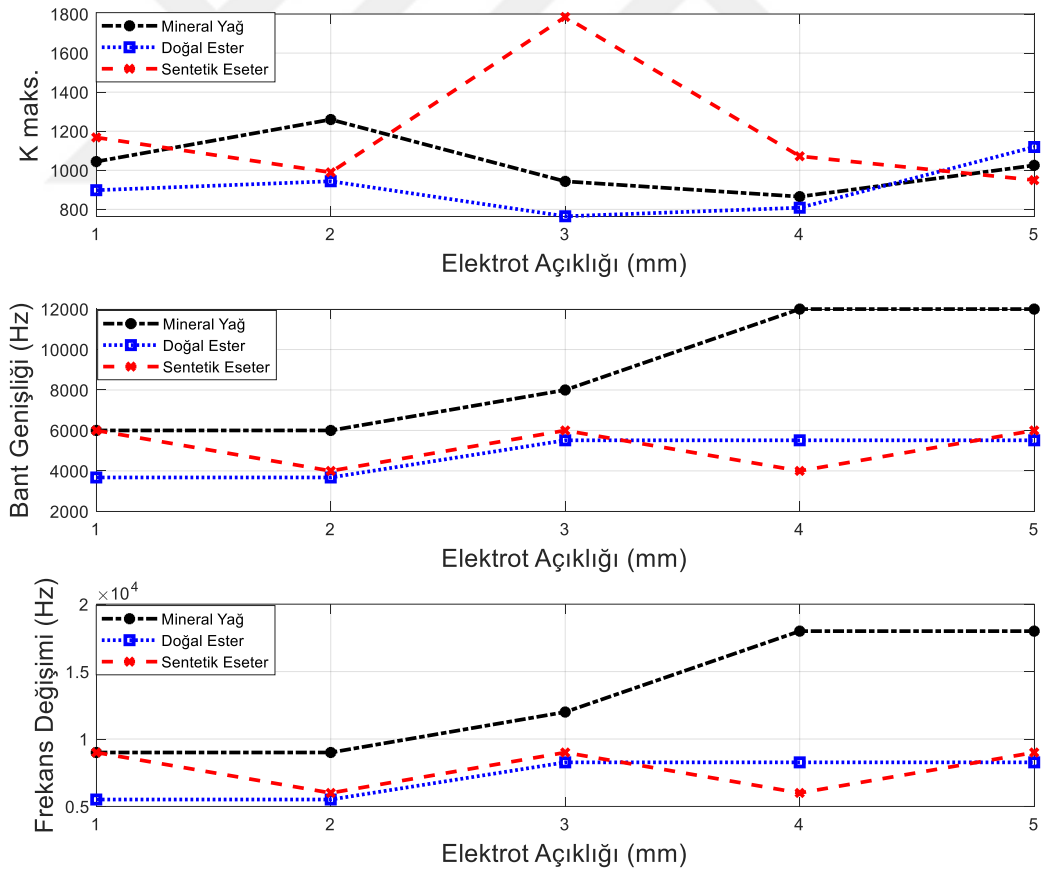


Şekil 4.89: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %60).

Tablo 4.26: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %60).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	1302,8	2,5	4000	6000
	2	1128,6	2,5	4000	6000
	3	1180,8	1,5	8000	12000
	4	1037,2	2	6000	9000
	5	1483,7	2	6000	15000
Doğal ester sıvı	1	1457,2	1,5	7350	11025
	2	1279,1	1,5	7350	11025
	3	761,9	2	5512,5	8268,75
	4	708	2	5512,5	8268,75
	5	322	2	5512,5	8268,75
Sentetik ester sıvı	1	1087,7	2,5	4000	6000
	2	1188,6	2	6000	9000
	3	1775,5	2	6000	9000
	4	566,3	2,5	4000	14000
	5	2427,7	2	6000	15000

Mineral yağ, sentetik ester sıvı ve doğal ester sıvı da %60 nem seviyesinde yapılan deneylere ait kurtogram değerleri tablo 4.26 'da verilmektedir. Verilerin grafiksel karşılaştırması ise şekil 4.89' da gösterilmektedir. kmaks. değerleri karşılaştırıldığında mineral yağ için bütün kmaks. değerleri 1000 üzerinde çıkmıştır. En düşük kmaks. değeri farklı dielektrik sıvılar içinde doğal esterde 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde elde edilmiştir. En yüksek kmaks. değeri araştırıldığında ise 2427,7 ile 5 mm elektrot açıklığında sentetik ester sıvıda yapılan deneyde elde edilmiştir. Bu nem değerinde delinme gerilimi değerleri 1,5 -2,5 aralığında değişiyor olup 1 seviyesinde delinme deşarjları gözlenmemiştir. Delinme gerilimi deşarjlarına ait bant genişlikleri gözden geçirildiğinde en yüksek bant genişliğinin mineral yağ ile 3 mm elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneyine 8000 Hz ile elde edildiği görülmektedir. Frekans değerleri incelendiğinde ise yine mineral yağda 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde ve sentetik ester sıvıda 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 1500 Hz frekans değerine çıktığı görülmektedir.

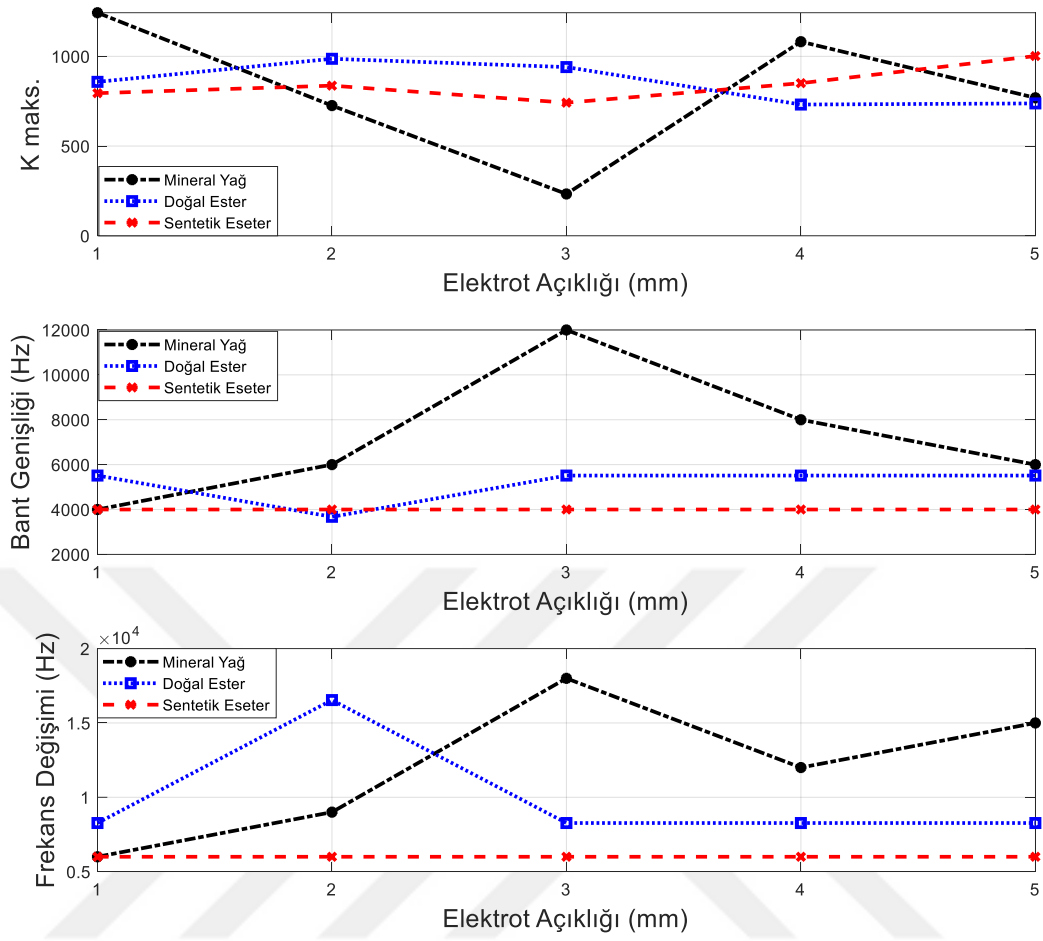


Şekil 4.90: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %65).

Tablo 4.27: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %65).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	1044,5	2	6000	9000
	2	1259,8	2	6000	9000
	3	943,2	1,5	8000	12000
	4	865,1	1	12000	18000
	5	1025,2	1	12000	18000
Doğal ester sıvı	1	898,1	2,5	3675	5512,5
	2	943,8	2,5	3675	5512,5
	3	764,5	2	5512,5	8268,75
	4	808,3	2	5512,5	8268,75
	5	1119,2	2	5512,5	8268,75
Sentetik ester sıvı	1	1168,1	2	6000	9000
	2	989,5	2,5	4000	6000
	3	1785	2	6000	9000
	4	1071,9	2,5	4000	6000
	5	949,5	2	6000	9000

%65 nem seviyesinde farklı dielektrik sıvılarda yapılan deneylere ait kurtogram verilerinin grafikleri şekil 4.90' da karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Verilerin sayısal değerleri ise tablo 4.27' de bulunmaktadır. Kurtogram analizinden elde edilen kmaks. değerleri incelendiğinde en yüksek kmaks. değerinin sentetik ester sıvı ile 3 mm elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneyinde 1785 olarak elde edildiği görülmektedir. Mineral yağda yapılan 3-4-5 mm elektrot açıklığında deneylerde seviyenin sırasıyla 1,5-1-1 olduğu, diğer dielektrik sıvılarda yapılan deneylerde bulunan seviyelerin ise 2-2,5 değerleri arasında değiştiği tablo 4.27' de görülmektedir. Bant genişlikleri incelendiğinde ise delinme gerilimine ait bant genişliklerinin en düşük doğal ester sıvıda 1mm ve 2 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde 3675 ile elde edildiği görülmektedir. Bu elektrot açıklıklarında aynı zaman en düşük frekans değerleri bulunmaktadır. En yüksek delinme gerilimine ait frekans değerleri ise mineral yağda 4 mm ve 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde 18000 Hz olarak gözlenmiştir.

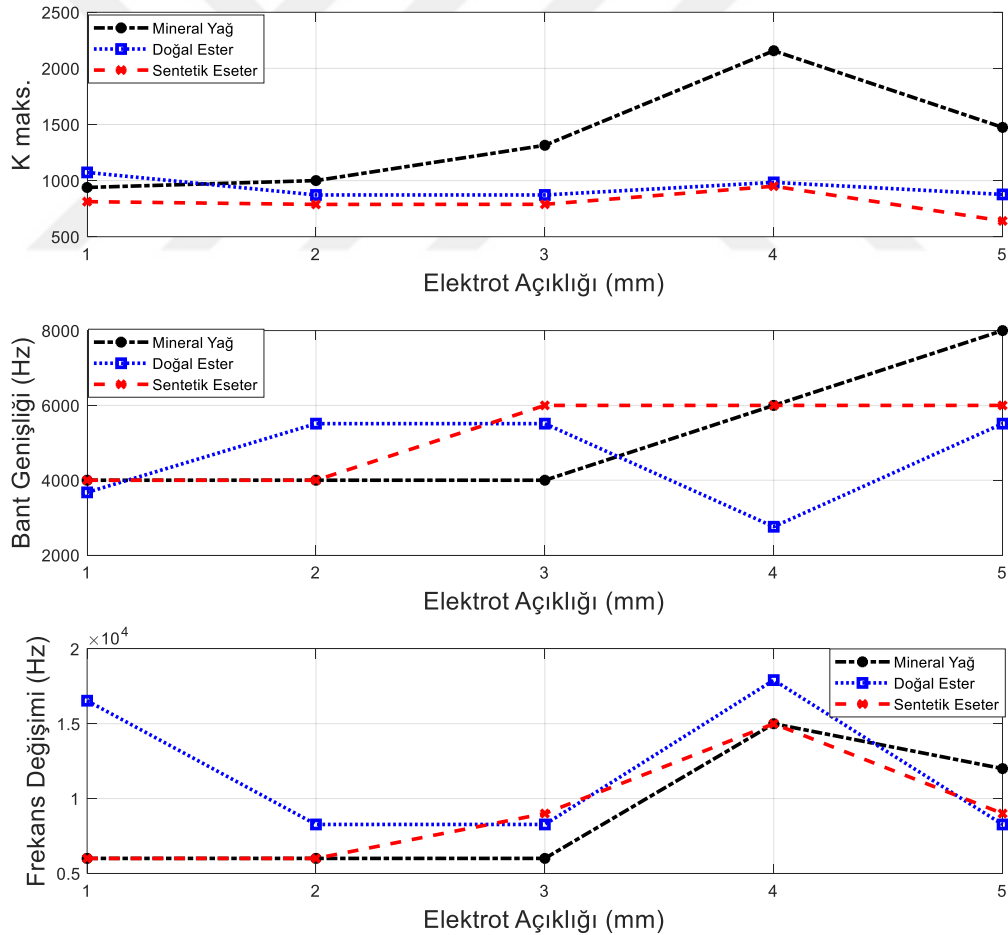


Şekil 4.91 Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %70).

Tablo 4.28: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %70).

Sıvı	Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ		1	1243,2	2,5	4000	6000
		2	725,6	2	6000	9000
		3	232,9	1	12000	18000
		4	1081,7	1,5	8000	12000
		5	769	2	6000	15000
Doğal ester sıvı		1	857,9	2	5512,5	8268,75
		2	986,4	2,5	3675	16537,5
		3	940,2	2	5512,5	8268,75
		4	731,4	2	5512,5	8268,75
		5	737,6	2	5512,5	8268,75
Sentetik ester sıvı		1	794,7	2,5	4000	6000
		2	836,7	2,5	4000	6000
		3	741,7	2,5	4000	6000
		4	850,5	2,5	4000	6000
		5	1001,8	2,5	4000	6000

Şekil 4.91’ de %70 nem seviyesine ait deneylerden elde edilen verilerin kurtogram metodu ile işlenmesi sonucu ortaya çıkan kmaks., bant genişliği ve frekans değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Kurtogram verilerinin sayısal değerleri ise tablo 4.28’ de verilmektedir. Bu verilerden kmaks. değerleri incelendiğinde en düşük kmaks. değerinin 232,9 ile mineral yağ kullanılarak 3 mm elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneyinde elde edildiği görülmektedir. Bununla beraber en yüksek kmaks. değeri de yine mineral yağ kullanılarak 1 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 1243,2 olarak belirlenmiştir. Mineral yağda 3 mm elektrot açıklığında yapılan deney ve 4 mm elektrot açıklığında yapılan deney hariç diğer bütün elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde bütün sıvı dielektriklerde delinme gerilimi seviyeleri 2-2,5 değerlerinde olduğu tablo 4.28’ de görülmektedir. Sentetik ester sıvıda bütün elektrot açıklıklarında delinme gerilimine ait bant genişlikleri 4000 Hz çıkarken frekans değerleri ise 6000 Hz çıkarak elektrot açıklığına göre değişmemiştir

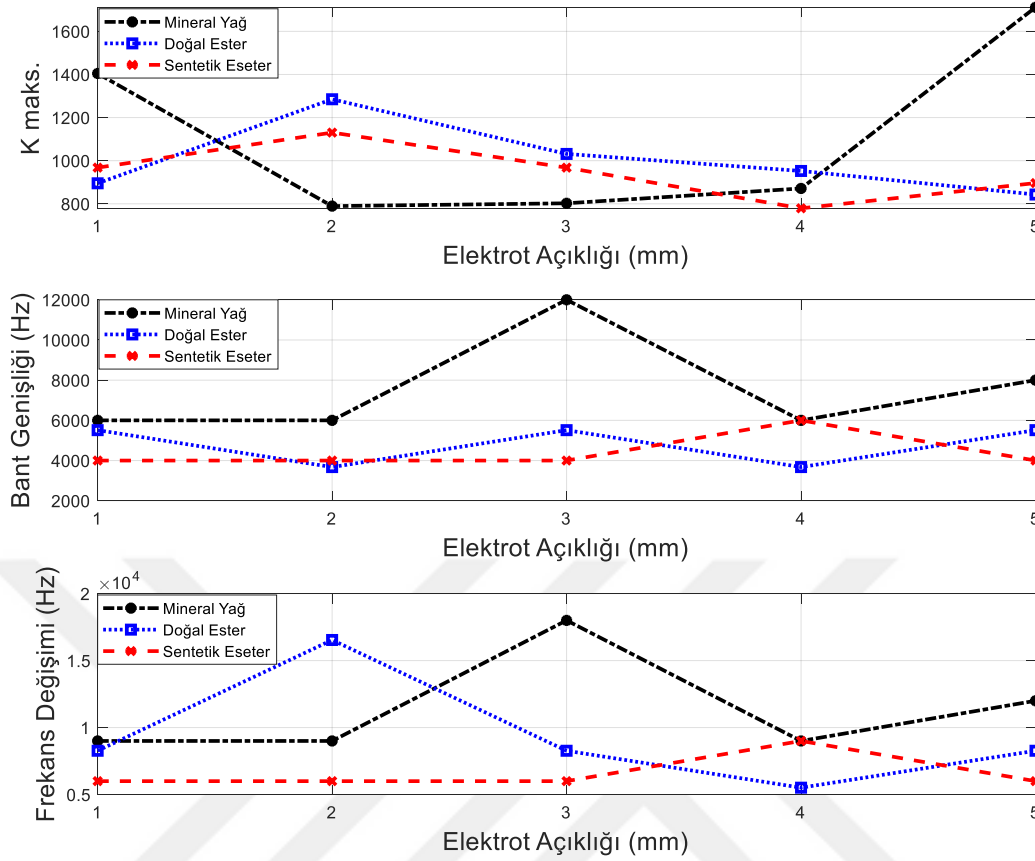


Şekil 4.92: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %75).

Tablo 4.29: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %75).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	939,1	2,5	4000	6000
	2	1000,4	2,5	4000	6000
	3	1314,8	2,5	4000	6000
	4	2157,3	2	6000	15000
	5	1474,2	1,5	8000	12000
Doğal ester sıvı	1	1073,1	2,5	3675	16537,5
	2	872,2	2	5512,5	8268,75
	3	872,2	2	5512,5	8268,75
	4	984,2	3	2756,25	17915,625
	5	876,9	2	5512,5	8268,75
Sentetik ester sıvı	1	812,6	2,5	4000	6000
	2	787,9	2,5	4000	6000
	3	788,8	2	6000	9000
	4	950,1	2	6000	15000
	5	640,9	2	6000	9000

Mineral yağ, doğal ester sıvı ve sentetik ester sıvının kullanıldığı delinme gerilimi deneylerinde nem değerinin %75 olduğu bütün elektrot açıklıklarında yapılan deneylere ait kurtogram değerleri tablo 4.29’ da bulunmaktadır. Farklı sıvı dielektriklere ait kurtogram değerlerinin karşılaştırmalı grafikleri ise şekil 4.92’ de verilmektedir. Kurtogram değerlerinden kmaks. değerleri farklı dielektrik sıvılar karşılaştırıldığında en yüksek kmaks. değerinin 2157,3 ile mineral yağda 4 mm elektrot açıklığında elde edildiği tablo 4.29 ve şekil 4.92’de açıkta görülmektedir. Yapılan deneylerde yağ tipleri için en düşük kmaks. değerleri sentetik ester sıvı ile yapılan delinme gerilimi değerlerinde gözlenmektedir. En düşük kmaks. değeri 640,9 ile sentetik ester sıvıda 5 mm elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneyinde elde edilmiştir. Delinme gerilimine ait seviyeler araştırıldığında tablo 4.29’ da da görüleceği üzere mineral yağda 5 mm elektrot açıklığı haricindeki bütün sıvı dielektriklerde ve elektrot açıklıklarında 2 -2,5 seviyelerinde görülmektedir. Yalnız mineral yağda 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde seviye 1,5 olarak gözlenmiştir. %75 nem seviyesinde bant genişlikleri karşılaştırıldığında doğal ester sıvı kullanılarak 4 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde bant genişliği 2756,25 Hz ile en düşük değerde gözlenirken aynı deneyin frekans değeri 17915,625 ile yağlar arasında yapılan deneylerde en yüksek frekans değerinde olduğu açıkça görülmektedir.

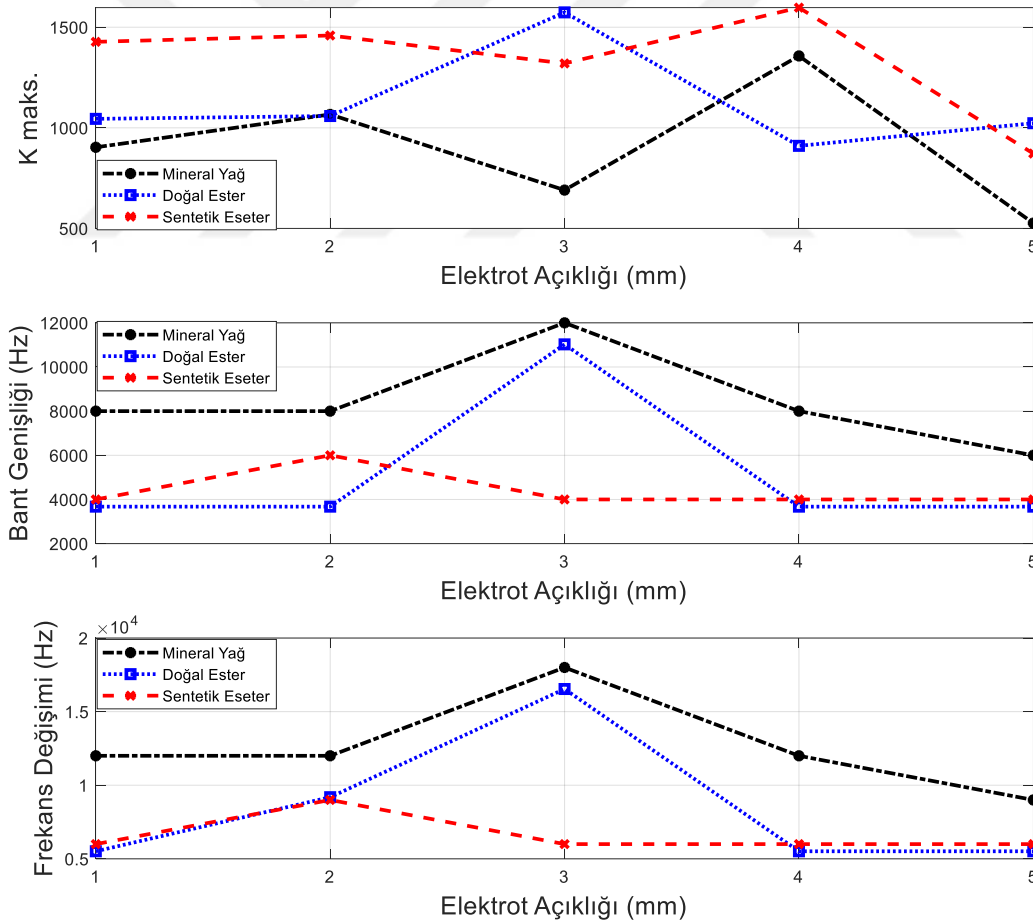


Şekil 4.93: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %80).

Tablo 4.30: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %80).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	903,2	1,5	8000	12000
	2	1066,5	1,5	8000	12000
	3	690,4	1	12000	18000
	4	1357,2	1,5	8000	12000
	5	526,2	2	6000	9000
Doğal ester sıvı	1	1044,5	2,5	3675	5512,5
	2	1058,6	2,5	3675	9187,5
	3	1573,7	1	11025	16537,5
	4	910,3	2,5	3675	5512,5
	5	1022,9	2,5	3675	5512,5
Sentetik ester sıvı	1	1427,3	2,5	4000	6000
	2	1458,8	2	6000	9000
	3	1319,9	2,5	4000	6000
	4	1597,3	2,5	4000	6000
	5	872	2,5	4000	6000

Ortam neminin %80 olarak ayarlandığı deneylere ait verilerin kurtogram metoduyla işlenmesi sonucu oluşan kmaks., seviye, bant genişliği ve frekans değerlerinin sıvı dielektrik tipine göre karşılaştırmalı grafikleri şekil 4.93’ de gösterilmektedir. Bu değerler tablo 4.30’ da verilmiştir. kmaks. değerleri incelendiğinde bütün yağ tipleri için %80 nem oranında yapılan deneylerde en düşük kmaks. değeri sentetik ester sıvı kullanılarak 4 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 779 olarak elde edilmiştir. En yüksek kmaks. değeri ise 1711,3 ile mineral yağda 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde görülmektedir. Delinme gerilimi seviyeleri sentetik ester sıvı ve doğal ester sıvıda 2-2,5 değerlerinde değişirken mineral yağda yapılan deneylerde sırasıyla 1-1,5-2 değerlerinde gözlenmektedir. Delinme gerilimine ait bant genişlikleri karşılaştırıldığında ise en büyük bant genişliği ve aynı zamanda en büyük frekans değerinin mineral yağda 3 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde ortaya çıktığı 12000 Hz bant genişliği ve 18000 Hz de frekans değerine sahip olduğu görülmektedir.

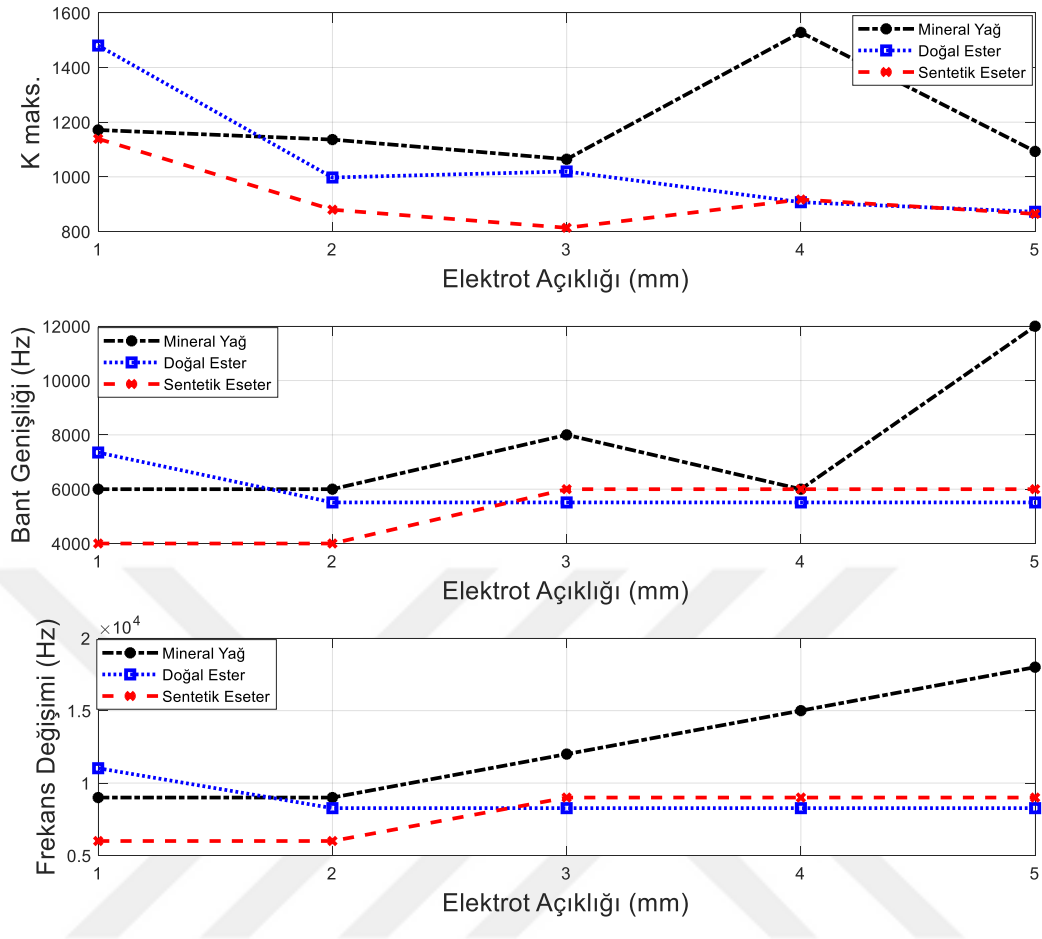


Şekil 4.94: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %85).

Tablo 4.31: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %85).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	903,2	1,5	8000	12000
	2	1066,5	1,5	8000	12000
	3	690,4	1	12000	18000
	4	1357,2	1,5	8000	12000
	5	526,2	2	6000	9000
Doğal ester sıvı	1	1044,5	2,5	3675	5512,5
	2	1058,6	2,5	3675	9187,5
	3	1573,7	1	11025	16537,5
	4	910,3	2,5	3675	5512,5
	5	1022,9	2,5	3675	5512,5
Sentetik ester sıvı	1	1427,3	2,5	4000	6000
	2	1458,8	2	6000	9000
	3	1319,9	2,5	4000	6000
	4	1597,3	2,5	4000	6000
	5	872	2,5	4000	6000

%85 ortam neminde farklı sıvı dielektrik tipini içeren delinme gerilimi deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen veriler kurtogram yöntemi ile işlenmiştir. Kurtogram yöntemi ile işlenen verilerden elde edilen kurtogram değerlerine ait grafikler şekil 4.94’ de gösterilmektedir. Grafiklerin sayısal değerleri tablo 4.31’ de verilmiştir. Bu değerlerden kmaks. değeri bütün sıvı dielektrik tipleri ve bütün elektrot açıklıkları için %85 nem oranında karşılaştırıldığında en düşük kmaks. değerinin 5 mm elektrot açıklığında mineral yağda yapılan delinme gerilimi deneyinden 526,2 ile elde edildiği tablo 4.31’ de görülmektedir. Bu üç sıvı dielektrik tipi arasında en yüksek kmaks. değeri 1597,3 ile sentetik ester sıvı kullanılarak 4 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde gözlenmektedir. Sentetik ester sıvı için bütün delinme gerilimi seviyeleri araştırıldığında bütün delinme deşarjlarının seviye 2,5’ da gerçekleştiği görülmektedir. Delinme gerilimi deşarjlarına ait en yüksek bant genişliği 12000 Hz ile mineral yağ kullanılarak 3 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde elde edilmiştir. Aynı zamanda en yüksek frekans değeri de aynı deneyde 18000 Hz verilmektedir.

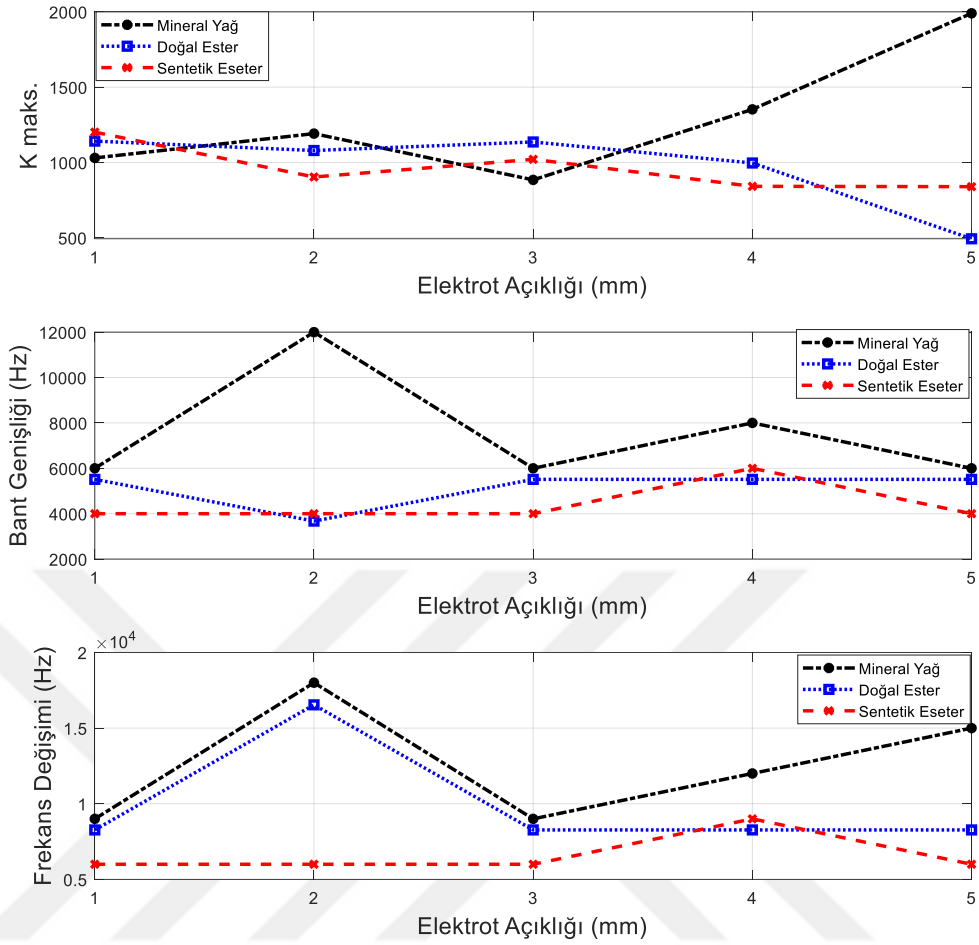


Şekil 4.95: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %90).

Tablo 4.32: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %90).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	1171,4	2	6000	9000
	2	1136,3	2	6000	9000
	3	1064,4	1,5	8000	12000
	4	1528,4	2	6000	15000
	5	1093	1	12000	18000
Doğal ester sıvı	1	1480,4	1,5	7350	11025
	2	997,6	2	5512,5	8268,75
	3	1019,6	2	5512,5	8268,75
	4	907,2	2	5512,5	8268,75
	5	872,2	2	5512,5	8268,75
Sentetik ester sıvı	1	1139,1	2,5	4000	6000
	2	879,8	2,5	4000	6000
	3	813,6	2	6000	9000
	4	917,1	2	6000	9000
	5	864,4	2	6000	9000

Yüzde 90 nem oranı için yapılan deneyler sonucunda mineral yağ, doğal ester sıvı sentetik ester sıvı için kmaks., bant genişliği ve kesim frekansı(f_c) değerlerinin grafiksel karşılaştırması şekil 4.95' de verilmiştir. Grafiklerdeki verilerin sayısal değerleri ise tablo 4.32' de verilmiştir. Maksimum dalga sayısını temsil eden kmaks. değeri en yüksek 1528,4 olarak mineral yağ ile yapılan 4 mm elektrot açıklığına sahip deneyde ölçülmüştür. Bütün elektrot açıklıklarında Seviyenin 1,5 ve 2,5 arasında değiştiği görülmektedir. Seviyenin belirli frekanstaki bileşenlerinin orta düzeyde bir enerjiye sahip olduğunu göstermektedir. Bunun sonucunda enerji seviyesini 1,5 ve 2,5 arasında belirli bir ölçekte dengelendiği görülmektedir. Tablo 4.32' deki bant genişlikleri incelendiğinde ise en düşük değerin 4000 Hz ile 1mm ve 2mm elektrot açıklıklarında sentetik ester sıvıya ait olduğu görülmektedir. En yüksek bant genişliği ise 12000 Hz ile mineral yağın 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde ölçülmüştür. Bütün elektrot açıklıklarındaki bant genişlikleri incelendiğinde ise mineral yağın daha yüksek bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Tablo 4.32' deki kesim frekanslarını (f_c) ele aldığımızda ise mineral yağ için 5 mm elektrot açıklığında yapılan deney sonucu elde edilen kesim frekansının en yüksek 18000 Hz çıktığı görülmektedir. Sentetik ester sıvı ile yapılan 4mm ve 5mm deneylerinde ise kesim frekansının 6000 Hz ile en düşük çıktığı görülmektedir. Mineral yağın kesim frekansları 3 mm, 4 mm, 5mm açıklık deneyleri diğer yağlarda yapılan deney sonuçlarına göre daha yüksek çıkmıştır. Bu da daha yüksek bir frekansta delinme olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.96: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değer grafik karşılaştırması (Nem= %95).

Tablo 4.33: Dielektrik sıvıların ölçülen kurtogram değerleri (Nem= %95).

Sıvı Dielektrik Tipi	Elektrot Açıklığı (mm)	kmaks.	Seviye	Bw (Hz)	fc (Hz)
Mineral yağ	1	1030,2	2	6000	9000
	2	1191,6	1	12000	18000
	3	884,4	2	6000	9000
	4	1352,6	1,5	8000	12000
	5	1990,3	2	6000	15000
Doğal ester sıvı	1	1141,9	2	5512,5	8268,75
	2	1079,5	2,5	3675	16537,5
	3	1136,2	2	5512,5	8268,75
	4	996,6	2	5512,5	8268,75
	5	493,5	2	5512,5	8268,75
Sentetik ester sıvı	1	1201,5	2,5	4000	6000
	2	903,7	2,5	4000	6000
	3	1021	2,5	4000	6000
	4	841,7	2	6000	9000
	5	839,5	2,5	4000	6000

En yüksek nem seviyesi olan %95 nem seviyesinde bütün elektrot açıklıklarında mineral yağ, doğal ester sıvı ve sentetik ester sıvı için delinme gerilimi deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen veriler kurtogram metoduyla işlenip elde edilen değerler %95 nem oranında birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.96' da kurtogram verilerine ait olan grafikler sunulmuştur. Grafiklerdeki sayısal veriler tablo 4.33' de verilmiştir. Üç farklı sıvı dielektrik tipine ait kurtogram verileri birbiri ile karşılaştırıldığında kmaks. değerleri içinden en düşük değerin doğal ester sıvı kullanılarak 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 493,5 ile elde edildiği görülmektedir. Delinme gerilimi deşarjlarının seviyeleri incelendiğinde sentetik ester ve doğal ester sıvı için delinme gerilimi seviyelerinin 2-2,5 bandında olduğu mineral yağ içinse 1-1,5-2 değerlerinde olduğu görülmektedir. Bant genişlikleri incelendiğinde ise en yüksek delinme gerilimi deşarjlarına ait bant genişliği ve frekansının 12000 Hz bant genişliği 18000 Hz frekans değeri ile mineral yağ kullanılarak 2 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde elde edildiği gözlenmektedir. Bununla beraber en düşük bant genişliğinin 3675 Hz ile doğal ester sıvı kullanılarak 2 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde olduğu görülmektedir.

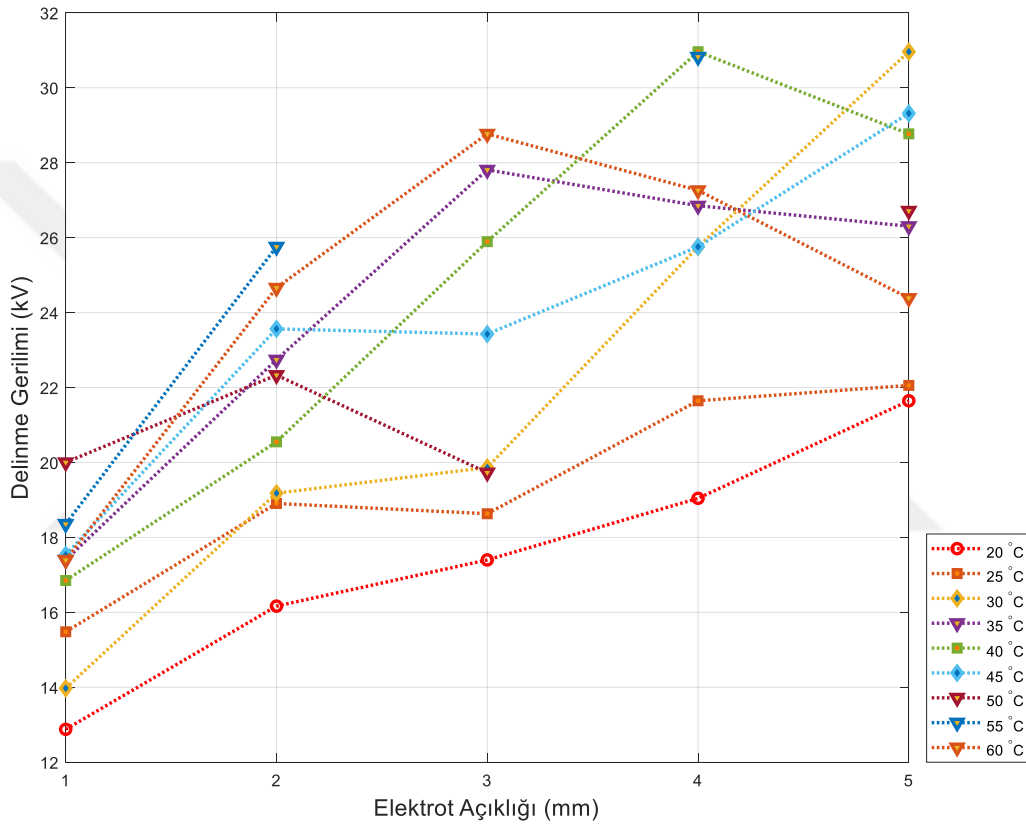
4.2. DELİNME GERİLİMİ DENEY BULGULARI

4.2.1. Delinme Geriliminin Sıvı Dielektriklerde Sıcaklıkla Değişimi

Sıvı dielektriklerin sıcaklık ile değişimine bağlı olarak delinme gerilimleri yapılan deneyler sonucu elde edilmiştir. Ölçülen delinme gerilimi verileri hem kendi içinde hem de sıvı dielektriklerin birbirleri arasında sıcaklık değişimleri ve elektrot açıklıklarına göre karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir.

Mineral yağın deney yapılan 9 farklı sıcaklık deneyi ve 5 farklı elektrot açıklığı için elde edilen delinme gerilimi değerleri şekil 4.97' de verilmiştir. Delinme gerilimi değerlerini veren tablo 4.34 incelendiğinde 50 °C 4mm elektrot açıklığında ve 55 °C de 3 mm ve 5 mm elektrot açıklıklarında delinme olmadığı gözlenmiştir. En düşük delinme geriliminin 20 °C sıcaklıkta 1 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 12,878 kV olarak ölçüldüğü görülmektedir. En yüksek delinme gerilimi ise 40 °C' de 30,962 kV ile ölçülmüştür. Sıcaklığa bağlı olarak delinme gerilimi deneyleri incelendiğinde elektrot açıklığı arttıkça 20 °C de delinme gerilimleri 12,878 kV ile 21,646 kV arasında değişmiştir. Elektrotlar arası açıklığa göre en yüksek delinme gerilimi değişiminin 30 °C sıcaklıkta olduğu görülmektedir. 30 °C sıcaklıkta 1 mm elektrot açıklığında delinme gerilimi değeri 13,974 kV ölçülürken 5 mm elektrot açıklığında ise 30,962 kV olarak ölçülmüştür. Elektrot açıklıkları incelendiğinde ise 1 mm elektrot açıklığında en

düşük delinme gerilimi 20 °C de 12,878 kV olarak tablo 4.34' de görülmektedir. 1 mm için ise en yüksek delinme gerilimi değeri ise 50 °C' de 20,002 kV ile ölçülmüştür. 2 mm elektrot aralığında en düşük delinme gerilimi 20 °C' de 16,166 kV' a çıkarken en yüksek delinme gerilimi değeri 55 °C de 25,756 kV olarak ölçülmektedir. Elektrot açıklıkları arttıkça en düşük delinme gerilimlerinin yükseldiği görülmektedir. 3 mm için en düşük delinme gerilimi 20 °C de 17,399 kV olarak ölçülürken 4 mm' de aynı sıcaklık için 19,043 kV ve 5 mm de 21,646 olarak ölçülmüştür.

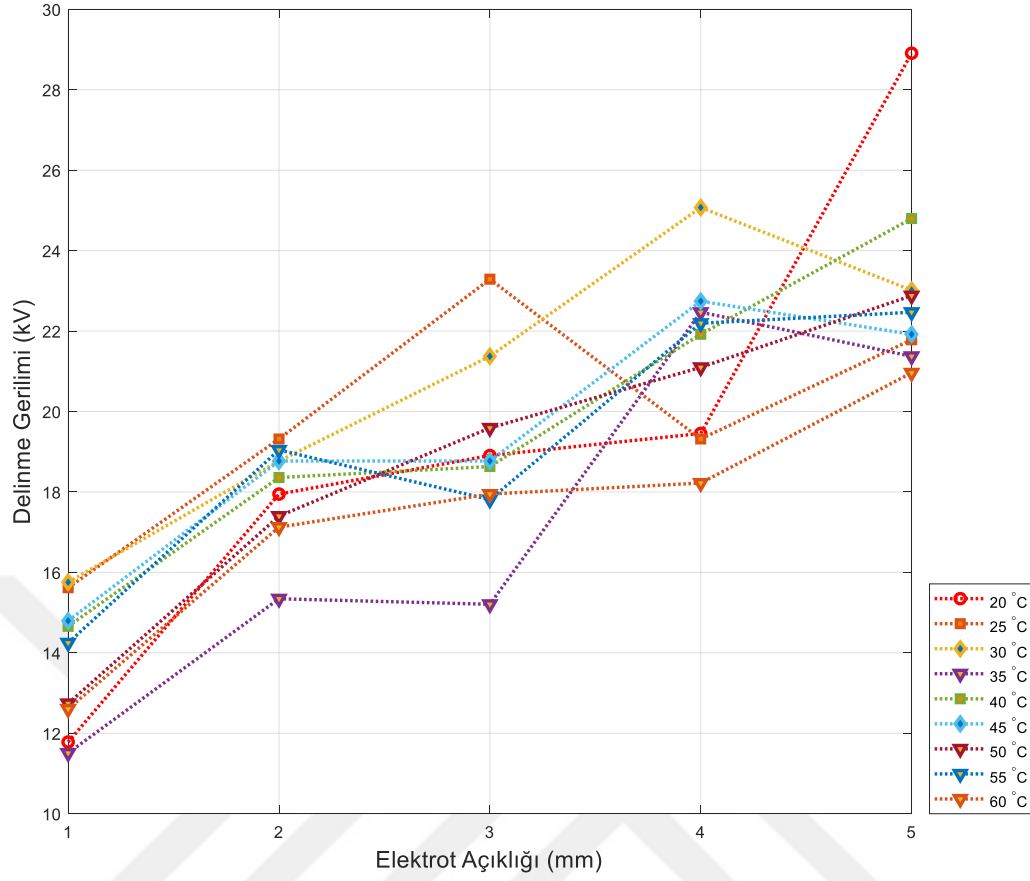


Şekil 4.97: Mineral yağ delinme geriliminin sıcaklıkla değişimi

Tablo 4.34 Mineral yağ sıcaklıkla değişen delinme gerilimi değerleri

Elektrot Aıklığı (mm) Sıcaklık (°C)	Delinme Gerilimi (kV)				
	1	2	3	4	5
20	12,878	16,166	17,399	19,043	21,646
25	15,481	18,906	18,632	21,646	22,057
30	13,974	19,18	19,865	25,756	30,962
35	17,399	22,742	27,811	26,852	26,304
40	16,851	20,55	25,893	30,962	28,77
45	17,536	23,564	23,427	25,756	29,318
50	20,002	22,331	19,728	-	26,715
55	18,358	25,756	-	30,825	-
60	17,399	24,66	28,77	27,264	24,386

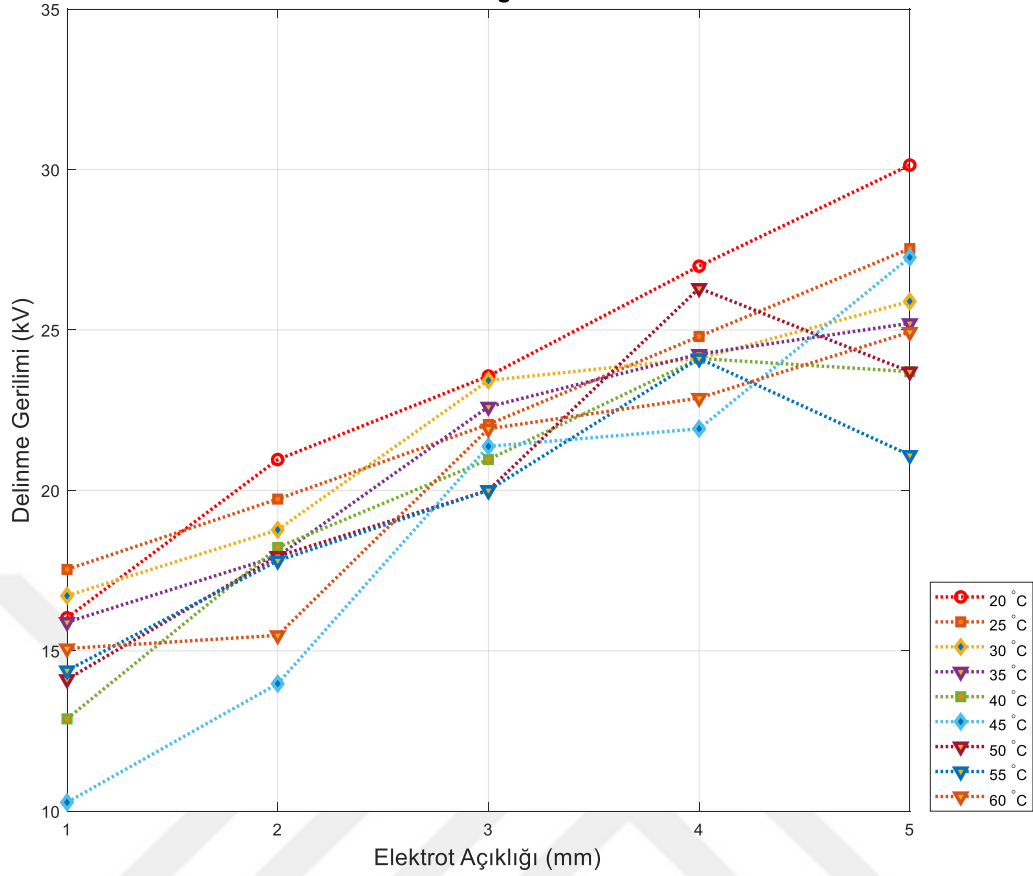
Doğal ester sıvıya ait sıcaklığa bağlı delinme gerilimi değerleri grafiğı şekil 4.99’ da verilmiştir. Elektrot açıklıklarına göre bu delinme gerilimi değerleri tablo 4.35’ de incelendiğinde, doğal ester sıvılar için en düşük delinme gerilimi değerinin 35 °C’ de 11,508 kV ile 1 mm elektrot açıklığı için elde edildiğı görölmektedir. En yüksek delinme gerilimi değeri ise 28,907 kV ile 20 °C’ de 5 mm elektrot açıklığı için tablo 4.36’ da görölmektedir. Elektrotlar arası açıklığa bağlı delinme gerilimi değerleri incelendiğinde ise 1 mm elektrot açıklığında delinme gerilimi değeri en yüksek 15,75 kV ile 30 °C’ de ölçölmüştür. 2 mm’ de bu değeri 19,317 kV ile 25 °C’ de gözlenmiştir. 3 mm elektrot açıklığında ise 25 °C sıcaklıkta en yüksek delinme gerilimi 23,29 kV ile görölmektedir. 4mm ve 5 mm elektrot açıklıklarında ise delinme gerilimi değerleri en yüksek 25,071kV ile 30 °C’ de ve 20 °C’ de en yüksek değeri olan 28,907 kV ile ölçölmüştür. Doğal ester sıvıların sıcaklık ve elektrot açıklığına bağlı olarak delinme gerilimleri ortalama 11 kV ile 22 kV arasında değişmektedir.



Şekil 4.98: Doğal ester sıvı için delinme geriliminin sıcaklıkla değişimi

4.35: Doğal ester sıvı için sıcaklıkla değişen delinme gerilimi değerleri

		Delinme Gerilimi (kV)				
Sıcaklık (°C)	Elektrot Açıklığı (mm)	1	2	3	4	5
		1	2	3	4	5
20		11,78	17,947	18,906	19,454	28,907
25		15,62	19,317	23,29	19,317	21,783
30		15,76	18,769	21,372	25,071	23,016
35		11,508	15,344	15,207	22,468	21,372
40		14,66	18,358	18,632	21,92	24,797
45		14,8	18,769	18,769	22,742	21,92
50		12,741	17,399	19,591	21,098	22,879
55		14,248	19,043	17,81	22,194	22,468
60		12,604	17,125	17,947	18,221	20,961

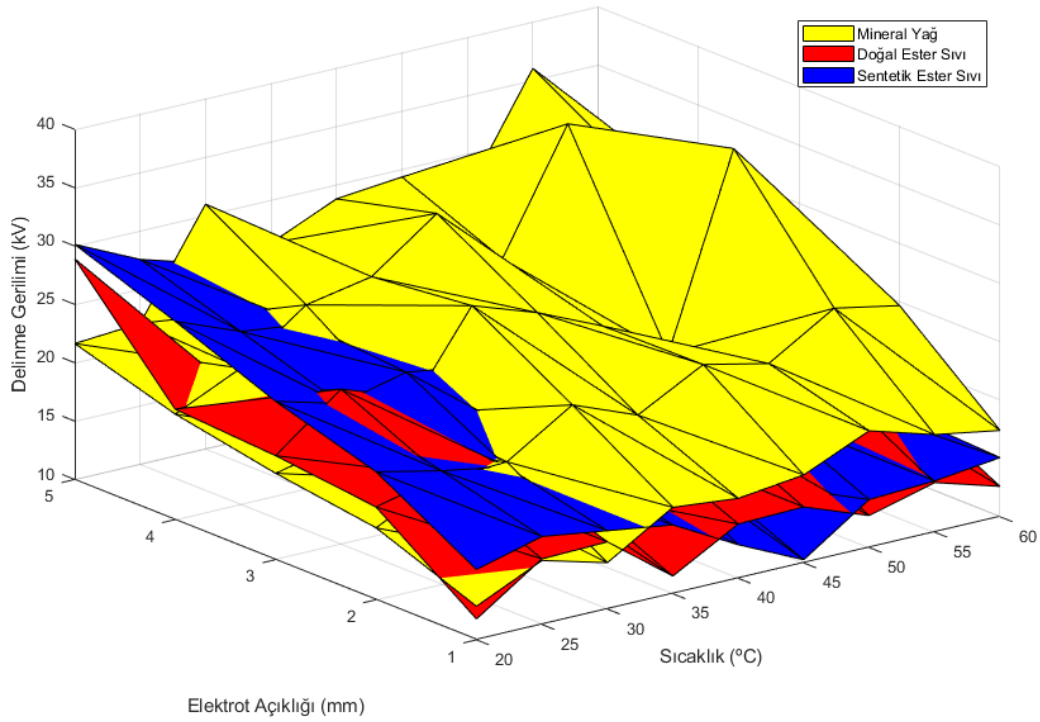


Şekil 4.99: Sentetik ester sıvı için delinme geriliminin sıcaklıkla değişimi

Sentetik ester sıvıya ait sıcaklıkla delinme gerilimlerinin sıcaklıkla değişim eğrileri şekil 4.99’ da verilmektedir. En yüksek delinme geriliminin olduğu sıcaklık 20 °C ve 5 mm elektrot açıklığında 30,14 kV olarak ölçülmüştür. En düşük delinme gerilimi ise 45 °C de 1 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 10,275 kV olarak tablo 4.36’ da görülmektedir. Bununla beraber elektrot açıklıklarına göre delinme gerilimleri incelendiğinde 1 mm elektrot açıklığında delinme gerilimi değerleri 10 kV ile 17,536 kV arasında değişirken 5 mm elektrot açıklığında bu değerler 21,098 kV ile 30,14 kV arasında değişmektedir.

Tablo 4.36: Sentetik ester sıvı için sıcaklıkla değişen delinme gerilimi değerleri

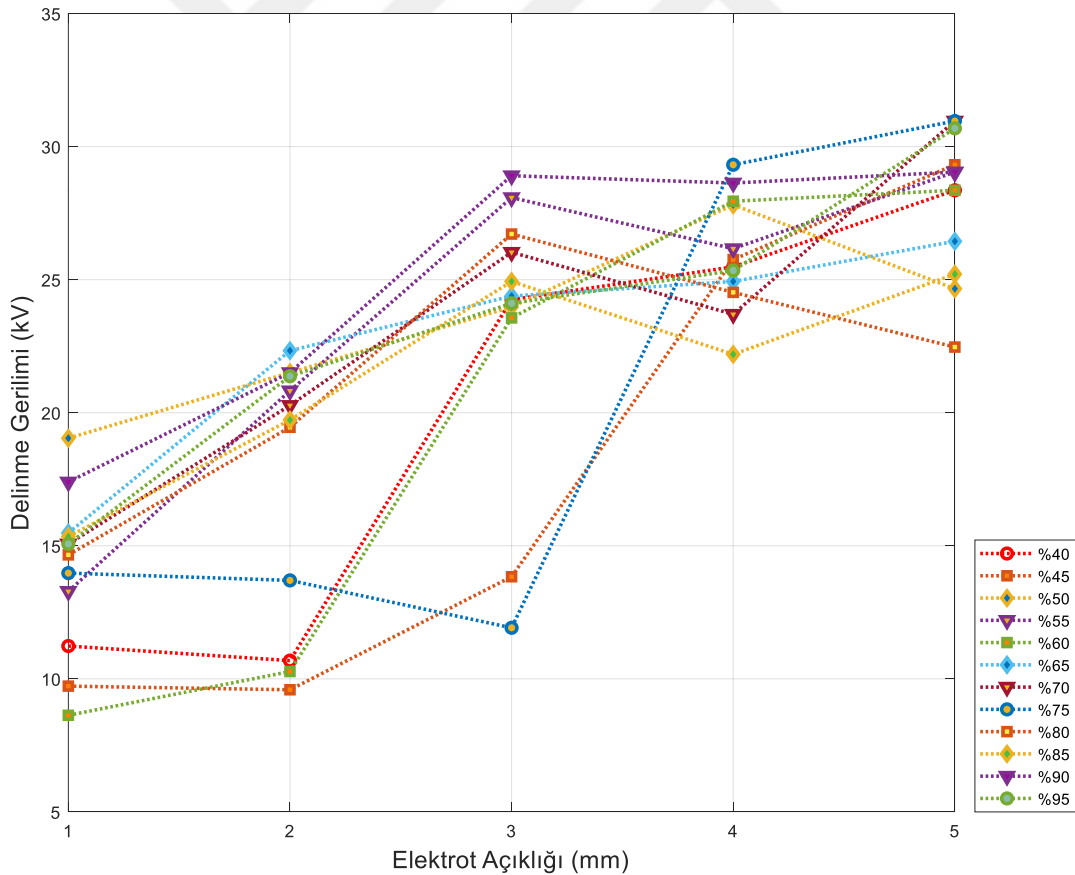
Elektrot Aıklığı (mm) Sıcaklık (°C)	Delinme Gerilimi (kV)				
	1	2	3	4	5
20	16,029	20,961	23,564	26,989	30,14
25	17,536	19,728	22,057	24,797	27,537
30	16,714	18,769	23,427	24,112	25,893
35	15,892	17,947	22,605	24,249	25,208
40	12,878	18,221	20,961	23,701	24,112
45	10,275	13,974	21,372	21,92	27,263
50	14,111	17,947	20,002	26,304	23,701
55	14,385	17,81	20,002	24,112	21,098
60	15,07	15,481	21,92	22,879	24,934

**Şekil 4.100:** Dielektrik sıvıların delinme geriliminin sıcaklık ile değişiminin grafik karşılaştırması

Üç farklı dielektrik sıvı için delinme gerilimleri deney yapılan sıcaklık değerleri ve elektrot açıklıkları için karşılaştırılması şekil 4.100’ deki grafikte verilmiştir. Şekil 4.100 incelendiğinde düşük sıcaklıklarda delinme gerilimleri sentetik ester sıvı için daha yüksek çıkarken sıcaklıklar arttıkça bütün elektrot açıklıkları için mineral yağların delinme gerilimlerinin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. 45 °C ve 55 °C sıcaklıklarda sentetik ester sıvıların delinme gerilimleri daha yüksek çıksa da deneylerin yapıldığı en yüksek sıcaklık olan 60 °C sıcaklıkta delinme geriliminin mineral yağlar için en yüksek olduğu şekil 4.100’ de görülmektedir.

4.2.2. Delinme Geriliminin Sıvı Dielektriklerde Nemle Değişimi

Delinme gerilimi deneyleri 5 farklı elektrot açıklığında ve 12 farklı nem seviyesi için yapılmıştır. Bu deneylerde ölçülen sonuçlara göre nem değişimi ve elektrot açıklığına göre delinme gerilimlerinin nasıl değiştiğinin incelenmesi önem arz etmektedir.

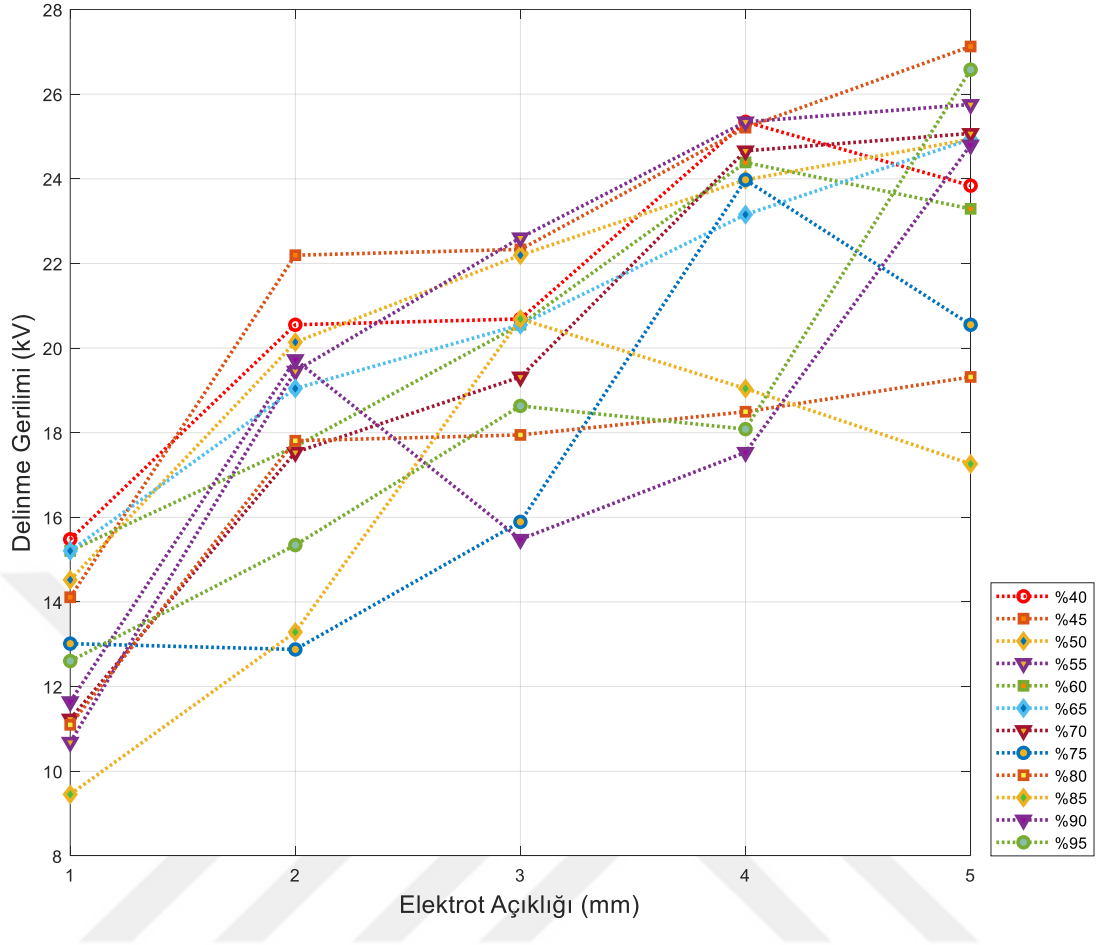


Şekil 4.101: Mineral yağ için delinme geriliminin nem ile değişimi

Mineral yağ için bütün nem seviyelerinde ve elektrot açıklıklarında yapılan deneylerde elde edilen delinme gerilimleri şekil 4.101 ve tablo 4.37' de verilmiştir. Delinme gerilimin en düşük olduğu 8,631 kV değeri %60 nem seviyesinde 1 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde ölçülmüştür. Bununla beraber %75 nem seviyesi ve 5 mm elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneyinde 30,962 kV ile mineral yağ için en yüksek delinme gerilimi gözlenmiştir. Elektrot açıklıklarına göre yapılan deney sonuçları incelendiğinde 1 mm elektrot açıklığı için en yüksek delinme gerilimi 17,399 kV ile %90 nem oranında yapılan deneyde gözlenmiştir. En büyük elektrot açıklığı olan 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde delinme geriliminin 30,962 kV ile en büyük olduğu nem oranının %70 ve %75 ile yapıldığı tablo 4.37' de görülmektedir. Şekil 4.101' de görüleceği üzere %75 nem oranında yapılan deneylerde elektrot açıklığının arttığı durumda delinme 3mm' de 11,919 kV ile 1 mm ve 2 mm elektrot açıklıklarında göre daha düşük çıkarken 4 mm elektrot açıklığına geçilen deneyde delinme gerilimi ani olarak 29,318 kV' a yükselmiştir. %40 ve %45 nem seviyelerinde 1 mm elektrot açıklığında delinme gerilimleri 11,23 kV ve 9,727 kV seviyelerinde iken nem seviyesinin %50 ye yükselmesi ile delinme 1 mm elektrot açıklığında delinme gerilimi 19,043 kV' a yükselmiştir.

Tablo 4.37: Mineral yağ için nem ile değişen delinme gerilimi değerleri)

Elektrot Açıklığı (mm)	Delinme Gerilimi (kV)				
	1	2	3	4	5
Nem (%)					
40	11,234	10,686	24,249	25,482	28,359
45	9,727	9,59	13,837	25,756	29,318
50	19,043	21,509	23,975	27,811	24,66
55	13,289	20,824	28,085	26,167	29,044
60	8,631	10,275	23,564	27,948	28,359
65	15,481	22,331	24,386	24,934	26,441
70	15,07	20,276	26,03	23,701	30,962
75	13,974	13,7	11,919	29,318	30,962
80	14,659	19,454	26,715	24,523	22,468
85	15,344	19,728	24,934	22,194	25,208
90	17,399	21,509	28,907	28,633	29,044
95	15,07	21,372	24,112	25,345	30,688

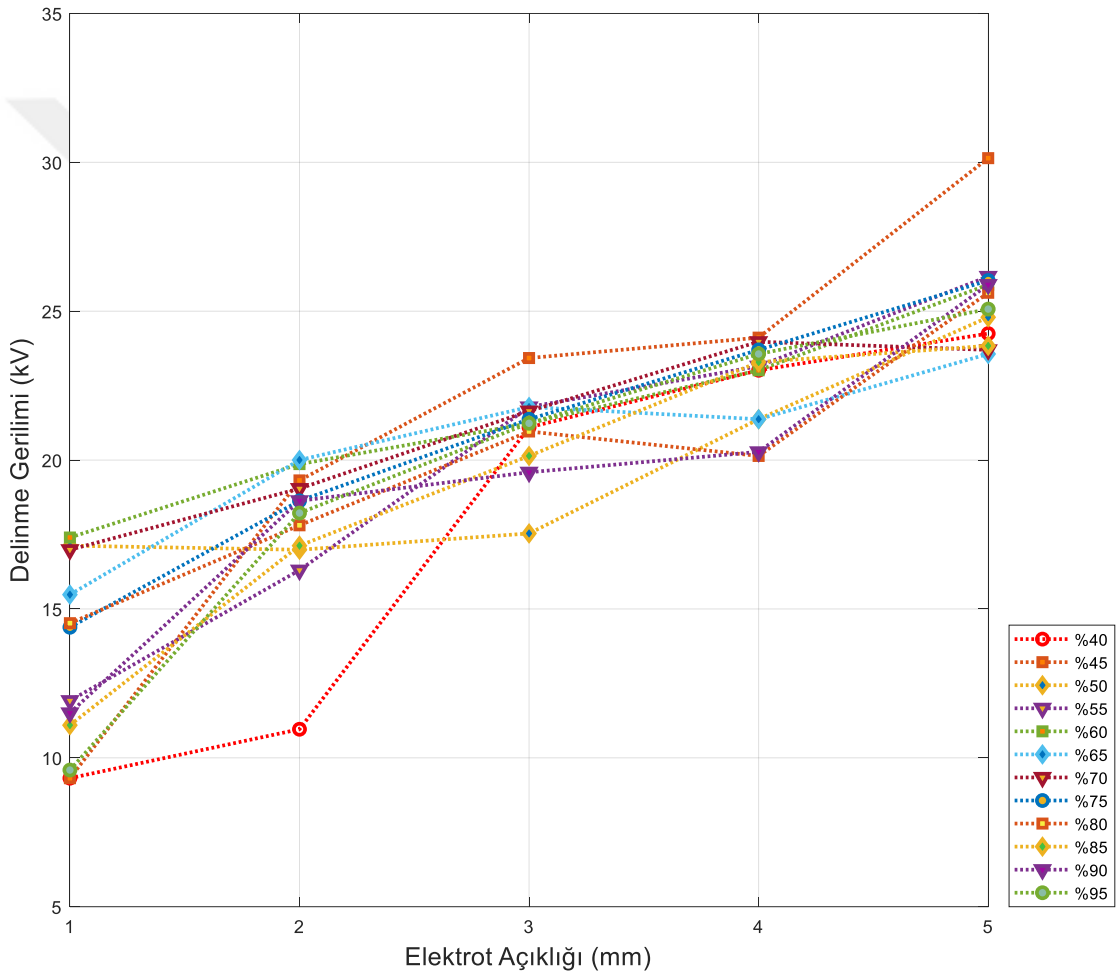


Şekil 4.102: Doğal ester sıvı için delinme geriliminin nem ile değişimi

Tablo 4.38 Doğal ester sıvı için nem ile değişen delinme gerilimi değerleri

		Delinme Gerilimi (kV)				
Nem (%)	Elektrot Açıklığı (mm)	1	2	3	4	5
40		15,481	20,55	20,687	25,345	23,838
45		14,111	22,194	22,331	25,208	27,126
50		14,522	20,139	22,194	23,975	24,934
55		10,686	19,454	22,605	25,345	25,756
60		15,207	17,673	20,55	24,386	23,29
65		15,207	19,043	20,55	23,153	24,934
70		11,234	17,536	19,317	24,66	25,071
75		13,015	12,878	15,892	23,975	20,55
80		11,097	17,81	17,947	18,495	19,317
85		9,453	13,289	20,687	19,043	17,262
90		11,645	19,728	15,481	17,536	24,797
95		12,604	15,344	18,632	18,084	26,578

Doğal ester sıvının nem oranının değişimine göre 1mm' den 5 mm' ye kadar 5 farklı elektrot açıklığında yapılan delinme deneylerine ait delinme gerilimi verileri tablo 4.38' de verilmiştir. En düşük delinme gerilimi %85 nem oranı ve 1 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde 9,453 kV olarak ölçülürken en yüksek delinme gerilimi 5 mm elektrot açıklığında %45 nem ortamında yapılan deneyde 27,126 kV olarak ölçülmüştür. 1 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde delinme gerilimleri 9,453 kV ile 15,522 kV arasında değişirken 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyler incelendiğinde delinme gerilimlerinin 17,262kV ile 27,126kV arasında olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.103: Sentetik ester sıvı için delinme geriliminin nem ile değişimi

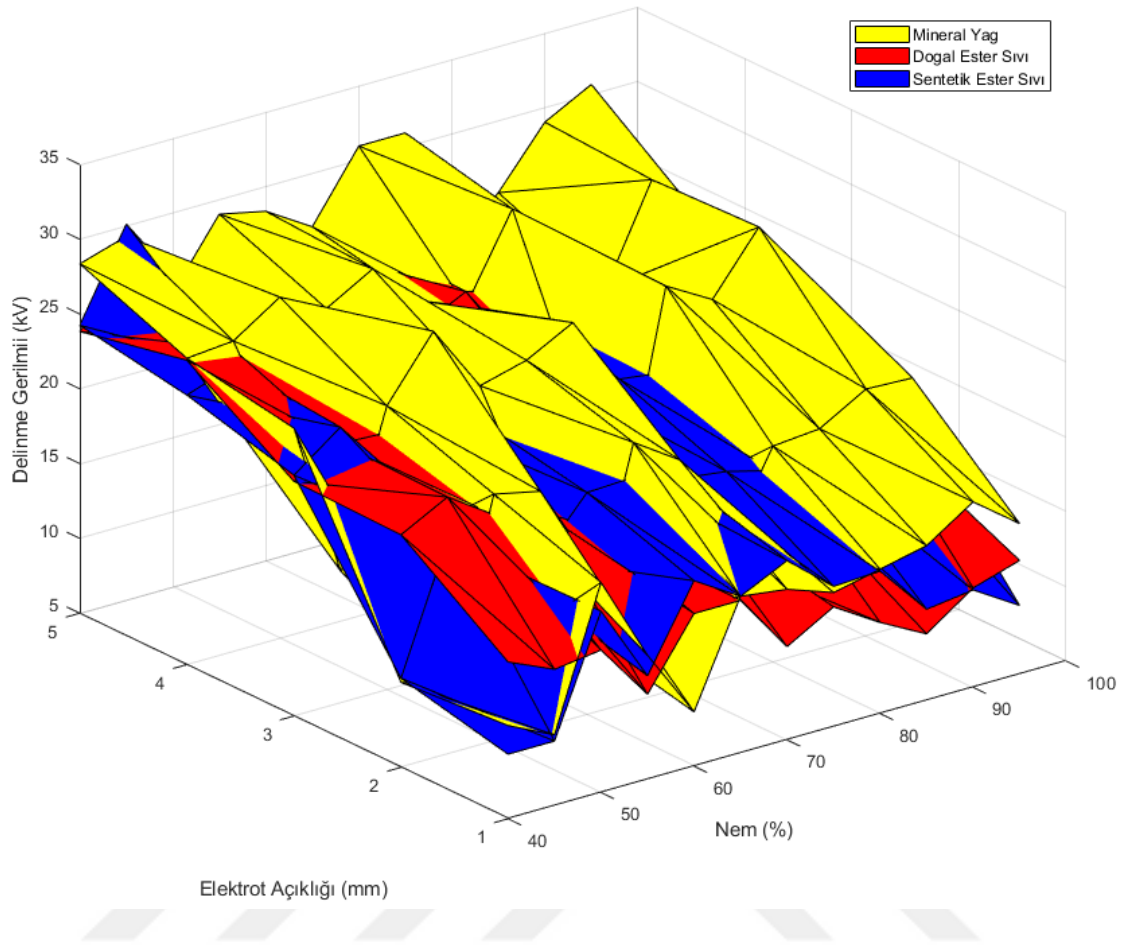
Şekil 4.103' de sentetik ester sıvı için bütün nem oranlarında delinme gerilimlerinin elektrot açıklıklarına göre sonuçları verilmiştir. En düşük delinme gerilimi %40 ve %45 nem ortamında 1 mm elektrot açıklığında 9,316 kV olarak ölçülmüştür. Delinme gerilimi değerleri tablo 4.39' da incelendiğinde 1 mm ve 2 mm elektrot açıklığında delinme gerilimleri daha düşükken 4 mm

ve 5 mm elektrot açıklığında en yüksek delinme oranına sahiptir. %45 nem ortamında 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneyde sentetik ester için 30,15 kV ile en yüksek delinme gerilimi değeri ölçülmüştür.

Tablo 4.39: Sentetik ester sıvı için nem ile değişen delinme gerilimi değerleri

Elektrot Açıklığı (mm) Nem (%)	Delinme Gerilimi (kV)				
		2	3	4	5
40	9,316	10,96	21,098	23,016	24,249
45	9,316	19,317	23,427	24,112	30,14
50	17,125	16,988	17,536	21,372	24,797
55	11,919	16,303	21,783	23,153	26,167
60	17,399	19,865	21,235	23,016	25,893
65	15,481	20,002	21,783	21,372	23,564
70	16,988	19,043	21,646	23,975	23,701
75	14,385	18,632	21,372	23,701	26,03
80	14,522	17,81	20,961	20,139	25,619
85	11,097	17,125	20,139	23,29	23,838
90	11,508	18,632	19,591	20,276	25,893
95	9,59	18,221	21,235	23,564	25,071

12 farklı nem seviyesi için 5 farklı elektrot açıklığında 3 farklı sıvı dielektrik ile yapılan delinme gerilimi deneylerine ait delinme gerilimlerinin karşılaştırıldığı eğriler şekil 4.104’ de verilmiştir. Düşük nem seviyeleri ve düşük elektrot açıklıklarında doğal ester sıvıların delinme gerilimleri daha yüksek iken nem oranı arttıkça mineral yağ ve sentetik ester sıvının delinme gerilimleri de yükselmiştir. 1 mm elektrot açıklığında %60 ve %80 nem oranında yapılan deneylerde sentetik ester sıvının delinme gerilimleri daha yüksek çıksa da 5 mm elektrot açıklıklarında ve yüksek nem oranında mineral yağın delinme gerilimleri daha yüksek olduğu şekil 4.104’ de açıkça görülmektedir.

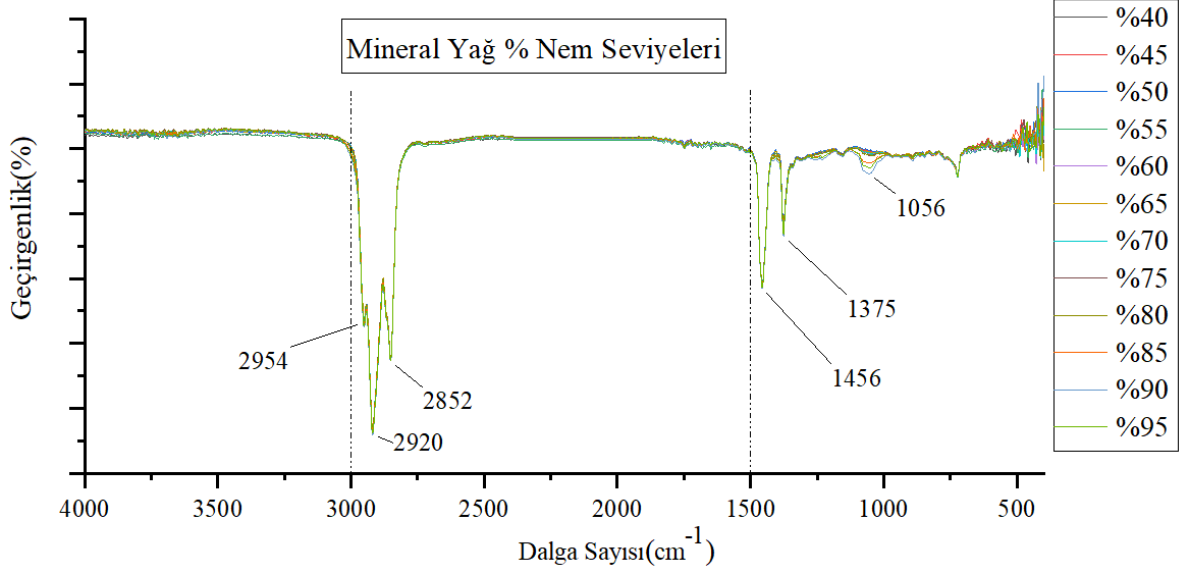


Şekil 4.104: Dielektrik sıvıların delinme geriliminin nem ile değişiminin grafik karşılaştırması

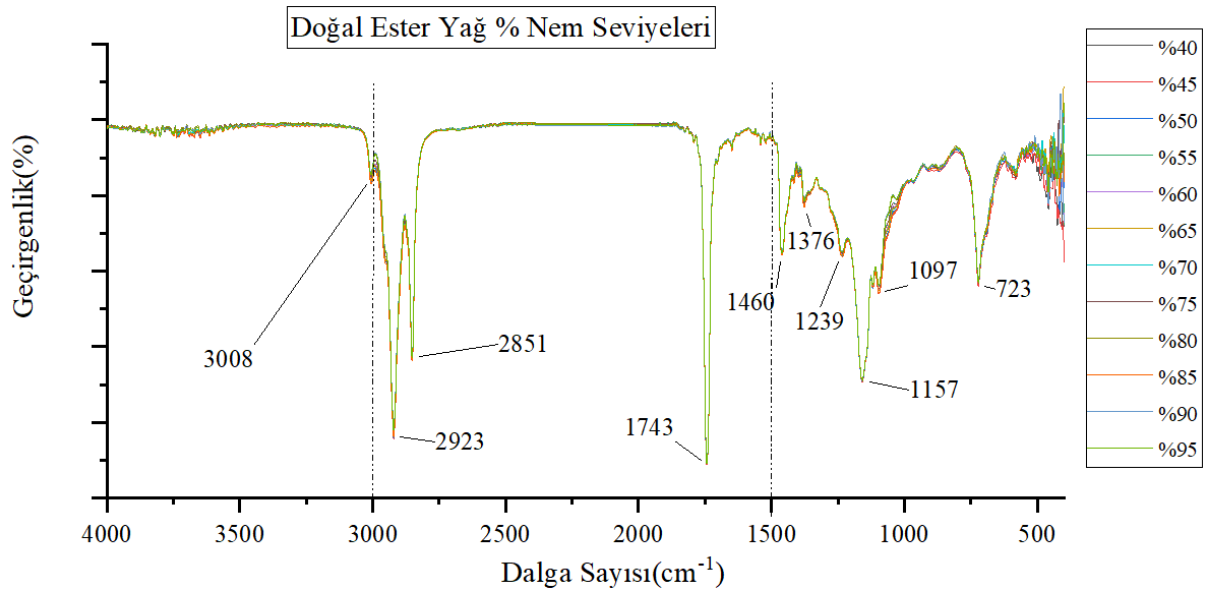
4.3. SIVI DİELEKTRİKLERİN FTIR ANALİZİ

Sıvı dielektriklerde yapılan deneylerden sonra sıvılar alınıp FTIR analizi yapılmıştır. Dielektrik sıvılara ait FTIR analizlerinin grafikleri şekil 4.105, 4.106 ve 4.107’ de görülmektedir.

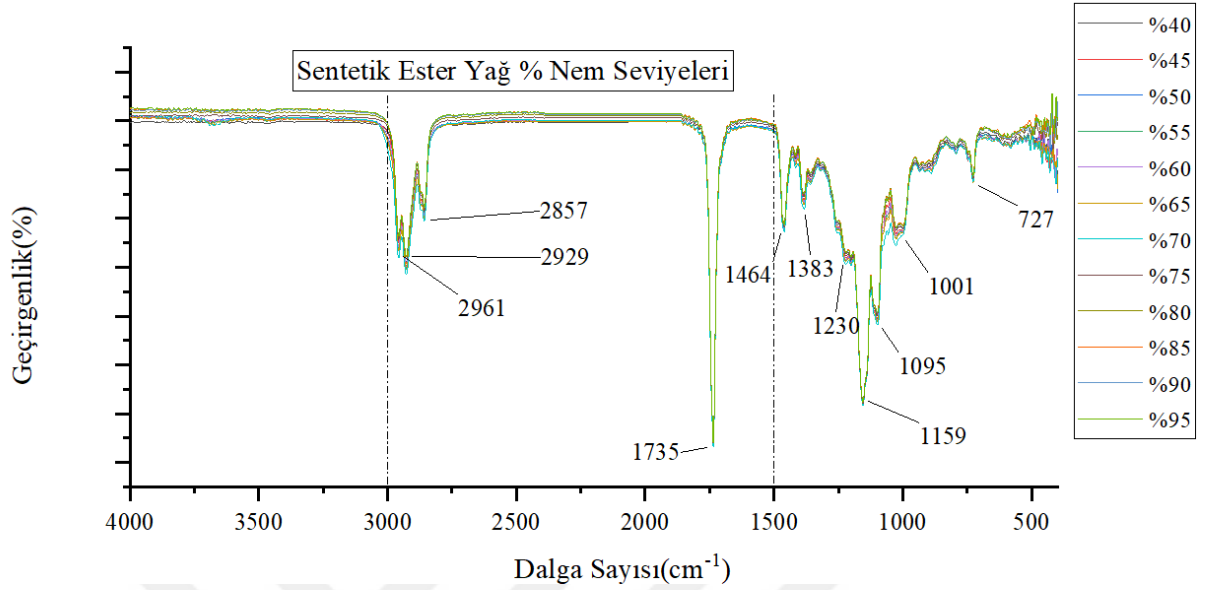
3300



Şekil 4.105: Mineral yağ için ortam nemi ölçümleri sonrası alınan yağ numunesi FTIR analizi.



Şekil 4.106: Doğal ester sıvı için ortam nemi ölçümleri sonrası alınan yağ numunesi FTIR analizi



Şekil 4.107: Sentetik ester sıvı için ortam nemi ölçümleri sonrası alınan yağ numunesi FTIR analizi

Her nem seviyesine ait deneylerden sonra yağlardan numune alınıp FTIR analizi yapılmıştır. Nem oranının yağın yapısı ile ilgili değişiklik yapıp yapmadığının kontrolü bu şekilde sağlanmıştır. Şekil 4.105’ de mineral yağ seviyesinin bütün nem seviyelerinde yağ numuneleri alınıp FTIR analizinin gösterimleri toplu halde sunulmaktadır. Dalga sayısının 1500 (cm^{-1}) olduğu noktadan dikey çizgi çizilip sol tarafındaki çift bağ bölgesi incelendiğinde herhangi bir sinyal görülmemektedir. Burada çok güçlü bir karbonil gerilimi görülmemektedir. Bu nedenle değerlendirmede karboksilik asit elenmektedir. 3000 (cm^{-1}) civarına dikey çizgi çekildiğinde sağ tarafta Sp^3 hibritleşmesine uğramış bir karbon barındıran C-H (karbon-hidrojen) bağ gerilimi olmaktadır. C-H bağları 3300 (cm^{-1}), 3100 (cm^{-1}), 2900 (cm^{-1}) dalga sayısı civarında görülmektedir. Karbon hidrojen bağ gerilimleri 3500 (cm^{-1}) civarına bakıldığında ise O-H bağ gerilimi olup olmadığı gözlenmektedir. Burada bütün yağ tipleri incelendiğinde herhangi bir O-H bağ gerilimi olmadığı görülmektedir. Bunun sonucunda yağlarda herhangi bir alkol bulunmadığı gözlemlenebilir. Aynı zaman da 3500 (cm^{-1}) civarında H—N—H (azot hidrojen) bağları da bulunmamaktadır. Bu nedenle amino da görülmemektedir. Aynı zamanda simetrik ve asimetrik iki gerilim de görülmemiştir.

Şekil 4.106 ve 4.107’ de görüldüğü üzere 1743 -1735 (cm^{-1}) bandında görülen sinyalden dolayı C=O (Karbon = Oksijen) çift bağ bölgesinde olduğu bu nedenle karbonil gerilimi olduğu gözlenmektedir. Bütün yağ tipleri için bütün nem oranlarında FTIR analizi grafikleri

incelendiğinde grafiklerden de görüldüğü üzere yağlarda ortam nemine bağlı bir kimyasal değişiklik olmamıştır. Bu da yağların öz olarak saf kaldığına göstermektedir. Bu çalışmadaki yağlarda yapılan deneylerde değişken olan parametrenin sadece ortam nemi olduğu belirtilmelidir. FTIR analizlerinde de nemin etkisi gözlenmeye çalışılmıştır. Bununla beraber yağların içerisinde su molekülü ya da su buharı girmemiştir. Yapılan bu çalışmadaki deneylerde üç farklı sıvı dielektrik tipi için yapılan FTIR analizinde nemin yağın kimyasal yapısını değiştirmedeği gösterilmiştir.



5. TARTIŞMA

Elektrik enerjisinin kesintisiz bir şekilde iletilmesi için arızasız çalışan güç transformatörlerinin oldukça önem arz ettiği literatürde çokça vurgulanan durumların başında gelmektedir [57,58]. Önceki bölümlerde sıklıkla bahsedildiği gibi trafolarla kullanılan sıvı dielektrik malzemelerinin arıza anındaki deşarjlarının izlenmesi ve analiz edilmesiyle olası kesintilerin önüne geçilebilmesi hedeflenmektedir. Petrol bazlı olan ve tamamen sentetik yöntemlerle üretilen mineral yağ, ester bağları içeren ve organik olan doğal ester ve sentetik ester sıvıların yalıtıcı malzeme olarak güç transformatörlerinde sıklıkla kullanıldığı için bu tez çalışmasında sıvı dielektrikler olarak seçilmişlerdir. Bu sıvıların yüksek elektrik alanlarda yalıtım özelliklerini kaybetmesi içerisinde meydana gelen deşarjlar sonucunda oluşmaktadır. Optimum çalışma koşullarında trafolar çalışırken bu elektriksel deşarjların olması beklenmemektedir. Ancak harici etkiler nedeniyle yalıtım sıvılarının dielektrik özelliklerinin kötüleşmesi nedeniyle gerek kısmi gerek tam elektriksel boşalmalar gözlenmektedir. Bu etkilerin detaylı şekilde incelenip doğru tanı ve müdahalelerle trafoların daha verimli çalışmaları sağlanabilir.

Sai ve arkadaşları yaşlandırma etkisini incelemek için kullanılmamış ve saf trafo yağı, 2 yıl boyunca yaşlandırılmış yağ ve filtrelenmiş yaşlandırılmış yağa ait delinme gerilimi, kayıp faktörü, asidite, parlama noktası ve buna benzer fiziksel, elektriksel ve kimyasal özelliklerinin değişimlerini incelemişlerdir [59]. Ancak ilgili çalışma tek tip yağda yapılmış ve sadece yaşlanma etkisi incelenmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere yaşlandırılmış ve filtrelenmemiş yağda tüm parametreler en kötü değerlere sahiptir. Gerçek çalışma koşullarında yaşlandırma önemli parametre olmasına rağmen, buna sebep olan çevresel etkilerden sıcaklık ve nem etkisinin incelenmesi daha önemlidir.

100 °C sıcaklık seviyesinden itibaren trafo yalıtım sıvılarının yaşlanma evresine geçtiği bilinmektedir. Doğal ester sıvının 90°C, 140°C ve 160°C sıcaklıklarda nitrojen gazı ortamında 100, 200 ve 300 saat yaşlandırılmasından sonra AC ve DC yüksek gerilim altında incelendiği bir çalışmada [60], delinme gerilimi, kısmi deşarj başlangıcı ve desenleri analiz edilmiştir. Daha uzun süre daha yüksek sıcaklıklara maruz bırakılma durumunda en kötü dielektrik performansının elde edildiği belirtilmiştir. İlgili çalışma her ne kadar çevresel parametrelerden sıcaklığın etkisini incelemiş olsa da yaşlandırma ortamı ve süresi yağın yapısını bozacak

düzeydedir. Dolayısıyla dielektrik sıvının yapısının bozulmadan ve daha erken deşarj karakteristiğinin incelenmesi karşılaştırma açısından daha doğru olacaktır. Bu tez çalışmasında 3 farklı dielektrik sıvı maksimum 60 °C sıcaklık seviyesine kadar ısıtılmış ve kimyasal yapısının bozulmaması sağlanmıştır. Nitekim, yapılan FTIR analizlerinde de her üç yalıtım sıvısının kimyasal bağlarını uygulanan sıcaklık değerlerinde koruduğu ortaya konmuştur.

Transformatör yalıtım sıvısının hem içeriğinde hem de çevresindeki nem seviyesi yalıtım performansını ciddi oranlarda etkilemektedir. Yüksek enerjili deşarjlar sırasında yağ içerisinde oluşan hava kabarcıklarının düşük sıcaklıklarda sıvılaşmasıyla su içerik değeri artmaktadır. Ayrıca çevre nem seviyesi yüksek olduğunda yağ içerisine nüfuz ederek yalıtım sıvısının nem içeriğini arttırmaktadır. Araştırmacılar genelde yağ içerisindeki nem miktarının etkisini incelemiş ve çevresel ortamdaki yoğun nem seviyesini dikkate almamışlardır [61,62]. Trafo yağı içerisindeki su içeriği miktarı ne kadar yüksek olursa deşarjların daha yüksek enerjili ve dayanımın daha da düşük olması doğal olarak beklenmektedir. Ancak bu bir sonuçtur ve nedenlerinin iyice araştırılması gerekmektedir. Böylece dielektrik sıvı bozulmaya uğramadan yalıtım performansı incelendikten sonra daha doğru bir analiz yapılabilecektir. Bu tez çalışmasında motivasyon noktalarından birisi de değişken yüzdelerdeki ortam neminin yağı tam anlamıyla yaşlandırmadan önce erken deşarj durumlarını saptamak ve doğru yalıtım sıvısını seçmektir. Bu amaçla detayları daha önceki bölümlerde genişçe verilen deneysel çalışmalar ve analizler (hızlı kurtogram) yapılmıştır.

Deneyler sırasında elde edilen kaçak akım sinyallerinin hızlı kurtogram yöntemiyle işlenmesi sayesinde deşarjların bant genişliği ve frekansı hakkında detaylı bilgiler elde edilmiştir. Buna göre mineral yağının sıcaklığının artmasıyla deşarjların daha yüksek frekanslarda ölçüldüğü gözlenmektedir. Çevresel parametrelerden olan sıcaklığın artışı daha yüksek frekans seviyelerinde görülen kısmi deşarjlara sebebiyet vermiştir. Ayrıca deşarjlar daha geniş bir bant aralığında ölçülmüştür. Deneyler sırasında artan elektrot açıklığıyla birlikte özellikle yüksek sıcaklıklarda (45 °C -60 °C) deşarjlar daha stabil bir şekilde benzer bant genişliği aralığına sahiptirler. Ancak bu durum deşarjların görüldüğü frekanslarda tam tersidir. Yüksek sıcaklık değerlerinde yüksek frekans değerlerinde deşarjlar görülmüştür. Bu durum kısmi deşarjların stabilitesinin bozulduğunu göstermektedir.

Doğal ester sıvının artan sıcaklıklarda daha dar bir bant genişliğinde delinme mekanizmasına sahip olduğu ölçülmüştür. Bu durum mineral yağda gözlenen davranışın tam tersidir. Organik

yapıda olan bu ester sıvıda deşarjların başladığı andan delinme gerçekleşene kadar geçen sürenin daha kısa olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda mineral yağın aksine delinmenin meydana geldiği frekans değerleri daha stabil bir davranış göstermiştir. Artan elektrot açıklığı ve sıcaklıkla birlikte kmaks. değerlerinin kararsızlığı artmaktadır. Bu durumda genel olarak bir artış veya düşüş davranışı ortaya konmamıştır. Böyle bir sonuç yalıtım sıvısının organik bazlı olmasından kaynaklanmaktadır. Çok düşük enerjili deşarjlardan sonra doğal esterlin toparlanması ve orijinal durumuna dönmesi mineral yağa ve sentetik ester sıvıya göre daha zordur. Dolayısıyla yapılan deneylerin ve alınan ölçümlerin metodolojisinin ne kadar doğru olduğu ortaya çıkmaktadır. Böyle bir doğal yalıtım sıvısının deşarj seviyelerinin sentetik ester sıvıya göre elbette daha yüksek olması beklenir. Buna rağmen mineral yağ ile doğru bir karşılaştırma yapabilmek için doğru bir proses ve ölçüm metodolojisi izlenmelidir. Delinme gerilimlerinin tek başına değerlendirilmesi deşarjların karakteristiğine dair bilgi veremez. Artan sıcaklıkla, uygulanan hızlı kurtogram yöntemi sayesinde doğal ester sıvının kmaks. seviyelerinin mineral yağa nispeten daha yüksek çıktığı görülmektedir. Organik tabanlı dielektrik sıvılarda fiziksel olarak gözle görülmesi imkânsız olan deşarjın bozucu etkisinin daha yüksek ölçülmesi literatüre çok önemli bir katkı sağlamaktadır. Sentetik ester sıvıda ölçülen kurtogram değerlerinin (B_w ve f_c) neredeyse tüm sıcaklıklarda mineral yağa ve doğal ester sıvıya göre kendi içinde daha kararlı bir davranış gösterdiği ortaya konmuştur. Özellikle AC gerilim altında dielektrik dayanımı yüksek olan sentetik ester sıvının bu özelliğinin hızlı kurtogram yoluyla farklı sıcaklıklarda gözlenmesi bu tez çalışmasının en önemli çıktılarından birisidir.

Dielektrik sıvıların kimyasal bağ yapıları ve diğer özellikleri birbirlerinden farklı olmasına karşın bazı sıcaklık değerlerinde benzer deşarj karakteristiklerine sahip oldukları bu çalışma ile gözlenmiştir. 60 °C sıcaklık değerinde 1 mm, 3 mm ve 5 mm elektrot açıklıklarında mineral yağ ve sentetik ester sıvı deşarjları aynı bant genişliği ve frekans değerlerine sahiptirler. Bu durum belli bir sıcaklık değerinden sonra dielektrik sıvıların benzer şekilde yaşlandığının bir göstergesi olarak söylenebilir. Ancak her yalıtım sıvısı kendi içerisinde değerlendirilmelidir. Örneğin, 40 °C- 45 °C sıcaklıklarda doğal ester sıvıda genel olarak daha düzensiz ve hızlı deşarjların olduğu kurtogram verileriyle ortaya konmuştur.

Dielektrik sıvı içerisinde nem/su içeriğinin artmasıyla yalıtım dayanımının düşeceği bilinmektedir. Ancak bu tip etkiler genelde yağ içerisinde yaşlandırma metodu ile nem/su içeriğinin arttırılmasına dayanmaktadır. Literatürde yaygın olanın aksine bu tez çalışmasında

ortamda belirli bir yüzdede sabit nem seviyesinde üç farklı dielektrik sıvının elektriksel deşarjları incelenmiştir. Bu şekilde delinmeye neden olan prosesleri daha erken fazda analiz etme imkânı kullanılan hızlı kurtogram yöntemi ile sağlanmıştır. Buna göre, mineral yağın çevresindeki nem miktarının artmasıyla meydana gelen deşarjlar daha geniş bir frekans bandında gerçekleşmiştir. Mineral yağ, dielektrik dayanımını olumsuz yönde etkileyen artan ortam nemine karşı direnmeye çalışsa da git gide daha yüksek frekans değerlerinde deşarjlar gözlenmiştir. Ayrıca, artan nem ile birlikte yağın stabil durumu etkilenmiş ve elde edilen kmaks. değerlerinde karasızlıklar gözlenmiştir.

Organik yapıda olan doğal ester sıvının bulunduğu test odasında nem seviyesinin artması bant genişliğinde majör değişikliklere neden olmamıştır. Ayrıca, elektrot açıklığı arttıkça Bw 5500 Hz civarında stabil bir davranış göstermektedir. Benzer bir durum deşarjların gerçekleştiği frekans değerinde de gözlenmiştir. Gerek elektrot açıklığı gerek ortamın nem seviyesinin arttığı durumlarda deşarjlar genelde 8 kHz frekans değerlerinde gerçekleşmiştir. Değişken nem seviyelerinde organik yapıda olan doğal ester sıvının mineral yağa göre daha stabil oluşu bu tez çalışmasında ortaya konan en önemli sonuçlardan biridir. AC gerilim stresi altında en dayanıklı olan sentetik ester sıvının deşarjları artan nem seviyesinde benzer karakterlere sahiptirler. Buna göre, elektriksel boşalmalar genelde 4 kHz- 6 kHz bant genişliğinde ve 6 kHz- 9 kHz frekans seviyelerinde ölçülmüştür. Buna rağmen, nem ve elektrot açıklığının artması deşarjların kurtogram seviye değerlerini arttırmıştır. Daha yüksek seviyede elektriksel boşalmalar görülmesine rağmen frekans domeninde stabil yapı bu sıvının yüksek dielektrik performansını ortaya koymaktadır.

Düşük nem seviyelerinde (özellikle %40) artan elektrot açıklıklarında doğal ester ve mineral yağın aksine sentetik ester sıvı, düşüş eğilimi gösteren kmaks. değerlerine sahiptir. Nem seviyesi arttıkça sentetik ester sıvının kmaks. stabilitesi ve nispeten lineer davranışı bozulmaktadır. Deşarj seviyelerinin yükselmesi bu duruma neden olan en önemli etkidir. %80, %85 ve %90 gibi çok yüksek seviyeli nem ortamında mineral yağdaki deşarjlar daha yüksek frekans seviyelerinde gözlenmiştir. Artan nem ile birlikte meydana gelen düşük enerjili deşarjlardan sonra yağ kendi orijinal durumuna geri dönmeye çalışsa da elektriksel kısmi boşalmaların görüldüğü yüksek frekanslarda yalıtımın bozulduğu anlaşılmaktadır.

Çevresel etkileri incelemek için farklı sıcaklık ve nem ortamında yapılan deneyler, bir yağın iç yapısında nüfuz eden bozucu etkinin yalıtım performansını olumsuz anlamda daha çok

etkilediğini ortaya koymuştur. Güç transformatörleirnde en yaygın olarak kullanılan üç farklı dielektrik sıvının içerisindeki sıcaklığın artması elektriksel boşalmaların farklı karakterde olmasına sebebiyet vermiştir. Elbette bu etki, farklı nem ortamlarında yapılan ölçümlerin hızlı kurtogram yöntemiyle değerlendirilmesi sonucu da gözlenmiştir. Yapılan FTIR analizinde değişken nem koşullarında alınan dielektrik sıvı örneklerinin kimyasal yapılarında bozulmaların görülmemesi de bu durumu ortaya koymuştur. Ancak, ortamdaki nem etkisi sıvı içerisindeki değişimi daha uzun sürelerde etkileyecektir. Klasik yöntemlerle elektriksel deşarj analizi yapmak bu durumda yeterli değildir. Buna rağmen, kısa süreler boyunca ortamdaki nem seviyesinin artması deşarj karakteristiğini değiştirmeye yetmiştir. Bu durum uygulanan hızlı kurtogram metodunun doğruluğunu da kanıtlamaktadır. Bu tez çalışmasının motivasyonlarında biri de çevresel etkilerin yağın yaşlanma derecesini ciddi şekilde arttırmayacak kadar kısa sürelerde bile elektriksel deşarj karakteristiğini önemli ölçüde değiştirebildiğinin ortaya konmasıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada trafolar da en çok kullanılan 3 çeşit trafo dielektrik sıvısına ait delinme geriliminin çevresel faktörlere karşı ne gibi cevaplar verdiğinin incelemesi yapılmıştır. Seçilen çevresel faktörler trafo yağlarının delinme gerilimini ve dielektrik dayanımını en çok etkileyen sıcaklık ve nemdir. Bu iki parametrenin trafo yağları üzerine etkisi diğer çevresel parametreleri de tetiklemektedir. Trafo yağlarında yağın hacimce genişmesi yağın içindeki moleküllerin değişmesine neden olmaktadır. Bu da yağın asidite oranının artmasına neden olur. Yağın içindeki asit oranının yükselmesi sonucunda ise yağın trafo içindeki bakır ve alüminyum saç plakalarına zarar vererek bu parçaların aşınmasına neden olmaktadır. Bu durum sonucunda trafo yağı çamurlaşır ve yağda bulunan çamurlaşma ve yabancı maddelerin artması sonucu yağın yaşlanması hızlanır. Sonuçta yağın delinme gerilimi düşer. Yağı bozan diğer parametreler de bu nedenle yağın sıcaklık artışından etkilenmektedir. Bu nedenle trafo yağlarının çevresel çalışma sıcaklığı olan 20 °C ile 60 °C arasında delinme gerilimine olan cevapları incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda yağın her 5 °C’ de delinme gerilimi cevabı alınmış ve farklı sıvı dielektrik tipleri arasında karşılaştırılmıştır. Delinme gerilimleri incelendiğinde mineral yağ için delinme gerilimleri 12,878 kV’ dan başlarken, doğal ester sıvıda 11,508 kV olarak ölçülmüş, sentetik ester sıvı da ise en düşük delinme gerilimin 10,275 kV olduğu görülmüştür. En düşük delinme gerilimleri 3 farklı dielektrik sıvı içinde 1 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde elde edilmiştir. Mineral yağ için en düşük delinme gerilimi 20 °C’ de ölçülürken, doğal ester sıvı da en düşük delinme gerilimi 35 °C’ de ölçülmüş, sentetik ester sıvı da ise 45 °C’ de bu değer bulunmuştur. Yapılan deneylerde en düşük delinme gerilimleri en iyi sonucu mineral yağın verdiği görülürken, en yüksek delinme gerilimleri incelendiğinde mineral yağ için 5 mm elektrot açıklığında 30 °C’ de yapılan deneyde delinme gerilimi 30,962 kV olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda mineral yağda 55 °C’ de yapılan 3 mm ve 5 mm elektrot açıklıklarında ve 50 °C’ de 4 mm elektrot açıklığında yapılan delinme gerilimi deneylerinde delinme meydana gelmemiştir. Doğal ester sıvının delinme gerilimi deneyleri incelendiğinde en yüksek delinme geriliminin 20 °C’ de 5 mm elektrot açıklığında 28,907 kV ile ölçüldüğü görülmüş ve sentetik eser sıvıda da 20 °C’ de 5 mm elektrot açıklığında yapılan deneylerde delinme gerilimin 30,14 kV olarak ölçülmüştür. Buradan hareketle delinme gerilimlerinde yine en iyi sonucu verenin mineral yağ olduğu söylenebilir. Daha sonra ise sentetik ester sıvı

gelmektedir. Özellikle düşük sıcaklıklarda delinme gerilimi dayanımı sentetik ester sıvıda diğer dielektrik sıvılara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Fakat sıcaklık arttıkça mineral yağ, delinme gerilimine dayanım konusunda üstünlük göstermektedir.

Ayrıca farklı tipte yağlar kullanılarak gerçekleştirilen elektriksel zorlanma deneylerinde delinme gerçekleşmeden önceki 20 döngü sayısı alınarak kurtogram yöntemi işlenmiştir. İlgili verilerin işlenmesi sonucunda delinme gerilimleri ile beraber oluşan alt frekanslar da elde edilmiştir. Kurtogram sonuçları da karşılaştırılarak frekans domeninde sonuçlara göre yağların delinme gerilimine karşı verdiği cevaplar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Delinme durumunda belirli bir frekans bandında kurtogram grafiklerinde değişim görülmektedir.

Deney düzeneği değiştirilerek bir diğer çevresel parametre olan nemin trafo yağlarının delinme gerilimine olan etkisi incelenmiştir. Trafo yağlarında nemin artması yağ içinde bulunan suyun artmasına neden olmaktadır. Trafo yağı içerisinde bir miktar çözünmüş su bulunmaktadır. Yüksek nem oranı ile bu çözünme artarak trafo yağının yalıtım etkisini azaltmaktadır. Trafo yağının yalıtımı azaldıkça delinme gerilimi de düşmektedir. Yapılan deneylerde ortam neminin oranının delinme gerilimi üzerine etkisinin incelenmesi %40' dan başlamış ve en yüksek nem seviyesi olan %95' de bitirilmiştir. Delinme gerilimi deneylerinde trafo yağlarının sıcaklık değerleri oda sıcaklığı olan 24 °C' de yapılmıştır. Trafo yağlarının nem deneylerinde elde edilen delinme gerilimi verileri de yine kurtogram yöntemi ile işlenmiştir. Kurtogram yönteminden elde edilen veriler ışığında yağların delinme gerilimine verdiği cevaplar alınarak sonuçlardan, yağın delinme gerilimine olan etkisi gösterilmiştir. Elektrot açıklığı arttıkça delinme gerilimi değerleri incelendiğin mineral yağların üstünlüğünün diğer yağlara oranla nem etkisi altında daha yüksek olduğu görülmüştür. 5 mm elektrot açıklıklarında özellikle %50, %55, %60, %65, %70, %75, %85, %90 %95 nem seviyelerinde yapılan deneylerde mineral yağın delinme gerilimleri diğer iki dielektrik sıvıdan daha yüksek çıkmıştır. %80 nem oranında yapılan deneyde ise doğal ester sıvısının diğer iki dielektrik sıvıya göre daha yüksek bir delinme gerilimine sahip olduğu görülmüştür. Delinme gerilimi deneylerinde mineral yağlar için delinme gerilimleri 30,962 kV seviyelerine çıkarken doğal ester sıvı için bu değerler 27,126 kV seviyesini geçememiştir. Sentetik ester de ise 30,14 kV delinme gerilimi değeri ile mineral yağın delinme gerilimlerine yaklaştığı görülse de diğer delinme gerilimi deneyleri incelendiğinde 26,167 kV' u geçmediği görülmektedir.

Delinme gerilimi sırasında elektriksel olarak boşalmalar meydana gelmekte ve belirli frekanslarda yüksek enerji yoğunlukları oluşmaktadır. Trafo yağlarının delinme gerilimine ait verilerin kurtogram yöntemi ile işlenmesi bu alanda ilk defa kullanılmıştır. Trafo yağlarının delinme esnasında oluşan frekans cevabı bazında incelenmesi ve trafo yağlarının birbirine olan üstünlüklerinin bu çerçevede incelenmesine olanak sağlanmıştır. Kurtogram analizleri elektrik sistemlerinde güvenli çalışmanın yanı sıra verimli çalışmanın da sağlanması bakımından kritik öneme sahiptir. Bu yöntem ile delinme gerilimi durumunun frekans analizleri yapılmış ve erken uyarı sistemleri ile arızanın tespiti için güçlü bir araç ortaya konmuştur.



KAYNAKLAR

- [1] CIGRE Working Group A2.37. (2015). "Transformer Reliability Survey,".
- [2] Y. Z. Yang Ghazali, M. A. Talib, and A. Maria Soosai. "TNB approach on managing asset retirement for distribution transformers." In 23rd International Conference on Electricity Distribution, 2015, no. June, pp. 1–5.
- [3] Ab Ghani, S., Bakar, N. A., Chairul, I. S., Khair, M. S. A., & Ab Aziz, N. H. (2019). Effects of Moisture Content and Temperature on the Dielectric Strength of Transformer Insulating Oil. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 63(1), 107-116..
- [4] Krause, Christoph. "Power transformer insulation—history, technology and design." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 19, no. 6 (2012): 1941-1947.
- [5] Nynas Naphthenics, A. B. "Base oil handbook." (2001).
- [6] Wada, Junichi, Genyo Ueta, Shigemitsu Okabe, and Tsuyoshi Amimoto. "Method to evaluate the degradation condition of transformer insulating oil-establishment of the evaluation method and application to field transformer oil." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 22, no. 2 (2015): 1266-1274.
- [7] CODE, PRICE. *Fluids for electrotechnical applications—Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear*. 2003.
- [8] ASTM, D. "3487, D3487 Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus." United States: American Society for Testing and Materials (2009).
- [9] Hadjadj, Y., I. Fofana, John Sabau, and Eduardo Brioso. "Assessing insulating oil degradation by means of turbidity and UV/VIS spectrophotometry measurements." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 22, no. 5 (2015): 2653-2660.

- [10] Butcher, M., Neuber, A. A., Cevallos, M. D., Dickens, J. C., & Krompholz, H. (2006). Conduction and breakdown mechanisms in transformer oil. *IEEE transactions on plasma science*, 34(2), 467-475.
- [11] Ghani, S. A., Muhamad, N. A., Chairul, I. S., & Jamri, N. (2016). A study of moisture effects on the breakdown voltage and spectral characteristics of mineral and palm oil-based insulation oils. *ARPN J. Eng. Appl. Sci*, 11(8), 5012-5020.
- [12] Kasahara, Y., Kato, M., Watanabe, S., Iwahashi, M., Wakamatsu, R., Suzuki, T., ... & Tamura, T. (2012). Consideration on the relationship between dielectric breakdown voltage and water content in fatty acid esters. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89(7), 1223-1229.
- [13] Suleiman, A. A., Muhamad, N. A., Bashir, N., Murad, N. S., Arief, Y. Z., & Phung, B. T. (2014). Effect of moisture on breakdown voltage and structure of palm based insulation oils. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21(5), 2119-2126.
- [14] OECD: Principles and strategies related to the testing of degradation of organic chemicals. <http://www.oecd.org/chemicalsafety/testing/5598432.pdf>. Erişim Tarihi: 18/04/2024
- [15] Warren L. Transformers-oil sampling—the comprehensive transformer health test. 2010. <http://www.electricalreview.co.uk/features/6760-118924>. 8. Warren L. Transformers-oil sampling—the comprehensive transformer health test. 2010. <http://www.electricalreview.co.uk/features/6760-118924>.
- [16] Rafiq, M., Lv, Y. Z., Zhou, Y., Ma, K. B., Wang, W., Li, C. R., & Wang, Q. (2015). Use of vegetable oils as transformer oils—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 308-324.
- [17] Baka, N. A., Abu-Siada, A., Islam, S., & El-Naggar, M. F. (2015). A new technique to measure interfacial tension of transformer oil using UV-Vis spectroscopy. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(2), 1275-1282.
- [18] Jeong, J. I., An, J. S., & Huh, C. S. (2012). Accelerated aging effects of mineral and vegetable transformer oils on medium voltage power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19(1), 156-161.

- [19] Abeysundara, D. C., Weerakoon, C., Lucas, J. R., Gunatunga, K. A. I., & Obadage, K. C. (2001, November). Coconut oil as an alternative to transformer oil. In ERU Symposium (Vol. 1, pp. 1-11).
- [20] Cargol, T. (2005, November). An overview of online oil monitoring technologies. In Fourth Annual Weidmann-ACTI Technical Conference (pp. 1-6).
- [21] Shukla, P., Sood, Y. R., & Jarial, R. K. (2013). Experimental evaluation of water content in transformer oil. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(1), 284-291.
- [22] Standard, I. E. C. (2013). Mineral insulating oils in electrical equipment—supervision and maintenance guidance. BS EN, 60422.
- [23] IEEE Std C57.106 International standard. IEEE guide for acceptance and maintenance of insulating oil in equipment, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006.
- [24] <http://prodel.com.tr/nytro-lyra-x-oksidasyon-stabilitesi>. Erişim Tarihi: 20/04/2024
- [25] <http://prodel.com.tr/nytro-lyra-x-trafo-yaginin-delinme-gerilimi/> Erişim Tarihi: 20/04/2024
- [26] Sun, J., Wang, K., Liu, X., & Wang, J. (2020, September). Experimental research on oil-paper insulation performance within wide temperature band. In 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE) (pp. 1-4). IEEE.
- [27] Abd-Elhady, A. M., Ibrahim, M. E., Taha, T. A., & Izzularab, M. A. (2018). Effect of temperature on AC breakdown voltage of nanofilled transformer oil. *IET Science, Measurement & Technology*, 12(1), 138-144.
- [28]. Saha, T. K., & Purkait, P. (2007). Investigations of temperature effects on the dielectric response measurements of transformer oil-paper insulation system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(1), 252-260.
- [29] Abeysundara, D. C., Weerakoon, C., Lucas, J. R., Gunatunga, K. A. I., & Obadage, K. C. (2001, November). Coconut oil as an alternative to transformer oil. In ERU symposium (Vol. 1, pp. 1-11)

- [30] Buerschaper, B., Kleboth-Lugova, O., & Leibfried, T. (2003, October). The electrical strength of transformer oil in a transformerboard-oil system during moisture non-equilibrium. In 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (pp. 269-272). IEEE.
- [31] Wang, X. (2011). Partial discharge behaviours and breakdown mechanisms of ester transformer liquids under ac stress. The University of Manchester (United Kingdom).
- [32] Martin, D., & Wang, Z. D. (2008). Statistical analysis of the AC breakdown voltages of ester based transformer oils. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15(4), 1044-1050.
- [33] Ciuriuc, A., Vihacencu, M. S., Dumitran, L. M., & Notingher, P. V. (2012, October). Comparative study on power transformers vegetable and mineral oil ageing. In 2012 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE) (pp. 1-6). IEEE
- [34] Oommen, T. V. (2002). Vegetable oils for liquid-filled transformers. *IEEE Electrical insulation magazine*, 18(1), 6-11.
- [35] Hamid, M. H. A., et al. "Dielectric properties of natural ester oils used for transformer application under temperature variation." 2016 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon). IEEE, 2016.
- [36] Darma, I. S. (2008, September). Dielectric properties of mixtures between mineral oil and natural ester. In 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2008) (pp. 514-517). IEEE.
- [37] Li, X., Li, J., & Sun, C. (2006, March). Properties of transgenic rapeseed oil based dielectric liquid. In *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2006* (pp. 81-84). IEEE.
- [38] Naidu, M. S., & Kamaraju, V. (1996). High voltage engineering
- [39] Envirotemp, F. R. (2004). Envirotemp FR3 Fluid Testing Guide. Cooper Industries Inc.
- [40] Zbojovský, J., Pavlík, M., Cimbala, R., & Petráš, J. (2023, October). Influence of Temperature and Humidity on the Electrical Strength of Oil-Paper Insulation. In 2023 IEEE 6th

International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE) (pp. 000077-000082). IEEE.

[41] Gao, M., Li, G., Li, J., & Zhao, Z. (2011, September). The temperature dependence of insulation characteristics of transformer oil at low dtemperatures. In 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference (Vol. 2, pp. 27-30). IEEE.

[42] Degeratu, S., Rotaru, P., Rizescu, S., Danoiu, S., Bizdoaca, N. G., Alboteanu, L. I., & Manolea, H. O. (2015). Condition monitoring of transformer oil using thermal analysis and other techniques. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 119, 1679-1692.

[43] Mohammed, H. J., Kaittan, A. S., Gainullina, L. R., & Jaber, A. I. (2024, January). Effective Temperature on the Electric Breakdown of Transformer Oil. In 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon) (pp. 594-598). IEEE.

[44] Okundamiya, M. S., Esekhaigbe, E., Owa, J. L., & Obakhena, H. I. (2021). Impacts of Ambient Temperature Change on the Breakdown Voltage of a Distribution Transformer. *International Journal of Emerging Scientific Research*, 2, 19-25.

[45] Koch, M., & Prevost, T. (2012). Analysis of dielectric response measurements for condition assessment of oil-paper transformer insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19(6), 1908-1915.

[46] Pradhan, A. K., Chatterjee, B., & Chakravorti, S. (2015). Estimation of paper moisture content based on dielectric dissipation factor of oil-paper insulation under non-sinusoidal excitations. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(2), 822-830.

[47] Kumar, A., Verma, H. C., Baral, A., Pradhan, A. K., & Chakravorti, S. (2018). Estimation of paper-moisture in transformer insulation employing dielectric spectroscopy data. *IET Science, Measurement & Technology*, 12(4), 536-541.

[48] Baral, A., & Chakravorti, S. (2014). Prediction of moisture present in cellulosic part of power transformer insulation using transfer function of modified Debye model. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21(3), 1368-1375.

- [49] Hernandez, R., Lachman, M., Griffin, P., & Lewand, L. (2015). Impact of aging by-products on moisture estimation in transformers using dielectric response measurements. *IEEE Latin America Transactions*, 13(2), 469-475.
- [50] Ghosh, P., Chakraborty, B., Chatterjee, B., Dalai, S., & Chatterjee, S. (2024). An Advanced Technique for Investigating the Moisture Effect on Next Generation Transformer Insulation Using Lightning Impulse Parameters. *IEEE Transactions on Plasma Science*.
- [51] Kierczynski, K., Zenker, M., & Korenciak, D. (2022, May). Activation energy of DC conductivity of high moisture content electrical pressboard impregnated with mineral oil of natural origin NYNAS NYTRO BIO300X. In *2022 ELEKTRO (ELEKTRO)* (pp. 1-4). IEEE.
- [52] Soni, R., & Mehta, B. (2023). A review on transformer condition monitoring with critical investigation of mineral oil and alternate dielectric fluids. *Electric Power Systems Research*, 214, 108954.
- [53] Atalar, F., Ersoy, A., & Rozga, P. (2023). Experimental investigation of the effect of nano particles on the breakdown strength of transformer liquids by harmonic current analysis. *Electric Power Systems Research*, 221, 109390.
- [54] Xu, Y., Tian, W., Zhang, K., & Ma, C. (2019). Application of an enhanced fast kurtogram based on empirical wavelet transform for bearing fault diagnosis. *Measurement Science and Technology*, 30(3), 035001.
- [55] Xiang, J., Zhong, Y., & Gao, H. (2015). Rolling element bearing fault detection using PPCA and spectral kurtosis. *Measurement*, 75, 180-191.
- [56] Antoni, J. (2007). Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults. *Mechanical systems and signal processing*, 21(1), 108-124.
- [57] Elele, U., Nekahi, A., Arshad, A., & Fofana, I. (2022). Towards online ageing detection in transformer oil: A review. *Sensors*, 22(20), 7923.
- [58] Bryakin, I. V., Bochkarev, I. V., Khrumshin, V. R., Gasiyarov, V. R., & Liubimov, I. V. (2022). Power transformer condition monitoring based on evaluating oil properties. *Machines*, 10(8), 630.

- [59] Sai, R. S., Rafi, J., Farook, S., Kumar, N. M. G., Parthasarathy, M., & Bakkiyaraj, R. A. (2020, December). Degradation studies of electrical, physical and chemical properties of aged transformer oil. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1706, No. 1, p. 012056). IOP Publishing.
- [60] Amalanathan, A. J., Sarathi, R., Prakash, S., Mishra, A. K., Gautam, R., & Vinu, R. (2020). Investigation on thermally aged natural ester oil for real-time monitoring and analysis of transformer insulation. *High Voltage*, 5(2), 209-217.
- [61] Liu, J., Wang, Q., Fan, X., Zhang, Y., & Goh, H. H. (2022). Effects of temperature gradient induced aging and moisture distribution on dielectric response measurement for transformer insulation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-10.
- [62] Kierczynski, K., Rogalski, P., Bondariev, V., Okal, P., & Korenciak, D. (2022). Research on the Influence of Moisture Exchange between Oil and Cellulose on the Electrical Parameters of the Insulating Oil in Power Transformers. *Energies*, 15(20), 7681.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

Alper AYDOĞAN

ORJİNALLIK RAPORU

% **7**

BENZERLİK ENDEKSİ

% **7**

İNTERNET KAYNAKLARI

% **1**

YAYINLAR

% **5**

ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1

www.nanoscience.gatech.edu

İnternet Kaynağı

% **5**

2

Submitted to The Scientific & Technological
Research Council of Turkey (TUBITAK)

Öğrenci Ödevi

% **1**

3

acikbilim.yok.gov.tr

İnternet Kaynağı

<% **1**

4

ppgcta.propesp.ufpa.br

İnternet Kaynağı

<% **1**

5

hgxb.cip.com.cn

İnternet Kaynağı

<% **1**

6

www.fuuasteed.yolasite.com

İnternet Kaynağı

<% **1**

7

www.slideshare.net

İnternet Kaynağı

<% **1**

8

patents.google.com

İnternet Kaynağı

<% **1**

9

Yalçinkaya, Çağlar. "Yüksek performanslı
çimentolu kompozitlerin erken ve ilerlemiş

<% **1**

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

- ☐ Etik Kurul izni gerekmektedir.
- ☒ Etik Kurul izni gerekmemektedir.

Alper AYDOĞAN
(İmza)



KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

- ☐ Kurum izni gerekmektedir.
- ☒ Kurum izni gerekmemektedir.

Alper AYDOĞAN
(İmza)



ÖZGEÇMİŞ

