

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MUZ TİPİ SIVI KRİSTALLERİN FAZ GEÇİŞİ  
PARAMETRELERİNİN DİELEKTRİK SPEKTROSKOPİ YÖNTEMİ  
İLE KARAKTERİZASYONU

**Hasret KARA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Danışman

Doç. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

Şubat, 2022

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MUZ TİPİ SIVI KRİSTALLERİN FAZ GEÇİŞİ PARAMETRELERİNİN**  
**DİELEKTRİK SPEKTROSKOPİ YÖNTEMİ İLE KARAKTERİZASYONU**

Hasret KARA tarafından hazırlanan tez çalışması 10.02.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Nimet YILMAZ CANLI  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Nimet YILMAZ CANLI, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Macide CANTÜRK RODOP, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Bahire Filiz ŞENKAL, Üye  
İstanbul Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Danışmanım Doç. Dr. Nimet YILMAZ CANLI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Muz Tipi Sıvı Kristallerin Faz Geçişi Parametrelerinin Dielektrik Spektroskopi Yöntemi İle Karakterizasyonu” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hasret KARA

İmza



*Aileme*  
*ve*  
*tüm sevdiklerime*

## TEŞEKKÜR

---

Yüksek lisans çalışmalarımı sunduğum bu tezde, ilk olarak her zaman yanımda olan, çalışmalarım boyunca desteğini hiç esirgemeyen kıymetli hocam Doç. Dr. Nimet Yılmaz CANLI' ya tüm içten samimiyetimle teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarına sundukları katkılar için, Prof. Dr. Belkız BİLGİN ERAN' a, Prof. Dr. Hale OCAK' a teşekkür ederim.

Son olarak, beni bugünlere getiren ve hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen kıymetli aileme ve her zaman yanımda olan, başta Arş. Gör. Emre BEYAZAY olmak üzere tüm dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hasret KARA

<b>SİMGE LİSTESİ</b>	viii
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	x
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	xi
<b>TABLO LİSTESİ</b>	xiii
<b>ÖZET</b>	xiv
<b>ABSTRACT</b>	xvi
<b>1 GİRİŞ</b>	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	2
1.3 Hipotez.....	3
<b>2 SIVI KRİSTALLER</b>	4
2.1 Kısa Tarihçe.....	4
2.2 Sıvı Kristal Özellikleri ve Sınıflandırılması.....	5
2.2.1 Liyotropik Sıvı Kristaller .....	6
2.2.2 Termotropik Sıvı Kristaller .....	6
2.3 Sıvı Kristallerin Molekül Geometrileri ve Sınıflandırılması.....	7
2.3.1 Kalamitik (çubuk şekilli) Mezogenler .....	7
2.3.2 Diskotik (disk şekilli) Sıvı Kristaller .....	9
2.3.3 Bent Core (muz şekilli) Sıvı Kristaller .....	9
2.4 Sıvı Kristallerin Fiziksel Özellikleri.....	10
2.4.1 Optiksel Özellikleri .....	10
2.4.2 Manyetik ve Elektriksel Özellikleri.....	10
2.4.3 Dielektrik Özellikleri.....	11
2.5 Sıvı Kristallere Ait Tekstürler.....	11
<b>3 DİELEKTRİK ÖZELLİKLER</b>	13

3.1	Dielektrikler .....	13
3.2	Kutuplanma (Polarizasyon).....	13
3.2.1	Kutuplanma Çeşitleri .....	15
3.3	Kompleks Dielektrik Sabiti.....	16
3.4	Debye Modeli .....	17
3.5	Cole-Cole Modeli.....	17
<b>4</b>	<b>MATERYALLER VE YÖNTEMLER</b>	<b>19</b>
4.1	İncelenen Sıvı Kristallerin Sentezi ve Karakterizasyonu .....	19
4.1.1	DDB ve DOB Bileşiklerinin Sentezi .....	20
4.1.2	3'-{4-[4-((S)-3,7-dimethyloctyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}-4-{4-[4-(octyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}biphenyl (DOB) .....	20
4.1.3	3'-{4-[4-((S)-3,7-Dimethyloctyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}-4-{4-[4-(Decyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}biphenyl (DDB).....	20
4.2	DDB ve DOB Bileşiklerinin Mezomorfik Özellikleri.....	21
4.3	Sıvı Kristal Hücrelerin Hazırlanması .....	22
4.4	Deney Düzenegi .....	24
<b>5</b>	<b>DENEYSEL SONUÇLAR</b>	<b>25</b>
5.1	DDB ve DOB Sıvı Kristallerin Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi.....	25
5.1.1	DDB ve DOB Sıvı Kristal Bileşiklerin Dielektrik Parametrelerindeki Değişimler.....	25
5.1.2	DDB ve DOB' nin Arrhenius Çizim Analizi .....	33
5.1.3	DDB ve DOB Sıvı Kristallerin İletkenliğinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi .....	35
<b>6</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER</b>	<b>39</b>
	<b>KAYNAKÇA</b>	<b>40</b>
	<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>	<b>46</b>

## SİMGE LİSTESİ

---

$\alpha$	Absorblama katsayısı
$\omega$	Açısal frekans
$I$	Akım
$E_a$	Aktivasyon enerjisi
$\sigma_{AC}$	Alternatif akım iletkenliği
$\varepsilon$	Bağıl geçirgenlik
$\rho_b$	Bağılı yük yoğunluğu
$k_b$	Boltzman sabiti
$\varepsilon_0$	Boş uzayın elektriksel geçirgenliği
$\mu$	Dipol moment
$\sigma_{DC}$	Doğru akım iletkenliği
$\varepsilon_s$	Düşük frekanslarda dielektrik sabiti
<b>E</b>	Elektrik alan vektörü
$\chi$	Elektriksel duyarlılık
$V$	Elektriksel potansiyel
<b>D</b>	Elektriksel yer değiştirme vektörü
$s$	İletkenlik üssel yasa katsayısı
Iso	İzotropik faz
$W$	İş
$\delta$	Kayıp açısı
$\varepsilon'$	Kompleks dielektrik sabitinin reel kısmı
$\varepsilon''$	Kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmı
Cr	Kristal faz
<b>P</b>	Kutuplanma vektörü
<b>F</b>	Kuvvet vektörü

$f$	Lineer frekans
$\tau$	Relaksasyon zamanı
$\rho_f$	Serbest yük yoğunluğu
SmA	Smektik A fazı
SmC	Smektik C fazı
$\tau$	Tork vektörü
Q	Yük
$\varepsilon_\infty$	Yüksek frekanslarda dielektrik sabiti



## KISALTIMA LİSTESİ

3B	3-boyutlu
AC	Alternatif akım
Ayar. R <sup>2</sup>	Ayarlanmış R <sup>2</sup> değeri
BC	Bükülmüş çekirdek
CBH	İlişkili bariyer boşaltma mekanizması
DC	Doğru akım
DDB	3'-{4-[4-((S)-3,7-dimethyloctyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}-4-{4-[4-(decyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}biphenyl
DOB	3'-{4-[4-((S)-3,7-dimethyloctyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}-4-{4-[4-(octyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}biphenyl
DS	Dielektrik spektrostopisi
DSC	Diferansiyel tarama kalorimetresi
EPA	Genişletilmiş çift yaklaşımı
NCL	Sabit kayıp modeli
PM	Polarizasyon mikroskobu
QMT	Kuantum tünelleme modeli
SLPL	Süper lineer güç yasası

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Sıvı kristal bir maddenin faz geçişleri [42].	5
Şekil 2.2 Sıvı kristalin mezofaz oluşumuna göre sınıflandırılması	6
Şekil 2.3 Bazı kalamitik sıvı kristaller [47].	7
Şekil 2.4 Nematik, smektik A ve smektik C mezofazlarının molekül dizilimleri.	8
Şekil 2.5 Diskotik sıvı kristallerin yapısı [52].	9
Şekil 2.6 Muz şekilli sıvı kristalin genel yapısı.	9
Şekil 2.7 Sıvı kristal tekstür örnekleri [50].	12
Şekil 3.1 Dielektrik kutuplanma [57].	14
Şekil 3.2 Dielektrik polarizasyonun frekans ile değişimi [57].	15
Şekil 3.3 Dielektrik polarizasyonun zaman ile değişimi [57].	16
Şekil 3.4 Dielektrikler için Debye eğrisi [57].	17
Şekil 3.5 Dielektrikler için Cole-Cole eğrisi [57].	18
Şekil 4.1 DDB ve DOB bileşiklerinin sentez şeması.	19
Şekil 4.2 (a, c) DOB ve (b, d) DDB ısıtma ve soğutma süreçlerindeki tekstür görüntüleri.	21
Şekil 4.3 (a) DOB ve (b) DDB sıvı kristallerinin ısıtma ve soğutma DSC grafikleri.	22
Şekil 4.4 Özel sandviç tipli hücre ve kullanılan numune görüntüsü.	22
Şekil 4.5 Kohler bankası.	23
Şekil 4.6 Deney düzeneği.	24
Şekil 5.1 Farklı sıcaklıklarda incelenen (a) DDB ve (b) DOB' 'nin dielektrik sabitinin reel kısımlarının açısıl frekansa bağlılığı.	26
Şekil 5.2 (a) DDB ve (b) DOB için absorpsiyon katsayısının ve relaksasyon süresinin sıcaklığa bağlılığı.	28
Şekil 5.3 Farklı sıcaklıklarda incelenen (a) DDB (b) DOB' nin dielektrik sabitinin sanal kısımlarının açısıl frekansa bağlılığı.	29
Şekil 5.4 (a) DDB ve (b) DOB' nin sıcaklığa bağlı Cole-Cole grafikleri.	30
Şekil 5.5 (a) DDB ve (b) DOB için gerçek dielektrik sabiti ile açısıl frekans ve sıcaklığın 3D çizimleri.	31
Şekil 5.6 Farklı açısıl frekanslar için (a) DDB ve (b) DOB' nin AC iletkenliğinin Arrhenius grafikleri.	34

**Şekil 5.7** Farklı sıcaklıklarda (a) DDB ve (b) DOB için AC iletkenliğinin açısal frekansa bağlılığı. .... 36



## TABLO LİSTESİ

---

<b>Tablo 4.1</b> DOB ve DDB bileşiklerinin faz geçiş sıcaklıkları T (°C) ve entalpi değerleri $\Delta H$ (kJ/mol).....	21
<b>Tablo 5.1</b> Sıcaklığa bağlı olarak DDB için dispersiyon eğrilerinden hesaplanan dielektrik parametreleri.....	32
<b>Tablo 5.2</b> Sıcaklığa bağlı olarak DOB için dispersiyon eğrilerinden hesaplanan dielektrik parametreleri.....	32
<b>Tablo 5.4</b> Farklı sıcaklıklarda DDB için sıcaklık bölgeleri ve aktivasyon enerjileri.....	35
<b>Tablo 5.5</b> Farklı sıcaklıklarda DOB için sıcaklık bölgeleri ve aktivasyon enerjileri.....	35
<b>Tablo 5.6</b> s parametresi ile belirlenen iletkenlik mekanizmaları (CM) [59-66].....	37
<b>Tablo 5.7</b> DDB için farklı frekans bölgeleri ve sıcaklıklar için iletkenlik mekanizmaları. .....	37
<b>Tablo 5.8</b> DOB için farklı frekans bölgeleri ve sıcaklıklar için iletkenlik mekanizmaları. .....	38

## Muz Tipi Sıvı Kristallerin Faz Geçişi Parametrelerinin Dielektrik Spektroskopisi Yöntemi İle Karakterizasyonu

Hasret KARA

Fizik Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

Bu çalışmada, yeni bifenil bazlı bent-core yani bükülmüş çekirdekli bileşiklerin sentezi gerçekleştirilmiştir. Bu bileşikler, 3'-{4-[4-((S)-3,7-dimethyloctyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}-4-{4-[4-(octyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy} biphenyl (**DOB**) ve 3'-{4-[4-((S)-3,7-dimethyloctyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}-4-{4-[4-(decyloxy)benzoyloxy]biphenyl (**DDB**)' dir. Bu kullanılan yeni bükülmüş çekirdekli bileşiklerin mezomorfik özellikleri, polarizasyon mikroskopu ve diferansiyel tarama kalorimetresi kullanılarak incelenmiştir. B<sub>1</sub>mezofazı gösteren her iki mezogenin (**DDB** ve **DOB**) faz geçiş sıcaklıkları belirlendi, dielektrik parametreleri çalışıldı ve sırasıyla 135.04 °C - 62.81 °C ve 141.45 °C - 64.83 °C soğutma sıcaklık aralığında dielektrik spektroskopisi tekniği ile hesaplamalar yapılmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak dielektrik sabitinin gerçek ve sanal kısımlarının değişimi hesaplandı. İletkenlik mekanizmaları, seçilen sıcaklık bölgelerinde frekans üs değerleri, s yardımıyla elde edilmiştir. **DDB** ve **DOB** bileşiklerinin aktivasyon enerjileri farklı sıcaklık bölgelerinde hesaplandı.

**Anahtar Kelimeler:** Sıvı kristaller, dielektrik spektroskopisi, faz geçiş sıcaklıkları, muz tipi sıvı kristaller



---

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

## Characterization of Phase Transition Parameters of Banana-Type Liquid Crystals by Dielectric Spectroscopy Method

Hasret KARA

Department of Physics

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

The synthesis of novel biphenyl-based bent-core (BC) compounds 3'-{4-[4-((S)-3,7-dimethyloctyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}-4-{4-[4-(octyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy} biphenyl (**DOB**) and 3'-{4-[4-((S)-3,7-dimethyloctyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}-4-{4-[4-(decyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy} biphenyl (**DDB**) have been carried out. Mesomorphic properties of the novel BC compounds **DDB** and **DOB** were investigated using optical polarizing microscope and differential scanning calorimeter. The phase transition temperatures of both mesogens (**DDB** and **DOB**) exhibiting B<sub>1</sub>mesophase were determined, the dielectric parameters were studied, and calculations were made by dielectric spectroscopy technique on the cooling temperature range 135.04–62.81 °C and 141.45–64.83 °C, respectively. By calculation of the temperature-dependent real and imaginary parts of the dielectric constant, the change of the dielectric properties in the both LCs mesophase interval gradually have been revealed. Conductivity mechanisms have obtained with the help of frequency exponent values,  $s$  in selected temperature regions. The activation energies of ( $E_a$ ) **DDB** and **DOB** at different temperature regions have also been calculated.

**Keywords:** Liquid crystals, dielectric spectroscopy, phase transition temperatures, banana type liquid crystals



---

**YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING**

### 1.1 Literatür Özeti

Sıvı kristal faz özelliğine sahip olan moleküller, 19. yüzyılın sonlarında keşfedilmeye başlanmışlardır [1]. Bu yeni keşifler birçok bilim insanının katkılarıyla günümüze kadar artarak devam etmiştir ve her geçen gün daha fazla merak edilen, araştırılan bir alan haline gelmiştir [2, 3]. Sıvı kristaller, sıvı gibi akışkanlığa ve katı gibi uzun menzilli konumlanmış kristal yapıya sahip olan, olağan dışı fiziksel özellikler taşıyan moleküllerdir [4]. Günümüze kadar, çubuk disk ve bükülmüş çekirdekli (BC) olmak üzere üç ana sınıftan oluşan çeşitli mezofazlar keşfedilmiştir [5, 6]. Sıvı kristaller, teknolojik açıdan ekran uygulamalarında çokça kullanılmışlardır ve bu durum 1970 yılından sonra bu moleküllerin teknolojik uygulamalar için daha fazla araştırılmasını sağlamıştır [7, 8]. Bu moleküller, organik ışık yayan diyotlar, biyosensörler, organik alan etkili transistörler gibi birçok teknolojik alanda ve biyolojik sistemlere dayalı çeşitli uygulamalarda kullanılmışlardır [9, 10]. Sıvı kristal molekülleri üzerine yapılan çalışmalar 20. yüzyılın sonlarında karşılığını bulmuştur ve Gennes, yaptığı araştırmalar ve çalışmalarıyla Nobel ödülü ile onurlandırılmıştır. Günümüze en yakın olarak keşfedilen, geleneksel, herhangi bir şekilli olmayan, V-şekilli veya muz tipi (bükülmüş çekirdek, BC) gibi birbirinden farklı mezogenlere sahip sıvı kristal moleküller, sıvı kristal sentezi ve karakterizasyonu yöntemlerinin daha da önemli bir araştırma alanı olmasını sağlamıştır [11, 12].

BC molekülleri kiral yapıda olmamalarına rağmen, mezofazda kiralitenin varlığı ile kendi kendilerini organize eden süper yapılar olduğu için çok önemli bir sıvı kristal sınıfı haline gelmişlerdir [11]. Elektrik alana hızlı tepki verme süreleri gibi önemli özellikleri olması sebebiyle potansiyel elektro-optik cihazlarda kullanılmaya başlanmışlardır [13]. BC bileşikler, B tipi mezofazlar olarak adlandırılan çeşitli smektik kolumnar mezofazlara sahip olan, merkezi bir birimin her iki yanına bir bükülme açısı ile simetrik olarak bağlanan çubuk benzeri mezogenik birimden oluşur [12]. Mezofazın oluşumu, kalamitik mezogenlere kıyasla yapısal farklılıklara sıkı sıkıya bağlıdır [12, 14-18]. Aromatik halkaların sayısı [12], terminal zincirlerin türü ve uzunluğunun [19-22] yanı

sıra bağlantı gruplarının tipi ve yönünü [23, 24] değiştiren mezomorfik davranışın ortaya çıkışını güçlü bir şekilde etkiler. 3'4 bifenil birimi, daha geniş mezomorfik aralıklar nedeniyle bükülmüş çekirdekli moleküllerinin merkezi parçası olarak sıklıkla kullanılmıştır [12]. Buna ek olarak, merkezi bifenil kısım, bifenil biriminin 3'- ve 4-pozisyonlarına farklı terminal zincirleri veya farklı bağlantı gruplarına sahip çubuk benzeri birimlerin bağlanmasıyla bükülmüş yapıdaki asimetriyi sağlar. Zincir dallanması, moleküler kiraliteyi bükülmüş çekirdekli mezogenlere dahil etmek için kullanılır [24, 26-28]. Bu aynı zamanda, aynı sayıda karbon atomu taşıyan ilgili dallanmış bileşiklerle karşılaştırıldığında geçiş sıcaklıklarında azalmaya yol açar [25, 29]. Bükülmüş yapıya bağlı olarak, moleküler kiralite, oluşan mezofazın tipini güçlü bir şekilde etkileyebilir [30, 31]. Ancak B<sub>1</sub> fazının ortaya çıktığı durumlarda faz yapısı moleküler kiraliteden etkilenmez [32, 33, 34].

Sıvı kristallerin dielektrik parametrelerinin değişimi ile moleküler özellikleri arasındaki bağlantıların araştırılması, elektro-optik cihazlarda olası uygulanabilirliklerini belirlemek için önemli bilgiler sağlar [35,36]. Bu amaçla, sıvı kristallerin moleküller arası etkileşimleri, polar yapıların dinamiği, faz geçişleri hakkında güvenilir bilgiler elde etmek için dielektrik spektroskopi yöntemi kullanılır. Bu malzemenin teknolojik uygulamalar için uygun olup olmadığına karar veren parametreler, dielektrik fonksiyonun gerçek ( $\epsilon'$ ) ve sanal ( $\epsilon''$ ) kısmı, dielektrik kaybı ( $\tan\delta$ ) ve iletkenlik ( $\sigma$ ). Bellek cihazları gibi mikro elektronik cihazlarda nispeten daha yüksek dielektrik sabitleri kullanılır [37].

## 1.2 Tezin Amacı

Sıvı kristal bileşikler uygulamalarda sıklıkla kullanılan önemli malzemeler olması nedeniyle, bu bileşiklerin faz geçiş sıcaklıklarının ve elektro-optik özelliklerinin ayrıntılı incelenmesi gereklidir. Bu nedenle çalışmamızda grubumuz tarafından sentezlenmiş karbon sayıları ve mesofaz sıcaklık aralıkları farklı olan B<sub>1</sub> mesofaz sergileyen iki sıvı kristal bileşiğin (**DDB** ve **DOB**) faz geçiş sıcaklıklarının ve tüm dielektrik parametrelerinin sıcaklığa bağlı olarak, sıklıkla kullanılan PM ve DSC yöntemine alternatif bir yöntem olarak, dielektrik spektroskopi yöntemi (DS) ile incelenmesi, yeni uygulama alanlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmamızdan elde edilen bilgiler ile uluslararası bir bildirinin yanı sıra uluslararası seçkin hakemli dergide de yayımlanarak literatüre kazandırılması da amaçlarımız arasındadır.

### **1.3 Hipotez**

Bu çalışmada organik kimya grubumuz tarafından sentezlenmiş olan 2 farklı sıvı kristalin (**DDB** ve **DOB**) dielektrik özellikleri karşılaştırmalı olarak ayrıntılı çalışılması planlanmıştır. İki bileşiğin de farklı sıcaklık aralıklarında dielektrik özelliklerindeki ani değişimlerin olduğu sıcaklıkların, faz geçiş sıcaklıkları analizlerinde sıklıkla kullanılan PM ve DSC den elde edilen faz geçişleriyle tutarlı olacağı ve DS yönteminin de PM ve DSC'ye alternatif bir metod olarak literatüre katkı sağlayacağı düşünülmüştür.



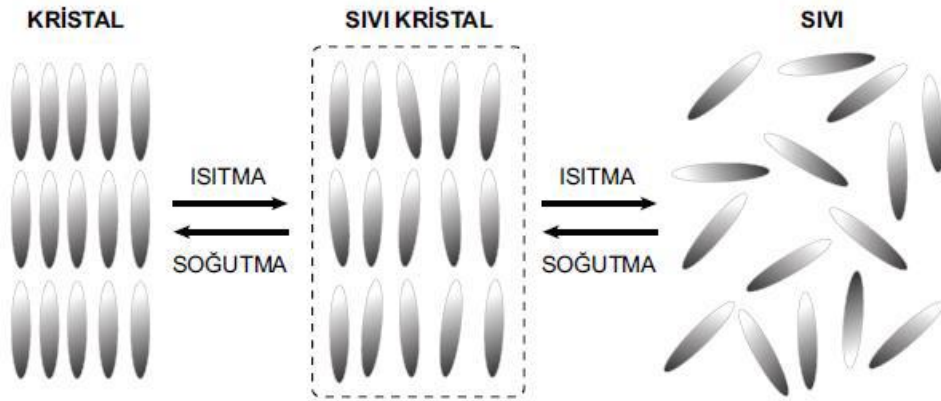
## 2.1 Kısa Tarihçe

İnsanlar geçmişten günümüze hep bir arayış, merak içinde olmuşlardır. Bu sebeple etraflarındaki maddelerin neyden meydana geldiklerini, özelliklerini, temellerini öğrenmek için sürekli gözlem yapmışlardır. Bunun neticesinde maddeyi sıcaklıkla ilişkili olarak değişkenlik gösteren üç ayrı temel sınıfa ayırmışlar ve bunları katı, sıvı, gaz şeklinde isimlendirmişlerdir. Fakat 1888 yılında Avusturyalı bir botanik fizyolojisti Friedrich Reinitzer kolesterolün çeşitli türevlerini incelerken bu maddelerin alışılmışın dışında özelliklerinin olduğunu farketmiştir. Kolesteril benzoatları donma noktasının hemen üzerinde soğutulduklarında renk değişimleri gözlemleyen Reinitzer bunun dışında erime eyleminin diğer bileşiklerden farklı olarak gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Bunun sonucunda maddenin bir erime sıcaklığına değil iki farklı erime sıcaklığının olması gerektiğini öngörmüştür. Reinitzer, bu öngörüsünün üzerine giderek fizikçi olan Otto Lehmann' a bir mektup gönderir. Mektup, Otto Lehmann' ın oldukça ilgisini çekmiştir ve numune üzerinde Reinitzer ile çalışmalar yapmıştır. Çalışmada numune üzerinde gördükleri kristalimsi akışkan yapı daha önce karşılaşmadıkları bir durumdur. Reinitzer, bu yapıya sıvı kristal adını vermiştir ve üç önemli özelliği olan iki erime noktasının varlığı, dairesel polarize ışık yansımaları ve ışığın polarizasyon yönünün döndürülebilirliği sunumunu yapmıştır. Ancak bu çalışmanın devamı gelmemiştir. Lehmann ise Reinitzer' in çalışmalarından ilham alarak benzer bileşikleri incelemiş ve çift erime noktası üzerine çeşitli çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarında kullandığı sıvı kristallerin sentezini ise Alman kimyager Daniel Vorlander yapmıştır. Sıvı kristal konusu bu çalışmalarla sınırlı kalmış ve uzun yıllar bilim insanlarının merakını çekememiştir. Daha sonrasında William Gray ve çalışma grubu bir çok yeni madde sentezlemişler ve bu sentezleme yöntemlerine ilişkin bir kitap yayınlamışlardır. Bununla beraber sıvı kristallerin uygulama alanlarının arayışı başlamıştır ve George H. Heilmeyer' in sıvı kristalleri kullanarak ekran teknolojisinde kullanılması artık bu maddeleri önemli bir araştırma konusu içine sokmuştur. 1991 yılında Pierre- Gilles de Gennes, sıvı kristaller üzerine yaptığı çalışmalar sonucunda Nobel ödülüne layık görülmüştür. Bu ödül sayesinde bilim insanlarının sıvı kristaller üzerine olan merakını daha da arttırmıştır ve

günümüze kadar ulaşan hala da devam eden önemli keşiflerin anahtarı olmuştur. Sıvı kristaller genel olarak ekran teknolojilerinde kullanılsa da son zamanlardaki popülaritesinin artmasının sebebi, enerji ihtiyacının fazlalığı ve üretim maliyetlerinin artması nedeniyle elektrik üretebilen fotovoltaik güneş pillerinde kullanılmalarıdır. Tüm bu anlatılanlarla birlikte, pek çok farklı konuda uygulama alanı bulunan, sıvı kristal fazı sergileyen moleküller üzerine çalışmalar değişik kulvarlarda devam etmekte olup, bu faza sahip olan malzemelerin sentezlenmesi ve en uygun şekilde karakterize edilmesi önemini her geçen gün artırmaktadır[38].

## 2.2 Sıvı Kristal Özellikleri ve Sınıflandırılması

Sıvı kristal faz, moleküller arası belirli bir düzen olmayan, izotropik özellik sergileyen sıvı faz ile moleküller arası belli bir düzen olan, anizotropik özellikte katı faz arasındaki bir geçiş faz halidir [39-41]. Bu fazda olan maddeler katı gibi kristal yapıya ve aynı zamanda sıvı gibi akışkanlığa sahiptir.

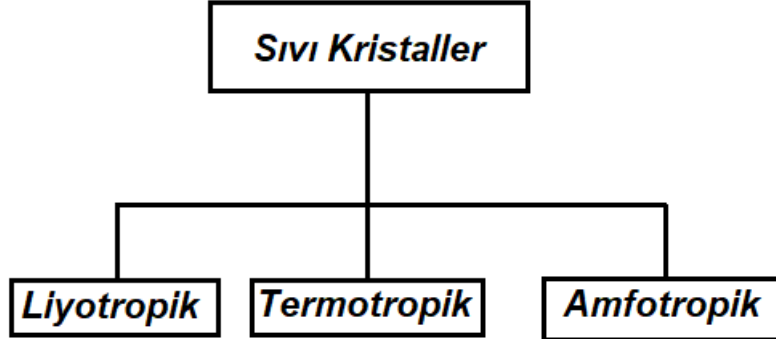


Şekil 2.1 Sıvı kristal bir maddenin faz geçişleri [42]

Sıvı kristal faza sahip maddeler soğutulduklarında kristal örgü düzenine sahip katı faza doğru yönelim gösterirken, ısıtıldıklarında sıvı faza doğru geçiş yapmaktadırlar [43]. (Şekil 2.1)

Sıvı kristal faz, mezofaz olarak adlandırılır. Maddenin katı fazdan mezofaza geçiş sıcaklığına “*erime sıcaklığı*”, mezofazdan sıvı faza geçiş sıcaklığına “*berraklaşma sıcaklığı*” denir [44]. Genelde viskoz halde bulunan sıvı kristal maddeler, sıcaklıkla beraber saydam hale gelip sıvı fazına geçiş yaparlar [45].

Sıvı kristaller mezofaz oluşumlarına üç sınıfa ayrılmışlardır (**Şekil 2.2**). Bu sınıflandırmaya göre *termotropik*, *liyotropik* ve *amfotropik* sıvı kristaller mevcuttur.



**Şekil 2.2** Sıvı kristalin mezofaz oluşumuna göre sınıflandırılması

### 2.2.1 Liyotropik Sıvı Kristaller

Bu faz, uygun bir çözücü ile hidrofilik, hidrofobik özellikleri olan bir sıvı kristalin uygun sıcaklık aralığında çözdürülmesi ile oluşur. Fazın yapısı ve fiziksel özellikleri, sıvı kristalin çözünürlüğüne, molaritesine ve türüne bağlı olarak değişkenlik gösterir [3].

### 2.2.2 Termotropik Sıvı Kristaller

Sıcaklık etkisi ile mezofaz oluşumu gözlenen sıvı kristallerdir. Termotropik faz, katı fazda bulunan bir maddenin ısıtılması ya da sıvı fazda bulunan maddenin soğutulmasıyla oluşan termodinamik dengenin bozulmadığı kararlı bir fazdır [3]. Mezofaz oluşumuna göre kendi içinde iki gruba ayrılırlar. Her iki yönde de sıcaklık değişimiyle oluşan kararlı mezofaza enansiyotropik, sadece tek bir yöne yani sıvı fazdan katı faza geçişte oluşan mezofaza monotropik faz denir [3].

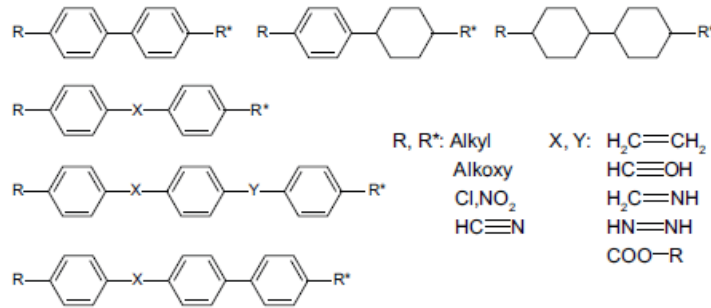
Ayrıca bu mezofaza sahip moleküller, molekül geometrilerine göre de kendi içinde üç gruba ayrılırlar. Bu sınıflandırmaya göre, *kalamitik (çubuk şekilli)*, *diskotik (disk şekilli)* ve *bent core (muz şekilli)* gibi sıvı kristaller kristal dizilimlerine göre sınıflandırılmışlardır.

## 2.3 Sıvı Kristallerin Molekül Geometrileri ve Sınıflandırılması

Sıvı kristaller kovalent olmayan etkileşimlere sahip olduğundan genellikle anizotropik şekillere sahiptirler. Mezofazın oldukça çeşitli şekilleri olabilir ve bu şekilleri ayrı ayrı sınıflandırma oldukça zor olduğundan yukarıda da bahsedildiği gibi temelde üç sınıfa ayrılmışlardır.

### 2.3.1 Kalamitik (çubuk şekilli) Mezogenler

En geleneksel sıvı kristal fazlarıdır. Nematik, smektik ve kolesterik fazlar olarak karşımıza çıkmaktadırlar. (Şekil2.4,Şekil2.5) İlk kez Vorländer tarafından sentezlenmişlerdir [46].



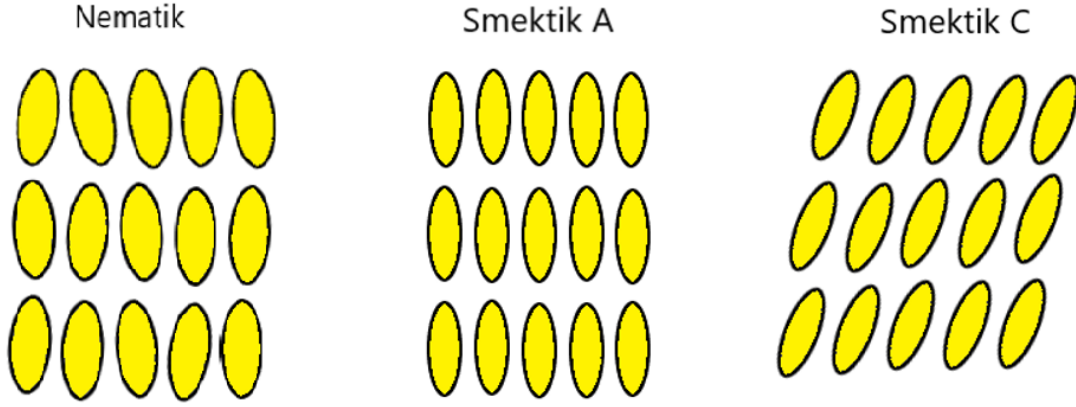
Şekil 2.3 Bazı kalamitik sıvı kristaller [47]

#### 2.3.1.1 Nematik Faz

Nematik fazın isminin kökeni Yunanca iplik anlamından gelmektedir. Bu faza sahip olan mezogenler ipliksi ve düzensiz bir yapıdadır. Moleküllerin herhangi bir düzeni yoktur ancak aynı yönde yönelme eğilimleri vardır (Şekil 2.4) [48]. Maddenin nematik faz içerebildiğini söylemek için molekül yapısının bir ana gruptan ve iki terminal grubundan oluşması gerekir [49].

Nematik fazın özel bir grubu vardır ve kiral nematik faz olarak adlandırılır. Kiral, ayna görüntüsü anlamına gelmektedir ve kiral nematik fazı da dairesel polarize ışığın bir bileşenini yansıtma özelliğine sahiptir [50].

Optiksel olarak aynı yönde yönelme eğilimleri olma sebebiyle ekran teknolojilerinde kullanılmaktadırlar.



**Şekil 2.4** Nematik, smektik A ve smektik C mezofazlarının molekül dizilimleri

### 2.3.1.2 Smektik Faz

Smektik fazın isim kökeni de Yunanca sabun kelimesinden gelmektedir. Moleküller nematik faza benzer şekilde aynı yöne yönelme eğilimindedirler. Nematik fazdan farklı olarak smektik faza sahip moleküller tabakalar halinde ve konumsal olarak da bir düzen içerisinde dirler. Bu düzen sebebiyle nematik faza göre kristal yapıya daha yakın bir yapıları vardır [49].

Çoğunlukla smektik A (SmA), smektik B (SmB) ve smektik C (SmC) olarak üç grupta gözlenmişlerdir.

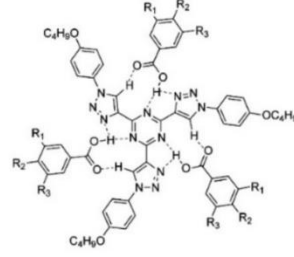
SmA mezofazında, mezogenler oluşan tabaka normaline dik diyebileceğimiz yönde konumlanırlar[49] (**Şekil 2.4**).

SmB mezofazında moleküller düzlem içinde dikey konumlamıştır ve tabaka içinde hegzagonal şekilde dururlar [49].

SmC mezofazı ise SmA mezofazına oldukça benzerdir. Tek fark olarak SmC mezofazında moleküller tabaka normaline belli bir açı ile konumlanmışlardır [49] (**Şekil 2.4**).

### 2.3.1.3 Kolesterik Faz

Diğer adıyla kiral nematik mezofaza sahip moleküller uzun eksene sarmal bir yapı oluştururlar. Bu faza sahip maddelerin en önemli özellikleri, sahip oldukları eğime eş olan bir dalga boyuna sahip ışığı yansıtması ve polarize etmesidir [51].



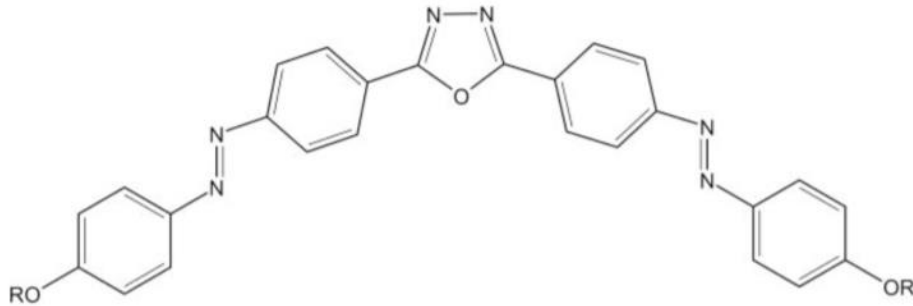
**Şekil 2.5** Diskotik sıvı kristallerin yapısı [52]

### 2.3.2 Diskotik (disk şekilli) Sıvı Kristaller

Adından da anlaşılacağı gibi disk şeklindeki moleküllerden oluşmaktadır. Aromatik bir çekirdek ve bu çekirdeğin etrafında oluşan esnek zincirlerden oluşur (**Şekil 2.5**). Disk şekilli moleküllerin üst üste yığın oluşturulduğu türe kolumnar mezofaz denir. Eğimli veya dik şekilde oluşabilen bu kolonlar, altıgen veya dörtgen şeklinde dizilebilirler. Disk benzeri moleküller, çeşitli varyantların bulunduğu daha düşük düzenli nematik fazları da oluşturabilir [53].

### 2.3.3 Bent Core (muz şekilli) Sıvı Kristaller

İlk keşfedildiklerinde kalamitik mezogenlere benzedikleri için bu sınıfa ait oldukları düşünülmüştür[53]. Ancak daha sonraları moleküler geometrik şekillerinin farklılık gösterdiği fark edilmiş ve buna göre bu ismi almışlardır. Bu mezogenler iki esnek kuyruk ile bükülmüş merkezi bir aromatik kısımdan oluşurlar[14]. BC şeklindeki bileşikler kuyruk uzunlukları bakımından B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub> ve B<sub>7</sub> fazları şeklinde ayrılırlar.



**Şekil2.6**Muz şekilli sıvı kristalin genel yapısı

**B<sub>1</sub> fazı**; yapı bakımından üst üste yığın oluşturmuş bir sütun biçimindedir. Bu sebeple kolumnar faz olarak da bilinir. Polarizasyon mikroskobu ile incelendiklerinde kolumnar faz tekstürleri gözlenir [50].

**B<sub>2</sub> fazı;** polar düzende eğik SmC mezofaz özelliğindedir [50].

**B<sub>3</sub> fazı;** kristal yapısına benzeyen bir düzene sahiptir [50].

**B<sub>4</sub> fazı;** Muz şekilli sıvı kristallerde en düşük sıcaklıklarda görülen B<sub>4</sub> fazı, B<sub>3</sub> fazının soğutulduğunda elde edilmektedir [50].

**B<sub>5</sub> Fazı;** ferroelektrik ve antiferroelektrik özellik gösteren çok sayıda alt fazı bulunmaktadır [50].

**B<sub>6</sub> Fazı;** B<sub>1</sub> fazının ısıtılması ile elde edilebilen bir fazdır [50].

**B<sub>7</sub> Fazı;** polar SmC fazlarından birisidir [50].

## 2.4 Sıvı Kristallerin Fiziksel Özellikleri

Sıvı kristal mezogenler farklı ve merak uyandıran birçok çeşitli özelliklere sahiptirler. Bu özellikler, anizotropi, optiksel, manyetik, dielektrik özellikler, viskozite, tekstürler gibi çeşitli çalışmalarla incelenmektedir [54].

Sıvı kristallerin bu fiziksel özellikler, aslında sahip oldukları düzenli yapıdan ve gösterdikleri yönelimsel eğilimidir. Moleküllerin uzun menzili yönelim eğilimleri **S** ile gösterilen bir düzen parametresi ile ifade edilir. Her fazda olduğu gibi sıcaklığın düşmesiyle sıvı kristal fazda da kinetik enerji seviyesi azalır. Bu durum sıvı kristal moleküllerin sıcaklığa bağlı bir fonksiyonuna sahip olduğunu gösterir. Ayrıca elektrik ve manyetik alana duyarlıdırlar ve yönelimleri bu iki dış kuvvet sayesinde yönlenebilir [55].

### 2.4.1 Optiksel Özellikleri

Sıvı kristaller, optiksel olarak çok önemli bir özellik olan çift kırılma(birefringent) özelliğine sahiptirler. Aynı dalga normaline ve dikey polarizasyonlara sahip farklı hızdaki iki dalga, iki farklı yönde optik olarak anizotropik bir ortam içinde yayılabilirler. Polarize ışın çift kırıcı ortama giren, iki ayrı dalgaya ayrılır. Ayrılan iki ışın ise farklı kırılma indislerine sahip olup, sıradan ışın optik eksene paralel olarak, Snell yasası gereği, dalga normaline boyunca yayılırken, sıra dışı ışın ise dalga normaline paralel olmayacak şekilde ilerler [47,54].

### 2.4.2 Manyetik ve Elektriksel Özellikleri

Sıvı kristallere dışarıdan bir elektrik veya manyetik alan uygulandığında bu etki mezogenleri yani elektriksel iki kutupluluğa sahip dipolleri uygulanan alanla aynı yöne

doğru yönlendirir. Bu durum, sıvı kristallerin organik yapılı olması ve dış etkilere karşı oldukça hassas olması yani uygulanan en ufak bir elektrik alanla bile molekül dizilimleri değişebilmesinden kaynaklanmaktadır. Sıvı kristaller nükleer manyetik rezonans ölçümleriyle manyetik anizotropi işaretinin belirlenmesi ve polarizasyon mikroskobu ile de çift kırıcılık incelenmesine göre sınıflandırılabilir [50].

### 2.4.3 Dielektrik Özellikleri

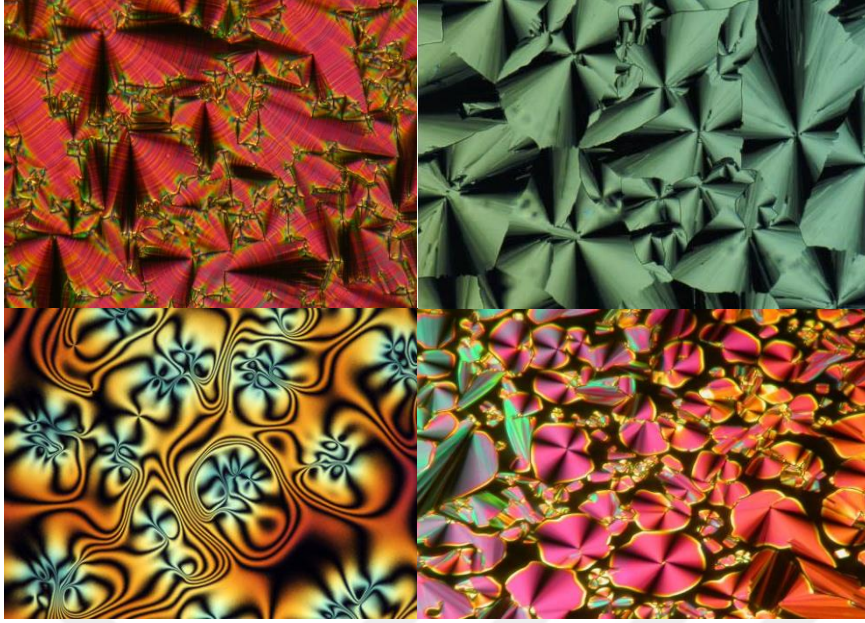
Dielektrik özellik, sıvı kristal faz sergileyen maddelerin en önemli özelliklerinden biridir. Dielektrik özelliklerinin karakterize edilmesi ile sıvı kristallere ait birçok fiziksel özellik hakkında bilgi edinilmiş olur. Dielektriksel yöntemlerle molekül dinamiği ve relaksasyon gibi sıvı kristallere özgü davranışlar incelenebilmektedir. Mezofaz oluşumu sırasında frekansa bağlı veya frekanstan bağımsız olan dielektrik sabitleri, relaksasyon frekansları, kayıp sabitleri gibi parametreler sıvı kristallerin karakter analizlerini yapılmasında kullanılır [56].

Bu tezde, dielektrik spektroskopisi ve analizi genel hatlarıyla bir bölüm olarak konu edilecek ve ilgili ayrıntılar bu bölümde anlatılacaktır (Bkz. **Bölüm 3**). Ayrıca bu tezde de özel olarak sentezlenmiş sıvı kristal bileşiklerinin (**DDB** ve **DOB**) dielektrik özellikleri ayrıntılı olarak karakterize edilmiştir.

### 2.5 Sıvı Kristallere Ait Tekstürler

Birçok önemli bilim insanının keşifleriyle katkı yaptığı sıvı kristalleri günlük hayatımızda farkında olmadan oldukça fazla kullanıyoruz. Kullanım alanlarının bu denli fazla olmasının sebebi yukarıda bahsedilen fiziksel, elektriksel ve dielektrik özelliklere sahip olmalarıdır. Bu moleküllerin en önemli ve diğer fazlardan olan farkı polarizasyon mikroskobu altında gözlemlenen davranışlarıdır. Polarizasyon mikroskobu yardımıyla malzemenin özelliklerini yansıtan karakteristik tekstürler gözlemlenir. Bu tekstürler, sıvı kristallerin kendilerine has olan özellikleri gösterir ve onların karakterizasyonunun belirlenmesini sağlar [42].

Eğer oluşan tekstür sınıflandırılan mezofazlardan biri ile net bir şekilde uyuyorsa bu tekstür özgün tekstür olarak adlandırılır. Tek bir sıvı kristal mezofaz değil de birden fazla mezofaz içeriyorsa bu tekstür özgün olmayan tekstür olarak adlandırılır [42].



Şekil 2.7 Sıvı kristal tekstür örnekleri [50]

### 3.1 Dielektrikler

Dielektrik maddeler elektriksel olarak yalıtkan malzemelerdir. Elektrik iletimini sağlayacak kadar serbest elektronları yoktur. Bu malzemelerin tüm yükleri atom veya moleküllerine sıkıca bağlıdır ve bu yüzden hareketleri molekül içinde sınırlıdır. Ancak dielektrikler dışarıdan uygulanan bir elektrik alana karşı duyarlıdırlar. Bir elektrik alan içersinde sokulduklarında, pozitif ve negatif yükler kuvvet etkisi ile zıt yönlerde doğru yönelirler ve böylece elektriksel kutuplanma meydana gelir. Bu kutuplanma sayesinde elektriksel dipol momentleri oluşur. Tüm dielektrikler, dışarıdan uygulanan bir elektrik alan etkisinde kutuplanma yani polarizasyon özelliğine sahiptirler. Oluşan bu elektriksel dipoller dielektrik malzemelerin yüzey alanlarında yük birikmesine sebep olur ve bu durum dielektrik malzemeleri yük veya enerji depolamaya yarayan kondansatörlerde kullanılmalarını sağlar. Bunun yanı sıra elektrik devrelerinde yük transferlerine engel olmak için yalıtkan olarak kullanılırlar [57].

### 3.2 Kutuplanma (Polarizasyon)

Dielektrik malzemelerin en önemli özelliği yukarıda da bahsedildiği üzere elektrik alana maruz kaldıklarında kutuplanma özelliğine sahip olmalarıdır. Kutuplanma, uygulanan elektrik alan nedeniyle, moleküllerdeki negatif ve pozitif yüklerin yer değiştirmesi ve dipollerin alan yönünde yönelmesini ifade eder. Polarize olmuş madde, negatif ve pozitif yükleri birbirinden çok az miktarda ayrılmış olan maddedir. Boş bir kondansatöre potansiyel fark uygulandığında plakaları arasında oluşan elektrik alan;

$$E = \frac{V}{d} \quad (3.1)$$

şeklinde gösterilir. Boş kondansatörün kapasitans değeri;

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (3.2)$$

ile verilir.

Kondansatörde depolanan yük miktarı ise;

$$Q_0 = A\varepsilon_0 E \quad (3.3)$$

formülü ile gösterilir. Burada,  $\varepsilon_0$  boşluğun dielektrik geçirgenlik sabitidir.

Dielektrik maddenin olmaması durumunda elektriksel yer değiştirme;

$$D = \varepsilon_0 E \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilir.

Kondansatörün plakaları arası dielektrik malzeme ile doldurulursa, plakalar arasında oluşan elektrik alan, dielektrik malzemeyi polarize eder. Polarize haldeki dielektrik malzemenin moleküllerinin negatif kısmı elektrik alana zıt yönde, pozitif kısmı ise elektrik alan yönünde yönelir. Eğer kondansatörün plakalarında oluşan potansiyel sabit tutulursa, depolanan yük Denklem 3.5' teki gibi olur.

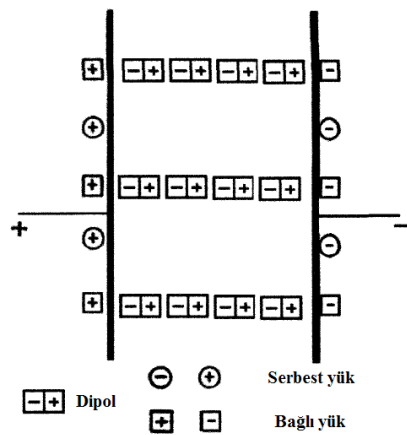
$$Q = \varepsilon_0 \varepsilon A E \quad (3.5)$$

$\varepsilon_0$ 'ın ne anlama geldiğinden bahsetmiştik. Buradaki  $\varepsilon$  ise kullanılan malzemenin dielektrik sabitidir ve dielektriklerin en önemli özelliklerindedir. Bu sabit, alternatif elektrik alanın frekansına bağlı olarak değişim gösterir.

Dielektrik malzeme ile doldurulmuş kondansatörde depolanan yükün artışı;

$$Q - Q_0 = A E \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) \quad (3.6)$$

eşitiği ile verilir. Bu artışı sebebi dielektriklerin yüzey alanında biriken yüklerdir [57].



**Şekil 3.1** Dielektrik kutuplanma [57]

**Şekil 3.1**'de görüleceği gibi kondansatör plakalarının yüzeyinde yükler oluşur. Yüzeyde oluşan bu yükler "*bağlı yükler*" veya "*indüklenmiş yüzey yükleri*" denir. Yüzeyde polarize olmuş bu yükler elektrik alana karşı indüklenmiş bir elektrik alan oluşturur. Bu

nedenle plakalar arasındaki potansiyel fark ve elektrik alan çarpanı  $1/\epsilon$  kadar azalır. Böylece kapasitans;

$$C = \epsilon C_0 \quad (3.7)$$

denklemleri ile verilir. Elektrik alan etkisi ile dielektrik malzeme polarize olur ve dipol momentler oluşur.

$$\mu = \mathbf{A} \mathbf{E} \epsilon_0 (\epsilon - 1) \mathbf{d} \quad (3.8)$$

Hacim başına düşen dipol momentini ;

$$\mathbf{P} = \frac{\mu}{\mathbf{A} \mathbf{d}} = \mathbf{E} \epsilon_0 (\epsilon - 1) = \chi \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (3.9)$$

Burada  $\chi$  dielektriğin elektriksel duygunluğu,  $\mathbf{P}$  ise birim hacim başına düşen dipol momentine eşit olan dielektriğin polarizasyonudur. Dielektrik duygunluk;

$$\chi = \epsilon - 1 \quad (3.10)$$

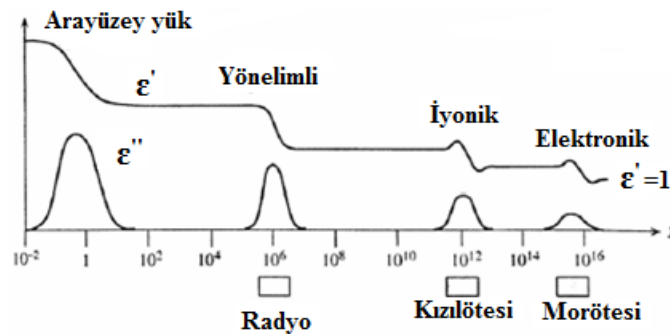
ile ifade edilir. Kutuplanmış dielektrikler için elektrik akı yoğunluğu;

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \epsilon_0 (1 + \chi) \mathbf{E} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E} \quad (3.11)$$

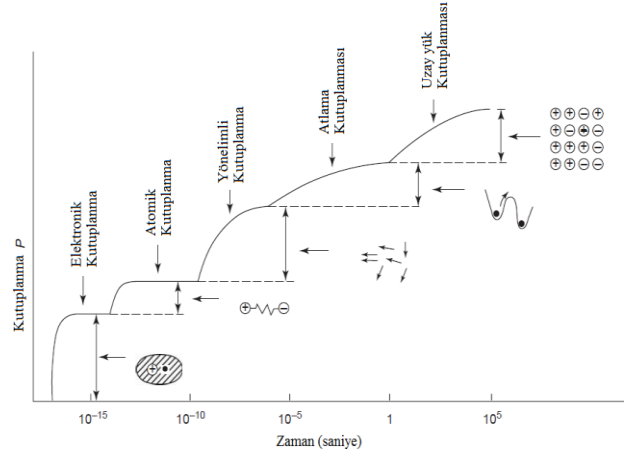
şeklinde gösterilir.

### 3.2.1 Kutuplanma Çeşitleri

Dielektrik malzemelerde, elektronik, iyonik, arayüzey ve yönelimli kutuplanma olmak üzere dört farklı kutuplanma gözlemlenir. Bu kutuplanmalar alternatif elektrik alanının frekansına (Şekil 3.2) ve elektrik alanının zamanına (Şekil 3.3) bağlı olarak değişim gösterirler.



Şekil 3.2 Dielektrik polarizasyonun frekans ile değişimi [57]



Şekil 3.3 Dielektrik polarizasyonun zaman ile değişimi [57]

### 3.3 Kompleks Dielektrik Sabiti

Standart bir çift plakalı bir kondansatöre uygulanan alternatif gerilim,

$$V = V_m \cos \omega t \quad (3.12)$$

denklemleri ile verilir [57]. Burada  $V$  ani gerilim,  $V_m$  ise maksimum gerilimdir.  $\omega$  ise açısal frekansı temsil etmektedir ve  $2\pi f$  olarak tanımlanır. O halde kondansatördeki akım,

$$I_0 = I_m (\cos \omega t + \pi/2) \quad (3.13)$$

ile verilir. Maksimum akım olan  $I_m$  ise,

$$I_m = \frac{V_m}{Z} = \omega C_0 V_m \quad (3.14)$$

İdeal koşullar düşünüldüğünde dielektriklerde akım ile gerilim arasındaki faz farkı yoktur. Ancak dielektrik sabiti  $\epsilon'$  olan bir dielektrik malzeme kondansatör plakaları arasına konulduğunda kapasitans  $C_0 \epsilon$  çarpanı şeklinde artar ve böylelikle kondansatördeki akım,

$$I_s = I_m \cos[\omega t + (\frac{\pi}{2} - \delta)] \quad (3.15)$$

olur. Burada  $\delta$  kayıp açısı olarak bilinir. Bunun sonucunda  $I_m$ ,

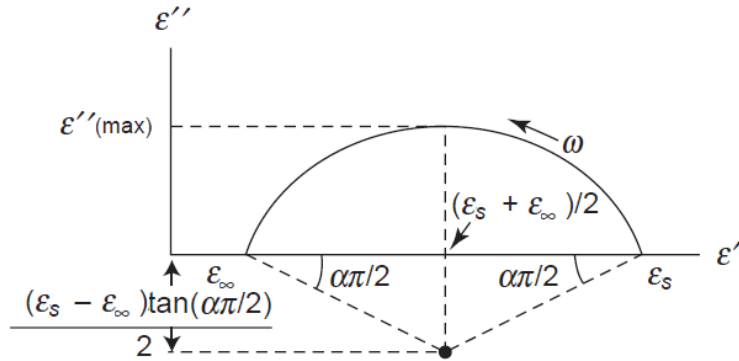
$$I_m = \omega C_0 \epsilon' V_m \quad (3.16)$$

şekline gelir.

Kompleks dielektrik sabiti,



relaksasyon zamanına sahip dielektriklerin parametrelerinde ise grafiklerde merkezi  $\varepsilon''=0$  eksenine altında kalan bir yarı daire veya yay meydana gelir.



**Şekil 3.5** Dielektrikler için Cole-Cole eğrisi [57]

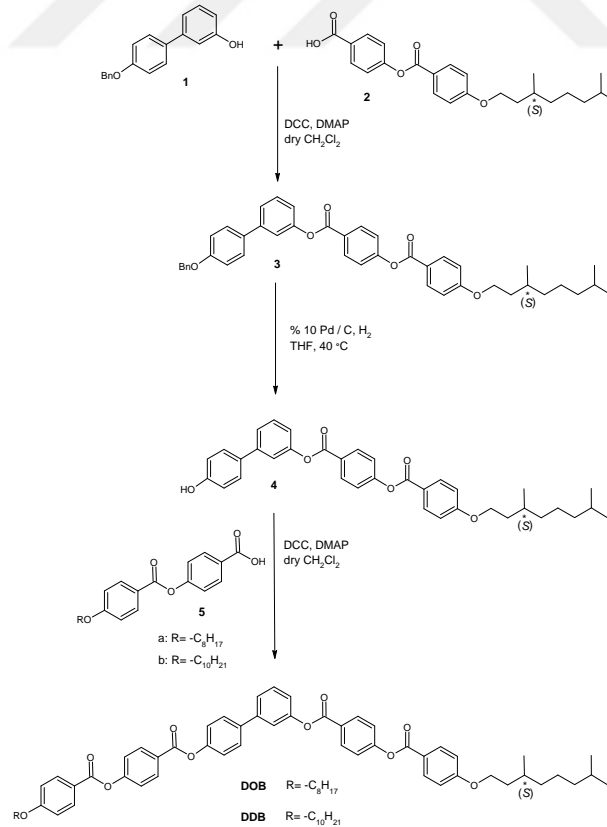
Cole-Cole denklemi,

$$\left[\varepsilon' - \frac{(\varepsilon_s + \varepsilon_\infty)}{2}\right]^2 + \left[\varepsilon'' - \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{2} \tan \frac{\alpha\pi}{2}\right]^2 = \left[\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2} \sec \frac{\alpha\pi}{2}\right]^2 \quad (3.19)$$

#### 4.1 İncelenen Sıvı Kristallerin Sentezi ve Karakterizasyonu

Bu çalışmada kullanılan bileşikler, 3'-{4-[4-((S)-3,7-dimethyloctyloxy) benzoyloxy] benzoyloxy}-4-{4-[4- (octyloxy) benzoyloxy]benzoyloxy} biphenyl (**DOB**) ve 3'-{4-[4-((S)-3,7-dimethyloctyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}-4-{4-[4-(decyloxy)benzoyloxy] benzoyloxy}biphenyl (**DDB**) materyalleridir. Bu bileşiklerin yapısı aşağıda **Şekil 4.1'** de gösterilmiştir. Bu tez boyunca, kullanılmış olan sıvı kristaller, **DDB** ve **DOB** olarak kısaltılmış şekilde verilmiştir.

Yeni bifenil bazlı BC çekirdek bileşiklerinin sentezi 3'-{4-[4-((S)-3,7-dimethyloctyloxy) benzoyloxy] benzoyloxy}-4-{4-[4- (octyloxy) benzoyloxy]benzoyloxy} biphenyl(**DOB**) ve 3'-{4-[4-((S)-3,7-dimethyloctyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}-4-{4-[4-(decyloxy) benzoyloxy] benzoyloxy}biphenyl (**DDB**)), **Şekil 4.1'** deki gösterildiği gibi yapılmıştır [25, 32].



**Şekil 4.1** DDB ve DOB bileşiklerinin sentez şeması

#### 4.1.1 DDB ve DOB Bileşiklerinin Sentezi

3'-[4-(S)-(3,7-Dimetiloktiloksi)benzoiloksi]benzoiloksi]bifenil-4-ol (4) (1 mmol) ve 4-(4-n-oktiloksibenzoiloksi)benzoik asit (5a) veya 4-(4-n-desiloksibenzoiloksi)benzoik asit (5b) (1 mmol), 30 mL kuru diklorometan içinde çözüldü. Bu solüsyona DCC (1.16 mmol) ve 4-(dimetilamino)piridin (DMAP) (0.22 mmol) argon atmosferi altında ilave edildi ve gece boyunca oda sıcaklığında karıştırılarak tutuldu. Reaksiyonun sonunu TLC (CHCl<sub>3</sub>) takip etti. CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> ile silika jel üzerinde süzöldükten sonra çözücü buharlaştırıldı. Ham ürün, yıkama sıvısı olarak CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> kullanılarak silika jel üzerinde kolon kromatografisiyle saflaştırıldı ve etanolden yeniden kristalleştirildi.

#### 4.1.2 3'-{4-[4-((S)-3,7-dimethyloctyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}-4-{4-[4-(octyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}biphenyl (DOB)

**Verim:** %31; renksiz kristaller. <sup>1</sup>H-NMR (500 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ (ppm) = 8.36 (d, J ≈ 8.7 Hz; 2 Ar-H), 8.33 (d, J ≈ 8.7 Hz; 2Ar-H), 8.21 (d, J ≈ 8.9 Hz; 2 Ar-H), 8.19 (d, J ≈ 8.9 Hz; 2 Ar-H), 7.71 (d, J ≈ 8.7 Hz; 2 Ar-H), 7.56-7.55 (m, 2 Ar-H), 7.50 (broad s, 1 Ar-H), 7.44 (d, J ≈ 8.9 Hz; 2 Ar-H), 7.41 (d, J ≈ 8.9 Hz; 2Ar-H), 7.36 (d, J ≈ 8.7 Hz; 2 Ar-H), 7.29-7.26 (m, 1 Ar-H), 7.04 (d, J ≈ 8.9 Hz; 2 Ar-H), 7.02 (d, J ≈ 8.9 Hz; 2 Ar-H), 4.17-4.07 (m, 4H, 2 OCH<sub>2</sub>), 1.96-1.83, 1.72-1.49, 1.40-1.18 (3m, 22H, 2 CH, 10 CH<sub>2</sub>), 1.01 (d, J ≈ 6.5 Hz; 3H, CH<sub>3</sub>), 0.96-0.92 (m, 9H, 3 CH<sub>3</sub>). <sup>13</sup>C-NMR (100 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ (ppm) = 164.51, 164.50, 164.36 (C=O), 163.87, 163.85, 155.47, 151.38, 150.68, 142.10, 138.05, 126.88, 126.84, 120.99 (Ar-C), 132.46, 131.88, 129.91, 128.36, 124.73, 122.16, 122.13, 120.66, 120.48, 114.46 (Ar-CH), 68.42, 66.77 (OCH<sub>2</sub>), 39.25, 37.28, 36.02, 31.83, 29.36, 29.25, 29.12, 26.02, 24.69, 22.69 (CH<sub>2</sub>), 29.86, 28.00 (CH), 22.74, 22.64, 19.68, 14.14 (CH<sub>3</sub>).

#### 4.1.3 3'-{4-[4-((S)-3,7-Dimethyloctyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}-4-{4-[4-(Decyloxy)benzoyloxy]benzoyloxy}biphenyl (DDB)

**Verim:** %20; renksiz kristaller. <sup>1</sup>H-NMR (500 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ (ppm) = 8.23 (d, J ≈ 8.7 Hz; 2 Ar-H), 8.21 (d, J ≈ 8.7 Hz; 2Ar-H), 8.09 (d, J ≈ 8.9 Hz; 2 Ar-H), 8.07 (d, J ≈ 8.9 Hz; 2 Ar-H), 7.59 (d, J ≈ 8.7 Hz; 2 Ar-H), 7.44-7.42 (m, 2 Ar-H), 7.38 (broad s, 1 Ar-H), 7.31 (d, J ≈ 8.9 Hz; 2 Ar-H), 7.29 (d, J ≈ 8.9 Hz; 2Ar-H), 7.23 (d, J ≈ 8.7 Hz; 2 Ar-H), 7.17-7.14 (m, 1 Ar-H), 6.92 (d, J ≈ 8.9 Hz; 2 Ar-H), 6.90 (d, J ≈ 8.9 Hz; 2 Ar-H), 4.04-3.95 (m, 4H, 2 OCH<sub>2</sub>), 1.84-1.71, 1.63-1.36, 1.28-1.06 (3m, 26H, 2 CH, 12 CH<sub>2</sub>), 0.89 (d, J ≈ 6.5 Hz; 3H, CH<sub>3</sub>), 0.83-0.79 (m, 9H, 3 CH<sub>3</sub>). <sup>13</sup>C-NMR (100 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ (ppm) = 164.51, 164.49, 164.35 (C=O), 163.87, 163.85, 155.47, 151.38, 150.69, 142.10, 138.05, 126.88, 126.84, 120.99 (Ar-C),

132.46, 131.88, 129.91, 128.36, 124.73, 122.16, 122.13, 120.67, 120.48, 114.47 (Ar- $\underline{C}H$ ), 68.42, 66.77( $O\underline{C}H_2$ ), 39.26, 37.29, 36.02, 31.93, 29.59, 29.39, 29.35, 29.12, 26.01, 24.69, 22.74 ( $\underline{C}H_2$ ), 29.86, 28.00 ( $\underline{C}H$ ), 22.72, 22.64, 19.68, 14.16 ( $\underline{C}H_3$ ).

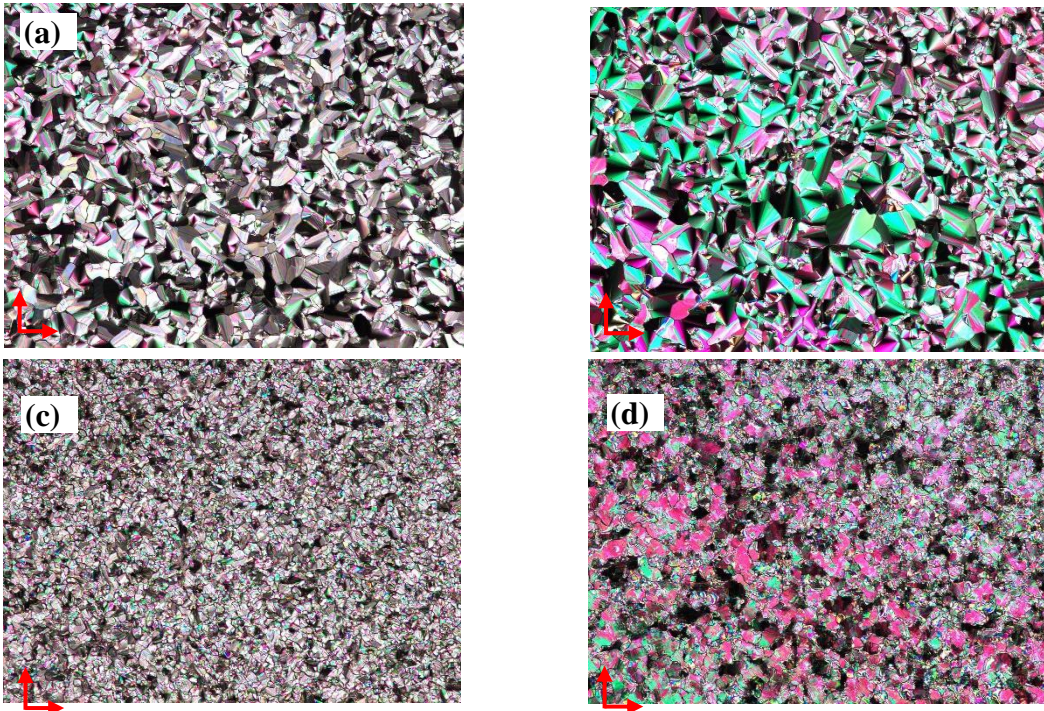
## 4.2 DDB ve DOB Bileşiklerinin Mezomorfik Özellikleri

Sentezlenen BC bileşikleri **DDB** ve **DOB**' nin mezomorfik özellikleri, optik polarizasyon mikroskobu (POM) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) kullanılarak araştırıldı. Yeni mezogenlerin faz geçişleri ve karşılık gelen entalpileri aşağıda Tablo 4.1' de sunulmuştur.

**Tablo 4.1** DOB ve DDB bileşiklerinin faz geçiş sıcaklıkları T (°C) ve entalpi değerleri  $\Delta H$  (kJ/mol)

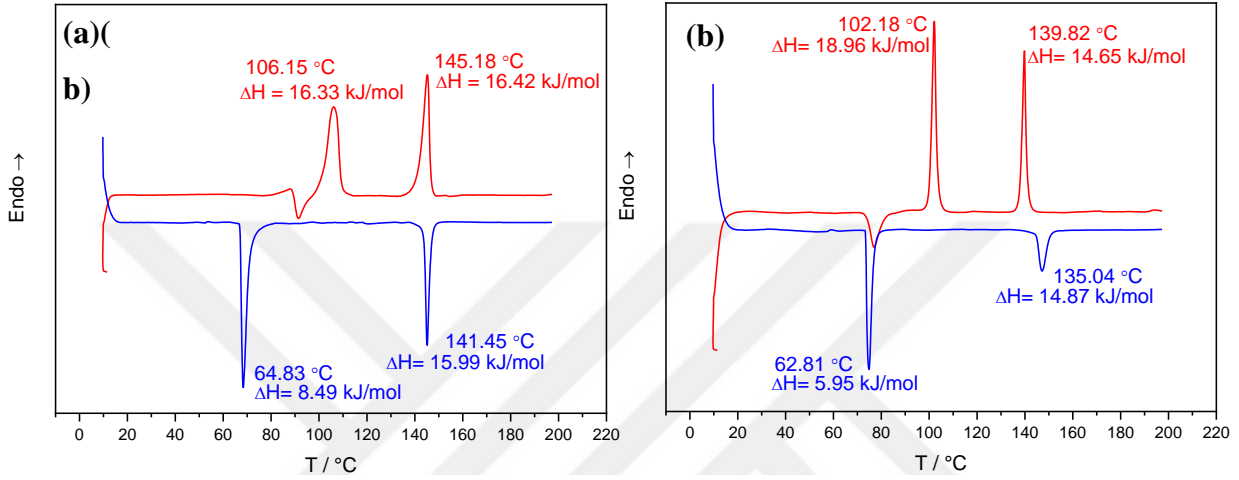
Bileşik	n	T/°C [ $\Delta H$ kJ/mol] <sup>a</sup>
<b>DOB</b>	8	<i>Isıtma:</i> Cr 106.15 [16.33] B <sub>1</sub> 145.18 [16.42] Iso <i>Soğutma:</i> Iso 141.45 [15.99] B <sub>1</sub> 64.83 [8.49] Cr
<b>DDB</b>	10	<i>Isıtma:</i> Cr 102.18 [18.96] B <sub>1</sub> 139.82 [14.65] Iso <i>Soğutma:</i> Iso 135.04 [14.87] B <sub>1</sub> 62.81 [5.95] Cr

Her iki bifenil bazlı bükülmüş çekirdek molekülü, çift kırılmalı mozaik benzeri doku ile belirtilen enansiotropik B<sub>1</sub> mezofazı sergiler [25, 32] (**Şekil 4.2**).



**Şekil 4.2** (a, c) DOB ve (b, d) DDB ısıtma ve soğutma süreçlerindeki tekstür görüntüleri

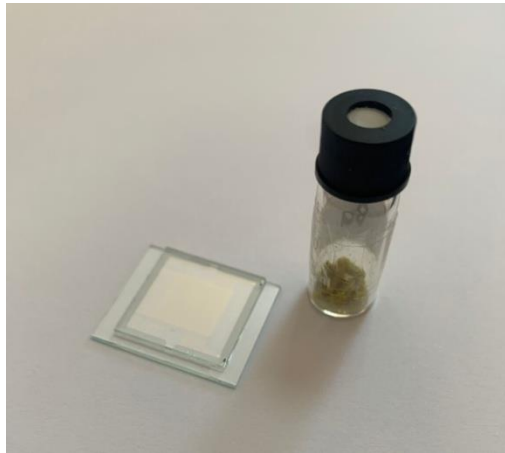
Bu doku, iki boyutlu dikdörtgen sütunlu bir faza karşılık gelir ve bu faz Colrec olarak isimlendirilir [32]. **DOB** ve **DDB**'nin mezomorfik özelliklerinin karşılaştırılması, sırasıyla 39 °C ve 37 °C olan mezofaz aralıklarının ve mezofaz tipinin, terminal zincir uzunluğunu değiştirmesine rağmen aynı kaldığını göstermektedir (**Şekil 4.2**). Öte yandan, bir (S)-3,7-dimetiloktiloksi zincirine sahip terminallerden birine moleküler kiralitenin eklenmesi, dikdörtgen sütunlu fazların oluşumu üzerinde açıkça kiral bir etkiye sahip değildir [33].



**Şekil 4.3** (a) **DOB** ve (b) **DDB** sıvı kristallerinin ısıtma ve soğutma DSC grafikleri

### 4.3 Sıvı Kristal Hücrelerin Hazırlanması

Tez kapsamında kullanılan sıvı kristal bileşiklerin dielektrik ölçümleri, sandviç tipi hücrelere doldurularak yapıldı. Inc şirketi tarafından üretilen bu özel hücrelerin yüzey alanları 100 mm<sup>2</sup> lik bir alana sahiptir. Bu bölgeye numune doldurularak ölçümler gerçekleştirildi. Bu hücrenin ve kullanılan sıvı kristalin görselleri **Şekil 4.4** verilmiştir.



**Şekil 4.4** Özel sandviç tipli hücre ve kullanılan numune görüntüsü

Bu sandviç tipli hücreler, ITO ile kaplanmış cam plakalardan oluşur. Plakaların iç tarafı, polyimid tabaka ile kaplıdır [68]. Numuneler hücre içlerine kılcallık özelliğinden faydalanarak doldurulmuştur. Bu özellikten yararlanmak için numuneler, Kohler bankası adı verilen sıcaklık gradyenine sahip bir ısıtıcı ile sıvı faza geçirilmiştir (**Şekil 4.5**). Hücre kapıcıklarına konulan numunelerin, yavaş bir şekilde faz geçişi yapıp, kılcal etki ile hücre içlerine dolmaları sağlanmıştır.

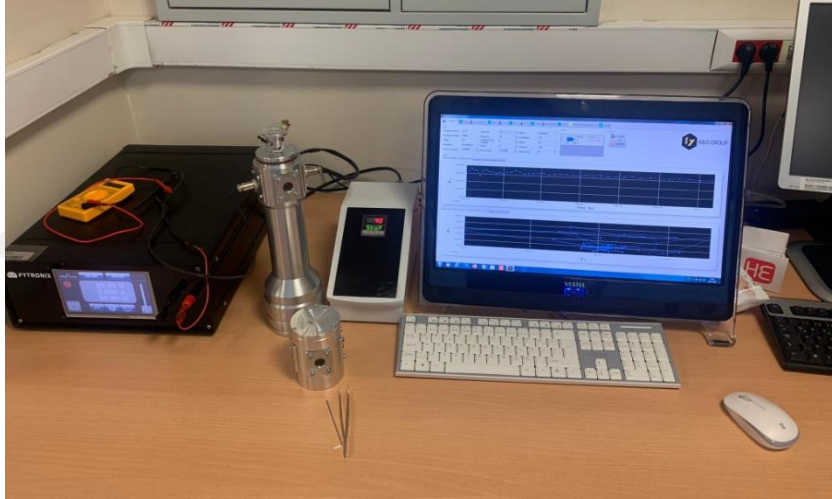


**Şekil 4.5** Kohler bankası

#### 4.4 Deney Düzenegi

Yapılan ölçümlerin ilgili sıvı kristale ait tüm fazları kapsaması için, hücrelerin ısıtılabilceği bir deney düzenegi kurulmuştur. Buna ek olarak, hücrelerin herhangi bir dış alana maruz kalmamaları adına, özel tasarlanmış bir bölmede tutulmuştur. Ölçümlerin yapıldığı sistemde, hücrelerin ısıtılması için bir direnç düzenegi kurulu olup, sıcaklık kontrolü için  $k$  tipi bir termoçift kullanılmıştır.

Tez kapsamında çalışılan sıvı kristal numunelere ait dielektrik özellikler. Empedans analiz cihazı ile, 100 Hz–10 MHz aralığında, karakterize edilmiştir. Bu cihaz, bir ara yüz bağlantısı ile bilgisayar yardımıyla kontrol edilmektedir (**Şekil 4.6**). Bu cihaz yardımıyla yazılan program sayesinde  $C_s$ ,  $C_p$ ,  $\delta$ ,  $\sigma$  gibi dielektrik parametreleri otomatik hesaplanabilmektedir. Alınan tüm ölçüm sonuçları, Origin programı ile analiz edilip grafikleri çizilmiştir.



**Şekil 4.6** Deney düzenegi

## 5.1 DDB ve DOB Sıvı Kristallerin Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi

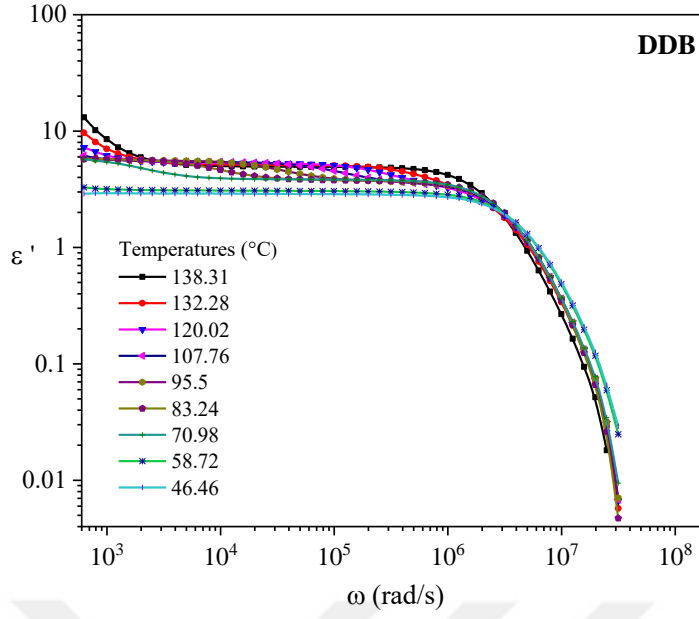
Bu bölümde, **DDB** ve **DOB** sıvı kristal bileşiklerinin dielektrik parametrelerine ait ölçüm sonuçları ele alınacaktır. Ölçümler, bir önceki bölümde değinilen formülasyonları temel almaktadır.

Bu tez kapsamında, **DDB** bileşiğinin dielektrik parametreleri belirlenirken frekans aralığı  $10^2$  ile  $10^6$  Hz ve sıcaklık  $46^\circ$  C ile  $139^\circ$  C arasında ölçüm yapılmıştır. Yine **DOB** bileşiği için aynı frekans aralığında,  $57^\circ$  C ile  $145^\circ$  C sıcaklıkları arasında ölçümler alınmıştır [58].

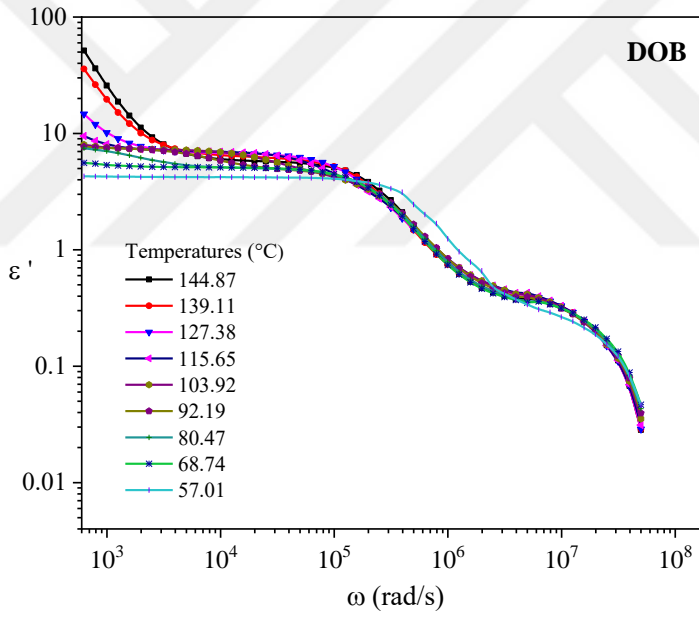
### 5.1.1 DDB ve DOB Sıvı Kristal Bileşiklerin Dielektrik Parametrelerindeki Değişimler

Bu başlık altında, tezde kullanılan sıvı kristal bileşiklerin sıcaklığa ve frekansa bağlı olarak dielektrik parametrelerindeki değişimi incelenmiştir [58].

**DOB** ve **DDB** sıvı kristal bileşiklerin farklı sıcaklıklarda dielektrik sabitinin ( $\epsilon$ ) gerçek kısmının frekansa bağlı grafikleri Şekil 5.1' de sunulmuştur (burada  $\omega = 2\pi f$  ve  $f$  doğrusal frekanstır).



(a)



(b)

**Şekil 5.1** Farklı sıcaklıklarda incelenen (a) **DDB** ve (b) **DOB**' nin dielektrik sabitinin reel kısımlarının açısal frekansa bağıllığı

Elde edilen veriler, dielektrik malzemelerin karakteristik bir davranışı olan  $\epsilon'$ 'nin dağılma davranışı gösterdiğini, frekansın artmasıyla kademeli olarak azaldığını ve daha sonra yüksek frekanslarda yakın değerlere ulaştığını göstermektedir. Öte yandan, dielektrik sabitinin gerçekte düşük frekanslarda maksimum değerine sahiptir.

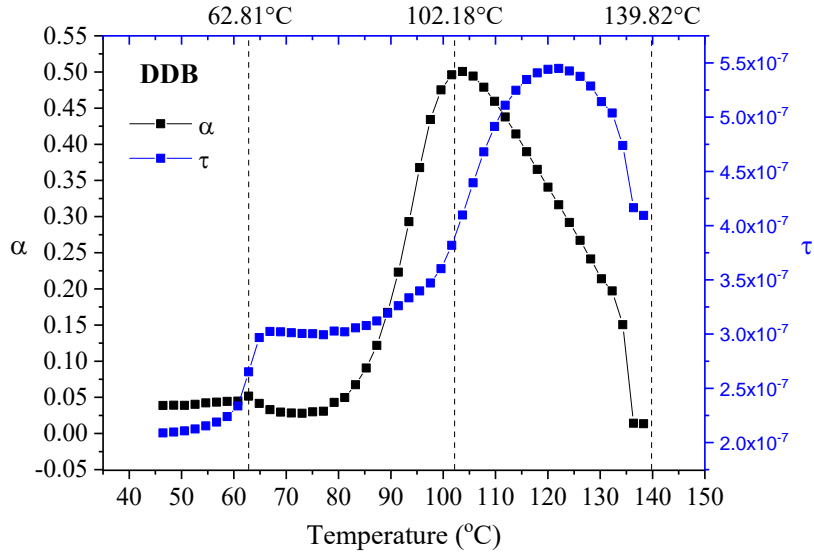
Sonuç olarak, depolanan enerjide gözle görülür bir kayıp meydana gelir; dolayısıyla  $\epsilon'$  aynı düşük değerlere yaklaşır. Bununla birlikte, düşük frekanslarda, bir net moleküler polarizasyonun varlığı, moleküler yeniden yönelme nedeniyle sıcaklıkla artan dielektrik sabitinin gerçek kısımlarında artışlara yol açar. Dielektrik geçirgenliğin sıcaklığa bağlılığı, potansiyel olarak faz geçişlerini gösterir. Dielektrik sabiti, sırasıyla kristal faz geçiş sıcaklığı **DDB** ve **DOB** için  $70.98^\circ \text{C}$  ve  $80.47^\circ \text{C}$  den sonra keskin bir şekilde değişir (**bkz. Şekil 5.1 (a), (b)**). Sıvı kristal fazlarda, polarizasyon muhtemelen yüksek olduğunda, dielektrik sabitleri 1 kHz'de maksimum değerlere ulaşır.

**Şekil 5.1'** de gösterildiği gibi, **DDB** ve **DOB'** nin dielektrik sabitlerinin gerçek bileşenleri bir doyma bölgelerine ve açısal frekans sırasıyla  $10^6$ ' dan  $10^8$  rad/s'ye ve  $10^5$ ' den  $10^8$  rad/s' ye yükseldikçe bir azalmaya sahiptir.

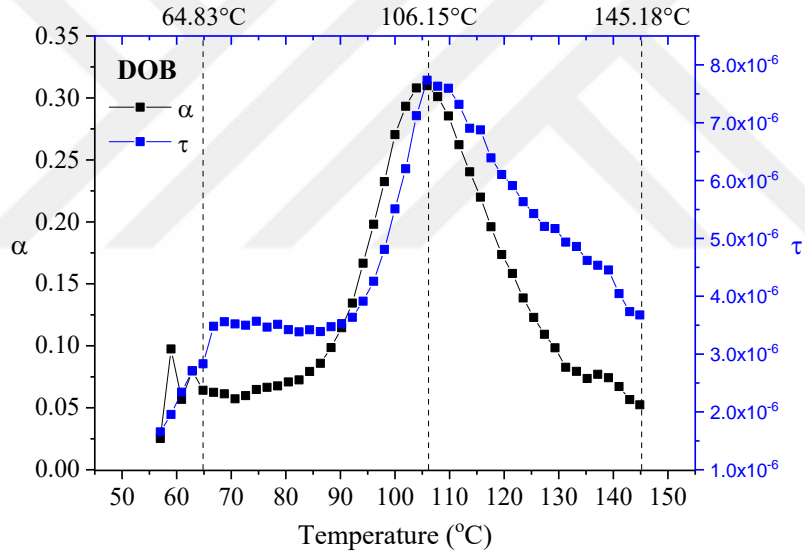
Sıcaklığın, **DDB** ve **DOB** bileşiklerinin dielektrik relaksasyon türleri üzerindeki etkisini açıklamak için, her sıcaklık için dağılım eğrileri ve dielektrik parametreleri ( $\alpha$ , absorpsiyon katsayısı  $\tau$ , Cole-Cole denklemindeki relaksasyon süresi,  $\alpha = 0$ ; Debye tipi relaksasyon eğrisi) Origin programı ile oluşturuldu ve hesaplandı.

**DDB** ve **DOB** için tüm dielektrik parametreler ( $\alpha$ ,  $\tau$  ve  $\Delta\epsilon_s$ ) **Tablo 5.1** ve **Tablo 5.2'** de verilmiştir.

**DDB** ve **DOB** için sıcaklığın  $\alpha$  ve  $\tau'$  ye bağımlılığı **Şekil 5.2 (a),(b)**' de verilmiştir. **DDB** için relaksasyon süreleri ( $\tau$ ), **DOB** molekülünden daha küçüktür. Bu doğrultuda **DDB** molekülünün **DOB'** ye göre daha yüksek karbon sayısı ile daha kolay hizalandığı tespit edilmiştir. **DDB** molekülünde karbon sayısı artırılarak moleküler yönelme daha kolay hale gelmiştir. Ayrıca bu sayede **DDB'** de faz geçiş sıcaklıklarının düştüğü gözlenmiştir. Dielektrik dayanımı ( $\Delta\epsilon_s$ ) hesaplanmış ve  $B_1$  fazında sıcaklık azaldıkça dielektrik dayanımının arttığı gözlemlenmiştir ancak neredeyse kristal fazda dielektrik kuvveti azalan davranış gösterir (**bkz. Tablo 5.1** ve **Tablo 5.2**).  $\Delta\epsilon_s$  değerindeki artış, sıvı kristal faz bölgesinde moleküler hizalamanın kolaylaştırıldığını gösterir.



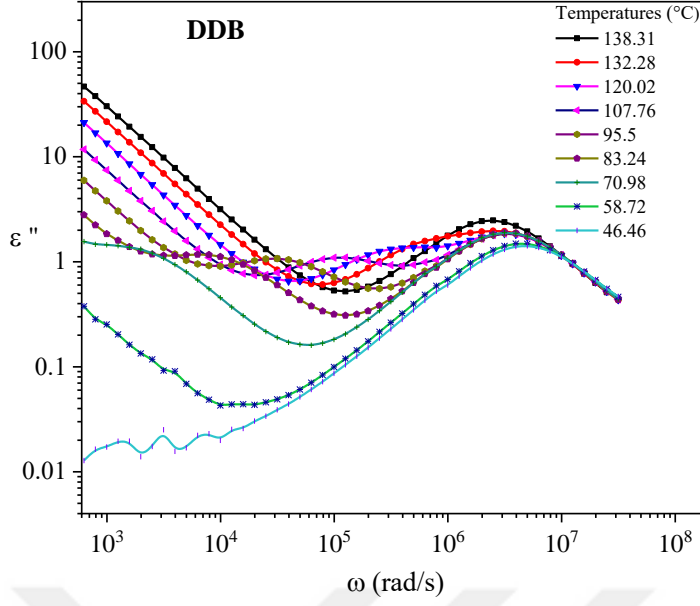
(a)



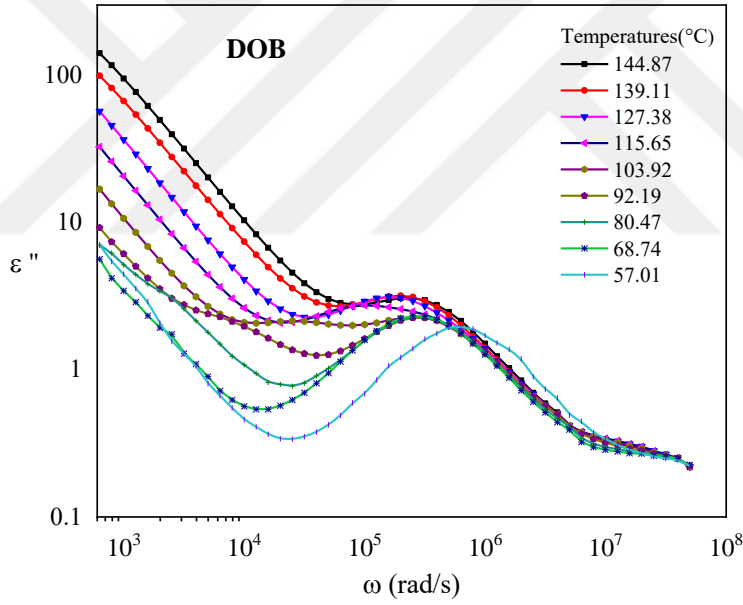
(b)

**Şekil 5.2 (a) DDB ve (b) DOB için absorpsiyon katsayısının ve relaksasyon süresinin sıcaklığa bağılılığı**

**DDB ve DOB molekülleri için dielektrik sabitinin sanal bileşenlerinin açılal frekans ile bağımlılığı aşağıda verilmiştir (Şekil 5.3 (a), (b)).**



(a)

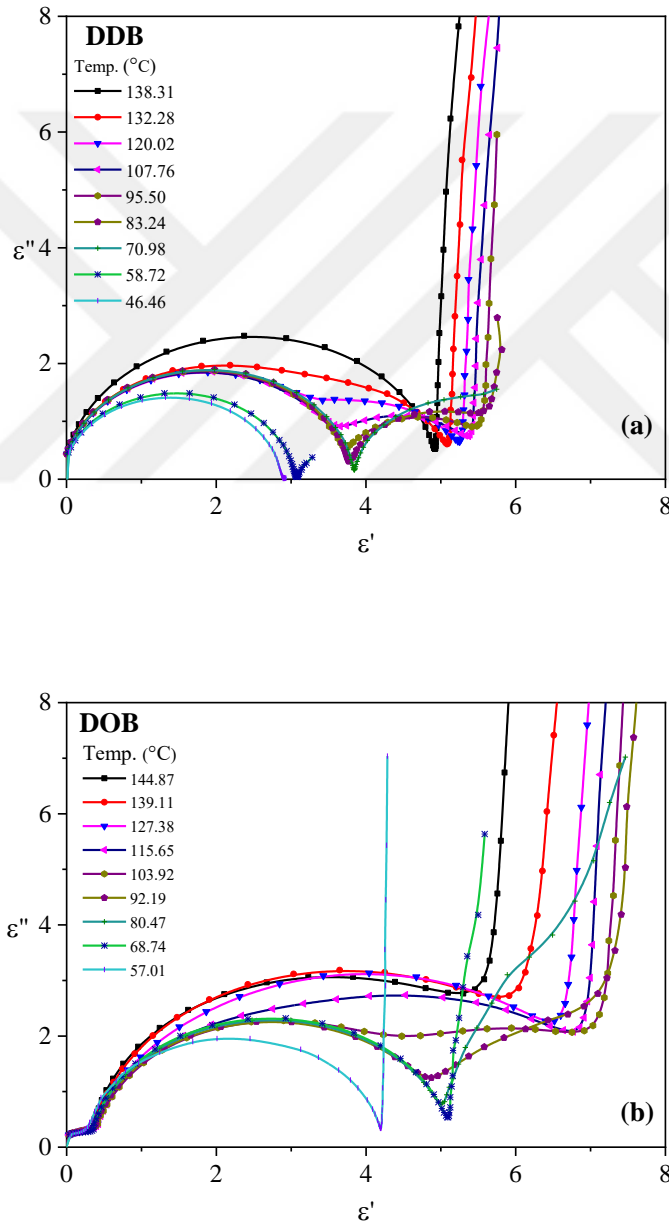


(b)

**Şekil 5.3** Farklı sıcaklıklarda incelenen (a) **DDB** (b) **DOB**' nin dielektrik sabitinin sanal kısımlarının açılal frekansa bağıllığı

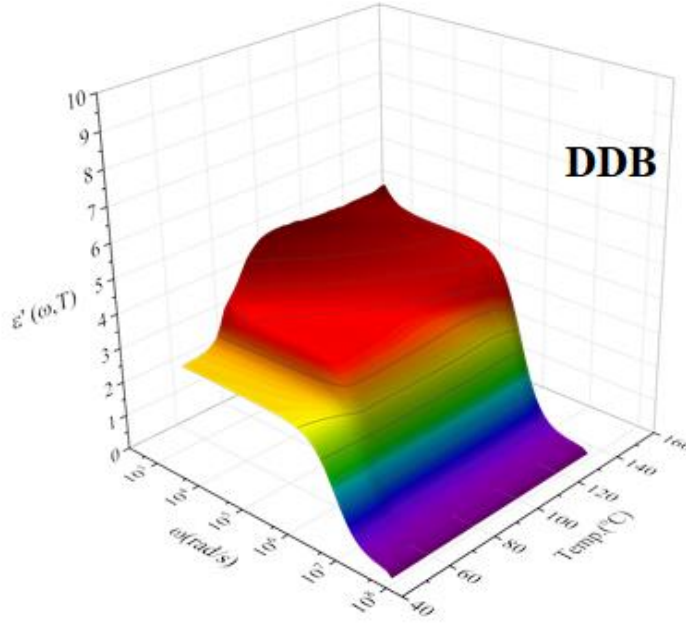
Gösterildiği gibi, düşük frekans bölgesindeki dielektrik sabitlerinin sanal kısımlarının büyüklüğü, yüksek frekans bölgelerinden daha yüksektir. Yüksek frekans bölgelerinde, dielektrik sabitinin sanal bileşenleri, dielektrik relaksasyonlara karşılık gelen tepe noktalarına sahiptir. **DDB** ve **DOB**' nin sırasıyla  $10^6$ - $10^7$  ve  $10^5$ - $10^6$  gevşeme piki

gösterdiği elde edilmiştir.  $\epsilon''$ 'nin büyüklüğü enerji kaybıyla orantılı olduğundan, bu BC sıvı kristallerinin yüksek frekans bölgesinde daha kararlı olduğu varsayılmıştır. **DDB** ve **DOB** BC sıvı kristallerin dielektrik gevşeme mekanizmasını Cole-Cole eğrileri yardımıyla araştırılmıştır (**Şekil 5.4 (a), (b)**). Cole Cole eğrileri ( $\epsilon''$ -  $\epsilon'$  grafiği) Cole-Cole formalizmine uygun relaksasyon süreçlerini sürdüren malzemeler için önemlidir. Grafikler, sabit sıcaklıktaki dielektrik depolama bileşenleri ile dielektrik kayıplarının değişimini içerir. Ayrıca  $B_1$  faz geçişinden sonra yarım daire oluşumları tek bir gevşeme süresinin varlığını göstermiştir.

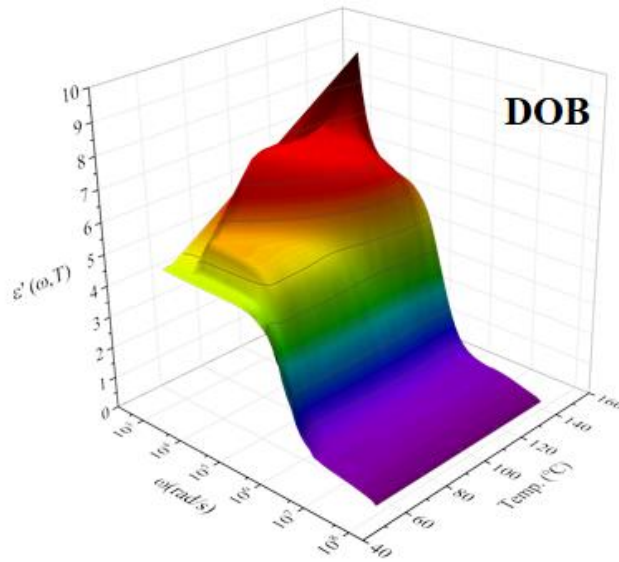


**Şekil 5.4** (a) **DDB** ve (b) **DOB**' nin sıcaklığa bağlı Cole-Cole grafikleri

Bu sıvı kristaller (**DDB** ve **DOB**) için sıcaklık ve açısal frekansa bağlı olarak gerçek  $\epsilon'$  ve sanal kısım  $\epsilon''$ 'nin üç boyutlu (3B) grafikleri de sırasıyla **Şekil 5.5'** de çizilmiştir. **Şekil 5.5 (a),(b)**' de görüldüğü gibi faz geçiş sıcaklıklarında pikler gözlenmiştir. Bu sıvı kristaller için faz geçiş sıcaklıklarının PM ve DSC tekniğine ek olarak bu 3D grafiklerden belirlenebileceği kanıtlanmıştır.



(a)



(b)

**Şekil 5.5** (a) **DDB** ve (b) **DOB** için gerçek dielektrik sabiti ile açısal frekans ve sıcaklığın 3D çizimleri

**Tablo 5.1** Sıcaklığa bağlı olarak **DDB** için dispersiyon eğrilerinden hesaplanan dielektrik parametreleri

DDB [°C]	$\alpha$		$\tau$		$\Delta\varepsilon$	Ayar. R <sup>2</sup>	
	Standart Sapma		Standart Sapma				
138.31	0.01352	0.00356	4.09E-07	2.27E-09	5.01693	0.01277	0.99986
132.28	0.19717	0.00895	5.04E-07	9.14E-09	5.48382	0.03877	0.99924
120.02	0.34076	0.02255	5.44E-07	3.21E-08	6.06561	0.13033	0.99583
107.76	0.4789	0.04957	4.68E-07	8.66E-08	6.84789	0.43917	0.98452
95.5	0.36781	0.06507	3.40E-07	6.85E-08	5.57284	0.40295	0.96777
83.24	0.06733	0.02402	3.06E-07	1.25E-08	4.0857	0.07546	0.99391
70.98	0.02833	0.00453	3.01E-07	2.19E-09	3.94589	0.01348	0.99977
58.72	0.04438	0.00556	2.24E-07	2.08E-09	3.17914	0.01433	0.99966
46.46	0.03871	0.00578	2.09E-07	2.01E-09	2.99252	0.01421	0.99963

**Tablo 5.2** Sıcaklığa bağlı olarak **DOB** için dispersiyon eğrilerinden hesaplanan dielektrik parametreleri

DOB [°C]	$\alpha$		$\tau$		$\Delta\varepsilon$	Ayar. R <sup>2</sup>	
	Standart Sapma		Standart Sapma				
144.87	0.05241	0.0115	3.68E-06	6.99E-08	5.69084	0.04883	0.99858
139.11	0.0743	0.01127	4.45E-06	8.67E-08	6.23208	0.05507	0.99866
127.38	0.10933	0.01144	5.21E-06	1.11E-07	6.74951	0.06473	0.99866
115.65	0.21998	0.01051	6.88E-06	1.81E-07	7.35257	0.08128	0.99898
103.92	0.30805	0.0238	7.12E-06	5.46E-07	7.21146	0.21209	0.99529
92.19	0.13446	0.01682	3.64E-06	1.15E-07	5.20577	0.06924	0.99718
80.47	0.07087	0.01203	3.42E-06	6.97E-08	4.91954	0.04411	0.99847
68.74	0.06123	0.01175	3.56E-06	6.99E-08	4.94826	0.04334	0.99853
57.01	0.02526	0.01308	1.65E-06	3.40E-08	4.05118	0.03605	0.99815

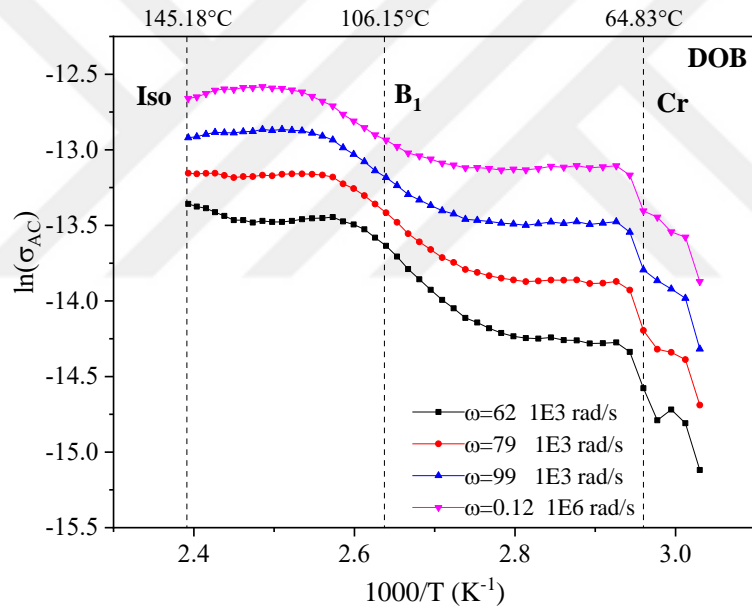
### 5.1.2 DDB ve DOB' nin Arrhenius Çizim Analizi

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{E_a}{k_b T}\right) \quad (5.1)$$

denklemini, iletkenliğin sıcaklıkla olan ilişkisini tanımlar. Burada  $\sigma_0$ , üstel fonksiyon,  $E_a$  aktivasyon enerjisi,  $k_b$  Boltzman sabiti ve  $T$  ise sıcaklığı ifade eder. Arrhenius AC iletkenlik grafikleri, **DDB** ve **DOB** bileşikleri için **Şekil 5.6** (a) ve (b)' de çizilmiştir. Aktivasyon enerjileri, **Şekil 5.6**'da gösterilen grafiklerin eğiminden hesaplanmış ve bulunan değerler **Tablo 5.3** ve **Tablo 5.4**'te sunulmuştur. **Tablo 5.3** ve **Tablo 5.4**'teki değerlerden de anlaşılacağı gibi,  $E_a$  artan frekansla azalmaktadır.  $E_a$ ' nın frekansla azalması, sıvı kristal cihaz uygulamaları için faydalı olabileceğini göstermiştir. **DDB** ve **DOB** için  $E_a$  değerlerinin faz geçiş sıcaklığı bölgelerinde azaldığı gözlemlenmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 5.6** Farklı açısal frekanslar için (a) **DDB** ve (b) **DOB**' nin AC iletkenliğinin Arrhenius grafikleri

**Tablo 5.3** Farklı sıcaklıklarda **DDB** için sıcaklık bölgeleri ve aktivasyon enerjileri

Sıcaklık (°C)	Açısal Frekans (rad/s)			
	0.61 1E6	0.8 1E6	1 1E6	1.2 1E6
46-59	0.90eV	0.068eV	0.066eV	0.063 eV
60-66	0.870eV	0.747eV	0.791eV	0.830 eV
67-93	0.004eV	0.005eV	0.010eV	0.011 eV
94-111	0.192eV	0.117eV	0.086eV	0.109 eV
112-129	0.323eV	0.311eV	0.267eV	0.214eV
130-133	0.034eV	0.027eV	0.089eV	0.076eV
134-140	1.11eV	0.179eV	0.120eV	0.164eV

**Tablo 5.4** Farklı sıcaklıklarda **DOB** için sıcaklık bölgeleri ve aktivasyon enerjileri

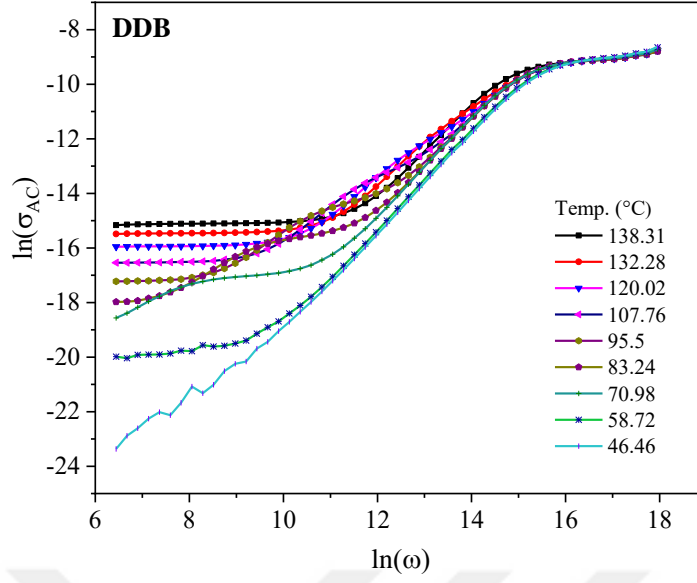
Sıcaklık (°C)	Açısal Frekans (rad/s)			
	62 1E3	79 1E3	99 1E3	0.12 1E6
56-60	0.440eV	0.235eV	0.303eV	0.171 eV
61-63	0.351eV	0.104eV	0.272eV	0.480 eV
64-68	1.217eV	1.35eV	1.26eV	1.19 eV
69-85	0.031eV	0.012eV	0.006eV	0.006eV
86-112	0.365eV	0.287eV	0.219eV	0.161eV
113-133	0.030eV	0.014eV	0.059eV	0.105eV
134-145	0.149eV	0.047eV	0.053eV	0.076eV

### 5.1.3 DDB ve DOB Sıvı Kristallerin İletkenliğinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi

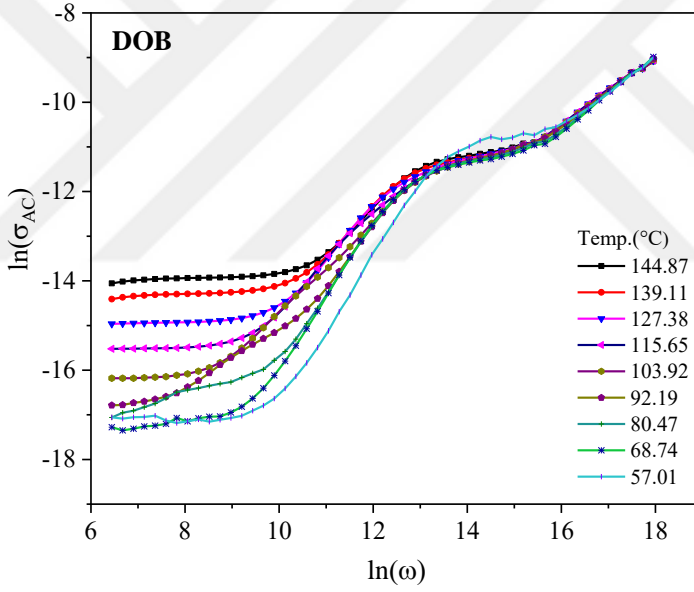
İletkenliğin frekans davranışının araştırılması genellikle Jonscher [67] tarafından tanımlanan güç yasası ilişkisi ile açıklanır;

$$\sigma(\omega) = \sigma_{dc} + \sigma_{ac}(A\omega^s) \quad (5.2)$$

Burada  $\sigma(\omega)$ , toplam iletkenliği gösterir. İlk terim, frekanstan bağımsız sıcaklığa bağlı DC iletkenliğini belirtir. İkinci terim, frekansa ve sıcaklığa bağlı  $\sigma_{ac}$ 'yi ve dielektrik relaksasyonu ifade eder. A bir sabittir ve s frekans üs değerini ifade eder [59–66]. Her sıcaklık için s verileri çeşitli frekans bölgelerinde hesaplanmıştır ( $\ln\sigma_{ac} = f(\ln\omega)$  eğrilerinin eğimi ile). Literatürdeki s değerlerine göre belirlenen iletkenlik mekanizmaları **Tablo 5.5**'te verilmiştir [60-66]. **Şekil 5.7**'de, **DDB** ve **DOB** sıvı kristallerinin açısal frekansa bağlı AC iletkenliğinin  $\ln\sigma_{ac} - f(\ln\omega)$  grafiklerini göstermektedir.  $\sigma_{ac}$  frekansla artar.



(a)



(b)

**Şekil 5.7** Farklı sıcaklıklarda (a) **DDB** ve (b) **DOB** için AC iletkenliğinin açısal frekansa bağlılığı

**Şekil 5.7 (a)** ve **(b)**'den hesaplanan sonuçlar **Tablo 5.6** ve **Tablo 5.7**'de verilmiştir. Bu **Tablo 5.6** ve **Tablo 5.7**, **DDB** ve **DOB** için frekans üssünün sıcaklık bağımlılığını gösterir. Farklı sıcaklıklar için  $s$  değeri,  $\ln\sigma_{ac}$ - $\ln\omega$  grafiklerinin eğimlerinden belirlenmiştir (bkz. **Şekil 5.7**).  $s$  verileri, yük taşıyıcılar arasındaki etkileşimleri temsil eder.

**Tablo 5.5** s parametresi ile belirlenen iletkenlik mekanizmaları (CM) [59-66]

Frekans üssü	CMs	Kısaltma
s=0	DC iletkenlik	DC İletk.
s=0.5	İlişkili bariyer boşaltma mekanizması	CBH
0.7<s<1	Kuantum tünelleme modeli	QMT
s=1	Sabit kayıp modeli	NCL
s>1	Süper lineer güç yasası	SLPL
s=2	Genişletilmiş çift yaklaşımı	EPA

**Tablo 5.6** DDB için farklı frekans bölgeleri ve sıcaklıklar için iletkenlik mekanizmaları

Sıcaklık Aralığı (°C)	Düşük frekans		Orta düzey frekans		Yüksek frekans	
	s	CMs	s	CMs	s	CMs
138.3	2.5x10 <sup>-2</sup>	DC İletk.	1.5	SLPL	2x10 <sup>-1</sup>	DC İletk.
132.2	2.5x10 <sup>-2</sup>	DC İletk.	1.3	SLPL	2.1x10 <sup>-1</sup>	DC İletk.
120	5.1x10 <sup>-2</sup>	DC İletk.	1.2	SLPL	2.1x10 <sup>-1</sup>	DC İletk.
107.7	7x10 <sup>-2</sup>	DC İletk.	1.1	SLPL	2.1x10 <sup>-1</sup>	DC İletk.
95.5	11x10 <sup>-2</sup>	DC İletk.	1.3	SLPL	2x10 <sup>-1</sup>	DC İletk.
83.2	7.4x10 <sup>-1</sup>	QMT	1.4	SLPL	2.5x10 <sup>-1</sup>	DC İletk.
70.9	5.2x10 <sup>-1</sup>	CBH	1.6	SLPL	2.2x10 <sup>-1</sup>	DC İletk.
58.7	2.5x10 <sup>-1</sup>	DC İletk.	1.7	SLPL	3x10 <sup>-1</sup>	DC İletk.
46.4	1.1	SLPL	1.7	SLPL	2.8x10 <sup>-1</sup>	DC İletk.

**Tablo 5.7 DOB için farklı frekans bölgeleri ve sıcaklıklar için iletkenlik mekanizmaları**

Sıcaklık Aralığı (°C)	Düşük frekans		Orta düzey frekans		Yüksek frekans	
	s	CMs	s	CMs	s	CMs
144.8	$5.6 \times 10^{-2}$	DC İletk.	$7.1 \times 10^{-1}$	QMT	$7.6 \times 10^{-1}$	QMT
139.1	$8.3 \times 10^{-2}$	DC İletk.	$7.9 \times 10^{-1}$	QMT	$7.3 \times 10^{-1}$	QMT
127.3	$7.8 \times 10^{-2}$	DC İletk.	$9.6 \times 10^{-1}$	QMT	$7 \times 10^{-1}$	QMT
115.6	$7 \times 10^{-2}$	DC İletk.	$9 \times 10^{-1}$	QMT	$7.5 \times 10^{-1}$	QMT
103.9	$10 \times 10^{-2}$	DC İletk.	$9.7 \times 10^{-1}$	QMT	$7.6 \times 10^{-1}$	QMT
92.1	$20 \times 10^{-2}$	DC İletk.	$9.8 \times 10^{-1}$	QMT	$7.7 \times 10^{-1}$	QMT
80.4	$32 \times 10^{-2}$	DC İletk.	1.2	SLPL	$7.7 \times 10^{-1}$	QMT
68.7	$23 \times 10^{-2}$	DC İletk.	1.4	SLPL	$7.6 \times 10^{-1}$	QMT
57	$7.5 \times 10^{-2}$	DC İletk.	1.5	SLPL	$7.2 \times 10^{-1}$	QMT

Bu çalışmada, bazı yeni muz tipi (bent-core, BC) sıvı kristallerin (**DDB** ve **DOB**) dielektrik ve iletkenlik özellikleri sıcaklık ve frekansın bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Dielektrik sabitinin açısal frekansa ve dielektrik kuvvetine bağlı olarak gerçek ve sanal bileşenlerinin değişimi çeşitli frekans bölgeleri için analiz edilmiştir. Araştırma BC bileşikleri, daha kararlı olan yüksek frekans alanında kolayca yeniden yönlendirilir. Mezofazlardaki iletkenlik, kristal halden çok daha yüksektir ve uygulamalar için BC sıvı kristallerinin potansiyel kullanımlarını vaat eder.  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  frekans ve sıcaklık bağımlılığında sırasıyla arayüzey ve yönlü polarizasyon ve dielektrik kaybı ile olan ilişkiyi gösterir. Bu sıvı kristaller (**DDB** ve **DOB**) için sıcaklığa ve açısal frekansa bağlı gerçek  $\epsilon'$  kısmının üç boyutlu (3D) grafikleri de sırasıyla çizilmiştir. Üç boyutlu (3D) grafiklerden görülebileceği gibi, faz geçiş sıcaklıklarında pikler net bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu sıvı kristaller için faz geçiş sıcaklıklarının PM ve DSC tekniğine ek olarak bu 3D grafiklerden belirlenebileceği kanıtlanmıştır. PM tekniği ile yapılan kapsamlı bir araştırmaya göre, **DDB** ve **DOB** sıvı kristalleri B1 mezofazını göstermektedir. **DDB** ve **DOB** için tüm dielektrik parametreler ( $\alpha$ ,  $\tau$  ve  $\Delta\epsilon_s$ ) belirlenmiş ve tablolarda verilmiştir. **DDB** için relaksasyon süreleri, **DOB** molekülünden daha küçüktür. Bu bakımdan **DDB** bileşiğinin, **DOB** bileşiğine göre daha yüksek karbon sayısı ile daha kolay hizalandığı tespit edilmiştir. Karbon sayısı artırılarak **DDB** molekülünde moleküler yönlendirme daha kolay hale geldiği görülmüştür. Ayrıca **DDB**'de faz geçiş sıcaklıklarının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu BC LC'lerin tüm dielektrik parametreleri  $\alpha$ ,  $\tau$  ve  $\Delta\epsilon_s$ 'nin PM, DSC teknikleri ile belirlenen faz geçiş sıcaklıklarında ani değişiklikler gösterdiği gözlemlenmiştir. Tez kapsamında incelenen BC LC'lerin dielektrik gevşeme mekanizması Cole-Cole eğrileri ile analiz edilmiştir. Literatürdeki verilere göre Cole-Cole grafiğindeki dikey çizgiler süper kapasitif davranışı temsil etmektedir. Bu nedenle elde edilen veriler sayesinde, bu BC LC'lerin uygulamalar için çok önemli olan farklı sıvı kristaller kullanılarak süper kapasitör uygulamalarında kullanılabileceğini kanıtlanmıştır.

- [1] F. Reinitzer, "Beiträge zur kenntniss des cholesterins," Monatshefte für Chemie und verwandte Teile anderer Wissenschaften, vol. 9, no. 1, pp. 421–441, 1888.
- [2] O. Lehmann, "Über fließende krystalle," Zeitschrift für Physikalische Chemie, vol. 4, pp. 462–472, 1889.
- [3] G. W. Gray, *Molecular Structure and Properties of Liquid Crystals*. New York: Clarendon Press, 1962.
- [4] J. W. Goodby, P. J. Collings, T. Kato, C. Tschierske, H.F. Gleeson, P. Raynes, *Handbook of liquidcrystals*, Weinheim: Wiley-VCH, 2014.
- [5] R. A. Reddy and C. Tschierske, Bent-core liquid crystals: polar order, superstructural chirality and spontaneous desymmetrisation in soft matter systems, *J. Mater. Chem.* 16, 907–961, 2006.
- [6] C. Tschierske, Development of Structural Complexity by LiquidCrystal Self-assembly, *Angew. Chem. Int. Ed.* 52, 8828–8878, 2013.
- [7] H. Kelker ve B. Scheurle, "A liquid–crystalline (nematic) phase with a particularly low solidification point," *Angewandte Chemie International Edition in English*, vol. 8, no. 11, pp. 884–885, 1969.
- [8] G. W. Gray, K. Harrison, ve J. Nash, "New family of nematic liquid crystals for displays," *Electronics Letters*, vol. 9, pp. 130–131, 1973.
- [9] E.P. Raynes, I.C.Sage, *Chemicals to calculators: the early exploitation of cyanobiphenyl liquid crystals*. *Liq. Cryst.* 42(5–6), 722–731, 2015.
- [10] M. Schadt, Nematic liquid crystals and twisted-nematicLCDs. *Liq Cryst.* 42(5–6), 646–652, 2015.
- [11] T. Niori, T. Sekine, J. Watanabe, T. Furukawa, ve H. Takezoe, "Distinct ferroelectric smectic liquid crystals consisting of banana shaped achiral molecules," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 6, pp. 1231–1233, 1996.
- [12] R. A. Reddy ve C. Tschierske, "Bent–core liquid crystals: polar order, superstructural chirality and spontaneous desymmetrisation in soft matter systems," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 16, pp. 907–961, 2006.

- [13] W. Iglesias and A. Jakli, in Handbook of Liquid Crystals, ed. J. W. Goodby, P. J. Collings, T. Kato, C. Tschierske, H. F. Gleeson and P. Raynes, Wiley-VCH, Weinheim, 2nd edn, vol. 8, pp. 799-814, 2014.
- [14] G. Pelzl, S. Diele, W. Weissflog, Banana-shaped compounds a new field of liquid crystals. *J Adv Mater.* 11, 707-724, 1999.
- [15] H. Takezoe, Y. Takanishi, Bent-core liquid crystals: their mysterious and attractive world. *Jpn J Appl Phys.* 45, 597-625, 2006.
- [16] G. Shanker, C.V. Yelamaggad, A new class of low molar mass chiral metallomesogens: synthesis and characterization, *J. Mater. Chem.* 21 (39), 15279-15287 2011.
- [17] C.V. Yelamaggad, G. Shanker, Mesomorphic chiral non-symmetrical dimers: synthesis and characterization, *Liq. Cryst.* 34 (7), 799-809, 2007.
- [18] C.V. Yelamaggad, G. Shanker, Synthesis and characterization of non-symmetric chiral dimers, *Liq. Cryst.* 34 (9), 1045-1057, 2007.
- [19] R. Achten, A. Koudijs, M. Giesbers, A.T.M. Marcelis, E.J.R. Sudholter, Non symmetric bent core mesogens with one terminal vinyl group, *Liq. Cryst.* 32, 277-285, 2005.
- [20] Thermotropic Liquid Crystals, ed. G. Pelzl, W. Weissflog, A. Ramamoorthy, Springer, pp. 1-58, 2007.
- [21] S. Balamurugana, P. Kannan, K. Yadupati, A. Roy, Electro-optical investigations and effect of asymmetry in bent-core liquid crystals, *Liq. Cryst.* 38(9), 1199-1207, 2011.
- [22] R. Achten, R. Cuypers, M. Giesbers, A. Koudijs, A.T.M. Marcelis, E.J.R. Sudholter, Asymmetric banana-shaped liquid crystals with two different terminal alkoxy chains, *Liq. Cryst.* 31(8), 1167-1174, 2004.
- [23] W. Weissflog, G. Naumann, B. Kosata, M. W. Schröder, A. Eremin, S. Diele, Z. Vakhovskaya, H. Kresse, R. Friedemann, S. Ananda Rama Krishnan, G. Pelzl, *J. Mater. Chem.* 15, 4328-4337, 2005.
- [24] R. A. Reddy, U. Baumeister, J. L. Chao, H. Kresse, C. Tschierske, *Soft Matter* 6, 3883-3897, 2010.

- [25] H. Ocak, B. Bilgin-Eran, M. Prehm, C. Tschierske, Bent-core compounds with two branched chains: evidence of a new dark conglomerate mesophase, *Soft Matter* 9, 4590-4597, 2013.
- [26] S. Ellinger, A. Kreyes, U. Ziener, C. Hoffmann-Richter, K. Landfester, M. Möller, *Eur. J. Aggregation Phenomena of Long  $\alpha$ - and  $\alpha,\omega$ -Substituted Oligothiophenes – the Effect of Branched vs. Linear End-Groups*, *Org. Chem.* 5686-5702, 2007.
- [27] S. K. Varshney, V. Prasad, H. Takezoe, Room-temperature discotic cholesteric and nematic phases: influence of 3,7-dimethyloctane peripheral chain on the molecular self-assembly of radial polyalkynylbenzene, *Liq. Cryst.* 38, 53-60, 2011.
- [28] C. K. Lee, S. S. Kwon, T. S. Kim, E. J. Choi, S. T. Shin, W. C. Zin, D. C. Kim, J. H. Kim, L. C. Chien, Synthesis and properties of new materials with banana-shaped achiral cores and chiral end groups, *Liq. Cryst.* 30, 1401-1406, 2003.
- [29] D. Shen, A. Pegenau, S. Diele, I. Wirth, C. Tschierske, *J. Am. Chem. Soc.* 122, 1593-1601, 2000.
- [30] H. Ocak, B. Bilgin-Eran, M. Prehm, S. Schymura, J.P.F. Lagerwall, C. Tschierske, Effects of chain branching and chirality on liquid crystalline phases of bent-core molecules: blue phases, de Vries transitions and switching of diastereomeric states. *Soft Matter* 7, 8266-8280, 2011.
- [31] H. Ocak, B. Bilgin Eran, S. Nuray, A. Özkonstanyan, S. Poppe, C. Tschierske, Extraordinary Magnetic Field Effects on the LC Phases of Homochiral and Racemic 4-Cyanoresorcinol-Based Diamagnetic Bent-Core Mesogens, *J. Mater. Chem. C* 9, 1895-1910, 2021.
- [32] H. Ocak, B. Bilgin-Eran, M. Prehm, C. Tschierske, Effects of molecular chirality on superstructural chirality in liquid crystalline dark conglomerate phases, *Soft Matter* 8, 7773-7783, 2012.
- [33] R. A. Reddy, B. K. Sadashiva, U. Baumeister, Liquid crystalline properties of unsymmetrical bent-core compounds containing chiral moieties, *J. Mater. Chem.* 15, 3303-3316, 2005.
- [34] D. Güzeller, H. Ocak, B. Bilgin-Eran, M. Prehm, C. Tschierske, Development of tilt, biaxiality and polar order in bent-core liquid crystals derived from 4'-hydroxybiphenyl-3-carboxylic acid, *J. Mater. Chem. C* 3, 4269-4282, 2015.

- [35] N V. Patil, B. N. Veerabhadraswamy, S. Chakraborty, S. M. Khened, R. D. Mathad, C. V. Yelamagad, Dielectric study of three homologous Schiff base ferroelectric liquid crystals with the variations of temperature and frequency, *J. Adv. Dielect.* 10, 2050019, 2020.
- [36] R. Balachandran, V. P. Panov, J. K. Vij, G. Shanker, C. Tschierske, K. Merkel, A. Kocot, Dielectric and electro-optic studies of a bimesogenic liquid crystal composed of bent-core and calamitic units, *Phys. Rev. E* 90 (3), 032506, 2014.
- [37] S. M. Kelly, M. O'Neil, Liquid Crystals for ElectroOptic Applications, In: *Liquid Crystals, Display and Laser Materials, Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices*, Nalwa H.S. (Eds.), Academic Press, pp.1-66, 2000.
- [38] K. N. Rao, "A novel class imbalance learning method using subset filtering," 2012.
- [39] M. Schadt, "Liquid crystal materials and liquid crystal displays," *Annual Review of Materials Research*, vol. 27, pp. 305–379, 1997.
- [40] D. Çağıl, N. Kaya ve Ahmet Alıcılar, "Y-H tipi sıvı kristal sistemlere karbon nanotüp ilavesinin moleküler yönelme ve faz geçişi üzerine etkileri, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 26, s. 1, ss. 213–221, 2011.
- [41] M. Okutan, "Fulleren ve azot boya katkılı nematik sıvı kristal sistemlerde dielektrik ve optik spektroskopi yöntemleri ile moleküler durulma zamanlarının ve kırılma indisi değişimlerinin incelenmesi," *Doktora tezi, Fizik Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye*, 2010.
- [42] Alptekin Yıldız, 'Sıvı Kristallerde Faz Geçiş Sıcaklıklarının Dielektrik Spektroskopi Yöntemi ile İncelenmesi' *Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2019.
- [43] P. de Gennes, *The Physics of Liquid Crystals*, ser. The International series of monographs on physics. New York: Clarendon Press, 1974.
- [44] Donino, B., Guillion, D., Deschenaux, Bruce, D.W., *Comprehensive Coordination Chemistry II* Eds. McCleverty, J.A., Meyer, T.J., Pergamon, Oxford, 2003.
- [45] Bilen, K., *Isıtılan Düzlem Bir Plakaya Dik ve Eğik Hava Jeti Çarpmasında Isı Transfer Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi*, *KTÜ Fen Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon*, 86, 1994.

- [46] Demus, D., "Plenary Lecture. One hundred years of liquid-crystal chemistry: Thermotropic liquid crystals with conventional and unconventional molecular structure", *Liquid Crystals*, 5(1): 75-110, 1989.
- [47] D. Vorländer ve A. Apel, "Die richtung der kohlenstoff-valenzen in benzolabkömmlingen (ii.)," *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft (A and B Series)*, vol. 65, no. 7, pp. 1101–1109, 1932.
- [48] Colling P. and Hird, M., "Introduction to Liquid Crystals, Chemistry and Physics", Taylor & Francis Ltd, 2001.
- [49] Değirmenci, M., (1996). Sıvı Kristal Polimerler, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Bölümü, Yüksek Lisans Semineri, Elâzığ, 58.
- [50] Müge Erdoğan, 'Sıvı Kristal Kompozitlerin Dielektrik Özellikleri', Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021,.
- [51] R. Achten, Banana-shaped liquid crystals. Wageningen: Online Press, 2006.
- [52] H. Fröhlich, Theory of Dielectrics: Dielectric Constant and Dielectric Loss, ser. Monographs on the physics and chemistry of materials. London: Clarendon Press, 1949.
- [53] C. V. Yelamaggad, I. Shashikala, D. S. Shankar, ve S. Krishna Prasad, "Bent-core v-shaped mesogens consisting of salicylalimine mesogenic segments: synthesis and characterization of mesomorphic behaviour," *Liquid Crystals*, vol. 31, no. 7, pp. 1027–1036, 2004.
- [54] G. Gray, V. Vill, H. Spiess, D. Demus, ve J. Goodby, *Physical Properties of Liquid Crystals*. Manchester: Wiley, 2009.
- [55] J. Hemine, A. Daoudi, R. Douali, A. El Kaaouachi, A. Nafidi, C. Legrand, ve A. Bouajaj, "Dielectric spectroscopy of the electroclinic effect in the ferroelectric liquid crystal materials," *Spectroscopy Letters*, vol. 47, no. 5, pp. 341–347, 2014.
- [56] H. Pellat, "Des diélectriques et de leur polarisation réelle," *Physique*, vol. 9, p. 313, 1900.
- [57] Aysel Büyükbaş, 'AuGe/SiO<sub>2</sub>/p-Si/AuGe (MOS) Kapasitörün Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi', Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.

- [58] N. Y. Canlı, H. Ocak, H. Kara, G. Bakırdögen ve B. B. Eran, "Synthesis, characterization and investigation of mesomorphic and dielectric properties of novel biphenyl-based bent-core liquid crystals, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 32, p. 24560-24574, 2021.
- [59] J. P. Tiwari, K. Shahi, Ion dynamics in mechanochemically synthesized amorphous fast ionic conductor  $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Sb}_2\text{S}_3$ , *Solid State Ionics* 176, 1271-1280, 2005.
- [60] S. M. Ke, H. T. Huang, S. H. Yu, L. M. Zhou, Ion and electron irradiation-induced effects in nanostructured materials, *Journal of Applied Physics* 107, 071301, 2010.
- [61] C. Cramer, M. Buscher, Complete conductivity spectra of fast ion conducting silver iodide/silver selenate glasses, *Solid State Ionics* 105, 109-120, 1998.
- [62] P. Lunkenheimer, T. Gotsfried, R. Fichtl, S. Weber, T. Rudolf, A. Loidl, A. Reller, S. G. Ebbinghaus, Apparent giant dielectric constants, dielectric relaxation, and ac-conductivity of hexagonal perovskites  $\text{La}_{1.2}\text{Sr}_{2.7}\text{BO}_{7.33}$  ( $B=\text{Ru, Ir}$ ), *Journal of Solid State Chemistry* 179, 3965-3973, 2006.
- [63] T. Tiwari, N. Srivastava, P. C. Srivastava, Ion Dynamics Study of Potato Starch + Sodium Salts Electrolyte System, *International Journal of Electrochemistry* 8, Article ID 670914, 2013.
- [64] P. N. Vishwakarma, Ac conductivity in boron doped amorphous carbon films, *Solid State Communications* 149, 115-120, 2009.
- [65] C. G. Elliott, B. Y. Rasmusson, R. O. Crapo, A. H. Morris, R. L. Jensen, Prediction of pulmonary function abnormalities after adult respiratory distress syndrome (ARDS), *American Review of Respiratory Disease* 135, 634, 1987.
- [66] S. R. Elliott, Frequency-dependent conductivity in ionically and electronically conducting amorphous solids, *Solid State Ionics* 70, 27-40, 1994.
- [67] A.K. Jonscher, "Universal Relaxation Law", Chelsea Dielectric Press, London, 1996.
- [68] B. B. Eran, A. Nesrullajev, ve N. Y. Canli, "Characterization and investigation of the mesogenic, thermo-morphologic and thermotropic properties of new chiral(s)-5-octyloxy-2-[4-(2-methylbutoxy)-phenylimino(methyl)]phenol liquid crystalline compound," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 111, no. 2-3, pp. 555-558, 2008.

### Makale

1. N. Y.Canli, H. Ocak, H. Kara, G. Bakırdögenand B. B. Eran, "Synthesis, characterization and investigation of mesomorphic and dielectric properties of novel biphenyl-based bent-core liquid crystals, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, vol. 32, p. 24560-24574, 2021.

### Konferans Bildirileri

1. N. Y. Canli, M. Erdogan, H. Kara, "Comparison of dielectricparametres of novel banana-shaped liquidcrystals", 4th International Conference on Physical Chemistry & FunctionalMaterials (PCFM 2021), Elazığ, Türkiye, 2021.