

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI MEZOFAZ SERGİLEYEN SIVI KRİSTALLERİN
MORFOLOJİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI

Dilek ÖZÜKANAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Danışman

Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

Eş Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Asuman AŞIKOĞLU BOZKURT

Şubat, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI MEZOFAZ SERGİLEYEN SIVI KRİSTALLERİN
MORFOLOJİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Dilek ÖZÜKANAR tarafından hazırlanan tez çalışması 23.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Asuman AŞIKOĞLU
BOZKURT

İzmir Demokrasi Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Serap GÜNEŞ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşe ÇELİK BEDELOĞLU, Üye

Bursa Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Farklı Mezofaz Sergileyen Sıvı Kristallerin Morfolojik ve Dielektrik Özelliklerinin Araştırılması” 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.

Dilek ÖZÜKANAR

İmza



Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimin başından itibaren ve tez çalışmalarımı yaptığım süreçte bilgisi ve tecrübesi ile her zaman yol gösteren, motive eden, inanan, desteğini ve aynı zamanda sevgisini de her zaman hissettiren, bu yolda en büyük şansım, çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI' ya çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım süresince yine yardımlarını eksik etmeyen Arş. Gör. Pelin KAVAK hocama teşekkür ederim. Tez çalışmamda bulundukları katkılardan dolayı Kimya bölümünden Prof. Dr. Belkız Bilgin ERAN hocama ve Arş. Gör. Deniz VARDAR' a teşekkürlerimi bildiririm. Ayrıca Asuman AŞIKOĞLU BOZKURT hocama da teşekkürlerimi bildiririm.

Laboratuvar çalışmalarımızı birlikte yürüttüğümüz, güzel bir eğitim dönemi geçirdiğimiz arkadaşım Merve UYUNMAZ' a çok teşekkür ederim. Bu süreçte yine birlikte çalıştığım arkadaşlarım İrem ÇAKIR ve İlkay KARA' ya teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitime başlamam doğrultusunda beni yönlendiren ve destekleyen Prof. Dr. Deniz DEĞER ULUTAŞ hocama teşekkürlerimi sunarım.

Beni her zaman destekleyen, hep yanımda olan Canım Anneciğime, kardeşime ve 2020 yılında kaybettiğim babama teşekkür ederim.

Dilek ÖZÜKANAR

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	2
1.3 Hipotez.....	3
2 SIVI KRİSTALLER	4
2.1 Sıvı Kristallerin Tarihçesi	4
2.2 Sıvı Kristallerin Tanımı ve Özellikleri	5
2.3 Sıvı Kristallerin Molekül Yapıları	6
2.4 Sıvı Kristallerin Sınıflandırılması	7
2.4 Sıvı Kristallerin Fiziksel Özellikleri	17
2.5 Sıvı Kristallerin Uygulama Alanları	20
3 DİELEKTRİK ÖZELLİKLER	22
3.1 Dielektrik Malzemeler	22
3.2 Noktasal Yük Etkileşimleri.....	22
3.3 Kutuplanma (Polarizasyon)	25
3.5 Dielektrik Relaksasyon Davranışları	28
4 MATERYAL VE YÖNTEM	31
4.1 İncelenen Sıvı Kristal Malzemeler	31
4.2 Cr ve LC bileşiklerinin sentezi	32
4.3 Kullanılan Cihazlar	32
4.4 Sıvı Kristal Hücrelerin Hazırlanması ve Deney Düzenegi	34
5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
5.1 Kullanılan Sıvı Kristal Malzemelerin Mesomorfik İncelemeleri	37
5.2 5CB, 5CB+(%2)LC, 5CB+(%5)LC, 5CB+(%2)Cr, 5CB+(%5)Cr Malzemelerin Dielektrik Ölçüm Sonuçları	38
5.3 LC ve Cr Bileşiklerinin Farklı Konsantrasyonlarının Frekansa Bağlı İletkenlik Üzerindeki Etkisinin Analizi	45

6 SONUÇ	49
KAYNAKÇA	51
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	59



SİMGE LİSTESİ

σ_{AC}	AC iletkenlik
ω	Açısal hız
I	Akım
ϵ_r	Bağıl geçirgenlik
ϵ_0	Boş uzayın dielektrik geçirgenliği
σ_0	DC iletkenlik
$\Delta\epsilon_s$	Dielektrik dayanım
R	Direnç
$\hat{n}$	Doğrultu vektörü
α	Durulma parametresi
τ	Durulma zamanı
ϵ_s	Düşük frekanslarda dielektrik sabiti
D	Elektriksel akı yoğunluğu
E	Elektrik alan
V	Elektriksel potansiyel
Z	Empedans
φ	Faz açısı
f	Frekans
f_r	Gevşeme frekansı
s	İletkenlik üssel yasa katsayısı
I_{so}	İzotropik faz
C	Kapasitans
δ	Kayıp açısı
ϵ^*	Kompleks dielektrik sabiti

ϵ'	Kompleks dielektrik sabitinin gerçek kısmı
ϵ''	Kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmı
$\epsilon''_{\max}$	Kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmına ait maksimum değeri
P	Kutuplanma vektörü
θ	Molekülün uzun eksenini ile yönlendirici arasında kalan açı
N	Nematik faz
ϵ	Ortaman dielektrik geçirgenliği
S_{mA}	Simetrik A fazı
ϵ_{∞}	Yüksek frekanslarda dielektrik sabiti
σ	Yüzey yük yoğunluğu

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
DSC	Diferansiyel tarama kalorimetrisi
ITO	İndiyum kalay oksit (İndiyum-tin-oxide)
Cr	Kristal
LC	Sıvı kristal
LCD	Sıvı kristal ekran
NMR	Nükleer manyetik rezonans
5CB	4-siyano-4'-pentilbifenil

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Sıvı kristal faza sahip malzemenin sıcaklığa bağlı faz geçişi.....	6
Şekil 2.2	Bir sıvı kristal molekülünün genel yapısı.....	7
Şekil 2.3	Sıvı kristallerin sınıflandırması.....	7
Şekil 2.4	Termotropik sıvı kristallerin faz geçişleri.....	8
Şekil 2.5	Liyotropik sıvı kristallerin faz geçişleri.....	9
Şekil 2.6	(a) Kalamitik(çubuksu), (b) Bent-Core(muz şekilli), (c)Diskotik(Disk şekilli) sıvı kristallerin molekül geometrisine göre sınıflandırması.....	9
Şekil 2.7	Kalamitik sıvı kristal molekülü.....	10
Şekil 2.8	(a) Nematik sıvı kristallerin şematik görünümü ve yönelim düzeni (b) Nematik sıvı kristale ait tekstür örneği.....	10
Şekil 2.9	(a) Smektik A sıvı kristalinin şematik görünümü ve yönelim düzeni (b) Smektik A sıvı kristale ait tekstür örneği.....	12
Şekil 2.10	(a) Smektik B sıvı kristalinin şematik görünümü ve moleküllerin yönelim düzeni (b) Smektik B sıvı kristale ait tekstür örneği	12
Şekil 2.11	(a) Smektik C sıvı kristalinin moleküllerin yönelim düzeni (b) Smektik C sıvı kristale ait tekstür örneği.....	13
Şekil 2.12	Kolesterik kristallerin (a) molekül yönelimleri (b) polarize mikroskop görüntüsü.....	14
Şekil 2.13	Nematik, smektik ve kolesterik sıvı kristallerin molekül düzenleri...	14
Şekil 2.14	Muz şekilli sıvı kristallerin molekül yapısı.....	15
Şekil 2.15	Diskotik sıvı kristallerin molekül yapıları.....	16
Şekil 2.16	Bent-core ve diskotik sıvı kristallerin şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.17	Sıvı kristallerin (a) planar (b) homeotropik yönelim şekilleri	17
Şekil 2.18	Polarize olmayan bir ışığın sıvı kristal ortamda davranışı	18
Şekil 3.1	Noktasal iki yükün etkileşimi.....	22
Şekil 3.2	Boşluk kapasitörünün şekli.....	24
Şekil 3.3	Dielektrik kapasitörünün şekli.....	25
Şekil 3.4	Bir dipol momentin yönelimi (a) Elektrik alan yokken (b) Elektrik alan varken.....	26
Şekil 3.5	Elektrik alan altında negatif ve pozitif yüklere etki eden kuvvetler.....	26
Şekil 3.6	Plakalar arasında boşluk ve dielektrik varken oluşan gauss yüzeyi	27
Şekil 3.7	Dielektrikler için debye eğrisi.....	30

Şekil 3.8	Dielektrikler için Cole-Cole eğrisi.....	31
Şekil 4.1	Tüm bileşiklerin molekül yapıları.....	32
Şekil 4.2	Sentezlenen bileşiklerin molekül yapısı.....	33
Şekil 4.3	Polarizasyon mikroskobu.....	34
Şekil 4.4	DS ölçümler için numune hazırlama aşamaları.....	36
Şekil 4.5	Sıvı kristal hücrenin yapısı.....	36
Şekil 4.6	Dielektrik Spektroskopi deney düzeneği.....	37
Şekil 5.1	(a) Cr ve (b) LC bileşiklerinin FT-IR sonuçları.....	38
Şekil 5.2	Cr ve LC malzemelerin polarize ışık mikroskobu tekstür görüntüleri (a) $T=39\text{ }^{\circ}\text{C}$ Cr; (b) $T=132\text{ }^{\circ}\text{C}$ LC.....	39
Şekil 5.3	Dielektrik sabitinin reel kısmının (ϵ') açısal frekansa göre değişimi (a) 5CB, 5CB+(%2) LC, 5CB+(%5) LC (b) 5CB, 5CB+(%2) Cr, 5CB+(%5) Cr.....	40
Şekil 5.4	Dielektrik sabitinin sanal kısmının (ϵ'') açısal frekansa göre değişimi (a) 5CB, 5CB+(%2) LC, 5CB+(%5)LC (b) 5CB, 5CB+(%2) Cr, 5CB+(%5) Cr.....	42
Şekil 5.5	Cole-Cole eğrileri (a) 5CB, 5CB+(%2)LC, 5CB+(%5)LC (b) 5CB, 5CB+(%2) Cr, 5CB+(%5)Cr.....	43
Şekil 5.6	5CB, 5CB+%2LC, 5CB+%5LC, 5CB+%2Cr, 5CB+%5Cr için konsantrasyona bağlı (a) dielektrik dayanım değişim grafiği (b) $\epsilon''_{\max}$ ' in değişim grafiği.....	45
Şekil 5.7	5CB'ye eklenen LC ve Cr bileşiğin konsantrasyona bağlı dielektrik sabitinin değişimi.....	46
Şekil 5.8	$\ln \sigma_{AC} - \ln \omega$ grafiği (a) 5CB, 5CB+%2LC, 5CB+%5LC (b) 5CB, 5CB+%2Cr, 5CB+%5Cr.....	47

TABLO LİSTESİ

Tablo 5.1	5CB ve tüm kompozitler için $\epsilon''_{\max}$, ϵ_s , ϵ_{∞} , $\Delta\epsilon$ ve f_r değerleri.....	44
Tablo 5.2	5CB, 5CB+%2LC, 5CB+%5LC, 5CB+%2Cr, 5CB+%5Cr için s parametreleri ve iletkenlik mekanizmaları.....	48



Farklı Mezofaz Sergileyen Sıvı Kristallerin Morfolojik ve Dielektrik Özelliklerinin Araştırılması

Dilek ÖZÜKANAR

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

Eş-Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Asuman AŞIKOĞLU BOZKURT

Uygulamalarda en çok kullanılan sıvı kristal türü nematik sıvı kristallerdir. Nematik sıvı kristallerin molekülleri diğer sıvı kristallere göre en az düzene sahiptirler. Bu onların dış etkilere kısa sürede tepki vermelerini sağlar. Bu özellikleri nematik sıvı kristalleri uygulamalarda kullanışlı hale getirir. Bu tür sıvı kristaller, uygulamalara uygun daha iyi elektro-optik özellikler elde etmek için farklı LC malzemeler ile katkılanarak kullanılırlar. Bu çalışmada farklı aromatik halka sayısı bulunan benzer moleküler yapıda iki bileşik (LC ve Cr) ile katkılanmış 5CB nematik sıvı kristalinin tüm dielektrik özellikleri araştırılmıştır.

Dielektrik parametreler (ϵ' , ϵ'' , $\Delta\epsilon$ (dielektrik güç), f_r (relaksasyon frekansı)) dielektrik spektroskopi yöntemi kullanarak oda sıcaklığında belirlendi. 5CB nematik sıvı kristaline %2 ve %5 oranlarında sıvı kristal bileşik eklendiğinde dielektrik sabitinin gerçek kısmının (ϵ') değerinin arttığı, kristal bileşik eklendiğinde ise dielektrik sabitinin gerçek kısmının azaldığı gözlemlendi. 5CB nematik sıvı kristaline, LC katkısı ile Cole-Cole eğrilerinin çapı, dielektrik dayanım

ve $\epsilon''_{\max}$ verilerinde artış gözlenirken, Cr katkısı ile azalma olduğu görüldü. Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan karışımlarda, 5CB+LC' nin dielektrik özelliklerinin iki sıvı kristal karışımında ve LC katkı oranının fazla olduğu durumda arttığı görüldü. Ek olarak, konsantrasyona bağlı olarak dielektrik dayanımın da arttığı belirlendi. 5CB' ye LC katkısında dielektrik özelliklerinde iyileşme görülür iken Cr katkısında ise dielektrik özelliklerde azalma olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sıvı kristaller, dielektrik parametreler, kompozitler.



Investigation of Morphological and Dielectric Properties of Liquid Crystals Exhibiting Different Mesophases

Dilek ÖZÜKANAR

Department of Physics

Master of Science

Supervisor: Prof. Dr. Nimet YILMAZ CANLI

Co-supervisor: Asst. Prof. Dr. Asuman BOZKURT AŞIKOĞLU

The most commonly used type of liquid crystals in applications are nematic liquid crystals.

The molecules of nematic liquid crystals have the least order compared to other liquid crystals. This makes them respond to external influences in a short time. These properties make nematic liquid crystals useful in applications. Such liquid crystals are used by doping with different LC materials to obtain better electro-optical properties suitable for applications. In this study, all dielectric properties of 5CB nematic liquid crystal doped with two compounds with similar molecular structure (LC and Cr) with different number of aromatic rings were investigated.

Dielectric parameters (ϵ' , ϵ'' , $\Delta\epsilon$ (dielectric power), f_r (relaxation frequency)) were determined at room temperature using the dielectric spectroscopy method. It was observed that when 2% and 5% liquid crystal compound was added to the 5CB nematic liquid crystal, the value of the real part of the dielectric constant (ϵ') increased, and when the crystal compound was added, the real part of the dielectric constant decreased. While an increase in the diameter of the Cole-Cole curves, dielectric strength and $\epsilon''_{\max}$ data was observed with the addition of LC to the 5CB

nematic liquid crystal, a decrease was observed with the addition of Cr. In the mixtures prepared at different concentrations, it was observed that the dielectric properties of 5CB+LC increased in the mixture of two liquid crystals and when the LC additive ratio was high. Additionally, it was determined that dielectric strength increased depending on concentration. While there was an improvement in dielectric properties with LC addition to 5CB, a decrease in dielectric properties was observed with Cr addition.

Keywords: Liquid crystals, dielectric parameters, composites.





1.1 Literatür Özeti

Sıvı kristaller, 19. yüzyılın sonlarına doğru keşfedilmiştir [1]. Yakın zamanda keşfedilmelerine rağmen birçok bilim insanının ilgisini çekmiş ve araştırmalarına konu olmuştur [2, 3].

Sıvı kristal moleküller, katı kristallerin özelliklerine sahip olmakla birlikte aynı zamanda sıvıların akışkanlık özelliğine de sahiptirler. Yönelimsel düzene de sahip olmalarından kaynaklı optik, mekanik, fiziksel ve elektriksel özelliklerinde değişim göstermektedirler. Sıvı kristallerin sahip oldukları bu özellikler sayesinde sıvı kristal cihaz uygulamalarında da büyük oranda gelişme sağlanmıştır [4, 5]. 20. yüzyılın son yıllarından itibaren sıvı kristallerin ileri teknolojik uygulamalarda kullanılabilmesi için araştırmalar yapılmaya başlanmıştır [6, 7]. Farklı geometriye sahip olan sıvı kristallerin keşfiyle sıvı kristallerin sentez ve karakterizasyon yöntemleri üzerinde yeni çalışmalar yapılmasının önünü açılmıştır [8, 9].

Sıvı kristaller, katıların ve sıvıların özelliklerini gösterdiklerinden dolayı moleküllerinin davranışları çeşitlidir. Bu durum bilim insanlarını, sıvı kristallerin farklı yönlerini de incelemesinin önünü açmıştır. Sonuçta birçok bilgi elde edilmiş olup uygulamaları oldukça geniş bir alana yayılmıştır.

Sıvı kristaller birbirlerinden farklı özelliği olan anizotropik mezofazlar gösterirler. Bu mezofazların oluşumunda farklı tekstür görüntüleri elde edilir. Tekstürler sıvı kristallerin mezomorfik, optik, morfolojik ve yapısal özellikleri hakkında bilgi verirler. Dış etkilere karşı hassastırlar [10, 11]. Bu tekstürlerin incelenmesi, sıvı kristallerin yapısı hakkında daha ayrıntılı bilgi sahibi olmayı sağlar.

Sıvı kristallerde, mezofazların arasında faz geçişleri gözlenir. Bu faz geçişlerinde yapı, simetri ve fiziksel özelliklerinde değişim görülür [10, 12, 13]. Bu geçiş ve değişimlerin incelenmesi fiziksel olarak anizotropik ve izotropik fazlar arasında olmasından dolayı ayrı bir önem taşır. Faz geçişleri 1. derece ve 2. derece geçişler olarak ayrılabilir. 1. derece faz geçişleri Smektik, Kolesterik ve Nematik fazlar ile

İzotropik sıvı faz arasında meydana gelmektedir. 2. derece faz geçişlerin de mezofaz ile izotropik sıvı arasındaki geçişleri araştırılmaktadır [14].

Farklı özelliklere sahip yeni sıvı kristal mezogenlerin sentezlenmesi ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi malzeme bilimi ve bunların uygulamaları açısından önemli bir yere sahiptir. Sıvı kristaller hakkında güncel olarak nitelendirebileceğimiz bu çalışmalar, teknolojik uygulamalar ve bilimsel araştırmalar açısından önemlidir [14].

Yapılan çalışmalarda sıvı kristallerin tensör ve anizotropi, manyetik, optiksel ve dielektrik özellikleri, akışkanlık ve viskozite, difüzyon, elastisite özellikleri, kusurlar ve tekstürler görüntüleri bilim insanları tarafından incelenmiştir. Bu fiziksel ve kimyasal özellikler sıvı kristallerin karakterizasyonlarının doğru yapılması adına da önemlidir [15].

Sıvı kristal moleküllerin yönelimleri, elektro-optik davranışları ile belirlenir ve moleküller dış etkiler ve molekül etkileşimler ile yeniden yönelim gösterebilir. Karakterizasyon yöntemleri, sıvı kristallerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre değişiklik gösterir. Kırılma indisi, empedans ve dielektrik spektroskopisi gibi yöntemler, sıvı kristallerin elektro-optiksel özelliklerini belirlemek için kullanılan önemli metotlardır [15, 16-20]. İlk olarak boya ve polimer katkılanmış sıvı kristaller ile elektro-optik özellikler başta olmak üzere bilim insanları, sıvı kristallerin farklı fiziksel özellikleri üzerine çalışmalar yapmıştır [21-26]. Ülkemizde de sıvı kristaller üzerine birçok çalışma yürütülmüştür [27-40].

Bu yöntemlerden tez çalışması kapsamında da kullanılan dielektrik spektroskopisi, hassas ölçüm sonuçları sağlaması açısından önemli bir yere sahiptir. Dielektrik spektroskopisi, bir elektrik alan altında malzemenin davranışını inceler ve malzemenin uygulanan alana vermiş olduğu cevabı, uygulanan alan fonksiyonuna bağlı olarak ölçer [41].

1.2 Tezin Amacı

Sıvı kristal (LC), molekülleri katıların özelliklerinden optik ve elektrik anizotropi sıvıların özelliklerinden moleküler akışkanlığı gösterirler. Sıcaklık değişimine bağlı olarak çeşitli mezofaz sergileyen sıvı kristallerin faz geçiş sıcaklıkları, mezofazların

oluşum sıcaklık aralıklarının bilinmesi uygulamalarda yol gösterici olmaktadır [14].

Bu tez çalışmasında malzemelerin incelenmesi Dielektrik Spektroskopi tekniği kullanılarak yapılacaktır. Geniş bir sıcaklık ve frekans aralığı kullanılarak tüm faz geçişleri üzerinden dielektrik özelliklerini incelemek amaçlanmaktadır. Elde edilen ölçüm sonuçlarından kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları, dielektrik rahatlama ve Cole–Cole analizleri, iletkenlik mekanizmaları ve belirli frekanslardaki σ parametreleri elde edilecektir. Elde ettiğimiz veriler bize malzemelerimizin farklı ve yeni birçok özelliğini göstermiş ve farklı alanlarda uygulanabilirliğinin analiz edilmesini sağlamıştır.

1.3 Hipotez

Kristal (Cr) ve sıvı kristal (LC) bileşikleri kimya grubu tarafından yeni sentezlenmiş malzemelerdir. Sentezlenen yeni malzemeler (Cr ve LC) arasındaki fark aromatik halka sayılarıdır. 5CB ticari sıvı kristali içerisine farklı oranlarda Cr ve LC malzemeler eklenmiştir. Oda sıcaklığında ölçümler yapılarak, geniş frekans aralığında dielektrik özellikleri incelenmiştir.

2

SIVI KRİSTALLER

2.1 Sıvı Kristallerin Tarihçesi

Maddeleri anlamaya çalışan bilim insanları, çok sayıda çalışmalar yürütmüşlerdir. Ulaştıkları sonuçlarda maddelerin atom ve moleküllerden oluştuğunu ve bunların farklı şekillerde bir araya geldiklerini görmüşlerdir. Maddenin sahip olduğu her bir durumu “faz” olarak belirtmişlerdir. Bilim insanları maddeyi katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç faz olarak sınıflandırmışlardır. Bu sınıflandırmayı sıcaklık değişimi altındaki davranışlarına göre yapmışlardır [42].

Genellikle fen bilimlerinde kullanılan “faz” terimi, bir maddenin fiziksel özelliklerinin her noktada aynı olduğu bölgeyi tanımlar. Her bir faz bölgesinde atomların serbestlik dereceleri, molekül düzenleri ve dağılımları farklıdır [43].

Sıvı kristaller, her ne kadar yakın tarihimizde yaygın olarak kullanılmaya başlamışlarsa da keşifleri birkaç yüzyıl öncesine dayanmaktadır. 19. yüzyıl ortalarında sinir lifleri üzerinde çalışmalar yapan Virchow, Mettenheimer ve Valentin, sinir liflerini su içerisine bıraktıklarında akışkan hale geldiğini ve suyu polarize olmuş bir ışık ile aydınlattıklarında daha önceki gözlemlerinden farklı bir sonuç görmüşlerdir. Ancak yeni bir faz olduğunu düşünmemişlerdir. 1877 yılında ise Otto Lehmann çalışmalarında ısıtıcı polarize mikroskop ile malzemelerdeki faz geçişleri üzerine çalışmalar yapmıştır. Malzemeyi soğutma işlemi gerçekleştirirken gördüğü malzeme sıvı halde iken şeffaf görüntüsünden önce bulanıklaşıp daha sonra katı hale geçmesini sıvı fazdan katı kristal faza geçerken meydana gelen bir yapı kusuru olarak anlamlandırmıştır [1, 4].

Tüm bu gelişmelerin üzerine 1888 yılında F. Reinitzer, kolesteril benzoat üzerinde yaptığı çalışmalar sırasında atmosferik basınç altında katı halde bulunurken bulanık bir sıvı haline dönüştüğünü, sıcaklığı arttırması durumunda 178°C ye ulaştığında ise ani bir şekilde berrak görümlü bir sıvı haline geldiğini gözlemledi. Otto Lehmann’ın aksine gözlemlediği bulanık sıvının yeni bir faz olduğunu söyleyerek farklı bir fazdan bahsetmiş oldu. Yaptığı yayında ise diğerlerinden farklı olarak iki erime noktasının varlığı, dairesel polarize ışık yansımaları yaptıkları ve ışık

polarizasyonunun yönünün döndürülebilir olduklarından bahsetmiştir. İlerleyen zamanlarda O. Lehmann maddenin bahsedilen bu yeni halini “sıvı kristaller” olarak adlandırmıştır. Bu zamana kadar yapılan bütün çalışmalar organik malzemeler ile yapılmıştır. 1890 yılında ise Gettermann ve Ritscheke sentetik olarak üretilen malzemelerde de sıvı kristal özellikler görüldüğünü bildirmişlerdir [1, 4].

Yaptığı çalışma sonuçlarına göre George Friedel 1922’ de malzemelerin her birinin farklı molekül düzenlerini göz önüne alarak sıvı kristalleri sınıflandırmıştır. Sıvı kristallerde bulunan kusurları ve elektrik alanın etkilerini de açıklamıştır. İkinci Dünya savaşı sırasında bilimsel çalışmalarda aksamalar olsa da artık sıvı kristaller hakkında daha da bilgi sahibi olunmuştur. 1940’ lı yılların sonlarında yeniden sıvı kristaller üzerinde çalışmalara devam eden bilim insanları, bu fazı gösteren malzemelerin de nasıl sentezleneceği hakkında daha da bilgi sahibi olmuşlardır.

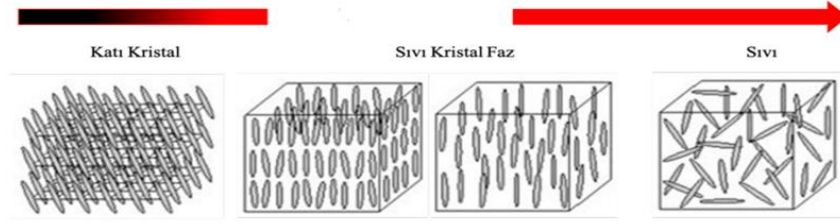
Yıl 1968’ i gösterdiğinde artık sıvı kristal göstergeler ilk defa kamuoyuna gösterildiler. Artık sıvı kristallerin farklı birçok özelliğinin bulunmasından ve ticari açıdan önemli görülmesinden dolayı daha çok ilgilenilmeye başlanmıştır.

1991 yılında sıvı kristaller üzerindeki çalışmalarından dolayı Pierre-Gilles de Gennes Nobel ödülü almıştır [1, 2, 42].

Birçok farklı uygulama alanı bulunan ve önemi daha da anlaşılan sıvı kristaller üzerinde çalışmalar devam etmekte olup, bunların özelliklerinin de ayrıntılı bir biçimde belirlenmesi büyük önem arz etmektedir.

2.2 Sıvı Kristallerin Tanımı ve Özellikleri

Maddelerin katı halde molekül ya da atomları belirli bir düzen halindedir ve titreşim yaparak hareket ederler. Sıvı halde ise molekülleri ve atomları katılara göre daha düzensiz haldedir, titreşim hareketine ek olarak dönme ve öteleme hareketi de yaparlar. Maddelerin yapısı hakkında bildiğimiz bu hal durumlarının dışında bazı organik malzemelerin katı hal ve sıvı hal değişimleri sırasında farklı bir faz daha gözlenir. Bu geçiş fazlarının simetri ve mekanik özellikleri katı ile sıvı arasındadır. Bundan dolayı bu maddeler sıvı kristal olarak tanımlanırlar. Sıvı kristal ara fazlar mezofaz olarak adlandırılırlar.



Şekil 2.1 Sıvı kristal faza sahip malzemenin sıcaklığa bağlı faz geçişi [21]

Şekil 2.1’de sıcaklığa bağlı olarak katı ve sıvı arasındaki faz geçişi verilmiştir. Sıcaklık arttıkça katı yapıda olan malzemenin erimeye başlayarak moleküller arasındaki düzen bozulmaya başlar. Sıvı hale geçerken moleküller ya da atomlar anizotropik durumdan izotropik duruma geçiş sağlar. Bu iki durum arasında madde sıvı kristal yapıda bulunur. Sıvı kristal faz ne katılar gibi net bir düzene sahiptir ne de sıvılar kadar düzensiz bir yapıdadırlar. Sıvı kristal faza sahip maddeleri sıvı fazda soğutma işlemine tabi tutarsak tekrar katı faz haline dönecektir [43, 44].

Maddelerin katıdan sıvıya geçiş sıcaklığı “erime sıcaklığı”, sıvı kristal halden sıvı hale geçerkenki sıcaklığı “berraklaşma sıcaklığı” olarak isimlendirilir. Sıvı kristal maddeler viskoz halde iken sıcaklığın artmasıyla saydam hale gelip sıvı faza geçerler [45, 46].

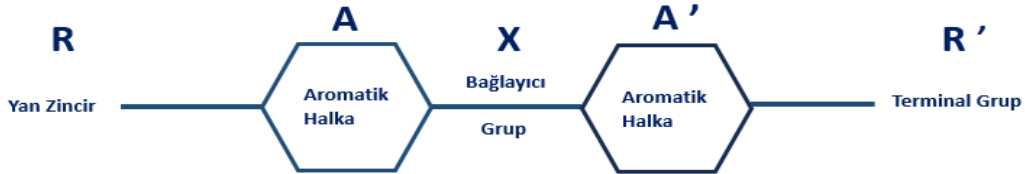
Sıvı kristaller, katı ve sıvı arasında olan özel bir düzene sahiptirler ve her iki fazın da özelliklerini üzerinde bulundurlar [48, 49].

Sıvı kristaller, katıların ve sıvıların özelliklerini bir arada bulundurmasının yanı sıra kendisine has bazı özellikleri de vardır. Normal manyetik veya elektrik alan altında mono kristal oluşturma, katılarda ve sıvılarda olmayan seviyede optik aktivasyon, ısıya karşı hassasiyet ve renk değişikliğinin bu özelliklerden olduğunu söyleyebiliriz [21].

2.3 Sıvı Kristallerin Molekül Yapıları

Sıvı kristallerin genel bir molekül yapısı Şekil 2.2’de verilmiştir. A ve A’ ile gösterilen yapılar (aromatik halkalar) siklo-hegzan, trifenil, bifenil gibi yapılardır. Bu aromatik halka moleküllerinin uzunluğuna bağlı olarak sıvı kristallerin erime noktaları değişmektedir. R (yan zincir) alkil, alkoksi, alkenil grubu bileşiklerdir ve

sıvı kristal fazların geçiş sıcaklığına etki ederler. R' (terminal grup) alkil, alkoksi, siyano ve nitro benzeri yapılardan oluşurlar. Sıvı kristal moleküllerinin optik özellikleri ve eşik voltajlarını etkiler. X ile gösterilen grup (bağlayıcı grup) etilen ester gibi yapılardan oluşmakta ve sıvı kristal moleküllerinin faz geçiş sıcaklığını ve çift kırılma gibi özelliklerini etkilemektedir [50, 51].

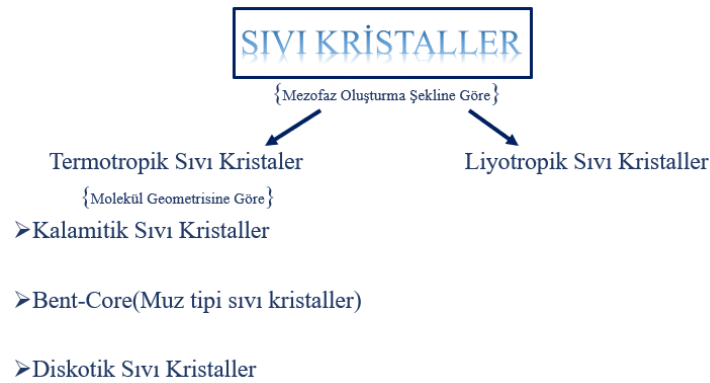


Şekil 2.2 Bir sıvı kristal molekülünün genel yapısı [52]

Sıvı kristal moleküllerin yapısı ince ve uzundur. Bu yapıya benzer şekilde oyuklu başka bir yüzeyle karşılaştıklarında bu oyuklar doğrultusunda sıralanmaya geçme eğilimi gösterirler.

2.4 Sıvı Kristallerin Sınıflandırılması

Sıvı kristaller sıcaklık değişimleriyle birlikte katılar ve sıvılar arasında değişik özellikler gösterirler. Bu özelliklere göre de farklı şekillerde sınıflandırmalar yapılmaktadır.



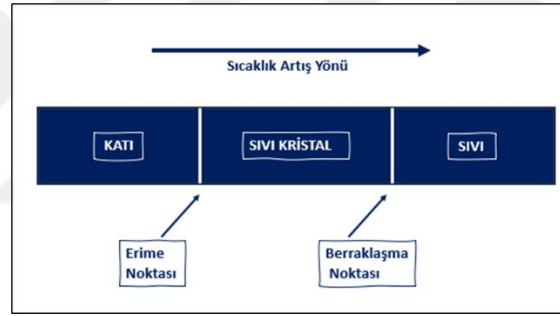
Şekil 2.3 Sıvı kristallerin sınıflandırması

Yaygın olan sınıflandırmaları katı hal düzeninin bozulma prensibine göre yapılmaktadır. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi sıvı kristaller mezofazların oluşma şekillerine göre ve moleküllerinin geometrik yapılarına göre gruplara ayrılmıştır.

Mezofaz Oluşturma Şekillerine Göre Sıvı Kristallerin Sınıflandırılması

Sıvı kristaller, mezofaz oluşumuna göre birçok farklı faz oluşturmalarına rağmen temelde iki faz çoğunlukta gözlenmektedir. Bunlardan birisi Termotropik mezofaz, diğeri Liyotropik mezofazlardır.

Termotropik mezofaz gösteren sıvı kristaller sıcaklık değişiminin etkisiyle ortaya çıkarlar (Şekil 2.4). Isıtma ve soğutmada mezofazın kararlı ve kararsız olma durumlarına göre iki şekilde isimlendirilirler. Sıvı kristalin hem ısıtma işleminde hem de soğutma işleminde oluşan mezofazlar kararlıdır ve enansiyotropik olarak adlandırılırlar. Sadece soğutma işlemi sırasında mezofaz oluşuyorsa kararsızdır ve monotropik olarak isimlendirilirler [53, 54].

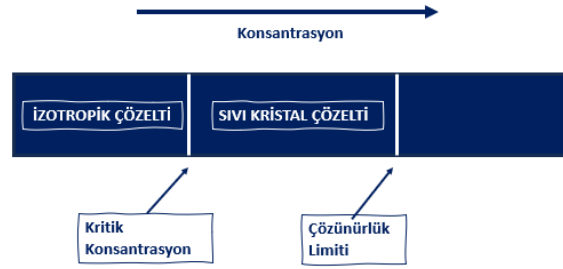


Şekil 2.4 Termotropik sıvı kristallerin faz geçişleri [21]

Termotropik sıvı kristaller aynı zamanda molekül geometrileri göze alındığında Şekil 2.3'te de görüldüğü gibi üç temel sınıfla ayrılabilir.

Liyotropik sıvı kristallerin, ise birden fazla organik bileşenden oluşan yapıları vardır. Molekül yapıları uzun zincirlidir. Liyotropiklerin yapıları genel olarak hidrofilik baş ve hidrofobik kuyruk kısmından oluşur [55, 56].

Liyotropik sıvı kristaller sıcaklık değişimi ve çözücü etkisine bağlı olarak faz değişimi gösterebilirler de çözünürlük daha etkilidir. Uygun bir çözücü kullanıldığında sıvı kristal hale geçerler [57]. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi Liyotropik sıvı kristallerde farklı fazların meydana gelmesini çözücünün konsantrasyonundaki değişim sağlar [56].



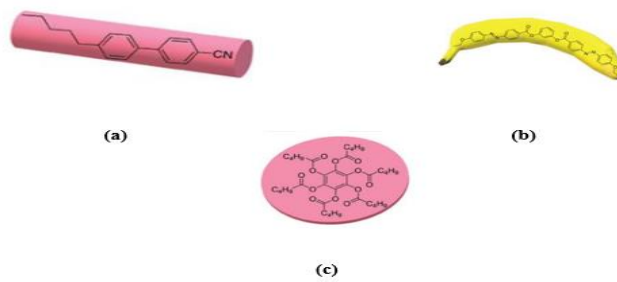
Şekil 2.5 Liyotropik sıvı kristallerin faz geçişleri [21]

Sıvı kristal fazın ortaya çıkmasında sıcaklığın ve konsantrasyonun ikisinin birlikte önemli olduğu sıvı kristal molekülleri amfotropik sıvı kristaller olarak adlandırılırlar.

Molekül Geometrisine Göre Sıvı Kristallerin Sınıflandırılması

Sıvı kristalleri sınıflandırmada göz önüne aldığımız bir diğer özellik de molekül geometrisinin yapısı olacaktır. Kovalent olmayan etkileşime sahip olmalarından dolayı çoğunlukla anizotropik şekillerde görülürler.

Sınıflandırdığımızda temelde kalamitik(çubuksu), bent-core(muz tipli) ve diskotik (disk şeklinde) olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Şekil 2.6’da molekül geometrisine göre sınıflandırılmış sıvı kristallerin üç boyutlu gösterimi ve molekül yapıları verilmiştir.

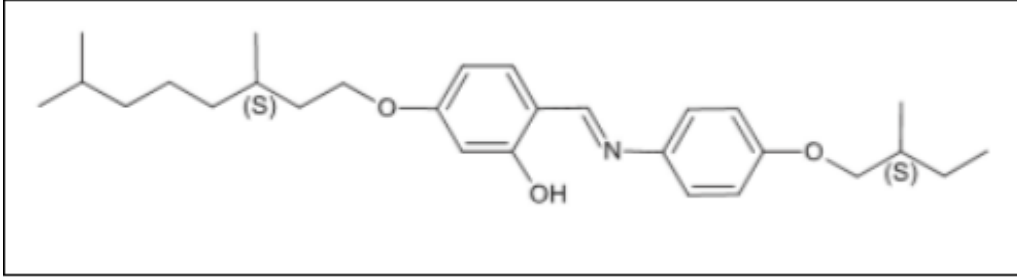


Şekil 2.6 (a) Kalamitik(Çubuksu), (b) Bent_Core(Muz şekilli), (c) Diskotik(Disk şekilli) sıvı kristallerin molekül geometrisine göre sınıflandırması [21]

Kalamitik Sıvı Kristaller

Kalamitikler, en yaygın sıvı kristal molekül çeşididir. Sıvı kristallerin büyük bir grubunu oluştururlar. İlk keşfedilen sıvı kristal yapılarıdır. Çubuk şeklinde bulunan

molekül yapılarında uzunluk ve genişlik farklılığı görülür. Bu durum gerekli molekül anizotropisi sağlanır. Örnek bir kalamitik sıvı kristalin molekül yapısı Şekil 2.7’de verilmiştir.

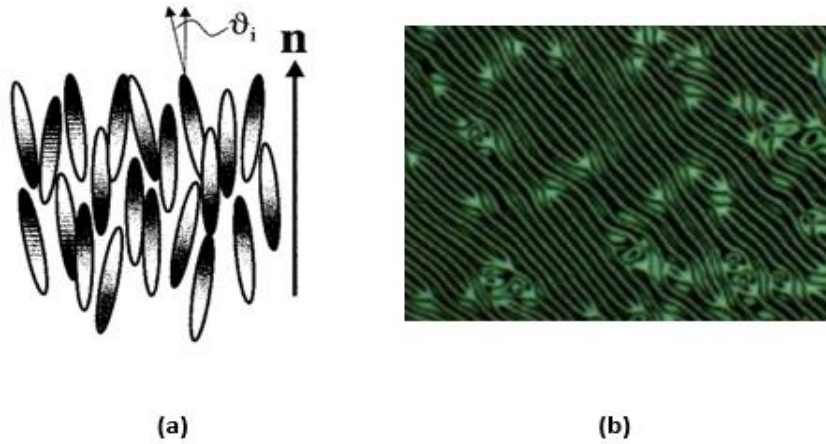


Şekil 2.7 Kalamitik sıvı kristal molekülü [58]

Kalamitik sıvı kristaller ara faz oluşumlarına göre nematik, smektik ve kolesterik olarak üç ayrı grupta incelenebilir.

Nematik sıvı kristaller

Nematik sıvı kristaller, polarizasyon mikroskopunda incelendiklerinde tekstürlerinin ipliksi bir yapıda olduğu görülür. İsmi Yunanca’da iplik anlamına gelen ‘nematos’ kelimesinden türetilmiş ve ilk defa Friedel tarafından kullanılmıştır [59]. Sıvı kristaller arasında en az düzene sahip ve sıvı faza en yakın ara fazdır.



Şekil 2.8 (a) Nematik sıvı kristallerin şematik görünümü ve yönelim düzeni [60]

(b) Nematik sıvı kristale ait tekstür örneği [61]

Nematik sıvı kristallerin molekülleri konumsal düzene sahip değildir. Kütle merkezleri rastgele dizilmiş olmasına rağmen, moleküller uzun erişimli bir

yönelimsel düzene sahiptir. Moleküller Şekil 2.8 (a)'da görüldüğü gibi moleküler ortalama bir yönelim doğrultusunda yönelirler ve bu $\hat{n}$ vektörü ile gösterilir [21].

Moleküllerinden herhangi birisinin konumu;

$$S = \frac{1}{2} \langle 3\cos^2\theta - 1 \rangle \quad (2.1)$$

ile verilen düzen parametresi ile bulunur [14].

Moleküllerinin ortalama bir yönelim gösterdiği bu ara fazda viskozite düşük olduğundan moleküller üç yönde hareket edebilir ve bir eksen etrafında dönebilir. Bu hareket yeteneği sayesinde moleküllerin yönelim doğrultuları elektrik alan, manyetik alan, basınç, sıcaklık gibi dışarıdan uygulanan etkilerle kolaylıkla değişebilir. Anizotropik özelliklerinden dolayı optik eksen ve bu eksene dik doğrultuda kırılma indisleri ölçüldüğünde arasında faz farkı meydana gelir. Bu faz farkı sayesinde çift kırılma özelliği ortaya çıkar [49]. Optik özelliklerinden kaynaklanan anizotropi ve elektrik alana çok kısa sürede cevap vermelerinden dolayı elektro-optik cihazlarda yaygın bir kullanıma sahiptir.

Smektik Sıvı Kristaller

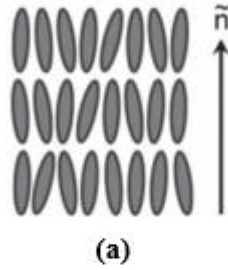
Smektik sıvı kristaller, ismini Yunanca sabun anlamına gelen 'smectos' kelimesinden almıştır. Termotropik sıvı kristaller içerisinde en yoğun faz ve nematiklerden daha düzenli yapıya sahiptirler [62, 63]. Maddeler katı fazda iken ısı verilmeye başlandığında ilk ortaya çıkan ara fazdır. Bu fazda moleküllerin yerleşimi katmanlıdır ve moleküllerin uzun eksenleri katman düzlemine dik olacak şekilde yerleşirler. Moleküller bu katmanlar içinde belli aralıklarda yerleşirken ve aynı doğrultu boyunca yönelirler [21]. Moleküller kendi etrafında dönerek hareket etseler de katmanlar arasında geçişleri çok azdır [64].

Nematik fazın aksine smektik fazda bulunan sıvı kristaller moleküllerin katmanlardaki düzenine göre çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Bilindiği kadar on iki adet (SmA, SmB, ...M) farklı smektik faz yapısı bulunsa da çoğunlukla SmA, SmB ve SmC olmak üzere üç grup gözlenmiştir [5, 21, 65].

SmektikA (SmA) mezofazında moleküllerin eğimi söz konusu değildir. Konumsal bir düzene sahip olmamasına rağmen tabakaları eşit mesafededir. Sıvı kristal

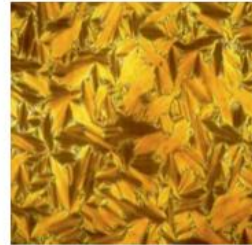
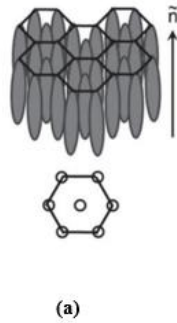
nematik halde veya izotropik halde iken soğutma ile SmA fazı görülebilir. Polarizasyon mikroskobunda yelpaze şeklinde bir görünümü vardır [66].

Şekil 2.9'da SmA mezofazına ait molekül yönelimleri ve bir tekstür görüntüsü verilmiştir.



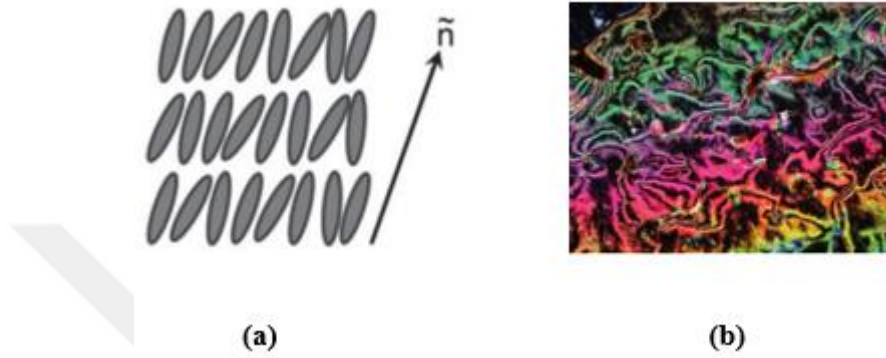
Şekil 2.9 (a) Smektik A sıvı kristalinin şematik görünümü ve yönelim düzeni [67]
(b) Smektik A sıvı kristale ait tekstür örneği [68]

Smektik B (SmB) mezofazında moleküller hekzagonal şekilde konumlanmıştır ve SmA mezofazına göre daha düzenli haldedir. Sıvı kristal olmalarına rağmen katı kristallere benzerler (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 (a) Smektik B sıvı kristalinin şematik görünümü ve moleküllerin yönelim düzeni [67] (b) Smektik B sıvı kristale ait tekstür örneği [69]

Smektik C (SmC) mezofazı SmA mezofazına benzemesine rağmen molekülleri tabaka normaline belirli bir açı yaparak yönelmişlerdir. Smektik mezofazların en düzenlileridir [66]. Bu yapı X-Ray saçılması sonucunda gözlemlenmiştir. Moleküler uzunlukları tabaka kalınlığından daha fazladır. Bu faz optiksel olarak çift eksenlidir [21]. Şekil 2.11’de SmC molekül yönelimleri ve tekstür görüntüsü örneği verilmiştir.



Şekil 2.11 (a) Smektik C sıvı kristalinin moleküllerin yönelim düzeni [67]

(b) Smektik C sıvı kristale ait tekstür örneği [70]

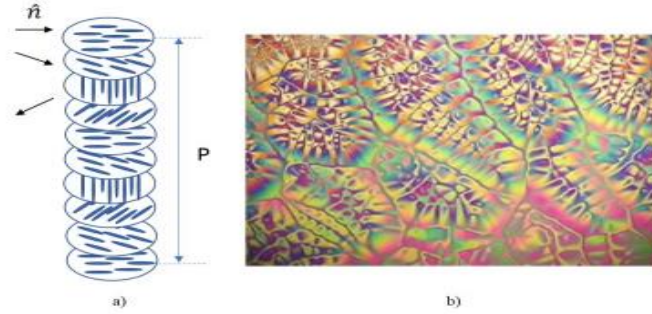
Bilim insanları çoğunlukla SmA ve SmC fazlarını kullanırlar. Smektik sıvı kristaller akışkanlığa karşı direnci fazla olduğu için teknolojik uygulamaları daha azdır [71].

Kolesterik Sıvı Kristaller

Kolesterik sıvı kristaller, nematik özellik gösteren sıvı kristallere bir miktar kiral molekül eklenmesi ile oluşturulurlar. Aynı zamanda “kiral nematik sıvı kristal” olarak da adlandırılırlar. Fiziksel özellikleri nematik sıvı kristallere benzemekle birlikte moleküller katman halinde dizilmiş ve moleküllerin yönelimleri, her katmanda ufak da olsa farklı açılarda bulunmaktadır. DNA yapısı bu tür sıvı kristallerin güzel örneğidir [71].

Şekil 2.12’de Kolesterik bir sıvı kristale ait bir yapının molekül yönelimleri ve örnek bir tekstür görüntüsü verilmiştir. Burada görüldüğü üzere katmanlar halinde bulunan sıvı kristal molekülleri $\hat{n}$ (direktör) doğrultusunda yönelirler. Yönelimler her katmandaki moleküller için aynı olup, katmanlar değişikçe farklı açılarda

yönelim sergiledikleri görülür. Böylece moleküller heliks (sarmal) bir yapı halini alırlar. ‘p’ harfi ile tanımlanan helis adımı, moleküllerin 360° turlarını tamamladığı tabakalar arasındaki mesafeye eşittir [50,52,72]. Bu mesafe sıcaklık artması ile azalır [66].

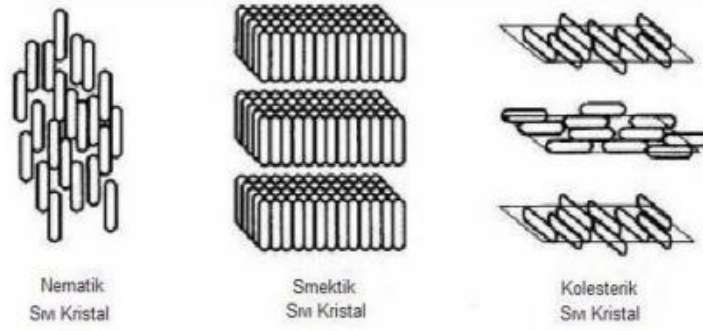


Şekil 2.12 Kolesterik kristallerin (a) molekül yönelimleri (b) polarize mikroskop görüntüsü [88]

p helis adımı, görünür ışığın dalga boyu ile karşılaştırılabilir ölçekte dir. Sıcaklık veya çeşitli dış etkenler ile değişiklik gösterir. Üzerlerine düşen ışığı yansıtılarak renk değişikliği gösterirler. Dairesel polarize ışığı seçimli olarak yansıtırlar.

Sahip oldukları bu özellikleri nedeniyle bir çok teknolojik uygulamaları mevcuttur. Sıcaklık sensörleri, hastalıklı dokuların teşhisi, akıllı camlar, elektrik devrelerindeki yada mikro yapıların kusurlarını incelemeye bu malzemelerden yararlanılmaktadır [21,73,74].

Buraya kadar bahsedilen kalamitik sıvı kristal çeşitlerinin molekül yönelimleri Şekil 2.13’de verilmiş olup aralarındaki yönelim farkları daha net bir şekilde karşılaştırılabilir.



Şekil 2.13 Nematik, smektik ve kolesterik sıvı kristallerin molekül düzenleri [21]

Bent - Core (Muz Tipi) Sıvı Kristaller

Bent-Core sıvı kristaller, bilim insanlarının yaptığı çalışmalarda ilk gözlemlendiğinde kalamitik sıvı kristaller olarak düşünülmüşlerdir. Çalışmaların devamında molekül yapılarının farklı olduğu görülmüştür [75,76].

Muz şeklinde olan bu sıvı kristaller, iki esnek kuyruk ve bükülmüş merkezde olan aromatik bir kısımdan oluşur [77]. Bu sıvı kristaller kuyruk uzunluklarına göre çeşitli fazlara ayrılırlar. Bunlar B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , B_5 , B_6 ve B_7 olarak isimlendirilirler.

B_1 faz yapı olarak üst üste yığılmış sütun biçiminde görülürler ve kolumnar olarak da isimlendirilirler.

B_2 faz yapısında SmC özelliği gösterirler, polar düzendedir.

B_3 faz yapısında kristal yapıya benzemektedir.

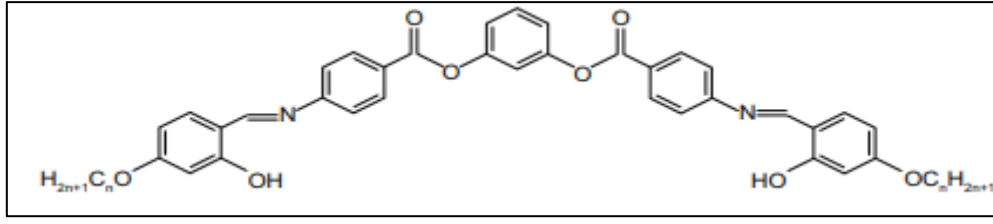
B_4 fazı B_3 fazının soğutulması sonucu görülür. Sıvı kristaller arasındaki en düşük sıcaklıkta görülen fazdır.

B_5 fazı ferroelektrik ve antiferroelektrik özelliklerin de görüldüğü çeşitli alt fazlarını bulundurmaktadır.

B_6 , B_1 fazı ısıtıldığında gözlenir.

B_7 fazı, bir SmC fazıdır [78].

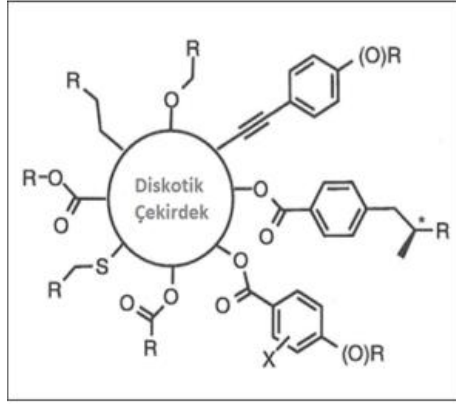
Şekil 2.14’de muz şekili sıvı kristallerin genel molekül yapısı verilmiştir.



Şekil 2.14 Muz şekilli sıvı kristallerin molekül yapısı [80]

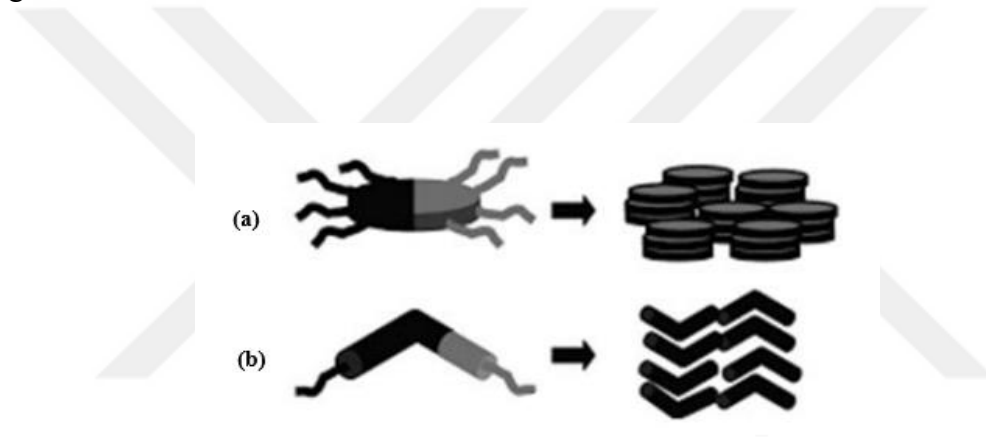
Diskotik (Disk Şekilli) Sıvı Kristaller

İlk olarak Chandrasekhar disk şeklindeki molekülleri gözlemlemiştir. Bununla birlikte birçok molekül sentezleyerek mesomorfik özelliklerini incelemiştir [14]. Molekül yapıları esnek ve hareketli bir zincir ve aromatik bir çekirdek barındırır [14, 38]. Disk şeklindeki moleküller üst üste birikerek kolon şeklinde oluşurlar. Eğilmiş veya dik olmalarının yanı sıra, altıgen ya da dörtgen şekilde bulunabilirler [75]. Şekil 2.15’de diskotik faz gösteren sıvı kristallerin genel molekül yapıları verilmiştir [80, 81].



Şekil.2.15 Diskotik sıvı kristallerin molekül yapıları [80]

Şekil 2.16'ya bakıldığında bent-core ve diskotik sıvı kristallerin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 2.16 Bent-core ve diskotik sıvı kristallerin şematik gösterimi [79]

2.4 Sıvı Kristallerin Fiziksel Özellikleri

Sıvı kristal moleküller, ortak olarak kabul edilen uzun eksenli olma, çift kutup yapısı, kolay bir şekilde polarize olabilme, eksen eğilmezliği gibi birçok özelliğe sahiptirler. Moleküler yönelim göstermeleri sıvı kristallerin en önemli ayırt edici özelliğidir. Akışkanlıkları molekül yönelimleri ile yönelim düzenleri ise S ile gösterilen düzen parametresi ile açıklanmaktadır [4, 96].

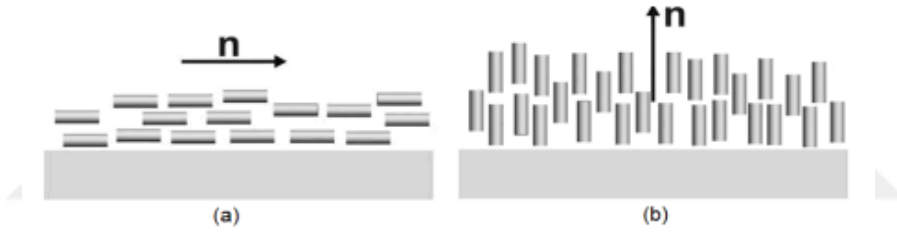
Sıcaklık artışına bağlı sıvı kristal moleküllerde hareketlerinin hızlanması ile kinetik enerjileri de artar. Sıvı kristal molekülleri sıcaklık ile değişim gösterir. Bu olay “anizotropi” olarak adlandırılır. Bu durumda sıvı kristaller bir doğrultu boyunca yönelim gösterirler. Anizotropik özellikleri sayesinde, ölçülen yöne bağlı olarak

değişiklik gösterirler. Sıvı kristaller üzerine elektrik ya da manyetik alan etki ettirildiğinde, moleküller bu alanların uygulanma yönlerine bağlı farklı davranışlar sergiler. Bu anizotropik özelliklerinden dolayı bilimsel çalışma ve teknolojiye tercih edilirler [4,96].

Sıvı Kristallerin Optik Özellikleri

Sıvı kristaller, anizotropik yapılarından kaynaklı olarak çift kırılmaya sebep olurlar. Sıvı kristaller elektrik ve manyetik alan gibi dışarıdan uygulanan etkilere karşı hassastırlar ve molekül yönelimleri de anizotropik özellikleri nedeniyle değişebilmektedir.

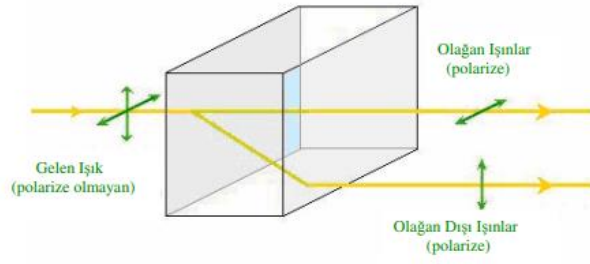
Sıvı kristallerin yönelim şekilleri, tabakalar arasındaki konumlarına göre incelenir. Sıvı kristallerin molekülleri yüzey ile etkileşimleri sonucu bir yönde yönelim gösterebilirler. Planar ve homeotropik olarak isimlendirilen yönelim şekillerinin şeması Şekil 2.17’de verilmiştir.



Şekil 2.17 Sıvı kristallerin (a) Planar (b) homeotropik yönelim şekilleri [82]

Planar yönelimde sıvı kristaller yüzeye paralel olarak yönelirken, homeotropik yönelimde yüzeye dik olarak yönelim gösterirler.

Sıvı kristaller, uygulanan elektrik alan ve manyetik alan yönlerine bağlı doğrultu vektörlerine göre farklı şekilde davranır. Bu durum ışığın elektromanyetik bir dalga olmasından kaynaklıdır. Polarize olmayan bir ışık demeti, sıvı kristal gibi çift kırıcı özelliği olan bir malzeme boyunca ilerlerken, elektrik alan vektörünün dik olarak yöneldiği ortamda olağan ve olağan dışı ışına ayrılır [83]. Şekil 2.18’de çift kırılma için şematik bir gösterim verilmiştir.



Şekil 2.18 Polarize olmayan bir ışığın sıvı kristal ortamda davranışı [84]

Olağan ışın, ortam içerisinde Snell yasasına göre hareket eder. Farklı yönlerde yayılan bu iki ışının polarizasyonları birbirine diktir. Çift kırıcı ortamda farklı hızlarda ilerler ve kırılma indisleri de farklıdır [48,54].

Olağan ışın, Snell yasasına göre hareket eder. Bu iki ışın farklı yönlerde yayılırlar ve polarizasyonları birbirine diktir. İki ışın çift kırıcı ortamda farklı hızlarla hareket ettiklerinden dolayı farklı kırılma indislerine sahiptir. Burada ışınların farklı ilerlemelerinden dolayı bir faz farkı meydana gelir [48, 54].

Elektrik ve Manyetik Özellikler

Sürekli elektriksel çift kutup bulunduran sıvı kristal molekülüne (dipol), elektrik alan uygulanırsa dipolleri elektrik alan yönünde yönlendirir. Bu durumda sıvı kristalin doğrultu vektörü uygulanan elektrik alan vektörü ile aynı yöne gelir. Katı ve sıvılarda molekül yapılarından dolayı bu mümkün olmasa da sıvı kristallerde çok az bir elektrik alanla doğrultu vektörü yeniden yönlendirilebilirler [84].

Sıvı kristallerin moleküllerine dik elektriksel dipoller, moleküllerin genişlik ve uzunluğu boyunca derece derece değişir. Doğrultu vektörünü değiştirebilmek için bazı sıvı kristallerde düşük elektrik alan yeterli olurken, bazılarında daha yüksek elektrik alana ihtiyaç duyarlar. Malzemeyi elektriksel olarak polarize etmenin ölçüsü olan ‘elektriksel duyarlılık’, birim kristal hacmi başına elektrik alan kuvvetine karşı dipol olarak tanımlanmıştır [85].

Maddeler, manyetik alan içinde davranışlarına göre paramanyetik ya da diyamanyetikler olarak sınıflandırılır. Sıvı kristaller de çoğu organik maddelerde olduğu gibi diyamanyetik özellik gösterirler. Uyguladığımız manyetik alanın etkisiyle manyetik alanın ters yönünde manyetik moment indüklenir. İndüklenen

manyetik momentin büyüklüğü uygulanan alanın moleküllerin eksenlerine göre nasıl yöneldiğine bağlıdır [85].

Sıvı kristallerde manyetik etkileşimler, elektrik etkileşimlerden daha düşüktür. Bu sebepten elektromanyetik etkileşimlerde manyetik etkileşimler ihmal edilir. İndüklenen manyetik dipol momentler arasındaki etkileşimin zayıf olmasından kaynaklı da iç manyetik alan ihmal edilebilir [83].

Esneklik ve Akışkanlık Özellikleri

Sıvı kristaller bir etki ile karşılaştıklarında moleküllerin, dönme ve bunu dengelemek üzere viskoz kuvvetler meydana gelmesinden kaynaklı titreşme ya da dalgalanma gerçekleşir. Titreşim ve dalgalanma hareketinden dolayı şekil değişimi gözlenir. Buna esneklik şekil değişimi adı verilir. Aynı zamanda sıvı kristallerde akışkanlık özellikleri meydana gelir. Molekül yönelimleri de akışkanlıklarından kaynaklanır. Dışarıdan bir alan uygulanması, sıvı kristal malzemenin içinde bulunduğu hacim sınırları ile etkileşimi ya da termal etkiler ortamdaki yerel doğrultuyu değiştirebilir [86].

Dielektrik özellikleri

Dielektrik özellikler sıvı kristal maddelerin önemli özelliklerinden birisidir. Dielektrik ölçümlerde sıvı kristallere ait moleküler dinamik ve rahatlama mekanizmaları. Mezofaz gösterirken bulunduğu sıcaklık aralığında hem katı hem de sıvı özellikleri gösterdiği için kendilerine özgün davranış sergiler. Ölçümlerden elde edilen frekansa bağlı ya da bağımsız dielektrik sabiti, rahatlama frekansı, kayıp sabiti gibi parametreler elektro-optik özelliklerinin belirlenmesini sağlar [87]. Dielektrikler Bölüm 3’ de konu edilerek ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

2.5 Sıvı Kristallerin Uygulama Alanları

Mezofaz (ara faz) gösteren sıvı kristal moleküller, sahip oldukları farklı birçok özellikleri ile bilimsel çalışmalar ve teknolojik uygulamalarda önemli bir yere sahiptir [15]. Molekülleri arasındaki etkileşimler çok zayıf oldukları için elektrik ve manyetik alan gibi dış etmenlere karşı molekül düzenlerinin kolayca değişmesi sıcaklık ve basınç sensörleri, holografik bilgi depolama sistemleri, açılır kapanır pencere gibi birçok farklı alanda kullanılmalarına olanak sağlamıştır. Nano

mertebede bulunan moleküller ile kolayca etkileşmeleri ve düşük voltaj uygulanabilirlikleri ile sıvı kristal gösterge cihazları (LCD televizyonlar), bilgisayar monitörleri, hesap makineleri, dijital saatler ve cep telefonu gibi uygulamalarda kullanılmalarını sağlamıştır [59,88].

Katı kristallerin ve sıvıların özelliklerini bir arada bulunduran sıvı kristaller ileri organik malzemelerdir ve organik yarı iletkenlerde, biyoaktif malzemelerde ve optiksel aygıt uygulamalarında kullanılırlar.

Sıvı kristallerin güncel çalışmalarından bir tanesi de Covid-19 testlerinde kullanılmaları olmuştur. Salgın dönemlerinde hastalığın teşhisinde hızlı sonuç almak önem taşımaktadır. Bu sebeple sıvı kristal tabanlı teşhis kitleri tasarlanmış olup akıllı telefon uygulaması yardımıyla sonuç elde edilmesi amaçlanmıştır [89].

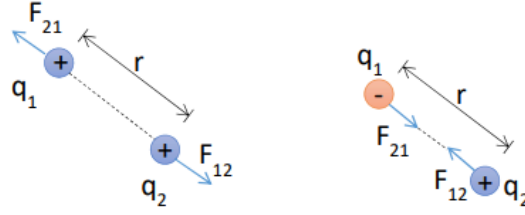
3.1 Dielektrik Malzemeler

Malzemenin iletkenliği, dışarıdan uyguladığımız elektrik alan altındaki davranışı ile belirlenir. Dışarıdan bir elektrik alan uygulandığında malzeme elektriği iletiyorsa ‘iletken’, eğer dışarıdan bir elektrik alan uygulandığında elektriği iletmiyorsa ‘yalıtkan’ olarak adlandırılırlar. Dielektrikler ise elektrik akımını iletmeyen ya da çok az ileten malzemelerdir. Dışarıdan bir elektrik alan uygulandığında yalıtkanlar gibi davranırlar. Dielektrik malzemelerde bulunan yükler atomlarına çok sıkı bağlıdırlar ve hareket edemezler. Böylece üzerlerine uygulanan akımı da iletmezler. Sadece çok küçük moleküler yer değişimi yaparak kutuplanırlar [90, 91].

Malzemelerin dielektrik özelliklerinin incelenmesi yeni çalışma ve uygulama alanlarının ortaya çıkmasına öncülük edecektir.

3.2 Noktasal Yük Etkileşimleri

Malzemelerin dielektrik özelliklerini incelerken elektrik ve manyetik özellikleri hakkında bilgi sahibi oluyoruz. Bu durumda elektriksel kuvvetlerle hareket eden yüklü parçacıkların hareketinden bahsedebiliriz. İletkenlerde serbest halde hareket eden elektronlar bulunurken yalıtkanlarda bu durum çoğunlukla görülmez. Ancak yüklü ya da yüksüz olması fark etmeksizin, başka bir yüklü cisimle etkileşime geçebilirler. Yalıtkanların moleküllerinin az da olsa hareket kabiliyeti bulundurmaları, yüklü cisimlerle etkileştiğinde net bir çekme kuvveti meydana getirir [92]. Yalıtkana temas eden yüklü cisim, zıt yükleri kendisine çekip aynı yükleri iter. Bu durum cisimler arasında net bir kuvvet oluşturur [92].



Şekil 3.1 Noktasal iki yükün etkileşimi [92]

Şekil 3.1’de aynı ve zıt yüklere sahip iki durumda aralarında oluşan elektrik kuvvet şematik olarak verilmiştir. Bu durumda ortaya çıkan elektrik kuvvetler Coulomb Yasası ile verilir. Bu yasaya göre yükler tarafından birbirine etkiyen kuvvetin büyüklüğü;

$$F = k \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} \quad (3.1)$$

$$F_{12}=F_{21}=F \quad (3.2)$$

olarak verilir. Formülde gördüğümüz k, orantı sabiti, q_1 ve q_2 yükler ve r ise yükler arasındaki mesafedir. ϵ_0 boşluğun geçirgenliği olarak tanımlanmak üzere k orantı sabiti, $1/4\pi\epsilon_0$ ile ifade edilir. Bu yasada görüldüğü üzere, noktasal iki yükün oluşturduğu elektrik kuvvetin büyüklüğünün yüklerin çarpımı ile doğru orantılı, yüklerin arasındaki mesafe ile ters orantılıdır [92].

Yüklü cisimlerin çevresinde elektrik alan oluşturduğunu bilmekteyiz. İki aynı yüke sahip cisim arasında oluşan kuvvet (F), cisimlerin oluşturduğu elektrik alandan kaynaklanmaktadır. Yüklü cisimlerin oluşturduğu elektrik alan kendisini etkilemez ancak çevresini ve diğer yüklü cisimleri etkilileyerek bir kuvvet oluşturur. Bir noktada yüklü bir cismin oluşturduğu elektrik alan $\vec{E}$, $\vec{F}_0/q_0$ ile verilir. Yüke etkiyen kuvvetin, etkilenen yüke oranı olarak açıklanır. Noktasal bir yükün elektrik alan büyüklüğü,

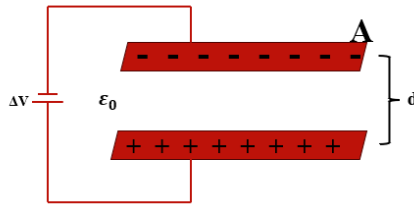
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (3.3)$$

Verilen ifadede $\vec{E}$, bir noktadaki değeri bilinebilir. Bu değer bir vektör alanını temsil eder.

Pozitif yüklerin elektrik alanları yükün dışına doğru, negatif yüklerin elektrik alanları ise yüke doğrudur. Mesafe ne kadar fazla ise alan da o kadar azalır. Elektrik alanı belirtmek için elektrik alan çizgileri kullanılır. Bu çizgiler gerçekte var olmayan hayali çizgilerdir. Elektrik alan çizgileri sık ise elektrik alan vektörü büyük, seyrek ise küçüktür. Bu çizgiler bulunduğu her bir noktada var olan elektrik alan vektörüne teğettir [92].

Kondansatörler

İki paralel iletken plakadan oluşan, yük depolamak için kullanılan devre sistemlerine kondansatör ya da kapasitör denir. Kondansatördeki iletken plakalar arasında elektrik alan oluşturacak kadar bir mesafe bulunur. İletken plakalar zıt yüklü ve yükleri birbirine eşittir. Kapasitörün çalışma sistemi elektrik alanın sabit ya da değişken olmasına göre değişir.



Şekil 3.2 Boşluk kapasitörünün şekli

İki plaka arasına bir potansiyel (V) uygulandığında plakalar arasında dik bir elektrik alan oluşacaktır. Oluşan bu elektrik alan;

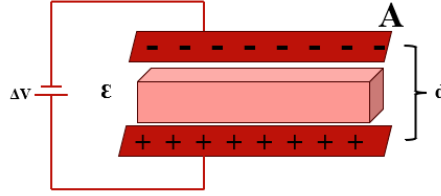
$$E = \frac{V}{d} \quad (3.4)$$

Bir boşluk kondansatörü (Şekil 3.2), göz önüne aldığımızda kapasitenin değeri fiziksel özelliklerine bağlı olarak (3.5) eşitliği ile verilir.

$$C_o = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d} \quad (3.5)$$

Düşünülenin aksine kondansatöre uygulanan potansiyel farkı arttırdığımızda depolanan yük miktarı artmayacaktır. Plakaların arasındaki uzaklık (d) ve yüzey alanı (A) kapasite değerini etkiler. Kondansatör oluşturulurken plakaların yüzey

alanlarının aralarındaki boşluktan çokça büyük olması, plakalar arasında düzgün bir elektrik alan oluşturup, düzgün olmayan elektrik alanı en aza indirmektir [93].



Şekil 3.3 Dielektrik kapasitörünün şekli

İki iletken plakadan oluşan kondansatör (Şekil 3.3), arasına dielektrik bir malzeme koduğumuzda malzeme ve iletken plakalar arasında yükler etkileşerek birbirini nötrlediğinde potansiyel farkta önce azalma meydana gelecek, sonrasında uyguladığımız potansiyel fark ile plakaların arasındaki potansiyel fark eşitlenene kadar bir miktar daha yüklenmeye devam edecektir. Sonuçta kondansatörün yapısını değiştirmeden daha fazla yüklenmesi sağlanmış olunur.

Böyle bir kondansatörde oluşan kapasite değeri, ϵ , ϵ/ϵ_0 olmak üzere ;

$$C = C_0 \cdot \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) = C_0 \cdot \epsilon \quad (3.6)$$

Boyutları sabit olan kondansatörde, plakalar arasında oluşturulabilecek maksimum elektrik alan şiddeti ϵ dielektrik sabitine bağlıdır [94].

3.3 Kutuplanma (Polarizasyon)

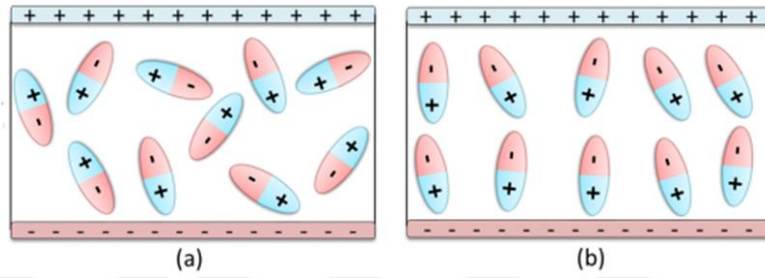
Atomlar, merkezinde pozitif (+) ve etrafında negatif (-) yükler bulundurur. Bir atomu elektrik alan içerisine bırakırsak artı ve eksi yükler ayrılarak farklı yönlerde çekileceklerdir [94].

Dielektrik özellik gösteren bir malzemeyi elektrik alan içerisine koyduğumuzda, elektrik alan şiddetinden bağımsız ve frekans ile bağımlı olarak çok küçük yer değiştirme gösterir. Pozitif ve negatif yüklerin zıt noktalara çekilmesi ile atom dengelenir. Bu olay polarizasyon (kutuplanma) olarak adlandırılır. Sonuçta atomda dipol moment oluşmuştur. Baktığımızda doğada bulunan bazı moleküllerin kendiliğinden dipol moment bulundurduğunu görmekteyiz.

Dipol, birbirine eşit ve zıt yüklerin oluşturduğu bir yapıdır. Bu yapıda bahsedeceğimiz elektrik dipol momenti ($\vec{p}$) vektörel bir büyüklüktür. Negatif yükten pozitif yüke doğru verilir.

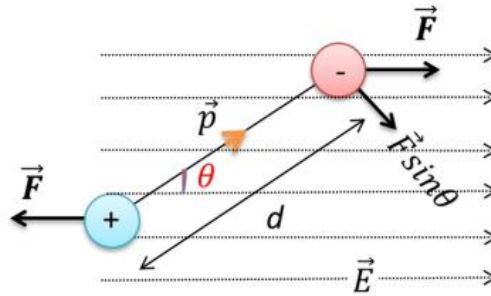
$$p = qd \quad (3.7)$$

Denklemden, dipol moment vektörü (p), yükün büyüklüğü q ve yüzeyler arası uzaklık d ile verilmiştir.



Şekil 3.4 Bir dipol momentin yönelimi (a) Elektrik alan yokken (b) Elektrik alan varken [92]

Şekil 3.4’de elektrik alan yokken ve elektrik alan altında dipollerin davranışı gösterilmiştir. İletken plakalar arasında elektrik alan yokken dipoller rastgele dağılmıştır. Plakalara elektrik alan uyguladığımızda ise dipoller elektrik alan yönünde bir yönelim gösterirler [94].

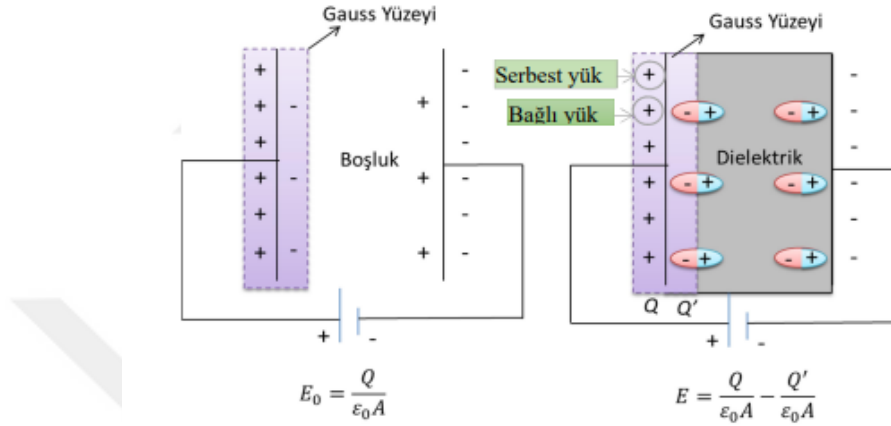


Şekil 3.5 Elektrik alan altında negatif ve pozitif yüklere etki eden kuvvetler [92]

Şekil 3.5’de elektrik alan altında bulunan bir dipole etkiyen kuvvetler verilmiştir. Bu alan altında kuvvetlerin etkisi ile dipol yapısı yükler birbirine eşit uzaklıkta bulunan bir noktada dönmeye başlayacaktır. Dipollerin dönmesinden kaynaklı indüklenmiş elektrik alan oluşur [94,95].

Kondansatörlerin plakaları arasında boşluk ya da dielektrik malzeme olması durumunda elektrik alanın oluşumunu ve dielektrik kondansatörünün daha fazla yüklenmesi Gauss Yasası ile açıklanabilir.

Plakalar arasında boşluk ve dielektrik olduğu durumlarda Gauss Yüzeyleri Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6 Plakalar arasında boşluk ve dielektrik varken oluşan gauss yüzeyi [92]

Dielektrik kondansatör için Elektrik alan,

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot A} - \frac{Q'}{\epsilon_0 \cdot A} \quad (3.8)$$

Denklemini ile verilir.

Elektrik alan, aynı zamanda

$$E = \frac{E_0}{\epsilon} = \frac{Q}{\epsilon \epsilon_0 \cdot A} \quad (3.9)$$

Olarak da yazılabilir.

Denklem (3.8) ve (3.9) birbirine eşitlenirse,

$$\frac{Q}{\epsilon \epsilon_0 \cdot A} = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot A} - \frac{Q'}{\epsilon_0 \cdot A} \quad (3.10)$$

Elde edilir.

Bu denklemi sadeleştirdiğimizde;

$$\frac{Q}{A} = \varepsilon_0 \left(\frac{Q}{\varepsilon \varepsilon_0 A} \right) + \frac{Q'}{A} \quad (3.11)$$

Şeklinde yazabiliriz.

Burada bulunan her bir değer vektör ile tanımlanabilir.

$$D = \varepsilon_0 \cdot E + P \quad (3.12)$$

Şeklinde gösterilir.

Burada D , deplasman vektörü E , elektrik alan vektörü ve P , polarizasyon vektörüdür.

Polarizasyon vektörü,

$$P = (\varepsilon - 1) \varepsilon_0 E = N \alpha E' \quad (3.13)$$

Olarak da verilebilir. N birim hacimde bulunan dipol moment sayısı, ε dielektrik sabiti, E kondansatöre uygulanan elektrik alan, E' yerel elektrik alan ve α polarlanma katsayısıdır [97-99].

Elektronik, atomik, yönelim ve ara yüzey (uzay yük) polarizasyonu olarak değişik şekillerde oluşabilir. Bu farklılık malzeme yapısından dolayı oluşmaktadır.

3.5 Dielektrik Relaksasyon Davranışları

Polarizasyon etkileri, relaksasyon frekansı veya rezonans frekansı karakterindedir. Dielektrik relaksasyon moleküllerin iç yapısı veya moleküler düzenine bağlı olarak yönelme polarizasyonu ile ilişkili iken rezonans etkisi ise elektronik ya da atomik polarizasyonda görülür [14].

Dielektrik malzemenin moleküllerinin hareketinin ölçüsü ya da elektrik alan altında bir dipolün bir periyot süresi içinde yönelim yapması için geçen süre relaksasyon zamanı olarak tanımlanır. Relaksasyon frekansı, malzemenin rezonans frekansıdır.

Eğer elektrik alan frekansı relaksasyon frekansından küçük olduğunda kutuplanma kolay bir şekilde meydana gelir ve elektrik alanı takip eder. Dielektrik kayıp ihmal edebileceğimiz kadar az olur. Frekansı arttırılıp relaksasyon bölgesine ulaştığında

kutuplanmanın alanla uyumu zorlanarak faz farkında artış meydana gelecektir ve kayıp maksimum olacaktır. Frekans artmaya devam ettiğinde kutuplanma oluşmayacak ve dielektrik sabiti azalacaktır. Kutuplanmanın olmadığı alanlarda herhangi bir dielektrik kayıp meydana gelmeyecektir [14].

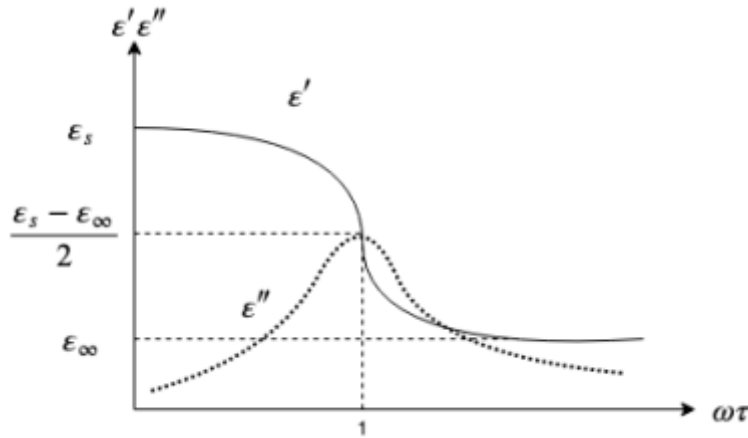
Dielektrik özelliği bulunan malzemelerin relaksasyon (gevşeme) davranışlarının açıklanmasında birçok yaklaşım ve model bulunsada en çok bilinen ve kullanılan Debye ve Cole – Cole modelleri olduğu görülmektedir.

Debye Modeli

Tek relaksasyon davranışı bulunan sistemlerde kompleks dielektrik sabiti Debye eşitliği ile tanımlanır. Sistemlerin dielektrik parametrik değişimlerini frekansa bağlı olarak açıklar [49, 99, 100].

$$\tau = \frac{1}{2\pi f} \quad (3.14)$$

Bu model, kompleks dielektrik sabitinin gerçekte kısmı ve sanal kısmı arasındaki bağlantıyı ifade eden bir denklem içerir. Bu denklem bir yarım daire denklemidir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Dielektrikler için Debye eğrisi [102]

Debye modeli için açısal frekansa bağlı kompleks dielektrik sabiti;

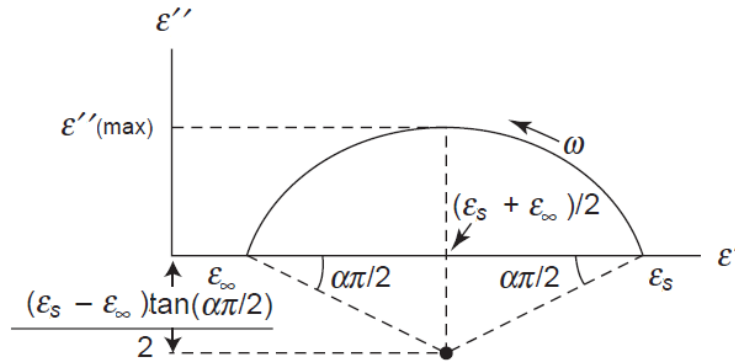
$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} \quad (3.15)$$

Burada kompleks dielektrik sabitinin reel kısmı için yüksek frekans limiti ϵ_∞ , düşük frekans limiti ϵ_s , relaksasyon zamanı τ ile ifade edilir [101].

Cole Cole Modeli

Debye modeli tek bir relaksasyona sahip sistemlerin kompleks dielektrik sabitini göstermekteydi. Cole Cole modelinde ise birden fazla relaksasyon davranışına sahip sistemlerin dielektrik sabitini açıklar.

Debye modeli tek relaksasyon zamanlı iken Cole-Cole modeli birden fazla durulma zamanına sahip, polimer gibi uzun zincirli yapıların dielektrik parametrelerini açıklar. Bu modelde, tıpkı Debye modeli gibi tek relaksasyon zamanlı dielektrikler için bir yarı daire meydana gelir, yani Debye eşitliğini kapsar. Çoklu relaksasyon zamanına sahip dielektriklerin parametrelerinde ise grafiklerde merkezi $\epsilon''=0$ eksenini altında kalan bir yarı daire veya yay meydana gelir (Şekil 3.8) [102].



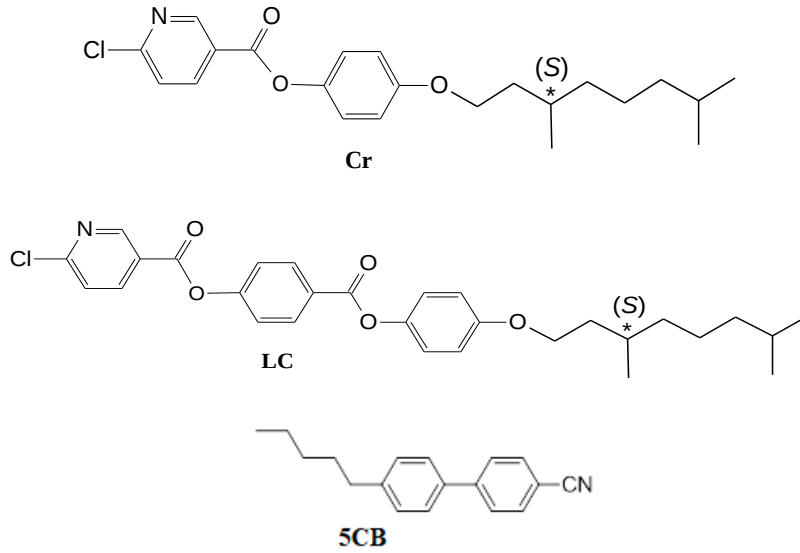
Şekil 3.8 Dielektrikler için Cole-Cole eğrisi [102]

4.1 İncelenen Sıvı Kristal Malzemeler

Bu çalışmada (4-siyano-4'-pentilbifenil) (5CB) ticari nematik sıvı kristal malzeme ile beraberinde 4-((S)-3,7-dimetiloktiloksi) fenil 6-kloronikotinat (Cr) ve (4-[4-((S)-3,7-dimetiloktiloksi) fenoksikarbonil] fenil 6-kloronikotinat (LC) malzemeler kullanılmıştır. Bu bileşiklerin molekül yapıları aşağıda Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Her iki molekül, 4-((S)-3,7-dimetiloktiloksi) fenil 6-kloronikotinat ve (4-[4-((S)-3,7-dimetiloktiloksi) fenoksikarbonil] fenil 6-kloronikotinat) araştırılmıştır. 4-((S)-3,7-dimetiloktiloksi) fenil 6-kloronikotinat (Cr), mezomorfik olmayan bir davranış sergiler ve (4-[4-((S)-3,7-dimetiloktiloksi) fenoksikarbonil] fenil 6-kloronikotinat (LC) enansiyotropik SmA mezofazı göstermiştir.

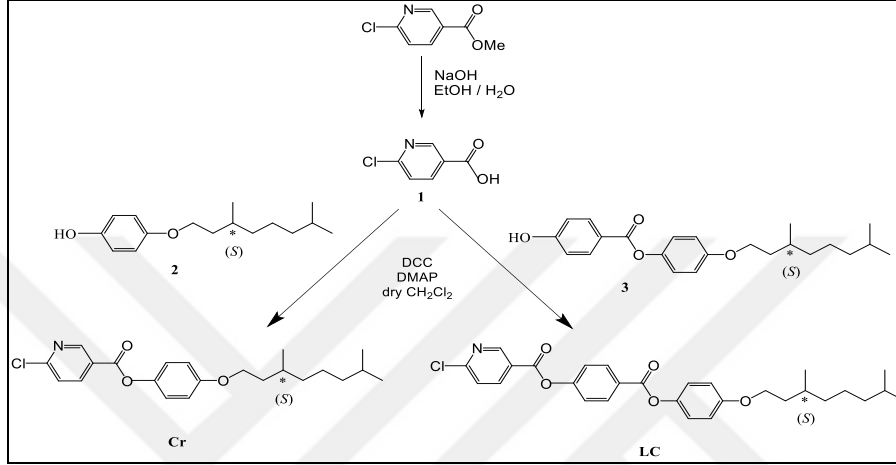
Her iki bileşikte nematik sıvı kristal 5CB'ye farklı konsantrasyonlarda ağırlıkça %2 ve %5 oranında eklendi.



Şekil 4.1 Tüm bileşiklerin molekül yapıları [103]

4.2 Cr ve LC bileşiklerinin sentezi

1, 2, 3 bileşikleri ile Cr ve LC'nin sentez yöntemi ve spektroskopik verileri daha önceki çalışmalarımızda bildirilmiştir [103]. Kristal 4-((S)-3,7-dimetiloktiloksi)fenil 6-kloronikotinat ve sıvı kristal (4-[4-((S)-3,7-dimetiloktiloksi)fenoksikarbonil]fenil 6-kloronikotinat bileşiklerinin kimyasal yapıları Şekil 4.2'de verilmiştir.



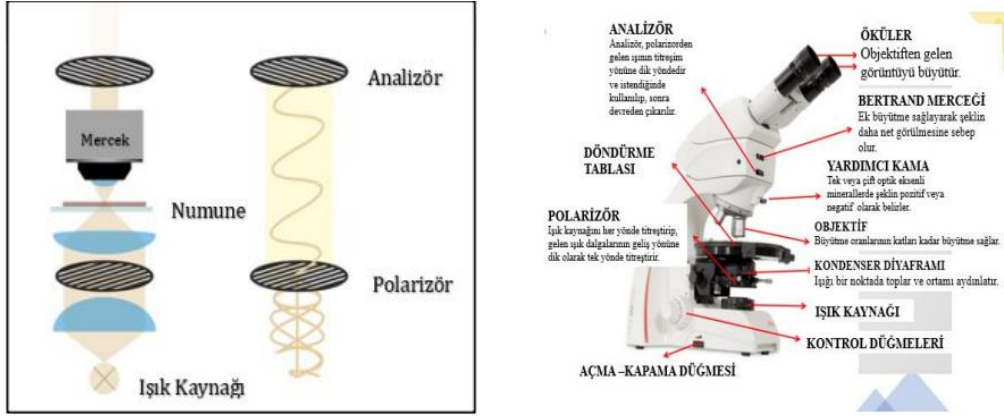
Şekil 4.2 Sentezlenen bileşiklerin molekül yapısı [103]

4.3 Kullanılan Cihazlar

Sıvı kristaller incelenirken çeşitli cihaz ve ölçüm teknikleri kullanılır. Bu bölümde tez çalışmasını yaparken kullandığımız cihaz ve yöntemlerden bahsedilecektir.

Polarizasyon Mikroskobu (PM)

Polarizasyon mikroskobu, malzemelerin elde edile tekstürlerinin morfolojik olarak araştırılması ve faz geçiş bölgesinde meydana gelen tekstürlerin incelenmesini sağlar. Genellikle diferansiyel taramalı kalorimetri cihazı ile kullanılan polarizasyon mikroskopları, çift kırılma özelliğine sahip yapıların optik anizotropi özelliğinden yararlanılarak görüntülenmesini sağlar. Bileşiklerin polarize ışık altındaki davranışları incelenerek, erime noktası, berraklaşma noktasına ait faz tekstürleri elde edilmiştir [14, 102].



Şekil 4.3 Polarizasyon mikroskopu [105]

Şekil 4.3’de polarizasyon mikroskopunun genel bir yapısı ve çalışma yöntemi verilmiştir.

Polarizasyon mikroskoplarının çalışma yöntemi;

Mikroskop içinde ışık kaynağı olarak beyaz ışık yayan bir lamba bulunur. Bu kaynaktan çıkan ışık ışınları, aynalardan yansyarak lens üzerinden geçip polarizöre geldikten sonra, 360° derece dönerek dalga boyu ayrıştırıcı filtreden kondansatör üzerine gelir. Uygun dalga boyuna sahip ışık, kondansatör üzerinden dönen yüzeyden numune bölümüne geçer. Bu bölümün sıcaklığı ayarladıktan uygun bir değerde ayarlanarak, numuneden yayılan ışık ışınları objektiften geçer. Buradan geçen ışık ışınları analizörde polarizöre göre yönlenir. Görüntüler mercek üzerine düştükten sonra net ve daha ayrıntılı görüntü elde edilir [102].

LC davranışı, Leica DM2700P polarizasyon mikroskobu ile birlikte Mettler FP–82 HT sıcaklık kademesi ve kontrol ünitesi kullanılarak yapılmıştır. Örnekler, ısıtma-soğutma hızı $10\text{ }^\circ\text{C/dk}$ olan iki ince cam lamel arasına yerleştirilerek hazırlandı.

Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC)

Diferansiyel tarama kalorimetresi, sıvı kristal malzemelerin mezofaz durumlarını ve saflık derecelerini incelerken kullanılan, hassas ölçüm yapan termal analiz yöntemidir. Numune üzerine gelen ya da numune üzerinden dışarıya salınan ısı farkının gösterilmesi için kullanılır. Numunenin ısıtma, soğutma işlemleri veya sabit sıcaklıkta bulunduğu salınan ve soğurulan enerji miktarını ölçer [14,102].

DSC’de, incelenecek numune ve referans olarak kullanılan maddenin sıcaklıkları aynı tutulmak sureti ile bunlar arasında bir sıcaklık farkı meydana gelip gelmediğine bakılır. Eğer sıcaklık farkı oluşur ise, bu değerleri değiştirmeden incelenen numuneye verilen enerji miktarını değiştirerek faz geçişlerindeki ısı değişimleri gözlemlenir.

Geçiş sıcaklığı ve faz geçiş entalpileri, nitrojen atmosferi altında dakikada 10°C ısıtma hızında Perkin-Elmer Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) kullanılarak belirlendi.

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)

Kızılötesi spektroskopi tekniği organik ya da inorganik malzemelerin karakterizasyonunda kullanılır [106]. Matematiksel Fourier dönüşümü yöntemi ile ışığın infrared yoğunluğuna bağlı dalga sayısını ölçer. Kimyasal bir yöntemdir. Ortaya çıkan IR spektrum, maddenin atomları arasında bulunan bağların titreşimi ile oluşan frekanslara karşılık gelen absorpsiyon piklerini verir. Burada ortaya çıkan pikler maddenin özelliklerini gösterir. Bu yöntemle daha hızlı sonuç alınmaktadır [107, 108].

Dielektrik Spektroskopisi (DS)

Dielektrik parametreler (ϵ' , ϵ'' , $\Delta\epsilon$ (dielektrik güç), f_r (relaksasyon frekansı)) Dielektrik Spektroskopisi (DS) Yöntemi ile belirlenmiştir. Tüm kompozitlerin karakterizasyonları Fytronix Impedance Analyzer tarafından 100Hz-10 MHz frekans aralığında yapılan dielektrik ölçümleri ile belirlenmiştir.

Bir sonraki bölümde dielektrik spektroskopisi ölçüm tekniği ve hazırlık aşamaları hakkında ayrıntılı bilgi verilecektir.

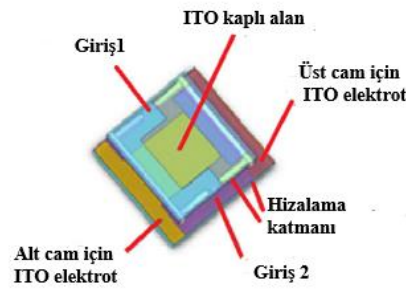
4.4 Sıvı Kristal Hücrelerin Hazırlanması ve Deney Düzeneği

Bu bölümde tez çalışmasının deney hazırlık ve ölçüm aşamalarından bahsedilecektir. Çalışma verilerini oluşturan yeni sentezlenen sıvı kristal ve kristal malzemeler nematik ticari sıvı kristal 5CB ye %2 ve %5 oranlarında hassas terazi ile ölçülerek katkılanmıştır. Malzemenin homojen olarak karışması manyetik karıştırıcıda bir gün karıştırılarak sağlanmıştır.



Şekil 4.4 DS ölçümler için numune hazırlama aşamaları

Daha sonra dielektrik ölçüm yapılmak üzere sandviç tipi hücre içerisine mikro pipet yardımı ile dolduruldu (Şekil 4.4). Sonuçların herhangi bir dış etkiden etkilenmesini önlemek için dolum işlemi sırasında kullanılan aletler propanol ve aseton kullanılarak temizlenmiştir. Çalışmalarda kullanılan hücreler INSTEK firması tarafından özel olarak üretilmiş olup hücrelerin yüzey alanları 100 mm^2 lik bir alana sahiptir. Boş hücrenin her bir plakası indiyum kalay oksit (ITO) kaplıdır ve elektrot görevi görmektedir (Şekil 4.5).

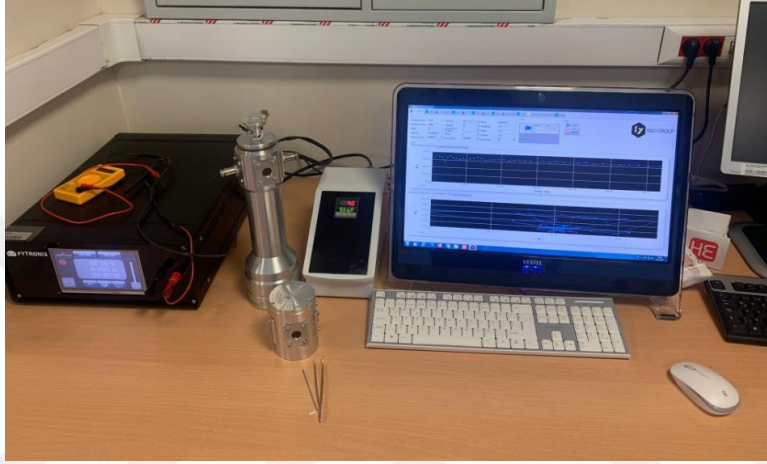


Şekil 4.5 Sıvı kristal hücrenin yapısı

Çalışılan sıvı kristal malzemelerin incelemek ve tüm faz geçişlerini gözlemleyebilmek için hücreleri ısıtabildiğimiz bir deney düzeneği kullanılmıştır. Hücreleri dış etkilerden korumak için deney setinde bulunan Kroyostat isimli bölme

kullanılmıştır. Bu bölmede hücreleri ısıtmak için direnç düzeneği ve sıcaklık kontrolünü sağlayabilmek için k tipi bir termo-çift bulunmaktadır (Şekil 4.6).

Sıvı kristal numunelerin dielektrik özelliklerinin empedans analiz cihazında 100Hz-10MHz frekans aralığında karakterizasyonu incelenmiştir. Empedans cihazının ara yüz bağlantısı kullanılarak bilgisayar ile kontrolü sağlanmaktadır. Bu cihaz yardımı ile kullanılan bilgisayar programlarıyla çeşitli dielektrik parametreler (C_s , C_p , δ , σ) kolayca hesaplanmaktadır. Alınan ölçüm sonuçları, Orijin grafik programı ile çizilmiş ve gerekli analizler yapılmıştır.

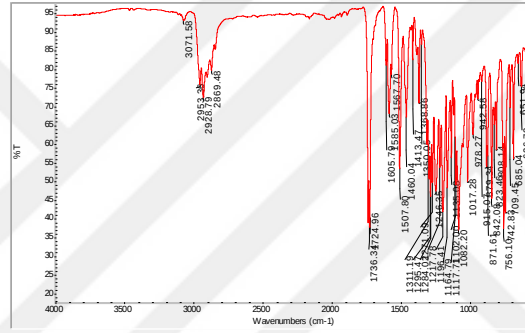


Şekil 4.6 Dielektrik spektroskopi deney düzeneği

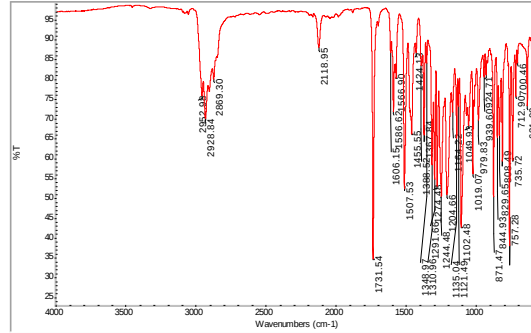
Bu bölümde tez konumuz olan sıvı kristal malzemelerin mezomorfik inceleme sonuçları ve dielektrik ölçüm sonuçları üzerine durulacaktır.

5.1 Kullanılan Sıvı Kristal Malzemelerin Mesomorfik İncelemeleri

Yeni sentezlenen Cr ve LC yapıları Perkin Elmer Spektrometre kullanılarak Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ile de doğrulanmıştır. İlgili FT-IR sonuçları Şekil 5.1a ve 5.1b'de verilmiştir.



(a)

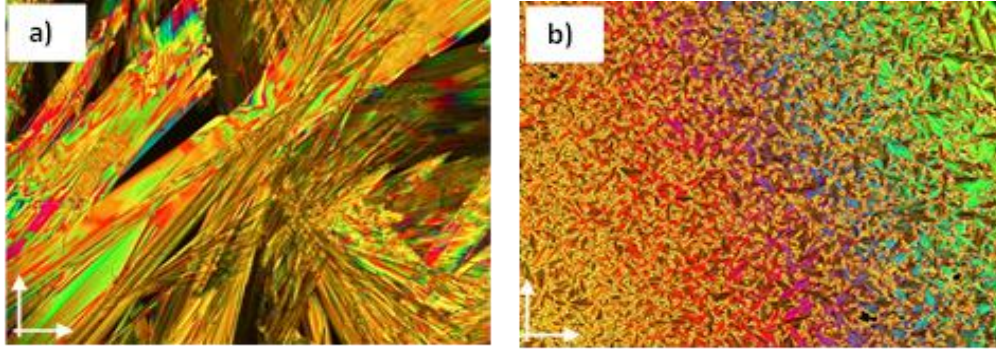


(b)

Şekil 5.1 (a) Cr ve (b) LC bileşiklerinin FT-IR sonuçları

Cr bileşik ısıtma işlemi sırasında yalnızca bir tersinir geçiş sergiler. Buna karşılık, Cr bileşiğinden farklı olarak bir aromatik halka daha içeren LC bileşiğinin ısıtma sırasında ölçülen DSC eğrisinde iki adet faz geçişi gözlemlenmiştir (Cr- SmA- Iso).

İzotropik fazdan soğutma işlemi sırasında iki faz geçişi de (Iso - SmA - Cr) gözlemlenmiştir. POM altında yelpaze şeklinde bir doku gözlenmiştir (Şekil 5.2).

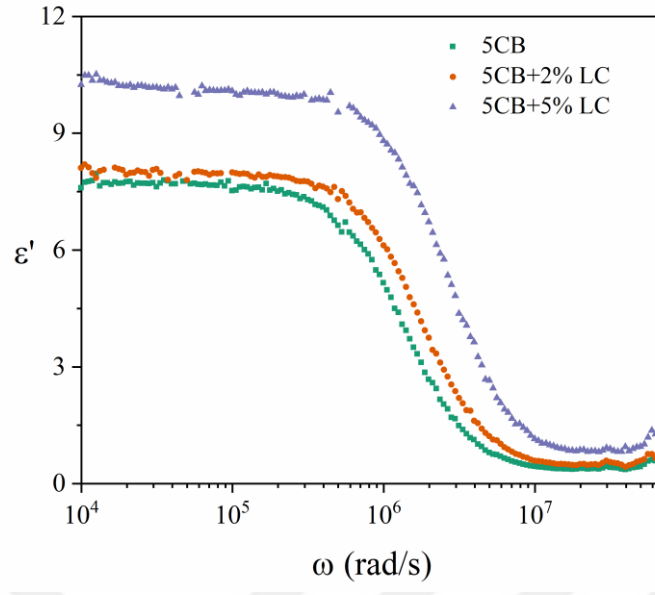


Şekil 5.2 Cr ve LC malzemelerin polarize ışık mikroskobu tekstür görüntüleri (a) $T=39\text{ }^{\circ}\text{C}$ Cr; (b) $T=132\text{ }^{\circ}\text{C}$ LC

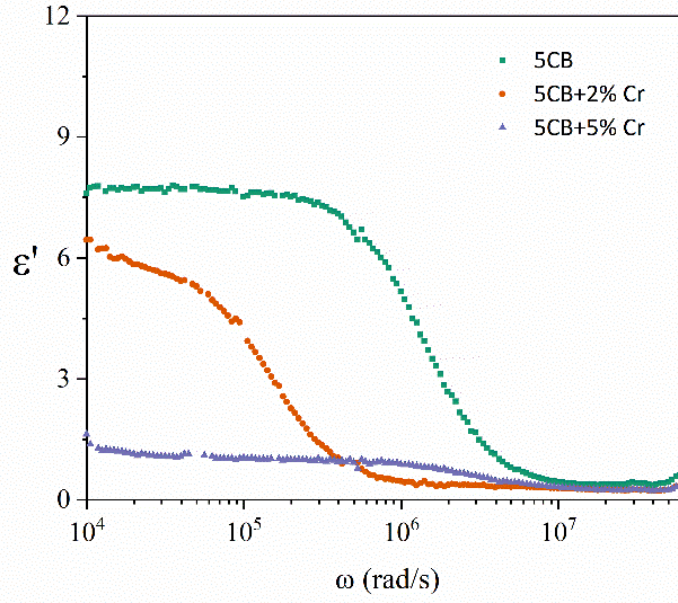
5.2 5CB, 5CB+%2LC, 5CB+%5LC, 5CB+%2Cr, 5CB+%5Cr Malzemelerin Dielektrik Ölçüm Sonuçları

5CB ve 5CB+%2LC, 5CB+%5LC, 5CB+%2Cr, 5CB+%5Cr kompozitlerin dielektrik spektrumları frekans aralığı 100Hz-10MHz olarak ölçülmüş ve incelenmiştir [103,104].

5CB ve 5CB+%2LC, 5CB+%5LC, 5CB+%2Cr, 5CB+%5Cr kompozit karışımların dielektrik sabitlerinin reel kısmının açısal frekansa ile değişen grafikleri Şekil 5.3’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.3 Dielektrik sabitinin reel kısmının (ϵ') açısal frekansa göre değişimi (a) 5CB, 5CB+%2LC, 5CB+%5LC (b) 5CB, 5CB+%2Cr, 5CB+%5Cr [103,104]

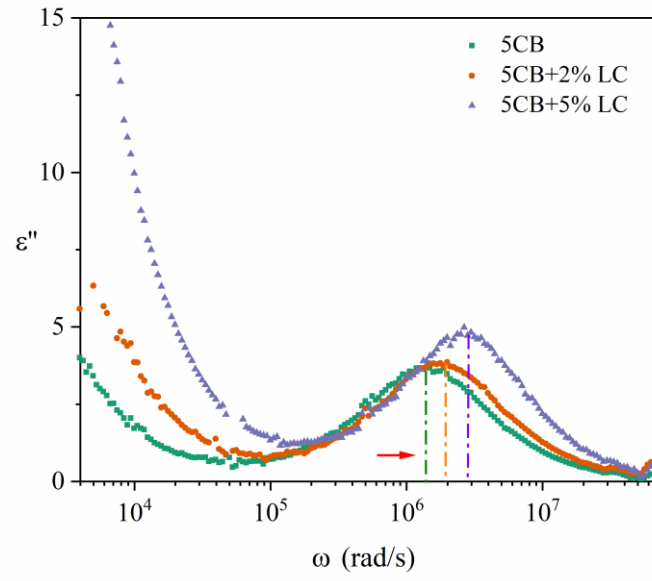
Şekil 5.3a'da 5CB kristaline %2 ve %5 oranlarında LC katkılıandığında düşük frekans bölgesinde dielektrik sabitinin reel kısmının (ϵ') yüksek değerlerde olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.3a'da 5CB'ye %2 ve %5 oranında LC maddesi ile hazırlanan kompozitlerin frekans arttıkça daha kararlı olduğu görülmüştür.

Şekil 5.3b'de 5CB sıvı kristaline sırasıyla %2 ve %5 oranlarda Cr malzeme eklendiğinde dielektrik sabitinin (ϵ') reel kısmının frekanstaki artışla birlikte hızla azalmış olduğu görülmektedir. Dielektrik sabitinin reel kısmında (ϵ') görülen bu belirgin azalma uzay yükü polarizasyon etkisinin azalmasından kaynaklanmaktadır. İncelenen her üç durumda açısıl frekansın en düşük olduğu bölgelerde dielektrik sabitinin (ϵ') reel kısımları en yüksek değere sahiptirler.

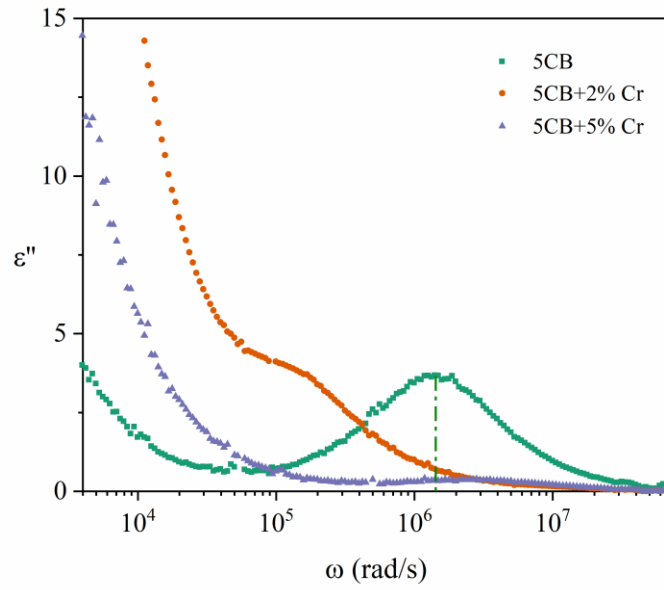
5CB ve 5CB+%2LC, 5CB+%5LC, 5CB+%2Cr, 5CB+%5Cr kompozitlerinin dielektrik sabitinin sanal kısmının (ϵ'') açısıl frekans ile karşılaştırmalı ölçüm sonuçlarının grafikleri Şekil 5.4'de verilmiştir. Burada bahsedilen (ϵ'') değeri enerji kaybı ile orantılıdır. Dielektrik sabitlerinin sanal kısımlarının frekansa bağlı eğrileri, bir dielektrik relaksasyon piki verir. Bu pikler, moleküllerin yönelimini gösterir.

LC katkısının artmasıyla, bu gözlenen relaksasyon piki yavaşça yüksek frekans bölgesine kayar. Katkı maddesi konsantrasyonu artırılırsa relaksasyon frekansı için önemli bir kayma elde edilebilir.

Relaksasyon pikleri, LC kompozitlerindeki moleküllerin oryantasyonu ile ilgilidir. Şekil 5.3b'de görüldüğü gibi, 5CB'ye Cr ekleyerek relaksasyon frekansı gözlemlenmedi. Bu nedenle kristal katkısının 5CB nematik sıvı kristalinin moleküler yönelimini bozduğunu söyleyebiliriz.



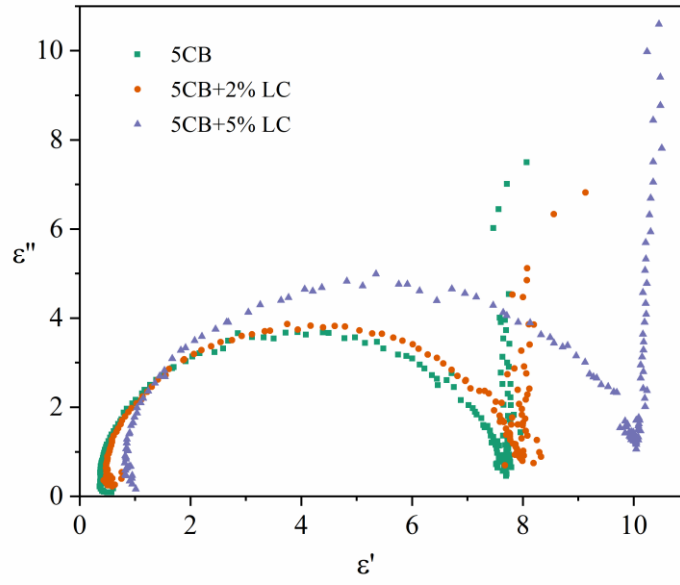
(a)



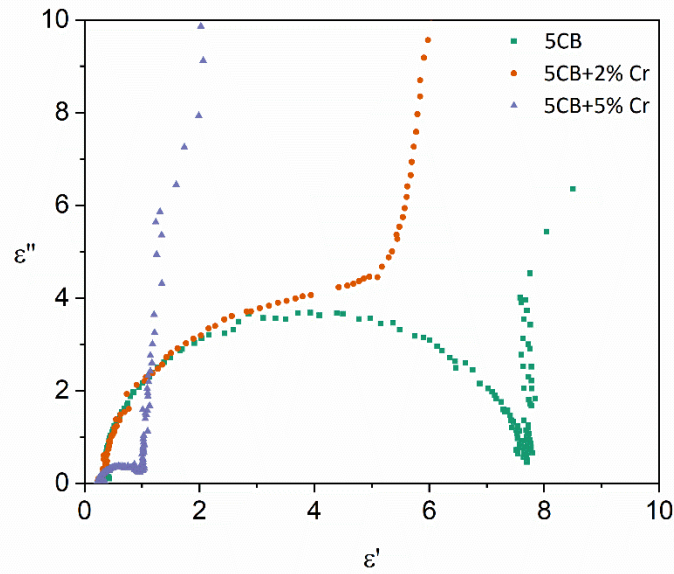
(b)

Şekil 5.4 Dielektrik sabitinin sanal kısmının (ϵ'') açısal frekansa göre değişimi (a) 5CB, 5CB+%2LC, 5CB+%5LC (b) 5CB, 5CB+%2Cr, 5CB+%5Cr [103,104]

Cr ve LC malzemelerin dielektrik gevşeme mekanizmasının analiz etmek için tüm kompozitlerin Cole-Cole grafikleri çizilmiştir (Şekil 5.4)



(a)



(b)

Şekil 5.5 Cole-Cole eğrileri (a) 5CB, 5CB+%2LC, 5CB+%5LC (b) 5CB, 5CB+%2Cr, 5CB+%5Cr [103, 104]

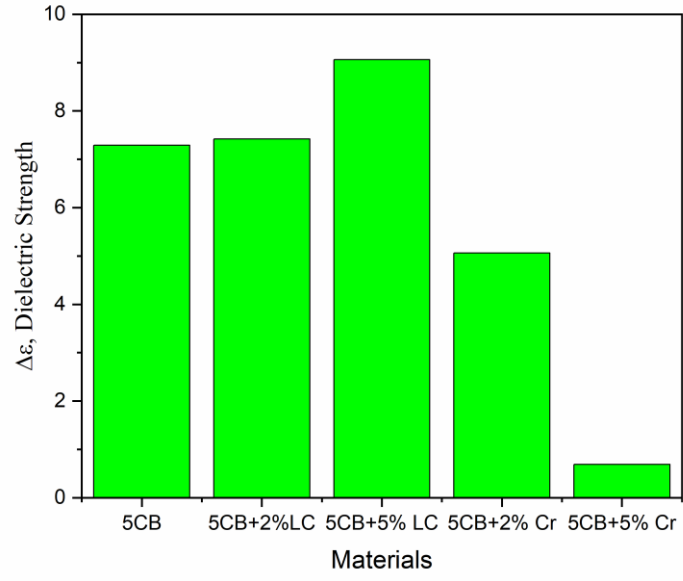
Cole -Cole eğrilerinde relaksasyon frekansı (f_r), $\epsilon''_{\max}$ noktasında en büyük değerine ulaşır. 5CB'nin LC ile konsantrasyonunda Cole-Cole eğrilerin çapının arttığı görülürken, 5CB'ye Cr ekleyip kompozit oluşturduğumuzda Cole- Cole eğrilerinin

çapının azaldığı görülmüştür. Buradan ortaya çıkan sonuç ile dielektrik gücün 5CB+LC kompozitlerinde arttığı, Cr katkılı kompozitlerde azaldığı gözlemlenmiştir.

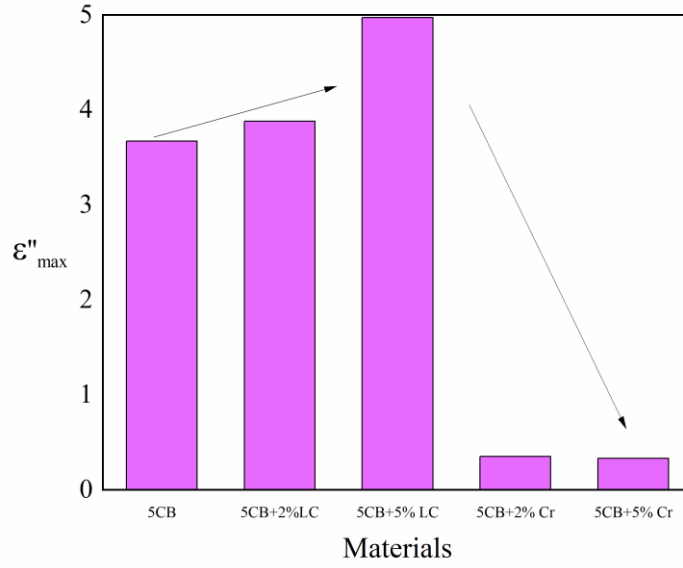
$\varepsilon''_{\max}$, ε_s , ε_{∞} , $\Delta\varepsilon$ (dielektrik dayanım), f_r (relaksasyon frekans) değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Dielektrik dayanım, 5CB nematik sıvı kristaline %2 ve %5 oranında LC katkılı olduğunda ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}$) arttığı, %2 ve %5 oranında Cr katkılı olduğunda ise azalttığı gözlenmiştir.

Tablo 5.1 5CB ve tüm kompozitler için $\varepsilon''_{\max}$, ε_s , ε_{∞} , $\Delta\varepsilon$ ve f_r değerleri [103,104]

	<i>5CB</i>	<i>5CB+2% LC</i>	<i>5CB+5% LC</i>	<i>5CB+2% Cr</i>	<i>5CB+5% Cr</i>
$\varepsilon''_{\max}$	3.67	3.88	4.97	3.70	0.33
ε_s	7.662	8.01	10.07	5.43	1.01
ε_{∞}	0.371	0.588	1.01	0.37	0.32
$\Delta\varepsilon$	7.291	7.422	9.06	5.06	0.69
f_r	0.29×10^6	0.315×10^6	0.417×10^6	-	-



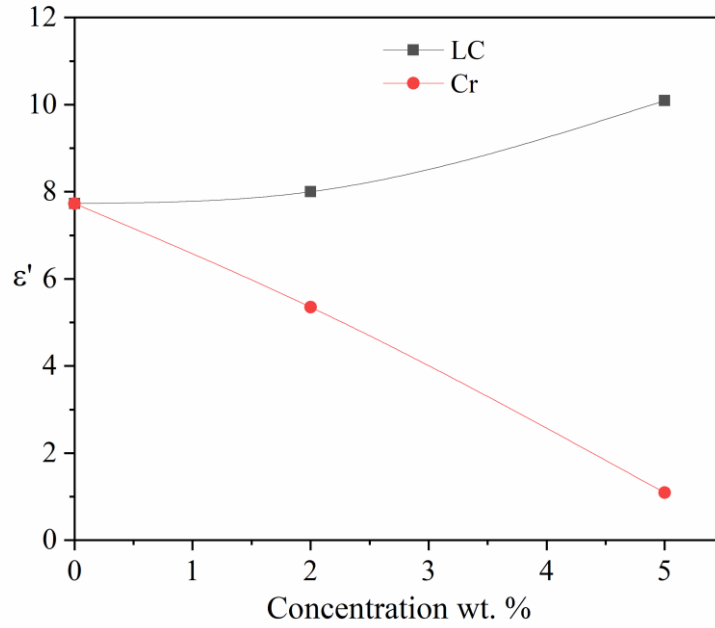
(a)



(b)

Şekil 5.6 5CB, 5CB+%2LC, 5CB+%5LC, 5CB+%2Cr, 5CB+%5Cr için konsantrasyona bağlı (a) dilektrik dayanım($\Delta\epsilon$) (b) $\epsilon''_{\max}$ 'ın değişim grafiği [103,104]

Şekil 5.6a ve Şekil 5.6b’de konsantrasyona bağlı dielektrik dayanım ve $\epsilon''_{\max}$ ’ın değişim grafikleri verilmiştir. Konsantrasyon arttıkça LC katkısında dielektrik dayanım($\Delta\epsilon$) ve $\epsilon''_{\max}$ artış gösterirken Cr katkısında belirgin bir azalış göstermiştir.



Şekil 5.7 5CB' ye eklenen LC ve Cr bileşiğin konsantrasyona bağlı dielektrik sabitinin değişimi [103,104]

Şekil 5.7’de LC ve Cr ile hazırlanan kompozitlerin dielektrik sabitinin reel kısmının konsantrasyona bağlı değişimi verilmiştir. 5CB ye eklediğimiz Cr malzemenin oranı arttıkça dielektrik sabitinin azaldığı, LC malzemenin oranı arttığında ise dielektrik sabitinin yükseldiği gözlemlenmiştir.

5.3 LC ve Cr Bileşiklerinin Farklı Konsantrasyonlarının Frekansa Bağlı İletkenlik Üzerindeki Etkisinin Analizi

İletkenlik mekanizmalarının analizlerinde Şekil 5.8’de verilen $\ln \sigma_{AC} = f(\ln \omega)$ eğrilerin eğimi kullanıldı. AC (Alternatif akım) iletkenliği, σ_{AC} ile fonksiyonu ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_{AC} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' \quad (4.1)$$

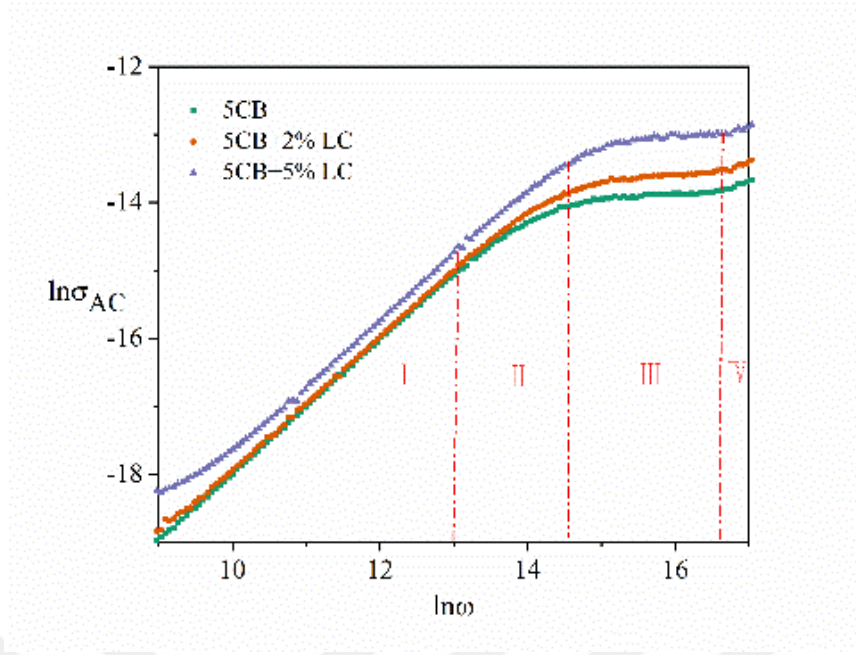
Verilen bağıntıda, ε_0 boş uzayın dielektrik geçirgenliği, ω açısal frekans ve ε'' dielektrik sabitinin sanal kısmı olarak ifade edilir.

İletkenlik Jonscher denklemi, DC ve AC bileşenleri ile

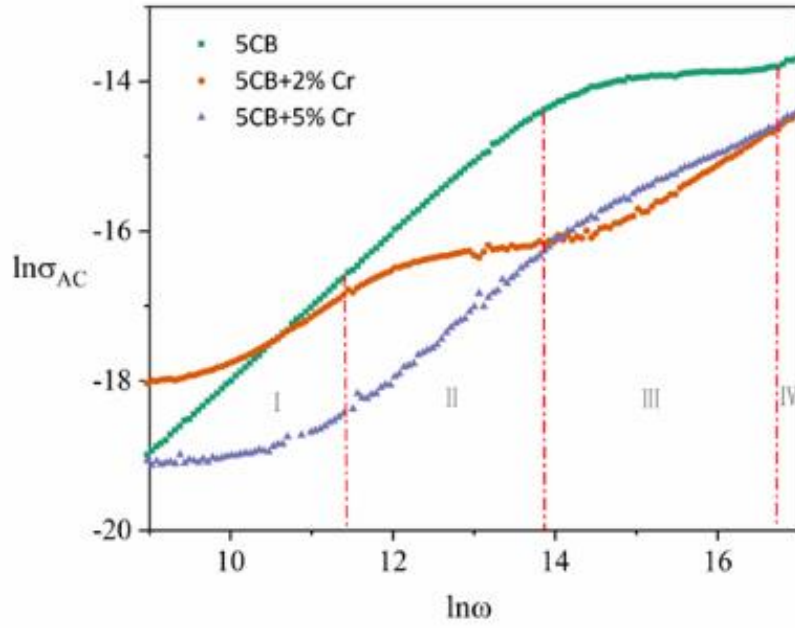
$$\sigma_{AC} = \sigma_{DC} + A\omega^s \quad (4.2)$$

Şeklinde ifade edilebilir.

İkinci terim AC bileşeni, $\sigma_{AC} = A\omega^s$, s frekans üs değerleridir, bu değerler farklı frekans bölgelerinde, 5CB, 5CB+%2LC, 5CB+%5LC, 5CB+%2Cr, 5CB+5%Cr kompozitleri için hesaplanmıştır. Farklı konsantrasyonlarda LC ve Cr eklenmesinin bazı frekans bölgelerinde iletkenlik mekanizmalarını değiştirdiği gözlemlendi (Tablo 5.2).



(a)



(b)

Şekil 5.8 $\ln \sigma_{AC} - \ln \omega$ grafiği (a)5CB, 5CB+%2LC, 5CB+%5LC (b) 5CB, 5CB+%2Cr, 5CB+%5Cr

Tablo 5.2 5CB, 5CB+%2LC, 5CB+%5LC, 5CB+%2Cr, 5CB+%5Cr için s parametreleri ve iletkenlik mekanizmaları

	1.Bölge s parametresi, iletkenlik mekanizması	2.Bölge s parametresi, iletkenlik mekanizması	3.Bölge s parametresi, iletkenlik mekanizması	4.Bölge s parametresi, iletkenlik mekanizması
5CB	0.981, QMT	0.893, QMT	0.243, DC	0.091, DC
5CB+2%LC	0.984, QMT	0.785, QMT	0.157, DC	0.901, QMT
5CB+5%LC	0.991, QMT	0.878, QMT	0.160, DC	0.715, QMT
5CB+2%Cr	0.563, CBH	0.216, DC	0.660, CBH	1.927, SLPL
5CB+5%Cr	0.124, DC	0.864, QMT	0.527, CBH	1.693, SLPL

5CB ticari nematik sıvı kristaline %2 ve %5 oranlarında LC ve Cr katkı yapılarak oda sıcaklığında, dielektrik spektrumları frekansa bağlı olarak analiz edildi. 5CB, 5CB+%2LC, 5CB+%5LC, 5CB+%2Cr, 5CB+%5Cr kompozitlerinin ölçümlerden elde edilen verileri karşılaştırıldı. Cole-Cole eğrilerinin çapının LC bileşiği ilavesiyle arttığı, kristal bileşiği ilavesiyle ise bu çapların azaldığı belirlendi. Bu sonuçta LC' nin üstün yönlenme özelliklerinden dolayı polarizasyonu arttırdığı gözlenmiştir. İki sıvı kristal karışımı, malzemenin dielektrik özelliklerini iyileştirmiştir.

Uygulanan voltajın frekansı da dielektrik sabitini etkiler. Frekans arttıkça, dielektrik sabiti doğrusal olmayan hale gelir ve frekans arttıkça değeri daha hızlı düşer. Yüksek frekanslarda elektrik güç kaybı artar. Yüksek frekans uygulamaları için düşük dielektrik sabiti değerlerine sahip malzemelerin tercih edilmesinin bir nedeni de budur. Bu nedenle, yüksek veya düşük dielektrik sabiti seçimi kullanılan uygulamaya bağlıdır. Çalışmamızda LC katkısı ile dielektrik sabiti bir miktar artarken, kristal katkısı dielektrik sabitini azaltmıştır. Dielektrik dayanım, bir malzemenin yalıtım özelliklerinde bozulma yaşamadan dayanabileceği maksimum elektrik alanıdır. Dielektrik dayanımı ($\Delta\epsilon$) ne kadar yüksek olursa, elektriksel iletkenliği önlemek için bir malzeme o kadar iyi olur. Aynı zamanda çalışmamızda LC'nin katkısı ile dielektrik dayanımının arttığı gözlenmiştir. Farklı aromatik halka sayıları ile farklılaşan benzer moleküler yapıya sahip kiral kalamitik moleküller farklı oranlarda (ağırlıkça %2.0 ve ağırlıkça %5.0) Cr ve LC ile katkılama yapılarak elde edilen karışımlarda, nematik faz sergileyen kalamitik geometri molekülü 5CB'nin dielektrik özellikleri katkılama ile artmıştır. SmA mezofaz sergileyen LC molekülü ile katkılama 1, 2 ve 3 nolu farklı frekans bölgelerinde iletkenlik mekanizmalarının değişmediği ancak kristal (Cr) katkılama ile bu bölgelerde iletkenlik mekanizmalarının değiştiği gözlenmiştir.

Eklenen LC konsantrasyonu küçük olduğundan ϵ' değerindeki artış küçüktü ve bu iletkenlik mekanizmasını değiştirmede. Eklenen LC konsantrasyonu daha da arttırılırsa, iletkenlik mekanizmasında önemli bir değişiklik gözlemleyebiliriz.

Benzer moleküler yapıya sahip kalamitik moleküllerle katılama, sıvı kristal (5CB)-sıvı kristal(LC) etkileşiminin sağladığı yeni moleküler düzenleme, sıvı kristal (5CB)-kristal(Cr) etkileşimine kıyasla dielektrik özelliklerde iyileşme sağlar. Karışımındaki moleküler istiflenmenin de dielektrik özellikler üzerinde önemli olduğu ortaya koyulmuştur.



- [1] F. Reinitzer, “Beiträge zur kenntniss des choleterins,” 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] Z. Ekici, “Sıvı Kristaller, Genel Özellikleri, Sıvı Kristallerin Sentezi ve Uygulama Alanları”, Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adıyaman, 2014.
- [5] Ş.Üstünel, “Sıvı Kristal İkili Karışımlarında Halperin-Lubensky-Ma Ölçeklenme Fonksiyonunun Çift Kırıcılık Ölçümleri ile Test Edilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.
- [6] 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.
- [7] G. W. Gray, K. Harrison ve J. Nash, “New family of nematic liquid crystals for displays,” Electronics Letters, vol. 9, pp. 130–131, 1973.
- [8] 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.
- [9] 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
- [10] P. G. De Gennes, “The physics of Liquid Crystals”, Oxford University, Press: Oxford, 1974.
- [11] I. Dierking, “Textures of Liquid Crystals”, Wiley –VCH, Weinheim, 2003.
- [12] D. Demus, L. Richter, “Textures of Liquid Crystals”, Verlag-Chemie, Weinheim, 1983.
- [13] S. A. Pikin, “The effect of pretransitional phenomena on the characteristics of induced ferroelectric liquid-crystalline systems”, Liq. Cryst., 5: 1195–1202, 1989.
- [14] N. Y. Canlı, “Sıvı kristal sistemlerin mesomorfik, morfolojik ve elektro-optik özelliklerinin incelenmesi,” Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [15] G. Gray, V. Vill, H. Spiess, D. Demus, ve J. Goodby, Physical Properties of Liquid Crystals. Manchester: Wiley, 2009.

- [16] H. Allinson, ve H.F. Gleeson, “Dielectric permittivity properties of a fulgide dye guest-host liquid crystal” *Liq. Cryst.* 19 (4): 421–425. 136, 1995.
- [17] G. Klimusheva, A.Koval’chuk, N. Volynets, ve A. Vakhnin, “Electrooptical Properties of metal organic ionic liquid crystals”, *Issue Series Title: Opto-electron. Rev.* 10 (1): 39–42, 2002.
- [18] J. Parka “Photorefractivity of dye-doped NLC layers and possibility of their application”, *Opto-electron. Rev.* 10 (1): 83–87, 2002.
- [19] T. Grudniewski, J. Parka, R. Dabrowski, A. Januszko ve A. Miniewicz, “Investigations of the diffraction efficiency in dye-doped LC cells under low frequency AC voltage”, *Opto-electron. Rev.* 10 (1): 11–16, 2002.
- [20] L.M. Blinov ve V. G. Chigrinov, “Electrooptic effects in liquid crystal materials”, Springer- Verlog, New York Inc, 1994.
- [21] O. Köysal, “Azo boya ve fulleren katkılı nematik sıvı kristallerin elektro optik özelliklerinin incelenmesi”, *Doktora Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli*, 2007.
- [22] F. Yeşil, “Anchoring Energy Measurements at the Aqueous Phase/Liquid Crystal Interface with Cationic Surfactants Using Magnetic Fréedericksz Transition,” *Langmuir*, vol. 34, no. 1, pp. 81-87, 55, 2017.
- [23] I. Budagovsky, A. Kuznetsov, S. Shvetsov, M. Smayev, A. Zolot’ko, P. Statsenko, S. Trashkeev, A. Bobrovsky, N. Boiko ve V. Shibaev, “Optical Fréedericksz transition and director field structure recording in dye-doped nematic liquid-crystalline polymer,” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 276, pp. 275-281, 2019.
- [24] Sıvı kristaller ve elektro-optik uygulamaları, <https://docplayer.biz.tr/46818316-Sivi-kristaller-ve-elektro-optik-uygulamalari.html>, (31 Aralık 2020)
- [25] L. Lam, “Solitons in Liquid Crystals: Recent Developments”, *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 5, no. 12, pp. 2463-2473, 1995.
- [26] A. Jonas, “Sıvı kristallerin emülsiyon damlalarının anizotropik lazer kaviteleri olarak kullanılması”, *TÜBİTAK Projesi*, Ocak 2017.
- [27] Ş. Özgan, M. Yazıcı, “Sıvı Kristaller ve Faz Geçişleri”, *KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 6, no. 2, pp. 20-27, 2003.
- [28] M. Okutan, F. Yakuphanoglu, O. Köysal, M. Durmus ve V. Ahsen, “Dielectric spectroscopy analysis in employing liquid crystal phthalonitrile derivative in nematic liquid crystals,” *Spektro Chemica Acta Part A*, vol. 67, pp. 531-535, 2006.
- [29] T. Aldanma, “Lazerin Polimer, Boyar Maddesi ve Karbon Tanecikleri Katkılandırılmış Sıvı Kristallerin Dielektrik Anizotropi Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ*, 2007.

- [30] N.Avcı, “ÇokluFaz Geçişli Kalamitik ve Bent-Core Moleküllü Sıvı Kristallerin Termotropik, Termo-Morfolojik, Termo-Optiksel, Dielektrik ve Viskoelastik Özelliklerini İncelenmesi”, Doktora Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, 56, 2013.
- [31] Y. Emül, “Monte Carlo Yöntemleri ile Termotropik Sıvı Kristal Özelliklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2014.
- [32] P. Özden, “Sonlu Boyutlu Miselli Liyotropik Sıvı Kristalik Mezofazların TermoMorfolojik, Termotropik, Termo-Optiksel ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, 2017.
- [33] T. Yıldırım, “Ötektik Sıvı Kristal Nanotel Karışımlarının Faz Geçişlerini Termo-Optik Yöntemlerle İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2017.
- [34] E. Kemiklioğlu, E. Atik, C. Çivi, “Mavi Faz Kolesterik Sıvı Kristalinin Termal Kararlılığı ve Mekanik Davranışları Üzerine Polimer Çeşitliliğinin Etkisi,” Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 18, pp. 403-411, 2018.
- [35] G. Kocakulah, “CdSeS/ZnS Kuantum Nokta Katkılı 5CB Nematik Sıvı Kristalinin Elektro-Optik ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, 2018.
- [36] G. Önsal, “Polimer-Sıvı Kristal Kompozit Yapılarda Azo Boyanının Dielektrik ve Opto-Elektronik Özelliklere Etkisi”, Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, 57, 2019.
- [37] B. Okayay, “Sıvı Kristal Hücre Geometrilere Bağlı Optik İletim Özelliklerinin Sayısal Yöntemlerle Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 2019.
- [38] A. Yıldız, “Sıvı Kristallerde Faz Geçiş Sıcaklıklarının Dielektrik Spektroskopi Yöntemi ile İncelenmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.
- [39] A. E. Mamuk, “Smektojen ve Nematojen Termotropik Sıvı Kristallerin Optiksel ve Termo-Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, 2019.
- [40] Y. Tapkıranlı, “Grafen Oksit Katkılı, 6CB Sıvı Kristalinin Elektro-Optik ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2019.
- [41] F. Kremer ve A. Schönals, Broadband Dielectric Spectroscopy. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [42] J. Mirzaei, “Optical and electro-optical properties of nematic liquid crystals with nanoparticle additives”, Doktora tezi, Kimya Bölümü, Manitoba Üniversitesi, Winnipeg, MB, Canada, 2015.

- [43] H. J. Shah, "Engineered interfaces for liquid crystal technology", Doktora tezi, Elektrik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Drexel Üniversitesi, Philadelphia, PA, USA, 2007.
- [44] P. de Gennes, The Physics of Liquid Crystals, ser. The International series of monographs on physics. New York: Clarendon Press, 1974.
- [45] P. J. Collings, Liquid crystals: nature's delicate phase of matter. Birleşik Krallık: Princeton University Press, 2002.
- [46] Donino, B., Guillion, D., Deschenaux, Bruce, D.W., Comprehensive Coordination Chemistry II Eds. McCleverty, J.A., Meyer, T.J., Pergamon, Oxford, 2003.
- [46] Donino, B., Guillion, D., Deschenaux, Bruce, D.W., Comprehensive Coordination Chemistry II Eds. McCleverty, J.A., Meyer, T.J., Pergamon, Oxford, 2003.
- [47] K. Bilen, Isıtılan Düzlem Bir Plakaya Dik ve Eğik Hava Jeti Çarpmasında Isı Transfer Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi, KTÜ Fen Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, 86, 1994.
- [48] M. Schadt, "Liquid crystal materials and liquid crystal displays", Annual Review of Materials Research, c. 27, ss. 305–379, 1997.
- [49] M. Okutan, "Fulleren ve azo boya katkılı nematik sıvı kristal sistemlerde dielektrik ve optik spektroskopi yöntemleri ile moleküler durulma zamanlarının ve kırılma indisi değişimlerinin incelenmesi", Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2010.
- [50] R. Kumar, "Morphology and electro-optic study of polymer stabilized liquid crystal dispersed composites," Doktora tezi, Fizik ve Malzeme Bilimi Okulu, Thapar Üniversitesi, Patiala, India, 2014.
- [51] S. Erkan, "Polar ve polar olmayan smektojen sıvı kristallerin yüksek çözünürlüklü çift kırıcılık ölçümleri," Doktora tezi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [52] G. Kocakulah, "Mikro ve nano parçacık katkılı sıvı kristal kompozit yapıların morfolojik, elektro-optik ve dielektrik özelliklerinin incelenmesi, Düzce Üniversitesi," Doktora Tezi, 2022.
- [53] G. W. Gray, "Molecular structure and the properties of liquid crystals," Academic press, New York, 1962.
- [54] I. G. Chistyakov "Liquid crystals, Sci. Publ. House," Moscow, 1966.
- [55] P.-L. Champagne, R. Kumar ve C.-C. Ling, Supramolecular Liquid Crystals Based on Cyclodextrins. In: Fourmentin S., Crini G., Lichtfouse E. (eds) Cyclodextrin Applications in Medicine, Food, Environment and Liquid Crystals. Environmental Chemistry for a Sustainable World, Springer International Publishing, 2018.

- [56] A. Katariya-Jain ve R. R. Deshmukh, “An overview of polymer-dispersed liquid crystal composite films and their applications,” *Liquid Crystals and Display Technology*, IntechOpen, ss. 1–68, 2020.
- [57] A. J. Paraskos, “Unusual Molecular Architectures in Liquid Crystals and Polymer Chemistry,” *Doctoral Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [58] P. Caglar, H. Ocak, N. Y. Canli, A. Yildiz, M. Okutan ve B. B. Eran, “The synthesis and dielectric characterization of a low temperature smectic A liquid crystal,” *Mater. Res. Express*, vol. 6, pp. 1-9, 2019.
- [59] N. Kaya, “Mavi- kırmızı boya ve karbon nanotüp katkılı nematik sıvı kristallerin karakterizasyonu ve uygulanabilirliğinin araştırılması,” *Doktora tezi*, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.
- [60] I. Dierking, “Textures of Liquid Crystals,” New York: Wiley, 2006.
- [61] D. Andrienko, “Introduction to liquid crystals,” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 267, pp. 520–541, 2018.
- [62] P. K. Tripathi, “Electrical and Optical Studies of Some Liquid Crystals,” *Doktora tezi*, Fizik Bölümü, Lucknow Üniversitesi, Lucknow, UP, India, 2013.
- [63] H. K. Bisoyi, “Synthesis and Characterization of Novel Mesogenic Materials,” *Doctoral Thesis*, Jawaharlal Nehru University Raman Research Institute, Bangalore, 2009.
- [64] S. Chandrasekhar, “Liquid Crystals, 2nd ed. Cambridge,” Cambridge University Press, 1992
- [65] D. J. R. Cristaldi, S. Pennise ve F. Pulvirenti, “Liquid Crystal Displays Drivers,” Springer, Netherlands, 2009.
- [66] P. J. Collings ve M. Hird, “Introduction to Liquid Crystals,” 2001
- [67] W. Li ve LixinWu, “Liquid crystals from star-like clusto-supramolecular macromolecules,” *Polym. Int.*, vol. 63, pp. 1750–1764, 2014.
- [68] H. N. Patela ve A. K. Prajapati, “Mesogenic Terminal Naphthyl Derivatives with Azomethine/Azo and Ester Central Linkages,” *Gen. Chem.*, vol. 4, pp. 1-7, 2018.
- [69] N. V. S. Rao, T. D. Choudhury, M. K. Paul ve T. Francis, “Mononuclear and binuclear complexes of salicylidene Schiff bases: synthesis and mesogenic properties,” *Liquid Crystals*, vol. 36, no. 4, pp. 409–423, 2009.
- [70] G. Karanlık, A. Yıldız, N. Y. Canli, H. Ocak, M. Okutan ve B. B. Eran, “The analysis of temperature effect on frequency dependent dielectric parameters of semifluorinated liquid crystalline biphenyl carboxylic acid,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 555, pp. 85–90, 2019.

- [71] M. S. Erel, “Bazı kloro ve amino antrakinon yapıları boyarmaddelerin y-h tipi sıvı kristal sistemlerde kullanılabilirliğinin araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [72] Ö. Yılmaz, “E63 kodlu NiPc+C61 katkılı nematik sıvı kristalin elektriksel ve manyetik özelliklerinin incelenmesi,” Doktora tezi, Fizik Anabilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2018.
- [73] A. Yıldız, “Sıvı Kristallerde Faz Geçişlerinin Dielektrik Spektroskopi Yöntemi ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,” İstanbul, 2019.
- [74] Ç. Özden, “Termotropik Kolesterik Sıvı Kristaller: Mezomorfik, Termomorfolojik ve Termo-Optiksel Özelliklerin İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, 2013.
- [75] C. V. Yelamagadda, I. Shashikala, D. S. Shankar, ve S. Krishna Prasad, “Bent-core v-shaped mesogens consisting of salicylaldehyde mesogenic segments: synthesis and characterization of mesomorphic behaviour,” Liquid Crystals, vol. 31, no. 7, pp. 1027–1036, 2004.
- [76] G. Pelzl, S. Diele, W. Weissflog, Banana-shaped compounds a new field of liquid crystals. J Adv Mater.11,707-724,1999.
- [77] I. Dierking, Textures of Liquid Crystals. New York: Wiley, 2006.
- [78] Müge Erdoğan, ‘Sıvı Kristal Kompozitlerin Dielektrik Özellikleri’, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021,
- [79] J. W. Goodby, P. J. Collings, T. Kato, C. Tschierske, H. F. Gleeson ve P. Raynes, “Handbook of Liquid Crystals,” 2014.
- [80] D. Vardar, “Piridin esaslı kiral kalamitik sıvı kristaller, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,” Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [81] N. H. Tinh, C. Destrode, ve H. Gasparoux, “Nematic disc-like liquid crystals,” Physics Letters A, vol. 72, no. 3, pp. 251–254, 1979.
- [82] Liquid Crystals: a Simple View on a Complex Matter, 6. Surface Anchoring, <http://dept.kent.edu/spie/liquidcrystals/anchoring1.html#ch11> , Şubat 2012.
- [83] M. Emek, “Faz dönüşümlerinin nematik sıvı kristallerin elektro-optik özelliklerine etkisi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,” Doktora Tezi, 2007.
- [84] N. Kaya, “Mavi-kırmızı boya ve karbon nanotüp katkılı nematik sıvı kristallerin karakterizasyonu ve uygulanabilirliğinin araştırılması,” Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şubat 2010.
- [85] B. Akar, “Nematik sıvı kristallerin karbon nanotüplerin yönleniminde kullanılması, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı,” Yüksek Lisans Tezi, 2006.

- [86] H. M. Eser, “Karbon nanotüp-sıvı kristal karışımlarının elektriksel özellikleri, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı,” Yüksek Lisans Tezi, 2006
- [87] P.S. Pershan, “Structure of liquid crystal phases,” World Scientific, New Jersey, 1988.
- [88] S.Balcı, “ Kuantum nokta katkılı polimer dağıtılmış sıvı kristal kompozit yapıların elektro-optik ve dielektrik karakterizasyonu, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,” , Yüksek Lisans tezi, 2021.
- [89] Y. Xu, A. M. Rather, S. Song, J. C. Fang, R. L. Dupont, U. I. Kara, & X. Wang, “Ultrasensitive and selective detection of SARS-CoV-2 using thermotropic liquid crystals and image-based machine learning. Cell Reports Physical Science, 1(12), 2020.
- [90] D.J. Griffiths, “Elektromanyetik Teori,” (Çev: B. Karaoğlu), İstanbul: Arte Güven Yayıncılık, 1996.
- [91] D. Griffiths, Introduction to Electrodynamics. London: Prentice Hall, 1999.
- [92] B. Değer Şitilbay, “Bitümlü malzemelerin reolojik ve dielektrik özelliklerinin yapay sinir ağlarıyla modellenmesi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,” , Doktora Tezi, 2023.
- [93] A.R. Von Hippel, Dielectric and Waves, Newyork, 54-11020., 1954,
- [94] Feymann, Leighton, Sands, “Feymann Fizik Dersleri”, Alfa Bilim, vol. 2, İstanbul, 2014.
- [95] E. Riande ve R. Diaz-Calleja, Electrical Properties of Polymers. New York: Taylor & Francis, 2004.
- [96] 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.
- [97] K., C., Kao, 2004, Dielectric phenomena in solids, Elsevier, ISBN: 0-12-396561-6.
- [98] A., Moliton, Applied Electromagnetism and Materials, Springer Science & Business Media, ISBN-13: 978-0387-38062-9., 2007
- [99] G.G. Raju, “Dielectrics in Electric Fields, ” Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
- [100] Aysel Büyükbaş, ‘AuGe/SiO₂/p-Si/AuGe (MOS) Kapasitörün Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi’,Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [101] O. Potok, “Polietilen oksit ince filmlerin dielektrik özelliklerinin incelenmesi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü” Yüksek Lisans Tezi, 2019.

- [102] S. M. Yaniç, “Kalamitik Sıvı Kristallerin Termodinamik Özellikleri ve Polimerde Dağılmış Sıvı Kristal Kompozitlerinin Sentezi ve Karakterizasyonu”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018
- [103] N. Yılmaz Canlı, D. Özükanar, D.Vardar, P. Kavak, A. Aşıkoğlu, H. Ocak, B. Bilgin Eran, “Determination of Dielectric Properties of 5CB Nematic Liquid Crystal Doped with NewChiral Calamitic Compounds”, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE:MATERIALS INELECTRONICS, cilt.34, sa.1304, ss.1-10,2023(SCI-Expanded)
- [104] D. Özükanar, P. Kavak, N. Yılmaz Canlı, A. Asikoglu Bozkurt, D.Vardar, H. Ocak, B. Bilgin Eran, “Investigation of Dielectric Properties of 5CB Doped by SmA LC and Cr”, 9 th International Conference on Materials Science and Nanotechnology for Next Generation, Ankara, Türkiye, ss.1, 22-24 Eylül 2022.
- [105] Huberlin.De,
https://fakultaeten.huberlin.de/en/mnf/forschung_internationales/grs/salsa/p-a-labs/application-lab/instrumentation/a-labs-lm/polarized-light-microscopy , (31 Aralık 2020).
- [106] Dergipark, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/79181>
- [107] TD. Dzharov, S. S. Yesilkaya, Canlı NY., Caliskan M., “Diffusion and influence of Cu on properties of CdTe thin films and CdTe/CdS cells” Solar Energy Materials and Solar Cells 85(3), 371-383 2005
- [108] N.Yılmaz Canlı, Ö. Yasa, C. Yörür, B. Bilgin Eran, F. Yakuphanoglu“ Dielectric anisotropy and dielectric relaxation dynamics in chiral and non-chiral salicylaldehyde –nematic crystal composites” Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid communications (OAM-RC) 4, ISS 1 (January 2010) p. 86 – 92.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

- [1] D. Özükanar, P. Kavak, N. Yılmaz Canlı, A. Aşıkoğlu Bozkurt, D. Vardar, H. Ocak, B. Bilgin Eran, “Investigation of Dielectric Properties of 5CB Doped by SmA LC and Cr”, 9 th International Conference on Materials Science and Nanotechnology for Next Generation, Ankara, Türkiye, 22-24 Eylül2022, ss.1.

Makaleler

- [1] N. Yılmaz Canlı, D. Özükanar, D.Vardar, P. Kavak, A. Aşıkoğlu, H. Ocak, B.Bilgin Eran, “Determination of Dielectric Properties of 5CB Nematic Liquid Crystal Doped with NewChiral Calamitic Compounds”, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE:MATERIALS INELECTRONICS, cilt.34, sa.1304, ss.1- 10,2023(SCI-Expanded).