T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MİKRO VE NANO PARÇACIK KATKILI SIVI KRİSTAL KOMPOZİT YAPILARIN MORFOLOJİK, ELEKTRO-OPTİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

GÜLSÜM KOCAKÜLAH

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
PROF. DR. OĞUZ KÖYSAL

DÜZCE, 2022

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MİKRO VE NANO PARÇACIK KATKILI SIVI KRİSTAL KOMPOZİT YAPILARIN MORFOLOJİK, ELEKTRO-OPTİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gülsüm KOCAKÜLAH tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL
Düzce Üniversitesi _____

Prof. Dr. Kadir GÖKŞEN
Düzce Üniversitesi _____

Doç. Dr. Abdulkadir ALLI
Düzce Üniversitesi _____

Prof. Dr. Yusuf ATALAY
Sakarya Üniversitesi _____

Doç. Dr. Arif KÖSEMEN
Muş Alparslan Üniversitesi _____

Tez Savunma Tarihi: 30/05/2022

BEYAN

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

30 Mayıs 2022

Gülsüm KOCAKÜLAH

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2020.05.02.1103 ve BAP-2020.05.02.1121 numaralı Bilimsel Araştırma Projeleri ile desteklenmiştir.

30 Mayıs 2022 **Gülsüm KOCAKÜLAH**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ vii
ÇİZELGE LİSTESİ x
KISALTMALAR xi
SİMGELER xii
ÖZET xiv
ABSTRACT xv
EXTENDED ABSTRACT xvi
1. GİRİŞ 1
2. GENEL BİLGİLER 5
2.1. SIVI KRİSTALLER 5
2.1.1. Sıvı Kristal Tanımı ve Tarihçesi 5
2.1.2. Sıvı Kristallerin Sınıflandırılması 7
2.1.2.1. Termotropik Sıvı Kristaller 8
2.1.2.2. Liyotropik Sıvı Kristaller 13
2.2. AZO BOYALAR 14
2.3. YARIİLETKEN KUANTUM NOKTALAR 15
3. SIVI KRİSTALLERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ 17
3.1. DÜZEN PARAMETRESİ 17
3.2. ANİZOTROPİ 18
3.2.1. Optik Anizotropi 18
3.2.2. Dielektrik Anizotropi 19
3.3. ELASTİK SABİTLERİ 20
3.4. ROTASYONEL VİSKOZİTE 21
3.5. YÖNELİM MEKANİZMALARI 22
3.6. BAĞLANMA ENERJİSİ 23
3.7. FREEDERICKSZ GEÇİŞİ VE EŞİK VOLTAJI 24
3.8. TEPKİ SÜRESİ 26
3.9. DİELEKTRİK ÖZELLİKLER 27
3.9.1. Kompleks Dielektrik Sabiti 28
3.9.2. Dielektrik Relaksasyon Davranışları 29
3.9.3. İletkenlik 31
4. KOLESTERİK SIVI KRİSTALLER 32
4.1. KOLESTERİK SIVI KRİSTAL YAPISI VE TEMEL ÖZELLİKLERİ 32
4.2. KOLESTERİK SIVI KRİSTAL DURUMLARI 35
4.3. KOLESTERİK SIVI KRİSTAL DURUMLARI ARASINDA GERÇEKLEŞEN GEÇİŞLER 36
5. DENEYSEL YÖNTEM 38

5.1. KULLANILAN MALZEMELER 38
5.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI 40
5.3. ÖLÇÜMLER 42

6. BULGULAR VE TARTIŞMA 45

6.1. KOLESTERİK SIVI KRİSTALLERİN MORFOLOJİK, ELEKTRO-OPTİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ 45
6.2. AZO BOYA VE KUANTUM NOKTA KATKILI KOLESTERİK SIVI KRİSTAL KOMPOZİT YAPILARIN MORFOLOJİK, ELEKTRO-OPTİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ 63

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 82

8. KAYNAKLAR 88

ÖZGEÇMİŞ 95

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Sıvı kristal faza sahip bir yapının sıcaklığa bağlı faz geçiş diyagramı. 6
Şekil 2.2. (a) Sıvı kristal molekülünün genel yapısı ve (b) Örnek bir sıvı kristal molekülü. 7
Şekil 2.3. Sıvı kristallerin sınıflandırılması. 8
Şekil 2.4. Termotropik sıvı kristallerde faz geçiş süreçleri. 9
Şekil 2.5. (a) Çubuksu sıvı kristal, (b) Disk-şekilli sıvı kristal ve (c) Muz-şekilli sıvı kristalin üç boyutlu görüntüleri. 9
Şekil 2.6. Nematik sıvı kristallerin, (a) Moleküler yönelimi, (b) Polarize mikroskop görüntüsü ve (c) Örnek moleküler formülü. 10
Şekil 2.7. (a) Simektik-A sıvı kristalinin moleküler yönelimi, (b) Simektik-A sıvı kristalinin polarize mikroskop görüntüsü, (c) Simektik-C sıvı kristalinin moleküler yönelimi, (d) Simektik-C sıvı kristalinin polarize mikroskop görüntüsü ve (e) Simektik sıvı kristaline ait örnek moleküler formül. 11
Şekil 2.8. Kolesterik sıvı kristallerin, (a) Moleküler yönelimi, (b) Polarize mikroskop görüntüsü ve (c) Örnek moleküler formülü. 12
Şekil 2.9. Liyotropik sıvı kristallerde faz geçiş süreçleri. 13
Şekil 2.10. Azo boyalarda, (a) Trans-cis fotoizomerizasyonu ve (b) Dalga boyuna bağlı soğurum miktarı değişim grafiği. 14
Şekil 2.11. Yığın malzeme ve kuantum noktaların yasak enerji bant aralıkları. 15
Şekil 2.12. Kuantum noktaların boyuta bağlı Fotolüminesans-Dalga boyu değişim grafiği. 16
Şekil 3.1. Sıvı kristal yapılarda, (a) Düzen parametresinin gösterimi ve (b) Düzen parametresinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği. 17
Şekil 3.2. Optiksel olarak tek eksenli sıvı kristal yapılarda, (a) Pozitif optik anizotropi, (b) Negatif optik anizotropi ve (c) Kırılma indisi parametresinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği. 19
Şekil 3.3. Sıvı kristal yapılarda, (a) Pozitif dielektrik anizotropi, (b) Negatif dielektrik anizotropi ve (c) Dielektrik sabitinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği. 20
Şekil 3.4. Sıvı kristal yapılarda deformasyon çeşitleri, (a) Eğilme, (b) Burulma ve (c) Bükülme. 21
Şekil 3.5. Dış elektrik alan varlığında sıvı kristal molekülünün yönelimine ait şematik gösterim. 22
Şekil 3.6. Sıvı kristallerde temel yönelim mekanizmaları, (a) Planar yönelim ve (b) Homeotropik yönelim. 23
Şekil 3.7. Sıvı kristallerin yüzey ile etkileşimi ve bağlanma enerjisi. 23
Şekil 3.8. Planar yönelime sahip sıvı kristal hücre içerisinde pozitif $\Delta\varepsilon'$ değerine sahip sıvı kristal yapı için, (a) E=0 durumunda moleküler yönelim, (b) E≠0 durumunda moleküler yönelim ve (c) Geçirgenlik-Voltaj grafiği. 25
Şekil 3.9. Sıvı kristal yapılarda tepki süresi parametresinin belirlenmesinde kullanılan Geçirgenlik-Zaman grafiği. 27
Şekil 3.10. Kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal bileşenlerinin frekansa bağlı değişim grafiği. 29
Şekil 3.11. Tek relaksasyon zamanına sahip sistemler için Cole-Cole grafiği. 30
Şekil 4.1. Kiral yapıya sahip olan alanin molekülünün gerçek görüntüsü ve ayna simetrisi. 32

Şekil 4.2. Kolesterik sıvı kristallerde $\hat{n}$ yönelim doğrultusunun değişimi ve p helis adımı. 34
Şekil 4.3. Kolesterik sıvı kristallerde Bragg yansıması. 35
Şekil 4.4. Kolesterik sıvı kristal yapının üzerine ışık düşürülmesi ve farklı voltaj değerlerinde oluşan durumları, (a) P ($V = 0$), (b) FK ($V = V_d$) ve (c) H ($V = V_y$). 36
Şekil 4.5. Kolesterik sıvı kristal yapının planar, fokal konik ve homeotropik durumları arasında voltaj değerine bağlı olarak gerçekleşen geçiş mekanizmaları. 37
Şekil 5.1. 5CB nematik sıvı kristalinin moleküler yapısı. 38
Şekil 5.2. S-811 kiral katkı maddesinin moleküler yapısı. 39
Şekil 5.3. Metil kırmızısı azo boyanın moleküler yapısı. 39
Şekil 5.4. Sıvı kristal hücre yapısı. 40
Şekil 5.5. (a) Numunelerin faz geçiş sıcaklıklarının belirlenmesinde kullanılan DSC cihazı ve (b) Numunelerin morfolojik yapısının belirlenmesinde kullanılan POM cihazı. 42
Şekil 5.6. Numunelerin elektro-optik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan elektro-optik geçirgenlik sistemi deney düzeneği. 43
Şekil 5.7. Numunelerin dalga boyuna bağlı geçirgenlik ve soğurum spektrumlarının belirlenmesinde kullanılan deney düzeneği. 43
Şekil 5.8. Numunelerin dielektrik özelliklerinin ve akım-gerilim davranışlarının belirlenmesinde kullanılan deney düzeneği. 44
Şekil 6.1. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin p helis adımı değerleri değişim grafiği. 45
Şekil 6.2. Kolesterik sıvı kristallerin elektrik alan değişimine bağlı oluşan (a) P, (b) FK ve (c) H durumlarına ait şematik diyagramları. 46
Şekil 6.3. (a) 5CB nematik sıvı kristallinin, (b) A1, (c) A2, (d) A3 ve (e) A4 kodlu numunelerin ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen Isı Akışı-Sıcaklık grafikleri. 48
Şekil 6.4. 5CB nematik sıvı kristali ile A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen faz geçiş sıcaklığı değerleri karşılaştırma grafiği. 49
Şekil 6.5. A1 kodlu numuneye ait soğutma durumunda elde edilen POM görüntüleri. 49
Şekil 6.6. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin Normalize Geçirgenlik-Voltaj değişim grafikleri. 50
Şekil 6.7. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin geçiş voltajı değerleri karşılaştırma grafiği. 51
Şekil 6.8. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin Normalize Geçirgenlik-Dalga boyu değişim grafikleri. 52
Şekil 6.9. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin Zıtlık Oranı-Dalga boyu değişim grafiği. 53
Şekil 6.10. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin Normalize Geçirgenlik-Zaman değişim grafikleri. 54
Şekil 6.11. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin tepki süresi parametreleri değişim grafiği. 54
Şekil 6.12. A1 kodlu numuneye ait (a) P, (b) FK ve (c) H durumlarında elde edilen POM görüntüleri ve fotoğraflar. 55
Şekil 6.13. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin ε′-f değişim grafikleri. 56

Şekil 6.14. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin ε″-f değişim grafikleri. 57
Şekil 6.15. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin Δε′-f değişim grafiği. 58
Şekil 6.16. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin Cole-Cole grafikleri. 59
Şekil 6.17. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin σ_{ac}-f değişim grafikleri. 61
Şekil 6.18. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin I-V değişim grafikleri. 61
Şekil 6.19. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin P, FK ve H durumlarında şematik diyagramları. 64
Şekil 6.20. (a) B1, (b) B2, (c) B3 kodlu numunelerin ısıtma ve soğutma durumunda elde edilen Isı Akışı-Sıcaklık grafikleri ve (d) Numunelerin ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen faz geçiş sıcaklığı değerleri karşılaştırma grafiği. 66
Şekil 6.21. (a) B1, (b) B2, (c) B3 kodlu numunelerin Normalize Geçirgenlik-Voltaj değişim grafikleri ve (d) Numunelerin geçiş voltajı değerleri karşılaştırma grafiği. 67
Şekil 6.22. (a) MR azo boyanın Normalize Absorbans-Dalga boyu grafiği ve (b) B1, (c) B2, (d) B3 kodlu numunelerin Normalize Geçirgenlik-Dalga boyu değişim grafikleri. 69
Şekil 6.23. B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin Zıtlık Oranı-Dalga boyu değişim grafiği. 69
Şekil 6.24. (a) B1, (b) B2, (c) B3 kodlu numunelerin Normalize Geçirgenlik-Zaman değişim grafikleri ve (d) Numunelerin tepki süresi parametreleri karşılaştırma grafiği. 71
Şekil 6.25. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin P, FK ve H durumlarında elde edilen POM görüntüleri ve fotoğrafları. 73
Şekil 6.26. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin ε′-f değişim grafikleri. 75
Şekil 6.27. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin ε″-f değişim grafikleri. 76
Şekil 6.28. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin Δε′-f değişim grafikleri. 77
Şekil 6.29. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin Cole-Cole değişim grafikleri. 78
Şekil 6.30. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin σ_{ac}-f değişim grafikleri. 80
Şekil 6.31. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin I-V değişim grafikleri. 81

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 5.1. Kolesterik sıvı kristal yapıların oluşumunda kullanılan 5CB ve S-811 malzemelerinin ağırlıkça % katkı oranları. 41
Çizelge 5.2. Azo boya ve kuantum nokta katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapıların oluşumunda kullanılan malzemelerinin ağırlıkça % katkı oranları. 41
Çizelge 6.1. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin relaksasyon frekansı (f_R) değerleri. 57
Çizelge 6.2. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin relaksasyon zamanı (τ_R) değerleri. 59
Çizelge 6.3. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin dielektrik dayanım ($\delta\varepsilon'$) değerleri. 60
Çizelge 6.4. A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen faz geçiş sıcaklığı değerleri. 65
Çizelge 6.5. A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin geçiş voltajı değerleri. 68
Çizelge 6.6. A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin tepki süresi parametresine ait değerler. 72
Çizelge 6.7. A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin relaksasyon frekansı (f_R) değerleri. 76
Çizelge 6.8. A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin relaksasyon zamanı (τ_R) değerleri. 78
Çizelge 6.9. A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin dielektrik dayanım ($\delta\varepsilon'$) değerleri. 79

KISALTMALAR

5CB	4-pentyl-4′-cyanobiphenyl
AC	Alternatif akım
CdSeS/ZnS	Kadmiyum Selenyum Sülfür/Çinko Sülfür
CR	Zıtlık oranı
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
FK	Fokal konik
H	Homeotropik
He-Ne	Helyum-Neon
IR	Kızıl ötesi
ITO	İndiyum kalay oksit
MR	Metil kırmızısı azo boya
P	Planar
PI	Poliimid
POM	Polarize optik mikroskop
S-811	S-(+)-2-Octyl 4-(4-hexyloxybenzoyloxy)benzoate
UV/VIS	Ultraviyole/Görünür bölge

SİMGELER

A	Yüzey alanı
C	Kondansatörün sığası
C_o	Plakaları arasında boşluk bulunan kondansatörün sığası
c	Konsantrasyon
D	İyonik difüzyon katsayısı
d	Kalınlık
dk	Dakika
E	Elektrik alan
F	Serbest enerji yoğunluğu
f	Frekans
f_c	Geçiş frekansı
f_R	Relaksasyon frekansı
G	İletkenlik
g	Gram
Hz	Hertz
I	Akım
J	Joule
K_{11}	Eğilme elastik sabiti
K_{22}	Burulma elastik sabiti
K_{33}	Bükülme elastik sabiti
k_B	Boltzmann sabiti
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
m	Metre
mm	Milimetre
ms	Milisaniye
mW	Miliwatt
n	Kırılma indisi
n_c	İyonik yük konsantrasyonu
n_e	Sıradan olmayan kırılma indisi
n_{izo}	İzotropik sıvının kırılma indisi
n_o	Sıradan kırılma indisi
$\hat{n}$	Moleküllerin ortalama yönelim vektörü
$\hat{n}'$	Kolay eksen
nm	Nanometre
p	Helis adımı
P	Polarizasyon vektörü
q_o	Kiralite
S	Düzen parametresi
s	Frekansın bir üs kuvveti
t	Zaman
T	Sıcaklık
tanδ	Kayıp tanjant faktörü
T_{max}	Maksimum geçirgenlik
T_{min}	Minimum geçirgenlik
T_{N-I}	Nematik fazdan izotropik faza geçiş sıcaklığı

V	Voltaj
V_d	Düşük voltaj değeri
V_{FK-H}	Fokal konik durumdan homeotropik duruma geçiş voltajı
V_{P-FK}	Planar durumdan fokal konik duruma geçiş voltajı
V_{rms}	RMS voltajı
V_s	Satürasyon voltajı
V_{th}	Eşik voltajı
V_y	Yüksek voltaj değeri
z	İyonik yük
α	Dağılım parametresi
Γ	Viskoziteye bağlı tork
γ	Rotasyonel viskozite
Δn	Optik anizotropi
$\Delta\lambda$	Dalga boyu aralığı
$\Delta\varepsilon'$	Dielektrik anizotropi
$\delta\varepsilon'$	Dielektrik dayanım
ε_o	Boş uzayın dielektrik sabiti
ε'	Kompleks dielektrik sabitinin reel kısmı
ε''	Kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmı
ε^*	Kompleks dielektrik sabiti
$\varepsilon'_{\parallel}$	Dielektrik sabitinin paralel bileşeni
$\varepsilon'_{\perp}$	Dielektrik sabitinin dik bileşeni
ε'_{∞}	Dielektrik sabitinin yüksek frekans limiti
ε'_s	Dielektrik sabitinin düşük frekans limiti
ε'_{izo}	İzotropik sıvının dielektrik sabiti
τ_d	Düşme süresi
τ_R	Relaksasyon zamanı
τ_t	Tepki süresi
τ_y	Yükselme süresi
ω_θ	Polar bağlanma enerjisi
ω_φ	Mutlak bağlanma enerjisi
μm	Mikrometre
λ	Dalga boyu
π	Pi sayısı
σ_{ac}	AC iletkenlik
σ_{dc}	DC iletkenlik
ω	Açısal frekans
wt	Ağırlıkça
Ω	Ohm
%	Yüzde

ÖZET

MİKRO VE NANO PARÇACIK KATKILI SIVI KRİSTAL KOMPOZİT YAPILARIN MORFOLOJİK, ELEKTRO-OPTİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gülsüm KOCAKÜLAH
Düzce Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı
Doktora Tezi
Danışman: Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL
Mayıs 2022, 94 sayfa

Bu çalışmada, akıllı pencere sistemi uygulamalarında kullanılması planlanan kolesterik sıvı kristal kompozit yapıları oluşturulmuş ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, farklı oranda S-811 kiral katkı maddesi ve 5CB nematik sıvı kristali bir araya getirilerek dört farklı kolesterik sıvı kristal yapının üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu yapıların geçiş voltajı, tepki süresi ve relaksasyon zamanı gibi önemli elektro-optik ve dielektrik parametreleri elde edilerek optimum performansı sağlayan numune belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, optimum performans elde edilen kolesterik sıvı kristal yapı, mikro boyutlu MR azo boya ve nano boyutlu CdSeS/ZnS kuantum nokta yapıları ile belirli konsantrasyonlarda bir araya getirilerek yeni sıvı kristal kompozit yapılar oluşturulmuştur. Kompozitlerin termal, elektro-optik, dielektrik ve morfolojik özellikleri detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Özellikle, azo boya ve kuantum nokta yapılarının bir arada kullanıldığı kolesterik sıvı kristal kompozit yapıda gerçekleşen moleküler etkileşim mekanizmaları sebebiyle elde edilen yapının hem elektro-optik hem de dielektrik özelliklerinde önemli değişimler gözlemlenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, hem kolesterik sıvı kristal yapıların hem de azo boya ve kuantum nokta katkılı kolesterik sıvı kristal kompozitlerin değişen voltaja bağlı olarak opak ve şeffaf özellik gösterdikleri görülmüş olup bu yapıların akıllı pencere sistemi tabanlı cihaz uygulamalarında ışık açıp/kapatıcı özelliğe sahip yeni tip kompozit malzemeler olarak kullanılabilecekleri sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar sözcükler: Azo boya, Dielektrik özellikler, Elektro-optik özellikler, Kolesterik sıvı kristal, Kuantum nokta.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MORPHOLOGICAL, ELECTRO-OPTICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES OF MICRO AND NANO PARTICLE DOPED LIQUID CRYSTAL COMPOSITE STRUCTURES

Gülsüm KOCAKÜLAH
Düzce University
Institute of Graduate Studies, Department of Physics
Doctoral Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL
May 2022, 94 pages

In this study, cholesteric liquid crystal composite structures planned to be used in smart window system applications were formed and their physical properties were investigated. In the first stage of the study, four different cholesteric liquid crystal structures were produced by combining different ratios of S-811 chiral dopant and 5CB nematic liquid crystal. By obtaining important electro-optical and dielectric parameters such as transition voltage, response time and relaxation time of these structures, the sample providing optimum performance was determined. In the second stage of the study, new liquid crystal composite structures were formed by combining cholesteric liquid crystal structure with optimum performance with micro sized MR azo dye and nano sized CdSeS/ZnS quantum dot structures at certain concentrations. Thermal, electro-optical, dielectric and morphological properties of the composites were investigated in detail. In particular, significant changes were observed in both electro-optical and dielectric properties of the obtained structure due to the molecular interaction mechanisms that occur in the cholesteric liquid crystal composite, in which azo dye and quantum dot structures are used together. As a result of the evaluations, it has been observed that both cholesteric liquid crystal structures and azo dye and quantum dot doped cholesteric liquid crystal composites have opaque and transparent properties depending on the changing voltage, and it is concluded that these structures can be used as new type composite materials with light on/off feature in smart window system based device applications.

Keywords: Azo dye, Cholesteric liquid crystal, Dielectric properties, Electro-optical properties, Quantum dot.

EXTENDED ABSTRACT

INVESTIGATION OF MORPHOLOGICAL, ELECTRO-OPTICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES OF MICRO AND NANO PARTICLE DOPED LIQUID CRYSTAL COMPOSITE STRUCTURES

Gülsüm KOCAKÜLAH
Düzce University
Institute of Graduate Studies, Department of Physics
Doctoral Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL
May 2022, 94 pages

1. INTRODUCTION

Cholesteric liquid crystals, which are a sub-group of thermotropic liquid crystals, have been intensively investigated by researchers with their unique physical properties and easy preparation processes. These materials are obtained by adding chiral dopant to nematic liquid crystal. Cholesteric liquid crystals, which have some properties similar to nematic liquid crystals, are characterized by helical structure and are considered as one-dimensional photonic crystals. In recent years, cholesteric liquid crystals have been widely used in lasers, smart window systems, display technologies, thermometers and reflectors. Particularly, the use of cholesteric liquid crystal composites prepared using different azo dyes in light shutter device applications is increasing. These composites can be found in three basic states as planar (P), focal conic (FC) and homeotropic (H) depending on the applied electric field and they show opaque and transparent properties. However, it is seen that the number of cholesteric liquid crystal composites that can be used in light shutter device applications and produced using nano-sized materials is quite low. In addition, in these studies, while the electro-optical properties of composites were examined in detail, it was observed that there were deficiencies with their dielectric properties. Accordingly, in this thesis, the production of cholesteric liquid crystals with varying chiral dopant concentration and also azo dye and quantum dot doped cholesteric liquid crystal composites were produced and their electro-optical and dielectric properties were investigated in detail. As a result of the evaluations, it was concluded that both cholesteric liquid crystals and azo dye and quantum dot doped cholesteric liquid crystal composites can be used as light shutter (light on/off) devices in smart window system applications.

2. MATERIAL AND METHODS

In this study, cholesteric liquid crystals and azo dye and quantum dot doped cholesteric liquid crystal composites were produced. In this context, in the first stage of the thesis, 5CB nematic liquid crystals were combined with S-811 chiral dopant at a ratio of 4%, 8%, 12% and 16% wt/wt and four different cholesteric liquid crystals were formed. These cholesteric liquid crystals were coded with A1, A2, A3 and A4 in the given order of increasing S-811 chiral dopant ratio in 5CB nematic liquid crystal. Prepared cholesteric liquid crystals were mixed in an ultrasonic bath at 60 ^{o}C for 4 hours for homogenous distribution. In the second stage of the thesis, the A1 coded sample was doped with 2% wt/wt MR azo dye and 2% wt/wt CdSeS/ZnS quantum dots, and the production of azo dye and quantum dot doped cholesteric liquid crystal composites was formed. These samples were coded B1 and B2, respectively. In addition, in this stage, 2% wt/wt MR azo dye and 2% wt/wt CdSeS/ZnS quantum dot doped cholesteric liquid crystal composite was produced and given with the B3 code. The B1, B2 and B3 coded samples were mixed in an ultrasonic bath at 60 ^{o}C for 4-6 hours. Afterwards, all samples were injected into Indium Tin Oxide (ITO) coated planar alignment liquid crystal cells (7.7 μm) with the help of capillary action by using temperature to reduce viscosities. The phase transition temperatures of the samples were investigated in the range of 20-45 ^{o}C using Differential Scanning Calorimeter (DSC). Morphological structures of investigated samples were also obtained using Polarised Optical Microscope (POM). In addition, the electro-optical properties of the samples were investigated using an electro-optical switching method experimental set-up, in which different devices were brought together depending on frequency and voltage. The dielectric properties of samples were determined with a dielectric/impedance analyzer depending on the voltage varying in the frequency range of 1 kHz-10 MHz. And voltage dependent current values of investigated samples were measured in the 0-40 V voltage range using a current-voltage source meter.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In the first stage of the thesis, the production of A1, A2, A3 and A4 coded cholesteric liquid crystals was carried out. Firstly, the *p* helical pitch values of these structures were determined and it was observed that this value decreased depending on the increase in the chiral dopant concentration. Afterwards, the phase transition temperature values of cholesteric liquid crystals in heating and cooling conditions were obtained using DSC

method. It was observed that the phase transition temperature value decreased due to the increasing chiral dopant ratio in cholesteric liquid crystals. It has been interpreted that this behavior may occur due to the increase in molecular weight as a result of increasing chiral dopant concentration in the samples. The morphological structure of the cholesteric liquid crystal, which changes depending on the temperature, was obtained by using the POM and according to the POM images, it was determined that the morphological structure of the sample was in accordance with the literature. Electro-optical properties of cholesteric liquid crystals were also determined using electro-optical switching method. With this method, transition voltage values ($V_{P\text{-}FC}$ and $V_{FC\text{-}H}$) and response time (τ_t) parameters of cholesteric liquid crystals that vary depending on frequency and voltage were calculated. It was observed that both $V_{P\text{-}FC}$, $V_{FC\text{-}H}$ and τ_t values increased depending on the increase in the concentration of the chiral dopant used in the production of the samples. This behavior was explained by the increase in charge density and viscosity of the medium as a result of increasing chiral dopant concentration in the samples. That is, the lowest transition voltage and response time value was obtained in the A1 coded sample. This result is important in that the A1 coded sample is used in electro-optical device applications, as it requires low power consumption and is a material that can respond quickly. In addition, using the voltage dependent transmittance graphs of the samples, the voltage ranges in which they have P, FC and H states were determined. Based on these voltage values, POM images and photographs of the P, FC and H states of the A1 coded sample were obtained at room temperature. According to POM images and photographs, it has been observed that the sample has a transparent appearance in P and H states and an opaque appearance in FC state. The dielectric properties of the samples were obtained using a dielectric/impedance analyzer and some important parameters such as the real and imaginary components of the complex dielectric constant (ε' and ε''), dielectric anisotropy ($\Delta\varepsilon'$) and ac conductivity (σ_{ac}) were investigated depending on the voltage and frequency. When the frequency dependent changes of the ε' values of the samples were examined, it was obtained the lowest in the P state and the highest in the H state. The main reason for this change is thought to be related to the establishment of molecular order as a result of the orientation of the liquid crystal molecules in the direction of the electric field due to the increase in voltage. By using the ε''-f graphs of the samples, the relaxation frequency (f_R) values were obtained and it was seen that the highest value was in the A1 coded sample. This result is important in that cholesteric

liquid crystals containing low concentrations of chiral dopants can operate in the high frequency region. It was observed that from the Cole-Cole plots of the samples showed almost Debye behavior in the investigated frequency range. In addition, relaxation time (τ_R) parameters of the samples were calculated using Cole-Cole plots. It was observed that τ_R values increased in P, FC and H states depending on the ratio of chiral dopant used in the production of the samples. According to the data obtained from the dielectric measurements, it was determined that there were significant changes in the cholesteric liquid crystal depending on the increasing chiral dopant concentration. Moreover, when the voltage dependent current parameters of the samples were examined, it was observed that the current value increased depending on the voltage, and the highest current value at 40 V was obtained in the A1 coded sample. Considering all the evaluations made in the first stage of the thesis, it was concluded that the sample with the optimum yield was the A1 coded sample. According to these results, in the second stage of the thesis, it is planned to produce new composites using the A1 coded sample.

In the second stage of the thesis, the A1 coded sample was used as a base material and new cholesteric liquid crystal composites with MR azo dye and CdSeS/ZnS quantum dot were produced. These composites were coded with B1, B2 and B3. When the phase transition temperature values of the samples were examined, it was observed that these values decreased compared to the A1 coded sample. This change is explained by the absorption occurring due to the azo dye used in the B1 coded sample and also by the increase in the number of impurity ions in the composite. The decrease in the phase transition temperature value of the B2 coded sample is thought to occur as a result of the deterioration of the molecular order due to the liquid crystals collected around the quantum dots in the composite, and in addition to this, the increase in the impurity ions formed in the composite. Also, the decrease in the phase transition temperature of the B3 coded sample was explained by the molecular interactions of azo dye, quantum dot and liquid crystals in the composite. When the transition voltage values of the composites are examined and compared with the transition voltage values of the A1 coded sample; it was concluded that an increment was observed in the B1 coded sample, and a decrement occurred in the B2 and B3 coded samples. It is thought that the increase in the B1 coded sample is due to the increased viscosity as a result of the use of azo dye in the composite, as well as the adsorbing of some ions in the alignment layer of the liquid crystal cell. It can be interpreted that the reason for the decrease in the B2

coded sample is the dipole-dipole and anchoring effect between the quantum dot and liquid crystal molecules existing in the composite. In the B3 coded sample, it was observed that the transition voltage values decreased due to both the presence of azo dye and the effect of quantum dots. Similar results were also found in the response time parameters of composites. Furthermore, it was concluded that the sample with the highest value of the contrast ratio parameter among the transmittance values depending on the changing wavelength of the samples was the B3 coded sample. When the POM images and photographs obtained in the visible light region of B1, B2 and B3 coded composites were evaluated, it has been observed that they have opaque and transparent properties. B3 coded sample, where azo dye and quantum dot structures are used together, it is very important that high contrast ratio, low response time and also low transition voltage values. When the dielectric properties of the samples were examined, it was seen that the value of the ε' increased depending on the molecular order in the transition from the P state to the H state, similar to the results obtained in the first stage of the thesis. Furthermore, it was observed that the ε' value increased in the P and FC state in the azo dye doped B1 and B3 coded samples compared to the A1 coded sample. This result is explained by the increase in electrical polarization as a result of the orientation of the azo dye molecules in the same direction as the liquid crystals depending on the applied electric field. It was also observed that the f_R values obtained from the ε''-f graphs of the B1, B2 and B3 coded samples decreased when compared to the A1 coded sample. It was concluded that the f_R values of the B3 coded sample were higher than the samples given with the B1 and B2 coded sample. In this respect, it is thought that the B3 coded sample is a material that can operate at higher frequency region. From the experimental results, it was observed that the crossover frequency (f_c) values of the samples increased when compared to the A1 coded sample. According to this result, it can be interpreted that both the azo dye and the quantum dot effect delay the transition of the samples from the positive $\Delta\varepsilon'$ value to the negative $\Delta\varepsilon'$ value. From the Cole-Cole graphs of B1, B2 and B3 coded samples, non-Debye behavior was observed in B1 and B3 coded samples, while B2 coded sample showed almost Debye type behavior. In addition, the τ_R values of the samples were calculated using these graphs and it was seen that the lowest value was obtained in the H state of the B3 coded sample. According to this result, the fact that the B3 coded sample has the lowest τ_R value in the H state is considered important in terms of being able to be used as a material that will show faster relaxation in electro-optical device applications. When the

voltage dependent current values of the composites were investigated, it was observed that the current value increased due to the increasing voltage in all samples, and the current value obtained for the B3 coded sample at 40 V was higher than the current value of all samples examined in this study. As a result of detailed examinations in the second stage of the study, positive changes were detected in both electro-optical and dielectric properties of the B3 coded sample, which contains azo dye and quantum dot structures.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

In this thesis, electro-optical and dielectric properties of cholesteric liquid crystal composite structures were investigated. When the results of all examined samples within the scope of the study are evaluated together, it has been observed that cholesteric liquid crystal composites are materials with opaque and transparent properties depending on the changing electric field. In addition, it has been determined that MR azo dye and CdSeS/ZnS quantum dot structures used in the production of composites are materials that can significantly change and improve the electro-optical and dielectric properties of cholesteric liquid crystals. In particular, the fact that MR azo dyes reduce the transmittance value of composites, and quantum dots cause low transition voltage and response time, has revealed the importance of these materials once again. Accordingly, in the thesis study, cholesteric liquid crystal composite containing both azo dye and quantum dot structures was produced, in which low light transmittance, low transition voltage and low response time parameters were obtained. It is thought that the produced azo dye and quantum dot doped cholesteric liquid crystal composites can be used as light shutter device in smart window systems application. At the same time, it has been concluded that all samples produced within the scope of the thesis study are new functional materials that can be used in electro-optical device technology by utilizing their physical properties depending on varying frequency and voltage.

1. GİRİŞ

Madde doğada katı, sıvı, gaz ve plazma olmak üzere dört temel fazda bulunmaktadır [1], [2]. Katı fazda molekülleri bir arada tutan moleküller arası kuvvetler oldukça güçlüdür. Bu özelliklerinden dolayı katıların yapısını oluşturan atom ve moleküller bulundukları konumda örgü titreşimi yaparken dönme hareketi yapamazlar. Katı fazda atom ve moleküller periyodik bir örgü içerisinde konumsal düzene sahiptir ve yapı anizotropik özellik göstermektedir [3]–[5]. Katılar ısıtıldığında ortaya çıkan termal enerji, moleküller arası bağların bozulmasına sebep olmakta ve maddenin sıvı fazı ortaya çıkmaktadır. Sıvı fazın sahip olduğu atom ve moleküllerde ise öteleme hareketi ile birlikte dönme hareketi de görülmektedir. Sıvı fazda moleküller düzensiz bir yerleşime sahip olup madde izotropik özellik göstermektedir. Sisteme daha fazla termal enerji sağlandığında, yani sıcaklık arttırıldığında, maddenin yapısını oluşturan moleküller yüksek hızlarda hareket etmeye ve birbirinden uzaklaşmaya başlar. Böylece, moleküller arası etkileşimlerin önemsiz hale geldiği ve moleküler düzenin bozulduğu izotropik özelliğe sahip gaz fazı ortaya çıkar. Son derece yüksek sıcaklıklarda ise elektronlar kendi çekirdeklerinden ayrılmakta ve iyonlaşma başlamaktadır. Maddenin bu hali plazma fazı olarak bilinmekte ve çok düşük yoğunluklarda serbest hareket eden pozitif ve negatif iyonlardan oluşmaktadır [6].

Maddenin yukarıda bahsedilen temel fazlarına ek olarak bazı kimyasallar katı kristal fazdan sıvı faza geçerken, sıvı faz oluşmadan önce bir veya birden çok faz geçişi gösterebilmektedir. Bu geçişler, maddelerin bazı ara fazlara sahip olduğu anlamına gelmektedir. Ara fazlarda görülen mekanik, optik ve yapısal özellikler, katı kristal faz ve sıvı fazının sahip olduğu özellikleri de taşıyabilmektedir. Bildiğimiz gibi, katı kristal yapı ısıtıldığında sahip olduğu üç boyutlu örgü düzeni bozulmakta ve iki boyuta inmektedir. Sıcaklığın daha fazla arttırılması ile moleküller arası bağların kopması sonucu iki boyutlu örgü düzeni de kaybolmakta ve sıvı faza geçiş gerçekleşmektedir. Sıvı faza geçmeden hemen önce ise katı kristal ve sıvı fazı arasında bir ara faz görülmektedir. Maddenin termodinamik açıdan kararlı, özellikleri ise katı kristal ile sıvı fazı arasında yer alan bu özel hali “sıvı kristal fazı” olarak tanımlanmakta ve bu fazın özelliklerini taşıyan malzemelerde “sıvı kristaller” olarak ifade edilmektedir [7], [8].

İlk olarak 1888 yılında keşfedilen sıvı kristaller, katıların sahip olduğu anizotropik özellikleri ve sıvıların sahip olduğu izotropik özellikleri yapısında bulunduran malzemeler olarak bilinmektedir [9]–[11]. Moleküller arası zayıf kuvvetlere sahip olan sıvı kristal yapıların fiziksel özellikleri elektrik alan, manyetik alan, basınç ve sıcaklık gibi dış etkiler ile kolay bir şekilde değiştirilebilmektedir [4], [12]. Sahip oldukları bu özelliklerinden dolayı, keşfedilmelerinden günümüze kadar pek çok bilimsel ve teknolojik alanda geniş uygulamalara konu olan sıvı kristallerin en yaygın kullanıldığı yapılar sıvı kristal ekranlardır. Elektro-optik cihaz uygulamalarında son derece önemli yapılar olarak görülen sıvı kristal ekranlar, sıvı kristal hücre içerisinde belirli bir yönlendirici katman üzerine sıvı kristal katman oluşturularak elde edilmektedir. Genel olarak sıvı kristal ekranı oluşturan bu hücreler, üzerine elektrik alan uygulanması durumunda alan hizalı yani "açık" durumda; üzerine elektrik alan uygulanmadığı durumda ise yüzey hizalı yani "kapalı" durumda bulunmaktadır [13]. Günümüze kadar akıllı pencere sistemleri, sensörler, hesap makineleri, bilgisayarlar, televizyonlar ve daha pek çok elektro-optik cihaz uygulamasında kullanılan sıvı kristallerin bilimsel araştırmalara bağlı olarak fiziksel özellikleri keşfedilmeye devam etmekte ve teknolojik olarak kullanım alanları her geçen gün artmaktadır [14], [15].

Sıvı kristaller, termotropik ve liyotropik olmak üzere iki temel grupta incelenmektedir. Termotropik sıvı kristallerde ara fazların oluşumu sıcaklığa bağlı olarak değişmekte ve kendi içinde nematik, simektik ve kolesterik olmak üzere üç farklı alt grup içermektedir. Liyotropik sıvı kristallerde ise ara fazların oluşumu sıcaklığa ve kullanılan organik bileşiğin konsantrasyonuna bağlı olarak değişim göstermektedir. Birden fazla organik bileşiğin bir araya getirilerek oluşturulduğu liyotropik sıvı kristaller uzun zincirli moleküllerden oluşmaktadır [7], [16].

Teknolojik çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanılan termotropik sıvı kristaller, farklı pek çok katkı malzemesi ile bir araya getirilebilmekte ve sıvı kristal tabanlı yeni kompozitlerin üretilmesine olanak sağlamaktadır [17]–[19]. Termotropik sıvı kristallerin bir alt grubu olan kolesterik sıvı kristal yapılar, eşsiz fiziksel özellikleri ve kolay hazırlanabilme süreçleri ile son yıllarda bilim insanları tarafından yoğun bir şekilde araştırılmaktadır [20]–[22]. Kolesterik sıvı kristaller, nematik sıvı kristal yapılara kiral katkı maddesi eklenmesiyle elde edilmektedir. Nematik sıvı kristal yapılar ile benzer bazı özelliklere sahip olan kolesterik sıvı kristaller, spiral (helis) yapı ile karakterize edilirler ve tek boyutlu fotonik kristaller olarak kabul edilirler [23], [24].

Fiziksel özellikleri oldukça önemli olan kolesterik sıvı kristaller; lazerler, akıllı pencere sistemleri, ekran teknolojileri, termometreler ve daha pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [22], [25], [26].

Son yıllarda, kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarının akıllı pencere sistemi uygulamalarında kullanımı artarak devam etmektedir. Genel olarak kolesterik sıvı kristal kompozit yapılar, üzerlerine uygulanan elektrik alana bağlı olarak planar, fokal konik ve homeotropik olmak üzere üç temel durumda bulunabilmektedir. Voltaj değeri sıfır olduğunda planar, sıfırdan farklı düşük voltaj değerlerinde fokal konik ve yüksek voltaj değerlerinde homeotropik özellik gösteren kolesterik sıvı kristal kompozit yapılar, değişen voltaja bağlı olarak opak ve şeffaf durumda bulunabilme özellikleri ile birçok araştırmaya konu olmuş ve pek çok elektro-optik cihaz uygulamasına avantaj sağlamıştır [27]–[29].

Günümüze kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, kolesterik sıvı kristal kompozit yapıların üretiminde yüksek oranlarda kiral katkı maddesi tercih edildiği görülmektedir [30]–[32]. Diğer yandan, kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarda opaklık derecesinin arttırılması için polimer malzemelerinde yapıya eklenmesi söz konusu olabilmektedir [28], [33], [34]. Ancak kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarda yüksek opaklık derecesi polimer kullanılmadan da elde edilebilmektedir. Buna rağmen, polimer kullanılmadan üretilen kolesterik sıvı kristal bazlı, akıllı pencere sistemi uygulamalarında kullanılması önerilen ışık açıp/kapatıcı özelliğe sahip kompozit yapıların üretimine yönelik yapılan çalışmaların sayısının oldukça az olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, üretilen kolesterik sıvı kristal kompozit yapıların yalnızca elektro-optik özelliklerinin araştırılması da literatürde yapılan çalışmaların başka bir eksik yanını göstermektedir. Ayrıca, yine literatürde kiral katkı maddesi konsantrasyonundaki değişime bağlı olarak değişen dielektrik özelliklerin detaylı bir şekilde araştırıldığı çalışmaların çok fazla olmadığı belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, kiral katkı maddesi konsantrasyonundaki değişime bağlı olarak farklı kolesterik sıvı kristal kompozit yapıları oluşturulmuş; oluşturulan bu yapıların elektro-optik ve dielektrik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın bir sonraki aşamasında, üretilen kolesterik sıvı kristal yapılardan optimum verimi sağlayan yapı seçilmiş, mikro yapıdaki azo boya ve nano boyuta sahip kuantum nokta yapıları ile bir araya getirilerek azo boya ve kuantum nokta katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapıları elde edilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen azo boya ve kuantum nokta katkılı

kolesterik sıvı kristal kompozit yapıların morfolojik yapısı belirlenmiş, geniş bir frekans ve voltaj aralığında dielektrik özellikleri incelenmiş, elektro-optik parametreleri dalga boyu ve voltaja bağlı olarak araştırılmıştır. Sonuçlar, farklı kiral katkı maddesi konsantrasyonu ile azo boya ve kuantum nokta yapılarının kolesterik sıvı kristal kompozit yapısının morfolojik, elektro-optik ve dielektrik özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, bu çalışmada geliştirilen, opak ve şeffaf özelliklere sahip olan azo boya ve kuantum nokta katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarının, düşük güç tüketimi ile akıllı pencere sistemi uygulamalarında ışık açıp/kapatıcı özelliğe sahip yeni malzemeler olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

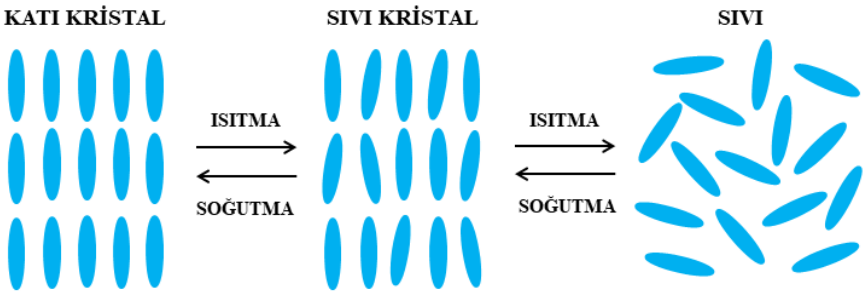
2.1. SIVI KRİSTALLER

2.1.1. Sıvı Kristal Tanımı ve Tarihçesi

Sıvı kristal fazı ilk olarak 1888 yılında Avusturyalı botanikçi Friedrich Reinitzer tarafından kolesteril asetat ve kolesteril benzoat bileşiklerinin incelenmesi sırasında keşfedilmiştir. Friedrich Reinitzer kolesteril benzoat yapısının oda koşullarında katı fazda bulunduğunu, 145 ^{o}C'de berrak olmayan sıvı faza sahip olduğunu ve 179 ^{o}C'de şeffaf bir sıvıya dönüştüğünü gözlemlemiştir. Bu gözlemlerine dayanarak kolesteril benzoat yapısının iki farklı erime noktasına sahip olduğunu öne sürmüştür. Ancak o dönemde bu yapının varlığını tam olarak açıklayamadığından örnekleri incelemesi için Alman fizikçi Otto Lehmann'a göndermiştir. Lehmann, kolesteril benzoat örneklerini polarize mikroskop kullanarak incelemiş ve bazı ara fazlara sahip olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca, katı kristal ve sıvı fazı arasında özelliklere sahip bu yapının optik anizotropiye sahip olduğunu fark etmiş ve bu anizotropinin uzun eksene paralel olarak yönlenmiş moleküller nedeniyle meydana geldiğini belirtmiştir. "Sıvı kristal" terimi ilk olarak Lehmann tarafından kullanılmaya başlanmıştır [13], [15]. Keşfedilmelerinden sonra fiziksel ve kimyasal özellikleri yoğun bir şekilde araştırılan sıvı kristaller; fizikçiler, kimyagerler, mühendisler ve malzeme bilimciler tarafından pek çok alanda kullanılmış ve disiplinler arası bilimin yerleşik bir parçası haline gelmiştir. Benzersiz elektro-optik özelliklere sahip olan sıvı kristal yapılar, günümüzde sıvı kristal ekran teknolojisi alanında önemli bir yere sahiptir [13].

Sıvı kristal fazı, molekülleri uzun erişimli periyodik düzenliliğe sahip ve anizotropik özellik gösteren katı kristal fazı ile moleküler düzenliliğe sahip olmayan ve izotropik özellik gösteren sıvı fazı arasında bulunan maddenin özel bir hali olarak tanımlanmaktadır [3]–[5]. Şekil 2.1'de sıvı kristal faza sahip bir malzemenin sıcaklığa bağlı faz geçiş diyagramı verilmiştir. Katı kristal fazda hem yönelimsel hem de konumsal bir düzen mevcuttur. Sıcaklık artışı ile katı kristal yapıya ait moleküllerin konumsal düzeninin bozulmaya başladığı ancak yönelimsel düzenin korunduğu sıvı kristal faza geçilmektedir. Yönelimsel düzenin varlığından dolayı anizotropik olarak

kabul edilen sıvı kristaller, akıcılık özelliğini de yapılarında bulundururlar. Sıcaklık daha fazla arttırıldığında ise moleküller arası etkileşim giderek zayıflamakta ve sıvı faza geçiş gerçekleşmektedir. Isıtma işlemi sonucu oluşan sıvı faz soğutulduğunda ise gerçekleşen bu süreç tersinir bir davranış göstermektedir [3], [15].



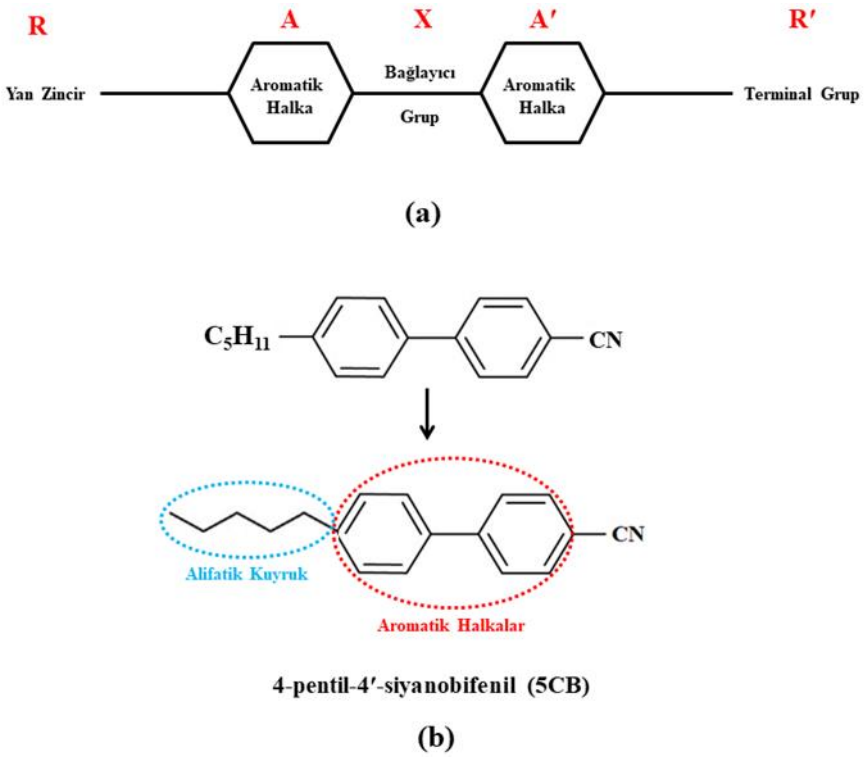
Şekil 2.1. Sıvı kristal faza sahip bir yapının sıcaklığa bağlı faz geçiş diyagramı.

Katı kristal ve sıvı fazın sahip olduğu bazı önemli özellikleri yapısında bulunduran sıvı kristaller; dış manyetik alan veya elektrik alan ile etkileşerek monokristal oluşturma istekleri, yüksek mertebede optik aktiviteleri, ısıya karşı duyarlılıkları ve daha pek çok önemli özelliğe sahip olmaları nedeniyle katı kristal ve sıvı fazdan önemli ölçüde ayrılmaktadırlar. Özellikle dışarıdan uygulanan elektrik alan, manyetik alan, sıcaklık ve basınç gibi etkilerle yeniden yönelim gösterme özelliğine sahip olan sıvı kristaller, günümüzde teknolojinin pek çok alanında uygulama sahası bulmuştur [3], [4], [15].

Sıvı kristal moleküllerinin genel yapısı Şekil 2.2.(a)'da verilmiştir. Şekilde A ve A′ ile gösterilen aromatik halkalar; siklo-hegzan, siklo-siklohegzan, bifenil, trifenil gibi yapılardan oluşmaktadır. Bu moleküllerin uzunluğu sıvı kristal yapıların erime noktasını değiştirmektedir. R ile gösterilen yan zincir; alkil, alkoksi, alkenil grubu içeren bileşiklerden oluşmakta ve sıvı kristal faz geçiş sıcaklığına etki etmektedir. R′ ile verilen kısım ise sıvı kristal molekülünün terminal grubu olarak adlandırılmakta ve alkil, alkoksi, siyano, nitro gibi yapılardan oluşmaktadır. Terminal grubu, sıvı kristal molekülünün eşik voltajı ve optik özelliklerini etkilemektedir. X ile verilen bağlayıcı grup, sıvı kristallerin faz geçiş sıcaklığı ve çift kırılma gibi önemli fiziksel özelliklerine etki etmekte ve etilen, ester gibi yapılardan meydana gelmektedir [9], [16].

Şekil 2.2.(b)'de, 4-pentil-4′-siyanobifenil (4-pentyl-4′-cyanobiphenyl:5CB) nematik sıvı kristalinin moleküler yapısı verilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi 5CB nematik sıvı kristali aromatik halka ve alifatik kuyruk yapılarından oluşmaktadır. Aromatik halkalar, katı maddelerin sahip olduğu sert ve hareketsiz özelliğe sahip iken, alifatik kuyruk

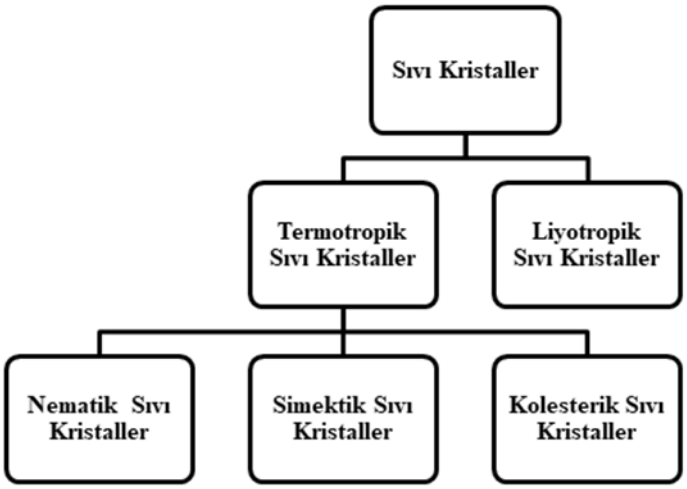
yapısı sıvı kristal moleküllerine akışkanlık özelliği sağlamaktadır. Aromatik halka ve alifatik kuyruğun varlığı nedeniyle, sıvı kristaller hem katı kristallerin hem de sıvıların özelliklerine sahip malzemeler olarak tanımlanmaktadır [35], [36].



Şekil 2.2. (a) Sıvı kristal molekülünün genel yapısı ve (b) Örnek bir sıvı kristal molekülü.

2.1.2. Sıvı Kristallerin Sınıflandırılması

Sıvı kristal faza sahip maddelerin molekülleri yapısal olarak incelendiğinde; çubuksu, disk, kübik kristal ve benzeri şekilde gruplanabilmektedir. Buna ek olarak sıvı kristaller; metal içeren ve içermeyen, monomerik ve polimerik, amfibilik olan ve olmayan şeklinde de ayrıca bir sınıflandırmaya tabi tutulabilmektedirler. Ancak sıvı kristallerin en yaygın sınıflama biçimi katı hal düzeninin bozulma prensibi dikkate alınarak yapılmaktadır. Şekil 2.3'te, katı hal düzeninin bozulma prensibine göre sıvı kristallerin sınıflandırılmasının şematik gösterimi verilmiştir. Bu sınıflamaya göre sıvı kristaller, termotropik sıvı kristaller ve liyotropik sıvı kristaller olmak üzere iki temel grupta incelenmektedir [15].



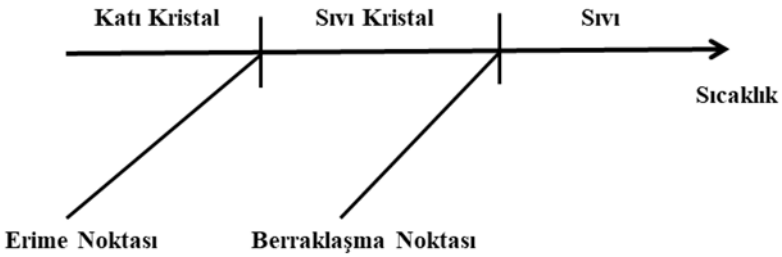
Şekil 2.3. Sıvı kristallerin sınıflandırılması.

Termotropik sıvı kristaller, ara fazların sıcaklık etkisi ile oluştuğu yapılardır. Kendi içerisinde nematik, simektik ve kolesterik olmak üzere üç gruba ayrılan termotropik sıvı kristaller, genellikle çubuksu veya disk şeklinde moleküllerden oluşmaktadır [3]–[5].

Liyotropik sıvı kristaller, iki veya daha fazla organik bileşiğin bir araya getirilmesiyle elde edilen uzun zincirli moleküllerden oluşmaktadır. Bu tip sıvı kristallerde ara fazların gözlemlenmesi hem sıcaklık hem de kullanılan organik bileşiğin konsantrasyonuna göre değişim göstermektedir [3]–[5].

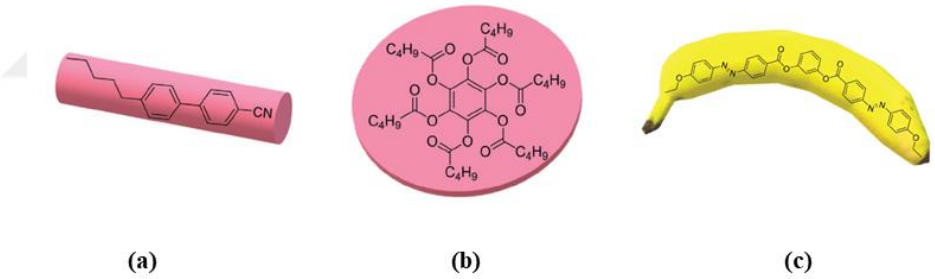
2.1.2.1. *Termotropik Sıvı Kristaller*

Termotropik sıvı kristaller, faz geçişlerinin sıcaklık ile gerçekleştiği sıvı kristal grubu olarak bilinmektedir. Bu tip sıvı kristaller, belirli sıcaklık değerlerinde kararlı yapıda olup bu sıcaklık değerinden daha düşük sıcaklıklarda katı kristal, daha yüksek sıcaklıklarda ise sıvı fazın sahip olduğu özellikleri sergilerler. Termotropik sıvı kristallerde sıcaklığa bağlı faz geçiş süreçleri Şekil 2.4'te verilmiştir. Sıvı kristal özellik gösteren kimyasal malzemelerde, sıcaklığın artması ile katı kristal fazdan önce sıvı kristal faza geçiş gözlenmekte, sıcaklığın daha yüksek değerlere çıkarılması ile de sıvı kristal fazdan sıvı faza geçiş görülmektedir. Katı kristal fazdan sıvı kristal faza geçişin gerçekleştiği sıcaklık değeri "erime noktası", sıvı kristal fazdan sıvı faza geçişin gerçekleştiği sıcaklık değeri ise "berraklaşma noktası" olarak tanımlanmaktadır [37].



Şekil 2.4. Termotropik sıvı kristallerde faz geçiş süreçleri.

Termotropik sıvı kristaller moleküler formlarına göre incelendiğinde; çubuksu, disk-şekilli ve muz-şekilli yapılara sahip oldukları görülmektedir. Şekil 2.5'te çubuksu, disk-şekilli ve muz-şekilli sıvı kristallerin üç boyutlu görüntüsü verilmiştir [3]. Bu yapılar genellikle aromatik yapılı sert çekirdek ve esnek bir yapıya sahip alifatik kuyruk grubundan oluşmaktadır. Sıvı kristallerde moleküller arası kuvvetlerin zayıf olması sebebiyle uzun eksenli bir yapıya sahip olma eğilimi söz konusudur. Elektro-optik cihaz teknolojilerinde en yaygın kullanılan yapılar ise çubuksu özelliğe sahip sıvı kristallerdir [3].



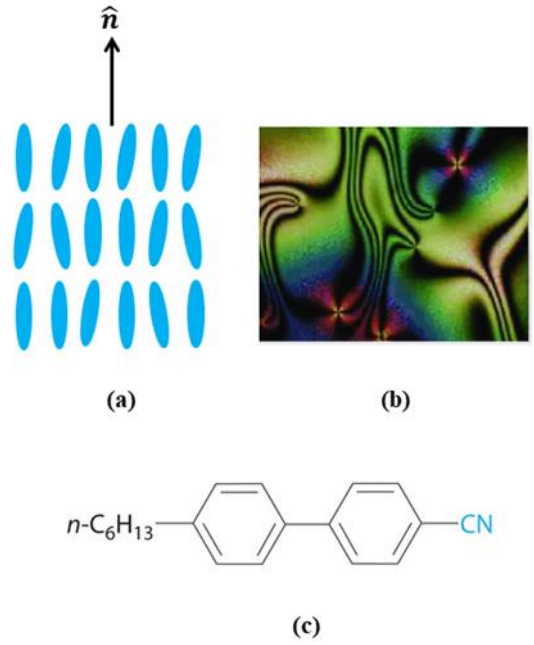
Şekil 2.5. (a) Çubuksu sıvı kristal, (b) Disk-şekilli sıvı kristal ve (c) Muz-şekilli sıvı kristalin üç boyutlu görüntüleri.

Termotropik sıvı kristaller sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen ara fazların oluşumuna göre nematik, simektik ve kolesterik olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır:

Nematik sıvı kristaller, bilimsel ve teknolojik çalışmalarda en çok kullanılan yapılardır. Yaklaşık 1-3 nm arasında değişen uzunluğa ve 0,1-0,5 nm arasında değişen genişliğe sahip olan nematik sıvı kristaller, sıvı faza en yakın özellik gösteren sıvı kristal grubu olarak bilinmektedir [35].

Nematik sıvı kristaller, birden fazla molekülün moleküler ekseninin birbirine paralel olarak yönlendiği ve bunun sonucunda uzun erişimli yönelimsel düzenin sağlandığı

yapılar olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.6'da, nematik sıvı kristal yapıların moleküler yönelimi, polarize mikroskop görüntüsü ve örnek bir moleküler formülü verilmiştir. Optiksel olarak tek eksenli yapılar olan nematik sıvı kristallerde, moleküller optiksel eksen $\hat{n}$ doğrultusunda ortalama bir yönelim göstermektedir. Nematik sıvı kristaller, katmanlı yapı özelliğine sahip değildir. Yapıyı oluşturan moleküllerin ağırlık merkezlerinin dizilimi rastgele bir düzen göstermektedir ve moleküllerin birbirine göre hareket serbestliği vardır [4], [15].



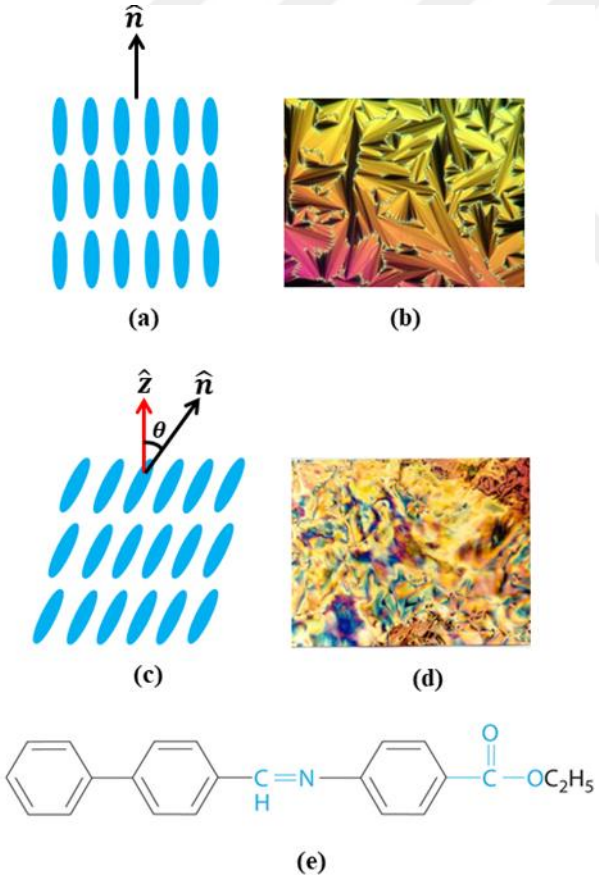
Şekil 2.6. Nematik sıvı kristallerin, (a) Moleküler yönelimi, (b) Polarize mikroskop görüntüsü ve (c) Örnek moleküler formülü.

Düşük viskoziteli yapılar olan nematik sıvı kristaller, yüksek hareket yeteneğine sahiptirler. Dışarıdan uygulanan herhangi bir etki (elektrik alan, manyetik alan, basınç, sıcaklık, vb.) ile nematik faza sahip moleküllerin yönelim doğrultusu kolay bir şekilde değişim gösterebilmektedir. Özellikle elektrik alana gösterdikleri tepki sürelerinin milisaniye mertebesinde olması, nematik sıvı kristallerin pek çok elektro-optik cihaz uygulamasında kullanılabilmesine olanak sağlamıştır [5].

Simektik sıvı kristaller, hem yönelimsel hem de konumsal düzenin en yüksek mertebede sağlandığı yapılar olarak tanımlanmaktadır. Katı kristallere ısı verildikten sonra gözlemlenen ilk ara faz olarak bilinen simektik sıvı kristallerde moleküller katmanlı bir yerleşim düzenine sahiptir. Simektik sıvı kristallerde moleküllerin kendi eksenleri etrafında dönmeleri serbest iken katmanlar arası geçişleri sınırlıdır [6].

Simektik sıvı kristaller, katmanlar içi düzen ve katmanlar arası korelasyona bağlı olarak farklı türlere ayrılmaktadır. Günümüze kadar simektik sıvı kristallere ait on iki faz keşfedilmiştir. Bu fazlar; Simektik-A, Simektik-B, Simektik-C,…, Simektik-M olarak adlandırılmıştır. Bilimsel araştırmalarda ise Simektik-A ve Simektik-C fazları yaygın bir kullanım alanı bulmuştur [12].

Şekil 2.7'de, Simektik-A ve Simektik-C sıvı kristallerine ait moleküler yönelimler, polarize mikroskop görüntüleri ve örnek bir moleküler formül verilmiştir. Simektik-A fazında moleküller bulundukları tabakanın normali, $\hat{n}$, doğrultusunda yönelim göstermektedir. Simektik-C fazında ise moleküller küçük bir θ açısı (eğilme açısı) ile bulundukları katmanın normalinden uzaklaşmaktadır. Simektik sıvı kristallerin sahip oldukları katmanlı yapı polarize mikroskop görüntülerinde de açıkça görülmektedir [3].

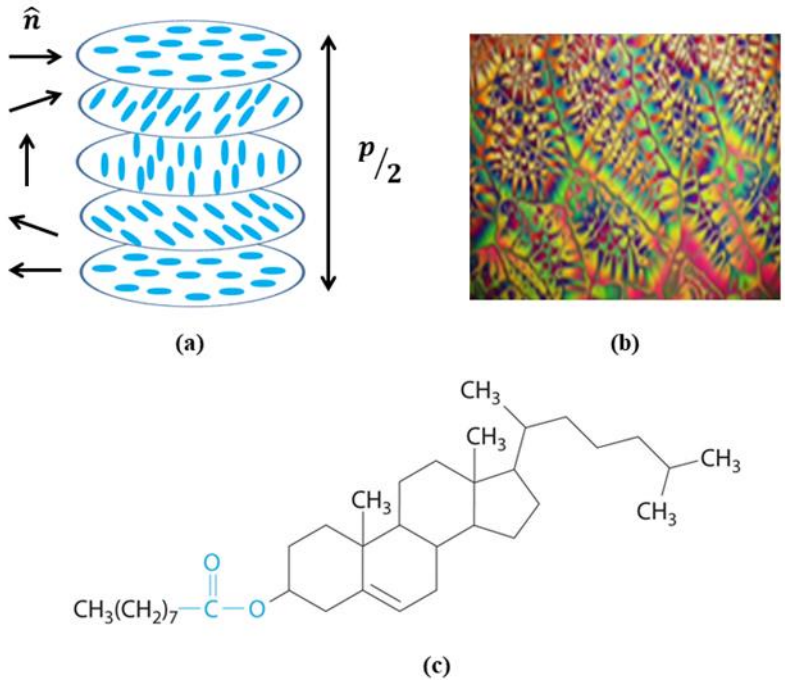


Şekil 2.7. (a) Simektik-A sıvı kristalinin moleküler yönelimi, (b) Simektik-A sıvı kristalinin polarize mikroskop görüntüsü, (c) Simektik-C sıvı kristalinin moleküler yönelimi, (d) Simektik-C sıvı kristalinin polarize mikroskop görüntüsü ve (e) Simektik sıvı kristaline ait örnek moleküler formül.

Simektik sıvı kristaller, yüksek viskozite ve üst dereceden simetri özelliği göstermektedirler. Sahip oldukları yüksek viskozite, simektik sıvı kristallerin elektro-optik cihaz uygulamalarındaki kullanımını sınırlamaktadır [3], [15].

Kolesterik sıvı kristaller, nematik sıvı kristallere kiral katkı maddesi eklenmesiyle oluşan sıvı kristal grubu olarak tanımlanmaktadır. Yapılarında bulunan kiral katkı maddesi sebebiyle "kiral nematik sıvı kristaller" olarak da adlandırılan kolesterik sıvı kristaller, karmaşık bir moleküler yapıya sahiptir. Fiziksel özellikleri nematik faz ile benzerlik gösteren kolesterik sıvı kristal yapıda, moleküller üst üste katmanlar halinde dizilmekte ve moleküllerin yönelimi her katmanda farklı açı ile gerçekleşmektedir [7], [38].

Şekil 2.8'de, kolesterik sıvı kristal yapıya ait moleküler yönelim, polarize mikroskop görüntüsü ve örnek bir moleküler formül verilmiştir. Şekil 2.8.(a)'da görüldüğü gibi, her bir katmanda yer alan sıvı kristal molekülleri $\hat{n}$ doğrultusunda yönelim göstermekte ve aynı tabaka için $\hat{n}$ vektörünün yönü sabit iken katman değiştikçe yön değişmektedir. Böylece, moleküllerin yönelimi bir helis yapısı oluşturmaktadır. Kolesterik sıvı kristal yapılar, p ile tanımlanan helis adımı ile karakterize edilmektedir. Helis adımı, p, moleküllerin 360^{o} turlarını tamamladıkları tabakalar arası mesafeye eşittir [8], [9], [12].



Şekil 2.8. Kolesterik sıvı kristallerin, (a) Moleküler yönelimi, (b) Polarize mikroskop görüntüsü ve (c) Örnek moleküler formülü.

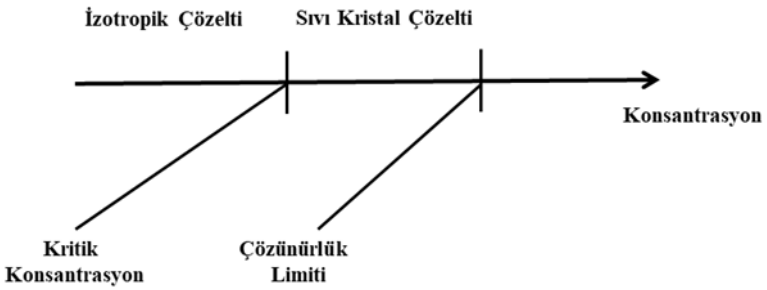
Kolesterik sıvı kristaller, elektrik alan, manyetik alan, sıcaklık gibi dış etkilere karşı oldukça duyarlı malzemelerdir. Bu özellikleri ile sensörlerde, akıllı pencere sistemlerinde, mikro yapı kusurlarının belirlenmesinde ve daha pek çok bilimsel ve teknolojik alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [3].

Bu tez çalışmasının temelini kolesterik sıvı kristaller oluşturmaktadır. Kolesterik sıvı kristal yapılar ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 4'te verilecektir.

2.1.2.2. *Liyotropik Sıvı Kristaller*

Kimyasal yapıları birden fazla organik bileşiğin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Uzun zincirli moleküler yapıya sahip olan liyotropik sıvı kristaller, amfifilik özellik göstermektedir. Liyotropik sıvı kristallerin yapısı genellikle hidrofilik baş ve hidrofobik bir kuyruk kısmından oluşmaktadır. Sabun ve deterjan yapıları liyotropik sıvı kristallerin en bilinen örnekleridir [39], [40].

Liyotropik sıvı kristallerde faz geçişleri hem sıcaklığa hem de çözücü konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Şekil 2.9'da, liyotropik sıvı kristallerde çözücü konsantrasyonuna bağlı faz geçiş süreci verilmiştir. Liyotropik fazda, kullanılan çözücü madde sisteme akışkanlık sağlamak için bileşiklerin etrafındaki boşluğu doldurmaktadır. Bu yapılarda farklı fazların oluşumu çözücü konsantrasyonundaki değişim ile meydana gelmektedir [37], [40].

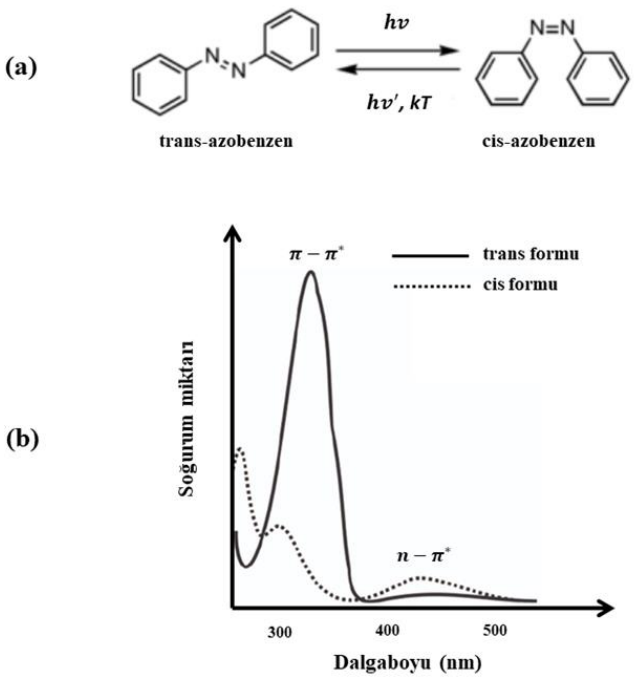


Şekil 2.9. Liyotropik sıvı kristallerde faz geçiş süreçleri.

Liyotropik sıvı kristallerin biyolojik araştırmalardaki rolü oldukça önemlidir. Yapılan araştırmalarda, hücre zarındaki lipidlerin liyotropik yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca endüstri alanında yapılan çalışmalarda da liyotropik sıvı kristal yapısından faydalanılmaktadır [3], [7], [15].

2.2. AZO BOYALAR

Renklendiriciler, boyarmaddeler ve pigmentler olmak üzere iki temel sınıfta incelenmektedir. Boyarmaddeler sınıfının çoğunluğunu ise azo boyalar oluşturmaktadır. Azo boyalar; kolay elde edilebilmeleri, boyama güçlerinin yüksek olması, geniş renk aralığına sahip olmaları ve düşük maliyetleri sebebiyle pek çok bilimsel araştırmada tercih edilmektedir [41]. Azo boyaların moleküler yapıları kromofor grubu olarak bilinen bir veya birden fazla azo (-N=N-) grubu bileşiklerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır [42]. Çubuk benzeri yapıya sahip olan azo boyaların üzerlerine düşürülen ışığın moleküle paralel ve dik gelmesine bağlı olarak ışığı soğurma miktarları değişim göstermektedir. Bu özellikleri sebebiyle dikroik boya olarak kabul edilen azo boyalar, üzerlerine düşürülen ışığı soğurmaları sonucunda moleküllerinin şekilleri değişmekte ve bu durum trans-cis foto-izomerizasyon olarak tanımlanmaktadır [4]. Şekil 2.10'da, azo boyaların ışık ile etkileşimi sonucu trans ve cis formu ile dalga boyuna bağlı değişim gösteren soğurum miktarları verilmiştir. Trans formu cis formuna göre enerji bakımından daha kararlı olan azo boyalar, belirli dalga boylarında birbirine dönüşebilmektedir. Genel olarak azo boyaların trans formundan cis formuna dönüşümü ultraviyole (UV) ışık $\pi - \pi^*$ enerji bandı geçişine denk gelirken, mavi ışık $n - \pi^*$ bandı daha çok cis formundan trans forma geçiş dalga boyunu belirtmektedir [3].

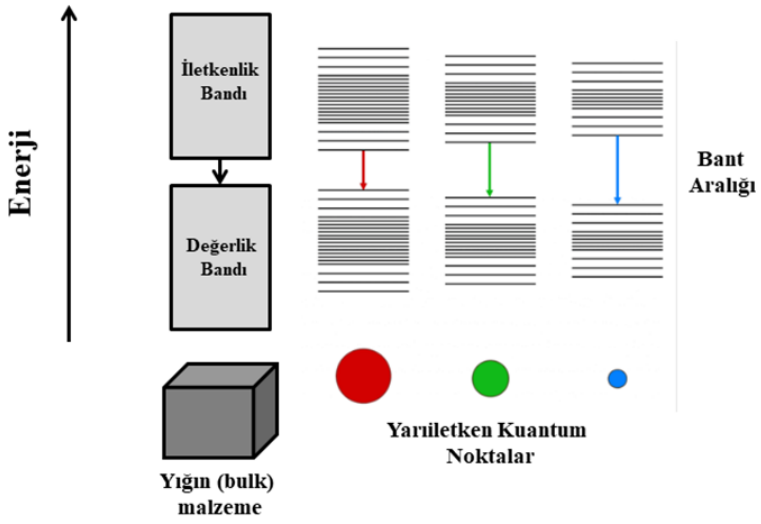


Şekil 2.10. Azo boyalarda, (a) Trans-cis fotoizomerizasyonu ve (b) Dalga boyuna bağlı soğurum miktarı değişim grafiği.

2.3. YARIİLETKEN KUANTUM NOKTALAR

Yarıiletken kuantum noktalar, fiziksel boyutları 2-10 nm çap aralığında değişim gösteren yüzlerce veya binlerce atomun bir araya gelmesiyle oluşan nano parçacıklardır. Yığın şeklindeki malzemeler ile karşılaştırıldığında eşsiz optik ve elektronik özelliklere sahip oldukları görülmüştür. Kuantum nokta yapılarında bu eşsiz özelliklerin görülmesi kuantum sınırlama etkisi ile oluşmaktadır. Kuantum sınırlama etkisi ile yarıiletken özelliğe sahip kuantum nokta yapısındaki elektron ve boşlukların güçlü bir şekilde sınırlandırılması söz konusudur. Bu etki, kullanılan nano parçacığın yarıçapının eksiton Bohr yarıçapından küçük olduğu durumlarda geçerli olmaktadır [43].

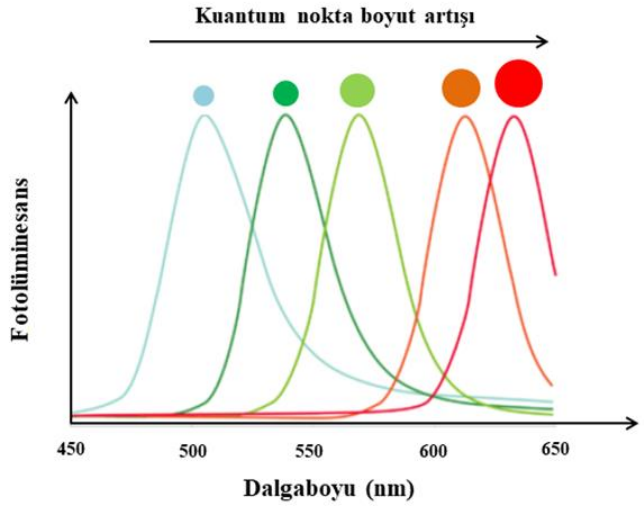
Kuantum noktaların yasak enerji bant aralıklarının yığın malzemeler ile karşılaştırıldığında daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca, kuantum noktaların boyutlarının azalmasına bağlı olarak yasak enerji bant aralıkları artmaktadır. Şekil 2.11'de yığın malzemeler ile kuantum noktaların yasak enerji bant aralıklarının değişimi şematik olarak gösterilmiştir [13]. Şekilde görüldüğü gibi düşük boyuta sahip olan kuantum noktaların yasak enerji bant aralıkları daha büyüktür ve bu kuantum noktaların uyarılmaları için daha fazla enerjiye gereksinim olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 2.11. Yığın malzeme ve kuantum noktaların yasak enerji bant aralıkları.

Kuantum noktaların bir diğer önemli özelliği de parçacık yarıçapı ile fotolüminesans değerlerinin kontrol edilebilmesidir. Bu özellikleri, emisyon dalga boyunu kullanarak kuantum noktaların ortalama büyüklüğünü ve boyut dağılımını belirlemek için floresans spektroskopisinin kullanılabileceği anlamına gelmektedir. Şekil 2.12, elektromanyetik

spektrumun görünür bölgesinde yarıiletken kuantum noktaların boyuta bağlı fotolüminesans değerlerini göstermektedir [44], [45]. Şekilde görüldüğü gibi, fotolüminesans değerinin dalga boyuna bağlı olarak değişimi ile kuantum nokta boyutunun tespit edilmesi söz konusu olabilmektedir.



Şekil 2.12. Kuantum noktaların boyuta bağlı Fotolüminesans-Dalga boyu değişim grafiği.

Parlaklık, kuantum noktaların başka bir önemli özelliği olarak bilinmektedir. Organik boyalar ile karşılaştırıldığında foton soğurum kapasitelerinin yüksek olması nedeniyle kuantum noktalar yüksek parlaklık gösterirler. Ayrıca çevreleri ile etkileşimleri minimum olan kuantum noktaların yüksek foto-stabiliteye sahip oldukları bilinmektedir. Günümüzde yeni nesil güneş pilleri, ışık yayan diyotlar, lazerler ve ekran teknolojileri alanında yaygın bir şekilde kullanılan yarıiletken kuantum noktaların eşsiz fiziksel özellikleri keşfedilmeye devam etmektedir [13].

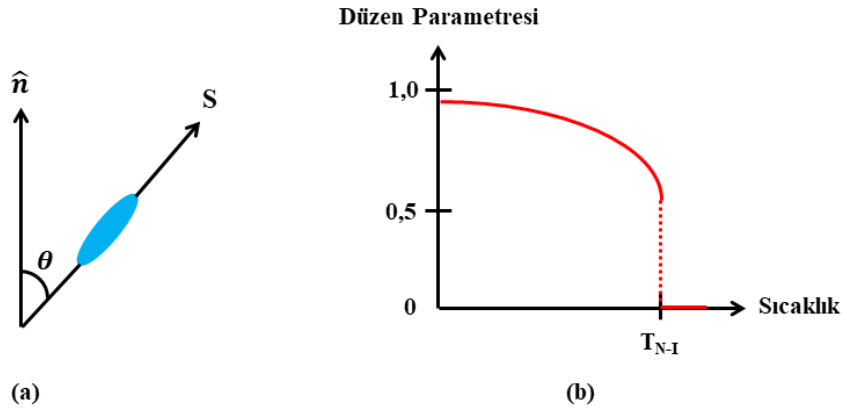
3. SIVI KRİSTALLERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

3.1. DÜZEN PARAMETRESİ

Maddenin katı ve sıvı fazları arasında yer alan sıvı kristal fazı, sıvıların sahip olduğu akışkanlık özelliğini yapısında bulundurmaktadır. Sıvı kristal yapıların akışkanlık özelliği moleküllerin yönelimine bağlı olarak değişim göstermektedir. Sıvı kristal moleküllerin uzun eksenleri boyunca yönelim düzenleri, düzen parametresi (S) ile ifade edilmektedir [5]. Düzen parametresi değerinin matematiksel ifadesinin elde edilebilmesi için Şekil 3.1.(a)'da verilen moleküler düzen göz önüne alınmıştır. Burada θ, bir sıvı kristal molekülünün uzun ekseni ile moleküllerin ortalama yönelimini gösteren $\hat{n}$ direktörü arasındaki açıyı ifade etmektedir. Sıvı kristallerin düzen parametresi ifadesi Denklem (3.1) ile verilmektedir [40]:

$$S = \frac{1}{2}\langle 3cos^2\theta - 1\rangle \tag{3.1}$$

Katı kristal faza sahip malzemelerde düzen parametresi değeri 1, sıvı faza sahip malzemelerde ise 0 değerini almaktadır. Sıvı kristal faza sahip yapılarda düzen parametresi değeri 0,3 ile 0,9 arasında değişmektedir. Örneğin, nematik sıvı kristallerde düzen parametresi 0,5 ile 0,7 arasında değer almaktadır [7], [40].



Şekil 3.1. Sıvı kristal yapılarda, (a) Düzen parametresinin gösterimi ve (b) Düzen parametresinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği.

Şekil 3.1.(b)'de, sıvı kristal yapılarda düzen parametresinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği verilmiştir. Sıcaklığın artması ile düzen parametresi değerinin azaldığı görülmektedir. Grafikte yer alan T_{N-I} sıcaklık ifadesi, nematik sıvı kristal yapının nematik fazdan izotropik sıvı faza geçiş sıcaklığını göstermektedir. Bu sıcaklık değerinden sonra düzen parametresinin değerinin sıfır olduğu görülmektedir [40].

3.2. ANİZOTROPİ

Anizotropik yapıya sahip olan sıvı kristallerde moleküler yönelim, dışarıdan uygulanan elektrik alan, manyetik alan, sıcaklık gibi etkilerle değiştirilebilmektedir. Sıvı kristallerin sahip olduğu anizotropik yapı; kırılma indisi, dielektrik sabiti, viskozite ve iletkenlik gibi bazı fiziksel parametrelerde önemli değişimlere sebep olmaktadır [7].

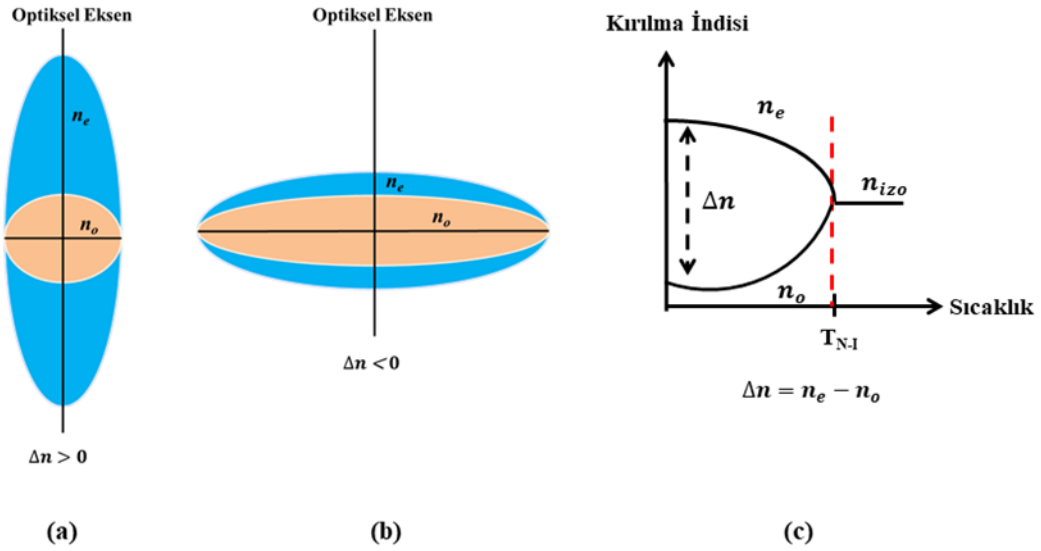
3.2.1. Optik Anizotropi

Sıvı kristaller, optiksel olarak anizotropik malzemelerdir ve çift kırılma özelliği gösterirler. Sahip oldukları çift kırılma özelliği sıradan (n_o) ve sıradan olmayan (n_e) kırılma indisleri arasındaki fark ile ifade edilmektedir ve Denklem (3.2) ile verilmektedir [38]:

$$\Delta n = n_e - n_o \tag{3.2}$$

Δn parametresi, pozitif veya negatif değer alabilmektedir. Şekil 3.2.(a-b)'de, optiksel olarak tek eksenli sıvı kristallerde pozitif optik anizotropi ve negatif optik anizotropi durumlarına ait temsili gösterimlere yer verilmiştir. Δn, nematik sıvı kristallerde pozitif değere sahip iken kolesterik sıvı kristallerde negatif değer alabilmektedir [40].

Genel olarak, malzeme üzerine gelen ışığın dalga boyu ve sıcaklık arttırıldığında çift kırılma indisinin azaldığı bilinmektedir. Şekil 3.2.(c)'de sıvı kristal yapılarda kırılma indisinin sıcaklığa bağlı değişimi verilmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak Δn değeri azalmakta ve kritik sıcaklık değeri olan T_{N-I}'dan sonra çift kırılma indisi izotropik sıvının kırılma indisine (n_{izo}) eşit olmaktadır [40].



Şekil 3.2. Optiksel olarak tek eksenli sıvı kristal yapılarda, (a) Pozitif optik anizotropi, (b) Negatif optik anizotropi ve (c) Kırılma indisi parametresinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği.

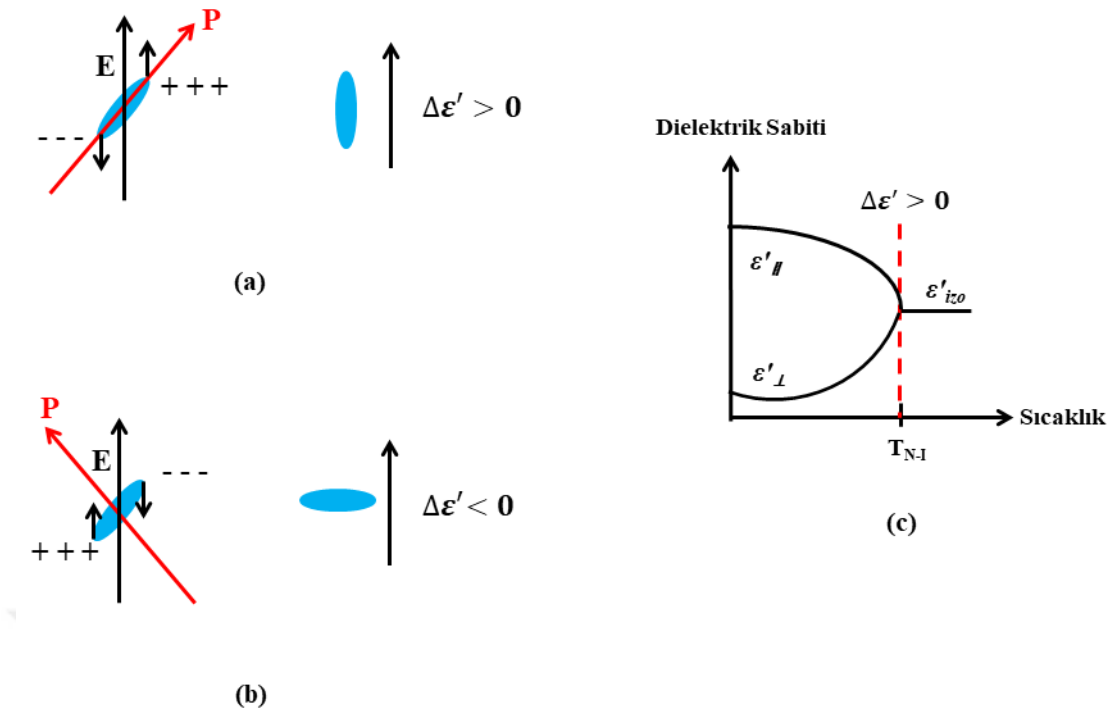
3.2.2. Dielektrik Anizotropi

Sıvı kristaller, polar ve polar olmayan moleküller içermektedir. Polar moleküller sıvı kristal malzemede kalıcı dipol moment oluştururken, polar olmayan moleküller dışarıdan uygulanan elektrik alan ile elektriksel dipol oluştururlar. Kalıcı veya dış elektrik alan etkisi ile oluşan elektriksel dipoller, sıvı kristallerin moleküler eksenine paralel veya dik olabilmektedir. Dipol momentin moleküler eksene paralel olması durumunda dielektrik anizotropi ($\Delta\varepsilon'$) pozitif değere, dik olması durumunda ise negatif değere sahip olmaktadır [15].

Şekil 3.3.(a-b)'de sıvı kristal yapılarda $\Delta\varepsilon'$ parametresinin pozitif ve negatif değere sahip olma durumu şekilsel olarak gösterilmiştir. Ayrıca, $\Delta\varepsilon'$ parametresinin matematiksel ifadesi Denklem (3.3) ile verilmektedir [4]:

$$\Delta\varepsilon' = \varepsilon'_{\parallel} - \varepsilon'_{\perp} \tag{3.3}$$

Burada, $\varepsilon'_{\parallel}$ ve $\varepsilon'_{\perp}$ sırasıyla elektrik alana paralel ve dik yönde ölçülen dielektrik sabiti değerlerini ifade etmektedir. Şekil 3.3.(c)'de, dielektrik sabitinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği verilmiştir. $\Delta\varepsilon'$ parametresinin sıcaklık artışına bağlı olarak azaldığı ve T_{N-I}'dan sonra izotropik sıvının dielektrik sabiti değerine (ε'_{izo}) eşit olduğu görülmektedir [40].



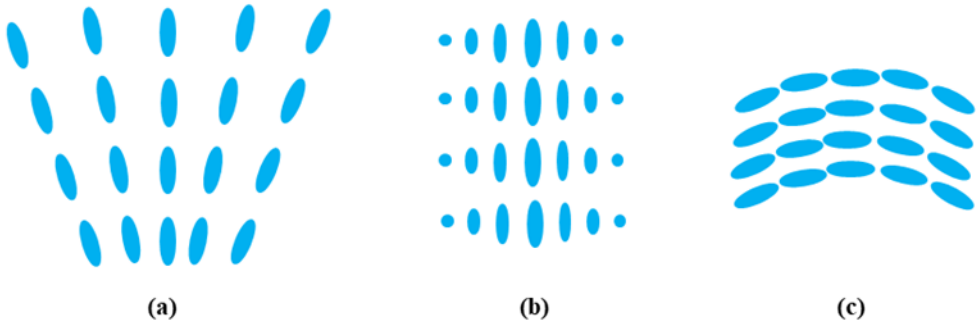
Şekil 3.3. Sıvı kristal yapılarda, (a) Pozitif dielektrik anizotropi, (b) Negatif dielektrik anizotropi ve (c) Dielektrik sabitinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği.

3.3. ELASTİK SABİTLERİ

Sıvı kristaller, mekanik, elektriksel ve manyetik dış etkilere karşı oldukça duyarlı malzemeler olarak bilinmektedir. Bu dış etkilere maruz kalan sıvı kristaller, kolay bir şekilde deforme olabilmekte ve sıvı kristal yapıda meydana gelen deformasyonlar moleküllerin ortalama yönelim doğrultusunda ($\hat{n}$) önemli değişimlere sebep olmaktadır. Nematik sıvı kristallerde, Şekil 3.4.(a-c)'de görülen ve sırasıyla eğilme, burulma ve bükülme olarak adlandırılan üç çeşit deformasyon görülmektedir. Bu deformasyonlara bağlı olarak oluşan değişimler, Frank tarafından geliştirilen serbest enerji yoğunluğu (F) ile ifade edilmekte ve Denklem (3.4) ile verilmektedir [3]:

$$F = \frac{1}{2}[K_{11}(\nabla.\hat{n})^2 + K_{22}(\hat{n}.\nabla \times \hat{n})^2 + K_{33}(\hat{n} \times \nabla \times \hat{n})^2] \quad (3.4)$$

Denklemde yer alan K_{11}, K_{22} ve K_{33} değişkenleri sırasıyla eğilme, burulma ve bükülme elastik sabitleri olarak tanımlanmaktadır. Bu sabitler, Frank elastik sabitleri olarak da bilinmektedir. Sıvı kristallerde meydana gelen deformasyonlar sistemsel dengeye ulaşılana kadar devam etmektedir [3], [4].



Şekil 3.4. Sıvı kristal yapılarda deformasyon çeşitleri, (a) Eğilme, (b) Burulma ve (c) Bükülme.

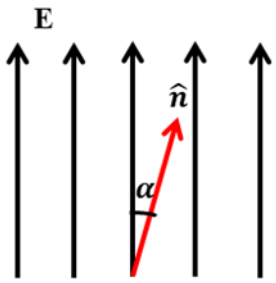
3.4. ROTASYONEL VİSKOZİTE

Sıvı kristaller, anizotropik yapılarından dolayı farklı yönelim doğrultularında farklı rotasyonel viskozitelere (γ) sahip yapılardır. Bu viskoziteler, eğilme dalgalanması, faz dalgalanması ve sıvı kristal moleküllerinin uzun ekseni etrafında yeniden yönelim göstermesine göre sırasıyla γ_θ, γ_φ ve γ_l ile tanımlanmaktadır. Sıvı kristal moleküller bir dış elektrik alana maruz kaldıklarında, rotasyonel viskozitelerine bağlı olarak moleküllerin hareketlerini etkileyen rotasyonel tork oluşmaktadır [46]. Şekil 3.5'te, nematik sıvı kristal molekülünün dış elektrik alan varlığında yöneliminin şematik gösterimi verilmiştir. Uygulanan dış elektrik alan etkisi ile sıvı kristal moleküllerinin yönelim değiştirmesi sonucu oluşan dinamik etki Denklem (3.5) ile verilmektedir [47]:

$$\varepsilon_o \Delta\varepsilon' E^2 \alpha + \gamma \frac{d\alpha}{dt} = 0 \tag{3.5}$$

Burada, ε_o boş uzayın dielektrik sabitidir. Denklemde yer alan birinci terim ($\varepsilon_o \Delta\varepsilon' E^2 \alpha$) dielektrik tork, ikinci terim ise ($\gamma \frac{d\alpha}{dt}$) viskoziteye bağlı oluşan tork olarak ifade edilmektedir. Viskoziteye bağlı olarak oluşan tork, sıvı kristallerin moleküler hareketini engellemekte ve Denklem (3.6) ile tanımlanmaktadır [46]:

$$\Gamma = -\gamma \frac{d\alpha}{dt} \tag{3.6}$$

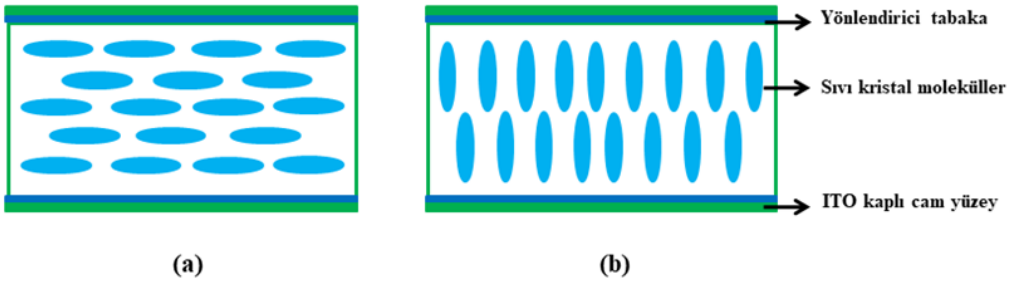


Şekil 3.5. Dış elektrik alan varlığında sıvı kristal molekülünün yönelimine ait şematik gösterim.

3.5. YÖNELİM MEKANİZMALARI

Elektro-optik cihaz üretiminde sıvı kristal malzemelerin moleküler yönelim kabiliyeti oldukça önemlidir. Bu yönelimler sıvı kristal malzemenin sahip olduğu $\Delta\varepsilon'$ parametresinin pozitif veya negatif değere sahip olma durumuna göre farklılık göstermektedir. Genel olarak, sıvı kristallerde planar (paralel) ve homeotropik (dik) olmak üzere iki farklı yönelim mekanizmasından söz edilmektedir. Bu yönelim mekanizmalarına bağlı olarak sıvı kristal malzemelerin fiziksel parametrelerinin ölçümünde, planar ve homeotropik yönelime sahip hücreler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Pozitif $\Delta\varepsilon'$ değerine sahip sıvı kristallerin fiziksel parametrelerinin ölçümlerinde planar yönelimli sıvı kristal hücreler kullanılırken, negatif $\Delta\varepsilon'$ değerine sahip sıvı kristallerin fiziksel parametrelerinin belirlenmesinde homeotropik yönelimli hücrelerin kullanılması tercih edilmektedir [3], [5], [15].

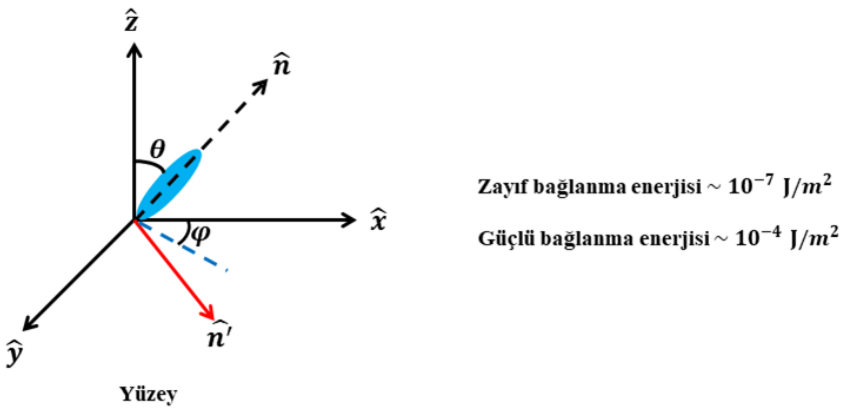
Şekil 3.6'da, sıvı kristal moleküllerinin sıvı kristal hücre içerisinde planar ve homeotropik yönelimleri verilmiştir. Planar yönelimde, sıvı kristal moleküllerin ortalama yönelim vektörü, sıvı kristal hücrenin İndiyum Kalay Oksit (ITO) kaplı elektrotlarının yüzeyine paralel bir şekilde yönelim göstermektedir. Planar yönelime sahip hücrelerde moleküllerin homojen bir şekilde yönelimini sağlamak için ITO kaplı cam yüzey üzerine bir takım mekanik veya kimyasal işlemler uygulanmakta ve yönlendirici tabakanın oluşumu sağlanmaktadır. Homeotropik yönelimde ise sıvı kristal moleküllerin ortalama yönelim vektörü sıvı kristal hücrenin ITO kaplı elektrotlarının yüzeyine dik bir şekilde yönelim göstermektedir. Bu yönelimi sağlamak için yine ITO kaplı cam üzerine bazı yüzey işlemleri uygulanmakta ve yönlendirici tabaka oluşturulmaktadır [3]–[5].



Şekil 3.6. Sıvı kristallerde temel yönelim mekanizmaları, (a) Planar yönelim ve (b) Homeotropik yönelim.

3.6. BAĞLANMA ENERJİSİ

Sıvı kristallerin fiziksel özellikleri moleküler yapılarına ve moleküller arası etkileşimlerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Örneğin, nematik faza sahip bir sıvı kristal katı bir yüzey ile temas ettiğinde, moleküllerin ortalama yönelim doğrultusu, $\hat{n}$, sıvı kristalin moleküler yapısına ve katı yüzey ile etkileşimine bağlı olarak belirlenir. Ankraj (bağlanma), sıvı kristal moleküllerin yüzey tarafından yönlendirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Sıvı kristal yapılarda meydana gelen ankraj mekanizmalarının anlaşılması, sıvı kristal temelli cihazların geliştirilmesinde son derece önemlidir. Şekil 3.7'de, sıvı kristallerde meydana gelen ankraj mekanizmasının anlaşılmasını kolaylaştırmak için sıvı kristallerin yüzey ile etkileşimini gösteren basit bir şematik diyagrama yer verilmiştir. Şekilde verilen $\hat{n}$, sıvı kristallerin yönelim doğrultusunu, $\hat{n'}$ ise ankraj yönü veya kolay eksen olarak tanımlanan yönelim doğrultusunu ifade etmektedir. Kolay eksen, herhangi bir dış alan veya kuvvet yokluğunda yüzeydeki yönelim doğrultusunun ($\hat{n}$) kendiliğinden değişmesidir [7].



Şekil 3.7. Sıvı kristallerin yüzey ile etkileşimi ve bağlanma enerjisi.

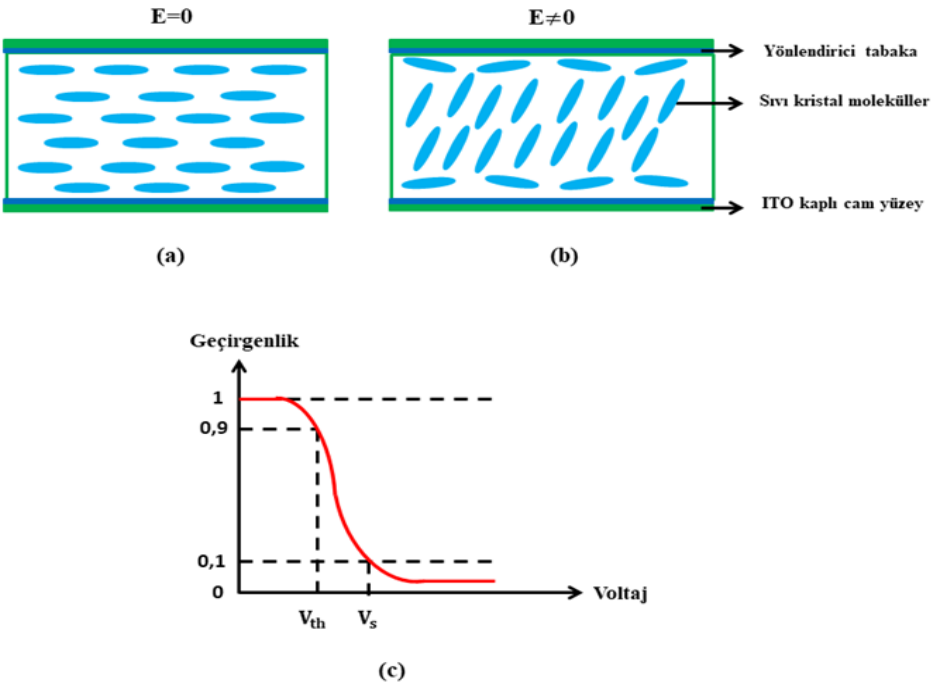
Sıvı kristal molekülleri ve bulundukları yüzey arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkan enerji bağlanma (ankraj) enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Bağlanma enerjisi fiziksel olarak sıvı kristal moleküllerinin yüzeyde bulunan kolay yönlenme ekseninden sapması için gerekli olan enerji miktarıdır. Genel olarak, polar bağlanma enerjisi ve mutlak bağlanma enerjisi olmak üzere iki temel bağlanma enerjisinden söz edilmektedir. Polar bağlanma enerjisi, yüzeyde bulunan sıvı kristal moleküllerinin direktörünün yüzeyin normalinden sapması için gerekli enerji miktarıdır ve ω_θ ile gösterilmektedir. Mutlak bağlanma enerjisi ise, yüzeyde bulunan sıvı kristal moleküllerinin direktörünün düzlemin normalinden sapması için gerekli enerji miktarıdır ve ω_φ ile ifade edilmektedir [7], [48].

Sıvı kristal yapılarda, güçlü bağlanma enerjisinin değeri yaklaşık olarak 10^{-4} J/m^2, zayıf bağlanma enerjisinin yaklaşık değeri ise 10^{-7} J/m^2 olarak verilmektedir. Bağlanma enerjisinin değeri, sıvı kristallerin eşik voltajı ve tepki süresi gibi önemli fiziksel parametrelerini etkilemektedir [4], [7].

3.7. FREEDERICKSZ GEÇİŞİ VE EŞİK VOLTAJI

Sıvı kristal malzemeler, sıvı kristal hücre içerisine doldurulup elektrik alana maruz bırakıldıklarında, sıvı kristal molekülleri ile ITO kaplı cam yüzey arasında meydana gelen etkileşimler sonucu bir bağlanma oluşmaktadır. Eğer uygulanan elektrik alanın yönü sıvı kristal moleküllerinin yönelim doğrultusuna dik ise sıvı kristal moleküllerin yönelimi değişmeye başlayacaktır. Yönelimin sağlanması için, sıvı kristal yapıların sahip olduğu elastik ve viskoelastik kuvvetlerin üstesinden gelinmesi gerekmektedir. Bu kuvvetlerin üstesinden gelinmesi için gerekli olan kritik bir elektrik alan değeri bulunmaktadır. Bu değer, Freedericksz eşiği olarak tanımlanmaktadır [3], [15].

Şekil 3.8.(a-b)'de planar yönelime sahip sıvı kristal hücre içerisinde, pozitif $\Delta\varepsilon'$ değerine sahip nematik fazda bulunan sıvı kristal yapı için elektrik alan olmadığı durumda (E=0) ve elektrik alan varlığında (E≠0) moleküler yönelimlere yer verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, sıvı kristal hücre elektrik alana maruz bırakıldığında, sıvı kristal moleküller elektrik alan yönünde yönlenmeye başlamıştır.



Şekil 3.8. Planar yönelime sahip sıvı kristal hücre içerisinde pozitif $\Delta\varepsilon'$ değerine sahip sıvı kristal yapı için, (a) E=0 durumunda moleküler yönelim, (b) E≠0 durumunda moleküler yönelim ve (c) Geçirgenlik-Voltaj grafiği.

Şekil 3.8.(c)'de, planar yönelimli sıvı kristal hücre içerisinde pozitif $\Delta\varepsilon'$ değerine sahip nematik sıvı kristal yapıya ait örnek bir Geçirgenlik-Voltaj grafiği verilmiştir. Bu grafik, sıvı kristal yapıların eşik voltajı (V_{th}), satürasyon voltajı (V_s) ve zıtlık oranı (CR) parametreleri hakkında önemli bilgiler vermektedir. Eşik voltajı, sıvı kristal moleküllerin yönlenmesi için gerekli olan minimum voltaj olarak tanımlanmaktadır. Geçirgenlik-Voltaj grafiğinde, geçirgenliğin %10 azaldığı değere karşılık gelen voltaj, V_{th} parametresinin sayısal değerini vermektedir. Satürasyon voltajı ise sıvı kristal moleküllerinin neredeyse elektrik alan yönünde tamamen yönelim gösterdiği voltaj değeri olarak tanımlanmaktadır. Geçirgenlik-Voltaj grafiğinde, geçirgenliğin %90 azaldığı değere karşılık gelen voltaj V_s parametresinin değeri olarak hesaplanmaktadır. Zıtlık oranı parametresi ise Geçirgenlik-Voltaj grafiğinde yer alan minimum ve maksimum geçirgenlik (T_{min} ve T_{max}) değerleri kullanılarak hesaplanmakta ve Denklem (3.7) ile ifade edilmektedir [48]:

$$CR = \frac{T_{max}}{T_{min}} \tag{3.7}$$

V_{th}, V_s ve CR parametrelerinin, sıvı kristal yapıların elektro-optik cihaz uygulamalarında kullanılmasını sağlayan önemli parametreler olduğu bilinmektedir.

3.8. TEPKİ SÜRESİ

Sıvı kristal malzemelere elektrik alan uygulanması durumunda, sıvı kristal moleküllerinin alan yönünde yönelim göstermesi ve elektrik alan kaldırıldığında eski haline dönmesi için gerekli süre tepki süresi (τ_t) olarak tanımlanmaktadır. Sıvı kristal yapılarda tepki süresi parametresinin değeri, sistemin elastik sabitine ve viskozitesine bağlı olarak değişim göstermektedir. Tepki süresi, yükselme süresi (τ_y) ve düşme süresi (τ_d) parametrelerinin toplamı ile hesaplanmakta ve Denklem (3.8) ile ifade edilmektedir [49]–[51]:

$$\tau_t = \tau_y + \tau_d \tag{3.8}$$

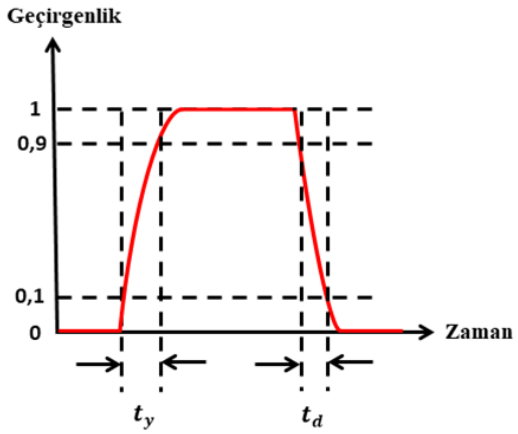
Denklemde yer alan yükselme süresi, sıvı kristal hücreye elektrik alan uygulanmasıyla ışık geçirgenlik değerinin %10'dan %90'a ulaşması için gereken süre olarak; düşme süresi ise sıvı kristal hücreye elektrik alan uygulandığında ışık geçirgenlik değerinin %90'dan %10'a ulaşması için gereken süre olarak tanımlanmaktadır. Yükselme ve düşme süresi parametrelerinin matematiksel ifadeleri Denklem (3.9) ve (3.10) ile verilmektedir [46]:

$$\tau_y = \frac{\gamma d^2}{|\Delta\varepsilon'|V^2 - K_i\pi^2} \tag{3.9}$$

$$\tau_d = \frac{\gamma d^2}{K_i\pi^2} \tag{3.10}$$

Denklemlerde verilen d, sıvı kristal hücrenin kalınlığını; K_i (i=11, 22, 33) ise sıvı kristal yapılarda eğilme, burulma ve bükülme durumları için elde edilen elastik sabiti değerini ifade etmektedir.

Şekil 3.9'da, sıvı kristal yapılarda tepki süresi parametresinin belirlenmesinde kullanılan örnek bir Geçirgenlik-Zaman grafiği verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi geçirgenliğin %10 ve %90 olduğu değerler arasındaki fark τ_y ve τ_d olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3.9. Sıvı kristal yapılarda tepki süresi parametresinin belirlenmesinde kullanılan Geçirgenlik-Zaman grafiği.

3.9. DİELEKTRİK ÖZELLİKLER

Dielektrik malzemeler, elektrik alan varlığında polarize olabilen ve elektriksel olarak yalıtkan malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Dielektrik özelliğe sahip bir malzeme üzerine elektrik alan uygulandığında, yapısında var olan pozitif ve negatif yüklerin zıt yönlerde hareket etmeleri sonucu elektriksel dipoller oluşmaktadır. Elektrik alan varlığı ile oluşan bu dipoller, uygulanan elektrik alan yönünde yönelim göstermekte, elektrik alan kaldırıldığında ise eski durumlarına geri dönmektedir. Bazı dielektrik malzemeler ise üzerine elektrik alan uygulanmadığı durumunda dipol momente sahiptir. Bu malzemeler kendiliğinden dipol momente sahip malzemeler olarak adlandırılmaktadır [46].

Dielektrik malzemelerin sahip olduğu elektriksel özellikler, dielektrik spektroskopi tekniği kullanılarak incelenmektedir. Bu teknik ile incelenen malzemenin sahip olduğu polarizasyon mekanizmalarının frekansa bağlı olarak değişimi araştırılmaktadır. Dielektrik bir malzeme üzerine elektrik alan uygulanması durumunda, yapısında bulunan tüm yüklü parçacıkların alan boyunca yönelimini sağlayan kuvvetler ile karşılaşması söz konusudur. Bu kuvvetler, dielektrik malzemede geniş bir frekans aralığında farklı dielektrik polarizasyon mekanizmalarını (iyonik, dipolar, atomik ve elektronik) oluşturmaktadır. Dielektrik malzemelerin polarizasyonu dielektrik sabiti ile ifade edilmektedir [40].

3.9.1. Kompleks Dielektrik Sabiti

Dielektrik malzemelerin dışarıdan uygulanan elektrik alana duyarlı olması, elektriksel özelliklerinin araştırılmasında önemli bir faktör olarak görülmektedir. Bu malzemelerin bazı önemli dielektrik parametrelerinin analizi dielektrik/empedans spektroskopi tekniği kullanılarak araştırılmaktadır. Bu teknikte, dielektrik özellikleri belirlenecek malzeme genellikle iki iletken plaka veya iki iletken cam arasına yerleştirilmekte ve bir kondansatör elde edilmektedir. Kondansatörün sığası belirlenerek, dielektrik özelliklerin analizinde son derece önemli görülen kompleks dielektrik sabiti parametresinin değeri hesaplanabilmektedir [8], [52], [53].

Kompleks dielektrik sabiti, madde içerisindeki elektriksel yük dağılımının bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Frekansa bağlı olarak değişim gösteren kompleks dielektrik sabiti eşitliği ilk olarak Debye tarafından kullanılmıştır. Bu eşitlik Denklem (3.11) ile ifade edilmektedir [5], [54]:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \tag{3.11}$$

Burada, ε' kompleks dielektrik sabitinin reel kısmını oluşturmakta ve malzemede depolanan enerji miktarını belirtmektedir. ε'' ise kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmını oluşturmakta ve malzemede meydana gelen enerji kayıplarını ifade etmektedir. ε' ve ε'' parametrelerinin bazı değişkenlere bağlı ifadeleri sırasıyla Denklem (3.12) ve Denklem (3.13) ile verilmektedir [55], [56]:

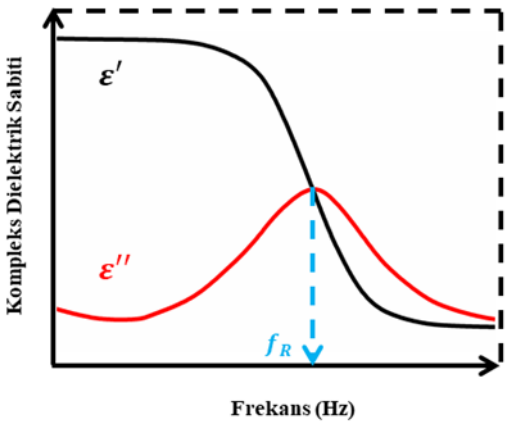
$$\varepsilon'(\omega) = \frac{Cd}{\varepsilon_o A} = \frac{C}{C_o} \tag{3.12}$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{Gd}{\omega\varepsilon_o A} = \frac{G}{\omega C_o} \tag{3.13}$$

Burada, ε_o boşluğun dielektrik sabitini, C_o aralarında boşluk bulunan paralel plakalı kondansatörün sığasını, C aralarında dielektrik malzeme bulunan paralel plakalı kondansatörün sığasını, d kondansatörün paralel plakaları arasındaki mesafeyi, A kondansatörün paralel plakalarının sahip olduğu alanı ve G iletkenliği ifade etmektedir.

Şekil 3.10'da, dielektrik bir malzeme için kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal bileşenlerinin frekansa bağlı değişim grafiği verilmiştir. Grafikte görülen kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmının maksimum değerine karşılık gelen frekans,

relaksasyon frekansı (f_R) olarak tanımlanmaktadır. Dielektrik özelliğe sahip malzemelerde bir veya birden çok relaksasyon davranışı görülebilmektedir ve bu davranışlar malzemelerin moleküler yönelim mekanizmaları hakkında bilgi vermektedir [57].



Şekil 3.10. Kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal bileşenlerinin frekansa bağlı değişim grafiği.

Kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal bileşenleri kullanılarak, dielektrik malzemeler için kayıp tanjant faktörü hesaplanmaktadır. Kayıp tanjant faktörü, dielektrik malzemelerde kaybedilen enerjinin kazanılan enerjiye oranı olarak tanımlanmakta ve Denklem (3.14) ile ifade edilmektedir [56]:

$$tan\delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \tag{3.14}$$

3.9.2. Dielektrik Relaksasyon Davranışları

Dielektrik özelliğe sahip malzemelerin relaksasyon davranışlarının açıklanmasında birden fazla yaklaşım ve model önerisi bulunmaktadır. Ancak bilinen en temel modeller Debye ve Cole-Cole modelleridir.

Debye Modeli: Tek relaksasyon davranışına sahip sistemlerin kompleks dielektrik sabiti Debye eşitliği ile tanımlanmaktadır. Bu sistemlerde, relaksasyon zamanı parametresi relaksasyon frekansı ile ters orantılı olup Denklem (3.15) ile verilmektedir [5]:

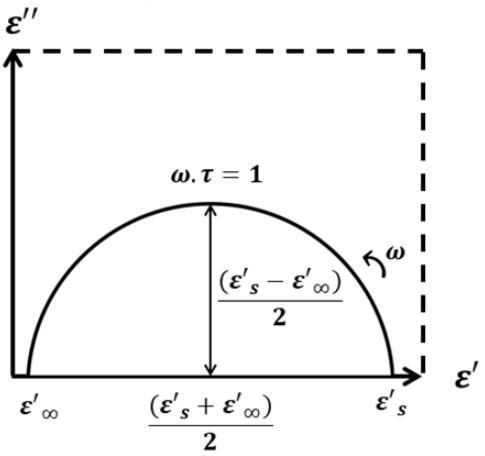
$$\tau_R = \frac{1}{2\pi f_R} \tag{3.15}$$

Debye model için açısal frekansın bir fonksiyonu olarak kompleks dielektrik sabiti ise Denklem (3.16) ile ifade edilmektedir [54]:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'_\infty + \frac{(\varepsilon'_s - \varepsilon'_\infty)}{1 + i\omega\tau} \tag{3.16}$$

Burada, ε'_∞ kompleks dielektrik sabitinin reel kısmının yüksek frekans limitini, ε'_s kompleks dielektrik sabitinin reel kısmının düşük frekans limitini, τ relaksasyon zamanını ifade etmektedir.

Cole-Cole Modeli: Birden fazla relaksasyon davranışı gösteren sistemlerin kompleks dielektrik sabiti Cole-Cole eşitliği ile tanımlanmaktadır. Şekil 3.11'de, tek relaksasyon zamanına sahip sistemlere ait Cole-Cole grafiği verilmiştir. Grafikte, merkezi $\varepsilon'' = 0$ yatay ekseni üzerinde $((\varepsilon'_s + \varepsilon'_\infty)/2, 0)$ noktasında bulunan ve yarıçapının büyüklüğünün değeri $((\varepsilon'_s - \varepsilon'_\infty)/2)$ olan bir yarım daire görülmektedir. Bu durumda Cole-Cole modeli Debye modeline indirgenmektedir [58].



Şekil 3.11. Tek relaksasyon zamanına sahip sistemler için Cole-Cole grafiği.

Birden fazla relaksasyon zamanına sahip sistemlerde ise merkezi $\varepsilon'' = 0$ yatay ekseninin altında kalan bir yarım daire veya yay oluşmaktadır. Cole-Cole modeli için açısal frekansın bir fonksiyonu olarak kompleks dielektrik sabiti Denklem (3.17) ile ifade edilmektedir [55]:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'_\infty + \frac{(\varepsilon'_s - \varepsilon'_\infty)}{1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}} \tag{3.17}$$

Burada, α $(0 \leq \alpha \leq 1)$ relaksasyon dağılım parametresi olarak tanımlanmaktadır. Bu parametrenin sıfıra eşit olması durumunda, Cole-Cole modeli Debye modeli ile ifade edilmektedir. Denklemde yer alan kompleks dielektrik sabitinin reel kısmının düşük ve yüksek frekans limitinde elde edilen değerleri arasındaki fark $(\varepsilon'_s - \varepsilon'_\infty)$ dielektrik dayanım parametresi olarak verilmekte ve $\delta\varepsilon'$ ile tanımlanmaktadır.

3.9.3. İletkenlik

Sıvı kristallerde AC iletkenlik, yapılarında bulunan iyonik yükler tarafından oluşmaktadır. AC iletkenlik değeri sıcaklık ve frekansa bağlı olarak değişim göstermekte ve Denklem (3.18) ile ifade edilmektedir [46]:

$$\sigma_{ac} = \omega\varepsilon_o\varepsilon'' \tag{3.18}$$

DC iletkenlik ise sıvı kristal malzemelerdeki safsızlık iyonlarının varlığından ve bu iyonların hareketinden kaynaklı oluşmaktadır. Ayrıca, DC iletkenlik değeri AC iletkenlik parametresine göre değişim göstermekte ve Denklem (3.19) ile verilmektedir [46], [55]:

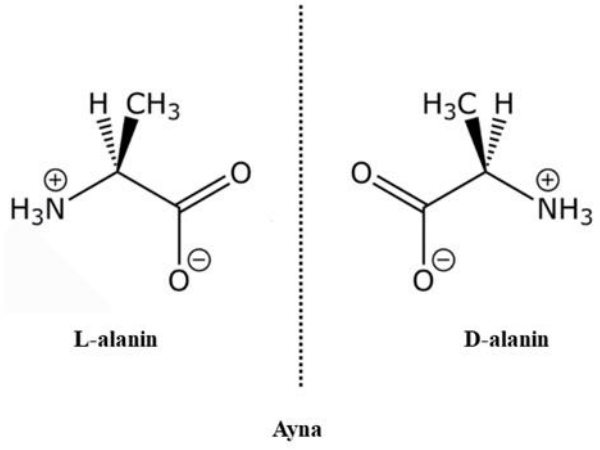
$$\sigma_{dc} = \sigma_{ac} - \frac{1}{s}\frac{d\sigma_{ac}}{dln\omega} = \frac{n_c z^2 D}{k_B T} \tag{3.19}$$

Burada, s frekansın bir üs kuvveti, n_c iyonik yük konsantrasyonu, z iyonik yük, D iyonik difüzyon katsayısı, k_B Boltzmann sabiti ve T sıcaklık olarak tanımlanmıştır.

4. KOLESTERİK SIVI KRİSTALLER

4.1. KOLESTERİK SIVI KRİSTAL YAPISI VE TEMEL ÖZELLİKLERİ

Kiralite ilk olarak 1894 yılında Lord Kelvin tarafından keşfedilmiştir ve gerçek görüntüleri ile ayna simetrileri çakışmayan bir moleküler özellik olarak tanımlanmıştır. Kiral kelimesi, Yunanca el anlamına gelen "cheir" kelimesinden türetilmiştir. Kiral moleküllerdeki çakışmazlık özelliği sağ ve sol elde var olan bir özelliktir. Moleküler boyutta ise kiraliteye sebep olan temel özellik asimetrik yapıya sahip olan karbon atomunun varlığıdır [59]–[61]. Şekil 4.1'de, kiral yapıya sahip olan alanin molekülünün gerçek görüntüsü ve ayna simetrisi verilmiştir. Alanin molekülünün karbon atomuna bağlı dört farklı gruptan oluştuğu görülmektedir. Üst üste çakışmazlık, yani kiral özellik gösteren alanin molekülünün gerçek görüntüsü ve ayna simetrisi birbirinden farklıdır. Kiral moleküllerin ayna görüntüleri enantiyomer olarak adlandırılmaktadır. Enantiyomer çiftleri sağa veya sola bükümlü (right handed veya left handed) özellik göstermektedir. Bu özellikler, enantiyomerin düzlem polarize ışığı döndürme yeteneğine göre belirlenmektedir. Enantiyomer, ışığı saat yönünde döndürüyorsa sağa bükümlü, saat yönünün tersine döndürüyorsa sola bükümlü özellik gösterdiği anlaşılmaktadır [59].



Şekil 4.1. Kiral yapıya sahip olan alanin molekülünün gerçek görüntüsü ve ayna simetrisi.

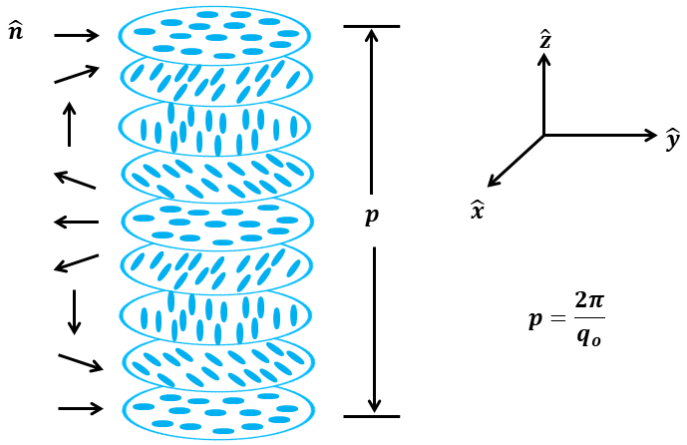
Kolesterik veya kiral nematik sıvı kristal fazı, nematik sıvı kristallere kiral katkı maddesi eklenmesi ile elde edilmektedir ve ilk olarak kolesteril ester bileşiklerinde gözlemlenmiştir [60], [62]. Yönelimsel düzene sahip olan kolesterik sıvı kristal yapılar konumsal düzen göstermezler. Fiziksel özellikleri genel olarak nematik sıvı kristaller ile benzerlik gösteren kolesterik sıvı kristaller, p helis adımı ile karakterize edilirler ve tek boyutlu fotonik kristaller olarak kabul edilirler. Kolesterik sıvı kristallerde p helis adımı, sıvı kristal moleküllerin 360^{o}'lik tam turlarını tamamladıkları tabakalar arası mesafeye eşit olup gelen ışığın yansımasında önemli rol oynamaktadır [22]–[24]. Şekil 4.2'de, kolesterik sıvı kristal yapılarda $\hat{n}$ yönelim doğrultusunun değişimi ve p helis adımı şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde, sıvı kristal moleküllerinin x-y düzleminde $\hat{n}$ direktörü boyunca ortalama bir yönelim gösterdikleri ve böylece kolesterik sıvı kristalin helis yapısının oluştuğu görülmektedir. Bu durumda, oluşan helis yapısının doğrultusu z ekseni yönündedir. Ayrıca, kolesterik sıvı kristallerin sahip olduğu helis yapısı, kullanılan kiral katkı maddesinin yapısına bağlı olarak sağa veya sola bükümlü özellik göstermektedir. Kolesterik sıvı kristal yapısında, sağa bükümlü özellik gösteren kiral katkı maddesi kullanıldığında p helis adımı pozitif değere sahip iken sola bükümlü özellik gösteren kiral katkı maddesi kullanıldığında p helis adımı negatif değer almaktadır. Kullanılan kiral katkı maddesinin özelliğine göre kolesterik sıvı kristal yapıda oluşan p helis adımının değeri Denklem (4.1) ile verilmektedir [61]:

$$p = \frac{2\pi}{q_o} \tag{4.1}$$

Burada, q_o kiralite olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, kolesterik sıvı kristal yapının karakteristik özelliklerinden biri olan p helis adımı, kolesterik sıvı kristali oluşturan kiral katkı maddesi miktarının oranına (c) bağlı olarak da değişmekte olup Denklem (4.2) ile ifade edilmektedir [59], [63]:

$$p = \frac{1}{HTP.c} \tag{4.2}$$

Burada, HTP helissel döndürme gücü olarak tanımlanmaktadır. HTP değeri, kolesterik sıvı kristal yapının ne kadar bükülme davranışı göstereceğinin bir ölçüsüdür. Sayısal değeri kolesterik sıvı kristal yapıyı oluşturan kiral katkı maddesi ve kullanılan sıvı kristale göre değişim gösteren HTP'nin birimi μm^{-1} olarak verilmektedir.



Şekil 4.2. Kolesterik sıvı kristallerde $\hat{n}$ yönelim doğrultusunun değişimi ve p helis adımı.

Helis yapısına sahip olan kolesterik sıvı kristaller, kırılma indislerinin periyodik olarak değişmesi sebebiyle gelen ışığı seçici olarak yansıtma özelliğine sahiptir. Seçici yansımanın merkezi dalga boyu λ ve dalga boyu aralığı $\Delta\lambda$ olarak tanımlanmaktadır ve sırasıyla Denklem (4.3) ve Denklem (4.4) ile verilmektedir [64]:

$$\lambda = n.p \tag{4.3}$$

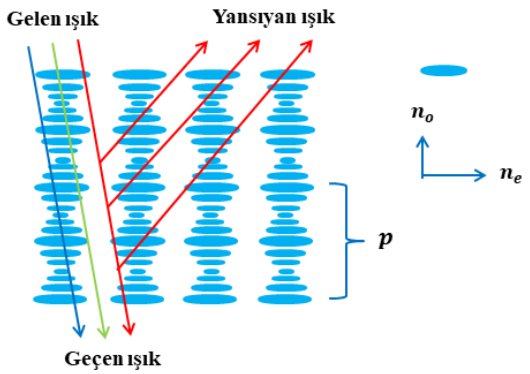
$$\Delta\lambda = \Delta n.p \tag{4.4}$$

Burada, n kırılma indisi n_o ve n_e olarak verilen kırılma indislerinin ortalamasını $(n = (n_o + n_e)/2)$, Δn ise n_o ve n_e olarak verilen kırılma indisleri arasındaki farkı $(\Delta n = n_e - n_o)$ belirtmektedir.

Şekil 4.3'te, kolesterik sıvı kristallerde oluşan Bragg yansıması şematik olarak verilmiştir. Üzerine belirli dalga boyu aralığında ışık düşürülen kolesterik sıvı kristal yapı, bu ışığın bir kısmını karşı tarafa geçirirken bir kısmını Bragg yasasına göre yansıtmaktadır. Bragg yasası Denklem (4.5) ile ifade edilmektedir [65]:

$$2dsin\theta = n\lambda \tag{4.5}$$

Burada, d kristal düzlemleri arasındaki mesafeye eşittir. Kolesterik sıvı kristallerde $d = p/2$ eşitliği ile verilmektedir. Bu yapılarda Bragg yansıması, kolesterik sıvı kristal düzlemi ile üzerine düşürülen ışığın arasında oluşan θ açısının değişimine göre gerçekleşmektedir.



Şekil 4.3. Kolesterik sıvı kristallerde Bragg yansıması.

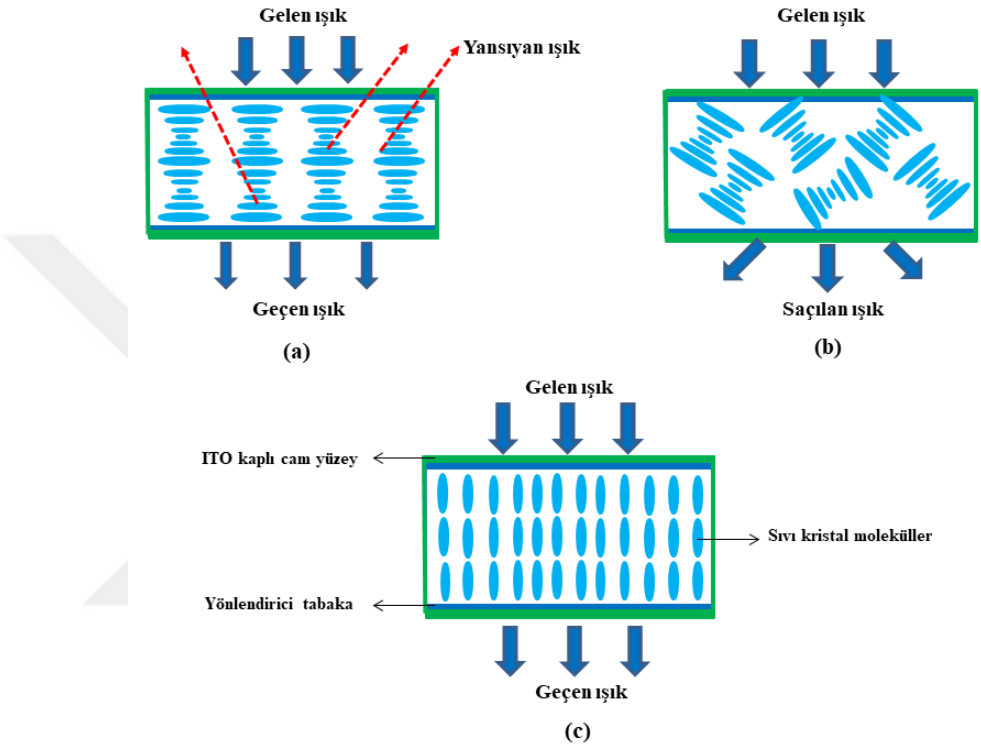
4.2. KOLESTERİK SIVI KRİSTAL DURUMLARI

Kolesterik sıvı kristaller, üzerlerine uygulanan elektrik alan etkisi, hücre kalınlığı, sıvı kristal moleküllerin yüzey ile etkileşimi gibi etkilere bağlı olarak farklı durumlarda bulunma özelliğine sahiptir. Günümüzde, kolesterik sıvı kristallerin morfolojik özelliklerinin değişimi yaygın olarak elektrik alan şiddetindeki değişime göre incelenmektedir. Uygulanan elektrik alan şiddetine bağlı olarak kolesterik sıvı kristaller, planar (P), fokal konik (FK) ve homeotropik (H) olmak üzere üç temel durumda bulunmaktadır [27]. Şekil 4.4'te, planar yönelimli sıvı kristal hücre içerisinde bulunan pozitif dielektrik anizotropiye sahip nematik sıvı kristal kullanılarak hazırlanan kolesterik sıvı kristal yapının üzerine ışık düşürülmesi durumunda, farklı voltaj değerlerinde elde edilen durumlarının şematik gösterimi verilmiştir.

Planar durum, kolesterik sıvı kristal fazının bilinen en temel durumudur. Voltajın sıfır $(V = 0)$ olduğu değere karşılık gelen planar durumda, kolesterik sıvı kristal yapının sahip olduğu helis ekseni sıvı kristal hücre yüzeyinin normaline dik yönelim göstermektedir. Bu durumda, üzerine ışık düşürülen sıvı kristal hücrede Bragg yansımalarının oluştuğu görülmektedir. Yani üzerine ışık düşürülen sıvı kristal hücre ışığın bir kısmını geçirmekte ve diğer kısmını yansıtmaktadır.

Fokal konik durum, kolesterik sıvı kristal yapıda oluşan helis adımlarından her birinin helis ekseninin farklı yönelim doğrultusunda yönlendiği durumdur. Genel olarak düşük voltaj (V_d) değerlerinde elde edilen fokal konik durumda, oluşan helis adımlarının kırılma indisleri arasında bir uyumsuzluk oluşmaktadır. Bu durumda üzerine ışık düşürülen sıvı kristal hücrede saçılmalar meydana gelmektedir.

Homeotropik durum, kolesterik sıvı kristal yapıda helis yapısının bozulduğu ve sıvı kristal moleküllerinin uygulanan elektrik alan ile aynı yönde yönelim gösterdiği durum olarak bilinmektedir. Homeotropik durum yüksek voltaj (V_y) değerlerinde elde edilir ve bu durumda üzerine ışık düşürülen sıvı kristal hücrede yansıma ve saçılmalar minimumdur. Yani, kolesterik sıvı kristal ile doldurulmuş sıvı kristal hücre, üzerine düşürülen ışığın neredeyse tamamını karşı tarafa geçirmektedir [27], [61].



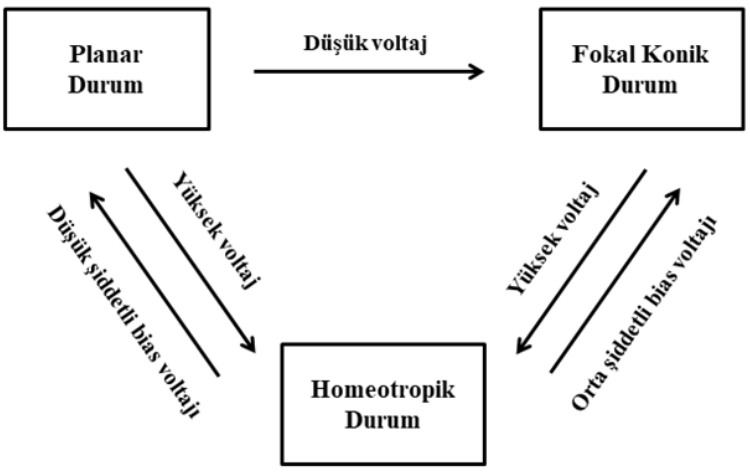
Şekil 4.4. Kolesterik sıvı kristal yapının üzerine ışık düşürülmesi ve farklı voltaj değerlerinde oluşan durumları, (a) P ($V = 0$), (b) FK ($V = V_d$) ve (c) H ($V = V_y$).

4.3. KOLESTERİK SIVI KRİSTAL DURUMLARI ARASINDA GERÇEKLEŞEN GEÇİŞLER

Sıvı kristaller denge durumunda minimum serbest enerjiye sahiptir. Kolesterik sıvı kristallerin sahip olduğu farklı durumlarda oluşan enerjiler, sıvı kristal moleküllerinin yönelim direktörünün deformasyonu ile oluşan elastik enerji, elektriksel enerji ve yüzey enerjisini kapsamaktadır. Planar ve fokal konik durumlarında kolesterik sıvı kristal fazın sahip olduğu helis yapısı korunmaktadır. Planar durumda, yönelim direktörünün bozulmaması ve uygulanan elektrik alana dik olması sebebiyle elastik enerji ve elektriksel enerji değerleri sıfıra eşit olmaktadır. Fokal konik durumda ise kolesterik sıvı

kristal yapıdaki katmanların bükülmesi sebebiyle elastik enerji ve elektriksel enerji oluşumu söz konusudur. Bu durumda oluşan elastik enerji, planar durumdan fokal konik duruma geçişe karşıdır, elektriksel enerji ise planar durumdan fokal konik duruma geçişi desteklemektedir.

Şekil 4.5'te, planar yönelimli sıvı kristal hücre içerisinde pozitif dielektrik anizotropiye sahip nematik sıvı kristal kullanılarak hazırlanan kolesterik sıvı kristal yapının planar, fokal konik ve homeotropik durumları arasında voltaja bağlı olarak gerçekleşen geçiş mekanizmaları verilmiştir. Kolesterik sıvı kristal doldurulmuş sıvı kristal hücrenin planar durumdan fokal konik duruma geçişi düşük voltaj değerlerinde gerçekleşmektedir. Fokal konik durumdaki sıvı kristal hücrenin üzerine uygulanan voltaj arttırılmaya devam ederse, sıvı kristal molekülleri uygulanan elektrik alan ile aynı yönde yönelim gösterir ve homeotropik duruma geçiş gerçekleşir. Homeotropik durumdan fokal konik duruma geçiş ise genellikle orta şiddetli bias voltajı uygulanarak sağlanmaktadır. Ayrıca, kolesterik sıvı kristal yapılarda planar durumdan homeotropik duruma geçiş gerçekleşebilmektedir. Bu geçiş için yüksek voltaj gerekmektedir. Homeotropik durumdan planar duruma geçiş ise düşük şiddetli bias voltajı uygulanarak sağlanabilmektedir [66], [67].



Şekil 4.5. Kolesterik sıvı kristal yapının planar, fokal konik ve homeotropik durumları arasında voltaj değerine bağlı olarak gerçekleşen geçiş mekanizmaları.

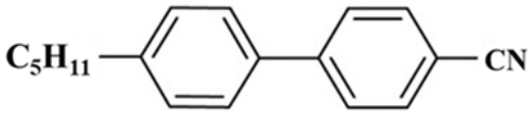
5. DENEYSEL YÖNTEM

Bu çalışmada, nematik sıvı kristal ve farklı konsantrasyonlarda kiral katkı maddesi içeren kolesterik sıvı kristal yapıların üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen kolesterik sıvı kristal yapıların termal, morfolojik, elektro-optik ve dielektrik özellikleri incelenmiş ve yapılan değerlendirmeler sonucunda optimum verimi sağlayan numune belirlenmiştir. Çalışmanın bir sonraki aşamasında, optimum verim elde edilen bu numunenin fiziksel parametrelerinin geliştirilmesi planlanmıştır. Bu amaçla, kolesterik sıvı kristal yapı azo boya ve kuantum nokta molekülleri ile bir araya getirilerek yeni kompozit malzemelerin oluşumu sağlanmıştır. Bu bölümde, numunelerin üretiminde kullanılan malzemeler ve fiziksel parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan ölçüm cihazları ve deneysel düzeneklere ait gerekli bilgilere yer verilmiştir.

5.1. KULLANILAN MALZEMELER

5CB nematik sıvı kristal:

Bilimsel araştırmalarda yaygın bir şekilde kullanılan 5CB kodlu nematik sıvı kristal, Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir. Kapalı formülü $C_{18}H_{19}N$ olan 5CB nematik sıvı kristali, 4-pentyl-4′-cyanobiphenyl olarak adlandırılmaktadır. 5CB nematik sıvı kristaline ait moleküler yapı Şekil 5.1'de verilmiştir.



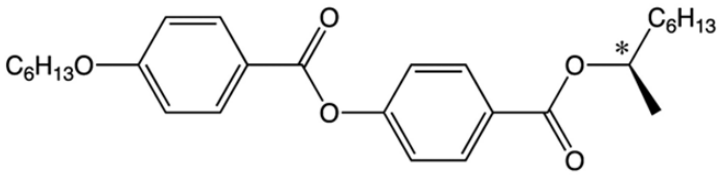
Şekil 5.1. 5CB nematik sıvı kristalinin moleküler yapısı.

5CB nematik sıvı kristalinin, 25 ^{o}C sıcaklık ve λ=633 nm dalga boyunda kırılma indisi değerleri sırasıyla, $n_e = 1{,}705$ ve $n_o = 1{,}540$ olarak verilmektedir. Moleküler ağırlığı 249,350 g/mol olan 5CB nematik sıvı kristali düşük frekans bölgesinde pozitif dilektrik anizotropiye ($\Delta\varepsilon' > 0$) sahiptir. Literatürde, 1 kHz frekans değerinde, 5CB nematik sıvı

kristalinin $\Delta\varepsilon'$ değerinin yaklaşık olarak 10 olduğu görülmektedir. Nematik fazdan izotropik faza geçiş sıcaklığı ise yaklaşık olarak 35 ^{o}C'dir.

S-811 kiral katkı maddesi:

Tez çalışmasında kullanılan S-811 kiral katkı maddesi Daken Chemical firmasından satın alınmıştır. Kapalı formülü $C_{28}H_{38}O_5$ olarak verilen S-811 kiral katkı maddesi S-(+)-2-Octyl 4-(4-hexyloxybenzoyloxy)benzoate olarak adlandırılmaktadır. S-811 kiral katkı maddesinin moleküler yapısı Şekil 5.2'de verilmiştir.

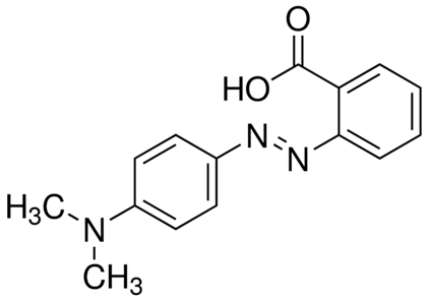


Şekil 5.2. S-811 kiral katkı maddesinin moleküler yapısı.

Moleküler ağırlığı 454,6 g/mol olan S-811 kiral katkı maddesi sola bükümlü (left-handed) özellik göstermektedir.

Metil kırmızısı azo boya:

Metil kırmızısı (Methyl Red=MR) azo boya Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir. $C_{15}H_{15}N_3O_2$ kapalı formülüne sahip olan MR azo boya, 2-(4-dimethylaminophenylazo)benzoic acid olarak ifade edilmektedir. Moleküler ağırlığı 269,299 g/mol ve erime sıcaklığı 179-182 ^{o}C aralığındadır. MR azo boyanın moleküler yapısı Şekil 5.3'te verilmiştir.



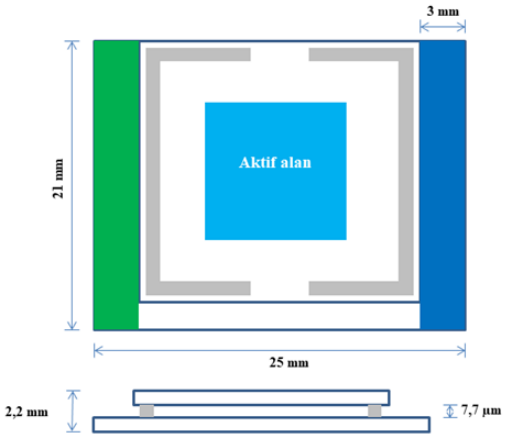
Şekil 5.3. Metil kırmızısı azo boyanın moleküler yapısı.

CdSeS/ZnS kuantum nokta:

CdSeS/ZnS kuantum nokta yapısı Sigma Aldrich firmasından toluen içerisinde çözülmüş olarak satın alınmıştır. Lineer formülü CdS_xSe_{1-x}/ZnS ile verilen kuantum nokta yapısı 525 nm emisyon dalga boyuna ve 6 nm çap uzunluğuna sahiptir. Kırılma indisi 1,496 olarak verilmiştir.

Sıvı kristal hücre:

Tez çalışması kapsamında hazırlanan numunelerin fiziksel parametrelerinin araştırılmasında Instec, Inc. firmasından satın alınan sıvı kristal hücreler kullanılmıştır. Kullanılan sıvı kristal hücrenin temsili gösterimi Şekil 5.4'te verilmiştir. Sıvı kristal hücre yapısı, İndiyum Kalay Oksit (ITO) kaplı cam plakalardan oluşmaktadır ve bu cam plakaların iç yüzeyleri sıvı kristal molekülleri hizalama özelliği gösteren poliimid (PI) tabaka ile kaplanmıştır. Ölçümlerde kullanılan sıvı kristal hücre yapısı planar özellik göstermektedir. Düşeyde 21 mm, yatayda 25 mm ve yükseklikte 2,2 mm uzunluğa sahip bu hücreler; 7,7 µm kalınlıktadır ve 10 mm-10 mm büyüklüğünde bir aktif alana sahiptir. Kullanılan hücrelerin yüzey direnci 100 Ω olarak verilmiştir.



Şekil 5.4. Sıvı kristal hücre yapısı.

5.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Çalışmanın birinci aşamasında, kolesterik sıvı kristal yapılarda, kiral katkı maddesi konsantrasyonundaki değişime bağlı olarak elektro-optik ve dielektrik özelliklerinde meydana gelen değişimin incelenmesi planlanmıştır. Bu amaçla, farklı oranlarda S-811 kiral katkı maddesi 5CB nematik sıvı kristal ile bir araya getirilerek kolesterik sıvı kristal yapıları oluşturulmuştur. Bu yapıların numune kodları A1, A2, A3 ve A4 olarak

belirlenmiştir. Çizelge 5.1'de, kolesterik sıvı kristal yapıları oluşturan malzemelere ait katkı oranlarının ağırlıkça % olarak ifadelerine yer verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kolesterik sıvı kristal yapıların oluşumunda kullanılan 5CB ve S-811 malzemelerinin ağırlıkça % katkı oranları.

Numune Kodu	5CB (%)	S-811 (%)
A1	96	4
A2	92	8
A3	88	12
A4	84	16

Cam vialler içerisinde hazırlanan kolesterik sıvı kristal yapılar 60 ^{o}C'de ultrasonik banyoda 4 saat boyunca karıştırılmıştır. Bu işlemin ardından A1 numunesine MR azo boya ve CdSeS/ZnS kuantum nokta yapıları eklenmiş ve hazırlanan numuneler homojen dağılımın elde edilebilmesi için 4-6 saat boyunca 60 ^{o}C'de ultrasonik banyoda karıştırılmıştır. Bu bölümde hazırlanan numunelere ait ağırlıkça % katkı oranları ve numune kodları Çizelge 5.2'de verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi, azo boya, kuantum nokta ve hem azo boya hem de kuatum nokta yapılarını bir arada içeren üç farklı kolesterik sıvı kristal kompozit yapı oluşturulmuştur.

Çizelge 5.2. Azo boya ve kuantum nokta katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapıların oluşumunda kullanılan malzemelerinin ağırlıkça % katkı oranları.

Numune Kodu	A1 (%)	Azo Boya (%)	Kuantum Nokta (%)
B1	98	2	0
B2	98	0	2
B3	96	2	2

Numune hazırlama işleminin son aşamasında üretimi gerçekleştirilen kompozitler sıvı kristal ölçüm hücrelerine kılcallık yöntemi ile doldurulmuştur. Bu işlem, viskoziteyi azaltmak amacıyla ısı tablası üzerinde gerçekleştirilmiştir.

5.3. ÖLÇÜMLER

Numunelerin faz geçiş sıcaklıklarının belirlenmesinde Şekil 5.5.(a)'da verilen Shimadzu marka DSC 60 model Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazı kullanılmıştır. Tüm numunelerin DSC spektrumları nitrojen gazı varlığında, 20-45 ^{o}C aralığında, 0,5 ^{o}C/dk ısıtma ve soğutma hızında elde edilmiştir.



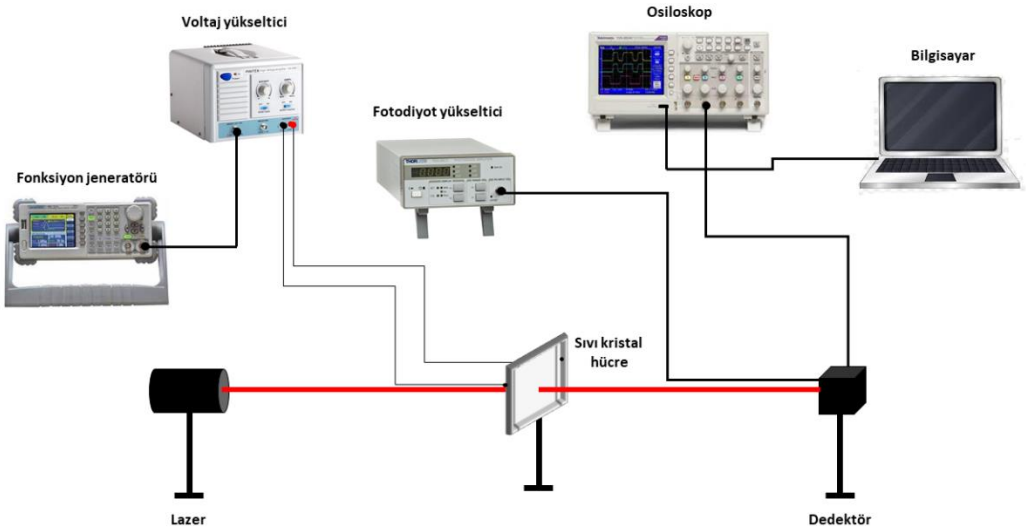
(a) (b)

Şekil 5.5. (a) Numunelerin faz geçiş sıcaklıklarının belirlenmesinde kullanılan DSC cihazı ve (b) Numunelerin morfolojik yapısının belirlenmesinde kullanılan POM cihazı.

Numunelerin morfolojik yapısının belirlenmesinde Şekil 5.5.(b)'de verilen Leica marka DM 2700M model Polarize Mikroskop (POM) cihazı kullanılmıştır. POM cihazının sıcaklık kontrolü, Linkam T95 Peltier ısı tablası kullanılarak sağlanmıştır. Numunelerin frekansa bağlı uygulanan voltaj kontrolü ise AA Tech marka AWG-1020 model fonksiyon jenaratörü ve Pintek marka HA-405 model voltaj yükseltici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kolesterik sıvı kristal kompozit yapıların değişen voltaja bağlı morfolojik yapılarına ait POM görüntüleri oda sıcaklığında elde edilmiştir.

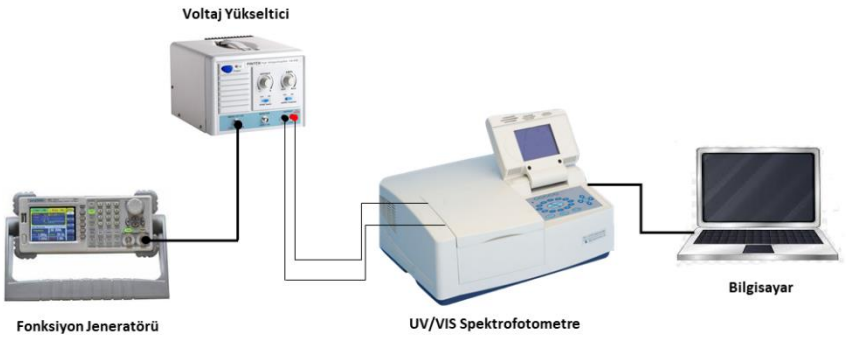
Hazırlanan numunelere ait geçiş voltajı ve tepki süresi parametrelerinin elde edilmesinde Şekil 5.6'da verilen elektro-optik geçirgenlik sistemi kullanılmıştır. Bu ölçüm sistemi, 632,8 nm dalga boyunda ve 7 mW gücünde Helyum-Neon (He-Ne) lazer, Thorlabs marka silisyum (Si) dedektör, AA Tech marka AWG-1020 model fonksiyon jenaratörü, Pintek marka HA-405 model voltaj yükseltici, Thorlabs marka PDA200C model fotodiyot yükseltici ve Tektronix marka TDS-2012C osiloskoptan oluşmaktadır. Numunelerin geçiş voltajı değerleri 1 kHz kare dalga varlığında elde

edilen Geçirgenlik-Voltaj grafikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Tepki süresi parametreleri ise 20 Hz kare dalga varlığında ve değişen voltaj değerlerinde elde edilmiştir.



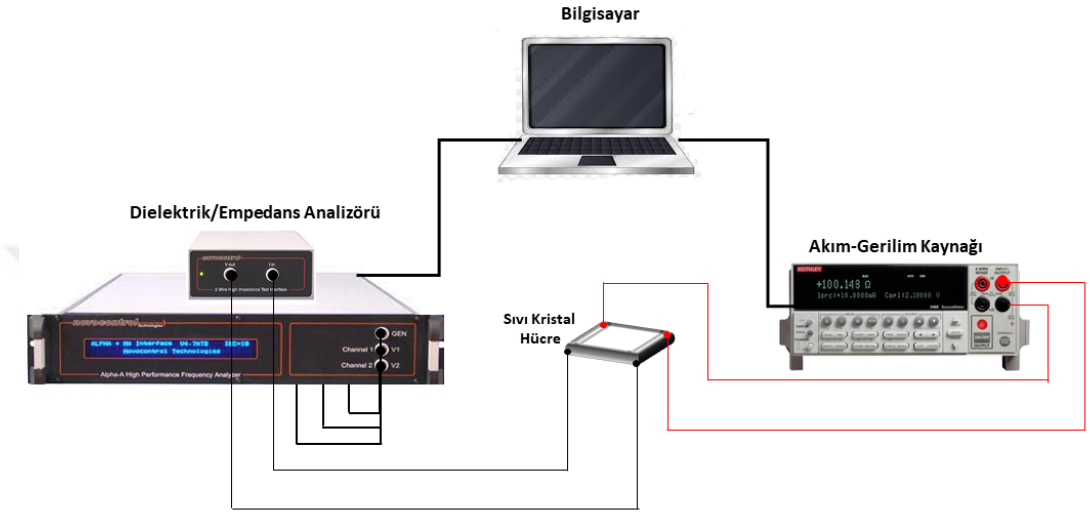
Şekil 5.6. Numunelerin elektro-optik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan elektro-optik geçirgenlik sistemi deney düzeneği.

Numunelerin değişen dalga boyuna bağlı geçirgenlik ve soğurum (absorbans) spektrumlarının belirlenmesinde Şekil 5.7'de verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Bu sistem, PG Instruments marka T70+UV/VIS model spektrofotometre, AA Tech marka AWG-1020 model fonksiyon jenaratörü ve Pintek marka HA-405 model voltaj yükselticiden oluşmaktadır. Kompozit yapıların üretiminde kullanılan MR azo boyanın soğurum spektrumu 300-700 nm dalga boyu aralığında elde edilmiştir. Numunelerin dalga boyuna bağlı geçirgenlik değerleri ise 1 kHz kare dalga varlığında ve 0-35 V gerilim aralığında elde edilmiştir.



Şekil 5.7. Numunelerin dalga boyuna bağlı geçirgenlik ve soğurum spektrumlarının belirlenmesinde kullanılan deney düzeneği.

Üretimi gerçekleştirilen sıvı kristal kompozit yapıların dielektrik özelliklerinin araştırılmasında Şekil 5.8'de verilen Novocontrol Alpha A Dielektrik/Empedans Analizörü kullanılmıştır. Ölçümler, 1 kHz-10 MHz frekans ve 0-40 V gerilim aralığında, 100 mV_{rms} test sinyali ile oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Numunelere ait voltaja bağlı akım verileri ise yine Şekil 5.8'de verilen Keithley marka 2400 model Akım-Gerilim kaynağı kullanılarak 0-40 V gerilim aralığında elde edilmiştir.

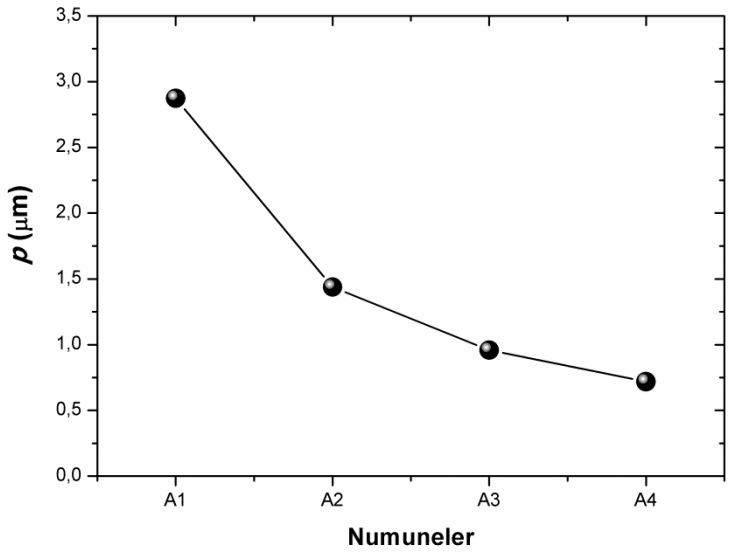


Şekil 5.8. Numunelerin dielektrik özelliklerinin ve akım-gerilim davranışlarının belirlenmesinde kullanılan deney düzeneği.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

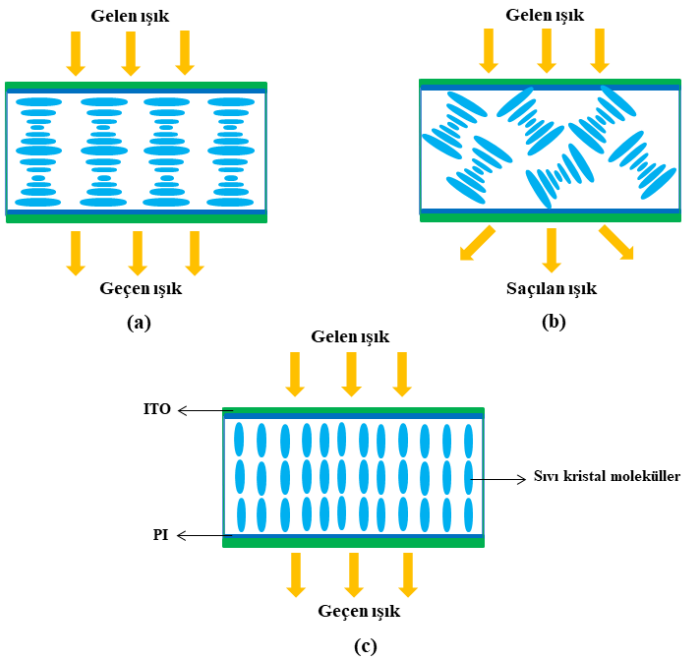
6.1. KOLESTERİK SIVI KRİSTALLERİN MORFOLOJİK, ELEKTRO-OPTİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ

Tez çalışmasının birinci aşamasında, farklı oranlarda S-811 kiral katkı maddesi ve 5CB nematik sıvı kristal bir araya getirilerek dört adet kolesterik sıvı kristal yapı oluşturulmuştur. Bu yapılar; A1, A2, A3 ve A4 kodu ile tanımlanmıştır. Üretimi gerçekleştirilen, farklı oranlarda kiral katkı maddesi içeren kolesterik sıvı kristal yapıların, *p* helis adımı değerleri Denklem (4.2) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamada kullanılan HTP değerleri ise literatürde var olan verilerden alınmıştır [68], [69]. Şekil 6.1'de, numunelerin *p* helis adımı değerlerinin büyüklüğünün değişiminin yer aldığı grafik verilmiştir. Kullanılan denklem göz önüne alındığında, *p* helis adımı değerinin büyüklüğünün numunenin üretiminde kullanılan kiral katkı maddesi konsantrasyonu ile ters orantılı olarak değişim gösterdiği görülmektedir. Buna bağlı olarak, A1 kodlu numunede *p* değerinin büyüklüğü 2,873 μm olarak en yüksek, A4 kodlu numunede ise *p* değerinin büyüklüğü 0,718 μm olarak en düşük değerini almaktadır. Yani, *p* değerinin büyüklüğü, numunede kullanılan kiral katkı maddesi konsantrasyonunun artışı ile azalmaktadır. Yapılan hesaplamalara göre, numunelerde oluşan helis yapısının mikrometre boyutunda olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 6.1. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin *p* helis adımı değerleri değişim grafiği.

Numunelerin planar yönelimli sıvı kristal hücre içerisinde ve görünür ışık bölgesinde uygulanan elektrik alana bağlı değişimlerini gösteren şematik diyagramları Şekil 6.2'de verilmiştir. P durumu, sıvı kristal hücreye voltaj uygulanmadığı durumda elde edilmektedir. Bu durumda, kolesterik sıvı kristallerde oluşumu gerçekleşen helis yapısı sıvı kristal hücre yüzeyinin normaline dik yönelim göstermektedir. P durumunda, üzerine görünür ışık düşürülen sıvı kristal hücre ışığı karşı tarafa geçirecek ve hücre şeffaf bir görünüme sahip olacaktır. Bu çalışmada üretilen kolesterik sıvı kristal yapıların oluşumunda kullanılan kiral katkı maddesi konsantrasyonundan dolayı oluşan Bragg yansımalarının elektromanyetik spektrumun kızılötesi (IR) bölgesinde gerçekleşeceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu yüzden, yansımalar sonucu oluşması beklenen durumlar göz ardı edilmiştir. FK durumu, sıvı kristal hücreye düşük voltaj uygulanması sonucu elde edilmektedir. Bu durumda, P durumunda oluşan helis yapılarının her biri ayrı doğrultuda yönelim gösterecek ve kırılma indisleri arasında farklılık oluşacaktır. Böylece, sıvı kristal hücre üzerine düşürülen görünür ışık saçılmaya uğrayacak ve incelenen numune opak bir görünüme sahip olacaktır. H durumu ise sıvı kristal hücreye yüksek voltaj uygulanması sonucu elde edilmektedir. Bu durumda, kolesterik sıvı kristalin sahip olduğu helis yapısı bozulmakta ve sıvı kristal moleküller elektrik alan yönünde yönelim göstermektedir. H durumunda, üretimi gerçekleştirilen numune şeffaf bir görünüme sahip olacaktır.

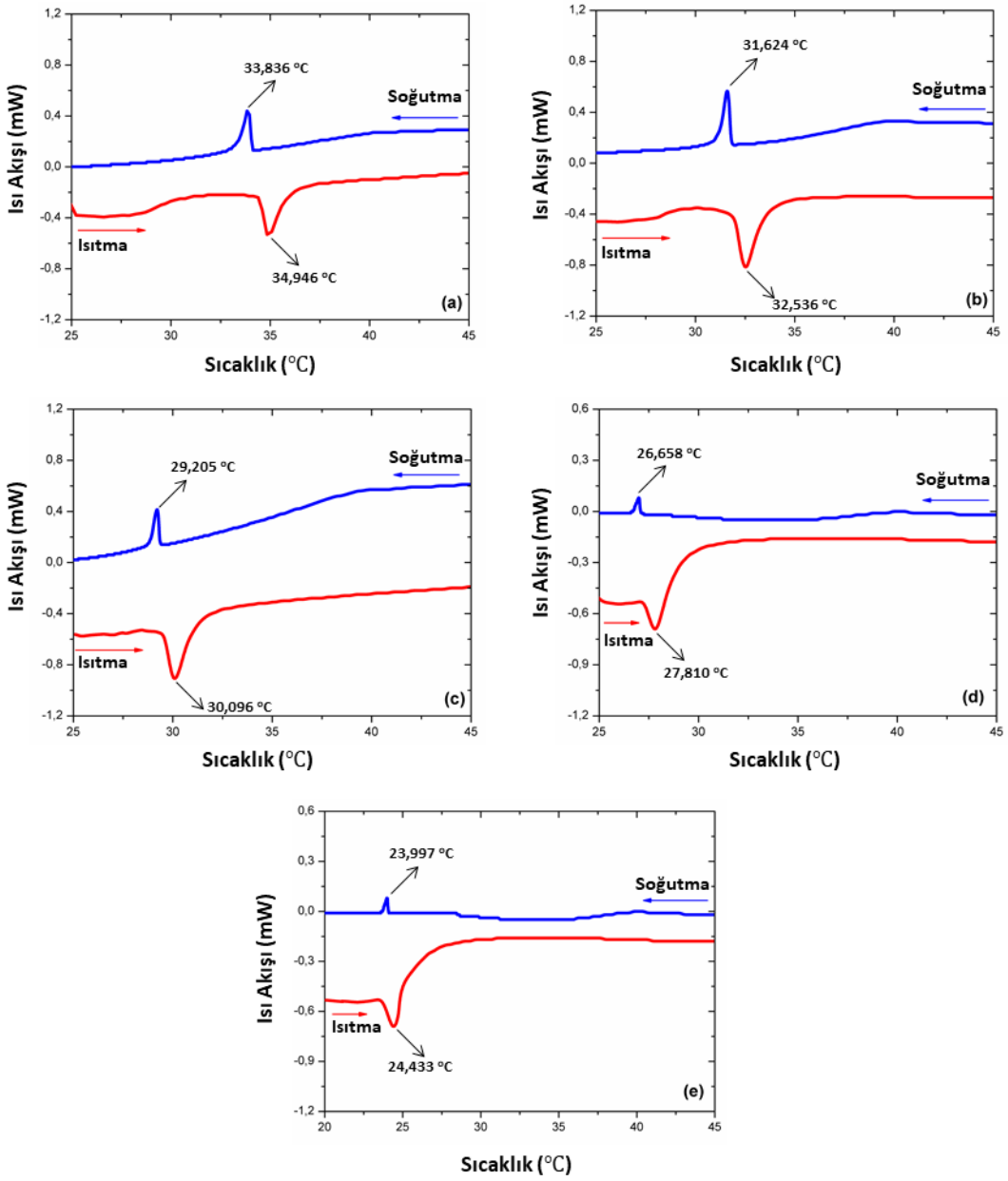


Şekil 6.2. Kolesterik sıvı kristallerin elektrik alan değişimine bağlı oluşan (a) P, (b) FK ve (c) H durumlarına ait şematik diyagramları.

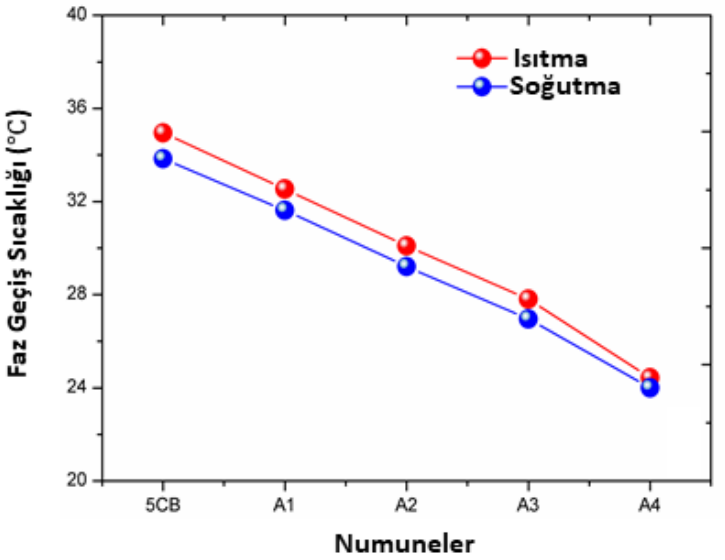
Numunelerin sıcaklığa bağlı ısı akışı grafikleri Şekil 6.3'te verilmiştir. Bu grafikler kullanılarak numunelerin ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen faz geçiş sıcaklığı değerleri belirlenmiştir. Bu değerler, ısı akışı miktarının maksimum olduğu noktaya karşılık gelen sıcaklık değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Şekil 6.3.(a)'da, 5CB nematik sıvı kristaline ait ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen faz geçiş diyagramları verilmiştir. Bilindiği gibi, 5CB nematik sıvı kristalinin nematik fazdan izotropik faza geçiş sıcaklığı yaklaşık olarak 35 ^{o}C'dir [70], [71]. Elde edilen grafik, 5CB nematik sıvı kristalinin ısıtma ve soğutma durumlarında hesaplanan faz geçiş sıcaklığını doğrulamaktadır. Şekil 6.3.(b-e)'de, sırasıyla, A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelere ait ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen Isı Akışı-Sıcaklık diyagramlarına yer verilmiştir. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin faz geçiş sıcaklığı değerlerinin 5CB nematik sıvı kristaline göre daha düşük olduğu görülmektedir. Şekil 6.4'te ise bu çalışmanın birinci aşamasında üretimi gerçekleştirilen numunelere ait ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen faz geçiş sıcaklığı değerleri özet grafiği verilmiştir. Faz geçiş sıcaklığı değerlerinin, S-811 kiral katkı maddesi konsantrasyonundaki artışa göre orantılı bir şekilde düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu sonuç, sıvı kristal yapılara kiral katkı maddesi eklenmesi sonucu oluşan yeni kolesterik sıvı kristal yapıların moleküler ağırlığında meydana gelen artış ile açıklanabilir [72].

Üretimi gerçekleştirilen kolesterik sıvı kristal yapıların morfolojik özelliklerinin literatür ile karşılaştırılması amacıyla POM görüntülerinin incelenmesi gerekmektedir. Çalışmanın ikinci aşamasında, A1 kodlu numune kullanılarak, azo boya ve kuantum nokta katkılı yeni kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarının fiziksel özelliklerinin araştırılması söz konusu olacaktır. Bu amaçla, A1 kodlu numunenin sıcaklığa bağlı değişen morfolojik yapısı POM cihazı kullanılarak incelenmiştir. Şekil 6.5'te, A1 kodlu numuneye ait farklı sıcaklık değerlerinde POM görüntüleri verilmiştir. Numunenin POM görüntüleri, planar yönelime sahip sıvı kristal hücre içerisinde ve soğutma durumunda elde edilmiştir. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için numune ilk olarak 45 ^{o}C'ye kadar ısıtılmış daha sonra düşük sıcaklık aralıkları ile soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Numuneye uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleri deneysel belirsizlikleri önlemek amacıyla üç kere tekrar edilmiştir. Şekil incelendiğinde, numunenin 36 ^{o}C'de izotropik fazda olduğu gözlemlenmektedir. Soğutma işlemi devam ettiğinde, 32,4 ^{o}C'de numunenin faz değiştirdiği ve izotropik fazdan kolesterik faza geçtiği görülmektedir.

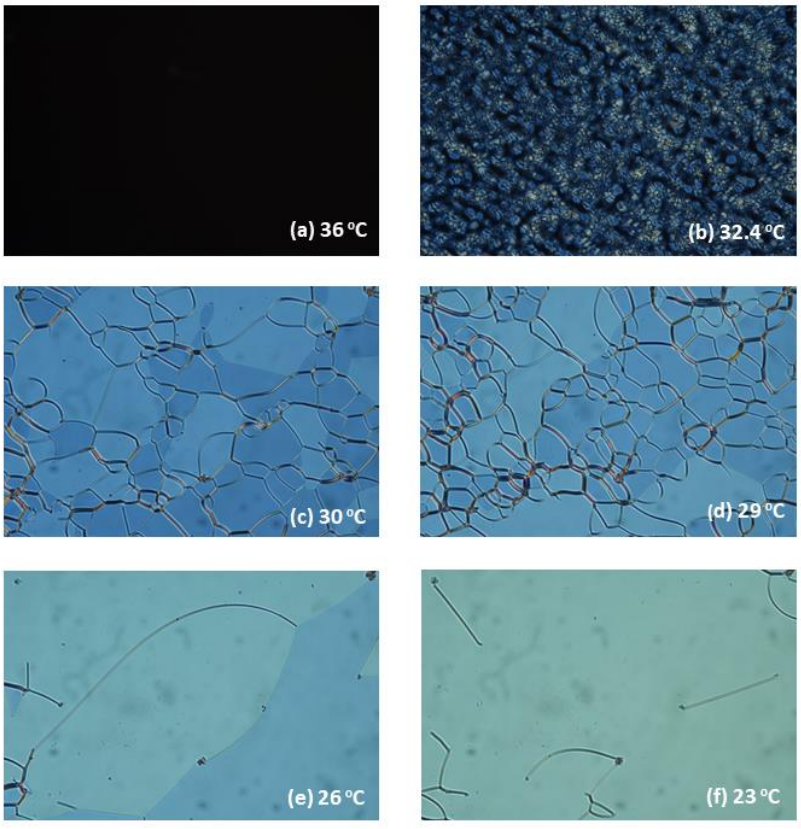
Daha düşük sıcaklık değerlerinde ise (29 ^{o}C ve 30 ^{o}C) kolesterik sıvı kristalde zincir benzeri yapıların oluşumuna rastlanmıştır. Diğer yandan, oda sıcaklığına yakın sıcaklık değerlerine ulaşıldığında (23 ^{o}C ve 26 ^{o}C), kolesterik sıvı kristalde zincir benzeri yapıların kaybolduğu gözlemlenmiştir. Bu değişimin, sıvı kristal hücrenin sahip olduğu hizalama tabakasının varlığı nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca, A1 kodlu numune için POM görüntülerinin incelenmesi sonucu elde edilen faz geçiş sıcaklığı değerinin DSC sonuçlarından elde edilen değer ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 6.3. (a) 5CB nematik sıvı kristallinin, (b) A1, (c) A2, (d) A3 ve (e) A4 kodlu numunelerin ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen Isı Akışı-Sıcaklık grafikleri.



Şekil 6.4. 5CB nematik sıvı kristali ile A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen faz geçiş sıcaklığı değerleri karşılaştırma grafiği.



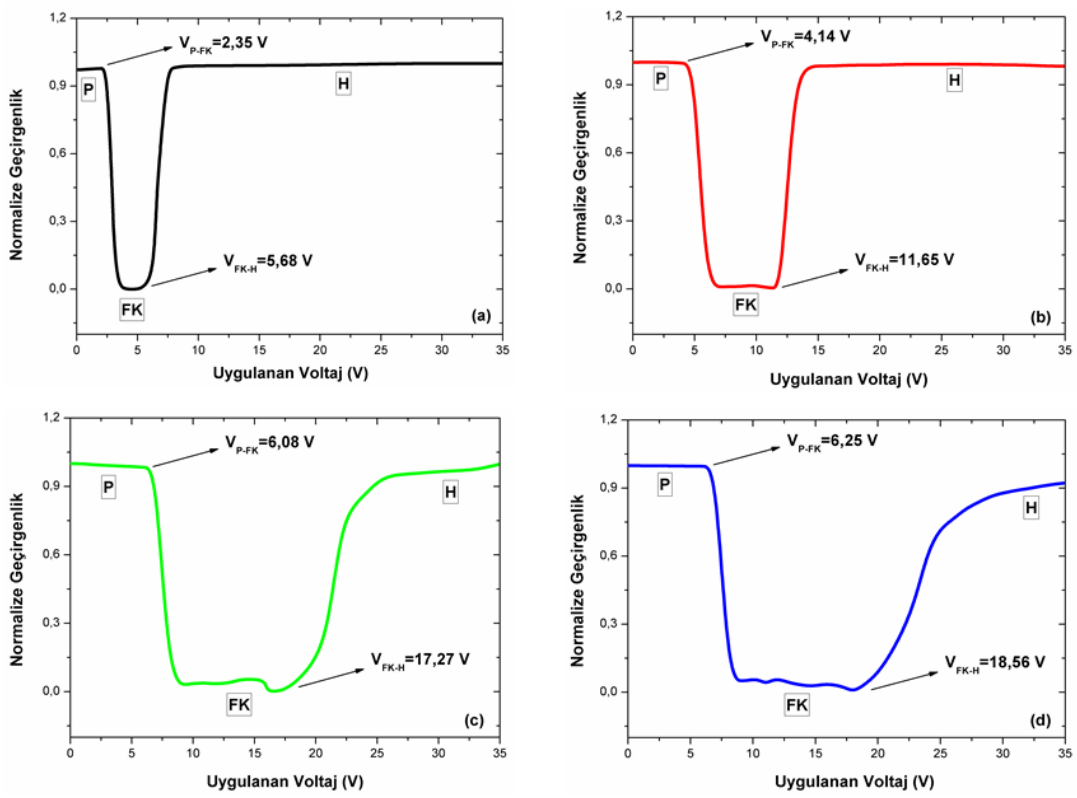
Şekil 6.5. A1 kodlu numuneye ait soğutma durumunda elde edilen POM görüntüleri.

Kolesterik sıvı kristal yapıların elektro-optik performans analizi, Şekil 5.6'da verilen elektro-optik geçirgenlik sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 6.6'da, A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelere ait voltaja bağlı değişen geçirgenlik grafikleri verilmiştir. Bu

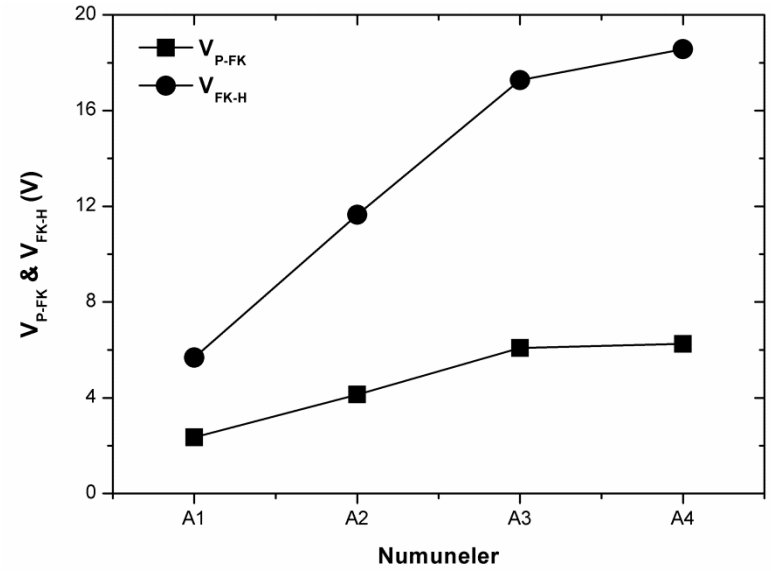
grafikler yardımıyla örneklerin P durumundan FK durumuna ($V_{P\text{-}FK}$) ve FK durumundan H durumuna ($V_{FK\text{-}H}$) geçiş voltajı değerleri hesaplanmış ve Şekil 6.6'da yer alan grafikler içerisinde bu değerler belirtilmiştir. Ayrıca, Şekil 6.7'de, numunelerin geçiş voltajı değerlerine ait bir karşılaştırma grafiğine yer verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, hem $V_{P\text{-}FK}$ hem de $V_{FK\text{-}H}$ değerlerinin numunede kullanılan kiral katkı maddesi konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu sonucun sebepleri aşağıda açıklanmıştır:

(i) Artan kiral katkı maddesi konsantrasyonu ile numunenin sahip olduğu yük miktarının artması sonucu, ortamdaki artan safsızlık iyonlarına bağlı olarak perdeleme etkisinin güçlenmesi beklenmektedir. Bu etkinin hem $V_{P\text{-}FK}$ ve hem de $V_{FK\text{-}H}$ değerlerinde artışa sebep olduğu düşünülmektedir [73].

(ii) Kolesterik sıvı kristal yapının oluşumunda kullanılan kiral katkı maddesi konsantrasyonunun artması ile birlikte numunedeki yük yoğunluğunun artması sonucu bir enerji bariyerinin oluşumu gerçekleşecektir. Bu oluşumun da $V_{P\text{-}FK}$ ve $V_{FK\text{-}H}$ değerlerinde artışa sebep olabileceği yorumu yapılabilmektedir [74], [75].

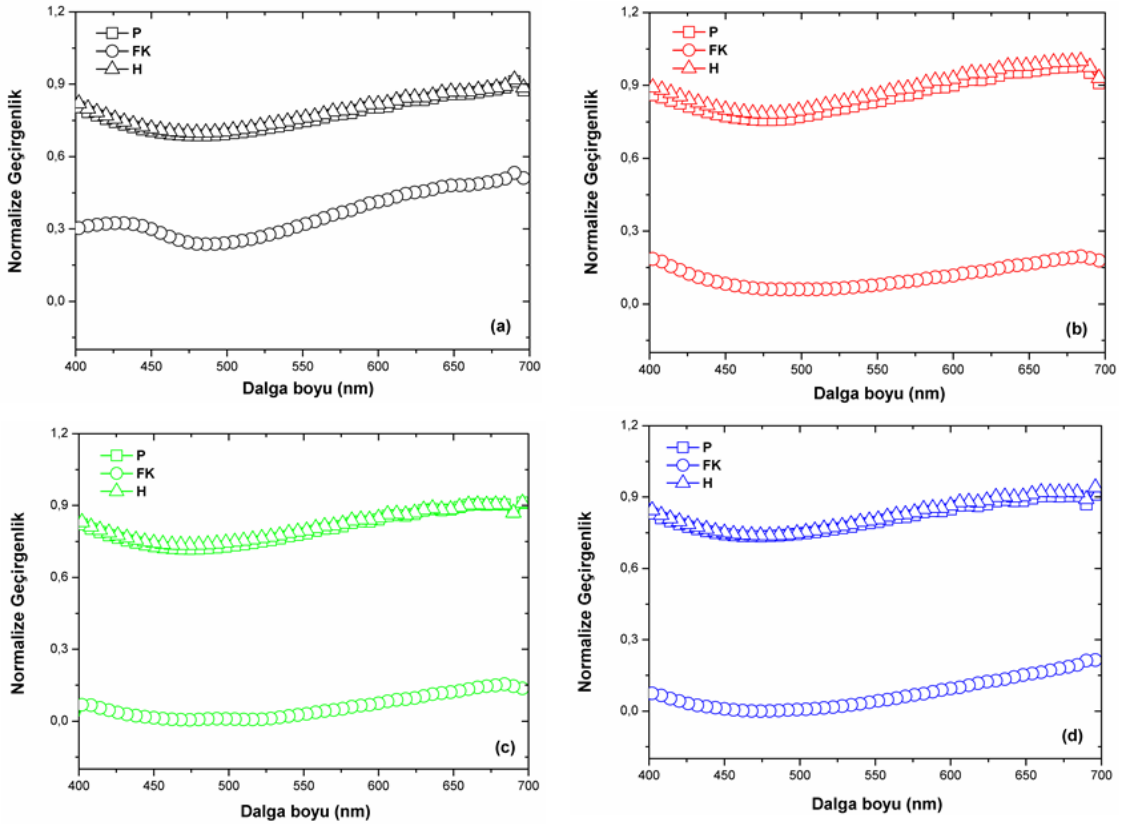


Şekil 6.6. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin Normalize Geçirgenlik-Voltaj değişim grafikleri.



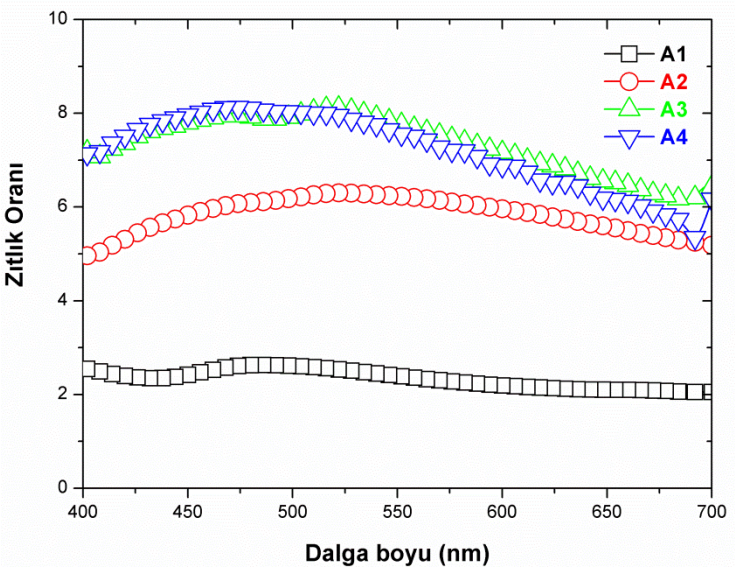
Şekil 6.7. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin geçiş voltajı değerleri karşılaştırma grafiği.

Numunelerin dalga boyuna bağlı geçirgenlik değerleri değişim grafikleri Şekil 6.8'de verilmiştir. Tüm yapılarda en düşük geçirgenlik değerinin FK durumunda, en yüksek geçirgenlik değerinin ise H durumunda elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, P durumu ve H durumunda elde edilen geçirgenlik değerlerinin birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmektedir. Bu davranışın temel sebebi, P durumunda sıvı kristal molleküllerinin kullanılan sıvı kristal hücrede düzenli yönelime sahip olması, H durumunda ise artan voltaj değeri ile birlikte moleküllerin elektrik alan ile aynı yönde yönelim göstermesidir. Böylece, oluşturulan kolesterik sıvı kirstaller, P ve H durumlarında şeffaf özellik göstermektedir. Diğer yandan, FK durumunda artan kiral katkı maddesi konsantrasyonunun artışına bağlı olarak geçirgenlik değerinin azaldığı görülmektedir. FK durumunda, kolesterik sıvı kirstallerin geçirgenlik değerlerindeki değişim, *p* helis adımı değerine bağlıdır. Daha önce bahsettiğimiz gibi, kolesterik sıvı kirstallerin *p* değeri kullanılan kiral katkı maddesi konsantrasyonu ile ters orantılı bir şekilde değişim göstermektedir. Buna bağlı olarak, kiral katkı maddesi konsantrasyonu arttıkça *p* değeri azalacaktır. *p* değerinin azalmasına bağlı olarak sıvı kristal hücre içerisinde oluşacak helis yapısı güçlenecektir. Böylece kolesterik sıvı kristal yapıda oluşacak saçılmalar artacak ve bu da FK durumunda gerçirgenlik değerinin azalmasına sebep olacaktır [76].



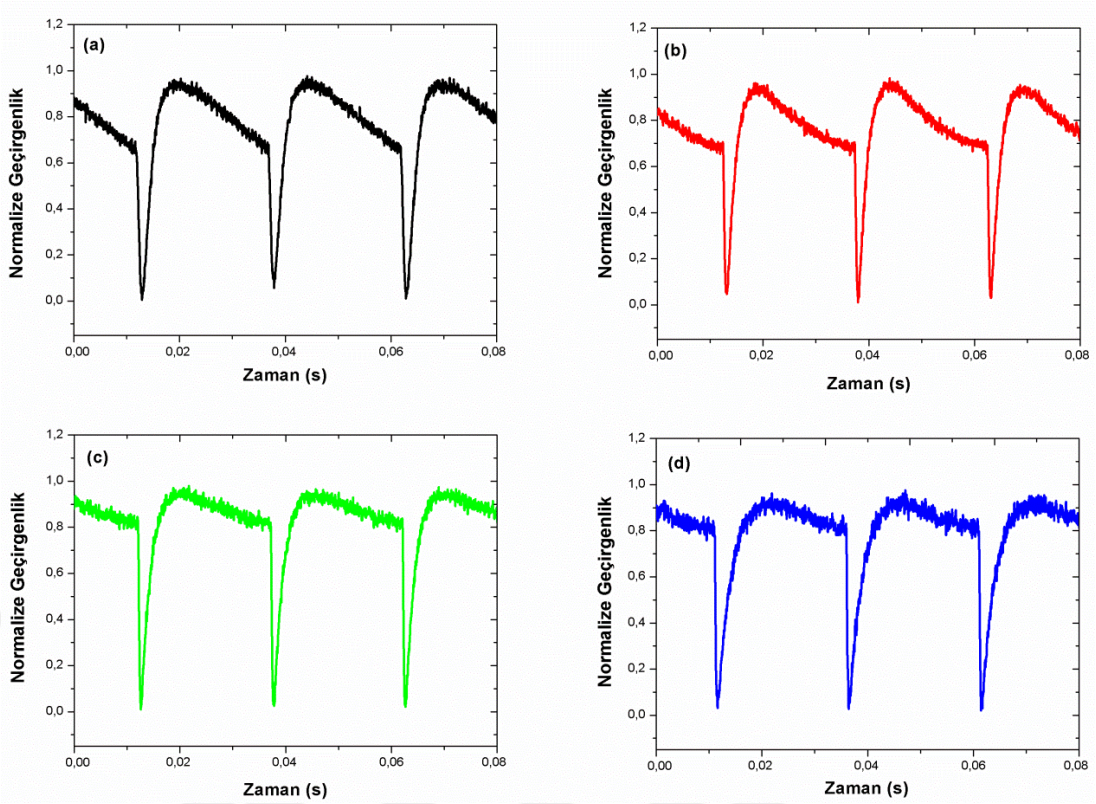
Şekil 6.8. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin Normalize Geçirgenlik-Dalga boyu değişim grafikleri.

A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin dalga boyuna bağlı zıtlık oranı değişim grafiği Şekil 6.9'da verilmiştir. Düşük dalga boyu değerlerinde zıtlık oranının kiral katkı maddesi konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak arttığı görülmektedir. Aynı zamanda, A3 ve A4 kodlu numunelerin zıtlık oranı parametrelerinin değerinin neredeyse aynı değişimi gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu davranışın temel sebebi, kiral katkı maddesi konsantrasyonunun artması ile *p* değerinin azalmasıdır. Bu azalma, geçirgenlik değerinde bir azalmaya sebep olacağından dolayı numunelerin zıtlık oranı parametresi, artan kiral katkı maddesi oranına bağlı olarak artış göstermektedir [28].

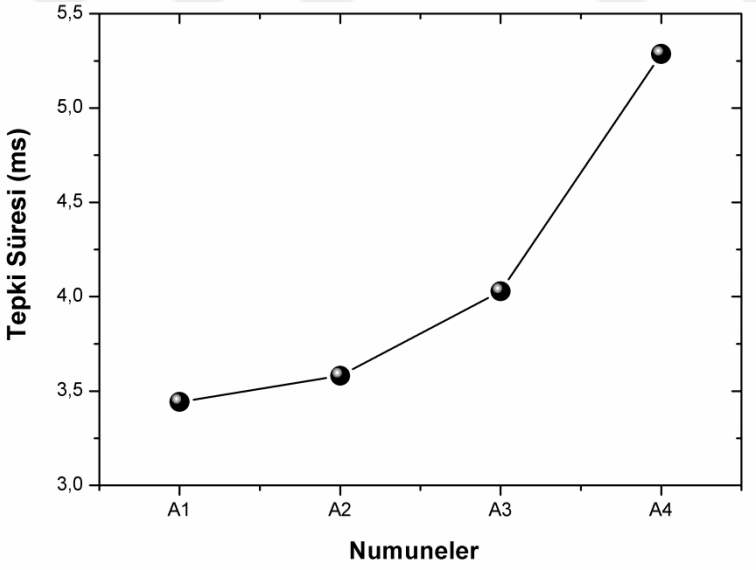


Şekil 6.9. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin Zıtlık Oranı-Dalga boyu değişim grafiği.

Numunelerin tepki süresi parametreleri, 20 Hz kare dalga ve değişen AC gerilimi varlığında elektro-optik geçirgenlik sistemi kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 6.10'da, numunelerin tepki süresi parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan Normalize Geçirgenlik-Zaman grafiklerine yer verilmiştir. Grafiklerde verilen geçirgenlik değerinin %10'dan %90'a ulaştığı zaman aralığı değeri yükselme süresi (τ_y), %90'dan %10'a ulaştığı zaman aralığı değeri ise düşme süresi (τ_d) olarak belirlenmiştir. Yükselme ve düşme sürelerinin toplamı ile numunelerin tepki süresi (τ_t) parametreleri hesaplanmıştır. Şekil 6.11'de, A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelere ait tepki süresi parametrelerinin değişim grafiğine yer verilmiştir. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin tepki süresi parametresine ait değerler sırasıyla, 3,443 ms, 3,581 ms, 4,029 ms ve 5,286 ms olarak hesaplanmıştır. Değerler incelendiğinde, kiral katkı maddesi konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak tepki süresinin arttığı görülmektedir. Bu sonucun, numunelerde artan kiral katkı maddesi konsantrasyonunun, ortamın viskozitesinde artışa sebep olması ile ilgili olduğu düşünülmektedir [75].



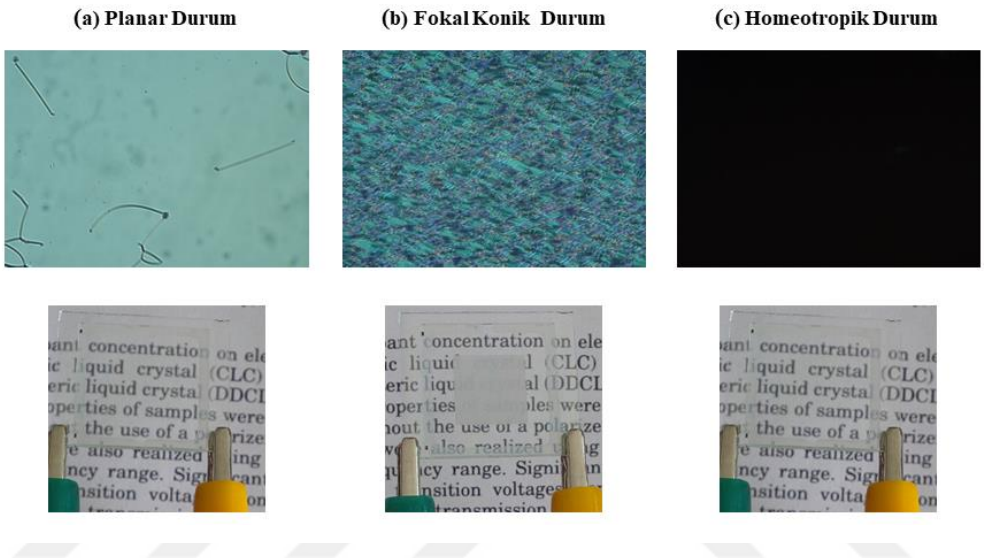
Şekil 6.10. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin Normalize Geçirgenlik-Zaman değişim grafikleri.



Şekil 6.11. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin tepki süresi parametreleri değişim grafiği.

Şekil 6.12'de, A1 kodlu numunenin P, FK ve H durumlarında POM görüntüleri ve fotoğrafları verilmiştir. POM görüntüleri, 1 kHz kare dalga varlığında, değişen AC

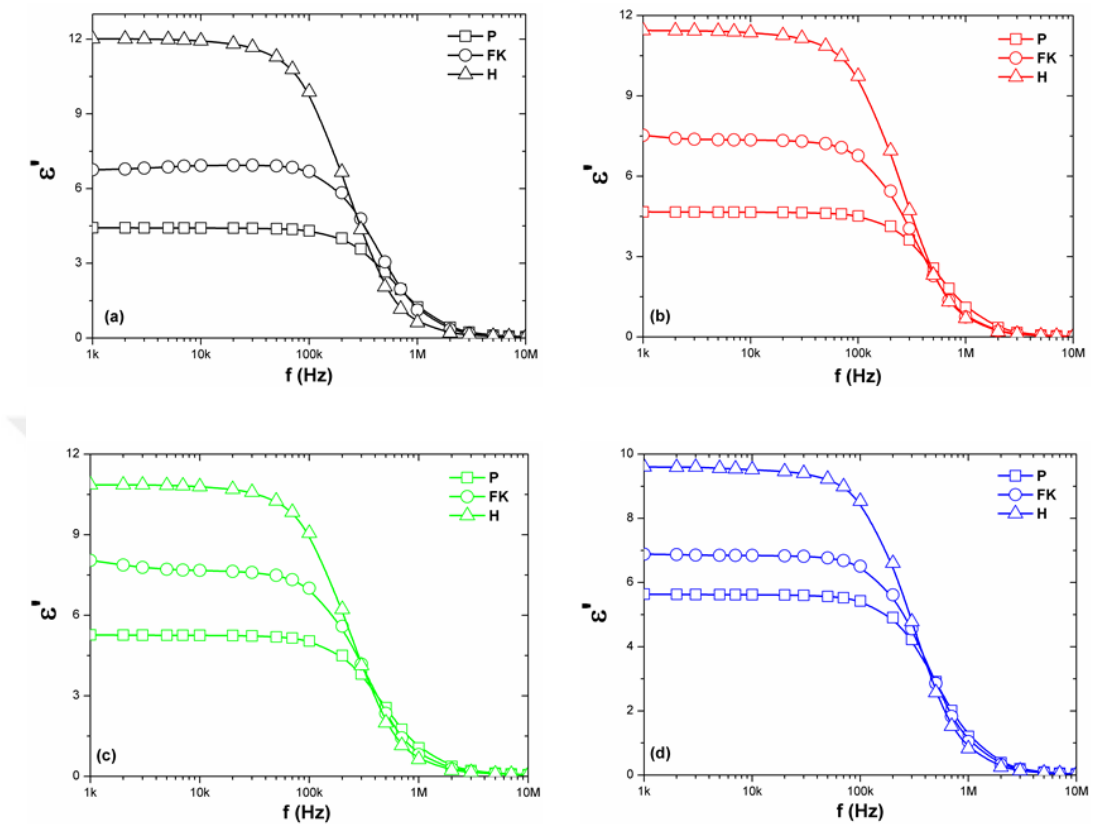
gerilimi altında ve oda sıcaklığında elde edilmiştir. P durumunda, sıvı kristal hücreye uygulanan voltaj değeri sıfırdır. Bu durumda, sıvı kristal hücrenin şeffaf bir görünüme sahip olduğu görülmektedir. FK durumunda, sıvı kristal hücreye 5 V gerilimi uygulanmıştır. Bu durumda, sıvı kristal hücre yüzeyine düşürülen görünür ışık saçılmaya uğradığından dolayı opak bir görünüm elde edilmiştir. H durumunda ise sıvı kristal hücreye 10 V gerilimi uygulanmıştır ve numunenin şeffaf özellik gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.12. A1 kodlu numuneye ait (a) P, (b) FK ve (c) H durumlarında elde edilen POM görüntüleri ve fotoğraflar.

A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin dielektrik relaksasyon davranışları 1 kHz-10 MHz frekans aralığında dielektrik spektroskopi yöntemiyle incelenmiştir. Bu yöntem, kompozit malzemelerin elektrik alan varlığında moleküler etkileşimlerine bağlı olarak oluşan polarizasyon mekanizmaları hakkında detaylı bilgi vermektedir. Şekil 6.13'te numunelerin frekansa bağlı ε′ değişim grafikleri verilmiştir. P durumunda, sıvı kristal molekülleri sıvı kristal hücrenin yüzeyine paralel yönelim göstermektedir. Diğer yandan, sıvı kristal hücrenin elektrotlarına voltaj uygulanması sonucu, sıvı kristal molekülleri oluşan elektrik alan boyunca yönelim göstermeye başlayacaktır. H durumunda, sıvı kristal molekülleri elektrik alan ile paralel yönelim gösterecektir. Şekil 6.13'te görüldüğü gibi, tüm örneklerin ε′ değeri P durumunda en düşük, H durumunda ise en yüksek değere sahiptir. Bu davranışın temel sebebi, artan voltaj ile sıvı kristal moleküllerinin oluşan elektrik alan ile aynı yönde yönelim göstermesi ve böylece kompozit malzemelerde oluşan net dipol momentinin değerinin artmasıdır. Yüksek

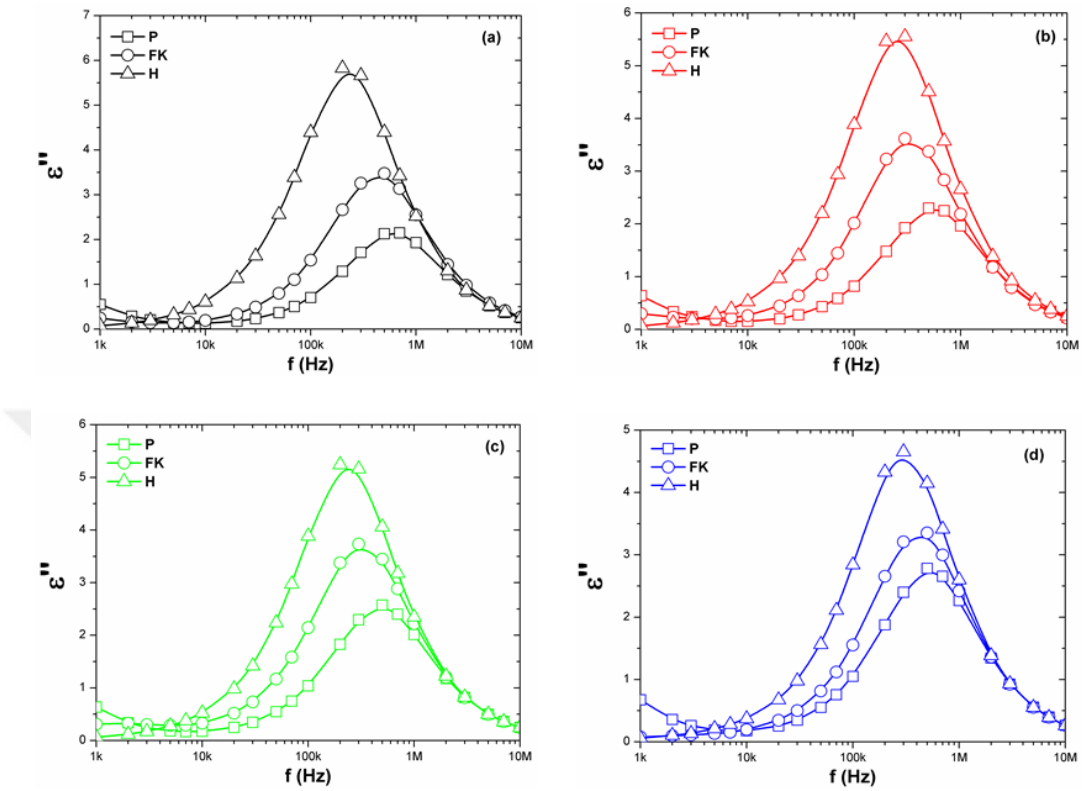
frekans değerlerinde ise tüm örneklerin P, FK ve H durumlarında ε′ değerlerinin hızla azaldığı görülmektedir. Yüksek frekans bölgesinde sıvı kristal moleküllerin oluşan elektrik alanı takip edememesinin bu davranışı oluşturduğu düşünülmektedir [74].



Şekil 6.13. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin ε′-f değişim grafikleri.

Malzemelerin dielektrik relaksasyon mekanizmaları, geniş frekans aralıklarında moleküler dinamikleri hakkında bilgi vermektedir [77], [78]. Çalışma kapsamında üretilen numunelerin frekansa bağlı ε″ değişim grafikleri Şekil 6.14'te verilmiştir. Tüm örneklerde ε″ değerinin P durumundan H durumuna geçiş yapıldığında arttığı görülmektedir. Bu davranışın, artan voltaj değeri ile birlikte moleküler yönelimin daha düzenli bir duruma gelmesi ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, ε″-f grafiğinin tepe noktası değerine karşılık gelen frekans, relaksasyon frekansı (f_R) olarak tanımlanmaktadır. Şekil incelendiğinde, tüm numunelerde, P, FK ve H durumlarında tek bir relaksasyon davranışı oluştuğu görülmektedir. Numunelerin f_R değerleri Çizelge 6.1'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, f_R değerinin artan voltaj değeri ile azaldığı görülmüştür. Yani artan voltaj değeri ile numuneler daha düşük frekans bölgelerinde relaksasyon davranışı göstermektedir. Ayrıca, artan kiral katkı maddesi konsantrasyonuna bağlı olarak da, P, FK ve H durumlarında, f_R değerlerinin azaldığı

görülmektedir. Ancak bu eğilim sadece A4 kodlu numunede bozulmuştur. Bu davranışın, artan kiral katkı maddesi miktarının numunede agregasyona sebep olması sonucu oluştuğu düşünülmektedir.



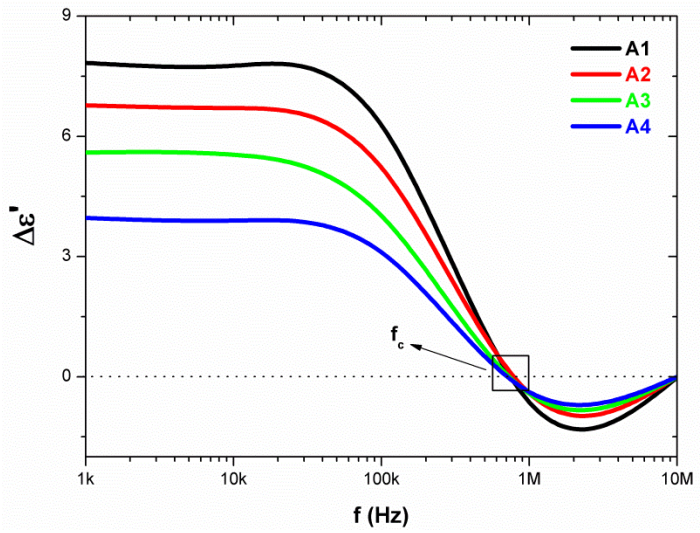
Şekil 6.14. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin ε″-f değişim grafikleri.

Çizelge 6.1. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin relaksasyon frekansı (f_R) değerleri.

Numune Kodu	Planar Durum	Fokal Konik Durum	Homeotropik Durum
A1	709 kHz	452 kHz	273 kHz
A2	588 kHz	332 kHz	258 kHz
A3	511 kHz	324 kHz	243 kHz
A4	551 kHz	437 kHz	294 kHz

Kompleks dielektrik sabitinin reel kısmı kullanılarak numunelere ait Δε′ parametresi hesaplanmıştır. Bu parametre, kompozit malzemelerin elektrik alan varlığında gösterdikleri moleküler yönelim mekanizmaları hakkında bilgi vermektedir. Şekil 6.15'te, A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin frekansa bağlı değişen Δε′ değerleri verilmiştir. Δε′ değerinin kiral katkı maddesi konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Bu azalışın temel sebebi, numunede artan kiral katkı maddesi

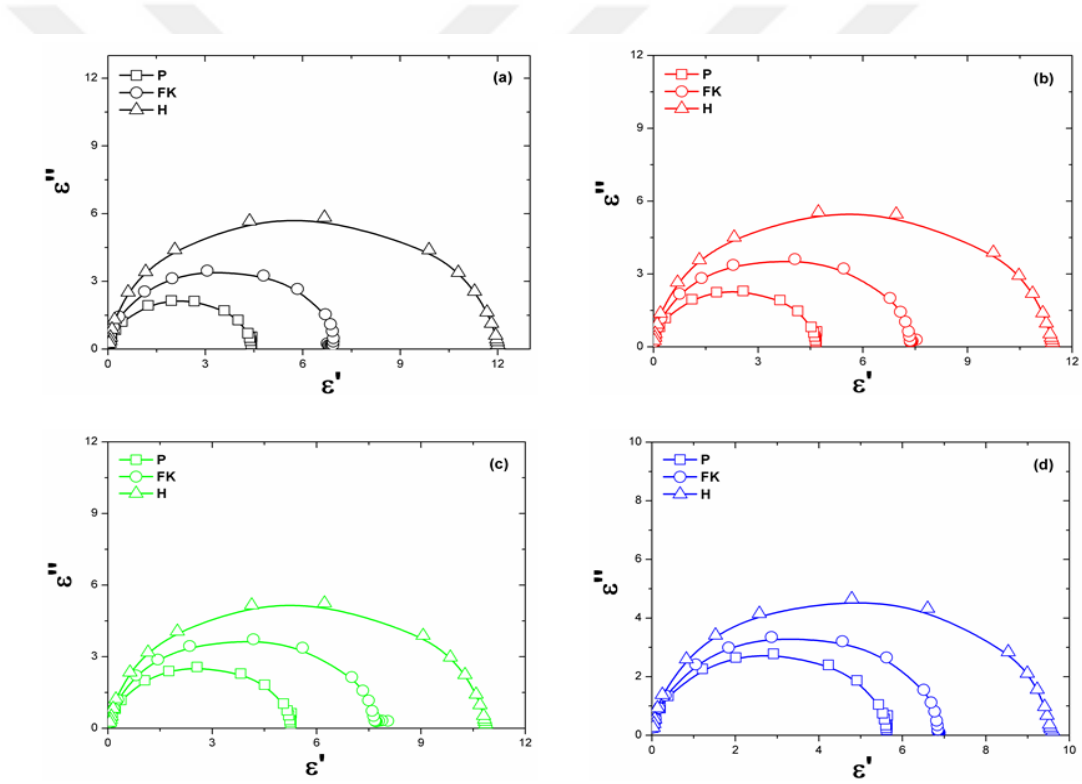
konsantrasyonu ile moleküler düzenin bozulmasıdır. Bununla birlikte, tüm numunelerin düşük frekans bölgesinde yüksek Δε′ değerine sahip olduğu görülmektedir. Ancak bu değer artan frekans ile birlikte hızlı bir şekilde azalmakta ve belli bir frekans değerinden sonra negatif değer almaktadır. Bu frekans değeri, geçiş frekansı (f_c) olarak tanımlanmaktadır [77]. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin f_c değerleri sırasıyla 743 kHz, 741 kHz, 728 kHz ve 706 kHz olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, f_c değerinin artan kiral katkı maddesi konsantrasyonu ile azaldığını göstermektedir. Bu davranışın temel sebebi, kolesterik sıvı kristal yapılarda meydana gelen moleküler etkileşim mekanizmaları ile açıklanabilir. Sıvı kristal yapıya farklı konsantrasyonlarda kiral katkı maddesi eklendiğinde, sıvı kristaller arasında oluşan moleküler etkileşimler nedeniyle numunelerin helis yapısında bazı değişimlerin meydana geldiği düşünülmektedir. Bu değişimler, numunelerin dipol momentlerinde bazı değişimlere sebep olacaktır. Böylece, numunelerde faz yapısı değişim gösterecektir. Yapılan değerlendirmeler sonucu, artan kiral katkı maddesi konsantrasyonunun kompozit yapıların pozitif dielektrik anizotropiden negatif dielektrik anizotropiye geçişini hızlandırdığı yorumu yapılabilmektedir.



Şekil 6.15. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin Δε′-f değişim grafiği.

Numunelerin ε′ ve ε″ parametreleri kullanılarak Cole-Cole grafikleri elde edilebilmektedir. Cole-Cole grafikleri, analizi gerçekleştirilen malzemelerin relaksasyon davranışları hakkında bilgi vermesi bakımından son derece önemli görülmektedir. Şekil 6.16'da, A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelere ait Cole-Cole grafikleri verilmiştir. Bu grafikler kullanılarak, numunelerin relaksasyon zamanı (τ_R) parametresi elde edilmiş ve

Çizelge 6.2'de verilmiştir. Çizelgede verilen değerler incelendiğinde, τ_R değerinin artan kiral katkı maddesi oranı ile A1 numunesinden A3 numunesine kadar orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir. Ancak, bu artış eğilimi A4 kodlu numunede bozulmaktadır. Bu davranış, artan kiral katkı maddesi konsantrasyonunun kompozit yapıda agregasyonlara neden olması ve bunun sonucunda moleküler düzende bozulmalar meydana gelmesi ile açıklanabilir. Aynı zamanda, τ_R parametresinin değerinin artan voltaj ile de arttığı görülmektedir. Tüm numunelerde H durumunda moleküler düzenin sağlanmasına bağlı olarak τ_R parametresi en yüksek değerini almıştır. Ayrıca, numunelere ait Cole-Cole grafiklerinin incelenen frekans aralığında ve uygulanan voltaj değerlerinde yarım daireyi tamamlandığı gözlemlenmiş ve neredeyse Debye tipi davranış gösterdiği görülmüştür [79], [80].



Şekil 6.16. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin Cole-Cole grafikleri.

Çizelge 6.2. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin relaksasyon zamanı (τ_R) değerleri.

Numune Kodu	Planar Durum	Fokal Konik Durum	Homeotropik Durum
A1	0,224 µs	0,352 µs	0,583 µs
A2	0,271 µs	0,479 µs	0,617 µs
A3	0,311 µs	0,491 µs	0,655 µs
A4	0,289 µs	0,364 µs	0,541 µs

Cole-Cole grafikleri kullanılarak numunelere ait dielektrik dayanım parametreleri (δε′) de belirlenmiş ve Çizelge 6.3'te verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, P durumunda, artan kiral katkı maddesi konsantrasyonu ile δε′ parametresinin değerinin arttığı görülmektedir. Bu sonuç ile birlikte, artan voltaj ile P durumundan H durumuna geçişte δε′ parametresinin değeri artmıştır. Elde edilen sonuçlar, kiral katkı maddesi konsantrasyonu değişiminin, numunelerin relaksasyon parametrelerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

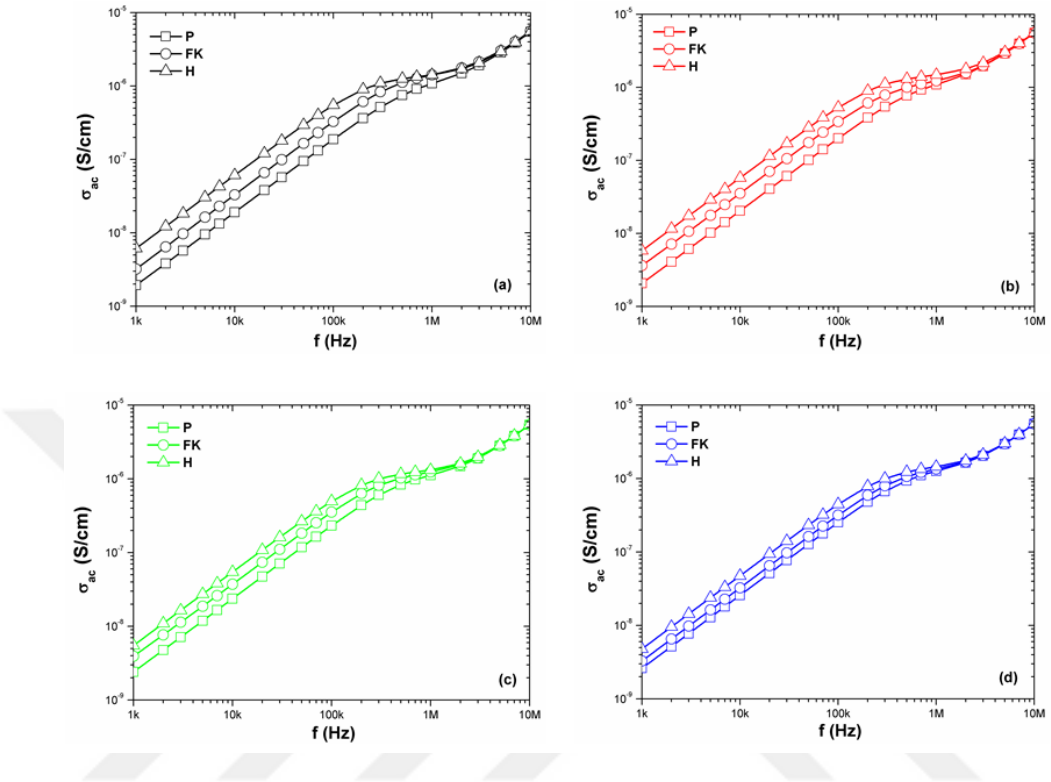
Çizelge 6.3. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin dielektrik dayanım (δε′) değerleri.

Numune Kodu	Planar Durum	Fokal Konik Durum	Homeotropik Durum
A1	4,379	6,725	11,974
A2	4,649	7,511	11,427
A3	5,210	7,990	10,812
A4	5,605	6,854	9,574

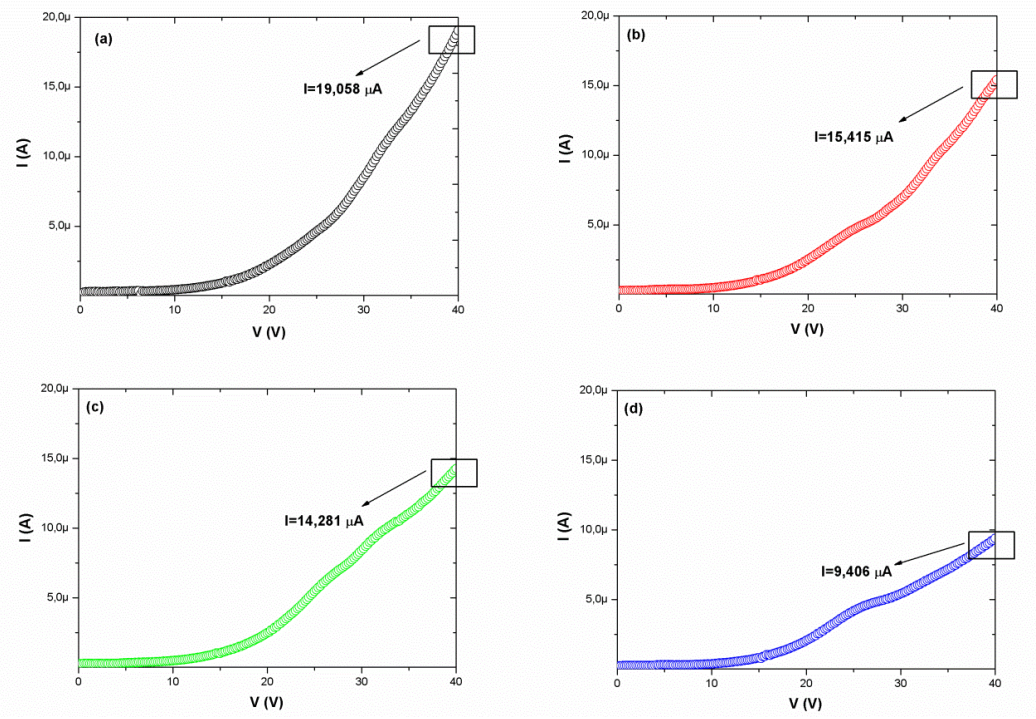
Numunelerin AC iletkenlik (σ_{ac}) değerlerinin frekansa bağlı değişim grafikleri Şekil 6.17'de verilmiştir. Artan voltaja bağlı olarak, düşük frekans bölgesinde, A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin σ_{ac} değerlerinin çok az değişim gösterdiği görülmektedir. Bu değişimin, kolesterik sıvı kristal yapılarda var olan iyonik yük taşıyıcılarının aktif atlama yoluyla rastgele difüzyonu nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir [81]. Ayrıca, tüm numunelerin, P, FK ve H durumlarında, 1 kHz-1 MHz frekans aralığında σ_{ac} değerlerinin artan frekans ile arttığı, 1 MHz'den sonra ise neredeyse birbirine eşit olduğu görülmektedir. Değişen kiral katkı maddesi konsantrasyonuna bağlı olarak σ_{ac} değerinin değişimi incelendiğinde ise elde edilen değerlerin birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonuç, kompozit yapıda yer alan kiral katkı maddesi konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak ortamdaki serbest iyonik yüklerin sayısının azalması ile açıklanabilir.

Şekil 6.18'de, numunelere ait I-V değişim grafikleri verilmiştir. Tüm numunelerde artan voltaja bağlı olarak akım değerinin arttığı görülmektedir. Bu artış, uygulanan voltaj ile numunelerdeki safsızlık iyonlarının ve serbest yük taşıyıcılarının daha yüksek yoğunluğa ulaşması ile açıklanabilir. Ayrıca, 40 V gerilim değerinde, A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin elde edilen akım değerleri grafik içerisinde belirtilmiştir. Değerler incelendiğinde, numunelerde artan kiral katkı maddesi konsantrasyonunun artışına bağlı

olarak akım değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonucun artan kiral katkı maddesi nedeniyle ortamdaki yük taşıyıcılarının artan rekombinasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir [82].



Şekil 6.17. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin σ_{ac}-f değişim grafikleri.



Şekil 6.18. (a) A1, (b) A2, (c) A3 ve (d) A4 kodlu numunelerin I-V değişim grafikleri.

Tez çalışmasının birinci aşamasında üretimi gerçekleştirilen, A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin morfolojik, termal, elektro-optik ve dielektrik özellikleri incelendiğinde, optimum verimi sağlayan numunenin A1 kodlu numune olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu kapsamda yapılan değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir:

(i) Geçiş voltajı değerlerinin A1 kodlu numunede en düşük değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Geçiş voltajı değerlerinin düşük olması, A1 kodlu numunenin elektro-optik cihaz uygulamalarında düşük güç tüketimi ile çalışabilecek cihaz olarak kullanılabilmesine olanak sağlayacaktır.

(ii) Tepki süresi parametresinin en düşük değere sahip olduğu numunenin yine A1 kodlu numune olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuç, A1 kodlu numunenin elektro-optik cihaz uygulamalarında kullanılması durumunda hızlı tepki verecek olması bakımından son derece önemlidir.

(iii) Relaksasyon frekansının en yüksek değere sahip olduğu numune A1 kodlu numunedir. Bu sonuç, A1 kodlu numunenin yüksek frekans bölgelerinde çalışabilecek yeni elektro-optik cihaz uygulamalarında kullanılabilmesine olanak sağlayacak olması açısından oldukça önemlidir.

(iv) Dielektrik anizotropi parametresinin düşük frekans bölgesinde maksimum değere sahip olduğu numune A1 kodlu numunedir. Bu sonuca göre, moleküler düzenin en iyi sağlandığı numunenin A1 kodlu numune olduğu yorumu yapılabilmektedir.

(v) Relaksasyon zamanı parametresinin değerinin A1 kodlu numunede en düşük değere sahip olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, numuneye uygulanan elektrik alan etkisi ortadan kaldırıldığında, eski durumuna dönebilmesi için gerekli süre minimum değere sahip olacaktır.

(vi) Voltaja bağlı akım değerleri incelendiğinde, 40 V gerilim değerinde en yüksek akım değeri A1 kodlu numunede elde edilmiştir.

(vii) A1 kodlu numunenin farklı voltaj değerlerinde, P, FK ve H durumlarında bulunma özelliği, akıllı pencere sistemi uygulamalarında ışık açıp/kapatıcı cihaz olarak kullanılabilecek olması bakımından oldukça önemlidir.

6.2. AZO BOYA VE KUANTUM NOKTA KATKILI KOLESTERİK SIVI KRİSTAL KOMPOZİT YAPILARIN MORFOLOJİK, ELEKTRO-OPTİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ

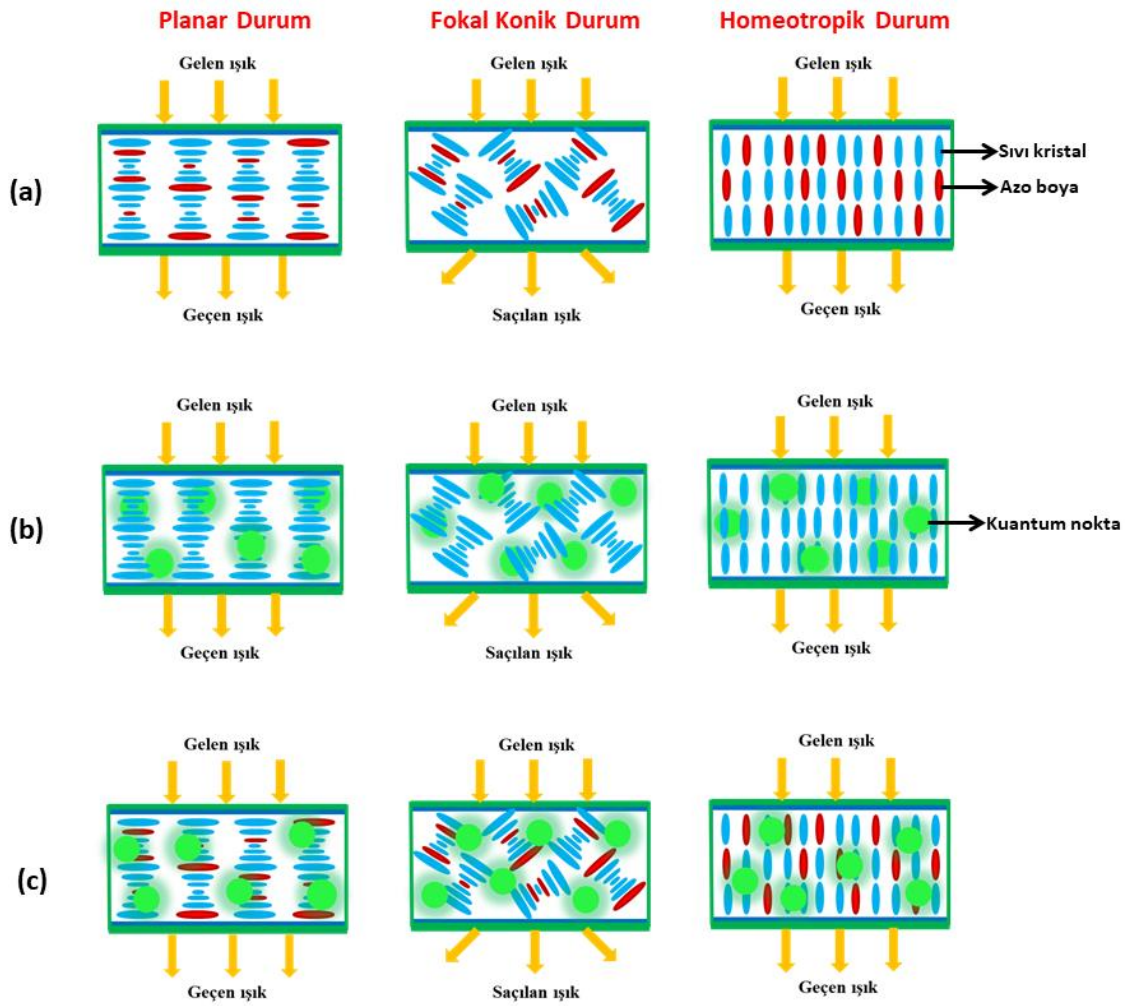
Tez çalışmasının ikinci aşamasında, A1 kodlu kolesterik sıvı kristal yapı baz olarak kullanılmış ve azo boya ve kuantum nokta katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarının üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen kompozit yapılar, B1, B2 ve B3 kodu ile adlandırılmıştır. B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin, P, FK ve H durumlarındaki şematik gösterimleri Şekil 6.19'da verilmiştir. İncelenen numunelere ait özellikler aşağıda açıklanmıştır:

(i) Şekil 6.19.(a)'da, B1 kodu ile adlandırılan azo boya MR katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapının şematik gösterimine yer verilmiştir. P durumunda, azo boya ve sıvı kristal moleküllerinin, sıvı kristal hücrenin yüzeyine paralel yönelim gösterdiği görülmektedir. Bu durumda, sıvı kristal hücre üzerine düşürülen görünür ışığın bir kısmı kompozit yapı içerisinde yer alan azo boya molekülleri tarafından soğurulacak diğer kısmı ise karşı tarafa geçecektir. FK durumunda ise sıvı kristal hücre yüzeyine düşürülen ışığın bir kısmı yine azo boya molekülleri tarafından soğurulacak diğer kısmı ise sıvı kristal molekülleri tarafından saçılacaktır. H durumunda, sıvı kristal hücre yüzeyine gelen ışık uygulanan elektrik alan yönünde düzenli yönelim gösteren azo boya ve sıvı kristal molekülleri nedeniyle karşı tarafa geçecektir. Bu durumda, soğurum ve saçılmalar minimum olacaktır.

(ii) Şekil 6.19.(b)'de, B2 kodu ile adlandırılan CdSeS/ZnS kuantum nokta katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapının şematik gösterimi verilmiştir. Bu kompozit yapı içerisinde azo boya molekülleri kullanılmadığından dolayı soğurum miktarının minimum olacağı düşünülmektedir. Böylece P ve H durumlarında, sıvı kristal hücre yüzeyine düşürülen görünür ışık karşı tarafa geçecektir. FK durumunda ise sıvı kristal hücre yüzeyine düşürülen ışık sıvı kristal molekülleri tarafından saçılmaya uğrayacaktır.

(iii) Şekil 6.19.(c)'de, B3 kodu ile adlandırılan MR azo boya ve CdSeS/ZnS kuantum nokta yapılarının bir arada kullanıldığı kolesterik sıvı kristal kompozit yapının şematik gösterimine yer verilmiştir. B1 kodu ile verilen numune için yapılan açıklamalara benzer şekilde; P durumunda, sıvı kristal hücre yüzeyine düşürülen görünür ışığın bir kısmı kompozit yapıyı oluşturan azo boya molekülleri tarafından soğurulacak diğer kısmı ise karşı tarafa geçecektir. FK durumunda, sıvı kristal hücre yüzeyine düşürülen

ışığın bir kısmı azo boya molekülleri tarafından soğurulacak diğer kısmı ise sıvı kristal molekülleri tarafından saçılacaktır. H durumunda ise sıvı kristal hücre yüzeyine gelen ışığın uygulanan elektrik alan yönünde düzenli yönelim gösteren azo boya ve sıvı kristal molekülleri nedeniyle karşı tarafa iletilmesi söz konusu olacaktır.



Şekil 6.19. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin P, FK ve H durumlarında şematik diyagramları.

Şekil 6.20'de, numunelerin ısıtma ve soğutma durumunda elde edilen Isı Akışı-Sıcaklık grafikleri ve faz geçiş sıcaklığı değerleri karşılaştırma grafiği verilmiştir. Ayrıca, numuneler arasında karşılaştırma yapılabilmesi için, Çizelge 6.4'te, A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen faz geçiş sıcaklığı değerleri verilmiştir. Grafikler ile ilgili yapılan değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir:

(i) B1 kodlu numunenin ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen faz geçiş sıcaklığı değerlerinin sadece kolesterik sıvı kristal yapıdan oluşan A1 kodlu numune ile

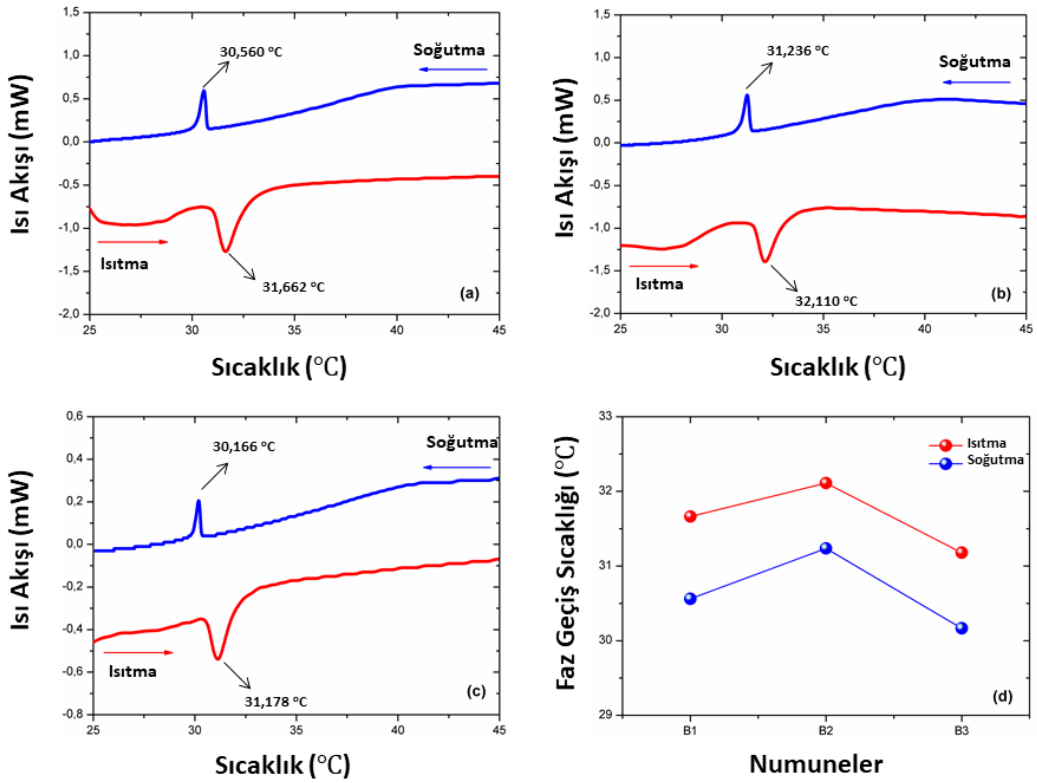
karşılaştırıldığında azaldığı görülmektedir. Bu azalma, kolesterik sıvı kristal yapıda boya moleküllerinin çözünmesi sonucu safsızlık iyonlarının artması ile açıklanabilir [83]. Ayrıca, kolesterik sıvı kristal kompozit yapıda var olan azo boya moleküllerinin soğurum özelliği göstermelerinin de faz geçiş sıcaklığı değerinin azalmasına sebep olabileceği düşünülmektedir [84].

(ii) Benzer şekilde, B2 kodlu numunenin de faz geçiş sıcaklığı değerlerinin A1 kodlu kolesterik sıvı kristal ile karşılaştırıldığında azaldığı gözlemlenmiştir. Kolesterik sıvı kristal, kuantum nokta ile katkılandığında, sıvı kristal molekülleri kuantum nokta yüzeylerinin etrafında ankraj etkisi oluşturmakta ve sıvı kristal moleküllerin yönelim düzeni bozulmaktadır. Bu etkinin faz geçiş sıcaklığı değerinde azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Buna ek olarak, katkılanan kuantum noktaların yeni oluşturulan kolesterik sıvı kristal kompozit yapıda safsızlık etkisi oluşturmasının da faz geçiş sıcaklığında düşüşe sebep olabileceği durumu değerlendirmelerimiz arasındadır [85], [86].

(iii) B3 kodlu numunenin faz geçiş sıcaklığı değerlerinin ise A1, B1 ve B2 kodlu numuneler ile karşılaştırıldığında azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın temel sebebinin kullanılan azo boyanın soğurum özelliği göstermesi ve azo boya/kuantum nokta yapılarının oluşturduğu safsızlık iyonlarının kolesterik sıvı kristal kompozit yapıda artmasından dolayı meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca, sıvı kristal, azo boya ve kuantum nokta moleküllerinin arasında gerçekleşen etkileşimler sonucu, moleküler düzende oluşan değişimlerinde faz geçiş sıcaklığının azalmasına neden olabileceği yorumu yapılabilmektedir.

Çizelge 6.4. A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen faz geçiş sıcaklığı değerleri.

Numune Kodu	Isıtma Durumu (^{o}C)	Soğutma Durumu (^{o}C)
A1	32,536	31,624
B1	31,662	30,560
B2	32,110	31,236
B3	31,178	30,166



Şekil 6.20. (a) B1, (b) B2, (c) B3 kodlu numunelerin ısıtma ve soğutma durumunda elde edilen Isı Akışı-Sıcaklık grafikleri ve (d) Numunelerin ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen faz geçiş sıcaklığı değerleri karşılaştırma grafiği.

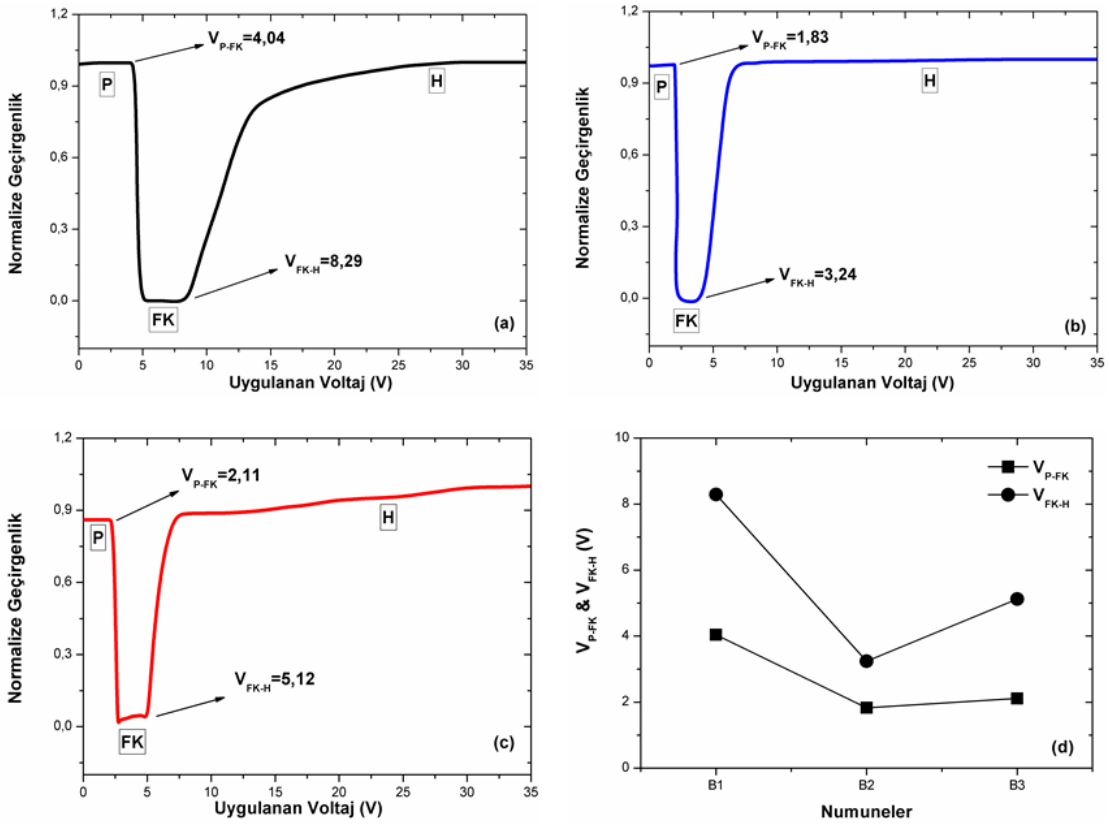
Numunelerin voltaja bağlı geçirgenlik değerleri değişim grafikleri ve geçiş voltajı değerleri karşılaştırma grafiği Şekil 6.21'de verilmiş olup; A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin geçiş voltajı değerlerinin özeti Çizelge 6.5'te sunulmuştur. Elde edilen geçiş voltajı değerleri, $V_{P\text{-}FK}$ ve $V_{FK\text{-}H,}$ ile ilgili yorumlara aşağıda yer verilmiştir:

(i) B1 kodlu numunenin geçiş voltajı değerlerinin A1 kodlu numune ile karşılaştırıldığında artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu artışın, B1 kodlu numunede yüksek oranda azo boya kullanılması sonucu kompozit yapıda artan viskozite ve sıvı kristal ile boya molekülleri arasında oluşan sterik etkiden kaynaklandığı düşünülmektedir [85]. Aynı zamanda, kolesterik sıvı kristal yapıya azo boya katkılanması ile kompozit yapıda oluşan iyonik konsantrasyon artacaktır. Bu artış ile sıvı kristal hücrenin hizalama katmanında bazı iyonların adsorbe edilmesi söz konusu olabilmektedir. Bu etkinin, uygulanan elektrik alan etkisini azaltacağı ve geçiş voltajı değerlerinde artışa sebep olabileceği yorumu yapılabilmektedir [87].

(ii) B2 kodlu numunenin geçiş voltajı değerlerinin A1 ve B1 kodlu numuneler ile karşılaştırıldığında azaldığı görülmektedir. Kolesterik sıvı kristal yapıya kuantum nokta

katkılanması sonucu kompozit yapının moleküler düzeninde değişim meydana gelmektedir. Özellikle, sıvı kristal moleküllerinin kuantum noktalar ile etkileşimi sonucu, üretilen kompozit malzemenin topolojik yapısı değişime uğrayacaktır. Bu değişimin, B2 kodlu numunenin geçiş voltajı değerlerinde azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir [26].

(iii) Azo boya ve kuantum nokta katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapının, B3, geçiş voltajı değerleri, A1 ve B1 kodlu numuneler ile karşılaştırıldığında azalmış, B2 kodlu numune ile karşılaştırıldığında ise artmıştır. Bu değişim, kompozit yapıda yer alan azo boyaların oluşturduğu safsızlık iyonlarının kuantum noktalar tarafından yakalanması sonucu sıvı kristal hücrenin hizalama tabakasında daha az iyonun adsorbe olması ile açıklanabilir.

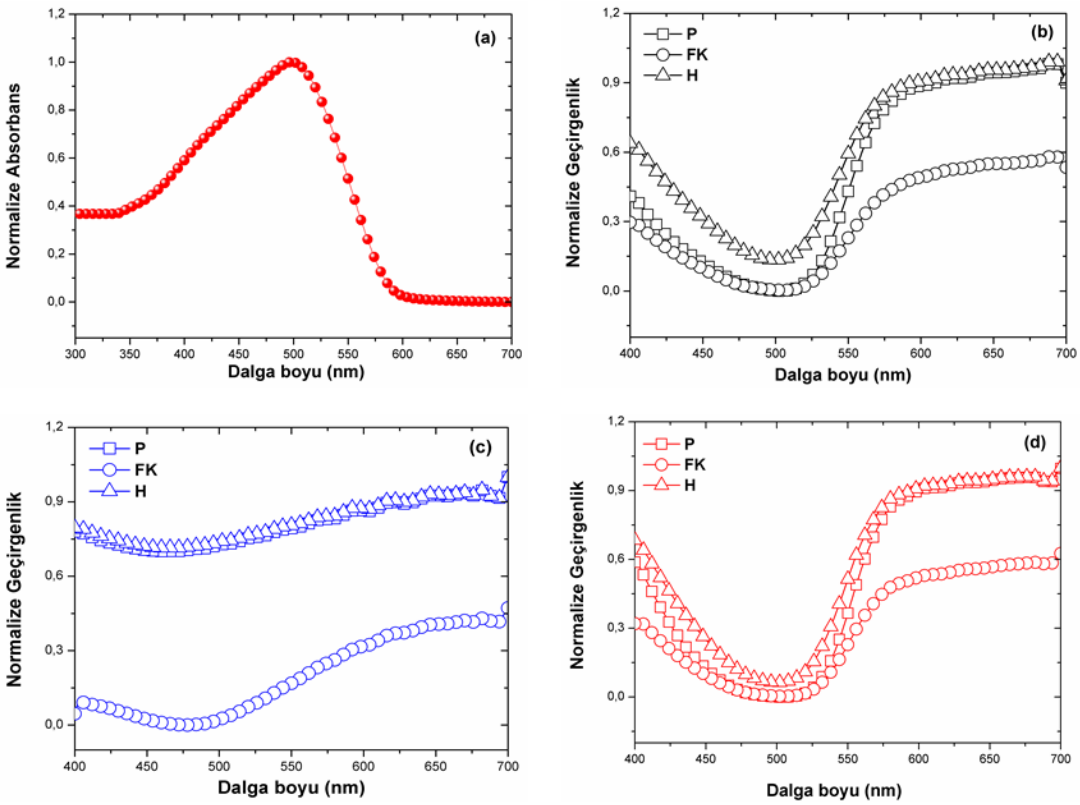


Şekil 6.21. (a) B1, (b) B2, (c) B3 kodlu numunelerin Normalize Geçirgenlik-Voltaj değişim grafikleri ve (d) Numunelerin geçiş voltajı değerleri karşılaştırma grafiği.

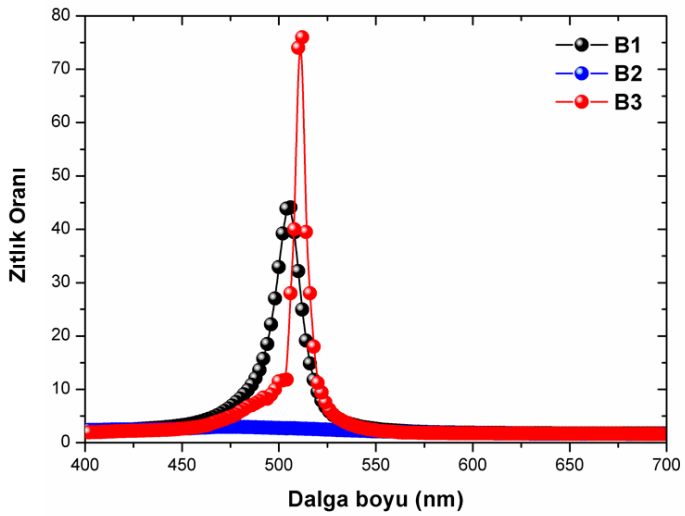
Çizelge 6.5. A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin geçiş voltajı değerleri.

Numune Kodu	$V_{P\text{-}FK}$ (V)	$V_{FK\text{-}H}$ (V)
A1	2,350	5,680
B1	4,040	8,290
B2	1,830	3,240
B3	2,110	5,120

Şekil 6.22.(a)'da, B1 ve B3 kodlu numunelerin üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılan MR azo boyaya ait Absorbans-Dalga boyu değişim grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde, MR azo boyanın 475-525 nm dalga boyu aralığında maksimum absorbans değerine sahip olduğu görülmektedir. Numunelerin geçirgenlik değerlerinin yorumlanmasında, kullanılan MR azo boyanın dalga boyuna bağlı değişim gösteren absorbans miktarı son derece önemlidir. Literatürde verilen dalga boyuna bağlı absorbans ve geçirgenlik değerleri incelendiğinde, MR azo boyanın maksimum absorbans değerine karşılık gelen dalga boyu aralığında minimum geçirgenlik değerine sahip olması beklenmektedir. Şekil 6.22.(b-d)'de, numunelerin dalga boyuna bağlı değişim gösteren geçirgenlik değerleri değişim grafiklerine yer verilmiştir. Numunelerin voltaja bağlı değişen geçirgenlik değerlerinin ölçümünde ise Şekil 6.21'de verilen P, FK ve H durumlarına ait gerilim aralıkları kullanılmıştır. İncelenen dalga boyu aralığında, tüm numunelerin FK durumunda en düşük geçirgenlik değerine sahip olduğu, P ve H durumlarında ise geçirgenlik değerlerinin bazı dalga boyu değerleri dışında neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, B1 ve B2 kodlu numunelere ait grafiklerin benzer eğilime sahip oldukları gözlemlenmektedir. Grafiklerin benzer eğilime sahip olmaları, kompozit yapıların üretiminde kullanılan MR azo boyadan kaynaklanmaktadır. MR azo boyanın maksimum absorbans değerine sahip olduğu dalga boyu aralığında numunelerin minimum geçirgenlik değerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6.22. (a) MR azo boyanın Normalize Absorbans-Dalga boyu grafiği ve (b) B1, (c) B2, (d) B3 kodlu numunelerin Normalize Geçirgenlik-Dalga boyu değişim grafikleri.



Şekil 6.23. B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin Zıtlık Oranı-Dalga boyu değişim grafiği.

Şekil 6.23'te, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin Zıtlık Oranı-Dalga boyu değişim grafiklerine yer verilmiştir. Zıtlık oranı parametresinin hesaplanmasında, numunelerin maksimum ve minimum geçirgenlik değerleri kullanılmış olup; verilerin birbiri ile kıyaslanması sonucu dalga boyuna bağlı değişim grafikleri elde edilmiştir. Grafik

incelendiğinde, en yüksek zıtlık oranı değerinin azo boya ve kuantum nokta yapılarını bir arada içeren B3 kodlu numunede elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, azo boya katkılı B1 kodlu numunede de zıtlık oranı parametresinin değerinin yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Dalga boyu değerinin yaklaşık 475-525 nm olduğu bölgede hem B1 hem de B3 kodlu numunelerin zıtlık oranı parametreleri en yüksek değerlerini almaktadır. Bu sonuç, kompozit yapıda kullanılan MR azo boyanın en düşük geçirgenlik değerinin en yüksek absorbans değerine karşılık gelen 475-525 nm dalga boyu aralığında elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Diğer yandan, B3 kodu ile verilen numunenin zıtlık oranı parametresinin değerinin B1 kodlu numune ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak 2 kat arttığı gözlemlenmektedir. Bu sonuç, B3 kodlu numunede azo boya ve kuantum nokta yapılarının bir arada kullanılması sonucu kuantum noktaların ışığın geçirgenlik değerinde düşüşe sebep olması ile açıklanabilir. Ayrıca, azo boya ve kuantum nokta katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapıda en yüksek zıtlık oranı değerinin elde edilmesi, kuantum noktaların gelecekte yapılacak çalışmalarda, azo boya katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarının geçirgenlik değerini azaltabilecek önemli bir katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

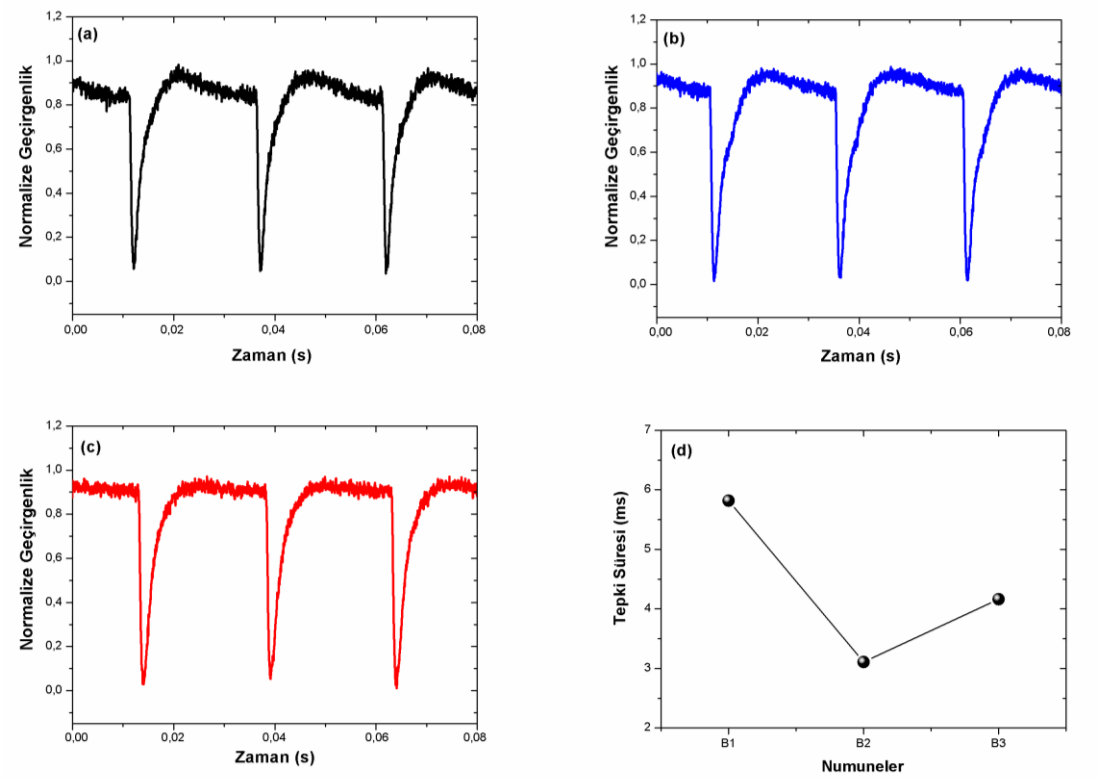
B1, B2 ve B3 kodlu numunelere ait tepki süresi parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan Normalize Geçirgenlik-Zaman değişim grafikleri Şekil 6.24.(a-c)'de verilmiştir. Şekil 6.24.(d)'de ise numunelerin tepki süresi parametrelerine ait karşılaştırma grafiği yer almaktadır. Ayrıca, Çizelge 6.6'da, A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin tepki süresi parametrelerinin yer aldığı bir tablo verilmiştir. Tepki süresi parametresinin değişimi ile ilgili yorumlar aşağıda özetlenmiştir:

(i) B1 kodlu numunenin tepki süresi parametresinin değeri 5,819 ms olarak hesaplanmış olup A1 kodlu numune ile kıyaslandığında arttığı görülmektedir. Bu artış, kompozit yapıda azo boya kullanılması sonucu sıvı kristal ve boya molekülleri arasındaki atomik ve elastik kuvvetlerin etkileşimi ile açıklanabilir [87]. Ayrıca, kompozit yapının viskozitesinde meydana gelen artışın da tepki süresinin artmasına sebep olabileceği düşünülmektedir [75], [87].

(ii) B2 kodlu numunenin ise tepki süresi parametresinin değeri 3,109 ms olarak hesaplanmıştır ve bu değerin hem A1 kodlu numunenin hem de B1 kodlu numunenin tepki süresi parametresinin değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu değişimin, kompozit yapıya kuantum nokta katkılanması sonucu, sıvı kristal ve kuantum

noktalar arasında gerçekleşen dipol-dipol ve ankraj kuvvetlerinin etkisi ile oluştuğu yorumu yapılabilmektedir [88].

(iii) Azo boya ve kuantum nokta yapılarının bir arada katkılandığı B3 kodlu numunede ise tepki süresi parametresinin değeri 4,164 ms olarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerin B1 kodlu numunenin tepki süresine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu azalış, kompozit yapıyı oluşturan azo boya molekülleri ile kuantum noktalar arasındaki moleküller arası etkileşim ile açıklanabilir. Benzer duruma geçiş voltajı değerlerinde de rastlanmıştır. Ayrıca, B3 kodlu numunenin tepki süresi parametresinin A1 kodlu numunenin tepki süresi parametresi ile karşılaştırıldığında arttığı görülmektedir. B3 kodlu numunenin yapısından var olan azo boya ve kuantum noktalar nedeniyle viskozitesinde meydana gelen artışın bu sonucu ortaya çıkardığı düşünülmektedir.



Şekil 6.24. (a) B1, (b) B2, (c) B3 kodlu numunelerin Normalize Geçirgenlik-Zaman değişim grafikleri ve (d) Numunelerin tepki süresi parametreleri karşılaştırma grafiği.

Çizelge 6.6. A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin tepki süresi parametresine ait değerler.

Numune Kodu	Tepki süresi (ms)
A1	3,443
B1	5,819
B2	3,109
B3	4,164

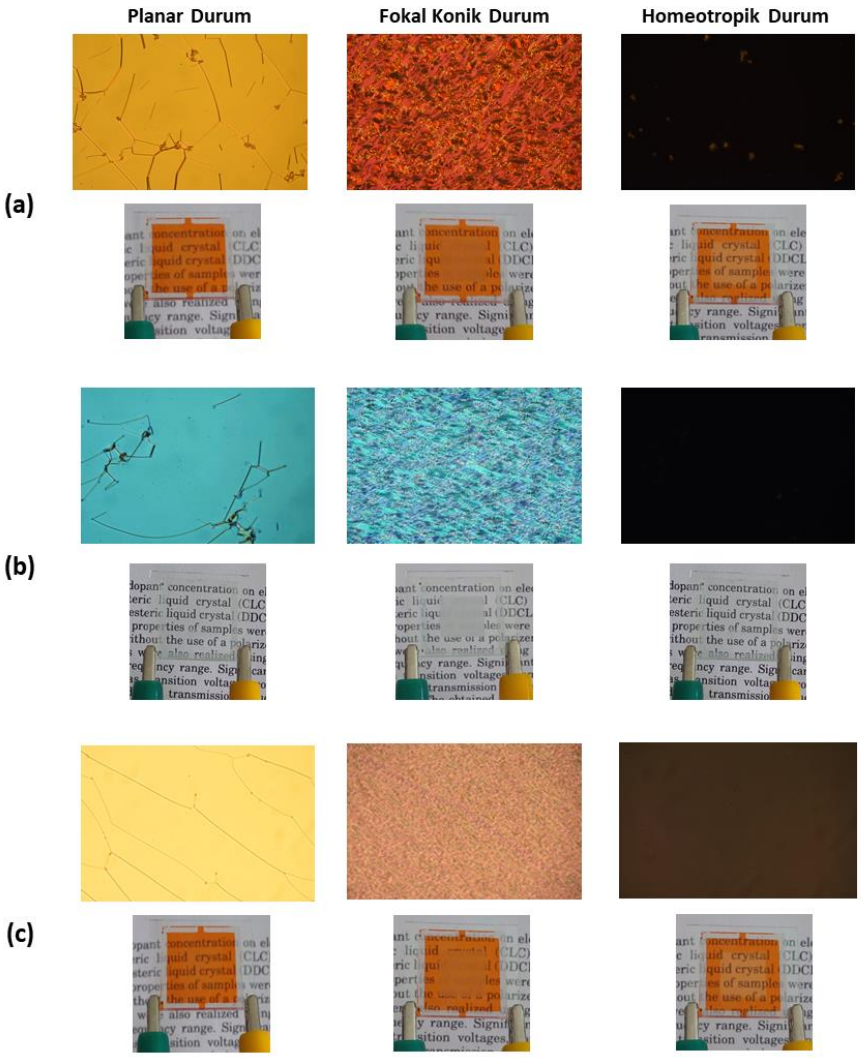
Şekil 6.25'te, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin P, FK ve H durumlarında POM görüntüleri ve fotoğrafları verilmiştir. Numunelerin POM görüntüleri ve fotoğrafları, 1 kHz kare dalga varlığında değişen voltaja bağlı olarak oda sıcaklığında elde edilmiştir. B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin POM görüntüleri ve fotoğrafları ile ilgili yorumlara aşağıda yer verilmiştir:

(i) B1 kodlu numune için, voltajın sıfıra eşit olduğu P durumunda, kullanılan azo boyanın rengine bağlı olarak POM görüntülerinde renkli bir yüzey görülmektedir. Fotoğrafta ise, P durumunda, azo boyanın renginden dolayı hücrenin renkli bir görünüme sahip olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca, üzerine ışık düşürülen sıvı kristal hücrenin bu durumda ışığın bir kısmını geçirdiği görülmektedir. FK durumunda, sıvı kristal hücreye 7 V gerilimi uygulanmış ve kompozit yapıda soğurum ve saçılmaların oluşumuna bağlı olarak opak bir görünüm elde edilmiştir. H durumunda ise sıvı kristal hücreye 30 V gerilimi uygulanmıştır. Bu durumda, sıvı kristal hücrenin aktif alanının P durumuna göre daha şeffaf bir görünüme sahip olduğu gözlemlenmiştir.

(ii) Kuantum nokta katkılı B2 kodlu numunenin ise A1 kodlu numune ile benzer POM görüntüsü ve fotoğraflara sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Voltajın sıfıra eşit olduğu P durumunda şeffaf, voltajın 2,5 V değerine sahip olduğu FK durumunda opak ve voltajın 7,5 V değerine sahip olduğu H durumunda da şeffaf özellik gösteren B2 kodlu numunenin, düşük voltaj değerlerinde opak ve şeffaf özellik göstermesi bakımından önemli olduğu düşünülmektedir.

(iii) B3 kodlu numunenin POM görüntüleri ve fotoğrafları ise B1 kodlu numune ile benzerlik göstermektedir. P durumunda, kullanılan azo boyadan dolayı hücrenin renkli bir görünüme sahip olduğu görülmektedir. FK durumunda, sıvı kristal hücreye uygulanan voltaj değeri 3,5 V'dir. Bu bakımdan, B1 kodlu numune ile

karşılaştırıldığında daha düşük voltaj değerinde opak bir görünüme sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç, kompozit yapıda yer alan kuantum noktaların geçiş voltajı değerini düşürmesi ile ilgilidir. H durumu ise 7,5 V değerinde elde edilmiştir ve sıvı kristal hücrenin P durumuna göre daha şeffaf bir görüntüye sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.25. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin P, FK ve H durumlarında elde edilen POM görüntüleri ve fotoğrafları.

Şekil 6.26'da, numunelerin P, FK ve H durumlarında frekansa bağlı değişim gösteren ε′ değerleri değişim grafiklerine yer verilmiştir. Tüm numunelerde, ε′ değerinin, H durumunda P durumundan daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu artış, P durumundan H durumuna geçişte voltajın artmasına bağlı olarak moleküler yönelimin değişmesi ile açıklanabilir. Voltajın sıfır olduğu P durumunda, sıvı kristal ve boya molekülleri, sıvı kristal hücrenin yüzeyine paralel olarak yönelim gösterdiği için ε′ en küçük değerini

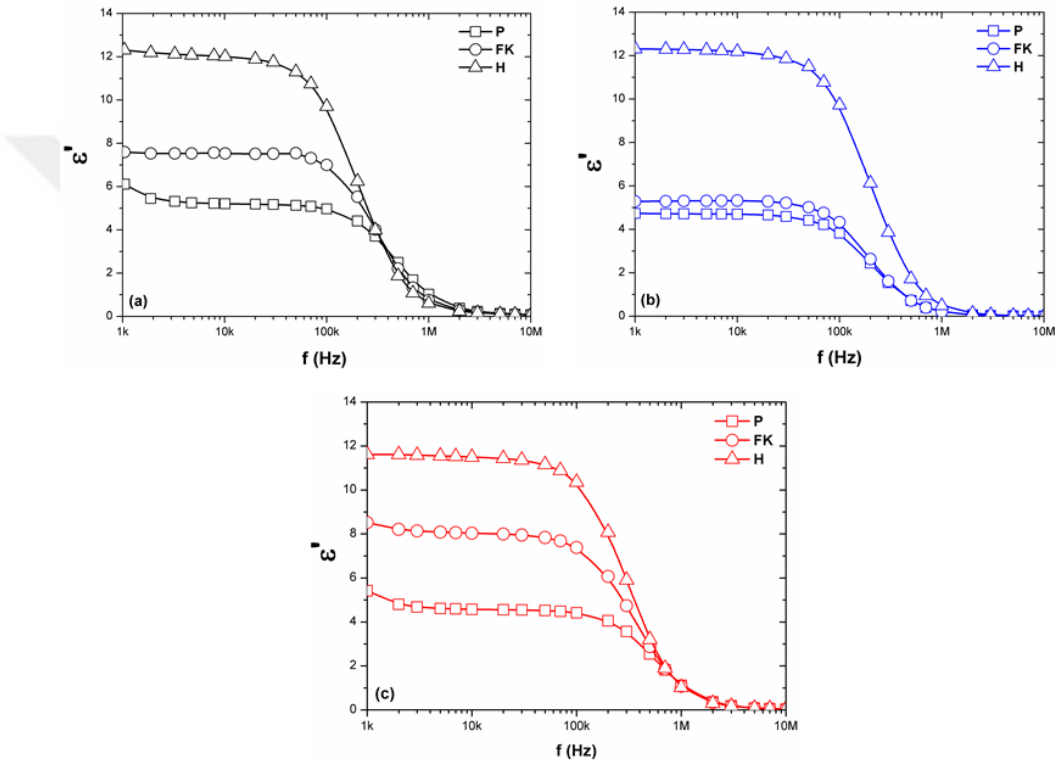
almaktadır. Voltaj değerinin eşik voltajından daha büyük olduğu değerlerde ise sıvı kristal ve boya molekülleri uygulanan voltaj ile oluşan elektrik alan yönünde yönelim göstermeye başlayacak ve ε′ artacaktır. Yüksek voltaj değerlerinde ise H durumu oluşacak ve sıvı kristal ile boya moleküllerinin büyük çoğunluğu elektrik alan ile aynı yönde yönelim gösterecektir. Böylece, ε′ maksimum değere sahip olacaktır. Aynı zamanda, tez çalışmasının birinci aşamasında incelenen numunelerde elde edilen ε′-f grafiklerine benzer şekilde, ε′ parametresinin artan frekans ile hızlı bir şekilde azaldığı görülmekte ve 1 MHz frekans değerinden sonra oldukça düşük değerler aldığı gözlemlenmektedir. Bu değişimin, yüksek frekans bölgelerinde sıvı kristal hücrenin ITO kaplı elektrotlarının sonlu dirence sahip olması ile ilgili olduğu düşünülmektedir [25], [55], [74]. B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin ε′ değerlerinin A1 kodlu numune ile karşılaştırılması sonucu yapılan yorumlara aşağıda yer verilmiştir:

(i) B1 kodlu numunenin P ve FK durumlarında frekansa bağlı ε′ değerleri incelendiğinde, Şekil 6.13.(a)'da verilen A1 kodlu numunenin ε′ değerlerine göre artış olduğu görülmektedir. Bu artışın temel sebebi, kompozit yapıya katkılanan azo boya moleküllerinin sıvı kristal molekülleri ile aynı doğrultuda yönelim göstermesi sonucu ortamın elektriksel polarizasyonunun artmasıdır. Aynı zamanda, kolesterik sıvı kristal yapı azo boya ile katkılandığında, azo boya ve sıvı kristal molekülleri arasında gerçekleşen moleküller arası etkileşim mekanizmaları sonucu kompozit yapının yük depolama kapasitesi artış gösterecektir. Bu artışın da ε′ değerinde artışa sebep olacağı düşünülmektedir. H durumunda ise moleküler düzenin sağlanmasına bağlı olarak ε′ değerinin her iki numunede de birbirine yakın olduğu gözlemlenmektedir [79].

(ii) Kuantum nokta katkılı B2 kodlu numunede ise A1 kodlu numune ile karşılaştırıldığında, ε′ değerinde, P durumunda oldukça az bir artış olduğu görülmektedir. FK durumunda, sıvı kristal moleküllerinin kuantum noktalar etrafında toplanması sonucu, kompozit yapının moleküler düzeninde meydana gelen deformasyonlar nedeniyle ε′ değerinde bir azalmanın meydana geldiği düşünülmektedir. H durumunda ise kompozit yapıda moleküler düzenin oluşması nedeniyle yüksek ε′ değerine ulaşıldığı ve bu değerin A1 kodlu numunenin ε′ değeri ile birbirine yakın olduğu görülmektedir [89].

(iii) B3 kodlu numunenin ε′ değerleri incelendiğinde, P durumunda, A1 ve B2 kodlu numunelere göre bir artış olduğu, B1 kodlu numuneye göre ise bir azalma meydana geldiği görülmektedir. FK durumunda, B3 kodlu numunenin ε′ değerinin A1, B1 ve B2

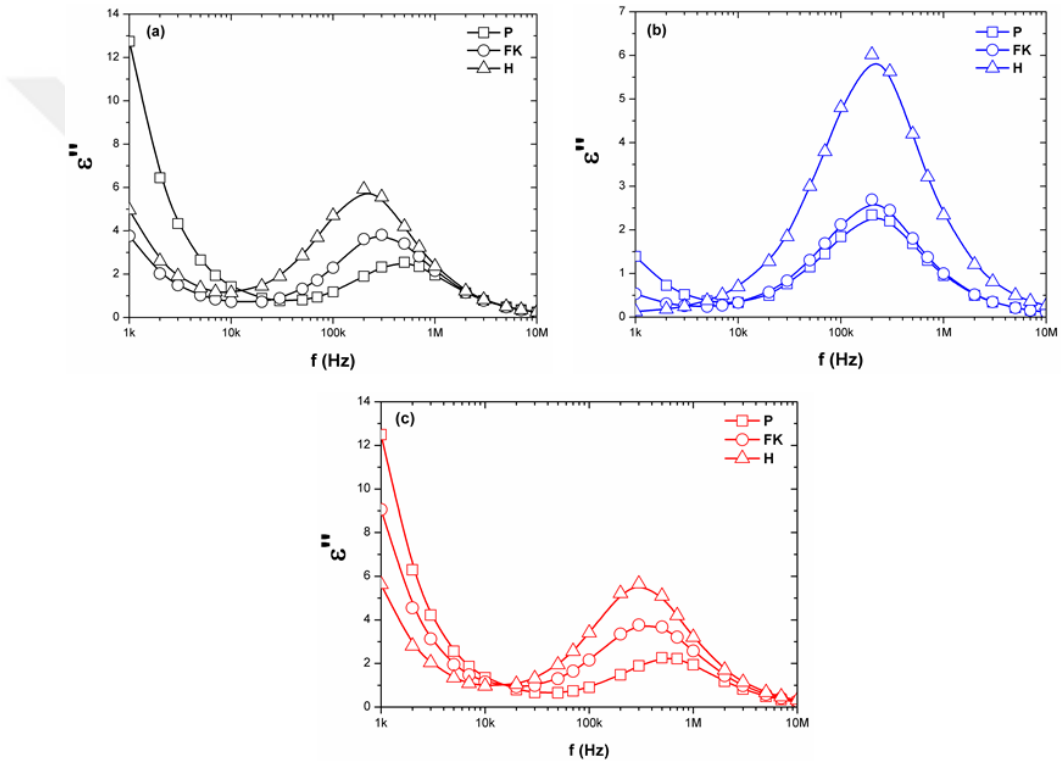
kodlu numunelere kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Bu artış, numunelere voltaj uygulanması sonucu, kompozit yapıda yer alan sıvı kristal ve azo boya moleküllerinin elektrik alan boyunca yönelim gösterme eğilimi ile açıklanabilir. Ayrıca B3 kodlu numunede yer alan kuantum noktaların kompozit yapının dipol momentini arttırmasına bağlı olarak ε′ değerinin artmasına sebep olduğu düşünülmektedir. A1, B1 ve B2 kodlu numuneler ile benzer şekilde, B3 kodlu numunenin de H durumunda maksimum ε′ değerine sahip olmasının moleküler düzenin sağlanması sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 6.26. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin ε′-f değişim grafikleri.

Numunelerin frekansa bağlı değişen ε″ değerleri değişim grafikleri Şekil 6.27'de verilmiştir. B1 ve B3 kodlu numunelerin grafikleri incelendiğinde benzer eğilime sahip oldukları görülmektedir. Özellikle 1 kHz frekans değerinde, iki numunenin de yapısında var olan azo boya nedeniyle yüksek ε″ değerine sahip oldukları gözlemlenmiştir. B2 kodlu numunenin ε″-f grafiğinin ise A1 kodlu numune ile benzer eğilime sahip olduğu görülmektedir. Numunelerin artan voltaja bağlı durum değişimleri incelendiğinde, 10 kHz-10 MHz frekans aralığında, moleküler düzenin değişimine bağlı olarak ε″ parametresinin sahip olduğu tepe noktası değerlerinin artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Ayrıca, numunelerin ε″-f grafiği kullanılarak, f_R değerleri

belirlenmiştir. Çizelge 6.7'de, A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelere ait f_R değerleri, P, FK ve H durumları için verilmiştir. Değerler incelendiğinde, B2 kodlu numunenin f_R değerinin tüm durumlar için en düşük değere sahip olduğu görülmektedir. B3 kodlu numunede ise f_R'nin en yüksek değerini aldığı görülmektedir. Diğer yandan, A1 kodlu numune ile karşılaştırma yapıldığında, numunelerin f_R değerlerinin bir durum dışında daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. B3 kodlu numunenin H durumunda f_R değerinin A1 kodlu numuneye oranla artış gösterdiği görülmüştür. Buna göre, B3 kodlu numunenin yüksek frekans aralıklarında çalışabilecek yeni bir kompozit malzeme olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

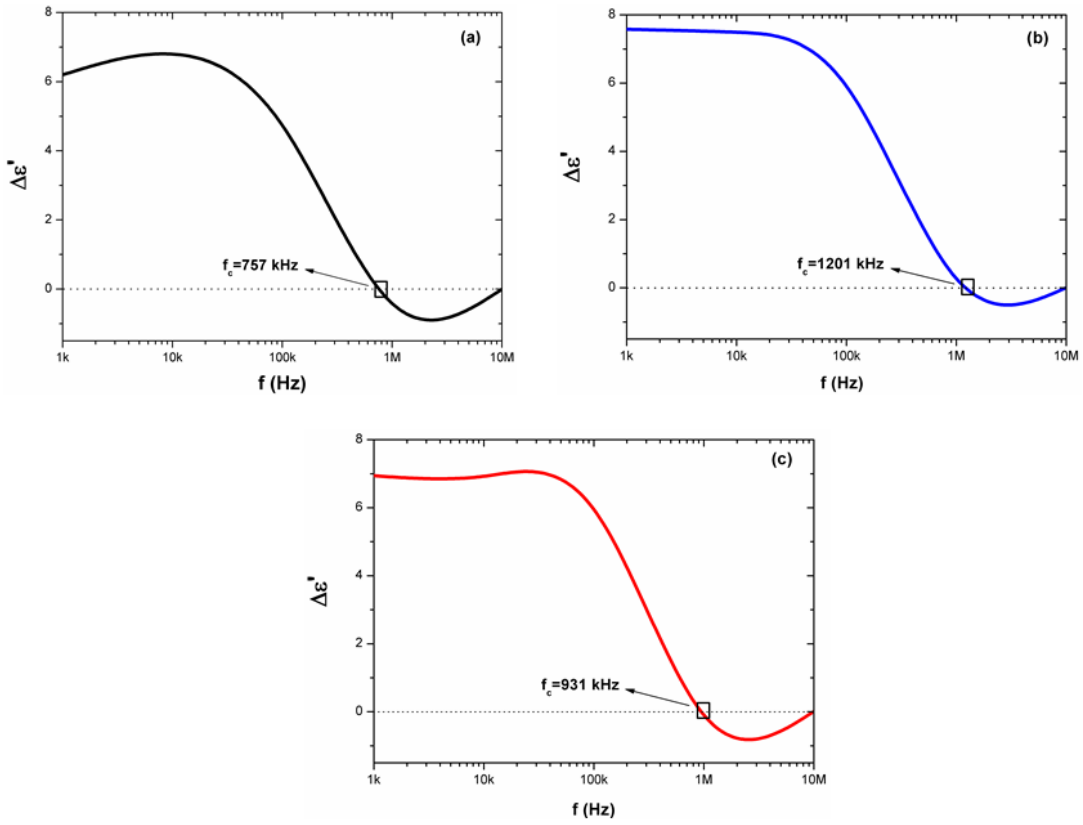


Şekil 6.27. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin ε″-f değişim grafikleri.

Çizelge 6.7. A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin relaksasyon frekansı (f_R) değerleri.

Numune Kodu	Planar Durum	Fokal Konik Durum	Homeotropik Durum
A1	709 kHz	452 kHz	273 kHz
B1	478 kHz	283 kHz	222 kHz
B2	227 kHz	221 kHz	217 kHz
B3	596 kHz	361 kHz	305 kHz

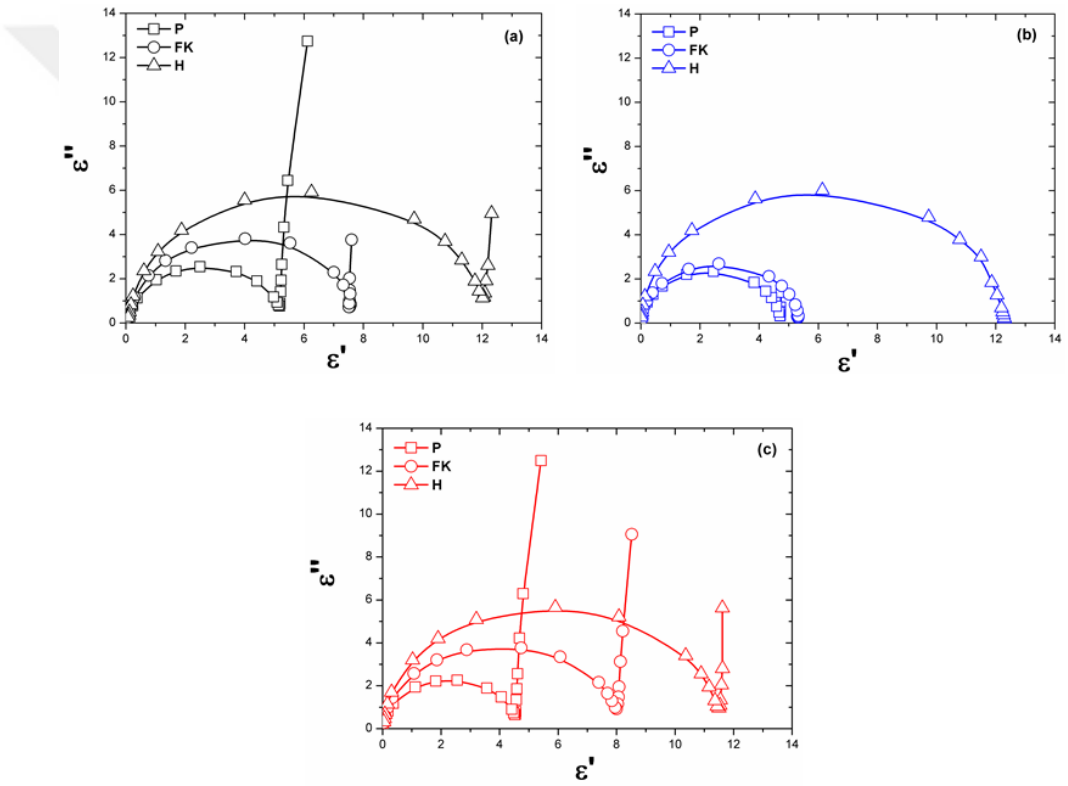
B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin frekans ile değişen Δε′ değerlerine ait grafikler Şekil 6.28'de verilmiştir. Tüm numunelerin 1 kHz frekans değerinde Δε′ parametresinin en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, B1 ve B3 kodlu numunelerin Δε′ değerlerinin, Şekil 6.15'te verilen A1 numunesi ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. B2 kodlu numunenin Δε′ değerlerinin ise A1 kodlu numune ile neredeyse aynı değere sahip olduğu görülmüştür. Numunelerin Δε′-f grafikleri kullanılarak bulunan f_c değerleri de grafik üzerinde verilmiştir. Değerler incelendiğinde, tüm numunelerde f_c değerinin A1 kodlu numuneye göre daha yüksek olduğu sonucu elde edilmektedir. Bölüm 6.1'de sonuçlarını verdiğimiz A1 kodlu numunenin f_c değeri 743 kHz olarak hesaplanmıştır. Özellikle, kuantum nokta katkılı B2 kodlu örneğin f_c değerinin en yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuç, azo boya ve kuantum nokta katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarda, pozitif Δε′ değerinden negatif Δε′ değerine geçişin yüksek frekanslarda gerçekleşeceği anlamına gelmektedir.



Şekil 6.28. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin Δε′-f değişim grafikleri.

Şekil 6.29'da, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin Cole-Cole değişim grafiklerine yer verilmiştir. B2 kodlu numunenin incelenen frekans aralığında neredeyse Debye tipi davranış gösterdiği görülmektedir. B1 ve B3 kodlu numunelerde ise kullanılan azo

boyanın iyonik etkisinden dolayı düşük frekans bölgesinde oluşan yüksek değerler, Cole-Cole grafiğinde yarım daire tamamlandıktan sonra bazı bozulmalara sebep olmuş ve Debye tipi olmayan davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, numunelerin Cole-Cole grafikleri kullanılarak, yüksek frekans bölgelerinde, τ_R parametrelerinin değerleri hesaplanmış ve Çizelge 6.8'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, B1 ve B2 kodlu numunelerin τ_R değerlerinin A1 kodlu numune ile karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu görülmüştür. B3 kodlu numunenin ise P ve FK durumlarında τ_R değerlerinin A1 kodlu numuneye oranla artış gösterdiği, H durumunda ise azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Buna göre, B3 kodlu numunenin homeotropik durumda hızlı relaksasyon davranışına sahip olabileceği yorumu yapılabilmektedir.



Şekil 6.29. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin Cole-Cole değişim grafikleri.

Çizelge 6.8. A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin relaksasyon zamanı (τ_R) değerleri.

Numune Kodu	Planar Durum	Fokal Konik Durum	Homeotropik Durum
A1	0,224 µs	0,352 µs	0,583 µs
B1	0,332 µs	0,562 µs	0,717 µs
B2	0,701 µs	0,720 µs	0,733 µs
B3	0,267 µs	0,441 µs	0,522 µs

B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin δε′ parametrelerine ait değerler Çizelge 6.9'da verilmiştir. Tüm numunelerin, P durumunda, δε′ değerlerinin A1 numunesi ile karşılaştırıldığında arttığı görülmektedir. FK durumunda, B1 ve B3 kodlu numunelerin δε′ değerlerinin A1 kodlu numuneden daha büyük olduğu; B2 kodlu numunenin ise δε′ değerinin A1 kodlu numuneden daha küçük olduğu görülmüştür. Bu değişimin, kolesterik sıvı kristal yapının azo boya ve kuantum nokta ile katkılanması sonucu moleküler düzeninin ve dipol momentinin değişimine bağlı olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir. H durumunda ise tüm numunelerde moleküler düzenin sağlanmasına bağlı olarak δε′ değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmektedir.

Çizelge 6.9. A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin dielektrik dayanım (δε′) değerleri.

Numune Kodu	Planar Durum	Fokal Konik Durum	Homeotropik Durum
A1	4,379	6,725	11,974
B1	6,039	7,287	12,241
B2	4,732	5,285	12,304
B3	5,385	8,481	11,623

Şekil 6.30'da, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin frekansa bağlı değişen σ_{ac} grafikleri verilmiştir. Grafikler ile ilgili yapılan yorumlara aşağıda yer verilmiştir:

(i) B1 kodlu numunenin, P, FK ve H durumlarında, σ_{ac} değerinin düşük frekans bölgesinde (≤10 kHz) A1 kodlu numune ile karşılaştırıldığında artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Düşük frekans değerlerinde gözlemlenen bu değişimin iyonik iletkenlikten kaynaklandığı düşünülmektedir. B1 kodlu numunenin yapısında var olan MR azo boyanın kompozit yapıda safsızlık iyonlarını arttıracağı ve bu artışın da σ_{ac} değerinde artışa sebep olabileceği düşünülmektedir [90].

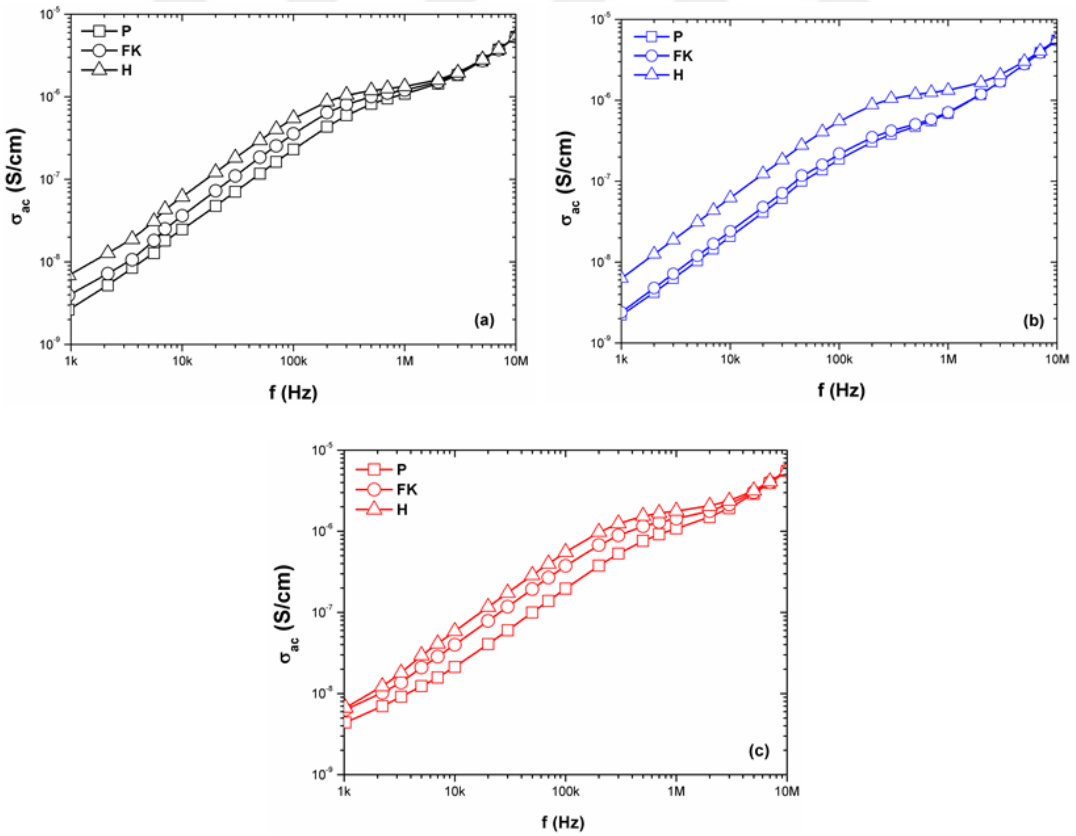
(ii) B2 kodlu numunenin σ_{ac} değerleri tüm durumlar için incelendiğinde, düşük frekans bölgesinde A1 kodlu numune ile karşılaştırıldığında küçük bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu artış, sıvı kristal yapıda bulunan ve hızlı hareket eden iyonların kuantum noktaların yüzeyleri tarafından adsorbe edilmesi, yavaş hareket eden iyonların ise kuantum nokta yüzeylerinden desorbe edilmesi sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Böylece ortamdaki iyonik yük miktarının artışına bağlı olarak σ_{ac} değeri artacaktır [85].

(iii) B3 kodlu numunenin, P, FK ve H durumlarında elde edilen σ_{ac} değerlerinin ise A1,

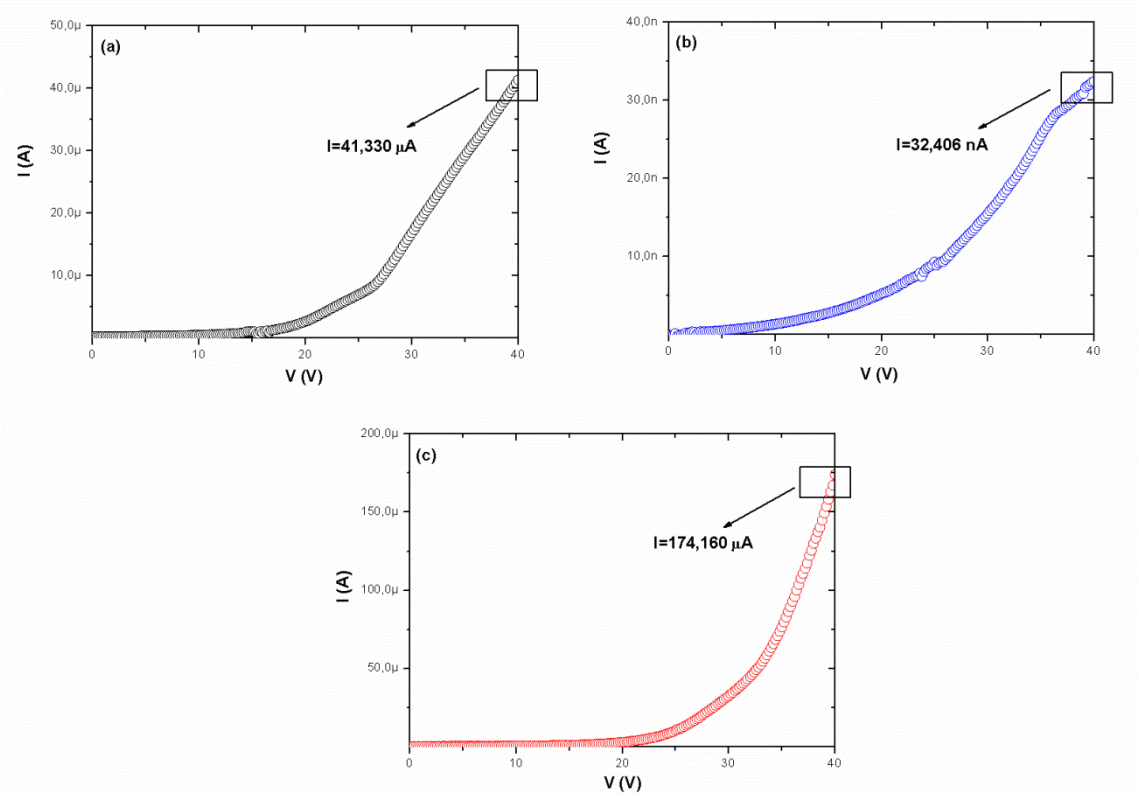
B1 ve B2 kodlu numuneler ile karşılaştırıldığında artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Azo boya ve kuantum nokta yapılarını bir arada içeren B3 kodlu numunenin düşük frekans bölgesinde σ_{ac} değerlerindeki artış ortamdaki safsızlık iyonlarının artışı ile açıklanabilir.

A1, B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin yüksek frekans bölgelerinde ise σ_{ac} değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonucun elektronik atlama mekanizması sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir [89].

B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin I-V değişim grafikleri Şekil 6.31'de verilmiştir. Tüm numunelerin artan voltaja bağlı olarak akım değerlerinin arttığı görülmektedir. Buna ek olarak, 40 V gerilim değerinde, B1 ve B3 kodlu numunelerin A1 kodlu numune ile karşılaştırıldığında akım değerlerinin arttığı; B2 kodlu numunenin ise akım değerinin A1 kodlu numune ile karşılaştırıldığında azaldığı gözlemlenmektedir. Özellikle azo boya ve kuantum nokta yapılarını bir arada içeren B3 kodlu numunenin akım değerinin incelenen tüm numunelerden oldukça yüksek olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Bu sonuç, kompozit yapıda yer alan azo boya ve kuantum noktaların varlığı nedeniyle ortamdaki serbest yük taşıyıcılarının artması ile açıklanabilir [74].



Şekil 6.30. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin σ_{ac}-f değişim grafikleri.



Şekil 6.31. (a) B1, (b) B2 ve (c) B3 kodlu numunelerin I-V değişim grafikleri.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kolesterik sıvı kristaller ile MR azo boya ve CdSeS/ZnS kuantum nokta katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarının üretimi gerçekleştirilmiş; morfolojik, elektro-optik ve dielektrik özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Tez çalışmasının birinci bölümünde, farklı konsantrasyonlarda S-811 kiral katkı maddesi ve 5CB nematik sıvı kristal bir araya getirilerek dört farklı kolesterik sıvı kristal yapının üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu yapılar tez çalışmasının deneysel yöntem bölümünde A1, A2, A3 ve A4 kodu ile tanımlanmıştır. İlk olarak, kolesterik sıvı kristal yapıların, *p* helis adımı değerlerinin büyüklüğü belirlenmiş ve kiral katkı maddesi konsantrasyonunun artışına bağlı olarak bu değerlerin azaldığı gözlemlenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen kolesterik sıvı kristal yapılarının *p* değerlerinin mikrometre boyutunda olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonrasında, kolesterik sıvı kristal yapıların ısıtma ve soğutma durumlarında faz geçiş sıcaklığı değerleri DSC cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Kolesterik sıvı kristal yapılarda artan kiral katkı maddesi konsantrasyonuna bağlı olarak faz geçiş sıcaklığı değerinin azaldığı görülmüştür. Bu davranışın, kolesterik sıvı kristal yapıda artan kiral katkı maddesi konsantrasyonu sonucu moleküler ağırlığının artmasına bağlı olarak ortaya çıkabileceği yorumu yapılmıştır. Aynı zamanda, kolesterik sıvı kristal yapının sıcaklığa bağlı olarak değişen morfolojisi POM cihazı kullanılarak elde edilmiştir. POM cihazı ile çalışmanın ikinci bölümünde kullanılması planlanan A1 kodlu numunenin soğutma durumunda morfolojik yapısı ve faz geçiş sıcaklığı değeri belirlenmiştir. Elde edilen POM görüntülerine göre, numunenin morfolojik yapısının literatürde var olan diğer çalışmalar ile uyumlu olduğu belirlenmiş ve faz geçiş sıcaklığı değerinin DSC sonuçları ile uygun olduğu gözlemlenmiştir. Kolesterik sıvı kristal yapılarının elektro-optik özellikleri, elektro-optik geçirgenlik sistemi deney düzeneği kullanılarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, kolesterik sıvı kristal yapıların frekans ve voltaja bağlı olarak değişen geçiş voltajı değerleri ($V_{P\text{-}FK}$ ve $V_{FK\text{-}H}$) ve tepki süresi (τ_t) parametreleri hesaplanmıştır. Geçiş voltajı değerlerinin, numunenin üretiminde kullanılan kiral katkı maddesi konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu artışın, kolesterik sıvı kristal yapılarda artan yük yoğunluğuna bağlı olarak oluşan enerji bariyeri ve perdeleme etkisinin

güçlenmesi sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir. Benzer şekilde, numunelerin tepki süresi parametrelerinin de numunenin üretiminde kullanılan kiral katkı maddesi oranının artışına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu davranış, numunelerde artan kiral katkı maddesi konsantrasyonu sonucu ortamın viskozitesindeki artış ile açıklanmıştır. Elektro-optik ölçümler sonucu yapılan analizlere göre, numunelerin geçiş voltajı ve tepki süresi parametrelerinin en düşük değere sahip olduğu numunenin A1 kodlu numune olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuç, A1 kodlu numunenin elektro-optik cihaz uygulamalarında kullanılması durumunda hem düşük güç tüketimi gerektirmesi hem de hızlı tepki verebilecek bir malzeme olması bakımından önemlidir. Ayrıca, numunelerin voltaja bağlı geçirgenlik grafikleri kullanılarak planar (P), fokal konik (FK) ve homeotropik (H) durumlarına sahip oldukları voltaj aralıkları belirlenmiştir. Bu voltaj değerlerine bağlı olarak, A1 kodlu numunenin P, FK ve H durumlarına ait POM görüntüleri ve fotoğrafları 1 kHz kare dalga varlığında, oda sıcaklığında elde edilmiştir. POM görüntüleri ve fotoğraflara göre, numunenin P ve H durumlarında şeffaf, FK durumunda ise opak bir görünüme sahip olduğu gözlemlenmiştir. A1, A2, A3 ve A4 kodlu numunelerin dielektrik özellikleri ise dielektrik/empedans analizörü kullanılarak elde edilmiştir. Bu kapsamda, numunelere ait kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal bileşenleri (ε' ve ε''), dielektrik anizotropi ($\Delta\varepsilon'$) ve ac iletkenlik (σ_{ac}) gibi bazı önemli parametreleri değişen voltaj ve frekansa bağlı olarak araştırılmıştır. Numunelerin ε' değerlerinin frekansa bağlı değişimleri incelendiğinde, P durumunda en düşük, H durumunda ise en yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu değişimin temel sebebinin, voltajın artmasına bağlı olarak sıvı kristal moleküllerinin elektrik alan yönünde yönelim göstermesi sonucu moleküler düzenin sağlanması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Frekansa bağlı olarak değişen ε'' grafiklerinden ise numunelerin incelenen frekans aralığında tek bir relaksasyon davranışına sahip oldukları görülmüştür. Bu grafikler kullanılarak elde edilen relaksasyon frekansı (f_R) parametrelerinin değerleri incelendiğinde, artan kiral katkı maddesi konsantrasyonuna bağlı olarak f_R değerinin, P, FK ve H durumlarında azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen veriler, düşük konsantrasyonda kiral katkı maddesi içeren kolesterik sıvı kristallerin yüksek frekans bölgesinde çalışabilecek yapılar olması bakımından önemlidir. Numunelerin $\Delta\varepsilon'$-f grafikleri kullanılarak pozitif dielektrik anizotropiden negatif dielektrik anizotropiye geçiş frekansı (f_c) değerleri belirlenmiştir ve f_c değerinin en yüksek olduğu numunenin A1 kodlu numune olduğu görülmüştür. Buna ek olarak numunelerin f_c değerlerinin numunede kullanılan kiral katkı maddesi

konsantrasyonun artışına bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, numunelerin Cole-Cole grafikleri kullanılarak relaksasyon zamanı (τ_R) ve dielektrik dayanım ($\delta\varepsilon'$) parametreleri de hesaplanmıştır. τ_R değerlerinin, numunelerin üretiminde kullanılan kiral katkı maddesi oranına bağlı olarak, P, FK ve H durumlarında arttığı gözlemlenmiş; $\delta\varepsilon'$ değerinin ise sadece P durumunda arttığı sonucuna ulaşılmıştır. τ_R parametresinin en düşük değere sahip olduğu A1 numunesi hızlı relaksasyon davranışı gösterecek olması bakımından önemlidir. Aynı zamanda, numunelerin Cole-Cole grafiklerinin incelenen frekans aralığında neredeyse Debye tipi davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Dielektrik ölçüm sonuçlarından elde edilen verilere göre, kolesterik sıvı kristal yapıda artan kiral katkı maddesi konsantrasyonuna bağlı olarak önemli değişimlerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Numunelerin voltaja bağlı değişim gösteren akım parametreleri incelendiğinde ise akım değerinin voltaja bağlı olarak arttığı görülmüş olup 40 V gerilim değerinde en yüksek akım değeri A1 kodlu numunede elde edilmiştir. Tez çalışmasının birinci bölümünde yapılan tüm değerlendirmeler göz önüne alındığında, optimum verimi sağlayan numunenin A1 (5CB+%4 S-811) kodlu numune olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu kapsamda, tez çalışmasının ikinci bölümünde, A1 kodlu numune kullanılarak yeni kompozit yapıların üretilmesi planlanmıştır.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde, yukarıda bahsetmiş olduğumuz nedenlerden dolayı, A1 kodlu numune baz olarak kullanılmış ve belirli konsantrasyondaki MR azo boya ve CdSeS/ZnS kuantum nokta katkılı yeni kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarının üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde; MR azo boya katkılı B1 kodlu numune, CdSeS/ZnS kuantum nokta katkılı B2 kodlu numune ve MR azo boya ile CdSeS/ZnS kuantum nokta yapılarının bir arada kullanıldığı B3 kodlu numunenin morfolojik, elektro-optik ve dielektrik özellikleri araştırılmış olup A1 kodlu numune ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu bakımdan, numunelerin ilk olarak faz geçiş sıcaklıklarının değişimi incelenmiştir. B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin faz geçiş sıcaklığı değerlerinin A1 kodlu numune ile karşılaştırıldığında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu değişim, B1 kodlu numunede kullanılan azo boya nedeniyle soğurum meydana gelmesi ve ayrıca kompozit yapıda yer alan safsızlık iyonlarının sayısının artması ile açıklanmıştır. B2 kodlu numunenin faz geçiş sıcaklığı değerinin azalmasının ise kompozit yapı içerisinde kuantum noktalar etrafında toplanan sıvı kristaller nedeniyle moleküler düzenin bozulması ve buna ek olarak kompozit yapıda oluşan safsızlık iyonlarının artması sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir. B3 kodlu numunenin faz

geçiş sıcaklığındaki azalma, kompozit yapıda yer alan azo boya, kuantum nokta ve sıvı kristallerin moleküler etkileşimleri ile açıklanmıştır. Kompozit yapıların geçiş voltajı değerleri incelendiğinde ve A1 kodlu numunenin geçiş voltajı değerleri ile karşılaştırma yapıldığında; B1 kodlu numunede artış gözlemlendiği, B2 ve B3 kodlu numunelerde azalma meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır. B1 kodlu numunenin geçiş voltajı değerlerinde oluşan artışın kompozit yapıda azo boya kullanılması sonucu artan viskozite ve ayrıca kompozit yapıda artan iyonik konsantrasyon sonucu sıvı kristal hücrenin hizalama tabakasında bazı iyonların adsorbe edilmesi nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. B2 kodlu numunede oluşan azalmanın sebebinin ise kompozit yapıda var olan kuantum nokta ve sıvı kristal molekülleri arasındaki dipol-dipol ve ankraj etkisi olduğu yorumu yapılabilmektedir. Azo boya ve kuantum nokta yapılarını bir arada içeren B3 kodlu numunede hem azo boyanın varlığı hem de kuantum noktaların oluşturduğu etkiye bağlı olarak geçiş voltajı değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlara tepki süresi parametresinde de rastlanmıştır. Numunelerin değişen dalga boyuna bağlı geçirgenlik değerleri incelendiğinde, zıtlık oranı parametresinin en yüksek değere sahip olduğu numunenin B3 kodlu numune olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buna ek olarak, kompozit yapıların görünür ışık bölgesinde elde edilen POM görüntüleri ve fotoğrafları ile ilgili değerlendirmeler yapıldığında; opak ve şeffaf özelliğe sahip oldukları gözlemlenmiştir. Elektro-optik ölçümler sonucunda elde edilen verilere göre, B2 kodu ile verilen kuantum nokta katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapının geçiş voltajı değerlerinin ve tepki süresi parametresinin en düşük değere sahip olduğu görülmüştür. Diğer yandan, akıllı pencere sistemi uygulamalarında kullanılması planlanan, B1, B2 ve B3 kodlu kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarda zıtlık oranı parametresinin değerinin yüksek olması gerekmektedir. Ancak, kuantum nokta katkılı B2 kodlu numunenin, yapısında azo boya içeren B1 ve B3 kodlu numuneler ile karşılaştırıldığında zıtlık oranı değerinin düşük olduğu görülmüştür. Azo boya ve kuantum nokta yapılarının bir arada kullanıldığı B3 kodlu numunede ise hem zıtlık oranının yüksek olması hem de yapısında var olan kuantum nokta etkisi sebebiyle geçiş voltajı değerlerinin ve tepki süresi parametresinin düşüş göstermesi; bu numunenin akıllı pencere sistemi uygulamalarında kullanılabilecek yeni bir malzeme olabileceğini düşündürmektedir. Numunelerin dielektrik özellikleri incelendiğinde, tez çalışmasının birinci bölümünde elde edilen sonuçlar ile benzer şekilde, ε' parametresinin değerinin P durumundan H durumuna geçişte moleküler düzenin sağlanmasına bağlı olarak artış gösterdiği görülmüştür. Azo boya katkılı B1 ve B3 kodlu numunelerde ise P ve FK

durumlarında ε′ değerinin A1 kodlu numune ile karşılaştırıldığında arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, azo boya moleküllerinin uygulanan elektrik alana bağlı olarak sıvı kristal molekülleri ile aynı doğrultuda yönelim göstermesi sonucu elektriksel polarizasyonun artması ile açıklanmıştır. İncelenen numunelerin ε″-f grafiklerinden elde edilen f_R değerlerinin A1 kodlu numune ile kıyaslandığında azaldığı görülmüştür. B3 kodlu numunenin f_R değerlerinin ise B1 ve B2 kodu ile verilen numunelere göre daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu bakımdan, B3 kodlu numunenin daha yüksek frekans değerlerinde çalışabilecek bir malzeme olduğu düşünülmektedir. Numunelerin geçiş frekansı değerlerinin ise A1 kodlu numune ile kıyaslandığında artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu sonuca göre, hem boya hem de kuantum nokta etkisinin numunelerin pozitif Δε′ değerinden negatif Δε′ değerine geçişini geciktirdiği yorumu yapılabilmektedir. B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin Cole-Cole grafikleri incelendiğinde, B1 ve B3 kodlu numunelerde Debye tipi olmayan davranış gözlemlenirken; B2 kodlu numunenin neredeyse Debye tipi davranış sergilediği tespit edilmiştir. Numunelerin Cole-Cole grafikleri kullanılarak elde edilen τ_R değerleri incelendiğinde ve A1 kodlu numunenin verileri ile karşılaştırıldığında; τ_R değerinin B3 kodlu numunenin H durumu dışında tüm durumlarda artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu sonuca göre, B3 kodlu numunenin H durumunda en düşük τ_R değerine sahip olması elektro-optik cihaz uygulamalarında daha hızlı relaksasyon gösterecek malzeme olarak kullanılabilecek olması bakımdan önemli kabul edilmiştir. B1, B2 ve B3 kodlu numunelerin δε′ değerlerinin ise P durumunda A1 kodlu numuneden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. FK durumunda ise B1 ve B3 kodlu numunelerin δε′ değerlerinin A1 kodlu numuneden daha yüksek olduğu; B2 kodlu numunenin ise δε′ değerlerinin A1 kodlu numuneden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, azo boya ve kuantum nokta katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarda moleküler düzenin ve dipol momentinin değişimi ile açıklanmıştır. Kompozit yapıların voltaja bağlı akım değerleri incelendiğinde ise tüm numunelerde artan voltaja bağlı olarak akım değerinin arttığı, 40 V gerilim değerinde B3 kodlu numune için elde edilen akım değerinin bu çalışmada incelenen tüm numunelerin akım değerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde yapılan detaylı incelemeler sonucunda, azo boya ve kuantum nokta yapılarını bir arada içeren B3 kodlu numunenin hem elektro-optik hem de dielektrik özelliklerinde olumlu yönde değişimler tespit edilmiştir.

Tez çalışmasında incelenen tüm numunelere ait sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarının değişen elektrik alana bağlı olarak opak ve şeffaf özelliğe sahip malzemeler oldukları gözlemlenmiştir. Ayrıca, kompozit yapıların üretiminde kullanılan MR azo boya ve CdSeS/ZnS kuantum nokta yapılarının kolesterik sıvı kristallerin elektro-optik ve dielektrik özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilen ve iyileştirebilen malzemeler oldukları tespit edilmiştir. Özellikle, kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarının üretiminde kullanılan MR azo boyanın elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde belirli dalga boyu aralığında ışık geçirgenliğini düşürmesi ve CdSeS/ZnS kuantum nokta yapılarının geçiş voltajı ve tepki süresi parametrelerinde düşüşe sebep olması bu malzemelerin önemini bir kez daha ortaya çıkarmıştır. Bu kapsamda, tez çalışmasında, hem ışık geçirgenliğinin hem de eşik voltajı ve tepki süresi parametrelerinin düşük olduğu azo boya ve kuantum nokta yapılarını bir arada içeren kolesterik sıvı kristal kompozit yapının üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen azo boya ve kuantum nokta katkılı kolesterik sıvı kristal kompozit yapının akıllı pencere sistemi uygulamalarında ışık açıp/kapatıcı cihaz olarak kullanılabileceği düşünülmektedir. Aynı zamanda, tez çalışması kapsamında üretimi gerçekleştirilen tüm numunelerin, değişen frekans ve voltaja bağlı fiziksel özelliklerinden faydalanılarak elektro-optik cihaz uygulamalarında kullanılabilecek yeni fonksiyonel malzemeler oldukları sonucuna ulaşılmıştır.

Tez çalışmasının temelini oluşturan kolesterik sıvı kristaller, sahip oldukları önemli fiziksel özellikleri nedeniyle son yıllarda pek çok araştırmacı tarafından büyük ilgi görmektedir. Özellikle, polimer ve boya kullanılarak üretilen kolesterik sıvı kristallerin elektro-optik özelliklerinin incelendiği çalışmalar artarak devam etmektedir. Diğer yandan, üretilen kompozit yapıların dielektrik özelliklerinin detaylı olarak incelendiği çalışmaların sayısının oldukça az olduğu görülmektedir. Ülkemizde yapılan çalışmalara bakıldığında da bu alanda yapılan çalışmaların sayısının son derece az olduğu tespit edilmiştir. Bu tez çalışması, hem mikro boyutta MR azo boya hem de nano boyutta kuantum nokta kullanılarak kolesterik sıvı kristal kompozit yapılarının üretimini içermesi ve ayrıca elektro-optik ve dielektrik özelliklerini kapsamlı bir şekilde incelemesi bakımından özgün bir çalışma niteliğindedir. Dolayısı ile ülkemizde kolesterik sıvı kristal temelli kompozit yapıların cihaz tabanlı uygulamalarında ve onların morfolojik, elektro-optik ve dielektrik özellikleri ile ilgili konularda çalışacak olan araştırmacılara rehber niteliğinde olabileceği düşünülmektedir.

8. KAYNAKLAR

[1] H. J. Shah, "Engineered interfaces for liquid crystal technology," Doktora tezi, Drexel Üniversitesi, Philadelphia, PA, USA, 2007.

[2] C. F. Dietrich, "Chirality effects in thermotropic and lyotropic nematic liquid crystals under confined geometries," Yüksek lisans tezi, Fiziksel Kimya Enstitüsü, Stuttgart Üniversitesi, Germany, 2019.

[3] O. Köysal, "Azo boya ve fulleren (C_{60}) katkılı nematik sıvı kristallerin elektro-optik özelliklerinin incelenmesi," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2007.

[4] G. Önsal, "Polimer-sıvı kristal kompozit yapılarda azo boyanın dielektrik ve opto-elektronik özelliklere etkisi," Doktora tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2019.

[5] 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," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2010.

[6] A. S. Zarin, "Electro-optic studies on chiral liquid crystals," Yüksek lisans tezi, Cochin Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, India, 2013.

[7] P. K. Tripathi, "Electrical and optical studies of some liquid crystals," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Lucknow Üniversitesi, Lucknow, UP, India, 2013.

[8] Ö. Yılmaz, "E_{63} kodlu NiPc+C_{61} katkılı nematik sıvı kristalin elektriksel ve manyetik özelliklerinin incelenmesi," Doktora tezi, Fizik Anabilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2018.

[9] 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.

[10] H. A. Abdulkadir, "Dispers turuncu boya katkılı nematik sıvı kristallerin yolcu-hancı tipi sistemlerde uygulanabilirliğinin araştırılması," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.

[11] N. Yılmaz Canlı, "Sıvı kristal sistemlerin mesomorfik, morfolojik ve elektro-optik özelliklerinin incelenmesi," Doktora tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.

[12] Ş. Üstünel, "Sıvı kristal ikili karışımlarında halperin-lubensky-ma ölçeklenme fonksiyonunun çift kırıcılık ölçümleri ile test edilmesi," Yüksek lisans tezi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2017.

[13] J. Mirzaei, "Optical and electro-optical properties of nematic liquid crystals with nanoparticle additives," Doktora tezi, Kimya Bölümü, Manitoba Üniversitesi, Winnipeg, MB, Canada, 2015.

[14] E. Şen, “Kloro antrakinon yapılı boya ve karbon nanotüp katkılı nematik sıvı kristallerin karakterizasyonu ve uygulanabilirliğinin araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.

[15] N. Kaya, “Mavi-kırmızı boya ve karbon nanotüp katkılı nematik sıvı kristallerin karakterizasyonu ve uygulanabilirliğinin araştırılması,” Doktora tezi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.

[16] 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.

[17] Y. Won, H. S. Shin, M. Jo, Y. J. Lim, R. Manda, ve S. H. Lee, “An electrically switchable dye-doped liquid crystal polarizer for organic light emitting-diode displays,” *Journal of Molecular Liquids*, c. 333, sayı 115922, 2021.

[18] P. Zhou, Y. Li, S. Liu, ve Y. Su, “Colour 3D holographic display based on a quantum-dot-doped liquid crystal,” *Liquid Crystal*, c. 46, sayı 10, ss. 1478–1484, 2019.

[19] Y.-T. Lai, J.-C. Kuo, ve Y.-J. Yang, “A novel gas sensor using polymer-dispersed liquid crystal doped with carbon nanotubes,” *Sensors and Actuators A: Physical*, c. 215, ss. 83–88, 2014.

[20] K. T. Cheng, C. K. Liu, C. L. Ting, ve A. Y. G. Fuh, “Optical addressing in dye-doped cholesteric liquid crystals,” *Optics Communications*, c. 281, sayı 20, ss. 5133–5139, 2008.

[21] S.-W. Oh, J.-M. Baek, J. Heo, ve T.-H. Yoon, “Dye-doped cholesteric liquid crystal light shutter with a polymer-dispersed liquid crystal film,” *Dyes and Pigments*, c. 134, ss. 36–40, 2016.

[22] P. Kumar, S.-W. Kang, ve S. H. Lee, “Advanced bistable cholesteric light shutter with dual frequency nematic liquid crystal,” *Optical Materials Express*, c. 2, sayı 8, ss. 1121–1134, 2012.

[23] Y. Inoue, M. Hattori, ve H. Moritake, “Thickness-independent dynamics in cholesteric liquid crystals,” *Optics Express*, c. 25, sayı 4, ss. 3566–3577, 2017.

[24] T.-H. Lin, Y. Huang, Y. Zhou, A. Y. G. Fuh, ve S.-T. Wu, “Photo-patterning micro-mirror devices using azo dye-doped cholesteric liquid crystals,” *Optics Express*, c. 14, sayı 10, ss. 4479–4485, 2006.

[25] Y.-C. Hsiao ve W. Lee, “Lower operation voltage in dual-frequency cholesteric liquid crystals based on the thermodielectric effect,” *Optics Express*, c. 21, sayı 20, ss. 23927–23933, 2013.

[26] P.-C. Wu, L. N. Lisetski, ve W. Lee, “Suppressed ionic effect and low-frequency texture transitions in a cholesteric liquid crystal doped with graphene nanoplatelets,” *Optics Express*, c. 23, sayı 9, ss. 11195–11204, 2015.

[27] A. Moheghi, “LC/polymer composites, scattering properties and application in displays,” Doktora tezi, Kent State Üniversitesi, Kent, ABD, 2017.

[28] B.-H. Yu, S.-M. Ji, J.-H. Kim, J.-W. Huh, ve T.-H. Yoon, “Light shutter using

dye-doped cholesteric liquid crystals with polymer network structure," *Journal of Information Display*, c. 18, sayı 1, ss. 13–17, 2017.

[29] C.-T. Wang ve T.-H. Lin, "Bistable reflective polarizer-free optical switch based on dye-doped cholesteric liquid crystal," *Optical Materials Express*, c. 1, sayı 8, ss. 1457–1462, 2011.

[30] C. H. Yu, P. C. Wu, ve W. Lee, "Electro-thermal formation of uniform lying helix alignment in a cholesteric liquid crystal cell," *Crystals*, c. 9, sayı 4, 2019.

[31] P.-C. Wu, G.-W. Wu, I. V. Timofeev, V. Y. Zyryanov, ve W. Lee, "Electro-thermally tunable reflective colors in a self-organized cholesteric helical superstructure," *Photonics Research*, c. 6, sayı 12, ss. 1094–1100, 2018.

[32] M.-C. Yeh, S.-H. Yang, ve W. Lee, "Color tuning in thermo-sensitive chiral photonic liquid crystals based on the pseudo-dielectric heating effect," *Journal of Molecular Liquids*, c. 296, sayı 112082, 2019.

[33] C.-C. Li, H.-Y. Tseng, T.-W. Pai, Y.-C. Wu, W.-H. Hsu, H.-C. Jau, C.-W. Chen, ve T.-H. Lin, "Bistable cholesteric liquid crystal light shutter with multielectrode driving," *Applied Optics*, c. 53, sayı 22, ss. E33-E37, 2014.

[34] R. Kumar ve K. K. Raina, "Electrically modulated fluorescence in optically active polymer stabilised cholesteric liquid crystal shutter," *Liquid Crystals*, c. 41, sayı 2, ss. 228–233, 2014.

[35] N. Podoliak, "Magneto-optic effects in colloids of ferromagnetic nanoparticles in nematic liquid crystals," Doktora tezi, Fiziksel ve Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Fizik ve Astronomi Bölümü, Southampton Üniversitesi, Southampton, UK, 2012.

[36] M. S. Erel, "Bazı kloro ve amino antrakinon yapılı boyarmaddelerin y-h tipi sıvı kristal sistemlerde kullanılabilirliğinin araştırılması," Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye 2012.

[37] L. G. Chen, "Thermo-optical properties of polymer dispersed liquid crystals," Doktora tezi, Uygulamalı Bilimler Bölümü, RMIT Üniversitesi, Melbourne, Australia, 2007.

[38] Khushboo, "Investigations on magnetic nanoparticle liquid crystal composites," Doktora tezi, Fizik ve Malzeme Bilimi Okulu, Thapar Mühendislik ve Teknoloji Enstitüsü, Patiala, India, 2017.

[39] 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.

[40] 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.

[41] P. Kubaşık, "Urasil türevlerinin dft çalışması ve antiparaziter aktiviteleri," Yüksek lisans tezi, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2020.

[42] M. Çelikez, "Polietilen tereftalat'tan (pet) yeni aktif metilen kenetleme

bileşeninin ve azo boyasının elde edilmesi," Yüksek lisans tezi, Kimya Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın, Türkiye, 2021.

[43] J. Mirzaei, M. Reznikov, ve T. Hegmann, "Quantum dots as liquid crystal dopants," *Journal of Materials Chemistry*, c. 22, ss. 22350–22365, 2012.

[44] I. L. Medintz, H. T. Uyeda, E. R. Goldman, ve H. Mattoussi, "Quantum dot bioconjugates for imaging, labelling and sensing," *Nature Materials*, c. 4, sayı 6, ss. 435–446, 2005.

[45] A. Bayram, "Kuantum noktaların deri sanayiinde kullanılabilirliği üzerine bir araştırma," Yüksek lisans tezi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2020.

[46] D. P. Singh, "Liquid crystal-nanomaterial composite systems," Doktora tezi, Sıvı Kristal Araştırma Laboratuvarı, Fizik Bölümü, Lucknow Üniversitesi, Lucknow, India, 2015.

[47] W. Haase ve S. Wrobel, *Relaxation Phenomenon: Liquid Crystal, Magnetic Systems, Polymers High- Tc Superconductors, Metallic Glasses*. Germany: Springer, 2003.

[48] L. W. May, "Polymer stabilized liquid crystals: topology-mediated electro-optical behavior and applications," Doktora tezi, Kimyasal Fizik Bölümü, Kent State Üniversitesi, Ohio, USA, 2016.

[49] V. Nova, C. Bachiller, B. Villacampa, R. Kronberger, ve V. E. Boria, "Characterization of nematic liquid crystals at microwave frequencies," *Crystals*, c. 10, sayı 1106, ss. 1–14, 2020.

[50] M. Pande, P. K. Tripathi, A. K. Misra, S. Manohar, R. Manohar, ve S. Singh, "Dielectric and electro-optical properties of polymer-stabilized liquid crystal system," *Applied Physics A*, c. 122, sayı 217, 2016.

[51] P. K. Tripathi, M. Pande, ve S. Singh, "Dielectric and electro-optical properties of polymer-stabilized liquid crystal. II. Polymer PiBMA dispersed in MBBA," *Applied Physics A*, c. 122, sayı 847, 2016.

[52] M. Gökçen, "Au/SiO2/n-GaAs (MOY) yapıların elektrik ve dielektrik karakteristiklerinin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi," Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2008.

[53] A. Deryal, "Montmorillonitçe zengin bentonitlerde sıcaklık, basınç ve parçacık büyüklüğünün dielektrik özelliklere ve aktivasyon enerjilerine etkisi," Doktora tezi, Fizik Anabilim Dalı, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2011.

[54] A. Yıldız, "Sıvı kristallerde faz geçişlerinin dielektrik spektroskopi yöntemi ile incelenmesi," Doktora tezi, Fizik Anabilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2019.

[55] M. Yıldırım, A. Allı, G. Önsal, N. Gök, ve O. Köysal, "Synthesis & chemical and dielectric characterization of poly (linoleic acid)-g-poly (dimethylaminoethyl methacrylate): a novel high-k graft copolymer," *Composites Part B*, c. 117, ss. 43–48, 2017.

[56] E. Orhan, M. Gökçen, ve O. Köysal, "Performance analysis and negative dielectric anisotropy behavior of nematic liquid crystal doped with newly

synthesized 1-(pchlorobenzyl)- 5-nitrobenzimidazole cobalt complex," *Synthetic Metals*, c. 240, ss. 8–14, 2018.

[57] G. Kocakülah, G. Algül, ve O. Köysal, "Effect of CdSeS/ZnS quantum dot concentration on the electro-optical and dielectric properties of polymer stabilized liquid crystal," *Journal of Molecular Liquids*, c. 299, sayı 112182, ss. 1–8, 2020.

[58] S. Zengin, "Farklı montmorillonit kil numunelerinin dielektrik özellikleri üzerine nemin etkisi," Yüksek lisans tezi, Fizik Anabilim Dalı, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2007.

[59] E. Kemiklioğlu, "Polymer stabilized and dispersed blue phases," Doktora tezi, Kimyasal Fizik Bölümü, Kent State Üniversitesi, Ohio, USA, 2014.

[60] Ç. Özden, "Termotropik kolesterik sıvı kristaller: mezomorfik, termo-morfolojik ve termooptiksel özelliklerin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Fizik Anabilim Dalı, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye, 2013.

[61] R. F. Zola, "Effects of electric field, surface alignment and guest materials in cholesteric liquid crystals," Doktora tezi, Kimyasal Fizik Bölümü, Kent State Üniversitesi, Ohio, USA, 2012.

[62] S.-Y. Lu, "Electrically-tunable colors of chiral liquid crystals for photonic and display applications," Doktora tezi, Kimyasal Fizik Bölümü, Kent State Üniversitesi, Ohio, USA, 2010.

[63] R. Eelkema, "Liquid crystals as amplifiers of molecular chirality," Doktora tezi, Organik ve Moleküler İnorganik Kimya Bölümü, Stratingh Kimya Enstitüsü, Groningen Üniversitesi, The Netherlands, 2006.

[64] Y. Zhou, "Cholesteric liquid crystal photonic crystal lasers and photonic devices," Doktora tezi, Fotonik ve Optik Koleji, Central Florida Üniversitesi, Orlando, Florida, 2008.

[65] D. I. Avşar, "Synthesis and characterization of sensor microparticles templated from cholesteric liquid crystals," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2020.

[66] F. Zhang, "Physical properties of cholesteric liquid crystal displays," Doktora tezi, Kent State Üniversitesi, Ohio, USA, 2001.

[67] M. Xu, "Electro-optical properties of cholesteric liquid crystal device and application of dual frequency cholesteric liquid crystals," Doktora tezi, Kent State Üniversitesi, Ohio, USA, 2000.

[68] G. Posnjak, *Topological Formations in Chiral Nematic Droplets*, 1st ed. Springer Nature Switzerland, 2018.

[69] A. Varanytsia, "Augmenting electro-optic and optical behavior of cholesteric and nematic liquid crystals," Doktora tezi, Kent State Üniversitesi, Ohio, USA, 2018.

[70] M. Mishra, R. S. Dabrowski, ve R. Dhar, "Thermodynamical, optical, electrical and electro-optical studies of a room temperature nematic liquid crystal 4-pentyl-4′-cyanobiphenyl dispersed with barium titanate nanoparticles," *Journal of Molecular Liquids*, c. 213, ss. 247–254, 2016.

[71] R. Verma, M. Mishra, R.Dhar, ve R.Dabrowski, "Single walled carbon nanotubes persuaded optimization of the display parameters of a room temperature liquid

crystal 4-pentyl-4′cyanobiphenyl," *Journal of Molecular Liquids*, c. 221, ss. 190–196, 2016.

[72] S.-W. Oh, S.-H. Kim, ve T.-H. Yoon, "Thermal control of transmission property by phase transition in cholesteric liquid crystals," *Journal of Materials Chemistry C*, c. 6, ss. 6520–6525, 2018.

[73] S. P. Yadav, M. Pande, R. Manohar, ve S. Singh, "Applicability of TiO_2 nanoparticle towards suppression of screening effect in nematic liquid crystal," *Journal of Molecular Liquids*, c. 208, ss. 34–37, 2015.

[74] M. Yıldırım, O. Köysal, G. Önsal, ve E. Gümüş, "Effect of iron phthalocyanine (FePc) concentration on electrical and dielectric properties of the nematic liquid crystal composites," *Journal of Molecular Liquids*, c. 223, ss. 868–872, 2016.

[75] P. Kumar, V. Sharma, ve K. K. Raina, "Studies on inter-dependency of electrooptic characteristics of orange azo and blue anthraquinone dichroic dye doped polymer dispersed liquid crystals," *Journal of Molecular Liquids*, c. 251, ss. 407–416, 2018.

[76] H.-H. Liang, P.-H. Wang, C.-C. Wu, S.-C. Hsu, ve J.-Y. Lee, "Polymer network morphology and electro-optical properties of electrothermal switchable bistable polymer-stabilized cholesteric texture light shutters with various chiral dopant concentrations," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, c. 552, sayı 1, ss. 111–122, 2012.

[77] O. Köysal, "Conductivity and dielectric properties of cholesteric liquid crystal doped with single wall carbon nanotube," *Synthetic Metals*, c. 160, sayı 9–10, ss. 1097–1100, 2010.

[78] Ö. T. Özmen, K. Goksen, A. Demir, M. Durmus, ve O. Köysal, "Investigation of photoinduced change of dielectric and electrical properties of indium (III) phthalocyanine and fullerene doped nematic liquid crystal," *Synthetic Metals*, c. 162, ss. 2188–2192, 2012.

[79] R. R. Deshmukh ve A. K. Jain, "The complete morphological, electro-optical and dielectric study of dichroic dye-doped polymer-dispersed liquid crystal," *Liquid Crystals*, c. 41, sayı 14, ss. 960–975, 2014.

[80] R. R. Deshmukh and A. K. Jain, "Effect of anti-parallel and twisted alignment techniques on various properties of polymer stabilised liquid crystal (PSLC) films," *Liquid Crystals*, c. 43, sayı 4, ss. 436–447, 2016.

[81] S. Patari ve A. Nath, "Tunable dielectric and conductivity properties of two 4-n alkoxy benzoic acid," *Opto-Electronics Review*, c. 26, sayı 1, ss. 35–43, 2018.

[82] G. Kocakülah, M. Yıldırım, O. Köysal, ve İ. Ercan, "Influence of UV light intensity on dielectric behaviours of pure and dye-doped cholesteric liquid crystals," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, c. 31, ss. 22385–22397, 2020.

[83] P. Kumar, Neeraj, S.-W. Kang, S. H. Lee, ve K. K. Raina, "Analysis of dichroic dye-doped polymer-dispersed liquid crystal materials for display devices," *Thin Solid Films*, c. 520, ss. 457–463, 2011.

[84] P. Kumar, V. Sharma, C. Jaggi, P. Malik, ve K. K. Raina, "Orientational control of liquid crystal molecules via carbon nanotubes and dichroic dye in polymer dispersed liquid crystal," *Liquid Crystals*, c. 44, sayı 5, ss. 843–853, 2017.

[85] J. Kumar, V. Prasad, ve M. Manjunath, “Quantum dots dispersed hockey stick nematic liquid crystal: Studies on dielectric permittivity, elastic constants and electrical conductivity,” *Journal of Molecular Liquids*, c. 266, ss. 10–18, 2018.

[86] X. Liu, X. Xia, L. Yang, J. Zhu, M. Xu, G. Zhang, G. Xia, L. Qiu, ve H. Lu, “Physical properties of liquid crystals doped with CsPbBr3 quantum dots,” *Liquid Crystals*, c. 48, sayı 10, ss. 1357–1364, 2021.

[87] G. Pathak, K. Agrahari, A. Roy, A. Srivastava, O. Strzezysz, K. Garbat, ve R. Manohar, “Dispersion of fluorescent dye in the nematic liquid crystal: Enhanced photoluminescence and high birefringence,” *Opto-Electronics Review*, c. 26, ss. 317–324, 2018.

[88] Z. Seidalilir, E. Soheyli, M. Sabaeian, ve R. Sahraei, “Enhanced electrochemical and electro optical properties of nematic liquid crystal doped with Ni:ZnCdS/ZnS core/shell quantum dots,” *Journal of Molecular Liquids*, c. 320, sayı 114373, 2020.

[89] A. Rastogi, F. P. Pandey, A. S. Parmar, S. Singh, G. Hegde, ve R. Manohar, “Effect of carbonaceous oil palm leaf quantum dot dispersion in nematic liquid crystal on zeta potential, optical texture and dielectric properties,” *Journal of Nanostructure in Chemistry*, c. 11, ss. 527–548, 2021.

[90] S. J. Shivaraja, S. Mishra, K. Dutta, R. K. Gupta, ve V. Manjuladevi, “Frequency dependence of dielectric permittivity and conductivity of functionalized carbon nanotube-nematic liquid crystal nanocomposite,” *Journal of Molecular Liquids*, c. 349, sayı 118168, 2022.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Gülsüm KOCAKÜLAH

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Fizik Anabilim Dalı	Düzce Üniversitesi	2022
Y. Lisans	Fizik Anabilim Dalı	Düzce Üniversitesi	2018
Lisans	Fizik Bölümü	Dokuz Eylül Üniversitesi	2012
Lise	Fen Bilimleri	Urla Lisesi	2007

YAYINLAR

[1] G. Kocakülah ve O. Köysal, "Electro-optical and dielectric response of quantum dot-doped cholesteric liquid crystal composites," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics,* c. 33, ss. 5489–5500, 2022.

[2] G. Kocakülah, O. Köysal, ve A. Kahyaoğlu, "Electro-optical Performance Investigation of Cholesteric Liquid Crystal Containing Azo Dye: Light Shutter Device Application," *Journal of Electronic Materials,* c. 50, ss. 497–510, 2021.

[3] G. Kocakülah, M. Yıldırım, O. Köysal, ve İ. Ercan, "Influence of UV light intensity on dielectric behaviours of pure and dye-doped cholesteric liquid crystals," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics,* c. 31, ss. 22385–22397, 2020.

[4] G. Kocakülah, A. Kahyaoğlu, M. Yıldırım, ve O. Köysal, "Effects of CdTe Quantum Dot Dispersal on Current-Voltage Characteristics in Liquid Crystalline Mediums of E63, E7 and SCLP," *Düzce University Journal of Science & Technology,* c. 8, sayı 3, ss. 1957–1963, 2020.

[5] G. Kocakülah, S. Balci, ve O. Köysal, "Determination of Phase Transition and Electro-optical Behaviors of Quantum Dot Doped Polymer Dispersed Liquid Crystal," *Journal of Electronic Materials,* c. 49, ss. 3427–3434, 2020.

[6] G. Kocakülah, G. Algül, ve O. Köysal, "Effect of CdSeS/ZnS quantum dot concentration on the electro-optical and dielectric properties of polymer stabilized liquid crystal," *Journal of Molecular Liquids,* c. 299, sayı 112182, 2020.

[7] G. Kocakülah, M. Yıldırım, ve O. Köysal, "Effect of intermolecular charge transfer between Ni(II)Pc and CdSeS/ZnS QD on dielectric relaxation mechanism of 5CB nematic liquid crystals in the presence of UV illumination," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics,* c. 31, ss. 2583–2590, 2020.

[8] G. Kocakülah, G. Önsal, ve O. Köysal, "Dielectric properties of CdSeS/ZnS quantum dots doped PMMA/LC composite structure," *Phase Transitions,* c. 92, sayı 10, ss. 907–915, 2019.

[9] G. Önsal, G. Kocakülah, A. Kahyaoğlu, ve O. Köysal, "Influence of azo dye concentration on dielectric response in polymer dispersed liquid crystal composites," *Journal of Molecular Liquids,* c. 284, ss. 607–615, 2019.

[10] G. Kocakülah ve O. Köysal, "Enhancement of electro-optical and dielectric properties of CdSeS/ZnS semiconductor quantum-dot-doped nematic liquid crystals in the presence of UV-illumination effect," *Applied Physics A,* c. 125, sayı 435, 2019.

[11] G. Kocakülah, G. Önsal, ve O. Köysal, "Electro-optical and dielectric performance analysis: the influence of azo dye on polymer/LC composite structures," *Applied Physics A,* c. 125, sayı 30, 2019.

[12] G. Kocakülah, G. Önsal, K. Goksen, İ. Ercan, ve O. Köysal, "Concentration effect of Cadmium Selenide Sulphide/Zinc Sulphide quantum dots on electro-optic and dielectric properties in nematic liquid crystals composite," *Physica B: Condensed Matter,* c. 550, ss. 47–59, 2018.

[13] O. Köysal, G. Kocakülah, M. Yıldırım, G. Önsal, ve Ö. Tüzün Özmen, "Dielectric and Performance Analysis of CdTe Quantum Dots Doped Nematic Liquid Crystal," *Düzce University Journal of Science & Technology,* c. 6, sayı 1, ss. 254–262, 2018.

[14] G. Kocakülah, K. Gökşen, ve O. Köysal, "CdSeS/ZnS Kuantum Nokta Katkılı 5CB Nematik Sıvı Kristalinde Optik Bant Aralıklarının İncelenmesi," *Düzce Üniversitesi*

Bilim ve Teknoloji Dergisi, c. 6, sayı 1, ss. 123–130, 2018.