



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER-SIVI KRİSTAL KOMPOZİT YAPILARDA AZO
BOYANININ DİELEKTRİK VE OPTO-ELEKTRONİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

GÜLNUR ÖNSAL

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. OĞUZ KÖYSAL**

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİMER-SIVI KRİSTAL KOMPOZİT YAPILARDA AZO
BOYANIN DİELEKTRİK VE OPTO-ELEKTRONİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Gölnür Önsal tarafından hazırlanan tez çalışması aşğıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri 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. Yusuf ATALAY

Sakarya Üniversitesi

Doç. Dr. Kadir GÖKŞEN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Erdoğan TARCAN

Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Mert YILDIRIM

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 13/06/2019

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.

13 Haziran 2019

Glnur NSAL

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.

Çalışmalarım sırasında 2211-Yurt içi Lisansüstü Burs Programı ile beni maddi açıdan destekleyen bilim insanlarının, araştırmacıların yetiştirilmeleri ve geliştirilmeleri için olanaklar sağlayan TÜBİTAK BİDEB'e, çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2018.05.02.811 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

13 Haziran 2019

Gölnur ÖNSAL

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
KISALTMALAR.....	xi
SİMGELER	xii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
EXTENDED ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ	1
2. SIVI KRİSTALLER	4
2.1. SIVI KRİSTALLERİN TANIMI	4
2.2. SIVI KRİSTALLERİN YAPISI	6
2.3. SIVI KRİSTALLERİN SINIFLANDIRILMASI.....	7
2.3.1. Termotropik Sıvı Kristaller	8
2.3.1.1. Nematik Sıvı Kristaller.....	9
2.3.1.2. Simektik Sıvı Kristaller.....	10
2.3.1.3. Kolesterik Sıvı Kristaller.....	12
2.3.2. Liyotropik Sıvı Kristaller	13
2.4. SIVI KRİSTALLERİN YÖNLENİMLERİ.....	14
2.5. SIVI KRİSTALLERİN KULLANIM ALANLARI	15
3. POLİMER / SIVI KRİSTAL KOMPOZİT YAPILAR.....	17
3.1. POLİMERLER.....	18
3.2. POLİMER DAĞILMIŞ SIVI KRİSTALLER.....	20
3.3. PDSK HAZIRLAMA YÖNTEMLERİ.....	22
3.3.1. Enkapsülasyon Yöntemi	23
3.3.2. Faz Ayırma Yöntemi.....	23
3.3.2.1. Polimerizasyon Kaynaklı Faz Ayırma Yöntemi.....	23
3.3.2.2. Sıcaklık Kaynaklı Faz Ayırma Yöntemi.....	24
3.3.2.3. Çözücü Kaynaklı Faz Ayırma Yöntemi.....	25
3.4. PDSK YAPILARIN KATKILANMASI	26
3.4.1. Boya Katkılı PDSK Yapılar	26
3.4.2. Dikroik Boyalar	27
3.4.2.1. Azo Boyalar.....	28
3.5. PDSK KULLANIM ALANLARI	29
4. SIVI KRİSTAL VE POLİMER YAPILARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ.....	31

4.1. ANİZOTROPİ.....	31
4.1.1. Optik Anizotropi	31
4.1.2. Dielektrik Anizotropi	33
4.2. ELASTİK SABİTİ	34
4.3. DÜZEN PARAMETRESİ	35
4.4. ÖRGÜ (ANCHORING) ENERJİSİ	36
4.5. DİELEKTRİK ÖZELLİKLER	37
4.5.1. Dielektrik Kutuplanma.....	39
4.5.1.1. Elektronik Kutuplanma	40
4.5.1.2. Atomik Kutuplanma	41
4.5.1.3. Dipolar Kutuplanma	41
4.5.1.4. ArayüzeySEL Kutuplanma.....	42
4.5.2. Kompleks Dielektrik Sabiti	43
4.5.3. Kayıp Tanjant Faktörü.....	44
4.5.4. Dielektrik Durulma	45
4.5.5. Cole-Cole Yaklaşımı.....	45
4.6. OPTO-ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ	46
4.6.1. Geçirgenlik.....	47
4.6.2. Tepki Süresi	49
5. DENEYSEL KISIM	51
5.1. DENEYDE KULLANILAN MALZEMELER.....	51
5.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI.....	54
5.3. ÖLÇÜMLER.....	56
5.3.1. Elektriksel ve Dielektrik Ölçümler	56
5.3.2. Opto-Elektronik Ölçümler	56
5.3.3. Morfolojik Ölçümler	58
5.3.4. Termal Ölçümler	59
5.4. BULGULAR VE TARTIŞMA	60
5.4.1. Elektriksel ve Dielektrik Özellikler	60
5.4.2. Opto-Elektronik Özellikler	73
5.4.2.1. Dikroik Oranı.....	73
5.4.2.2. Soğurma	75
5.4.2.3. Geçirgenlik.....	76
5.4.2.4. Tepki Süresi.....	78
5.4.3. Morfolojik Özellikler	80
5.4.4. Termal Özellikler	83
5.4.4.1. Faz Geçiş Sıcaklığı	83
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	88
7. KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ.....	98

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Maddenin katı kristal ve sıvı fazı arasında sıcaklığa bağlı faz geçiş diyagramı.....	5
Şekil 2.2. Çubuksu, disk biçimli ve muz biçimli sıvı kristallerin 3-D görünümü.	6
Şekil 2.3. Sıvı kristal molekülünün genel yapısı.	7
Şekil 2.4. Sıvı kristallerin sınıflandırılmasının şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.5. Termotropik sıvı kristallerin faz geçiş süreci.	9
Şekil 2.6. Nematik sıvı kristallerin a) şematik gösterimi ve b) polarize mikroskoptaki görüntüsü.....	10
Şekil 2.7. a) Simektik A ve b) Simektik C sıvı kristallerin şematik gösterimi ve polarize mikroskoptaki görüntüsü.	11
Şekil 2.8. Kolesterik fazda moleküler yönelim.....	12
Şekil 2.9. Liyotropik sıvı kristallerin faz geçişi.....	13
Şekil 2.10. Liyotropik bir sıvı kristalin şekli ve sabunun açık formülü.....	13
Şekil 2.11. Sıvı kristal moleküllerinin hücre içerisinde a) paralel b) dik ve c) bükülmüş yönelimi.	14
Şekil 2.12. Sıvı kristallerin kullanım alanları.	16
Şekil 3.1. a) PDSK yapı b) PSSK yapı için örnek POM görüntüleri ve c) PDSK yapı d) PSSK yapı için sıvı kristaller uzaklaştırıldıktan sonra örnek SEM görüntüleri.	18
Şekil 3.2. Stiren monomeri ve polistiren polimerinin gösterimi.....	18
Şekil 3.3. Farklı polimer yapılarının şematik gösterimi.	19
Şekil 3.4. PDSK kompozit yapılarda optik ışınımın yapı içerisinden geçişinin şematik gösterimi; (a) $V=0$, (b) $V \neq 0$	21
Şekil 3.5. PDSK yapıda soğutma hızının oranına göre sıvı kristal damlacıkların büyüklük değişimi.	25
Şekil 3.6. PDSK hazırlama yöntemlerine uygun olan örnek polimerler.	26
Şekil 3.7. Sıvı kristal molekülleri içerisinde azo boya moleküllerinin trans-cis formu.	29
Şekil 3.8. PDSK filmlerin akıllı pencerelerde kullanımı.	29
Şekil 3.9. PDSK yapıların optik dijital hafıza cihazlarında kullanımına bir örnek.	30
Şekil 4.1. Sıvı kristal ortama gönderilen polarize olmayan ışığın davranışı.	31
Şekil 4.2. Sıvı kristallerde a) sıradan polarize ışının ve b) sıradan olmayan polarize ışının sıvı kristalin moleküller eksenine boyunca yayılması.	32
Şekil 4.3. Pozitif dielektrik anizotropiye sahip sıvı kristal moleküllerin yönelimi a) $E=0$ b) $E \neq 0$; negatif dielektrik anizotropiye sahip sıvı kristal moleküllerin yönelimi c) $E=0$ d) $E \neq 0$	33
Şekil 4.4. Sıvı kristal moleküllerinde meydana gelen direktör deformasyon çeşitleri; a) burulma b) eğilme ve c) bükülme.	34
Şekil 4.5. Sıvı kristal yapılarda moleküllerin ortalama yönelimi ve düzen parametresinin gösterimi.	35
Şekil 4.6. Sıvı kristal yapılarda düzen parametresinin sıcaklığa bağlı değişim fonksiyonu.....	36

Şekil 4.7. Paralel yönlenime sahip bir hücrede sıvı kristal moleküllerinin yığın bölgesinde ve çeperlerdeki yönlenimi.	37
Şekil 4.8. Paralel plakaları arasında a) boşluk olan ve b) dielektrik malzeme bulunan kondansatör.	38
Şekil 4.9. Dielektrik kutuplanma mekanizmalarının frekansa bağlı değişimi.	40
Şekil 4.10. Elektronik kutuplanmanın şematik gösterimi.	40
Şekil 4.11. Atomik kutuplanmanın şematik gösterimi.	41
Şekil 4.12. Dipolar kutuplanmanın şematik gösterimi.	41
Şekil 4.13. Arayüzey kutuplanmanın şematik gösterimi.	42
Şekil 4.14. Kompleks dielektrik sabitinin frekansa bağlı değişimi.	44
Şekil 4.15. Kayıp tanjant vektör diyagramı.	44
Şekil 4.16. Tek relaksasyon zamanına sahip sistemler için Cole-Cole diyagramı.	46
Şekil 4.17. PDSK kompozit yapılar için Geçirgenlik-Voltaj grafiğinin şematik gösterimi.	47
Şekil 4.18. Farklı voltaj seviyelerinde ışığın sıvı kristal damlacıktan geçişi.	48
Şekil 5.1. E63 kodlu nematik sıvı kristalin moleküller yapısını oluşturan bileşenler. ...	51
Şekil 5.2. E63 kodlu nematik sıvı kristalin Soğurum-Dalga boyu grafiği.	52
Şekil 5.3. Methyl Red Azo Boyanın moleküller yapısı.	53
Şekil 5.4. Methyl Red Azo Boyanın Soğurum-Dalga boyu grafiği.	53
Şekil 5.5. Sıvı kristal hücrenin yapısı.	54
Şekil 5.6. Hazırlanan numunelerin sıvı kristal hücrelere kılcallık etkisi ile doldurulmasının şematik gösterimi.	55
Şekil 5.7. Örneklerin UV ışık ile polimerizasyonunun şematik gösterimi.	56
Şekil 5.8. Dielektrik ölçümler için kullanılan deney düzeneği.	56
Şekil 5.9. Optik ölçümler için kullanılan deney düzeneği.	57
Şekil 5.10. Opto-elektronik ölçümler için kullanılan optik geçirgenlik deney düzeneği.	58
Şekil 5.11. Morfolojik ölçüm için kullanılan SEM cihazı.	59
Şekil 5.12. Termal ölçüm için kullanılan DSC cihazı deney düzeneği.	59
Şekil 5.13. Termal ölçüm için kullanılan POM cihazı deney düzeneği.	60
Şekil 5.14. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların ϵ' -log f değişim grafiği.	61
Şekil 5.15. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların ϵ'' -log f değişim grafiği.	62
Şekil 5.16. Relaksasyon frekansını hesaplamak için örnek ϵ'' -log f değişim grafiği.	63
Şekil 5.17. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların $\Delta\epsilon'$ -log f değişim grafiği.	64
Şekil 5.18. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların $\tan\delta$ -f değişim grafiği.	65
Şekil 5.19. a) Saf PDSK b) %1 MR c) %3 MR ve d) %5 MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların C-V grafikleri.	67
Şekil 5.20. Eşik voltajının hesaplaması için örnek C-V değişim grafiği.	67
Şekil 5.21. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların V_{th} -MR boya konsantrasyonu grafiği.	68
Şekil 5.22. Saf PDSK ve MR boya katkılı PDSK yapıların K_{11} -MR boya konsantrasyonu grafiği.	69
Şekil 5.23. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların Cole-Cole grafiği.	70
Şekil 5.24. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların log σac -log f grafiği.	72
Şekil 5.25. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların I-V grafiği.	73
Şekil 5.26. Işığın boya molekülüne paralel ve dik gelme durumunda boyanın soğurma durumunun şematik gösterimi.	73

Şekil 5.27. a) E63+%1 MR b) E63+%3 MR ve c) E63+%5 MR kompozit yapılarının paralel ve dik soğurum spektrumları.....	74
Şekil 5.28. MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların Soğurum-Dalga boyu grafiği.	75
Şekil 5.29. a) Elektrik alanın uygulanmadığı durumda ve b) elektrik alanın uygulandığı durumda MR katkılı PDSK kompozit yapıdaki moleküler yönelimin şematik gösterimi c) elektrik alanın uygulanmadığı durumda ve d) elektrik alanın uygulandığı durumda filmin orijinal görüntüsü.	77
Şekil 5.30. PDSK kompozit yapı için kare dalganın a) osiloskop ekran görüntüsü ve b) Geçirgenlik-Zaman grafiği.	78
Şekil 5.31. a) Saf PDSK b) %1 MR c) %3 MR d) %5 MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların Geçirgenlik-Zaman grafikleri.	79
Şekil 5.32. Yükselme süresi (τ_y), düşme süresi (τ_d), ve tepki süresinin (τ_t), MR konsantrasyonuna bağlı değişim grafiği.	80
Şekil 5.33. a) Saf PDSK b) %1 MR c) %3 MR d) %5 MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların SEM görüntüleri.....	81
Şekil 5.34. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların MR boya konsantrasyonuna bağlı sıvı kristal damlacık boyutu değişim grafiği.	82
Şekil 5.35. a) Saf PDSK b) %1 MR c) %3 MR ve d) %5 MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların DSC grafikleri.	83
Şekil 5.36. a) 75 °C b) 80 °C c) 85 °C d) 90 °C e) 95 °C ve f) 100 °C sıcaklık değerinde saf PDSK kompozit yapı için POM görüntüleri.	84
Şekil 5.37. a) 75 °C b) 80 °C c) 85 °C d) 90 °C e) 95 °C ve f) 100 °C sıcaklık değerinde PDSK+%1 MR kompozit yapı için POM görüntüleri.....	85
Şekil 5.38. a) 75 °C b) 80 °C c) 85 °C d) 90 °C e) 95 °C ve f) 100 °C sıcaklık değerinde PDSK+%3 MR kompozit yapı için POM görüntüleri.....	86
Şekil 5.39. a) 75 °C b) 80 °C c) 85 °C d) 90 °C e) 95 °C ve f) 100 °C sıcaklık değerinde PDSK+%5 MR kompozit yapı için POM görüntüleri.....	87

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 5.1. Saf PDSK, PDSK+%1 MR, PDSK+%3 MR ve PDSK+%5 MR kompozit yapılar için bazı önemli dielektrik parametreler.	63
Çizelge 5.2. Saf PDSK, PDSK+%1 MR, PDSK+%3 MR ve PDSK+%5 MR kompozit yapılar için bazı önemli dielektrik parametreler.	71
Çizelge 5.3. %1, %3 ve %5 MR katkılı E63 kompozit yapıların DR ve S parametreleri.....	75
Çizelge 5.4. Saf PDSK, PDSK+%1 MR, PDSK+%3 MR ve PDSK+%5 MR kompozit yapılar için yükselme süresi (τ_y), düşme süresi (τ_d) ve tepki süresinin (τ_t) gösterimi.	79

KISALTMALAR

AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
DNA	Deoksiribo nükleik asit
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
GM	Goldstone modu
He-Ne	Helyum-Neon
ITO	İndiyum kalay oksit
MR	Metil red azo boya
NOA65	Norland optical adhesive 65
n-tipi	Negatif-tipi
p-tipi	Pozitif-tipi
PDSK	Polimer dağılmış sıvı kristal
POM	Polariza optik mikroskop
PMMA	Polimetilmetakrilat
PS	Polistiren
PSSK	Polimer stabilize sıvı kristal
PVA	Polivinil alkol
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
UV/VIS	Ultraviyole/Görünür bölge
3-D	Üç boyut

SİMGELER

A	Yüzey alanı
A_{off}	Elektrik alan uygulanmadığı durumda soğurum miktarı
A_{on}	Elektrik alan uygulandığı durumda soğurum miktarı
$A_{\parallel}$	Paralel soğurum miktarı
$A_{\perp}$	Dik soğurum miktarı
C	Kondansatörün sığası
C_0	Plakaları arasında boşluk bulunan kondansatörün sığası
$C_{\parallel}$	Kapasitansın paralel bileşeni
$C_{\perp}$	Kapasitansın dik bileşeni
cm	Santimetre
CR	Kontrast oranı
d	Kalınlık
E	Elektrik alan
eV	Elektronvolt
DR	Dikroik oranı
F	Farad
f_c	Geçiş frekansı
f_R	Relaksasyon frekansı
G	İletkenlik
h	Planck sabiti
Hz	Hertz
I	Akım
I_{gelen}	Gelen ışık şiddeti
$I_{\text{saçılan}}$	Saçılan ışık şiddeti
$I_{\text{çıkan}}$	Çıkan ışık şiddeti
K_{11}	Eğilme elastik sabiti
K_{22}	Burulma elastik sabiti
K_{33}	Bükülme elastik sabiti
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
mW	Miliwatt
mm	Milimetre
ms	Milisaniye
nA	Nanoamper
nm	Nanometre
n_e	Sıradan olmayan kırılma indisi
n_o	Sıradan kırılma indisi
n_{SK}	Sıvı kristal damlacıklarının kırılma indisi
n_p	Polimerin kırılma indisi
$n_{\parallel}$	Kırılma indisinin paralel bileşeni
$n_{\perp}$	Kırılma indisinin dik bileşeni
$\hat{n}$	Moleküllerin ortalama yönelim vektörü
P	Helis adımı

R	Yarıçap
s	Saniye
S	Düzen parametresi
Si	Silisyum
T	Geçirgenlik
$\tan \delta$	Kayıp tanjant faktörü
T_f	Akış sıcaklığı
T_g	Cam geçiş sıcaklığı
T_{N-I}	Nematik fazdan izotropik faza geçiş sıcaklığı
T_{off}	Minimum geçirgenlik
T_{on}	Maksimum geçirgenlik
V	Volt
V_{on}	Satürasyon voltajı
V_{th}	Eşik voltajı
W	Örgü enerjisi
W_θ	Polar örgü enerjisi
$W_\emptyset$	Mutlak örgü enerjisi
α	Dağılım parametresi
ω	Açısal frekans
$\delta\epsilon'$	Dielektrik dayanım
Δn	Optik anizotropi
$\Delta\epsilon'$	Dielektrik anizotropi
ΔT	Geçirgenlik farkı
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ'_s	Dielektrik sabitinin düşük frekans limiti
ϵ'_∞	Dielektrik sabitinin yüksek frekans limiti
$\epsilon'_{ }$	Dielektrik sabitinin paralel bileşeni
$\epsilon'_{\perp}$	Dielektrik sabitinin dik bileşeni
ϵ^*	Kompleks dielektrik sabiti
ϵ'	Kompleks dielektrik sabitinin reel kısmı
ϵ''	Kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmı
γ	Rotasyonel viskozite
μ	Dipol moment
μm	Mikrometre
μs	Mikrosaniye
π	Pi sayısı
σ	Yüzeysel yük yoğunluğu
σ_{AC}	AC iletkenlik
τ_R	Relaksasyon zamanı
τ_d	Düşme süresi
τ_y	Yükselme süresi
τ_t	Tepki süresi
%	Yüzde
Ω	Ohm

ÖZET

POLİMER-SIVI KRİSTAL KOMPOZİT YAPILARDA AZO BOYANININ DİELEKTRİK VE OPTO-ELEKTRONİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Gölnur ÖNSAL

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL

Haziran 2019, 97 sayfa

Bu tez çalışmasında, farklı konsantrasyonlarda Azo Boya Metil Red (MR) katkılı Polimer Dağılmış Sıvı Kristal (PDSK) kompozit yapılarının dielektrik, opto-elektronik, morfolojik ve termal özellikleri incelenmiştir. E63 kodlu nematik sıvı kristal, Norland 65 polimeri ve ağırlıkça %1, %3 ve %5 MR kullanılarak polimerizasyon kaynaklı faz ayırma yöntemi ile saf ve boya katkılı PDSK kompozit yapıları oluşturulmuştur. Kompozit yapıların dielektrik özellikleri 500 Hz-10 MHz frekans aralığında dielektrik spektroskopisi tekniği ile oda sıcaklığında incelenmiştir. Ölçüm sonuçlarından saf ve boya katkılı PDSK kompozit yapılarda kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları, dielektrik anizotropi, kayıp tanjant, relaksasyon frekansı, geçiş frekansı, eşik voltajı, eğilme elastik sabiti ve relaksasyon zamanı gibi parametreler elde edilmiştir. Kompozit yapıların tepki süresi, yükselme süresi ve düşme süresi gibi parametreleri de optik geçirgenlik sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Sıvı kristal içerisindeki MR boyanın soğurumu, dikroik oranı, düzen parametresi konsantrasyona bağlı olarak UV-VIS Spektrofotometre kullanılarak incelenmiştir. Polarize optik mikroskop ve diferansiyel taramalı kalorimetre ile kompozitlerin faz geçiş sıcaklıkları belirlenmiştir. Artan MR boya konsantrasyonu ile eşik voltajı ve relaksasyon zamanı gibi önemli parametrelerin değerleri azalırken, sıvı kristal damlacık boyutlarında katkı oranına bağlı olarak bir artış görülmüştür. Sonuçlar, PDSK kompozit yapıya MR katkılanmasının dielektrik ve opto-elektronik özelliklerinde önemli değişimlere sebep olduğunu ve MR katkılı PDSK kompozit yapıların sıvı kristal temelli cihaz uygulamaları için uygun ve umut verici fonksiyonel malzemeler olabileceğini göstermiştir.

Anahtar sözcükler: Azo boya, Dielektrik özellikler, Opto-elektronik özellikler, Polimer dağılmış sıvı kristal, Sıvı kristal.

ABSTRACT

INFLUENCE OF AZO DYE ON DIELECTRIC AND OPTO-ELECTRONIC PROPERTIES IN POLYMER-LIQUID CRYSTAL COMPOSITE STRUCTURES

Glnur NSAL

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Physics

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL

June 2019, 97 pages

In this thesis, the dielectric, electro-optic, morphological and thermal properties of Azo Dye Methly Red (MR) with different concentrations of doped Polymer Dispersed Liquid Crystal (PDLC) structure were investigated. Pure and dye doped PDLC composite structures were prepared using E63 coded nematic liquid crystal, Norland 65 polymer and MR at ratio of 1%, 3% and 5% wt/wt by Polymerization-Induced Phase Separation (PIPS) technique. Dielectric properties of composite structures were investigated in the frequency range of 500 Hz-10 MHz at room temperature using dielectric spectroscopy method. Parameters such as the real and imaginary parts of complex dielectric constant, dielectric anisotropy, loss tangent, relaxation frequency, crossover frequency, threshold voltage, splay elastic constant and relaxation time of pure and dye doped PDLC composite structures were obtained using experimental data. Moreover the response time, rise time and fall time were obtained using optic-transmittance system. The absorbance, dichroic ratio and the order parameter of MR dye in liquid crystal were investigated using UV–VIS Spectrophotometer. The phase transition temperature of composites was noted through polarizing optical microscopy and differential scanning calorimetry. The values of important parameters such as threshold voltage and relaxation time were decreased whereas liquid crystal droplet sizes were increased with increasing MR concentration. Results show that dispersing MR in PDLC composite structure causes significant changes in the dielectric and opto-electronic properties and the dye doped PDLC composite structures will be suitable and promising functional materials for liquid crystal based devise applications.

Keywords: Azo dye, Dielectric properties, Liquid crystal, Opto-electronic properties, Polymer dispersed liquid crystal.

EXTENDED ABSTRACT

INFLUENCE OF AZO DYE ON DIELECTRIC AND OPTO-ELECTRONIC PROPERTIES IN POLYMER-LIQUID CRYSTAL COMPOSITE STRUCTURES

Gülnur ÖNSAL

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Physics

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Oğuz Köysal

June 2019, 97 pages

1. INTRODUCTION

Polymer/Liquid Crystal composite structures formed by polymer and liquid crystal have become the focus of attention among the researches since they have been the cause of the development of devices such as optical shutters, flexible smart film, telecommunication, holographic films, sensors and lasers. At low polymer concentrations, a polymer network is formed along the liquid crystals and these structures are referred as Polymer Stabilized Liquid Crystals (PSLC). However, at high polymer concentrations, liquid crystal droplets are formed in a continuous polymer matrix and these structures are called as Polymers Dispersed Liquid Crystals (PDLC).

Liquid crystal droplets in PDLC structures can be formed by phase separation or encapsulation methods. There are three types of phase separation method; these are polymerization-induced phase separation (PIPS), solution-induced phase separation (SIPS) and temperature-induced phase separation (TIPS). Among these methods, PIPS is widely used because it is fast, clean, low cost and solvent free. Since PDSK based devices operate according to the principle of light scattering, it is not necessary to use a polarizer. PDLC structures have an opaque appearance in the absence of electric field. When the electric field is applied, the structure has a transparent appearance due to refractive indices of liquid crystal droplets (n_{LC}) and polymer (n_P) are matched.

Since dye molecules increase the absorption of light and decrease the power required

for the optical effects, the dye doped PDSK composites have become a preferred method by researchers in recent years. Light absorption and scattering can be controlled and this is another advantage of these systems. Therefore, dye doped PDSK composites are preferred to produce high contrast and low power consumption devices.

2. MATERIAL AND METHODS

For the construction of pure and dye doped PDLC composite structures E63 coded nematic liquid crystal which has positive dielectric anisotropy ($\Delta\epsilon' > 0$) at low-frequency regions, Norland Optical Adhesive 65 (NOA65) pre-polymer and 1, 3 and 5% wt/wt Azo Dye Methly Red (MR) as dispersal agent were used. Firstly, NOA65 was dispersed in toluene and then NOA65/E63 mixture was prepared NOA65 (75% wt/wt) and E63 nematic liquid crystals (25% wt/wt). The prepared NOA65/E63 mixture was homogenized with an ultrasonic bath for 2 hours at 50 °C. Then, MR was added to the NOA65/E63 mixture with 1, 3, 5% wt/wt thus NOA65/E63/MR composite structures were formed. These composite structures were homogenized with an ultrasonic bath for an hour at 50 °C. The composite structures were exposed to 80 °C heat treatment for 2 hours to evaporate the excess solvent (toluene). All samples were injected into ITO (Indium–Tin–Oxide) coated planar alignment liquid crystal cells (7.7 μm) with the help of capillary action by using temperature to reduce viscosities. These prepared cell were exposed to UV (Ultraviolet) light (intensity $\sim 10\text{mW}/\text{cm}^2$) for an hour at room temperature to make pure and dye doped PDLC composites.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Dielectric measurements were carried out by a computer controlled Novacontrol Alpha A Dielectric/Impedance Analyzer in the frequency range 500 Hz to 10 MHz and the bias voltage range of 0 V and 20 V. According to the results of the dielectric measurements, the real and imaginary parts of the dielectric constant, dielectric anisotropy, relaxation frequency, relaxation time, loss tangent and AC conductivity were determined. The real part of the complex dielectric constant decreased due to increasing MR concentration, since the total dipole moment decreases as a result of the molecular interactions between the polymer, liquid crystal and MR dye molecules. The imaginary part of the complex dielectric constant, which is an indication of the energy loss of the system, also decreased due to the increase in MR concentration. Pure and dye doped PDLC composites exhibit positive dielectric anisotropy at lower frequencies. At

higher frequencies, the dielectric anisotropy changes from positive to negative type. This change takes place at a crossover frequency. Crossover frequency decreased with increasing MR concentration. Threshold voltage, which is an important parameter in terms of energy efficiency, decreased with doping dye and further decrease was observed with increasing dye concentration in the PDLC composites. The reason for this behavior is that MR molecules may effectively suppress the screening effect or there may be an increase in charge density through doping MR molecules into the PDLC structure.

The response time, rise time and fall time of the samples were determined by using the optical transmission system. It was observed that the increase in the dye concentration increased the response time, rise time and fall time due to the viscosity of the medium.

SEM (Scanning Electron Microscope) images of the samples were taken for the morphological analysis and it was seen that the increase of the dye concentration increased the liquid crystal droplet size. This is because, the viscosity of the composite structure increases with the addition of MR and the dye-doped PDLC composites may require more time to form LC droplets as the dye molecules absorb the light.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

When all the results of the thesis study are evaluated together, it is seen that the MR contribution to the PDSK composite structure significantly improves the dielectric and opto-electronic properties and improves the performance of the composite structure examined. The results of the study show that MR doped PDSK composite structures may be suitable and promising functional materials for liquid crystal-based device applications and can be used in devices requiring low energy for technological purposes.

1. GİRİŞ

Maddeler katı, sıvı, gaz ve plazma olmak üzere dört ana fazdan oluşmaktadır. Katı fazda atom ve moleküller bulundukları konumda örgü titreşimi yaparlarken dönme hareketi yapmazlar. Bununla birlikte sıvı fazda öteleme hareketi yanında dönme hareketi de görülmektedir [1]. Katılarda atom ve moleküller periyodik bir örgü içerisinde konumsal bir düzene sahip olduklarından dolayı, katıların anizotropik bir yapı gösterdikleri, moleküllerinin düzensiz bir yerleşime sahip olmasından dolayı da sıvıların izotropik bir yapı gösterdikleri söylenebilir [2].

Günlük yaşantımızda maddelerin bazı dış etkilerle faz değiştirdiğini gözlemleyebiliriz. Örneğin katı kristal fazda bir madde sıcaklığı artırılarak eritildiğinde düzenli moleküler yapısı bozulur ve katının sıvı faza geçtiği gözlemlenebilir. Fakat birçok madde bu geçişlerde birden çok faz gösterebilir. Bu da maddelerin bazı ara fazlarının olduğu anlamına gelmektedir. Maddenin katı kristal ve sıvı fazı arasında yer alan, termodinamik açıdan kararlı bir faz olan bu özel haline “sıvı kristal faz” denir.

Sıvı kristaller, sıvılar gibi akışkan bir özelliğe sahip olsa da katı kristallere benzer özellikler göstermektedir. Sıvı kristallerin optik, manyetik ve elektriksel özellikleri belirlenen fiziksel doğrultulara göre değiştiğinden katı kristaller gibi anizotropik özellik gösterir. Sıvı kristaller, katı kristal ve sıvı maddelerin bazı özelliklerini taşımasının dışında onlarda gözlemlenmeyen farklı özelliklere de sahiptir. Elektrik alan ya da manyetik alan gibi dış etkilerle moleküller düzenin kolayca değiştirilebilmesi buna örnek olarak verilebilir. Sıvı kristal yapıların sahip olduğu bu eşsiz özellikler sıvı kristal temelli cihaz uygulamalarının gelişmesine sebep olmuştur [3], [4]. Sıvı kristaller elektrik ve manyetik gibi dış alanlara olan aşırı duyarlılığından dolayı, açılır kapanır pencereler, sensörler, holografik bilgi depolama gibi alanlarda araştırmacılar tarafından en çok kullanılan yapılar haline gelmiştir; düşük voltajda çalışabilmeleri ve nano seviyedeki moleküllerle kolaylıkla etkileşebilmeleri sebebiyle de hesap makinalarında, saatlerde, bilgisayarlarda, televizyonlarda vb. sistemlerde kullanılmaktadır [2]. Bunlara ek olarak günümüzde de hala sıvı kristal temelli cihazlar teknolojinin birçok alanında kullanılmakta ve her geçen gün yeni kullanım sahaları da keşfedilmektedir.

Sıvı kristal temelli cihaz uygulamalarında yapılan çalışmalarda, son yıllarda yeni sıvı kristallerin sentezlenmesi ve de farklı katkı malzemeleri kullanılarak mevcut sıvı kristallerin fiziksel ve opto-elektronik özelliklerinin değiştirilmesine odaklanılmıştır. Yapılan çalışmalarda altın nanoparçacıklar [5], [6], gümüş nanoparçacıklar [7], yarıiletken kuantum noktalar [8], [9]-[11], boyalar [12]-[15] polimerler [16], [17] vb. katkı malzemelerinin sıvı kristallere katkılanarak yeni kompozit yapılar oluşturulduğu görülmektedir. Bunlar arasında özellikle Polimer/Sıvı Kristal ile oluşturulan kompozit yapılar, açılır-kapanabilir pencereler, uzaysal ışık modülatörleri, üç boyutlu ekranlar ve geniş alanlı büyük boyutlu ekranlar gibi cihazların gelişmesine yol açan malzemeler olduğu için son yıllarda yapılan araştırmalar arasında büyük ilgi odağı haline gelmiştir [18]. Bu tip yapılarda seçilen sıvı kristalin, polimerin yapısına ve konsantrasyonlarına bağlı olarak Polimer/Sıvı Kristal kompozit yapıların dielektrik, opto-elektronik özellikleri değiştirilebilir [16], [19]-[21].

Düşük polimer konsantrasyonlarında sıvı kristaller boyunca bir polimer ağı oluşur ve bu yapılar “Polimer Stabilize Sıvı Kristaller (PSSK)” olarak adlandırılır. Diğer taraftan yüksek polimer konsantrasyonlarında, sürekli bir polimer matrisinin içinde sıvı kristal damlacıkları oluşur. Bu yapılar ise “Polimer Dağılmış Sıvı Kristaller (PDSK)” olarak adlandırılır [16]. Polimer dağılmış sıvı kristal yapılarda sıvı kristal damlacıkları, faz ayırma ya da enkapsülasyon yöntemleriyle oluşturulabilir. Polimerizasyon, çözelti ve sıcaklık kaynaklı faz ayrılması olmak üzere üç tip faz ayırma yöntemi vardır. Bu yöntemlerden polimerizasyon kaynaklı faz ayırma yöntemi hızlı, temiz, düşük maliyetli olması ve çözelti içermemesi gibi özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır [21], [22].

Sıvı kristal temelli cihazlar ışığın polarize olması prensibine göre etkin olarak çalışırken; PDSK temelli cihazlar ışığın saçılması prensibine göre çalışır [23]. Bu nedenle PDSK temelli cihazlarda polarizör kullanmaya gerek yoktur. Polimer katkılı sıvı kristal yapılar elektrik alan olmadığı durumda “opak” bir görünüme sahiptir. Fakat elektrik alan uygulandığında sıvı kristal damlacıklarının kırılma indisi (n_{SK}) ile polimerin (n_P) kırılma indisi eşleştiği için yapı “transparan” bir görünüme sahip olur [19], [23], [24]. Bu avantajlarından dolayı ışık saçan cihazlarda PDSK kompozit yapıların kullanıldığı görülmektedir. Bu avantajların yanında PDSK kompozitlerin yüksek eşik voltajı, zayıf kontrast oranı gibi dezavantajları da vardır [25]. Bu problemlerin çözülmesi için PDSK kompozitler boya [19], [21], [26], kuantum nokta

[27], silika [16] vb. malzemeler ile katkılanmaktadır. Böylece farklı malzemeler kullanılarak yeni hibrit yapılar oluşturulabilir ve PDSK kompozit yapıların fiziksel özellikleri geliştirilebilir. PDSK kompozit yapılar bu önemli özellikleriyle optik anahtar, akıllı pencereler, telekomünikasyon, holografik filmler, sensörler ve lazerler gibi birçok alanda kullanılmaktadır [16], [23], [24], [26].

Işığın soğurumunu artırdığı ve optik etkiler için gerekli olan gücü düşürdüğü için PDSK kompozit yapılara boya katkılarını son yıllarda araştırmacılar tarafından tercih edilen bir yöntem ve araştırma konusu haline gelmiştir. Ayrıca ışığın soğurumunun ve saçılmasının kontrol edilebilmesi bu sistemlerin bir diğer avantajıdır. Bu nedenle yüksek kontrastlı ve düşük güç tüketimli cihazlar üretmek için boya katkılı PDSK kompozit yapılar tercih edilmektedir [28], [29].

Bu tez çalışmasında Norland Optical Adhesive 65 (NOA65) polimer yapı ve E63 kodlu nematik sıvı kristal kullanılarak “Polimer Dağılmış Sıvı Kristal” yapı oluşturulmuştur. Ayrıca ağırlıkça farklı yüzdelerde Metil Red Azo Boya (MR) Polimer/Sıvı Kristal yapıya katkılanarak farklı kompozit yapılar oluşturulmuş, bu kompozit yapıların dielektrik, opto-elektronik, morfolojik ve termal özellikleri incelenmiştir. Ülkemizde bu alanda yapılan çalışmalara bakıldığında gerek sıvı kristal gerekse polimer yapıların bir araya getirildiği bu tip kompozit yapılar hakkında gerçekleştirilen özgün bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yurtdışında farklı katkı tipleri ve oranlarının denendiği bu tarz çalışmalar mevcut olsa da bunlar bu tez çalışmasının içeriği kadar kapsamlı değildir. Bu açıdan çalışmamız özgündür ve hem ulusal hem de uluslararası literatüre büyük katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

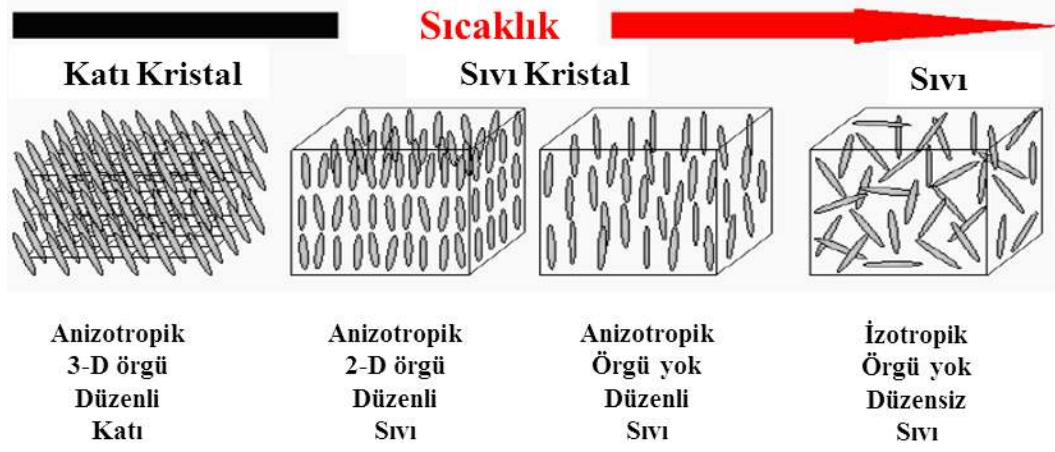
2. SIVI KRİSTALLER

2.1. SIVI KRİSTALLERİN TANIMI

Sıvı kristalin keşfi XIX. yüzyılın ortalarında Virchow, Mettenheimer ve Valentin'in sinir lifi üzerindeki çalışmalarına dayanmaktadır. 1877'de de Otto Lehman farklı malzemelerin faz geçiş sıcaklıklarını incelerken, malzemenin soğuma durumunda bulanık bir hal aldığını gözlemlemiş, diğer yandan bunu deneyinde bir kusur olarak görmüştür [3]. 1888 yılında Avusturyalı botanikçi Friedrich Reinitzer bir kolesterol türevi olan “Kolesterol benzoat” (ilk sıvı kristal) maddesinin erime noktasını gözlemlerken, 145 °C'de maddenin bulanık bir hal aldığını, 178 °C'de ise bulanıklığın kaybolarak şeffaflaştığını gözlemlemiştir. Reinitzer yaptığı deneyinde iki farklı sıcaklıkta faz değişimi olduğunu görmüş ve gözlemleri sonucunda bu bulanık halin yeni bir faz olduğunu öne sürmüştür [4], [5]. Lehmann, bu ara faz için “Sıvı Kristal Faz” ifadesini kullanan ilk kişidir [5]. George Friedel ise 1922'de yaptığı deneyler sonucunda sıvı kristallerin moleküler düzenlerini temel alarak nematik, simektik ve kolesterik olarak sıvı kristalleri sınıflandırmıştır. 1968 yılında sıvı kristal görüntülemenin (Liquid Crystal Display) tanıtılmasıyla sıvı kristale olan ilgi oldukça büyümüştür [3].

Sıvı kristaller; molekülleri uzun erişimli periyodik bir düzene sahip ve anizotropik özellik gösteren katı kristal faz ile molekülleri uzun erişimli bir düzene sahip olmayan ve izotropik özellik gösteren sıvı faz arasında bulunan maddenin çok özel bir halidir. Anizotropi, moleküllerin yönlenimsel düzenine bağlıdır. Sıvı kristal halde madde tıpkı katılar gibi anizotropik bir özellik gösterirken bu ara fazda moleküller arası düzen ve yönelim en belirgin özelliktir. Buna rağmen, sıvı kristaller akışkan olmalarından dolayı görünüş olarak da sıvılara benzer [2].

Katı kristaller gibi anizotropik olan sıvı kristaller ısıtıldıklarında, belli bir kritik sıcaklıktan sonra izotropik faza geçerler. Genellikle bu geçiş için sıcaklık aralığı -30 °C ile 100 °C arasında değişmektedir [3]. Sıcaklık sıvı kristal fazda maddenin moleküler yapısını değiştirebilen en önemli etkilere biridir. Şekil 2.1'de maddenin katı kristal ve sıvı hali arasındaki faz geçişinin sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir [30].



Şekil 2.1. Maddenin katı kristal ve sıvı fazı arasında sıcaklığa bağlı faz geçiş diyagramı.

Katı kristallerde hem konumsal hem de uzun menzilli yönelimsel bir düzen vardır. Katı kristaller ısıtıldığında, termal hareketlerinden dolayı moleküllerin dönüş serbestliği artar. Sıcaklık arttırıldığında katı kristalin üç boyutlu örgü düzeni bozulmaya başlar ve katı kristal, moleküllerin yönelim düzeninin korunduğu sıvı kristal faza geçer. Bu fazda konumsal düzen bozulur fakat moleküller yönlenimsel düzenlerini korurlar. Bu yüzden sıvı kristal fazda anizotropi özelliği görülmesinin yanında maddenin akışkanlık özelliği de mevcuttur. Sıcaklığın daha da arttırılması moleküller arasındaki bağların kopmasına ve örgü yapısının tamamen dağılarak yapının izotropik faza geçmesine sebep olur [31]. Böylece tüm düzen ortadan kalkar ve madde tamamen sıvı bir hal alır.

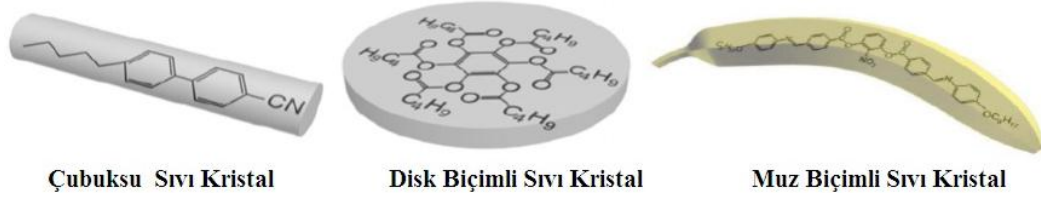
Birbirinden oldukça farklı olan katı kristal ve sıvı fazın bazı özelliklerini üzerinde taşıyan sıvı kristaller; elektrik alan ya da manyetik alan ile etkileşerek monokristal oluşturma istekleri, yüksek mertebede optik aktiviteleri, renk değişikliği ile gözlemlenebilen ısıya karşı hassasiyetleri gibi üstün özellikleri ile katı kristal ve sıvı fazdan ayrılmaktadır [32].

Elektriksel dipol momente sahip sıvı kristal moleküller, dışardan uygulanan bir elektrik alan yönünde yönelme eğilimindedirler. Katı kristal fazda moleküller arası bağların güçlü olmasından dolayı yönelim gerçekleşmemektedir. Sıvı fazda ise moleküllerin hareketlerindeki düzensizlik, moleküllerin belirli doğrultuda yönelmelerini engellemektedir. Sıvı kristal fazda ise moleküllerin hareket serbestliği olmasına rağmen moleküller arasında çeşitli fiziksel etkileşim mekanizmaları ile oluşan bir düzen söz konusudur [2]. Bu sebeple sıvı kristaller sıcaklık, basınç, elektrik alan, manyetik alan gibi dış etkilere karşı yüksek hassasiyet gösterirler. Bunun sonucu olarak da opto-elektronik teknolojisinde çeşitli alanlarda kullanım alanı bulabilmişlerdir. Örneğin; sıvı

kristallerin elektrik alana duyarlı olması ekran teknolojisinde, ışığa karşı duyarlı olması bilgi depolamada, sıcaklığa karşı duyarlı olması termal kameralarda kullanılmalarını sağlamıştır [31]. Ayrıca sıvı kristal temelli cihazların düşük güç tüketimi gerektirmeleri, karmaşık devreler ile gösterdikleri uyum ve küçük boyutlarda olmaları sıvı kristallerin teknolojiye yerini son derece önemli kılmıştır [32].

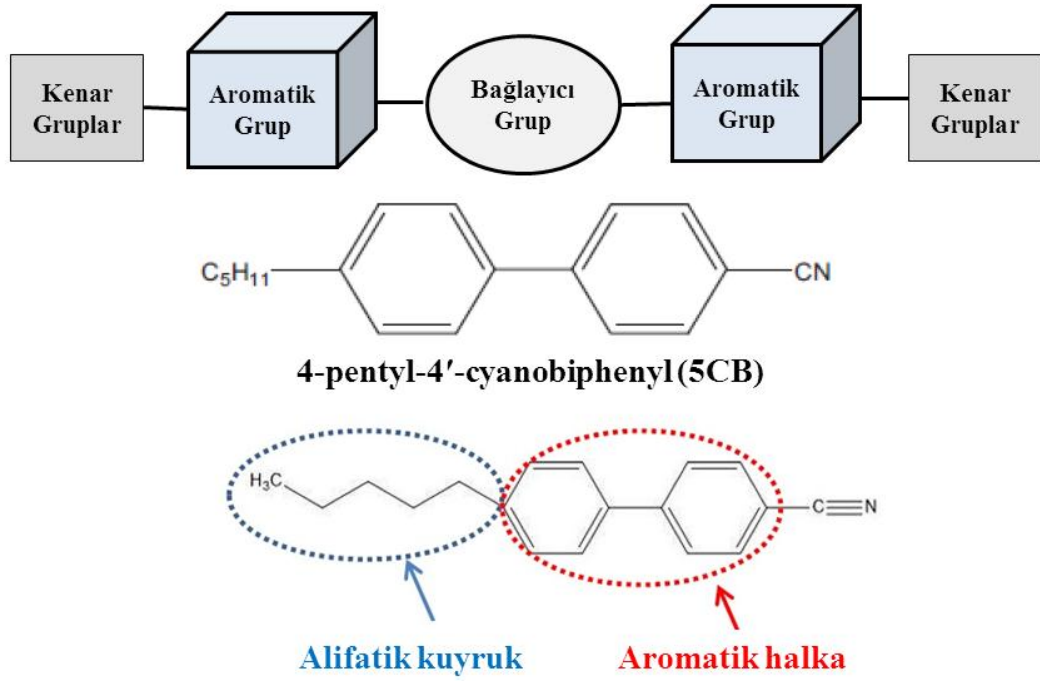
2.2. SIVI KRİSTALLERİN YAPISI

Sıvı kristaller moleküler şekillenimlerine göre çubuk (kalamitik), disk (diskotik) ve muz biçimli olmak üzere üç farklı şekilde görülebilmektedir. Bu yapılar molekülleri arasındaki kuvvetlerin zayıf olması sebebiyle uzunlamasına bir yapıda olma eğilimindedirler. En yaygın kullanılan sıvı kristaller çubuksu sıvı kristallerdir. Şekil 2.2’de sıvı kristal moleküllerinin farklı moleküler dizilimlerinden oluşan şekilleri 3-D (üç boyutlu) olarak verilmiştir [32].



Şekil 2.2. Çubuksu, disk biçimli ve muz biçimli sıvı kristallerin 3-D görünümü.

Sıvı kristallerin genel şekliyle moleküler yapısı Şekil 2.3 ile verilmiştir. Sıvı kristalin yapısı genel olarak bir bağlayıcı grup ve iki terminal (kenar) gruptan oluşur. Sıvı kristallerin optik, elektriksel, dielektrik vb. özellikleri bu gruplara bağlı olarak değişir. Sıvı kristaller organik yapıdadır. Ayrıca, organik bileşiklerin sıvı kristal özellik göstermeleri için alifatik kuyruk ile tutturulmuş aromatik halkalar gibi gruplara sahip olması gerekir. Aromatik halka sıvı kristale rijit bir yapı sağlarken, alifatik kuyruk akışkanlık sağlar. Bu sebeple sıvı kristaller hem katıların hem de sıvıların bazı özelliklerini üzerlerinde taşırlar [1].

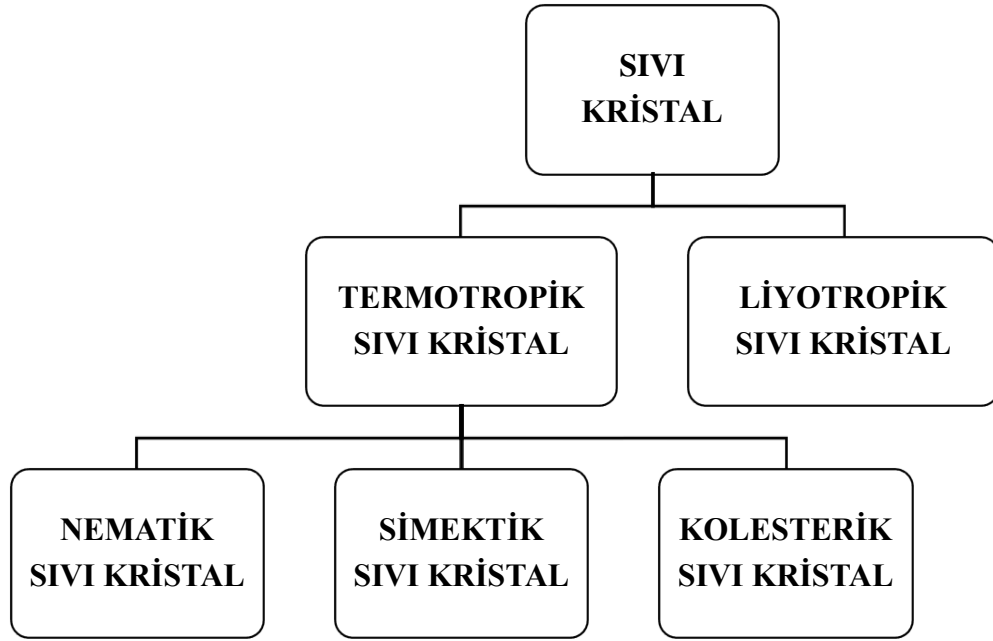


Şekil 2.3. Sıvı kristal molekülünün genel yapısı.

2.3. SIVI KRİSTALLERİN SINIFLANDIRILMASI

Sıvı kristaller şekillerine göre kalamitik, diskotik vb. gruplara ayrılabilirler. Ayrıca amfifilik (yarısı suyu seven) olan ve olmayan, metal içeren ve içermeyen, molekül ağırlıklarına göre, monomerik ve polimerik olarak farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Fakat yaygın olarak sıvı kristaller katı hal düzenlerinin bozulma prensibi dikkate alınarak Şekil 2.4'deki gibi iki ana gruba ayrılır [2];

1. Ara fazların oluşumu sıcaklığa bağlı olan "Termotropik Sıvı Kristaller".
2. Ara fazların oluşumu konsantrasyona ve çözücüye bağlı olan "Liyotropik Sıvı Kristaller".



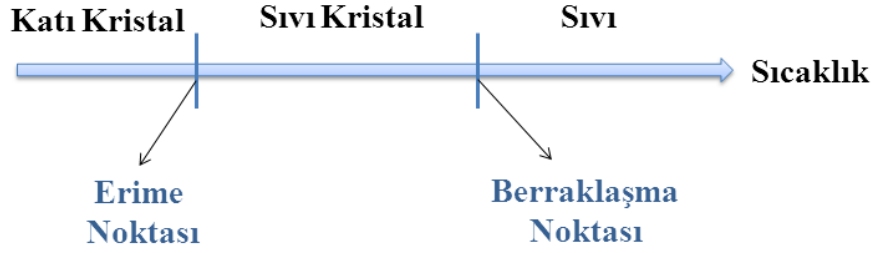
Şekil 2.4. Sıvı kristallerin sınıflandırılmasının şematik gösterimi.

Termotropik sıvı kristaller, sıcaklık etkisi ile ortaya çıkar; bu yapılarda faz geçişleri sıcaklık ile gerçekleşir. Yapısal olarak çubuk veya disk şeklinde moleküllerden oluşur. Termotropik sıvı kristaller nematik, simektik ve kolesterik olmak üzere farklı alt gruplar içerir.

Liyotropik sıvı kristaller birden çok organik bileşiğin bir araya gelmesiyle oluşan uzun zincirli moleküllerdir. Liyotropik sıvı kristallerde ise faz değişimi hem konsantrasyon değişimi ile hem de sıcaklık ile gerçekleşebilir ama burada birincil etken konsantrasyondur [2].

2.3.1. Termotropik Sıvı Kristaller

Termotropik sıvı kristaller araştırmacılar tarafından en çok bilinen ve en yaygın çalışılan sıvı kristallerdir. Bu malzemeler termal indükleme ile katı fazdan izotropik faza geçiş yapabilirler. Bu tip sıvı kristallerde faz geçişleri sıcaklık ile sağlanmaktadır [1]. Şekil 2.5'te termotropik sıvı kristalde sıcaklık ile faz değişim süreci verilmiştir. Maddenin ısıtılmasıyla, katı kristal fazdan sıvı kristal faza geçtiği sıcaklık “erime noktası”, sıvı kristal fazdan da sıvı faza geçtiği sıcaklık ise “berraklaşma noktası” olarak adlandırılmaktadır [33].



Şekil 2.5. Termotropik sıvı kristallerin faz geçiş süreci.

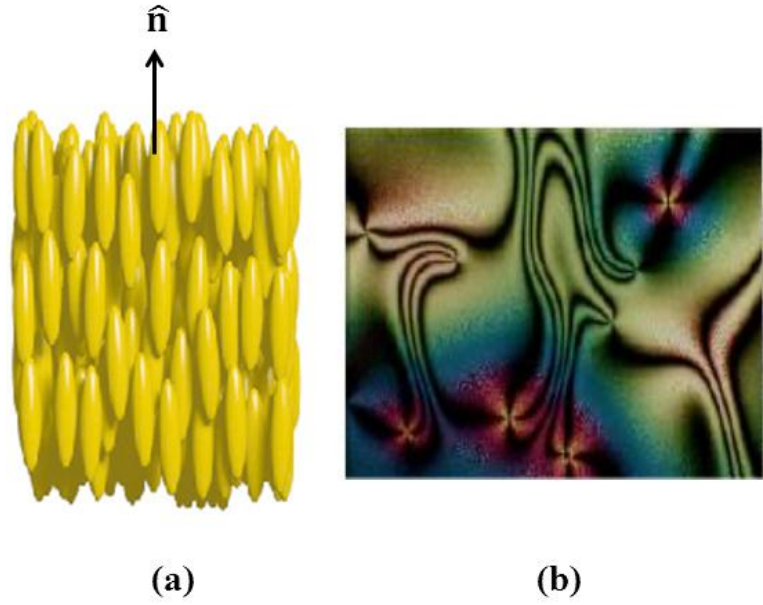
Termotropik sıvı kristallerin bazı genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- ✓ ince, çubuksu ya da disk şeklinde bir yapıya sahiptirler,
- ✓ yapılarında aromatik halkalar bulundurdıkları için rijit bir yapı gösterirler,
- ✓ ayrıca yapılarında polar gruplar ve kalıcı dipoller bulundururlar,
- ✓ molekül eksenine yakın yerlerde kuvvetli dipol momentlere, uzak yerlerde ise zayıf dipol momentlere sahiptirler [32],
- ✓ dipoller arasındaki çekimden dolayı moleküllerin konumları birbirine yakın ve paraleldir [3].

Termotropik sıvı kristaller sıcaklığa bağlı faz değişimlerine bağlı olarak nematik, simektik ve kolesterik olmak üzere üç alt basamakta gruplandırılır.

2.3.1.1. Nematik Sıvı Kristaller

Nematik kelimesi Yunancada iplik anlamına gelen “Nema” kelimesinden türetilmiştir ve ilk kez Friedel tarafından kullanılmıştır [2]. Nematik fazda moleküller, konumsal bir düzene sahip değildir; yani her bir molekülün kütle merkezi rastgele yerleşmiştir. Fakat moleküllerin uzun erişimli yönelimsel bir düzeni vardır. Moleküller $\hat{n}$ vektörü ile temsil edilen, ortalama bir yönelim doğrultusunda ($\hat{n}$ direktörü) yönlenmişlerdir [34]. Şekil 2.6’da nematik fazda moleküler yönelimin temsili bir şekli ve polarize optik mikroskoptaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.6. Nematik sıvı kristallerin a) şematik gösterimi ve b) polarize mikroskoptaki görüntüsü.

Katmanlı bir yapı göstermeyen nematik sıvı kristaller simetik yapıdaki katmanların bozulmasıyla oluşurlar. Moleküllerin uzun eksen boyunca hareket serbestliği vardır, bu yüzden viskoziteleri oldukça düşüktür. Bu özellikleriyle sıvılara benzeseler de, yönelimsel olarak bir düzenlerinin olması onları sıvı fazdan ayıran en belirgin özellikleridir [2].

Nematik fazda optik eksen doğrultusunda ölçülen kırılma indisi ile optik eksene dik doğrultuda ölçülen kırılma indisi arasında faz farkı vardır. Bu fark, yapının anizotropisinden kaynaklanmaktadır. Nematik sıvı kristaller çift kırılma özelliği ile birçok opto-elektronik uygulamalarda kullanılmaktadır [32].

Dışardan uygulanan bir etki ile nematik fazda moleküllerin yönelim doğrultusu ($\hat{n}$ direktörünün yönü) değiştirilebilir. Nematik sıvı kristallerin elektrik alan, manyetik alan gibi dış etkilere tepki süreleri milisaniye mertebesinde. Nematik sıvı kristallerin bu eşsiz özellikleri, ileri teknolojiye özellikle de ekran teknolojisinde bu yapıdaki sıvı kristallerin kullanılmasını sağlamıştır [31].

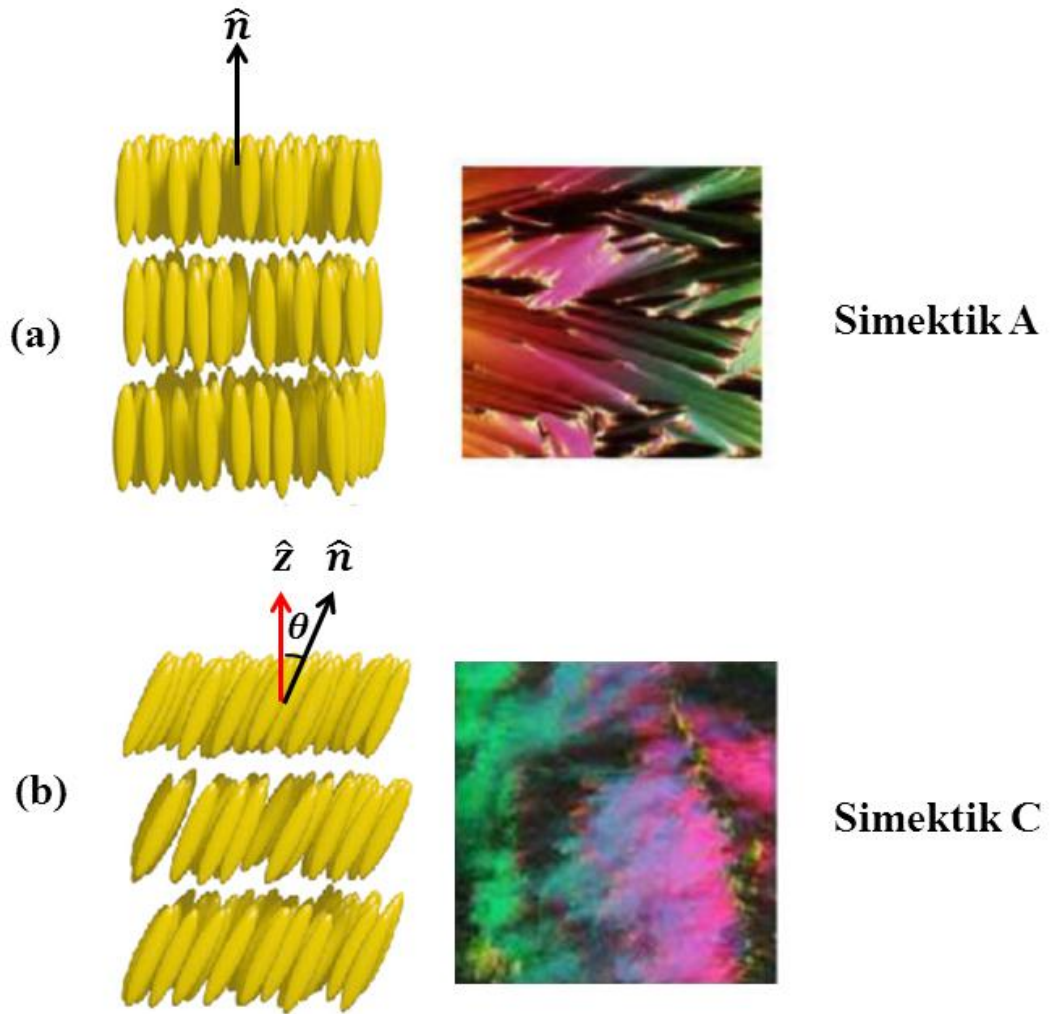
2.3.1.2. Simektik Sıvı Kristaller

Simektik kelimesi Yunancada sabun anlamına gelen “Smectos” kelimesinden türetilmiştir [30]. Termotropik sıvı kristal fazları içerisinde en yoğun ve en düzenli olan faz simektik fazdır. Simektik faz, katı kristal fazın ısıtılmasıyla oluşan ilk ara fazdır.

Viskozitesi nematik ve kolesterik faza göre daha yüksek olduğu için cihaz uygulamalarında kullanımı çok yaygın değildir [1].

Simektik fazda da moleküllerin nematik fazdaki gibi yönelimsel düzenleri vardır. Bunun yanında simektik fazda moleküller bir düzlemde hizalanırlar, yani simektik fazda katmanlı bir yapı görülür ve moleküllerin uzun eksenleri bu katman düzleminde kalacak şekilde yerleşir. Moleküllerin sadece kendi katmanları içinde hareket serbestliği vardır [32].

Katmanlardaki moleküllerin yerleşim düzenine bağlı olarak {A, B, C,..., M} ile simgelenen on iki farklı simektik sıvı kristal fazı bulunmaktadır. Fakat yaygın olarak simektik A ve simektik C fazlarının kullanıldığı görülmektedir [4].



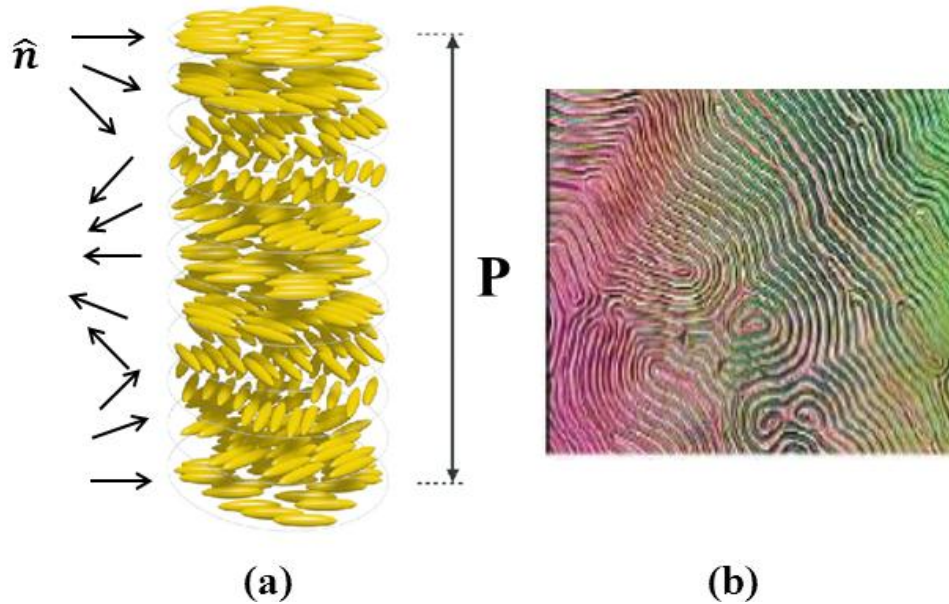
Şekil 2.7. a) Simektik A ve b) Simektik C sıvı kristallerin şematik gösterimi ve polarize mikroskoptaki görüntüsü.

Şekil 2.7’de Simektik A ve Simektik C fazında moleküllerin yönelimi görülmektedir [35]. Simektik A fazında moleküller, konumsal bir düzen olmaksızın bulundukları katmanın normaline doğrultusunda bir yönelim gösterirler. Simektik C fazında ise moleküller küçük bir açıyla (θ) katmanın normalinden uzaklaşırlar [34]. Bu açı “eğilme açısı” olarak adlandırılır [32].

2.3.1.3. Kolesterik Sıvı Kristaller

Nematik sıvı kristallere kiral moleküller eklenerek kolesterik sıvı kristaller elde edildiği için kolesterik sıvı kristaller, “kiral nematik sıvı kristaller” olarak da adlandırılır. Fiziksel özellikleri genel anlamda nematik sıvı kristallere benzer, fakat bu fazda nematik fazdan farklı olarak, moleküllerin yönelimi helis bir yapı oluşturur [4]. Kolesterik sıvı kristallere en iyi örnek DNA (Deoksiribo Nükleik Asit) molekülü verilebilir [1].

Kolesterik fazda moleküller üst üste katmanlar halinde dizilmektedir. Her bir katmanda moleküller birbirlerine göre aynı yönde olacak şekilde küçük açılar yaparak yönlenirler [1]. Şekil 2.8’de kolesterik fazda moleküllerin yönelimi görülmektedir [30].



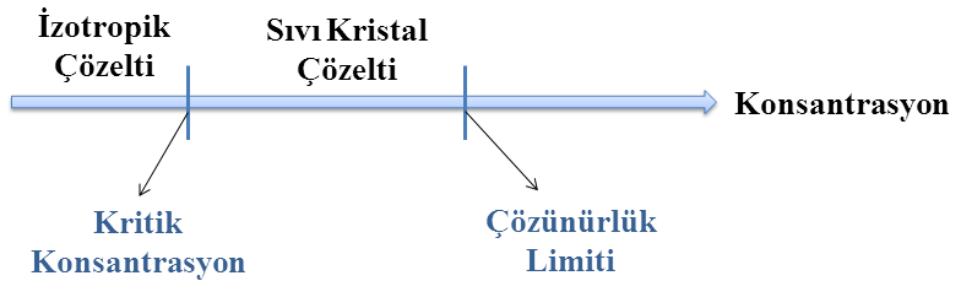
Şekil 2.8. Kolesterik fazda moleküler yönelim.

Kolesterik fazda en önemli özellik, direktörün bir tam tur dönmesiyle kat ettiği mesafe olarak tanımlanan “helis adımı (P)” dır. Helis adımı sıcaklık, manyetik alan gibi dış etkilerle değişebilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı kolesterik sıvı kristaller sıcaklık sensörlerinde, termal görüntülemeye, mikro yapı kusurlarının ve hastalıklı dokuların

teşhisinde kullanılmaktadır [32].

2.3.2. Liyotropik Sıvı Kristaller

Belirli konsantrasyonlarda birden fazla bileşiğin bir araya getirilmesiyle oluşturulan sıvı kristallerdir. Burada faz değişimi konsantrasyon ile belirlenir. Liyotropik sıvı kristallerde sıcaklık çok önemli bir parametre değildir [31]. Şekil 2.9’da liyotropik sıvı kristaller için konsantrasyona bağlı faz geçiş süreci verilmiştir. Liyotropik fazlarda, çözücü moleküller sisteme akışkanlık sağlamak için bileşiklerin etrafındaki boşluğu doldurur ve termotropik sıvı kristallerin aksine, liyotropik sıvı kristallerde, farklı fazların oluşumu konsantrasyon değişimi ile gerçekleştirilir [33].



Şekil 2.9. Liyotropik sıvı kristallerin faz geçişi.

Liyotropik sıvı kristaller amfibilik (çift karakterli) özelliği taşımaktadır. Amfibilik bileşikler polar bir baş kısım ve suda çözünmeyen apolar bir uç kısımdan oluşur [1]. Uzun zincirli molekülleri vardır. Şekil 2.10’da liyotropik bir sıvı kristal olan sabunun şekli ve açık formül yapısı görülmektedir [32].



Şekil 2.10. Liyotropik bir sıvı kristalin şekli ve sabunun açık formülü.

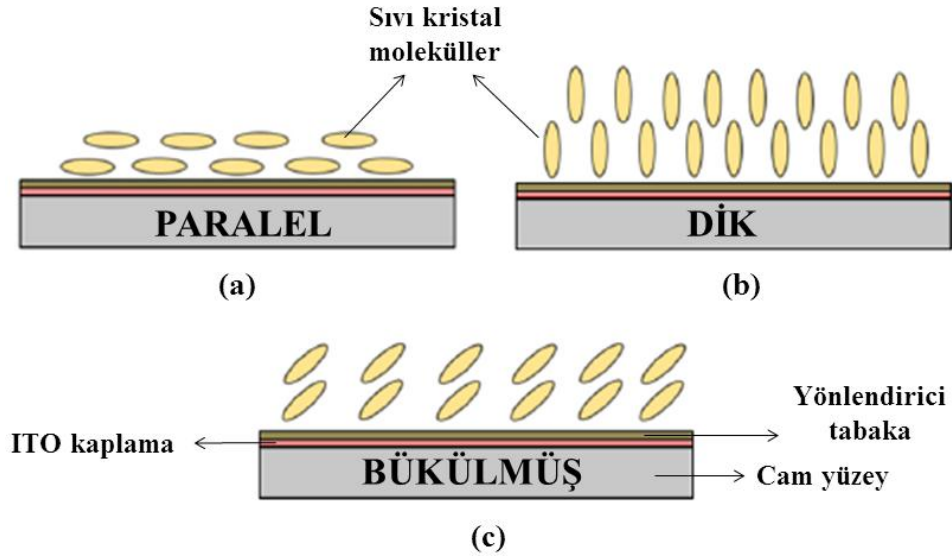
Hücre zarı lipidleri, tütün mozaik virüsü, misel, sabun liyotropik sıvı kristallere örnek olarak verilebilir. Ayrıca liyotropik sıvı kristallerin biyolojideki araştırmalarda önemi büyüktür [1].

2.4. SIVI KRİSTALLERİN YÖNLENİMLERİ

Sıvı kristal hücrelere farklı mekanik veya kimyasal yüzey işlemleri uygulanarak moleküllerin hücre içerisinde istenilen şekilde yönelimi sağlanabilir. Bu şekilde sıvı kristal yapıların yönlenimlerinin kontrol edilebilir olması görüntü teknolojisi ve elektro-optik uygulamalar için önem taşımaktadır [32].

Nematik sıvı kristallerde moleküler yönlenim sıvı kristal moleküllerinin kendi arasında olan hidrojen bağı, Van der Waals bağı, dipol-dipol etkileşimi ile beraber sıvı kristal molekülleri ile cam yüzeyi arasında olan etkileşimlerden ya da yüzey geometrisi gibi değişik faktörlerden etkilenebilir [2].

Temel olarak sıvı kristal yapılar hücre içerisinde paralel (planar), dik (homeotropik) ve bükülmüş (tilted) yönlenim gösterebilirler. Şekil 2.11’de sıvı kristal moleküllerinin hücre içerisinde paralel, dik ve bükülmüş yönlenimleri şematik olarak gösterilmiştir [36].



Şekil 2.11. Sıvı kristal moleküllerinin hücre içerisinde a) paralel b) dik ve c) bükülmüş yönlenimi.

Paralel yönlenimde sıvı kristal moleküllerinin direktörü ITO (İndiyum kalay oksit) kaplı cam yüzeyine paralel olacak şekilde yönlenir. Paralel yönlenime sahip hücreler yaygın olarak faz modülasyonu, ayarlanabilir faz geciktirici plaka ve dalga boyu seçici geçirgen filtre olarak sıvı kristal tabanlı cihaz uygulamalarında kullanılabilirler. Bu tip hücrelerde sabit bir molekül yönlenimi elde edebilmek için ITO kaplı yüzeye mekanik ve/veya

kimyasal işlemler uygulanır [31], [32].

Dik yönlenimde sıvı kristal moleküllerinin direktör yönelimi ITO kaplı cam yüzeyine dik olacak şekilde yönlenir. Dik yönlenimli hücreler faz modülasyonu ve faz geciktirici levha olarak kullanılabilirler. Bu tip hücrelerde sabit bir moleküler yönlenme elde edebilmek için ITO kaplı yüzeye bazı kimyasal yüzey işlemleri uygulanır.

Bükülmüş yönlenime sahip sıvı kristal molekülleri, her iki alt tabanda aynı moleküler yönlenime sahip olabilirken, moleküllerinin birbirlerine göre farklı açı yaptığı durumlarda söz konusu olabilir. Hücre içinde arada kalan sıvı kristal molekülleri alt ve üst tabandaki sıvı kristal moleküllerinin durumuna göre küçük açı değerleri ile bükülerek konumlanırlar. Bu yapıdaki nematik sıvı kristallerin ortalama yönlenimi, uygulanan bir elektrik alan ile kolaylıkla değiştirilebilir. Sıvı kristal temelli ekran teknolojisinde ışığın çeşitli durumdaki polarizasyonu için en çok tercih edilen sıvı kristal yapılar bükülmüş nematik yapıdır [32].

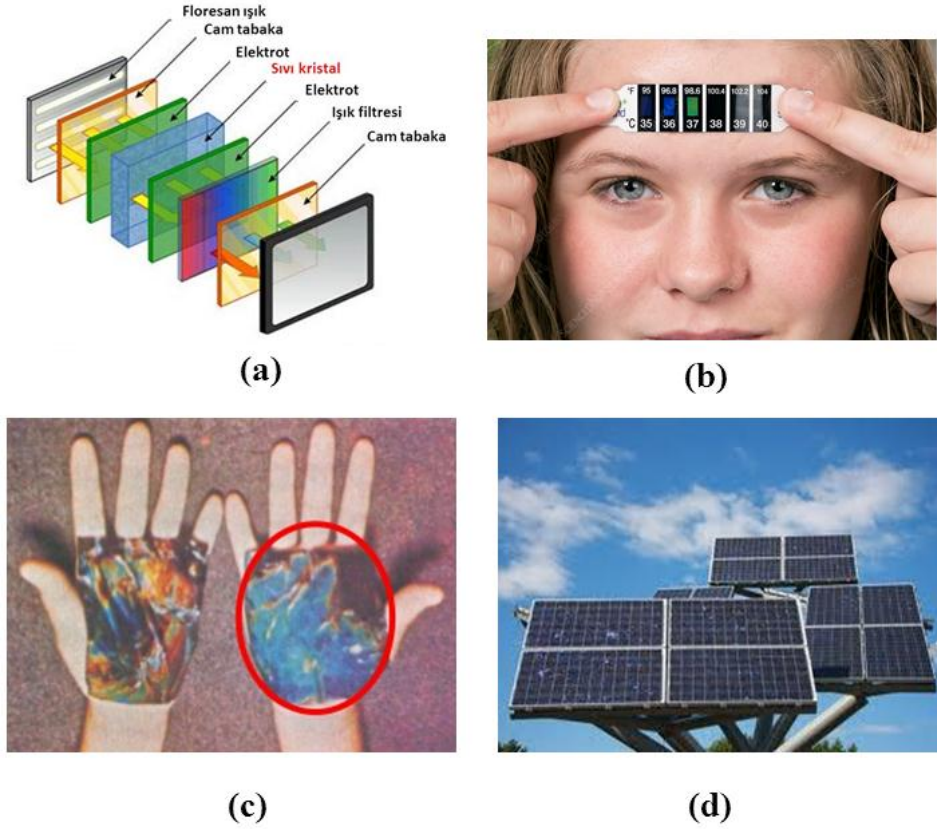
Çalışmalarda sıvı kristal yapıların dielektrik anizotropilerine bağlı olarak dik ya da paralel yönelimli hücreler de tercih edilebilir. Pozitif dielektrik anizotropiye sahip bir sıvı kristal ile yapılan bir çalışmada paralel yönelimli hücreler kullanılırken; negatif dielektrik anizotropiye sahip bir sıvı kristal ile yapılan çalışmada dik yönelimli hücrelerin kullanılması daha uygundur [2].

2.5. SIVI KRİSTALLERİN KULLANIM ALANLARI

Sıvı kristal yapılar üstün özelliklerinden dolayı günümüzde teknolojinin de birçok alanında kullanılmaktadır. En geniş kullanım alanının ekran teknolojisinde olduğu görülmektedir (Şekil 2.12.(a)). Bu işlevselliği onu saatlerde, bazı küçük ev aletlerinde, hesap makinelerinde vb. cihazlarda belirgin bir şekilde kullanılabilir hale getirmiştir. Ayrıca son zamanlarda bazı sıvı kristal maddeler bilgisayar endüstrisinde, yüksek bellek kapasitesine sahip yeni bilgisayar elemanları oluşturmak için araştırma konusu haline gelmiştir [30].

Sıvı kristallerin ısıya karşı duyarlı olması sıvı kristal termometreler, sıcaklık sensörleri gibi alanlarda kullanılmasını sağlamıştır. Örneğin sıvı kristal termometresi ile yalnızca termometrenin rengine bakılarak 1 °C duyarlılık sıcaklığın ölçülmesi mümkündür (Şekil 2.12.(b)) [37].

Sıvı kristallerin tıpta da yaygın kullanım alanı bulunduğu görülmektedir. Örneğin psikolojide yalan makinesi dedektörlerinde sıvı kristaller kullanılmaktadır. Ayrıca sıvı kristaller proteinlerin bağlanması, bazı mikropların belirlenmesi gibi uygulamalarda biyomedikal alanında da kullanılmaktadır. Şekil 2.12.(c) ile sıvı kristallerin hastalıklı dokuların teşhisinde kullanımına bir örnek verilmiştir. Burada sıvı kristal yapılar kullanılarak eldeki tümörün büyüklüğünün belirlenebilmesine dair bir yöntem gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Sıvı kristallerin kullanım alanları.

Sıvı kristallerin kullanıldığı, gelecek vadeden ve şu anda üzerinde yoğun bilimsel araştırmaların yürütüldüğü bir diğer alan da sıvı kristal tabanlı güneş pilleridir (Şekil 2.12.(d)) [30]. Sıvı kristal malzemelerin içine katkılanırılan boya, nanoparçacık vb. yapılar ile oluşturulan hibrit malzemeler güneş pillerinde aktif katman olarak kullanılmakta ve bu yapılardan elde edilen güneş pillerinde önemli ölçüde verim artışlarının sağlandığı görülmektedir.

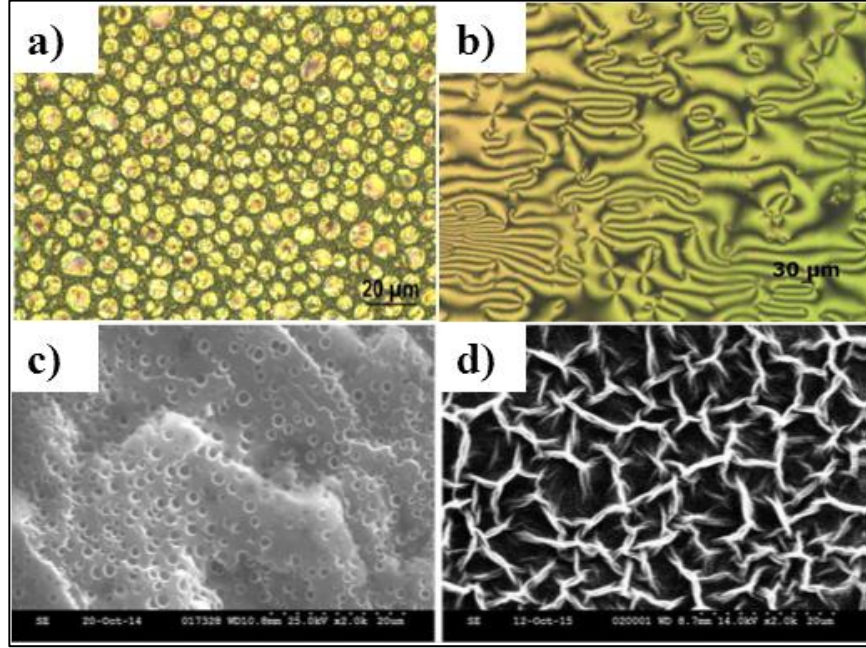
3. POLİMER / SIVI KRİSTAL KOMPOZİT YAPILAR

Elektro optik özellikleri nedeniyle, sıvı kristallerin teknolojide çeşitli uygulamalarda, özellikle de popüler olan ekran uygulamalarında yaygın kullanımı görülmektedir. Bununla birlikte, sıvı kristal temelli bazı cihaz uygulamalarında ekranı oluşturan katmanların kalınlığındaki hassas ayarlanmanın gerekliliği ve ışık şiddetini azaltan polarizörlerin kullanılması bu yapıları dezavantajlı hale getirebilmektedir. Bugün sıvı kristallere katkılanırılan çeşitli fonksiyonel malzemeler ile oluşturan hibrit yapılar, özellikle de son yıllarda büyük ilerleme kaydedilen polimerler ile oluşturulan yeni kompozit yapılar sayesinde bu güçlüklerin bir kısım üstesinden gelinebilmektedir [33].

Son yıllarda yapılan çalışmalara bakıldığında sıvı kristal yapılar çeşitli polimerler katkılanarak ve farklı faz ayırma yöntemleri uygulanarak yeni Polimer/Sıvı Kristal kompozitlerin oluşturulabildiği görülmüştür. Polimer/Sıvı Kristal kompozit yapılar, polimer ve sıvı kristalin kompozit yapıdaki konsantrasyonuna göre birbirinden ayrılabilir. En yaygın görülen Polimer/Sıvı Kristal kompozit yapılar, Polimer Dağılmış Sıvı Kristaller ve Polimer Stabilize Sıvı Kristaller olarak sıralanabilir [18].

Polimer/Sıvı Kristal kompozitlerde, polimer konsantrasyonlarının, polimerin tipine ve uygulamaya bağlı olarak ağırlıkça %2-%80 arasında değiştiği görülmüştür [38]. Polimer konsantrasyonunun sıvı kristal konsantrasyonundan çok daha az olduğu durumda sıvı kristaller boyunca bir polimer ağı oluşur ve bu yapılar “Polimer Stabilize Sıvı Kristaller” olarak adlandırılır. PSSK yapıda optik mikroskop altında, sadece sıvı kristalin konfigürasyonu görülebilir [39]. Literatürde bu alanda yapılan çalışmalara bakıldığında Jayoti ve arkadaşları [16] PSSK yapı için Polimer/Sıvı Kristal kompozit yapı içerisinde polimer konsantrasyonunun %20’den, Jiang [39] ve May [18] %10’dan, Malik [40] ise %5’den daha düşük olmasını önermişlerdir. Yapılan literatür çalışmasında Polimer Stabilize Sıvı Kristal yapılar için genel teamülün %20’den aşağı olması yönünde olduğu görülmüştür. Genel olarak yüksek polimer konsantrasyonuna sahip Polimer/Sıvı Kristal kompozit yapılarda faz ayırma işleminden sonra sıvı kristal damlacıkların bir polimer matrisinde dağıldığı görülebilir. Bu yapılar “Polimer Dağılmış Sıvı Kristal” olarak adlandırılır. Optik mikroskop altında, renkli sıvı kristal damlacıkları koyu izotropik polimerlerden kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Şekil 3.1’de PDSK ve

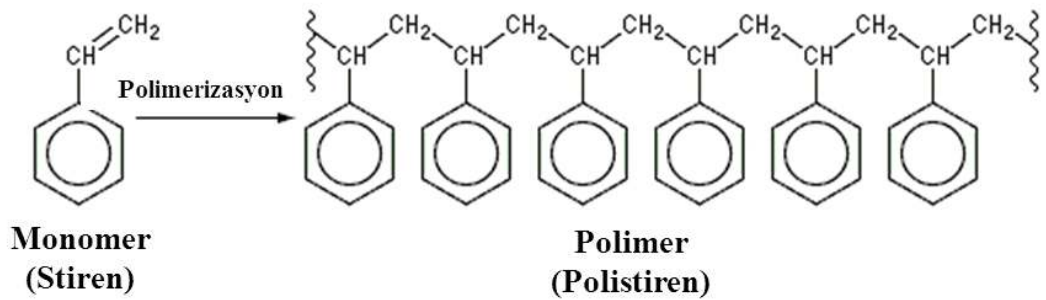
PSSK yapıların POM (Polarize Optik Mikroskop) görüntüleri ve sıvı kristallerin uzaklaştırılmasından sonra SEM (Taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.1. a) PDSK yapı b) PSSK yapı için örnek POM görüntüleri ve c) PDSK yapı d) PSSK yapı için sıvı kristaller uzaklaştırıldıktan sonra örnek SEM görüntüleri.

3.1. POLİMERLER

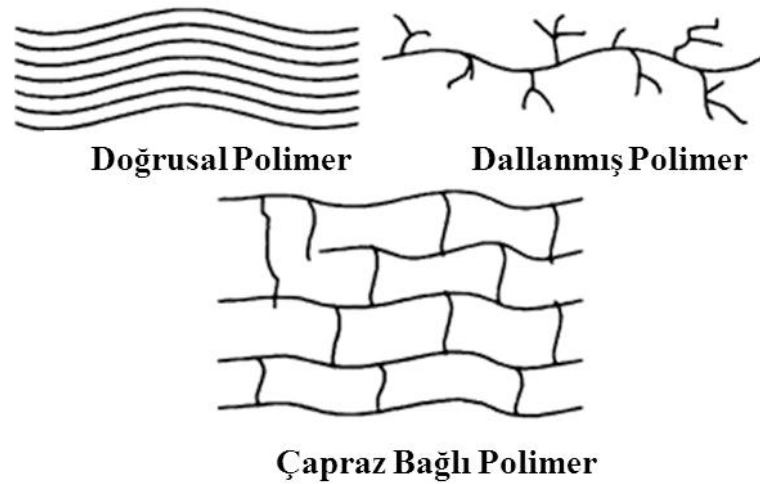
Polimerler monomer (pre-polimer) olarak adlandırılan yapı birimlerinin kimyasal bağlarla bağlanması ile oluşan büyük moleküllü yapılardır. Polimerlerin oluşması için monomerlerin yüzlerce, binlerce hatta daha fazlasının polimerizasyon reaksiyonları ile bir araya gelerek birbirine bağlanması gerekir. Şekil 3.2’de bir monomer olan stiren maddesinin polimerizasyon reaksiyonu sonucunda polistiren polimerine dönüşümü kimyasal formülleri ile örnek olarak verilmiştir [41].



Şekil 3.2. Stiren monomeri ve polistiren polimerinin gösterimi.

Sıcaklığa bağlı olarak polimerler camsı (glassy), lastiksi (rubber-like) ve viskoz sıvı olmak üzere üç farklı fiziksel durumda olabilirler. Polimer ısıtıldığında, ilk olarak atomların denge konumu etrafında titreşim hareketi gösterdiği camsı durumda bulunur. Sıcaklık artırıldığında polimer, camsı durumdan burulma titreşimlerinin yapıldığı lastiksi duruma daha sonra da makro moleküllerin bir bütün olarak hareket ettiği viskoz sıvı duruma geçer. Bu geçişler belli bir sıcaklık değerinde olmaz, bir sıcaklık aralığında polimerin fiziksel durumu değişebilir. Bu aralıktaki ortalama sıcaklık “geçiş sıcaklığı” olarak tanımlanır. Camsı durumdan lastiksi duruma geçiş sıcaklığı “cam geçiş sıcaklığı (T_g)”; lastiksi durumdan viskoz sıvı duruma geçiş sıcaklığı ise “akış sıcaklığı (T_f)” olarak adlandırılır. Ayrıca cam geçiş sıcaklığının altında ve üzerinde polimer faz değiştirmez, aynı fazda kalır [41].

Polimer içerisinde soğurulan düşük moleküler kütleli bazı maddelerin polimer zincirlerini çözmesiyle (plastikleştirme) polimerlerin hem akış sıcaklığı hem de cam geçiş sıcaklığı düşürülebilir. PDSK kompozit yapılarda kullanılan polimerlerin çoğunun sıvı kristali soğurma özelliği bulunur. Bu durum hem sıvı kristalin mezojenik özelliğini kaybetmesine hem de polimerin özelliğinin değişmesine neden olduğundan PDSK tipi kompozit filmlerde önemli bir fenomendir [33], [42].



Şekil 3.3. Farklı polimer yapılarının şematik gösterimi.

Polimer zincirleri Şekil 3.3'te gösterildiği gibi farklı doğrusal zincirlerin birbirine bağlandığı, doğrusal, dallanmış veya çapraz bağlı olabilir. Doğrusal ve dallanmış polimerler genellikle uygun çözücüler tarafından çözülebilirken, çapraz bağlı polimerler çözücülerde çözülemezler ve ağ yapılarını korurlar. Çapraz bağlı polimerler ile hem emülsiyon hem de polimerizasyon kaynaklı faz ayırma yöntemleri uygulanarak

kolaylıkla PDSK yapılar oluşturulabilir. Çözelti ve sıcaklık kaynaklı faz ayırma yöntemleri ile PDSK yapılar oluşturmak için ise doğrusal veya dallanmış polimerlerin kullanılması daha uygundur. PDSK kompozit yapılarda kullanılan en yaygın polimerler, akrilat, metakrilat veya vinil ailelerden türetilen polimerlerdir [33].

3.2. POLİMER DAĞILMIŞ SIVI KRİSTALLER

Polimer matrisinde dağılan sıvı kristal yapılar ilk olarak, bir nematik sıvı kristalin sulu bir polivinil alkol (PVA) çözeltisine eklenerek emülsiyon haline getirilmesiyle oluşturulmuştur [43]. Elektriksel olarak kontrol edilebilir, saçılma özelliği gösteren PDSK ince filmler ise bir tür faz ayırma yöntemi kullanılarak ilk olarak 1985 yılında Doane ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir [33]. Bu çalışmada çözücüdeki bir sıvı kristalin içerisine epoksi reçinesi (polimer) karıştırmışlar ve ısıtma işlemi ile polimer matrisinde dağılmış sıvı kristal damlacıkların oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Oluşturulan PDSK filmin, elektrik alanın sıfır olduğu durumda, ışığı yüksek miktarda saçtığı görülürken, PDSK filmine yeterli bir elektrik alan (eşik voltajının üzerinde) uygulandığında transparan bir görünüm aldığı görülmüştür. Ayrıca yapının dikroik bir boya içermesi durumunda kontrol edilebilir bir soğurma gösterdiği de fark edilmiştir. Bu özellikler günümüzde polimer dağılmış sıvı kristallerin temel ve ilgi çeken özellikleri arasında yer almaktadır [44].

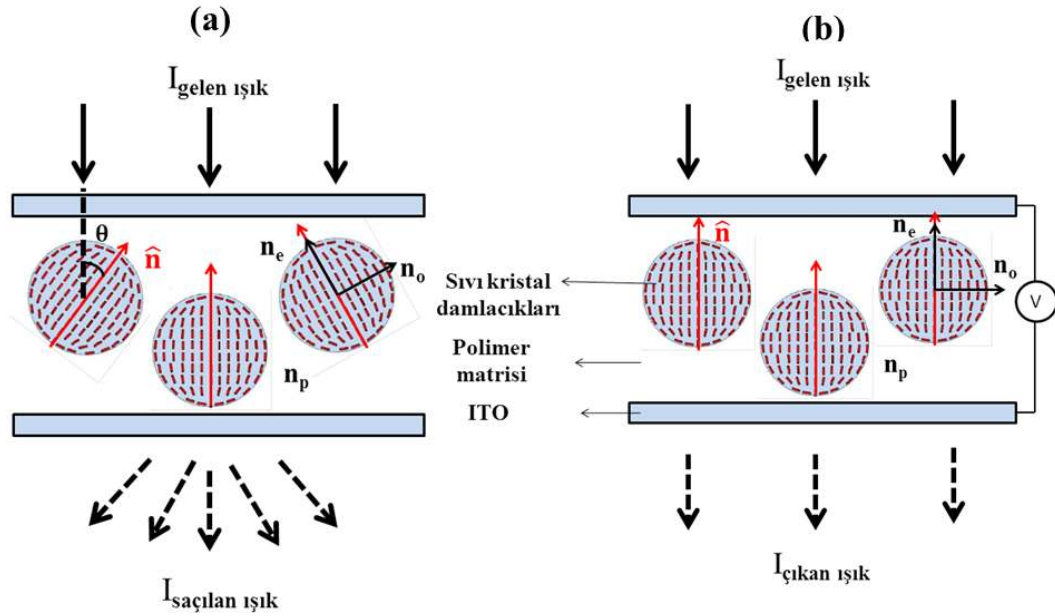
Bu alanda yapılan bilimsel çalışmalarda elektronik cihazlar için hazırlanan polimer dağılmış sıvı kristaller 60-120 V aralığında çalışabiliyorken, son yıllarda elde edilen gelişmeler ile PDSK filmlerde bu çalışma aralığı 5-10 V civarlarına kadar çekilebilmiştir. Düşük voltajlarda çalışabilmeleri, PDSK cihazların teknolojinin çeşitli alanlarında kendine uygulama sahası bulmasına da katkı sağlamıştır [33], [43].

PDSK'lar yapısal olarak, polimer matrisinde dağılmış ve çift kırıcı özelliğe sahip sıvı kristal damlacıklarından oluşur. Polimer içindeki bu sıvı kristal damlacıklar, PDSK yapıların benzersiz bazı özelliklere sahip olmasının nedenidir. Örneğin, dışarıdan uygulanan elektrik alan ile sıvı kristal moleküllerin yönelimi değiştirilerek, PDSK yapıdan geçen ışığın şiddetini değiştirmek mümkündür [33].

Sıvı kristal temelli cihazlarda, direktör eksenine sıvı kristal molekülleri için ortalama bir yön gösterir. PDSK yapılarda ise bunun aksine her bir sıvı kristal bölgesi diğer damlacıklardan bağımsız bir yönelime sahiptir. Sıvı kristal bölgelerindeki yönelimin

farklı olması, PDSK yapılar için önemli bir özellik olarak ortaya çıkmakta ve ışığın her yönde saçılmasına sebep olmaktadır [44].

Polimerler optik olarak tek bir kırılma indisine (n_p) sahipken, sıvı kristal yapılar çift kırıcılık özelliklerinden dolayı “sıradan kırılma indisi (n_o)” ve “sıradan olmayan kırılma indisi (n_e)” olmak üzere iki farklı kırılma indisine sahiptirler [44].



Şekil 3.4. PDSK kompozit yapılarında optik ışınımın yapı içerisinde geçişinin şematik gösterimi; (a) $V=0$, (b) $V \neq 0$.

PDSK yapılar Şekil 3.4’te gösterildiği gibi iki farklı durumda çalışabilirler. Elektrik alanın olmadığı durumda (Şekil 3.4.(a)), polimer matrisinde dağılmış sıvı kristal damlacıkları film boyunca rastgele bir dağılım gösterirler. Film normali boyunca gelen ışığın (I_{gelen}) doğrultusu ile sıvı kristal damlacıklarının ortalama yönelim direktörü ($\hat{n}$) arasında bir θ açısı oluşur. Sıvı kristalin θ açısına bağlı olan etkin kırılma indisi Denklem (3.1) ile ifade edilir [33], [39]:

$$n_{etkin}(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{(n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta)}} \quad (3.1)$$

Bu durum optik dalganın polimer matrisinde gördüğü polimer matrisinin kırılma indisi (n_p) ile sıvı kristal moleküllerin etkin kırılma indisi (n_{etkin}) arasında bir uyumsuzluğa sebep olduğundan optik dalga PDSK yapıdan geçerken saçılır ($I_{saçılan}$). Elektrik alanın uygulanmadığı bu durumda PDSK yapı opak bir görünüme sahiptir.

Elektrik alan uygulandığında (Şekil 3.4.(b)) ise polimer matrisinde damlacıklar içindeki sıvı kristallerin ($\Delta\epsilon > 0$) uzun eksenleri elektrik alan yönünde hizalanır. Bu durumda film normal boyuna gelen ışığın doğrultusu ile sıvı kristal damlacıklarının direktörü ($\hat{n}$) arasındaki θ açısı sıfır olur. Bu durumda polimer matrisinin kırılma indisi (n_p) ile sıvı kristal moleküllerinin sıradan kırılma indisi (n_o) eşleşerek aynı değere sahip olur. PDSK yapıya gelen ışık farklı bir kırılma indisini görmediği için film içinden saçılmadan geçer ($I_{\text{çıkan}}$). Elektrik alanın uygulandığı bu durumda PDSK yapı transparan bir görünüme sahiptir [38], [39].

PDSK filmini opak durumdan transparan duruma getirmek için yeterince yüksek bir elektrik alan uygulanmalıdır. Bu elektrik alan için gerekli olan voltaj değeri (eşik voltajı) sıvı kristal damlacık boyutu, sıvı kristal damlacık şekli, örgü enerjisi, elastik sabitleri ve sıvı kristalin dielektrik anizotropisi gibi bazı önemli fiziksel parametrelere bağlıdır. Daha küçük sıvı kristal damlacıklara sahip ve daha kalın olan PDSK filmler daha yüksek saçılma gösterirlerken bu yapıları yeniden yönlendirmek için daha yüksek voltaj uygulanması gerekmektedir [39].

Güçlü ışık saçma özelliği, geniş görüş açısı ve yüksek geçirgenliği nedeniyle, PDSK temelli cihaz uygulamalarında polarizör kullanılmasına gerek duyulmamaktadır. Bu, PDSK yapıların sıvı kristal ekran teknolojilerine göre önemli bir avantajı olup PDSK yapıların kullanıldığı ekranlarda daha parlak görüntünün elde edilmesini sağlamıştır. Yine PDSK yapıların geniş ve esnek yüzeylere kaplanabilir olmaları bu yapıların en önemli avantajlarından olmuş, PDSK yapılarının açılır-kapanır pencerelerde kullanılmasına imkân vermiştir [18].

3.3. PDSK HAZIRLAMA YÖNTEMLERİ

PDSK hazırlama yöntemleri, başlangıçta sıvı kristallerin polimerde (ya da monomerde) emülsiyon halinde olmasına göre ya da sıvı kristal, monomer ve katkı maddesinin tek bir fazda çözelti oluşturmasına göre “enkapsülasyon” ve “faz ayrılması” olmak üzere iki ana sınıfta gruplandırılabilir. Sıvı kristal damlacıklar enkapsülasyon yönteminde sıvı kristal fazda oluşurken, faz ayırma yönteminde ise polimerin katılaşmasıyla oluşur [44].

3.3.1. Enkapsülasyon Yöntemi

PDSK üretmek için ilk çalışmalar, mikro kapsülleme olarak bilinen bu teknikle yapılmıştır [40]. Enkapsülasyon küçük kapsül ilaçlar, gıda ürünleri ve sıcaklık gösteren cihazlar elde etmek için uygulanan bir tekniktir [45].

Enkapsülasyon yöntemi homojen olmayan bir çözelti ile başlar ve kapsülleyici ortamı içeren sulu bir karışımda bir nematik sıvı kristalin emülsiyon sürecini içerir. Bu teknikte nematik bir sıvı kristal polivinil alkol gibi su bazlı bir polimer ile karıştırılır. Karışım bir emülsiyon oluşturmak için mekanik olarak da karıştırılır [45]. Daha sonraki süreçte su buharlaştırılır ve sıvı kristal polimer tabakası ile çevrilir. Böylece küçük kapsüllerden çok sayıda oluşur. Bu yöntemle üretilen sıvı kristal damlacıkları ebat olarak birbirlerinden farklı olma eğilimindedir ve hatta yapı içerisinde sıvı kristal damlacıklar birbirine bağlanabilir [33], [40].

Enkapsülasyon yönteminin temel avantajı, geniş alanlara kolay uygulanabilir olmasıdır. Ayrıca, hem hidrofilik hem de hidrofobik polimerler dâhil birçok farklı türde polimerle de uyumludur [38].

Bu yöntemde sıvı kristal damlacıklarının boyutu, suya yüzey aktif maddeleri veya alkol eklenerek, ara yüzey özellikleri değiştirerek kontrol edilebilir [38].

3.3.2. Faz Ayırma Yöntemi

Faz ayırma yöntemi ile PDSK elde etmek için polimerizasyon, çözücü ve sıcaklık kaynaklı faz ayrılması olmak üzere üç farklı yöntem vardır. Üç yöntem de temelde aynı prensipleri içerir [46]. Faz ayırma yöntemi ile PDSK yapı oluşturmak için önce bir polimer ve bir sıvı kristalin homojen bir karışımı hazırlanır. Polimer katılaştırılırken, sıvı kristal molekülleri polimerden dışarı atılır (faz ayırma) ve sıvı kristal molekülleri bir araya gelerek polimer matrisinde sıvı kristal damlacıkları oluştururlar [40], [44].

3.3.2.1. Polimerizasyon Kaynaklı Faz Ayırma Yöntemi

Polimerizasyon kaynaklı faz ayırma yönteminde ilk olarak, sıvı kristal ve monomerin homojen bir karışım oluşturması gerekir. Homojen çözelti için polimerizasyon termal veya optik (UV (Ultraviyole) ışık ile foto-polimerizasyon) yolla iki farklı şekilde başlatılabilir [44].

Termal yolla başlatılan polimerizasyon, serbest radikal polimerizasyonu veya polikondansasyon mekanizması ile gerçekleştirilebilir. Termal olarak indüklenen

polimerizasyonun dezavantajı, bu yöntemde Monomer/Sıvı Kristal içerisindeki monomerin konsantrasyonunun düşük olması gerektiği için, polimerizasyonun yavaş gerçekleşmesidir. Foto-polimerizasyon ile gerçekleşen faz ayrılması tipik olarak serbest radikal polimerizasyonu ile yapılır [38].

Polimerizasyon gerçekleşirken sıvı kristaller çözeltiden ayrılır ve bir araya gelerek sıvı kristal damlacıkları oluşturur. Damlacıklar, polimer bağlayıcı moleküllerin tutulacağı ve artık kolay hareket edemeyeceği kadar katı hale gelinceye kadar büyür [40].

Hızlı ve kontrolü kolay bir yöntem olmasından dolayı polimerizasyon kaynaklı faz ayırma yöntemi (özellikle foto-polimerizasyon ile yapılan faz ayrılması) en yaygın kullanılan yöntemdir [38].

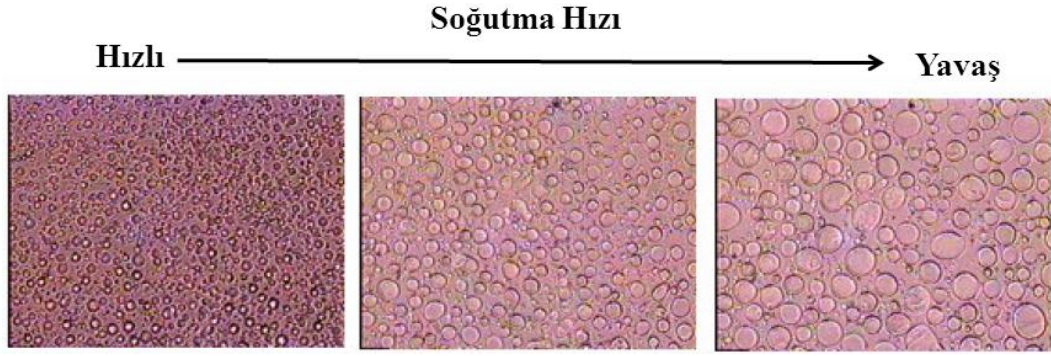
Bu yöntemde UV ışık yoğunluğu, polimerizasyon sıcaklığı ve sıvı kristal konsantrasyonu farklı morfolojiler elde etmek için değiştirilebilir [39], [47].

3.3.2.2. Sıcaklık Kaynaklı Faz Ayırma Yöntemi

Sıcaklık kaynaklı faz ayırma yönteminde kullanılan polimerler, polimetilmetakrilat (PMMA), polistiren (PS) gibi oda sıcaklığında sıvı kristalle karışmayan fakat yüksek sıcaklıkta sıvı kristal ile karışabilen termoplastik polimerlerdir [38], [48]. Ayrışma sıcaklıklarının altında eriyen termoplastik malzemeler bu yöntem için kullanılabilir [48].

Bu yöntemde, önce bir sıvı kristal ile erimiş bir polimerin homojen bir karışımı oluşturulur. Karışım, faz ayrılmasının gerçekleşmesi için belirli bir oranda soğutulur [44], [48]. Polimer sertleştikçe sıvı kristal damlacıklar oluşmaya başlar. Damlacıklar, polimerin cam geçiş sıcaklığı geçilinceye kadar büyümeye devam eder [33], [40].

Sıcaklık kaynaklı faz ayırma yönteminde, sıvı kristal damlacık boyutu soğutma hızı ve polimer konsantrasyonu ile kontrol edilebilirken araştırmalar bu yöntemde damlacık boyutunu etkileyen en önemli etkenin soğutma hızı olduğunu göstermektedir [39]. Soğutma hızı artırıldığında sıvı kristal damlacıkların büyümesi için yeterli zaman olmadığı için daha küçük boyutta sıvı kristal damlacıklar elde edilir [33], [40]. Şekil 3.5'te sıcaklık kaynaklı faz ayırma yöntemi ile oluşturulmuş PDSK yapı için soğutma hızına göre sıvı kristal damlacıklarının boyutlarındaki değişimi gösteren örnek mikroskop görüntüsü verilmiştir [33]. Şekilde de soğutma hızının azalmasıyla sıvı kristal damlacıkların boyutundaki artış açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.5. PDSK yapıda soğutma hızının oranına göre sıvı kristal damlacıkların büyüklük değişimi.

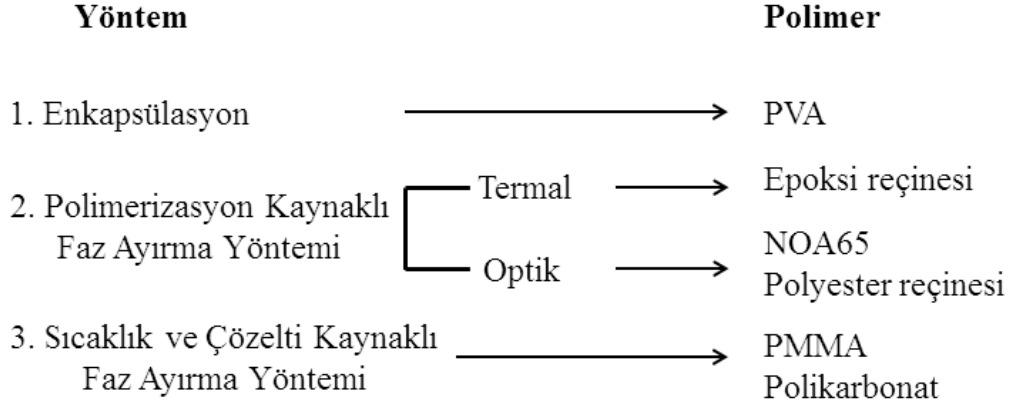
Sıcaklık kaynaklı faz ayırma yöntemi basit bir yöntem olmasına rağmen PDSK yapılarda yaygın kullanımı görülmemektedir. Çünkü bu yöntemle yapılan PDSK filmler, yapının oluşturma sürecinde uygulanan işlemlere karşı çok duyarlıdır. Bu yüzden bu yöntem ile yapılan PDSK filmlerin çoğaltılması çok mümkün değildir. Bir diğer dezavantajı da, sıvı kristal ve polimer fazların yüksek çözünürlüğe sahip olduğu yüksek sıcaklıklarda, sıcaklık kaynaklı faz ayırma yöntemi ile yapılan PDSK filmlerin kararsız oluşudur. Ayrıca, polimerizasyon kaynaklı faz ayırma yöntemi ile karşılaştırıldığında bu filmler için daha büyük sıvı kristal konsantrasyonları gerektirmesi bir diğer dezavantaj olarak da sayılabilir [33], [49].

3.3.2.3. Çözücü Kaynaklı Faz Ayırma Yöntemi

Çözücü kaynaklı faz ayırma yöntemi, ayrışma sıcaklığının üstünde eriyen veya çözücü kaplama tekniklerinin kullanıldığı termoplastik polimerler ile PDSK yapı oluşturmak için kullanılır [48]. Bu yöntemde sıvı kristal ve polimerin ortak bir çözücü içinde çözündüğü homojen bir çözelti hazırlanır. Çözücünün buharlaştırılarak uzaklaştırılmasıyla polimer katılaşır ve faz ayrışması gerçekleştirilir. Çözücü tamamen buharlaşıncaya kadar sıvı kristaller sürekli olarak çözeltiden dışarıya çıkar ve sıvı kristal damlacıklar oluşur [40]. Çözücü kaynaklı faz ayırma yönteminde sıvı kristal damlacık boyutunu etkileyen ana faktör, çözücü çıkarma hızıdır [39]. Sıcaklık kaynaklı faz ayırma yöntemine benzer şekilde, çözücü kaynaklı faz ayırma yönteminde de çözücü çıkarma hızı azaldıkça damlacık büyüklüğü artar [33].

Çözücü kaynaklı faz ayırma yöntemi uygulaması kolay bir yöntemdir. Ancak, bu yöntemle oluşturulan PDSK yapı için önemli bir değişken olan buharlaşma hızını tekrarlanabilir şekilde kontrol etmek kolay değildir [38].

PDSK oluşturmak için kullanılan yaygın yöntemlere uygun olan bazı polimerler örnek olarak Şekil 3.6’da verilmiştir [49].



Şekil 3.6. PDSK hazırlama yöntemlerine uygun olan örnek polimerler.

3.4. PDSK YAPILARIN KATKILANMASI

PDSK yapılar polimer ve sıvı kristalin bir araya getirilmesi ile farklı deneysel işlemler uygulanması sonucunda oluşturulan kompozit yapılardır. Literatürde PDSK yapılara farklı katkı malzemeleri katkılanarak opto-elektronik özelliklerinin değiştirilebildiği ve PDSK tabanlı cihazların performanslarının artırılabilirdiği görülmektedir. PDSK yapılara katkılanan bazı etken maddeler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- karbon nanotüp [22],
- kuantum nokta [27],
- boyalar [50],
- farklı nanoparçacıklar [16], [51].

Bu katkı malzemesi arasında boyaların PDSK yapılara katkılanmasıyla oluşturulan boya katkılı PDSK kompozit yapılar üzerine yapılan çalışmalar araştırmacılar tarafından son yıllarda oldukça yoğun bir ilgi görmektedir.

3.4.1. Boya Katkılı PDSK Yapılar

Son zamanlarda, boya katkılı PDSK yapılar, çeşitli teknolojik uygulamaları nedeniyle farklı araştırma grupları arasında ilgi odağı olmuştur. Kompozit yapı içerisine katkılanan boya ışığın soğurulmasında bir artışa sebep olur ve böylece optik etkiler için gerekli olan gücü büyük ölçüde azaltır. Boya katkılı PDSK filmlerde ışığın

soğurulmasının ve saçılmasının kontrol edilebilir olması da önemli bir avantajdır. Boya katkılı PDSK yapılar renkli ve yüksek kontrastlı ekranlar üretmek için kullanılabilir [28], [52].

Boya katkılı PDSK yapı oluşturulurken sıvı kristal yapıda iyi çözünebilen fakat polimer yapıda iyi çözünemeyen bir boya seçimi daha uygundur. Çünkü polimer matrisinde çözünmüş halde kalan boya molekülleri, dış alandan etkilenmez ve boya molekülleri rastgele bir yönelim gösterir. Bu nedenle, sadece nematik sıvı kristal damlacık içinde çözünmüş boya dikroik özellik sergiler ve filmlerin opto-elektronik tepkisine katkıda bulunur. Boya ve sıvı kristal molekülleri arasındaki güçlü etkileşimler, moleküllerin yönelimini, kırılma indisini, dielektrik sabitini ve faz geçiş sıcaklığı gibi bazı önemli parametrelerini de etkiler [53].

PDSK yapılara boya katkılanmasının dezavantajı olarak boyanın UV ışınını soğurmasından dolayı boyanın ayrışması ve monomerin polimerizasyonunu zorlaştırması söylenebilir [54].

PDSK yapılara boya katkılanarak oluşturulan yeni kompozit yapılar büyük soğurma değişimleri gösteren cihazlar üretmek için kullanılabilir. Bu yapılar için en iyi etki dikroik boyalarda görülür [40].

3.4.2. Dikroik Boyalar

Dikroik boya, çubuk benzeri bir şekle sahip olan ve ışığın moleküle paralel ve dik olarak gelmesine bağlı olarak ışığı soğurma özelliğinin değiştiği ve bu özelliğin dikroik oran (DR) ile karakterize edildiği eşsiz bir anizotropi gösteren organik bir moleküldür [55].

Dikroik boyanın etkinliğini karakterize etmek için dikroik oranı ya da kontrast oranı (CR) hesaplanır. DR ve CR sırasıyla Denklem (3.2) ve Denklem (3.3) ile verilir [56]:

$$DR = \frac{A_{\parallel}}{A_{\perp}} \quad (3.2)$$

$$CR = \frac{A_{off}}{A_{on}} \quad (3.3)$$

burada, $A_{\parallel}$ ve $A_{\perp}$ sırasıyla ışığın boya moleküllerine paralel ve dik geldiği durumda boyanın ölçülen maksimum soğurma değerini, A_{off} ve A_{on} ise sırasıyla elektrik alanın

uygulanmadığı ve elektrik alanın uygulandığı (satürasyon voltajı) durumda boyanın ölçülen maksimum soğurma değerini ifade eder.

Dikroik oranı düzen parametresi (S) ile Denklem (3.4) ile ilişkilidir [56], [57].

$$S = \frac{DR - 1}{DR + 2} \quad (3.4)$$

Düzen parametresinin soğurma değerine bağlı bir başka ifadesi de Denklem (3.5) ile verilmiştir [2], [58]:

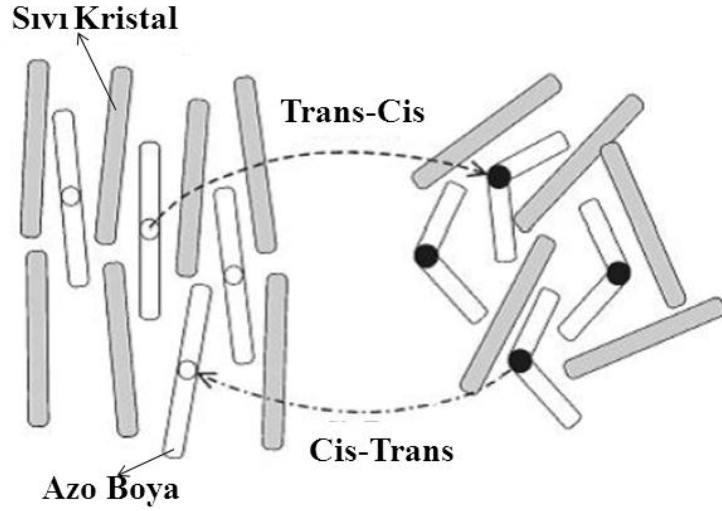
$$S = \frac{A_{\parallel} - A_{\perp}}{A_{\parallel} + 2A_{\perp}} \quad (3.5)$$

Dikroik oranı, yüksek kontrast ve düşük güç tüketimi elde etmek için önemli bir parametre olarak kabul edilir [1]. Uygulamalarda daha çok pozitif dikroik oranına sahip boyalar kullanılmaktadır.

3.4.2.1. Azo Boyalar

Bir dikroik boya olan azo boya moleküllerinin yapısı sıvı kristal moleküllerinin yapısına benzerdir ve ışığı kuvvetli soğurma özellikleri vardır. Boyama güçlerinin yüksek olması ve maliyeti düşük malzemelerden sentezlenebilmesinin yanında kolay ulaşılabilmesi azo boyanın diğer boyalara göre daha fazla tercih edilmesine sebep olur. Ayrıca sarı, kırmızı, mor, mavi, yeşil, kahverengi, siyah renkler olmak üzere tüm renk aralığını kapsar [2].

Moleküler yapılarında bir veya daha fazla azo grup içeren azo boyalar, üzerlerine gelen ışığı soğurmaları sonucunda moleküllerinin şekli değişir. Bu durum trans-cis foto-izomerizasyonu olarak adlandırılır. Trans formu enerji bakımından daha kararlı bir yapıya sahiptir ve uzunlamasına bir şekli vardır. Cis formunda ise azo grubun aromatik halkaları 120° açı yapar. Trans ve Cis formları belirli dalga boyunda birbirlerine dönüşebilirler (Şekil 3.7). Genellikle trans formundan cis formuna geçişteki dalga boyu UV ışık $\pi-\pi^*$ enerji bandı geçişine denk gelir. Mavi ışık $n-\pi^*$ bandı ise daha çok cis formundan trans formuna geçişte kullanılan dalga boyudur [32].



Şekil 3.7. Sıvı kristal molekülleri içerisinde azo boya moleküllerinin trans-cis formu.

3.5. PDSK KULLANIM ALANLARI

PDSK kompozit yapılar kendilerine özgü opto-elektronik ve mekanik özelliklerinden dolayı çok çeşitli uygulama alanlarına sahiptir.

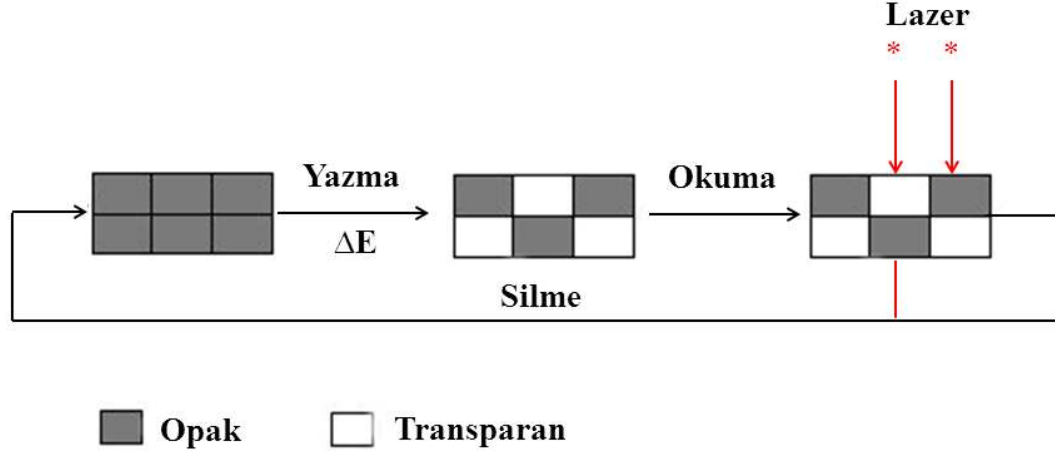
PDSK filmlerin kullanıldığı en popüler alan akıllı pencere uygulamalarıdır (Şekil 3.8). İletken ve ışığı geçiren iki yüzey arasına bir PDSK filmin yerleştirilmesi sonucu, yeterli bir voltaj uygulanmasıyla pencerenin görünümünü opak ve transparan durum arasında değiştirmek mümkündür. Bu tür cihazlar gizlilik veya ışık koruması gerektiren alanlar için kullanılabilmektedir [44].



Şekil 3.8. PDSK filmlerin akıllı pencerelerde kullanımı.

PDSK yapıların başka bir uygulaması da kalıcı bellek özelliği ile ilgilidir. PDSK yapılar kullanılarak elektriksel olarak bilgi yazılabilir, yazılan bilgi optik olarak okunabilir ve

termal yolla ilk saçılma durumuna getirilebilir. Örneğin Şekil 3.9’da görülen 6 pikseli ekrana elektrik alan uygulanarak, bilgiler dijital olarak yazılabilir (opak 0, transparan 1 kodlaması). Lazer kullanılarak yazılan bilgiler okunabilir ve kompozit yapı belli bir sıcaklığın üzerinde ısıtılarak başlangıç durumu olan opak görünüme dönüştürülebilir [44].



Şekil 3.9. PDSK yapıların optik dijital hafıza cihazlarında kullanımına bir örnek.

PDSK filmlerinin en heyecan verici uygulamalarından biri de projeksiyon ekranlarında kullanılmasıdır. Ekran teknolojisinde boyut, masraf ve güç gereksinimleri gibi faktörlerden dolayı günümüzde hala geniş yüzeyli ekranların oluşturulması kolay değildir. Saçılma özelliklerinden dolayı PDSK filmlerle elde edilen yüksek performanslı projeksiyonlar, standart boyutlu ekranlar kullanılarak geniş alanlı ekranlar elde etmek için kullanılan bir yöntem olmuştur [33].

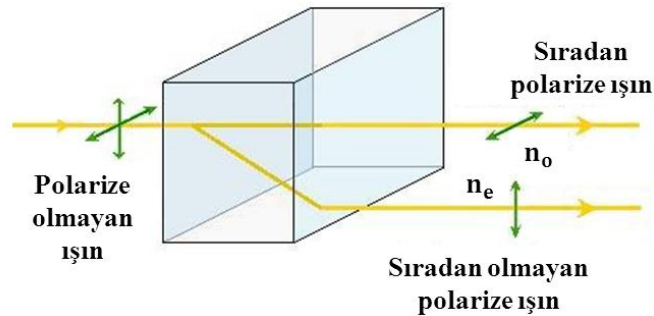
4. SIVI KRİSTAL VE POLİMER YAPILARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

4.1. ANİZOTROPİ

Sıvı kristal yapıların elektrik alan, manyetik alan veya optik dış etkiler ile yönelimlerinin değiştirilebildiği bilinmektedir. Sıvı kristallerin bu gibi etkilere tepki vermesinin en önemli sebeplerinin başında moleküllerin anizotropik yapıya sahip olması gelmektedir. Anizotropi; sıvı kristal moleküllerinin uzun eksenine paralel olarak ölçülen fiziksel özelliklerin dik olarak ölçülen fiziksel özelliklerden farklı olmasıdır [36].

4.1.1. Optik Anizotropi

Sıvı kristaller anizotropik yapılarından dolayı çift kırılma özelliği gösterirler. Bunun anlamı; polarize olmayan bir ışık demeti sıvı kristale girdiği zaman, düzlem polarize olan iki ışık demetine ayrılır (Şekil 4.1) [32]. Sıvı kristal ortamdaki optik anizotropiden dolayı, bu ışık demetlerinin gördükleri kırılma indisleri ve dolayısı ile optik ortamdaki hızları birbirinden farklı olduğu için aralarında bir faz farkı oluşur. Sıvı kristal yapı içinde sıradan kırılma indisi (n_o) ve sıradan olmayan kırılma indisi (n_e) olmak üzere sıvı kristalin iki farklı kırılma indisi oluşmaktadır.



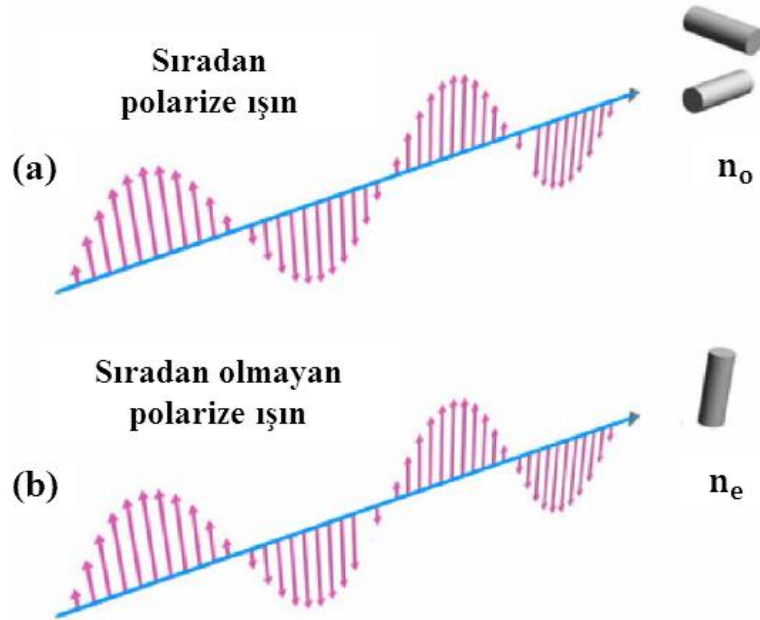
Şekil 4.1. Sıvı kristal ortama gönderilen polarize olmayan ışığın davranışı.

Gelen polarize ışığın elektrik alan vektörünün titreşim doğrultusunun sıvı kristalin direktör eksenine dik olması durumunda n_o ($n_{\perp}$) (Şekil 4.2.(a)), gelen polarize ışığın elektrik alan vektörünün titreşim doğrultusunun sıvı kristalin direktör eksenine paralel

olması durumunda ise n_e ($n_{\parallel}$) kırılma indisi görülür (Şekil 4.2.(b)) [31], [59].

Sıvı kristal yapıların optik olarak gösterdikleri bu anizotropik davranış, sıvı kristal yapıların karakterizasyonu için önemli bir parametre olan optik anizotropi (Δn) parametresiyle Denklem (4.1) ile ifade edilir [35]:

$$\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} \quad (4.1)$$



Şekil 4.2. Sıvı kristallerde a) sıradan polarize ışının ve b) sıradan olmayan polarize ışının sıvı kristalin moleküller eksenine boyunca yayılması.

Sıvı kristal yapılarda optik eksene paralel yayılan ışık demetinin kırılma indisi, dik yayılan ışık demetinin kırılma indisinden daha büyük ise ($n_{\parallel} > n_{\perp}$) sıvı kristal yapı pozitif optik anizotropiye ($\Delta n > 0$), küçük ise ($n_{\parallel} < n_{\perp}$) sıvı kristal yapı negatif optik anizotropiye ($\Delta n < 0$) sahiptir.

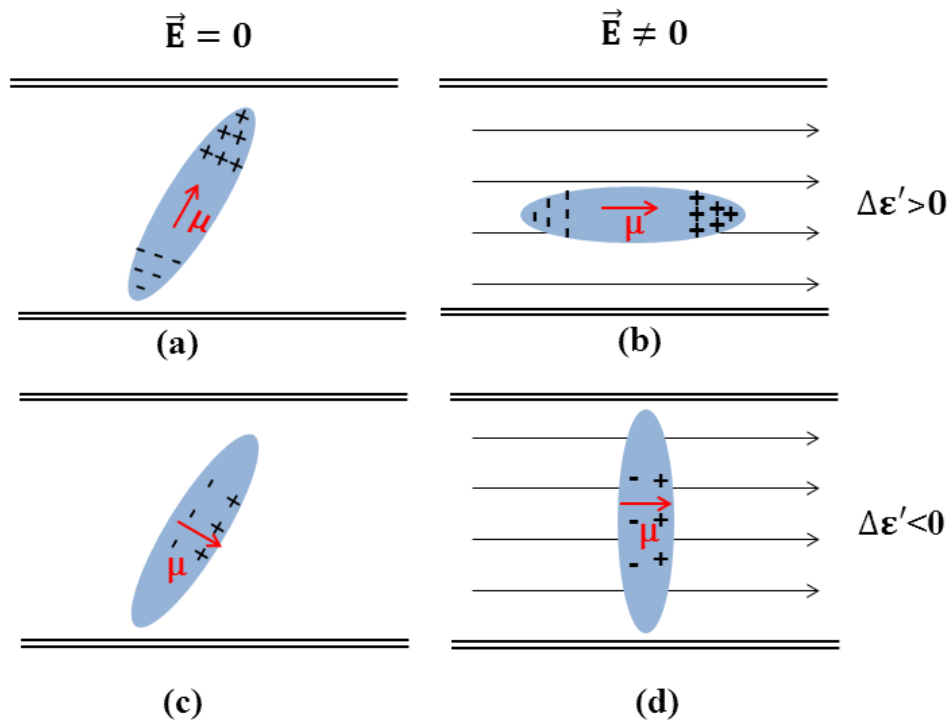
Çalışmalarda yaygın olarak pozitif optik anizotropiye sahip nematik sıvı kristaller kullanılmaktadır. Optik anahtarlama, sıvı kristal tabanlı ekran uygulamaları, faz geciktiricilerde ve elektriksel olarak kontrol edilebilen uzaysal ışık modülatörleri gibi birçok cihazda sıvı kristal yapıların optik anizotropi özelliğinden faydalanılmaktadır [2], [31], [32].

4.1.2. Dielektrik Anizotropi

Sıvı kristallerin elektrik alana karşı gösterdikleri tepkinin bir ölçüsü olan dielektrik anizotropi ($\Delta\epsilon'$) Denklem (4.2) ile ifade edilir:

$$\Delta\epsilon' = \epsilon'_{\parallel} - \epsilon'_{\perp} \quad (4.2)$$

burada, $\epsilon'_{\parallel}$ ve $\epsilon'_{\perp}$ sırasıyla elektrik alana paralel ve dik doğrultuda ölçülen dielektrik sabitleridir. Elektrik alana paralel yönde ölçülen dielektrik sabitinin dik yönde ölçülen dielektrik sabitinden büyük olması durumunda ($\epsilon'_{\parallel} > \epsilon'_{\perp}$) sıvı kristal yapı pozitif bir dielektrik anizotropiye ($\Delta\epsilon' > 0$), küçük olması durumunda ($\epsilon'_{\parallel} < \epsilon'_{\perp}$) ise sıvı kristal yapı negatif bir dielektrik anizotropiye ($\Delta\epsilon' < 0$) sahip olur (Şekil 4.3) [36]. Pozitif dielektrik anizotropiye sahip sıvı kristallerde moleküllerin uzun eksenı boyunca sahip olduğu dipol moment (μ) daha baskın iken, negatif dielektrik anizotropiye sahip sıvı kristallerde moleküllerin kısa eksenı boyunca sahip olduğu dipol moment daha baskındır.



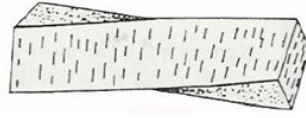
Şekil 4.3. Pozitif dielektrik anizotropiye sahip sıvı kristal moleküllerin yönelimi a) $\vec{E}=0$ b) $\vec{E} \neq 0$; negatif dielektrik anizotropiye sahip sıvı kristal moleküllerin yönelimi c) $\vec{E}=0$ d) $\vec{E} \neq 0$.

Dielektrik anizotropisi pozitif olan sıvı kristal yapıların elektrik alan yönünde yönelimi düşük frekans bölgesinde daha kolaydır. Dielektrik anizotropisi negatif olan sıvı kristal yapıların ise elektrik alana dik yönelimleri yüksek frekans bölgesinde daha kolay gerçekleşmektedir [31].

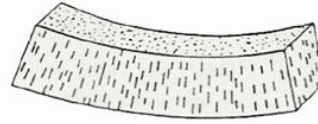
4.2. ELASTİK SABİTİ

Sıvı kristal molekülleri herhangi bir dış etkiye maruz kaldıklarında moleküler yönelimleri değişmektedir. Moleküllerin yönelimi esnasında moleküllerin üzerine etki eden döndürme kuvveti ve döndürme kuvvetini dengeleyen viskoz kuvvetlerden dolayı sıvı kristal moleküllerin ortalama direktör ekseninde ($\hat{n}$) bazı değişiklikler oluşturan deformasyonlar oluşabilir. Sırasıyla elastik sabitleri K_{11} , K_{22} ve K_{33} olan eğilme, burulma ve bükülme olmak üzere üç çeşit deformasyon vardır (Şekil 4.4) [32], [60].

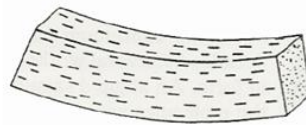
(a) Burulma



(b) Eğilme



(c) Bükülme



Şekil 4.4. Sıvı kristal moleküllerinde meydana gelen direktör deformasyon çeşitleri; a) burulma b) eğilme ve c) bükülme.

Bu deformasyonlar ile ilgili Frank tarafından geliştirilen serbest enerji yoğunlukları (F) sırasıyla Denklem (4.3.), Denklem (4.4.) ve Denklem (4.5.) ile verilmiştir.

$$F_{11} = \frac{1}{2} K_{11} (\nabla \cdot \hat{n})^2 \quad (4.3)$$

$$F_{22} = \frac{1}{2} K_{22} (\hat{n} \cdot \nabla \times \hat{n})^2 \quad (4.4)$$

$$F_{33} = \frac{1}{2} K_{33} (\hat{n} \times (\nabla \times \hat{n}))^2 \quad (4.5)$$

Genelde bir dış etki ile birden fazla deformasyon gerçekleşir. Deformasyonun her üç şeklinin de gerçekleştiği durumda toplam serbest enerji yoğunluğu Denklem (4.6.) ile verilir [32], [61].

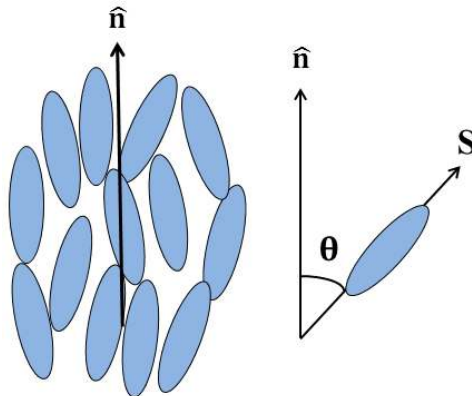
$$F_d = \frac{1}{2} K_{11} (\nabla \cdot \hat{n})^2 + \frac{1}{2} K_{22} (\hat{n} \cdot \nabla \times \hat{n})^2 + \frac{1}{2} K_{33} (\hat{n} \times (\nabla \times \hat{n}))^2 \quad (4.6)$$

4.3. DÜZEN PARAMETRESİ

Sıvı kristaller esneklik özelliklerinin yanında akışkan bir yapıya sahiptirler. Akışkanlık özelliği sıvı kristal moleküllerinin yönelimleri ile ilgili olup, moleküllerin uzun eksenleri boyunca yönelim düzenleri “düzen parametresi (S)” ile ifade edilir. Şekil 4.5’te sıvı kristal yapılarda moleküllerin ortalama yönelimleri ve düzen parametresi şematik olarak gösterilmiştir. Düzen parametresinin ifadesi Denklem (4.7) ile verilir [31]:

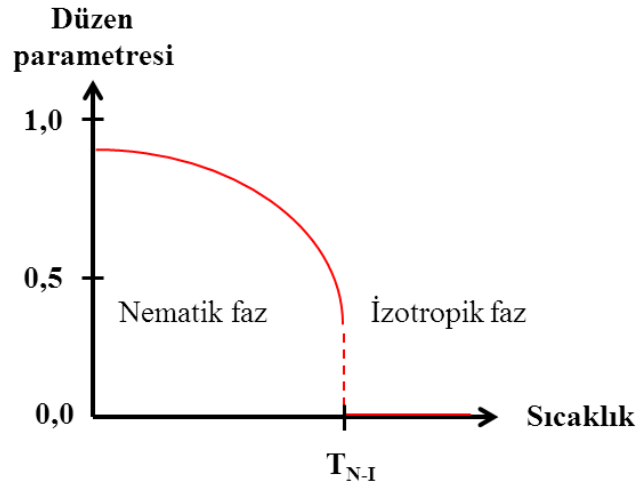
$$S = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 \theta - 1 \rangle \quad (4.7)$$

burada, θ bir sıvı kristal molekülünün uzun eksenini ile moleküllerin ortalama yönelimini gösteren direktör arasındaki açıyı ifade eder.



Şekil 4.5. Sıvı kristal yapılarda moleküllerin ortalama yönelimi ve düzen parametresinin gösterimi.

Düzen parametresinin 1 olması durumu ($S=1$) katı kristal fazın örnek verilebileceği tam düzeni, 0 olması durumu ise ($S=0$) sıvı fazın örnek verilebileceği tam düzensiz durumu temsil etmektedir. Nematik sıvı kristallerde S değeri 0,3 ile 0,9 arasında sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir [30], [37]. Sıcaklığın artmasıyla moleküllerin düzen derecesi azalmaktadır. Düzen parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4.6’da verilmiştir. T_{N-I} sıvı kristal moleküllerin nematik fazdan izotropik faza geçtiği sıcaklığı göstermektedir.



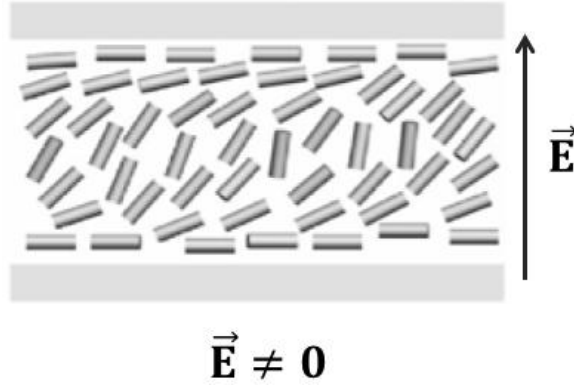
Şekil 4.6. Sıvı kristal yapılarda düzen parametresinin sıcaklığa bağlı değişim fonksiyonu.

4.4. ÖRGÜ (ANCHORING) ENERJİSİ

Sıvı kristal molekülleri ile bulundukları veya temas halinde oldukları yüzey arasındaki etkileşim örgü enerjisi ile ifade edilir. Adından da anlaşılacağı gibi, yüzeyin sıvı kristal molekülleri üzerindeki sabitleme etkisini tanımlar [62].

Örgü enerjisinin (W) fiziksel anlamı, sıvı kristal moleküllerinin yüzeydeki kolay yönelme pozisyonundan maksimum sapması için gereken enerji olarak ifade edilir. Genellikle iki tür örgü enerjisi vardır: Birincisi, yüzeydeki sıvı kristal moleküllerinin direktörünün yüzeyin normalinden sapması için gereken enerji olarak tanımlanan polar örgü enerjisi (W_θ), ikincisi de yüzeydeki sıvı kristal moleküllerinin direktörünün yüzeyin düzleminden sapması için gerekli enerji olarak tanımlanan mutlak örgü enerjisidir (W_ϕ). Örneğin dik yönelimli bir sıvı kristal hücre için sadece polar örgü enerjisinden bahsedilir [18], [30].

Sıvı kristal yapıların konulduğu sıvı kristal hücrelerin yüzeyine yakın olan sıvı kristal molekülleri yüzey hizalanmasından kuvvetli bir şekilde etkilenir ve yönelimleri sıvı kristal moleküllerinin yığın (bulk) bölgesinden daha farklıdır (Şekil 4.7). Çeperlerdeki yönelme etkisi de yığın bölgesine iletilir. Bu yüzden sıvı kristal yapılarda örgü enerjisi, opto-elektronik özellikleri de etkileyen önemli bir özelliktir [18].



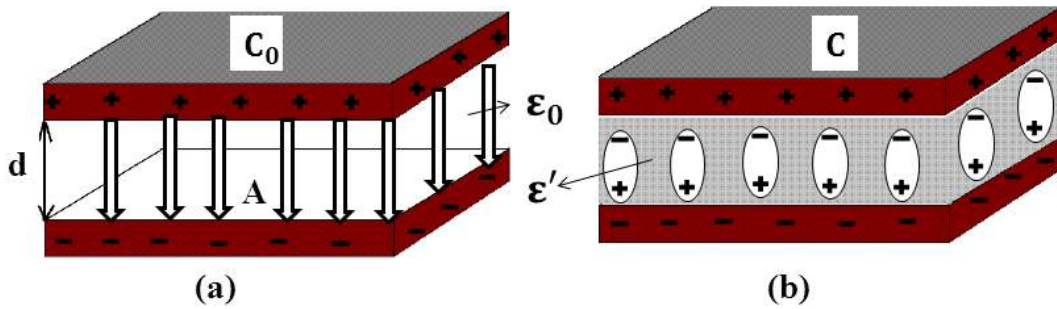
Şekil 4.7. Paralel yönlenime sahip bir hücrede sıvı kristal moleküllerinin yığın bölgesinde ve çeperlerdeki yönlenimi.

Güçlü örgü enerjisi ($\sim 10^{-4}$ J/m²) ile karşılaştırıldığında, zayıf örgü enerjisi ($\sim 10^{-6}$ J/m²) düşük eşik voltajına, daha kısa yükselme süresine ve daha uzun düşme süresine neden olur. Ayrıca örgü enerjisi hücre içindeki filmin kalınlığına da bağlıdır; ince hücrelerde daha güçlü bir örgü enerjisi görülür [30].

4.5. DİELEKTRİK ÖZELLİKLER

Elektrik alan uygulandığında enerji depolama yeteneği bulunan veya bulunduğu ortamda elektrik alanda değişikliğe sebep olan maddeler “dielektrik madde” olarak tanımlanır. Dielektrik maddelerin elektrik alan etkisinde serbest hareket eden yükleri olmadığı için yalıtkan malzemeler olarak nitelendirilirler. Dielektrik malzeme bir elektrik alan içerisine konulduğunda madde içindeki pozitif ve negatif yüklerin zıt yöndeki hareketleri sonucunda elektriksel dipoller oluşur. Oluşan bu dipoller elektrik alan doğrultusunda yönlenmeye zorlanır. Elektrik alan kaldırıldığında ise yükler eski konumlarına döner ve net elektrik dipol momentleri sıfırlanır. Bazı dielektrik maddeler ise elektrik alana konulmadığı halde bir dipol momente sahiptir [35]. Bunlar doğada kendiliğinden dipol momente sahip maddeler olarak adlandırılırken su molekülü buna en iyi örnek olarak gösterilebilir.

Paralel plakaları arasında boşluk bulunan C_0 kapasitansına sahip bir kondansatörün plakaları arasına dielektrik madde konulursa ve bu kondansatörün uçlarına gerilim uygulanırsa daha fazla yük depolanır. Şekil 4.8’de aralarında d uzaklığı bulunan A yüzey alanına sahip paralel plakaları arasında boşluk olan ve dielektrik madde bulunan, kondansatörler verilmiştir. Burada ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, ϵ' ortamda dielektrik malzeme olduğu durumda dielektrik sabiti, C_0 ortamda dielektrik malzeme olmadığında kondansatörün sığası ve C ise ortamda dielektrik malzeme olduğunda kondansatörün sığasını ifade etmektedir.



Şekil 4.8. Paralel plakaları arasında a) boşluk olan ve b) dielektrik malzeme bulunan kondansatör.

İletken plakalara bir elektrik alan uygulandığında plakalar $+Q$ ve $-Q$ yükü ile yüklenir. Bu durumda plakalar arası boşluk olan kondansatör için elektrik alan ifadesi Denklem (4.8), oluşan potansiyel fark ise Denklem (4.9) ile verilir:

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (4.8)$$

$$V_0 = E_0 \cdot d \quad (4.9)$$

burada, σ plakalarda birim alan başına düşen yüzeysel yük yoğunluğunu, d ise paralel plakalar arasındaki uzaklığı ifade eder. Denklem (4.8) ve Denklem (4.9) kullanılarak paralel plakalı kondansatörün sığası Denklem (4.10) ile verilir [63]:

$$C_0 = \frac{Q}{V_0} = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (4.10)$$

burada, plakaların sahip olduğu toplam Q yükü σA ile verilmek üzere, A paralel plakaların yüzey alanını ifade eder.

Kondansatörün plakaları arasındaki boşluk dielektrik bir malzemeye doldurulursa plakalar arasında oluşan elektrik alan ve potansiyel fark $1/\epsilon'$ çarpanı kadar azalır. ϵ' dielektrik maddelerin elektriksel özelliklerinin ifade edildiği dielektrik sabiti olarak tanımlanır. Paralel plakalar arasına dielektrik bir malzeme olan bir kondansatörün için elektrik alan Denklem (4.11), oluşan potansiyel fark ise Denklem (4.12) ile verilir:

$$E = \frac{E_0}{\epsilon'} \quad (4.11)$$

$$V = \frac{V_0}{\epsilon'} \quad (4.12)$$

Bu durumda kondansatörün sığası ise ϵ' çarpanı kadar artar. Paralel plakaların toplam yükü değişmediği için plakalar arasında dielektrik madde olan kondansatörün sığası da Denklem (4.13) ile verilir [64]:

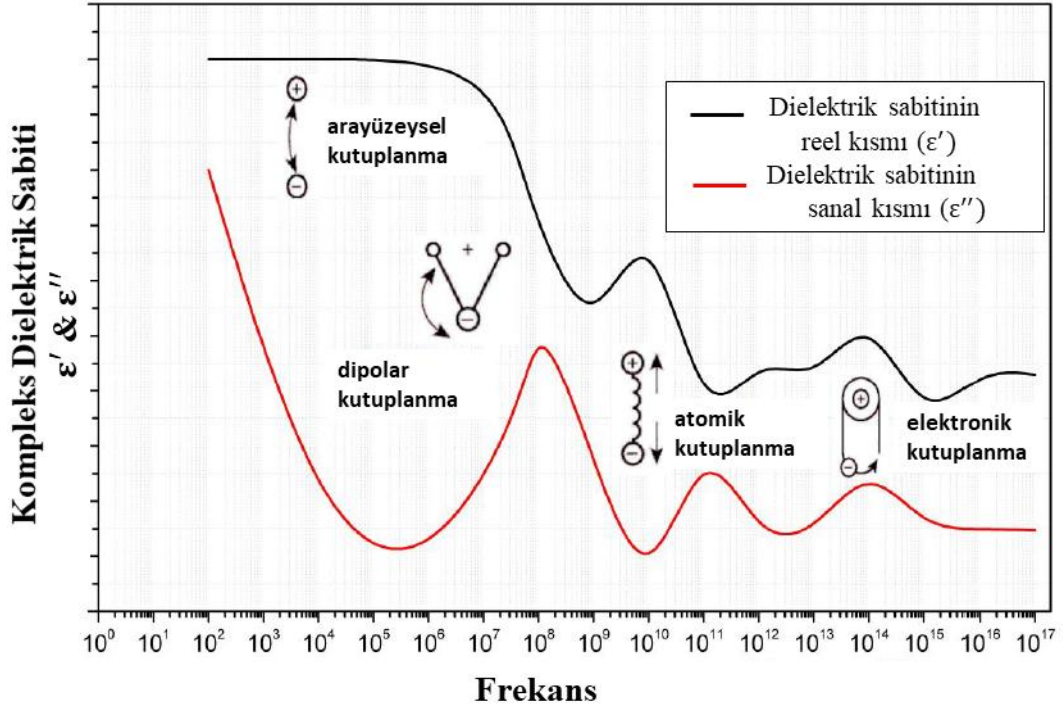
$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon' \frac{Q}{V_0} = \epsilon' C_0 = \epsilon' \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (4.13)$$

4.5.1. Dielektrik Kutuplanma

Elektrik alanın etkisiyle madde içerisinde oluşan dipollerin küçük yer değiştirmeleri kutuplanma (P) olarak tanımlanır ve Denklem (4.14) ile verilir [65]:

$$\vec{P} = \epsilon_0(\epsilon' - 1)\vec{E} \quad (4.14)$$

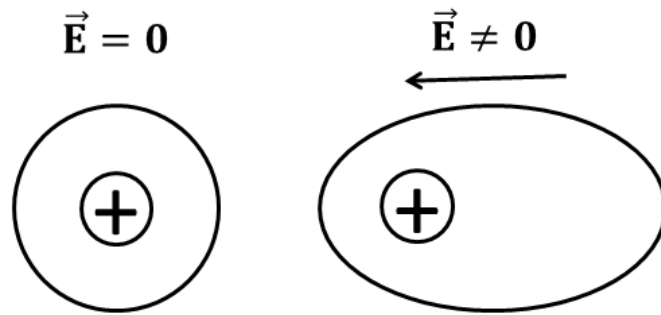
Moleküller arası etkileşimler kutuplanmalar sonucunda gerçekleşir. Kutuplanma seviyesi elektrik alan etkisi ile yönelen dipollerin yoğunluğuna ve büyüklüğüne bağlıdır. Bir maddenin kutuplanabilirliği dielektrik sabiti ile ifade edilir. Dielektrik malzemelerde uygun frekans bölgelerinde gerçekleşen arayüzey, dipolar, atomik ve elektronik olmak üzere dört çeşit kutuplanma mekanizması vardır. Bu kutuplanma mekanizmalarının frekansa bağlı değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir [31].



Şekil 4.9. Dielektrik kutuplanma mekanizmalarının frekansa bağlı değişimi.

4.5.1.1. Elektronik Kutuplanma

Dış bir elektrik alan uygulanmasıyla atomun çekirdeği elektrik alan yönünde, elektronlar ise elektrik alana zıt yönde bir elektrostatik kuvvetin etkisinde kalır ve elektronların oluşturduğu negatif yük merkezi çekirdeğin yük merkezine göre bir miktar kayarak atomda net bir dipol moment oluşturur. Bu durumda atomun simetrisi bozulur (Şekil 4.10). Dielektrik maddede gerçekleşen bu kutuplanma türüne “elektronik kutuplanma” denir [66].



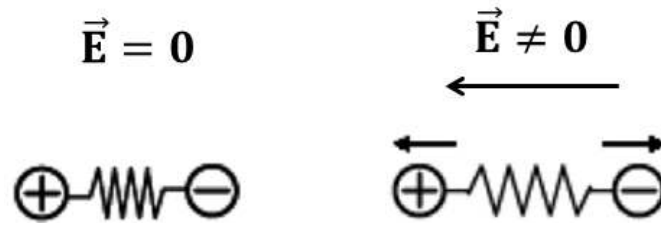
Şekil 4.10. Elektronik kutuplanmanın şematik gösterimi.

Atom içerisindeki elektronu uyarmak için yüksek frekanslarda bir sinyal gerektiği için elektronik kutuplanma yüksek frekans bölgesinde (mor ötesi ve görünür bölge) görülür ve elektronun kütlesi çok küçük olduğundan elektrik alanının etkisiyle kısa bir sürede

($\sim 10^{-15}$ s) oluşur. Zayıf bir kutuplanma türü olan elektronik kutuplanmanın etkisi geçicidir. Dielektrik malzemelerin tümünde elektronik kutuplanma görülür [67].

4.5.1.2. Atomik Kutuplanma

Atomik kutuplanmada elektronik kutuplanmada olduğu gibi elektrik alan ile yüklerin yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Elektrik alanın uygulanmasıyla negatif ve pozitif yüklü iyonların ters yönlerde hareket etmelerinden dolayı iyonların aralarındaki bağların deforme olmasıyla atomik kutuplanma gerçekleşir (Şekil 4.11). Bu etki ile malzemenin boyutları da değişebilir [67].

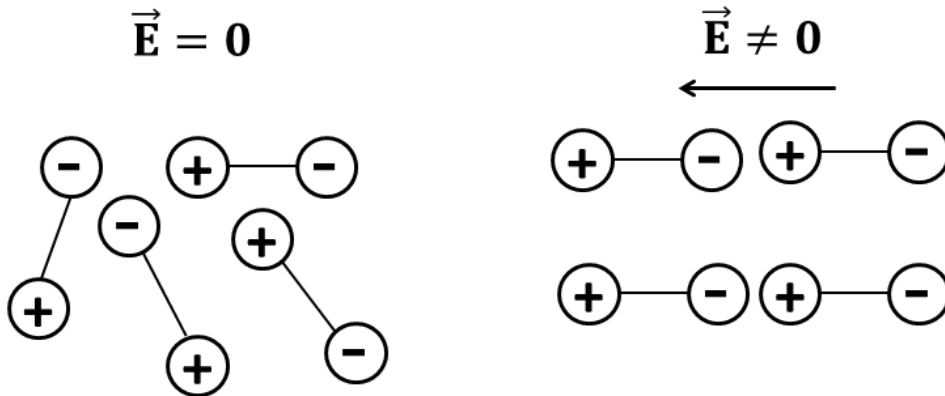


Şekil 4.11. Atomik kutuplanmanın şematik gösterimi.

Atomik kutuplanma kızılötesi frekans bölgesinde gerçekleşir ve elektronik kutuplanmaya göre yüz kat daha yavaştır ($\sim 10^{-13}$ s) [63], [66].

4.5.1.3. Dipolar Kutuplanma

Dış bir elektrik alan olmaması durumunda da elektriksel dipolleri olan polar maddelerde dipolar kutuplanma görülür. Elektrik alan yokken rastgele dağılan dipoller, elektrik alanın uygulanmasıyla üzerlerine etki eden tork ile dönmeye ve aynı yönde kutuplu olmaya zorlanırlar (Şekil 4.12) [66].



Şekil 4.12. Dipolar kutuplanmanın şematik gösterimi.

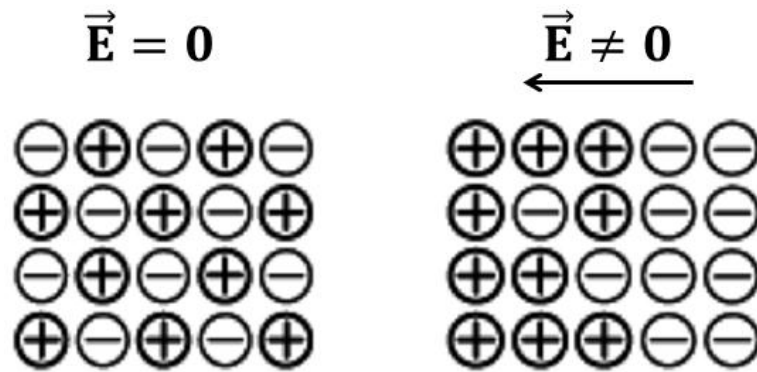
Dipolar kutuplanma yavaştır, dipollerin tamamen kutuplanması için dipol momentlerin büyüklüklerine göre 10^{-7} - 10^{-4} s yeterlidir [65]. Dipollerin kutuplanması mikrodalga frekans bölgesinde gerçekleşir ve sıvı kristal yapılar genelde bu frekans aralığında çalışılır [31].

Elektronik ve atomik kutuplanmada yükler dönmez, elektrik alanla uzaklaşırlar fakat dipolar kutuplanmada dipoller elektrik alan etkisiyle dönmeye zorlanırlar. Elektrik alanın hızlı değiştiği durumlarda dipolar kutuplanma görülmez. Düşük frekanslarda elektronik, atomik ve dipolar kutuplanmaların üçü de oluşurken frekans arttıkça dipoller elektrik alanı takip edemez [64].

4.5.1.4. Arayüzeysel Kutuplanma

Elektronik, atomik ve dipolar kutuplanma türleri homojen yapılarda görülürken, heterojen yapılarda bu kutuplanmalara ek olarak arayüzeysel kutuplanma da görülür [67].

Katılarda elektronların hareket serbestliği varken, sıvı yapılarda iyonların hareket serbestliği vardır. Farklı yapılarda maddelerin bir araya gelmesi iki farklı serbestlik derecesine sahip yüklerin hareketine sebep olur. Dışarıdan bir elektrik alan uygulanması ile de arayüzeylerde yük birikmesi gerçekleşir ve arayüzeylerde biriken yükler de arayüzeysel kutuplanmaya sebep olur (Şekil 4.13) [31].



Şekil 4.13. Arayüzeysel kutuplanmanın şematik gösterimi.

Elektronik, atomik ve dipolar kutuplanmalarda malzemenin bağlı yüklerin yer değiştirmesi söz konusudur. Bu kutuplanma türlerinde malzeme dış elektrik alanın sebep olduğu bir yerel elektrik alan etkisinde kalır. Arayüzeysel kutuplanması ise hareketli yüklerden kaynaklanmaktadır. Arayüzeylerde yük birikmesi olduğu için arayüzeysel kutuplanmada malzemenin içerisindeki elektrik alan, buna bağlı olarak da malzemenin

kapasitansı artar [65].

Düşük frekans bölgelerinde gerçekleşen arayüzeysel kutuplanma iyonik boyutta olduğundan diğer kutuplanma türlerine göre daha uzun bir zamanda gerçekleşir [64]. Bu kutuplanma türü radyo dalgaları ve üstü frekans aralığında etkindir.

4.5.2. Kompleks Dielektrik Sabiti

Kompleks dielektrik sabiti madde içerisindeki elektriksel yük dağılımının bir ölçüsüdür. Kompleks dielektrik sabiti reel ve sanal dielektrik sabiti olmak üzere iki kısımdan oluşur ve Denklem (4.15) ile verilir:

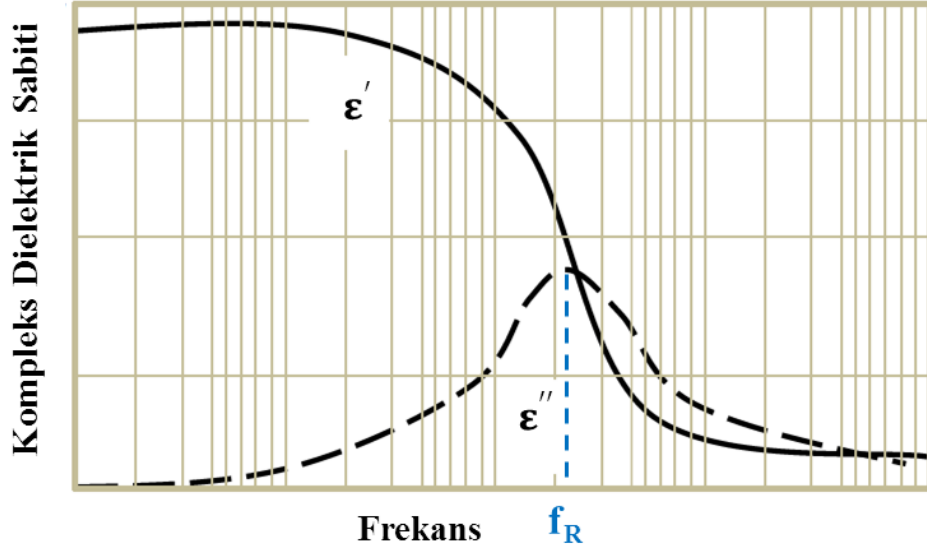
$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (4.15)$$

burada, ε' malzemede depolanan enerjinin bir ölçüsü olup kompleks dielektrik sabitinin reel kısmını, ε'' ise malzemede oluşan enerji kaybının bir ölçüsü olup kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmını ifade eder [68]. ε' ve ε'' sırasıyla Denklem (4.16) ve Denklem (4.17) ile verilir:

$$\varepsilon' = \frac{Cd}{\varepsilon_0 A} = \frac{C}{C_0} \quad (4.16)$$

$$\varepsilon'' = \frac{Gd}{\omega \varepsilon_0 A} = \frac{G}{\omega C_0} \quad (4.17)$$

burada, G iletkenliği ifade eder.

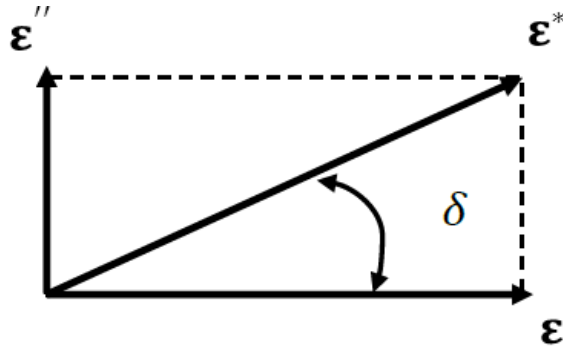


Şekil 4.14. Kompleks dielektrik sabitinin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 4.14'te kompleks dielektrik sabitinin frekansa bağlı değişimi verilmiştir. Kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmının tepe noktasına (ϵ''_{mak}) karşılık gelen frekans relaksasyon frekansı (f_R) olarak tanımlanır. Relaksasyon frekansı malzemenin moleküler yönelim mekanizmaları hakkında bilgi verir [69].

4.5.3. Kayıp Tanjant Faktörü

Kompleks dielektrik sabiti basit bir vektör diyagramı olarak çizildiğinde (Şekil 4.15) bileşke vektör (ϵ^*) ile kompleks dielektrik sabitinin reel kısmı (ϵ') arasında bir açı (δ) oluşur.



Şekil 4.15. Kayıp tanjant vektör diyagramı.

Dielektrik bir malzeme için kaybedilen enerjinin depolanan enerjiye oranı kayıp tanjant faktörü olarak adlandırılır ve Denklem (4.18) ile ifade edilir:

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (4.18)$$

Kayıp tanjant faktörü dielektrik bir malzemede elektriksel iletkenlik, dielektrik durulma, dielektrik rezonans gibi fiziksel mekanizmalardan dolayı sistemin enerjisinde meydana gelen kayıpları ifade etmektedir. Bu kayıplar yüksek gerilim veya yüksek frekans değerlerinde dielektrik malzemede ısı zorlamalara sebep olduğundan dolayı malzemelerin fiziksel özelliklerini değiştirir. Bu sebeple dielektrik malzemelerin kayıp faktörünün belirlenmesi bu yapıların elektriksel karakterizasyonu için de büyük önem arz eder [65].

4.5.4. Dielektrik Durulma

Bir elektrik dipolü bir elektrik alan ile kendi eksenini etrafında dönebilir. Dipol fazla sürtünmeli bir ortamda bulunduğu dipolün dönme frekansı uygulanan elektrik alanının frekansının gerisinde kalır ve bir durulma gerçekleşir. Dielektrik malzemeler için moleküllerin hareketliliğinin ölçüsü olan durulma (relaksasyon) zamanı (τ_R) elektrik alan içinde bulunan dipollerin yönlenmesi için gerekli zaman olarak tanımlanabilir [31].

Relaksasyon zamanı, relaksasyon frekansı ile ters orantılıdır ve Denklem (4.19) ile ifade edilir:

$$\tau_R = \frac{1}{2\pi f_R} \quad (4.19)$$

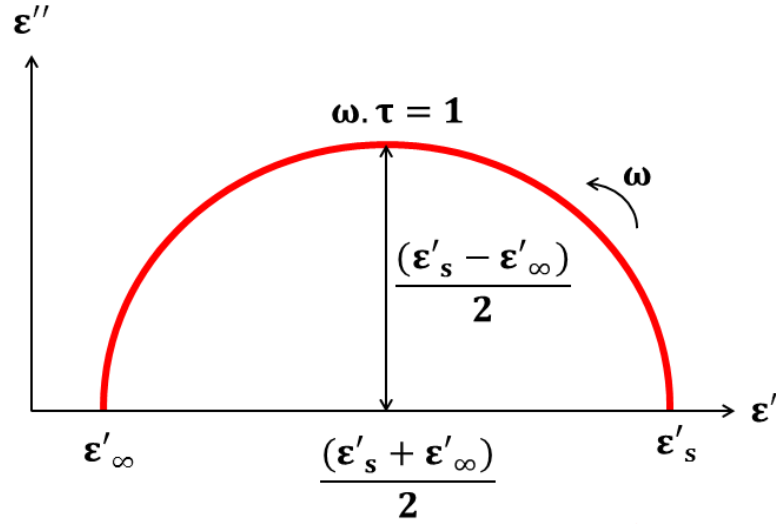
Elektrik alan uygulanmasıyla sistemdeki moleküller yönlenirler ve moleküller arasındaki çarpışmalar iç sürtünmeye neden olduğu için relaksasyon zamanı üstel olarak azalabilir. Elektrik alan kaldırıldığında ise sistem moleküllerin rastgele bir dağılım gösterdiği başlangıç durumuna aynı relaksasyon zamanı ile geri döner [67].

4.5.5. Cole-Cole Yaklaşımı

Bir maddenin dielektrik özelliklerini belirlemek için ε' ve ε'' değerleri kullanılarak Cole-Cole diyagramı çizilebilir. Cole-Cole diyagramı dielektrik malzemenin enerji depolama ve kaybetme oranları ile ilgili bilgiler verir.

Tek durulma zamanına sahip bir malzeme için Cole-Cole diyagramı Şekil 4.16'da görüldüğü gibi merkezi $\varepsilon''=0$ yatay ekseninin üzerinde $((\varepsilon'_s + \varepsilon'_\infty)/2, 0)$ noktasında

olan ve yarıçapı $((\epsilon'_s - \epsilon'_\infty)/2)$ ifadesine eşit olan tam bir yarım daire oluşturur. Bu durumda Cole-Cole modeli Debye modeline indirgenir [67].



Şekil 4.16. Tek relaksasyon zamanına sahip sistemler için Cole-Cole diyagramı.

Birden fazla relaksasyon zamanına sahip malzemer için ise merkezi $\epsilon''=0$ yatay ekseninin altında kalan bir yarım daire veya yay oluşur. Bu durumda kompleks dielektrik sabiti Denklem (4.20) ile verilen Cole-Cole Denklemi ile ifade edilir:

$$\epsilon^* = \epsilon'_\infty + \frac{\epsilon'_s - \epsilon'_\infty}{1 + (i\omega\tau)^{(1-\alpha)}} \quad (4.20)$$

burada, ϵ'_s ve ϵ'_∞ sırasıyla düşük ve yüksek frekanslardaki dielektrik sabiti, τ relaksasyon zamanı, α ($0 \leq \alpha \leq 1$) dağılım parametresini ifade eder. $\alpha=0$ durumunda denklem Debye modeline indirgenir [35], [70].

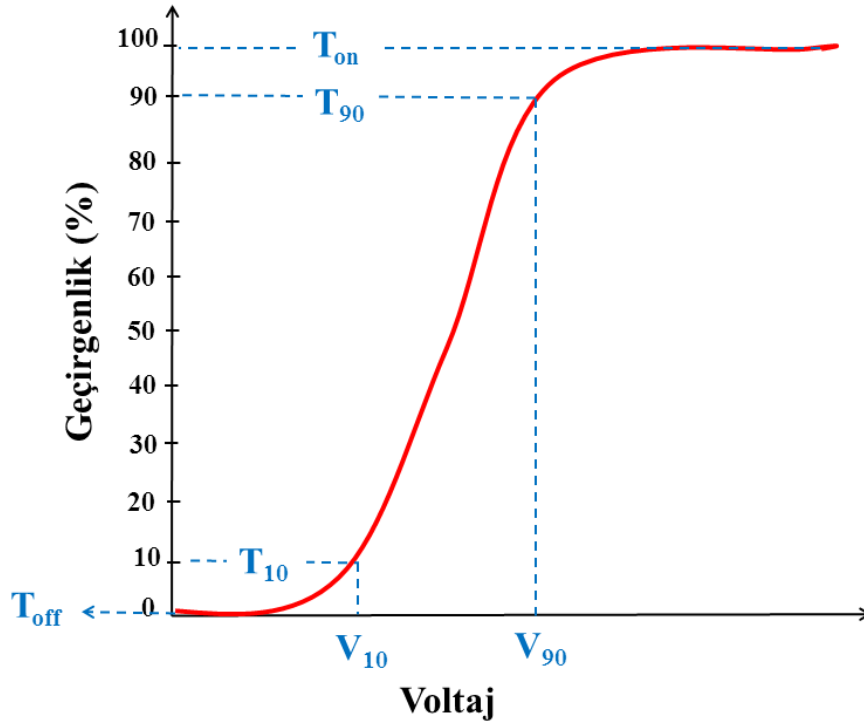
4.6. OPTO-ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ

PDSK yapıların opto-elektronik özellikleri uygulanan DC veya AC voltaj ile belirlenebilir. Fakat PDSK yapıya DC alan uygulandığında, iyonik safsızlıklar hücreye geçer, bu da zaman içinde kompozit yapıya zarar verir. Damlacık ara yüzünde iyonik safsızlıklar birikir ve dışardan uygulanan elektrik alandan farklı olarak hücre içerisinde daha düşük bir yerel alan üretirler. Uygulanan alan sonlandırıldığında, iyonlar yavaş yavaş rasgele bir dağılıma geçene kadar yerel alan bir süre daha kalır, bu da kompozit yapının opto-elektronik tepkisini etkiler. PDSK yapıya AC alanı uygulandığında ise, bu

alanın sıvı kristalin değişen alanının frekansıyla salınamayacağı, tipik olarak 100 Hz'den daha yüksek olan, yeterince yüksek bir frekansta uygulanması gerekir [71].

4.6.1. Geçirgenlik

Kompozit yapıların opto-elektronik özellikleri, kompozit yapı üzerine farklı gerilim değerleri uygulanarak her bir gerilim değeri için kompozitin optik tepkisi ölçülerek belirlenebilir. şekil 4.17'de PDSK yapı için voltaja bağlı geçirgenlik grafiği örnek olarak verilmiştir.



şekil 4.17. PDSK kompozit yapılar için Geçirgenlik-Voltaj grafiğinin şematik gösterimi.

Minimum geçirgenlik (T_{off}), maksimum geçirgenlik (T_{on}), geçirgenlik farkı (ΔT), kontrast oranı (CR), eşik voltajı (V_{th}), satürasyon voltajı (V_{on}) gibi PDSK temelli cihazların performansını etkileyen bazı önemli parametreler voltaja bağlı geçirgenlik grafiği kullanılarak belirlenebilir. Bu parametreler aşağıdaki gibi tanımlanabilir [72]:

T_{off} : PDSK filminin üzerindeki voltajın sıfır (off-state) olduğu durumda PDSK filminin geçirgenliği (minimum geçirgenlik).

T_{on} : PDSK filminin üzerine voltaj uygulandığı (on-state) durumda PDSK filminin geçirgenliği (maksimum geçirgenlik).

Geçirgenlik farkı (ΔT) Denklem (4.21) ile ifade edilir:

$$\Delta T = T_{on} - T_{off} \quad (4.21)$$

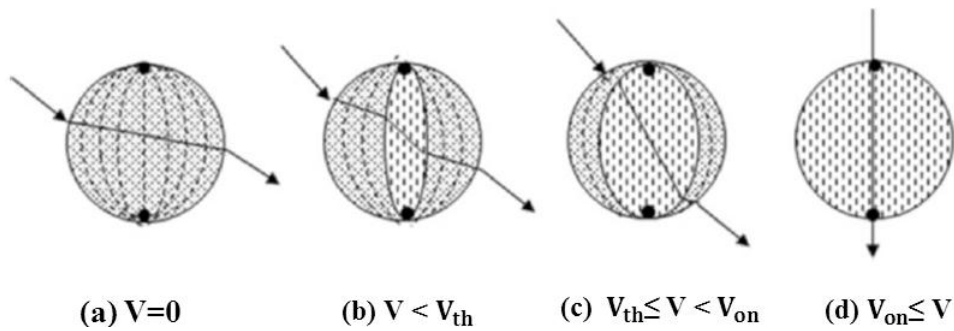
T_{10} : ΔT geçirgenlik farkının %10'una karşılık gelen geçirgenlik değeri.

T_{90} : ΔT geçirgenlik farkının %90'ına karşılık gelen geçirgenlik değeri.

V_{10} : Geçirgenliğin T_{10} değerine karşılık gelen voltaj değeri (eşik voltajı).

V_{90} : Geçirgenliğin T_{90} değerine karşılık gelen voltaj değeri (satürasyon voltajı).

Farklı voltaj seviyelerinde ışığın sıvı kristal damlacık içerisinde geçişi Şekil 4.18'de gösterilmiştir [73].



Şekil 4.18. Farklı voltaj seviyelerinde ışığın sıvı kristal damlacıktan geçişi.

Elektrik alan uygulanmadığı durumda, sıvı kristalin kırılma indisi ile polimerin kırılma indisi eşleşmediği için PDSK kompozit yapı içinden geçen ışık saçılır ve yapı opak bir görünüme sahip olur (Şekil 4.18 (a)). Eşik voltajının altında bir voltaj uygulandığında örgü enerjisi nedeniyle sıvı kristal damlacıkların iç kısmı dışında bulunan moleküllerin yönelimi değişmez (Şekil 4.18 (b)). Voltaj eşik değerinin üstüne çıkarıldığında sıvı kristal ve polimer arayüzeyi dışında daha fazla sıvı kristal molekülü elektrik alan yönünde yönelir (Şekil 4.18 (c)). Yeterince yüksek bir elektrik alan uygulandığında (satürasyon voltajı üzerinde bir voltaj) bütün moleküller elektrik alan yönünde hizalanır ve bu durumda sıvı kristalin kırılma indisi ile polimerin kırılma indisi eşleştiği için PDSK yapı tam transparan bir görünüme sahip olur ve ışık hiç saçılma olmadan geçebilir (Şekil 4.18 (d)) [73].

Kontrast oranı PDSK yapılar için önemli bir parametredir ve Denklem (4.22) ile ifade edilir [74]:

$$CR = \frac{T_{on}}{T_{off}} \quad (4.22)$$

Sıvı kristal moleküllerinin yönlenmesi için gerekli olan minimum voltaj değeri eşik voltajı (V_{th}) olarak tanımlanır ve Denklem (4.23) ile verilir [35]. Eşik voltajı voltaja bağlı geçirgenlik grafiğinde, belirlenen T_{10} geçirgenlik değerine karşılık gelen voltaj değerine eşittir.

$$V_{th} = \pi \sqrt{\frac{K_{11}}{\epsilon_0 |\Delta\epsilon'|}} \quad (4.23)$$

Eşik voltajının sıvı kristal damlacık boyutuna bağlı olan bir diğer eşitliği de Denklem (4.24) ile verilmiştir [27]:

$$V_{th} = \frac{d}{3R} \left[\frac{\epsilon'_{SK}}{\epsilon'_P} + 2 \right] \left[\frac{K(l^2 - 1)}{\epsilon_0 \Delta\epsilon'} \right]^{1/2} \quad (4.24)$$

burada, R sıvı kristal damlacığının yarıçapını, d PDSK filminin fiziksel kalınlığını, ϵ'_{SK} ve ϵ'_P sırasıyla sıvı kristal ve polimer için dielektrik sabitinin reel kısmını, l ($l=a/b$) ise sıvı kristal damlacığının büyük yarıçapının (a) küçük yarıçapına (b) oranını ifade eder.

4.6.2. Tepki Süresi

Bir elektrik alan uygulandığında sıvı kristal moleküllerinin hizalanması ve sıvı kristal molekülleri üzerinde elektrik alan etkisi kaldırıldığında moleküllerin tekrar başlangıç durumlarına gelmeleri için gerekli olan minimum zaman tepki süresi (τ_t) olarak adlandırılır. Tepki süresi (response time), yükselme süresi (rise time) (τ_y) ve düşme süresinin (fall time) (τ_d) toplamı olarak Denklem (4.25) ile ifade edilir:

$$\tau_t = \tau_y + \tau_d \quad (4.25)$$

Yükselme süresi (τ_y) PDSK film için ışık geçirgenliğinin elektrik alan uygulanmasıyla %10'dan %90'a artması için gereken süre olarak tanımlanır ve Denklem (4.26) ile verilir [53]:

$$\frac{1}{\tau_y} = \frac{1}{\gamma} \left[\Delta\epsilon' E^2 + \frac{K(l^2 - 1)}{R^2} \right] \quad (4.26)$$

burada, γ rotasyonel viskoziteyi, $\Delta\epsilon'$ dielektrik anizotropiyi, E uygulanan elektrik alanı, K elastik sabitini, R sıvı kristal damlacığının yarıçapını, l ($l=a/b$) ise sıvı kristal damlacığının büyük yarıçapının (a) küçük yarıçapına (b) oranını ifade eder.

Yüksek voltajlarda τ_y Denklem (4.27) ile verilir [75]:

$$\tau_y \cong \frac{\gamma}{\Delta\epsilon' E^2} \quad (4.27)$$

Düşme süresi (τ_d) ise PDSK film için ışık geçirgenliğinin %90'dan %10'a azalması için geçen süre olarak tanımlanır ve Denklem (4.28) ile verilir [22], [76]:

$$\tau_d \cong \frac{\gamma R^2}{K(l^2 - 1)} \quad (4.28)$$

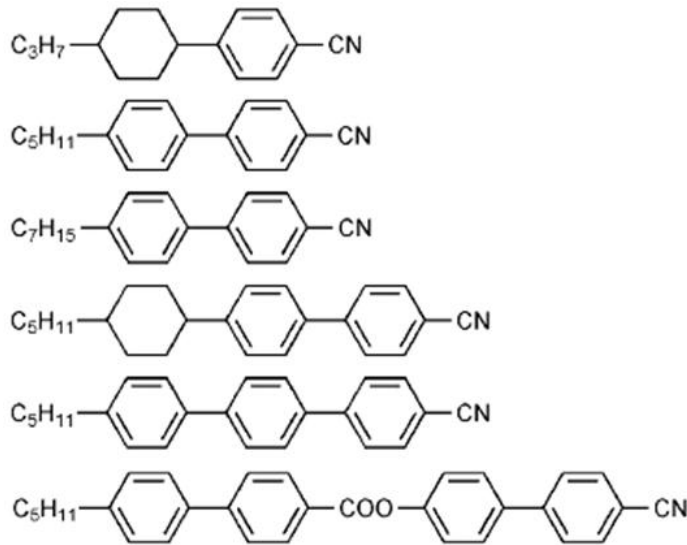
Denklem (4.27) ve Denklem (4.28)'e bakıldığında yükselme süresi ağırlıklı olarak uygulanan voltajın bir fonksiyonu iken, düşme süresi daha çok sıvı kristal moleküllerinin elastikliğine, viskozitesine, sıvı kristal damlacıklarının boyutuna ve şekline bağlıdır [21], [29], [73].

5. DENEYSEL KISIM

5.1. DENEYDE KULLANILAN MALZEMELER

Bu çalışmada Sigma Aldrich firmasından temin edilen E63 kodlu nematik sıvı kristal kullanılmıştır. Moleküler bileşimi Şekil 5.1’de verilen E63 kodlu nematik sıvı kristal altı farklı sıvı kristalden oluşmaktadır, bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir [77]:

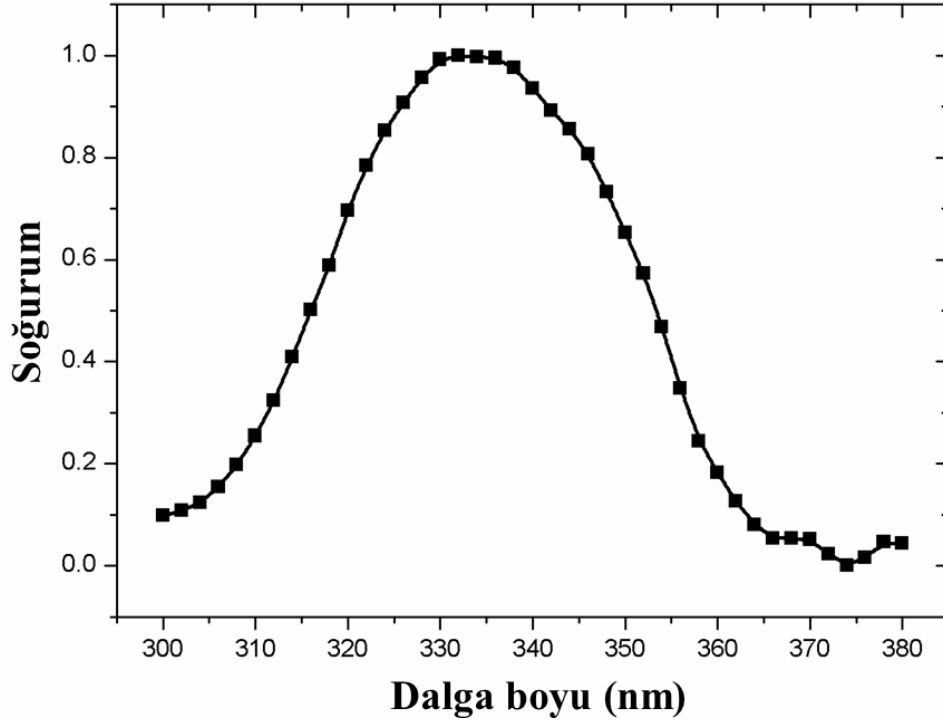
- (i) [1,1'Biphenyl],4-carbonitrile,4'-pentyl (5CB)
- (ii) [1,1'Bi-phenyl],4-carbonitrile,4'-heptyl (7CB)
- (iii) [1,1',4'-1''- Terphenyl],4-carbonitrile,4''pentyl (5CT)
- (iv) Benzonitrile,4-(4 propyl-1-cyclohexen-1-yl) (PCH3)
- (v) [1,1'Biphenyl]-4-carbonitrile,4'(4-pentyl-1-cycl ohexen-1-yl) (BCH5)
- (vi) [1,1'-Biphenyl]-4-carboxylic acid, 4'-heptyl-4'-cyano[1,1'-biphenyl]-4-yl ester (DB71).



Şekil 5.1. E63 kodlu nematik sıvı kristalin moleküller yapısını oluşturan bileşenler.

Bilimsel araştırmalarda yaygın bir kullanımı olan E63 kodlu nematik sıvı kristal ($n_e=1,74$; $n_o=1,51$; $T_{N-I}=86,50$ °C) düşük frekans bölgesinde yüksek pozitif dielektrik anizotropiye ($\Delta\epsilon' > 0$) sahiptir. E63'ün ultraviyole bölgeyi kapsayan spektrumunda

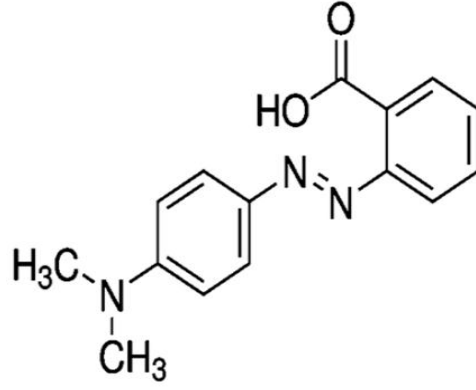
dalga boyuna bağılı soğurum grafiği Şekil 5.2 ile verilmiştir. Buna göre, E63 kodlu nematik sıvı kristalin 330-340 nm dalga boyları arasında güçlü soğurma özelliği gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.2. E63 kodlu nematik sıvı kristalin Soğurum-Dalga boyu grafiği.

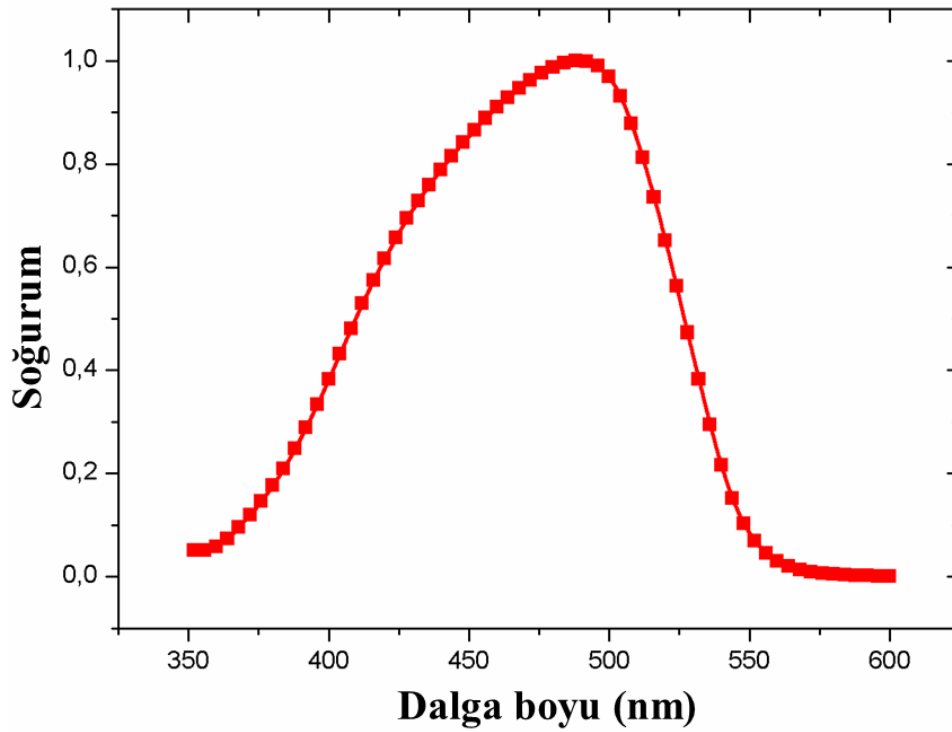
Bu çalışmada sıvı kristal ile birlikte kompozit yapımızı oluşturan ve ticari olarak çok iyi bilinen bir pre-polimer olan, Norland Optical Adhesive 65 (NOA65) kullanılmıştır. NOA65 PDSK film üretiminde yaygın olarak kullanılan bir pre-polimer olup 350-380 nm dalgaboyu aralığında UV ışık ile kür edilerek polimerize olabilmektedir [78]. Bu yapı renksizdir ve kür edilmiş hali esnektir. NOA65, farklı genişleme katsayılarına sahip farklı materyaller arasında zorlamayı minimumda tutmak için yeterli esnekliğe de sahiptir. Bu özellikler NOA65'in PDSK yapı ile oluşturulan ekranlarda yaygın kullanımına sebep olan etkilerin başında gelmektedir [45]. Polimer yapının kırılma indisi 1,52 olup çalışmada kullanılan E63 kodlu nematik sıvı kristalin kırılma indisi ile eşleşebilir özelliktedir.

Çalışmada oluşturulan kompozit yapıda diğer bir katkı maddesi olarak Methyl Red Azo Boya (MR) kullanılmıştır. MR'nin kapalı formülü $C_{15}H_{15}N_3O_2$ ile verilmekle birlikte açık formülü "2-(4-dimethylaminophenylazo)benzoic acid" olarak ifade edilmektedir. Literatürde MR için moleküler ağırlık 269,299 g/mol, erime sıcaklığı ise 179-182 °C olarak verilmektedir [31]. MR'nin moleküler yapısı Şekil 5.3'te verilmiştir.



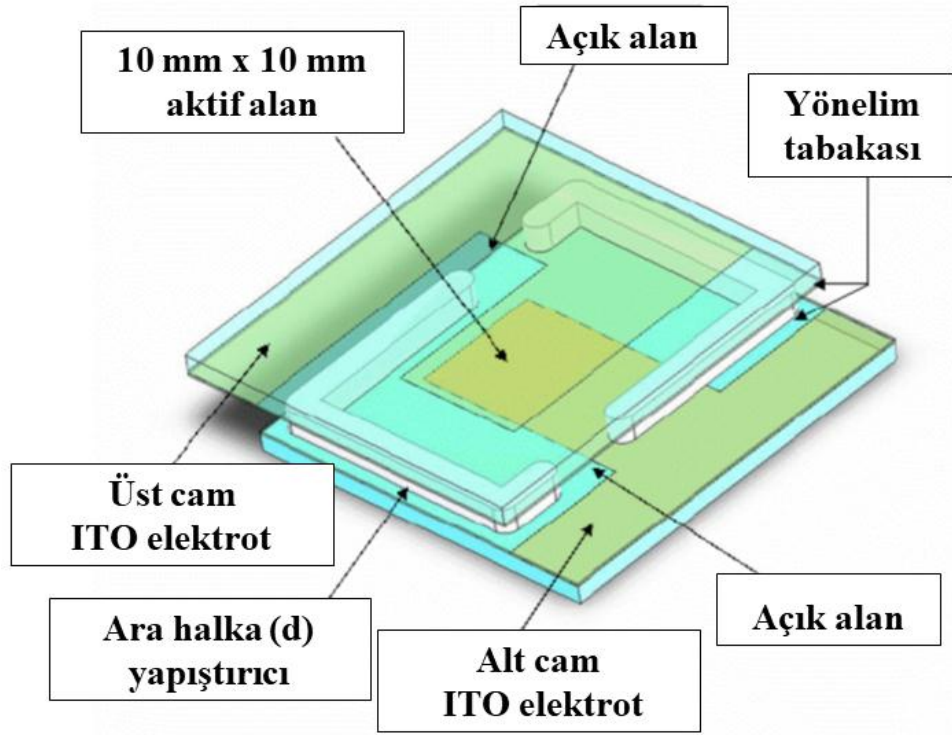
Şekil 5.3. Methyl Red Azo Boyanın moleküller yapısı.

Şekil 5.4'te Methyl Red Azo Boyanın dalga boyuna bağlı soğurum grafiği verilmiştir. MR boyanın 450-550 nm dalga boyları arasında güçlü soğurma özelliği gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.4. Methyl Red Azo Boyanın Soğurum-Dalga boyu grafiği.

Hazırlanan PDSK kompozit yapıların elektro-optik ölçümleri özel sıvı kristal hücreler içinde yapılmıştır. Bu amaçla, ölçümlerinin yapılması için 7,7 μm kalınlığında, 100 Ω/cm^2 yüzey direncine sahip ITO kaplı sıvı kristal hücreler kullanılmıştır. Bu hücreler yurt dışındaki INSTECH firmasından temin edilmiştir. Deneyde kullanılan sıvı kristal hücrelerin temsili yapısı Şekil 5.5'te gösterilmektedir [35].



Şekil 5.5. Sıvı kristal hücrenin yapısı.

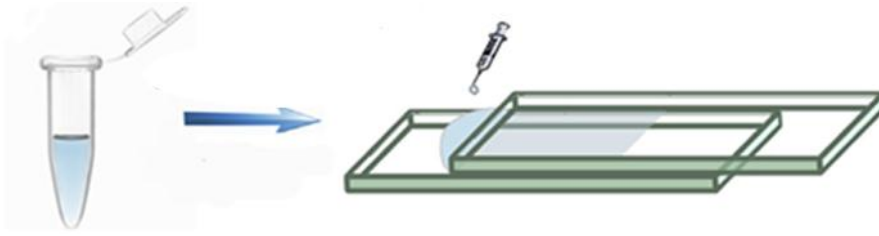
Tez çalışmasında ilk olarak NOA65 pre-polimeri ve E63 kodlu nematik sıvı kristal kullanılarak Polimer/Sıvı Kristal kompozit yapı oluşturulmuştur. Polimer/Sıvı Kristal kompozit yapıya ağırlıkça %1, %3 ve %5 MR boya katkılanması ile de boya katkılı Polimer/Sıvı Kristal kompozit yapılar oluşturulmuştur. Hazırlanan saf ve boya katkılı kompozit yapılara faz ayırma yöntemi uygulanarak polimer matrisinde sıvı kristal damlacıklarının olduğu saf ve boya katkılı PDSK kompozit yapılar elde edilmiştir. Hazırlanan numunelerin dielektrik, opto-elektronik, morfolojik ve termal özellikleri bu tez çalışmasında ayrıntılı olarak araştırılmıştır.

5.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Çalışmanın ilk aşamasında toluen içinde ağırlıkça 1:1 oranında çözölmüş NOA65 pre-polimeri (%75) ve E63 kodlu nematik sıvı kristal (%25) kullanılarak Polimer/Sıvı Kristal kompozit yapı oluşturulmuştur. Homojen dağılımın sağlanması için kompozit yapı 2 saat boyunca 50 °C sıcaklıkta ultrasonik banyoda karıştırılmıştır. NOA65/E63 kompozit yapıya sırasıyla ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında MR boya katkılanmıştır. NOA65/E63 ve boya katkılı NOA65/E63 kompozit yapılar homojen dağılımın sağlanması için 1 saat boyunca 50 °C sıcaklıkta ultrasonik banyoda karıştırılmıştır.

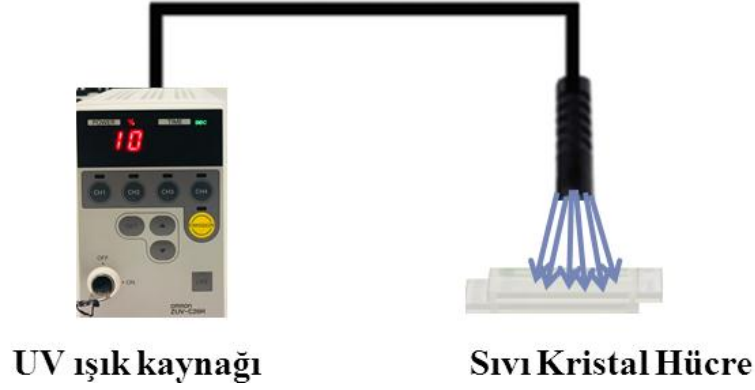
Hazırlanan numuneler toluenin buharlaşması için 2 saat boyunca ısı tablasında 80 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır.

Hazırlanan numunelerin ölçümlerinin yapılması için, numuneler ITO kaplı sıvı kristal hücrelere kılcallık yöntemiyle doldurulmuştur. Doldurma işlemini kolaylaştırmak için sıcaklıktan faydalanılarak numunelerin viskozitesi azaltılmıştır. Bu sebeple numunelerin sıvı kristal hücrelere doldurulması 40 °C'deki ısı tablası üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Hazırlanan numunelerin sıvı kristal hücrelere kılcallık etkisi ile doldurulmasının şematik gösterimi.

Numunelerin hazırlanmasında ikinci aşama PDSK yapıların oluşturulmasıdır. Bu amaçla sıvı kristal hücre içerisindeki kompozit yapıların polimerizasyonun gerçekleşmesi için faz ayırma yöntemleri arasında hızlı ve kontrol etmesi kolay bir yöntem olan polimerizasyon kaynaklı faz ayırma yöntemi kullanılmıştır. Sıvı kristal hücreye doldurulan saf ve boya katkılı Polimer/Sıvı Kristal kompozit yapılar, Omron marka ZUV-C20H model cihaz kullanılarak 1 saat boyunca UV ışığa ($\sim 10 \text{ mW/cm}^2$) maruz bırakılmış, böylece kompozit yapıların foto-polimerizasyonu gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.7). Tüm bu işlemler sonucunda saf PDSK, %1, %3 ve %5 boya katkılı PDSK kompozit yapılar elde edilmiştir.

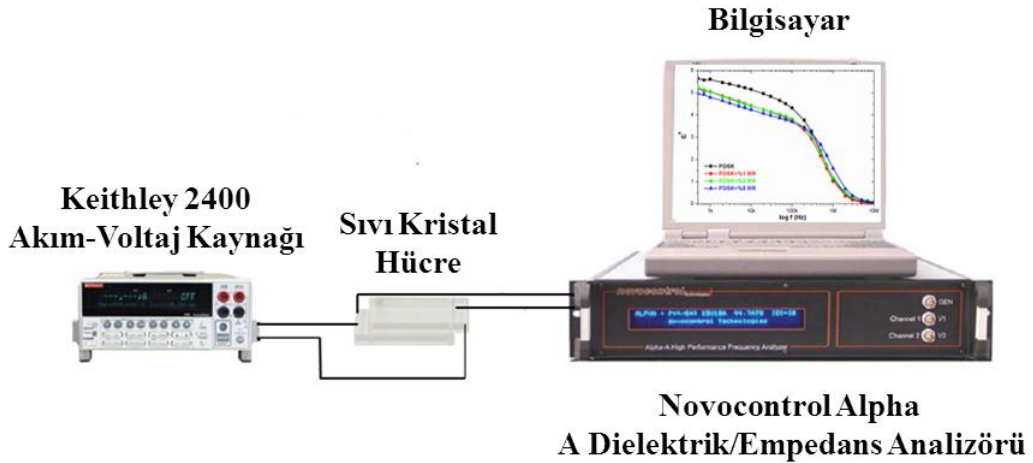


Şekil 5.7. Örneklerin UV ışık ile polimerizasyonunun şematik gösterimi.

5.3. ÖLÇÜMLER

5.3.1. Elektriksel ve Dielektrik Ölçümler

İncelenen yapılara ait dielektrik özelliklerin ölçümü Novocontrol Alpha A Dielektrik/Empedans Analizörü kullanılarak 500 Hz-10 MHz frekans ve 0-20 V gerilim aralığında, 10 mV_{rms} test sinyali ile oda sıcaklığında yapılmıştır. Numunelerin akım-gerilim (I-V) karakteristiği ise Keithley 2400 Akım-Gerilim kaynağı kullanılarak oda sıcaklığında 0-10 V gerilim aralığında elde edilmiştir. Bu amaçla kullanılan deney düzeneği Şekil 5.8 ile verilmiştir [35].

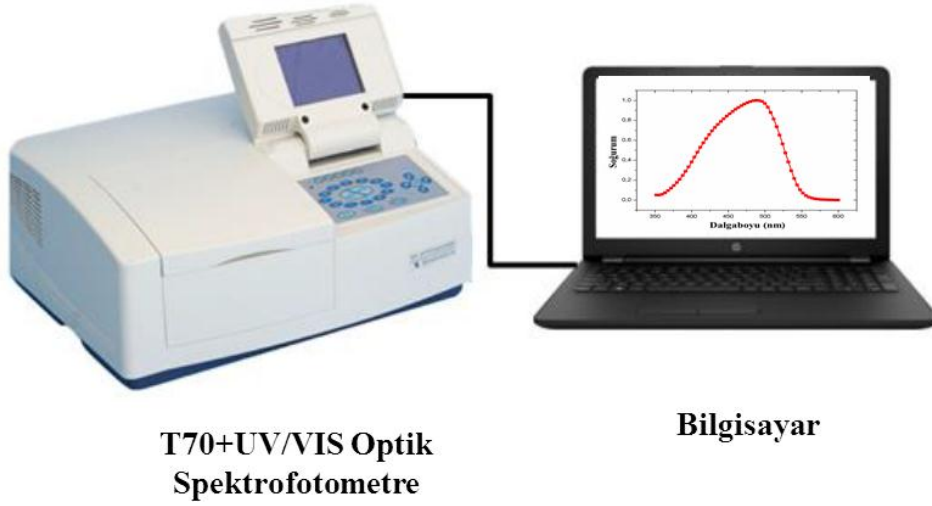


Şekil 5.8. Dielektrik ölçümler için kullanılan deney düzeneği.

5.3.2. Opto-Elektronik Ölçümler

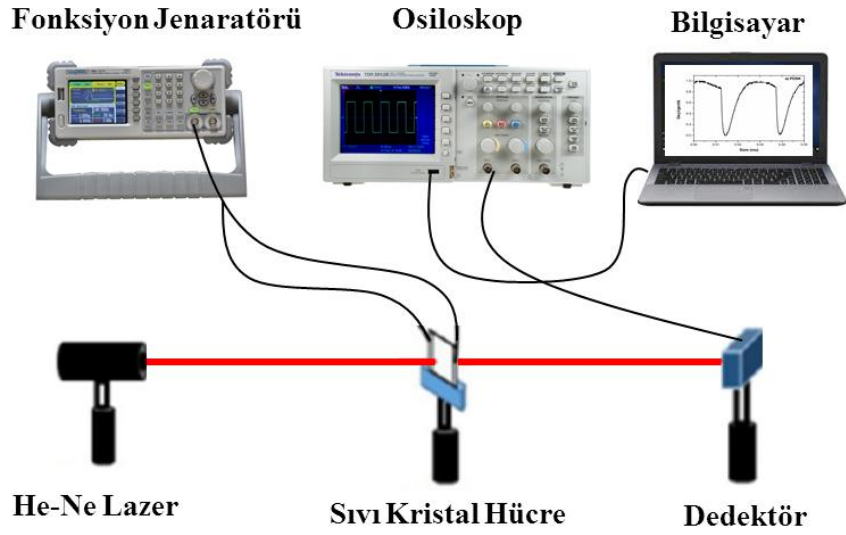
Numunelere ait soğurum ölçümleri 0,5 nm spektral bant adımında ve 300 nm ile 1100 nm dalga boyu aralığında ölçüm yapabilme özelliğine sahip olan PG Instruments

T70+UV/VIS model Spektrofotometre cihazı ile yapılmıştır. Soğurum ölçümleri için kullanılan deney düzeneği Şekil 5.9 ile verilmiştir.



Şekil 5.9. Optik ölçümler için kullanılan deney düzeneği.

Numunelerin opto-elektronik ölçümleri ise laboratuvarımızda hâlihazırda var olan ve modifiye edile bilinen Optik Geçirgenlik Sistemi kullanılarak yapılmıştır. Bu sistemde ışık kaynağı olarak 633 nm dalga boylu 7 mW gücünde He-Ne (Helyum-Neon) lazer kullanılırken, ışık şiddetini tespit etmek için Thorlabs marka silisyum (Si) dedektörden faydalanılmıştır. Ölçümü yapılacak olan ve sıvı kristal hücrelerin içine doldurulan kompozit yapılar AA TECH marka AWG-1020 model fonksiyon jeneratöründen 0-20 V değerinde değişebilen kare dalga uygulanmıştır. Tektronix marka TDS 2012C model osiloskop ile veriler kaydedilmiş ve bilgisayara aktarılmıştır. Optik Geçirgenlik Sistemi deney düzeneği Şekil 5.10 ile verilmiştir.



Şekil 5.10. Opto-elektronik ölçümler için kullanılan optik geçirgenlik deney düzeneği.

5.3.3. Morfolojik Ölçümler

Saf ve boya katkılı PDSK kompozit yapılarda polimer matrisi içindeki sıvı kristal damlacıklarının boyut, şekil, dağılım ve yönelimlerini incelemek için numunelerin SEM cihazı ile görüntüleri alınmıştır.

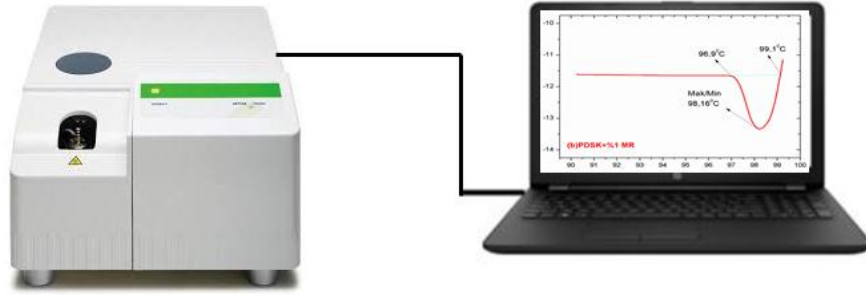
SEM analizinden önce kontrastı artırmak amacıyla kompozit yapı içerisindeki sıvı kristaller damlacık içinden uzaklaştırılmıştır. Bu amaçla dichloromethane ve hexane ile 1:4 oranında bir çözelti hazırlanmış, hücreler 4 gün boyunca bu çözeltide bekletilmiştir. Çözelti buharlaştırıldıktan sonra hücreler dikkatli bir şekilde açılmıştır. Çözeltinin buharlaştırılması ve ıslak olan numunelerin kuruması için numuneler 50 °C’de ki fırında 2 saat bekletilmiştir. İncelenecek kompozit yapıların üzeri SEM analizinden önce ince bir altın tabaka ile kaplanmıştır. Bu işlemlerin sonunda numunelerin morfolojik analizi Quanta FEG 250 model SEM cihazı ile yapılmıştır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Morfolojik ölçüm için kullanılan SEM cihazı.

5.3.4. Termal Ölçümler

Numunelerin termal ölçümleri Mettler Toledo Star model Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 5.12). Saf ve boya katkılı PDSK kompozit yapıların DSC spektrumları 25-100 °C aralığında, 10 °C/dk ısıtma ve soğutma hızı ile üç tekrarlı setler halinde alınmıştır.



Diferansiyel Taramalı Kalorimetre

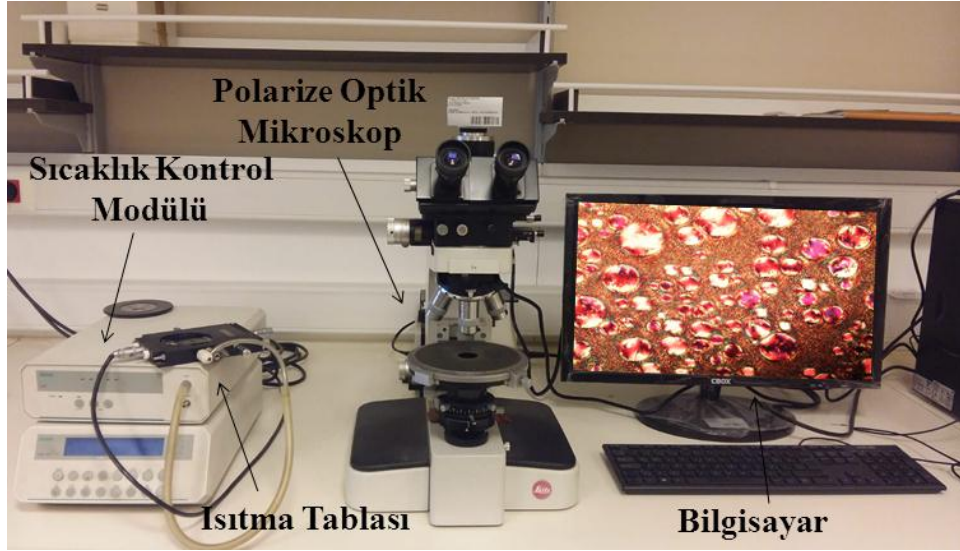
Bilgisayar

Şekil 5.12. Termal ölçüm için kullanılan DSC cihazı deney düzeneği.

Saf ve boya katkılı kompozit yapıların termal analizi için ayrıca POM cihazı ile numunelerin farklı sıcaklıklarda görüntüleri alınmıştır. Polimer ve rastgele yönlenmiş sıvı kristal damlacıklarının kırılma indisleri farklı olduğu için, kompozit filmlerden sıvı kristal damlacıkları uzaklaştırmadan numunelerin POM görüntüleri alınabilir [21].

Numunelerin faz geçiş sıcaklıklarını incelemek için Linkam TMS93 ısıtma tablası ve Linkam LNP sıcaklık kontrolü modülleri bulunan Leitz Wetzlar Orthoplan-pol model

POM cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.13).



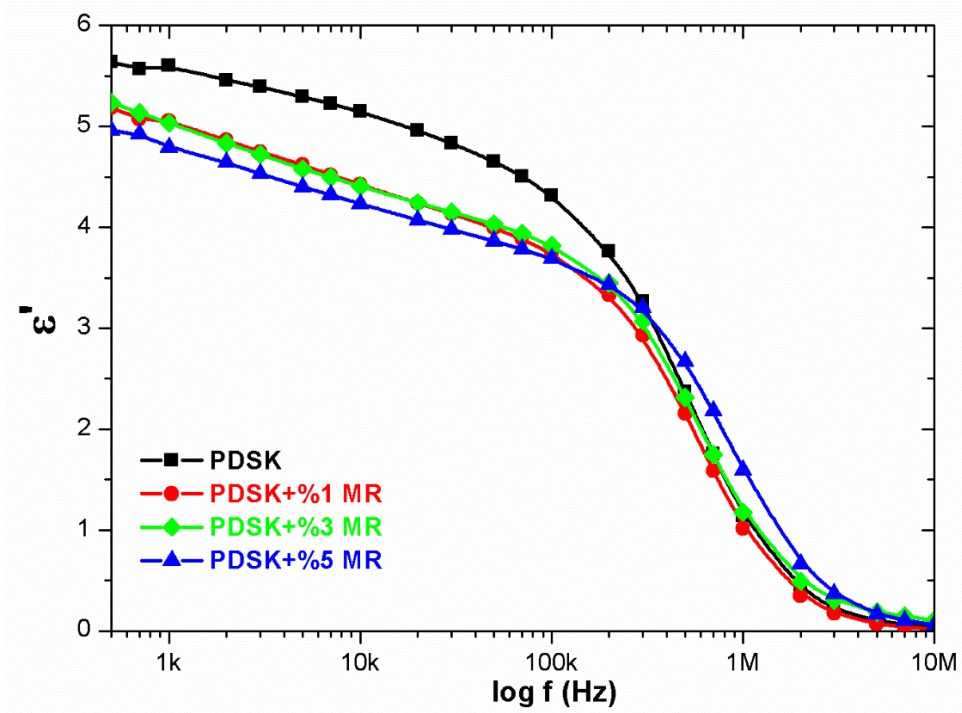
Şekil 5.13. Termal ölçüm için kullanılan POM cihazı deney düzeneği.

5.4. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.4.1. Elektriksel ve Dielektrik Özellikler

Dielektrik spektroskopisi tekniği, sıvı kristal malzemelerin fiziksel özelliklerini belirlemede önemli olan dielektrik sabiti, kapasitans, kayıp tanjant, iletkenlik gibi parametreleri gerilim ve frekansın bir fonksiyonu olarak inceleyen önemli ve güçlü bir yöntemdir.

Saf ve MR boya katkılı PDSK kompozit yapılarının kompleks dielektrik sabitinin reel kısmının 1 V gerilim değerinde frekansa bağlı değişimi Şekil 5.14 ile verilmiştir.

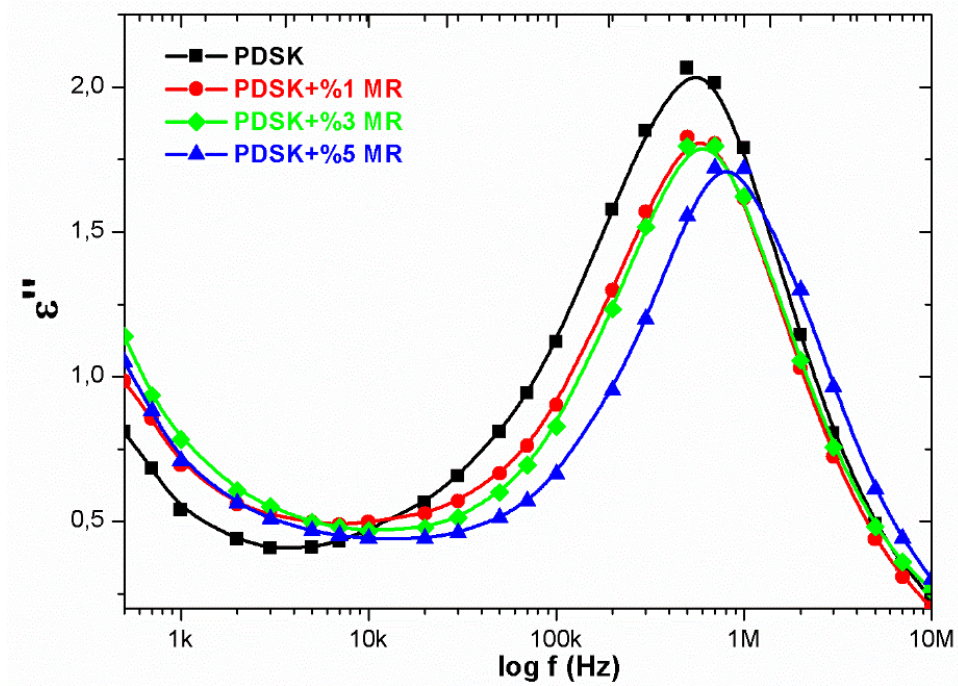


Şekil 5.14. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların ϵ' -log f değişim grafiği.

Buna göre kompleks dielektrik sabitinin reel kısmı saf PDSK kompozit yapıya boya katkılanması ve MR konsantrasyonunun artmasıyla azalmıştır. Denklem (4.16)'da ($\epsilon' = \frac{C}{C_0}$) görüldüğü gibi kompleks dielektrik sabitinin reel kısmı doğrudan sistemin kapasitansına bağlıdır. Boya molekülleri saf PDSK kompozit yapının içerisinde dağıldığında polimer, sıvı kristal ve boya molekülleri arasında konuk-ev sahibi türünden bazı moleküler etkileşimler gerçekleşir. Bu moleküler etkileşimlerin temeli dipol-dipol etkileşimleridir ve bu etkileşimlerin PDSK kompozit yapıdaki moleküler düzeni bozduğu düşünülmektedir. MR boya katkılı PDSK kompozitlerde polimer, sıvı kristal ve boya moleküllerinin dipol momentleri birbirini zayıflatır ve birim hacim başına düşen etkin dipol moment azalır; bu da PDSK kompozit yapıların yük depolama kapasitesini azaltabilir. Bu sebeplerden dolayı saf PDSK kompozit yapıya boya katkılanmasıyla ve boya konsantrasyonunun artırılmasıyla kompleks dielektrik sabitinin reel kısmı azalabilir [79], [80]. Ayrıca, tüm örnekler için frekansın artması ile ϵ' değeri azalmaktadır. Örneklere uygulanan elektrik alan sonucunda oluşan dipoller frekansın artmasıyla test sinyalini takip edemez duruma gelirler. Moleküllerin belirli bir zamanda tekrar yönlenimi de sağlanamadığı için toplam polarizasyon azalır. Bu sebeple artan frekans ile ϵ' değeri azalmaktadır.

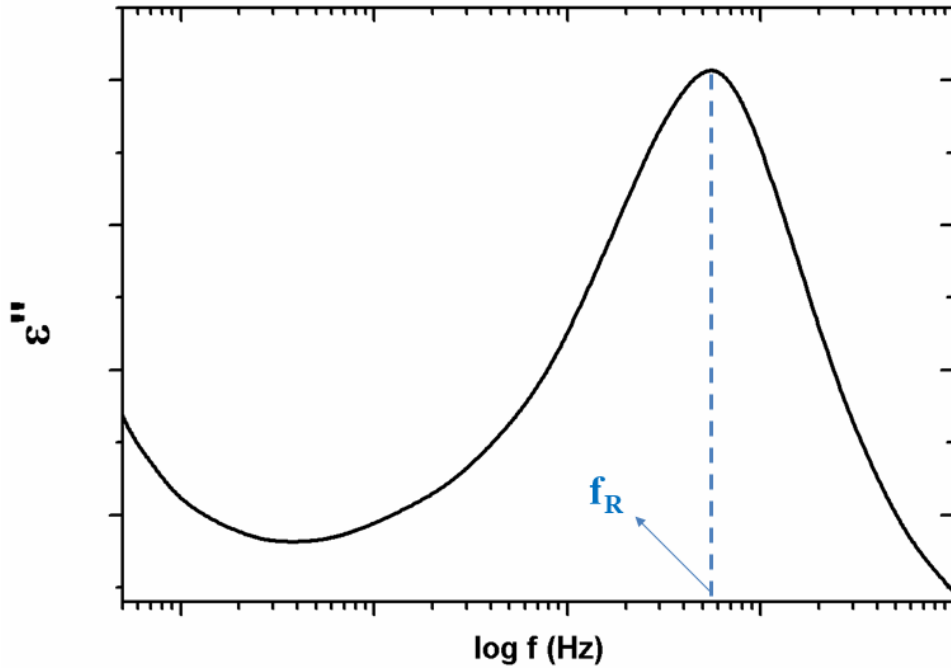
Şekil 5.15'de saf ve MR boya katkılı PDSK kompozit yapılar için kompleks dielektrik

sabitinin sanal kısmının frekansa bağılı değişimi görülmektedir. Grafikte düşük frekans bölgesinde iletkenlikten gelen katkının yaklaşık 10 kHz frekans değerine kadar azalarak geldiği görülmektedir. ϵ'' -log f grafiği örneklerin relaksasyon davranışı ile ilgili bilgiler verir.



Şekil 5.15. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların ϵ'' -log f değişim grafiği.

Relaksasyon frekansı (f_R) değeri incelenen sistemlerin moleküler hareketleri hakkında bilgi veren bir parametre olarak tanımlanmakta ve Şekil 5.16 ile gösterildiği gibi ϵ'' -f değişiminde maksimum değeri aldığı tepe noktasından elde edilmektedir. Şekil 5.15'e bakıldığında tüm örneklerin 1MHz altında tek bir relaksasyon piki gösterdiği görülmüştür. Bu davranış goldstone moduyla (GM) açıklanabilir [79].



Şekil 5.16. Relaksasyon frekansını hesaplamak için örnek ϵ'' -log f değişim grafiği.

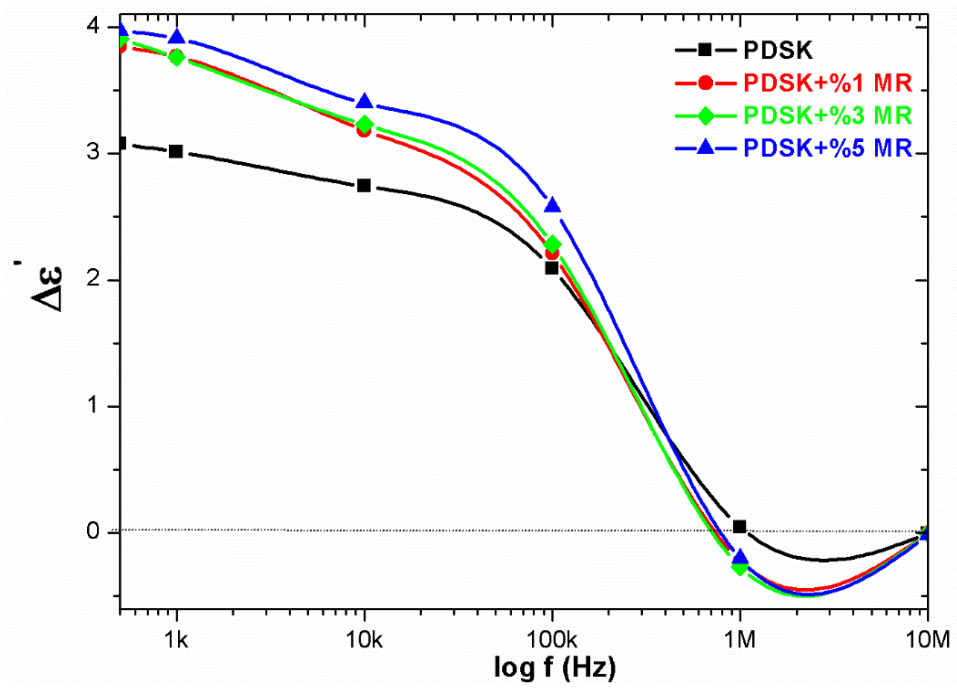
Elektromanyetik enerjinin ısıya dönüştüğü en yüksek frekans değerleri olan relaksasyon frekansının değeri saf, %1, %3 ve %5 MR boya katkılı PDSK kompozit yapıları için Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Saf PDSK, PDSK+%1 MR, PDSK+%3 MR ve PDSK+%5 MR kompozit yapılar için bazı önemli dielektrik parametreler.

Örnekler	f_R (kHz)	f_c (kHz)
PDSK	558	1086
PDSK+%1 MR	586	730
PDSK+%3 MR	607	710
PDSK+%5 MR	807	772

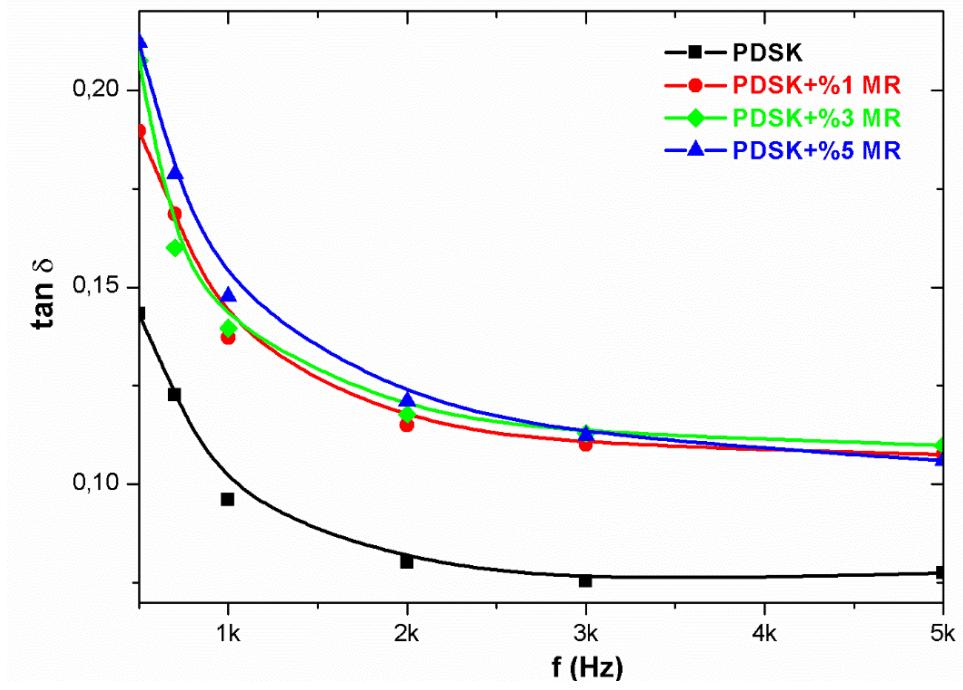
MR boya katkı oranının artmasıyla relaksasyon frekansı değerinin yüksek frekans bölgesine doğru kaydığı görülmüştür. Bu anlamda, PDSK kompozit yapılara MR boya katkılanmasının kompozitlerin çalışma frekansı aralığını genişlettiği söylenebilir. MR boya katkısıyla ve boya konsantrasyonunun artmasıyla PDSK kompozitlerin enerji kaybı da azalmaktadır. Bu sonuçlar MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların teknolojik amaçlar için düşük enerji gereksinimi ile çalışabileceğini göstermektedir [81].

Şekil 5.17’de saf ve MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların dielektrik anizotropisinin frekansa bağlı değişimi verilmiştir. Dielektrik anizotropinin değerinin düşük frekans bölgesinde artan boya konsantrasyonu ile arttığı görülmektedir. Aynı zamanda yüksek frekans bölgesinde $\Delta\epsilon'$ değerinin pozitiften (p-tipi) negatife (n-tipi) geçtiği görülmektedir. Bu tür sıvı kristal moleküller çift (dual) frekanslı sıvı kristaller olarak adlandırılır. Geçişin gerçekleştiği frekans değeri geçiş (crossover) frekansı (f_c) olarak tanımlanmaktadır [35]. Saf ve boya katkılı PDSK kompozit yapıların geçiş frekans değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Çizelgeye bakıldığında boya katkısıyla PDSK kompozit yapının geçiş frekansı değerinin azaldığı görülmektedir.



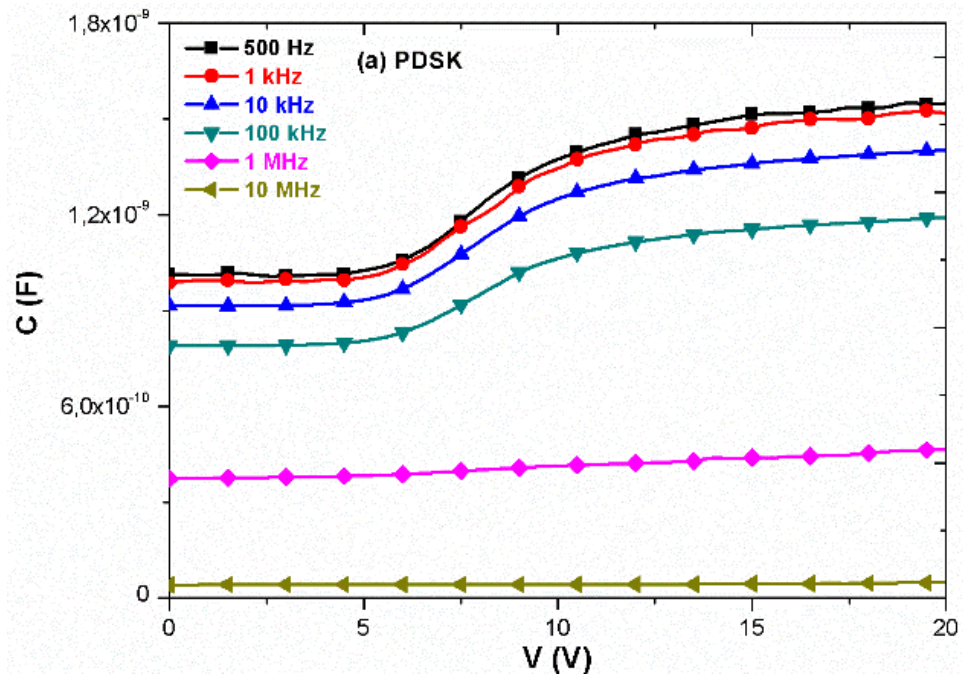
Şekil 5.17. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların $\Delta\epsilon'$ -log f değişim grafiği.

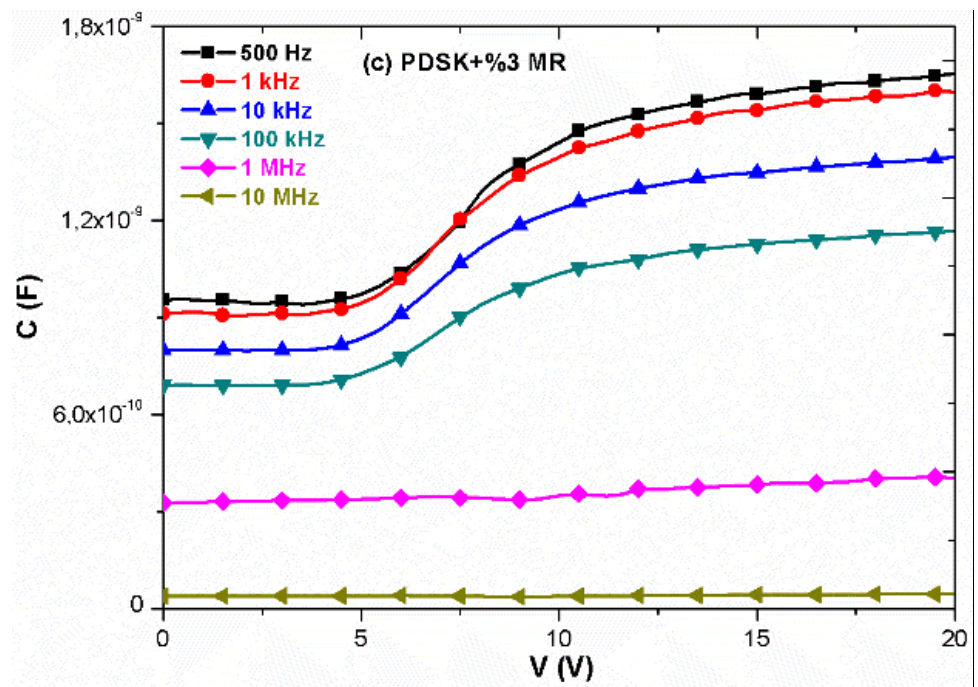
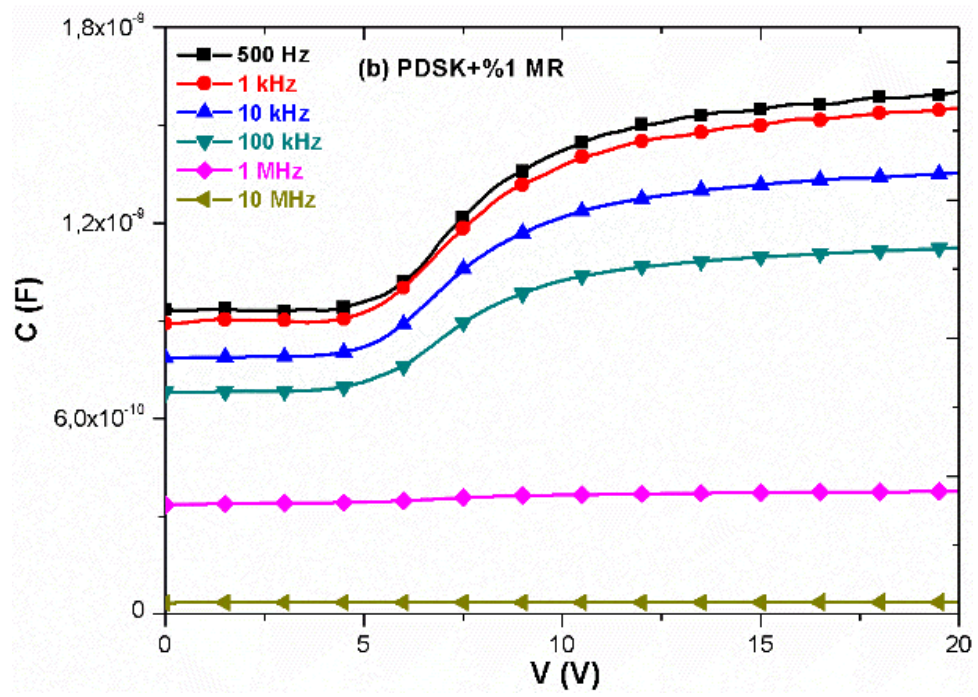
Şekil 5.18’de saf ve MR boya katkılı PDSL kompozit yapılara ait $\tan\delta$ değerinin, 1 V gerilim değerinde frekansa bağlı değişim grafiği verilmiştir. Boya konsantrasyonunun artmasıyla ortamda oluşan ekstra iyonlar $\tan\delta$ değerinin düşük frekans bölgesinde artışına neden olmuştur [82].

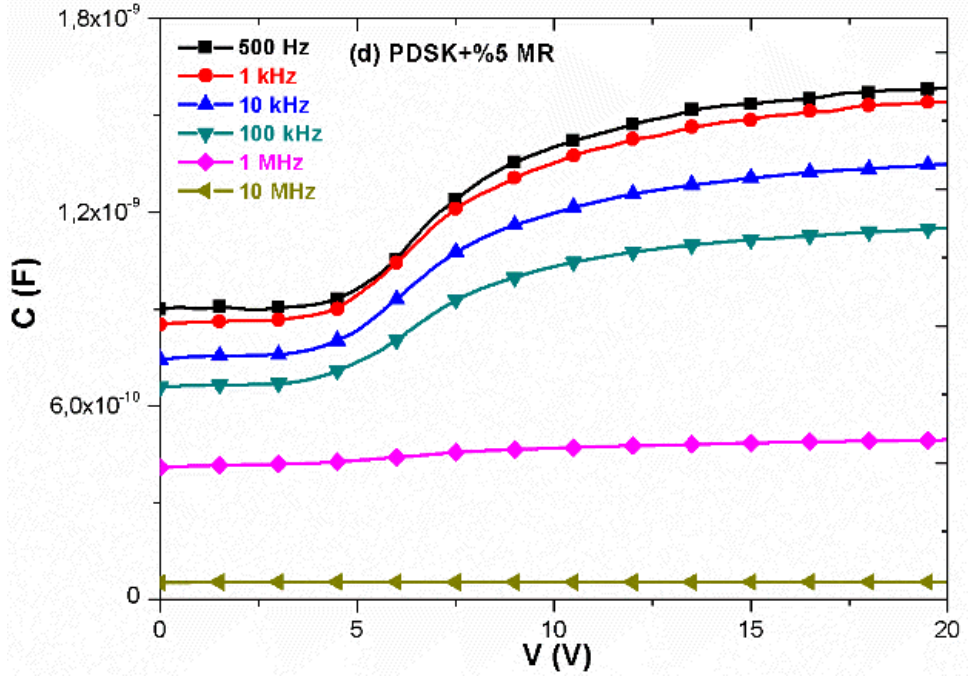


Şekil 5.18. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların $\tan\delta$ -f değişim grafiği.

Saf ve MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların farklı frekans değerlerinde kapasitans değerinin voltaja bağlı değişim grafiği Şekil 5.19’da verilmiştir. Grafiğe göre kapasitans değeri artan voltajla birlikte artmakta, düşük frekans bölgesinde satürasyona (doyma) ulaşmaktadır. Yüksek frekans bölgesinde ise (1 MHz ve 10 MHz) kapasitansın voltaja bağlı olarak hemen hemen değişmediği görülmüştür.

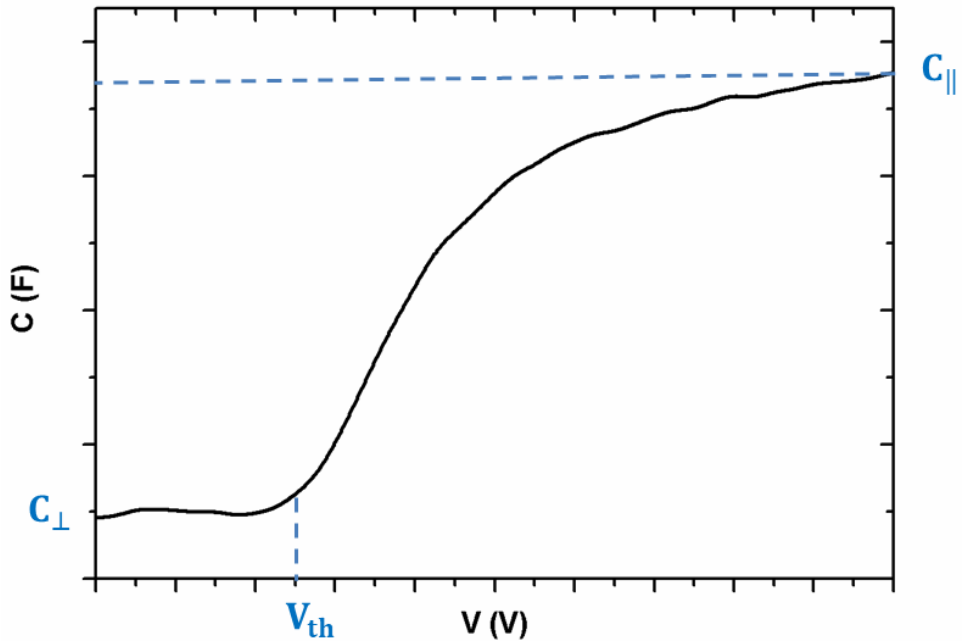






Şekil 5.19. a) Saf PDSK b) %1 MR c) %3 MR ve d) %5 MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların C-V grafikleri.

C-V grafiğinden, kapasitans değerinin %10 artışına karşılık gelen voltaj değeri olarak tanımlanan “eşik voltajı (V_{th})” bulunabilmektedir (Şekil 5.20).



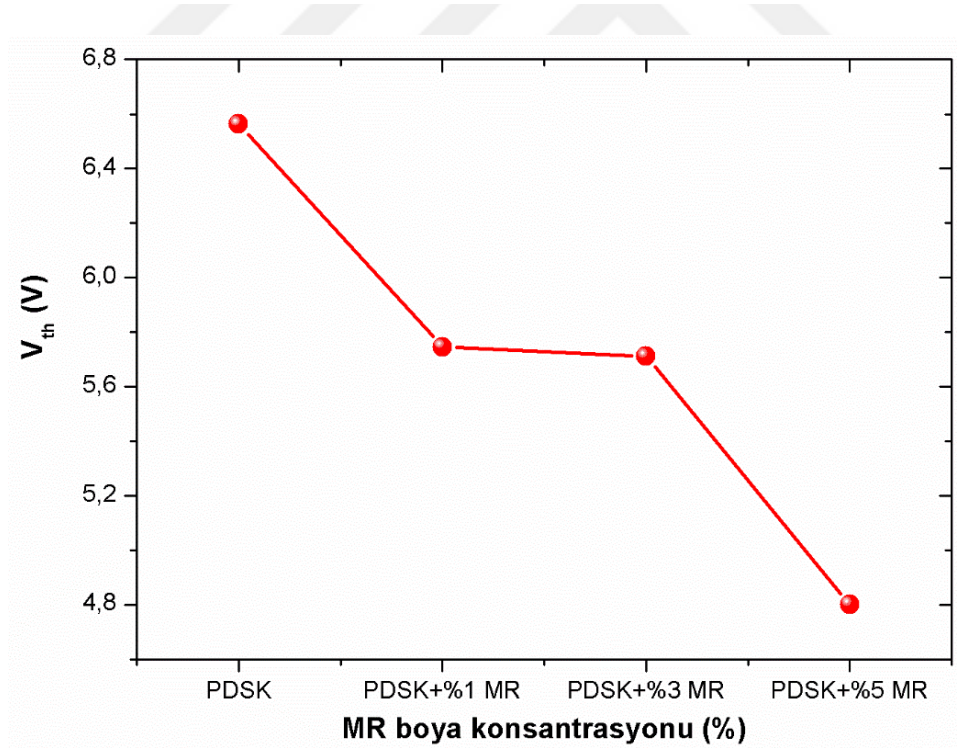
Şekil 5.20. Eşik voltajının hesaplaması için örnek C-V değişim grafiği.

Sıvı kristal temelli cihazlar için önemli bir parametre olan eşik voltajının incelenen yapılarda MR boya konsantrasyonuna bağlı değişim grafiği 1 kHz frekans değerinde

Şekil 5.21 ile verilmiştir. Saf PDSK yapı için 6,56 V bulunan eşik voltajı değeri, %1, %3 ve %5 MR katkılı PDSK yapılar için sırasıyla 5,75 V; 5,71 V ve 4,80 V değerine düşmüştür. PDSK kompozit yapıya MR boya katkılanması ve MR konsantrasyonunun artırılmasıyla eşik voltajı değerinin azaldığı görülmektedir. Eşik voltajındaki bu düşüşün olası sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [83], [84];

- i) MR boya moleküllerinin PDSK kompozit yapısına uyum sağlaması,
- ii) MR konsantrasyonunun artmasıyla dielektrik anizotropinin azalması,
- iii) Ortamdaki kirlilik iyonlarının sebep olduğu perdeleme etkisinin MR boya katkısıyla azalması.

Eşik voltajının azalmasının bir diğer sebebi de MR konsantrasyonunun artmasıyla sıvı kristal damlacık boyutlarının artmasıdır [16]. Eşik voltajının sıvı kristal damlacık boyutuna bağlı ifadesini veren Denklem (4.24)'e göre damlacık boyutu ve eşik voltajı ters orantılıdır. Dolayısı ile PDSK yapı içerisinde artan MR konsantrasyonunun damlacık boyutunda artış sağladığı ve bu sebeple de eşik voltajını düşürdüğü de söylenebilir.

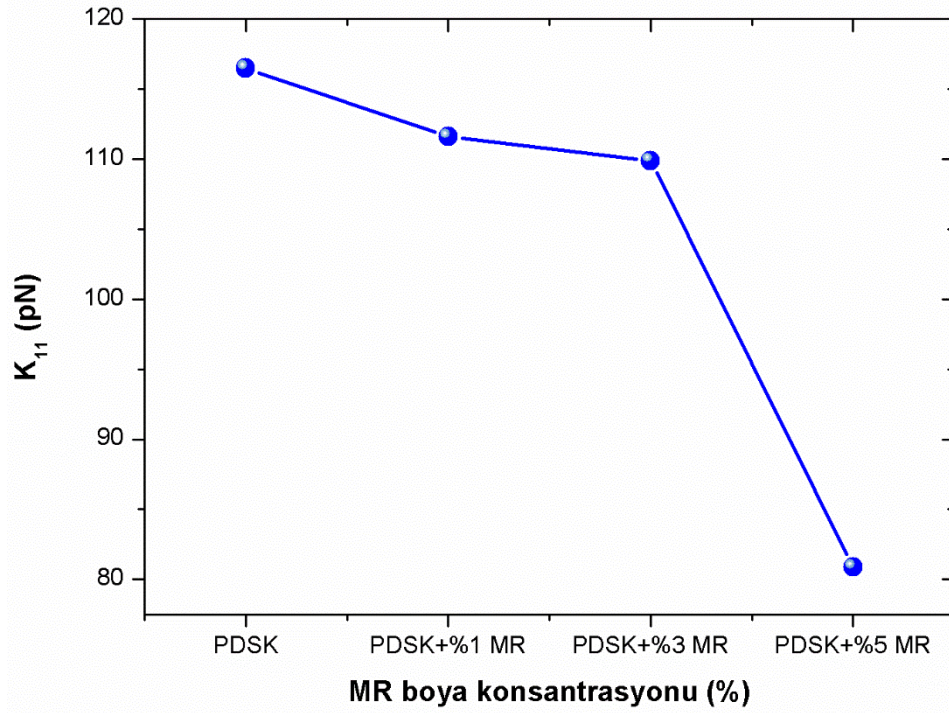


Şekil 5.21. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların V_{th} -MR boya konsantrasyonu grafiği.

Elde edilen eşik voltajı değerleri kullanılarak, Denklem (4.23) ile numunelere ait eğilme elastik sabiti değerleri de belirlenmiştir. Şekil 5.22'de tüm numuneler için 1 kHz

frekans değerinde MR boya konsantrasyonuna bağlı eğilme elastik sabitinin değişimi verilmektedir. K_{11} değeri, V_{th} değerinin karesiyle doğru orantılı bir şekilde değişim göstermektedir. Grafiğe göre, saf PDSK kompozit yapının K_{11} değerlerinin artan boya konsantrasyonu ile, V_{th} değerindeki azalmaya bağlı olarak azaldığı görülmektedir. K_{11} değerindeki değişimin diğer sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [84]:

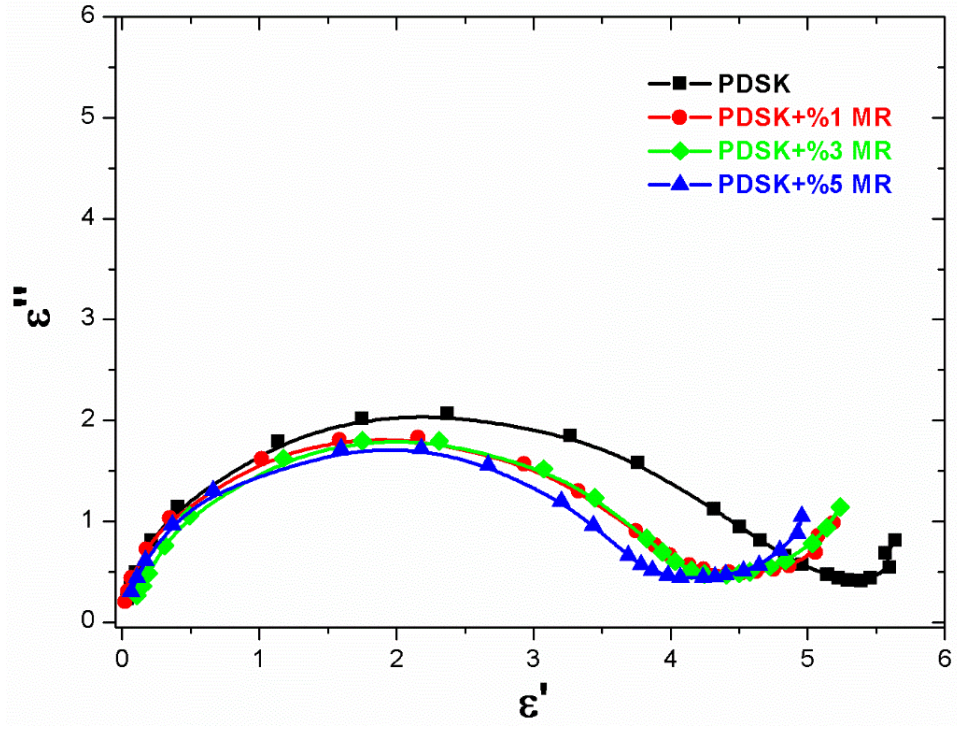
- i) Polimer, sıvı kristal ve boya molekülleri arasındaki etkileşim,
- ii) MR boya moleküllerinin PDSK kompozit yapısının yönlenimsel düzenini desteklemesi,
- iii) MR katkısı ile polimer matrisi/sıvı kristal damlacık yüzeyi arasındaki polar örgü enerjisinin zayıflaması.



şekil 5.22. Saf PDSK ve MR boya katkılı PDSK yapıların K_{11} -MR boya konsantrasyonu grafiği.

Saf ve MR boya katkılı PDSK kompozit malzemelerin yüksek frekans bölgesinde dielektrik relaksasyon davranışlarını değerlendirmek için dielektrik sabitinin gerçek ve sanal kısmının verilerinden faydalanılarak Cole-Cole grafiği elde edilmiştir. Cole-Cole denklemi, sistemin frekans değişimini örneklerin relaksasyon davranışıyla birlikte tanımlayan modelin genel şeklidir. İncelenen yapıların relaksasyon parametreleri Cole-Cole grafiğinin verilerinden elde edilmiştir ve izelge 5.2’de verilmiştir.

Şekil 5.23'te saf ve MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların 1 V gerilim değerinde Cole-Cole grafiği verilmiştir. Grafikten tüm örneklerin yüksek frekans bölgesinde relaksasyon davranışı gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.23. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların Cole-Cole grafiği.

Saf ve MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların relaksasyon zamanı değerleri Cole-Cole grafiğinin verilerinden elde edilmiştir ve Çizelge 5.2'de verilmiştir. Çizelgeye göre relaksasyon zamanı artan boya konsantrasyonuna bağlı olarak azalmaktadır. Bu sonuç MR boya katkılı PDSK kompozitlerin, saf PDSK kompozit yapılarla kıyasla bir elektrik alan uygulandıktan sonra dengeye ulaşmak için daha az zaman gerektirdiğini göstermektedir. Cole-Cole grafiğinin fit edilmesiyle aynı zamanda α dağılım parametreleri de elde edilmiştir. α dağılım parametresi tüm numuneler için sıfırdan farklı olduğundan kompozit yapıların Debye olmayan relaksasyon davranışı gösterdiği söylenebilir. Ayrıca boya katkısının α dağılım parametresinin değerinde azalışa sebep olduğu görülmektedir. Sırasıyla düşük ve yüksek frekanslardaki dielektrik sabitinin değerleri yine Cole-Cole grafiğinden elde edilmiştir. Malzemeler için dielektrik dayanım ($\delta\epsilon'$) değeri kırılmanın meydana gelmesinden önce voltaja karşılık gelen değer olarak tanımlanır. Düşük ve yüksek frekanslardaki dielektrik sabitinin değerleri kullanılarak dielektrik dayanım Denklem (5.1) ile ifade edilir [81]:

$$\delta\epsilon' = \epsilon'_s - \epsilon'_\infty \quad (5.1)$$

PDSK yapıda MR konsantrasyonunun artmasıyla dielektrik dayanım değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu sonuç da MR katkısının PDSK kompozit yapının relaksasyon davranışını etkilediğini göstermektedir.

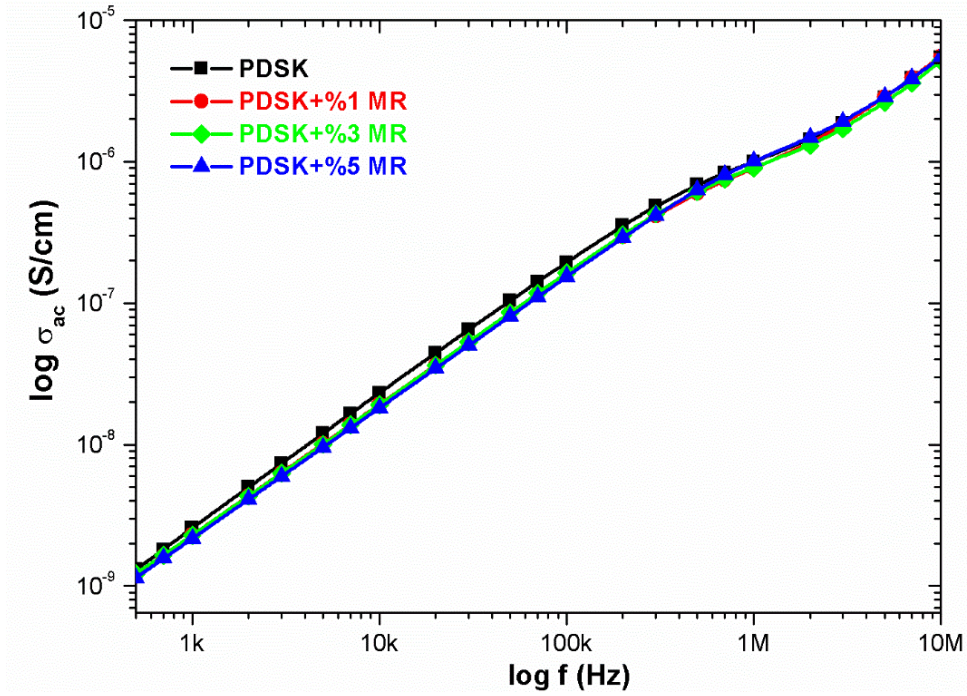
Çizelge 5.2. Saf PDSK, PDSK+%1 MR, PDSK+%3 MR ve PDSK+%5 MR kompozit yapılar için bazı önemli dielektrik parametreler.

Örnekler	$\tau_R (\mu s)$	α	ϵ'_s	ϵ'_∞	$\delta'\epsilon$
PDSK	0,385	0,156	5,395	0,039	5,356
PDSK+%1 MR	0,361	0,147	4,519	0,018	4,501
PDSK+%3 MR	0,330	0,134	4,405	0,106	4,299
PDSK+%5 MR	0,209	0,095	4,072	0,062	4,010

AC iletkenliğin (σ_{ac}) frekansa bağlı değişim bağıntısı Denklem (5.2) ile verilir [85]:

$$\sigma_{ac} = \epsilon_o \omega \epsilon'' \quad (5.2)$$

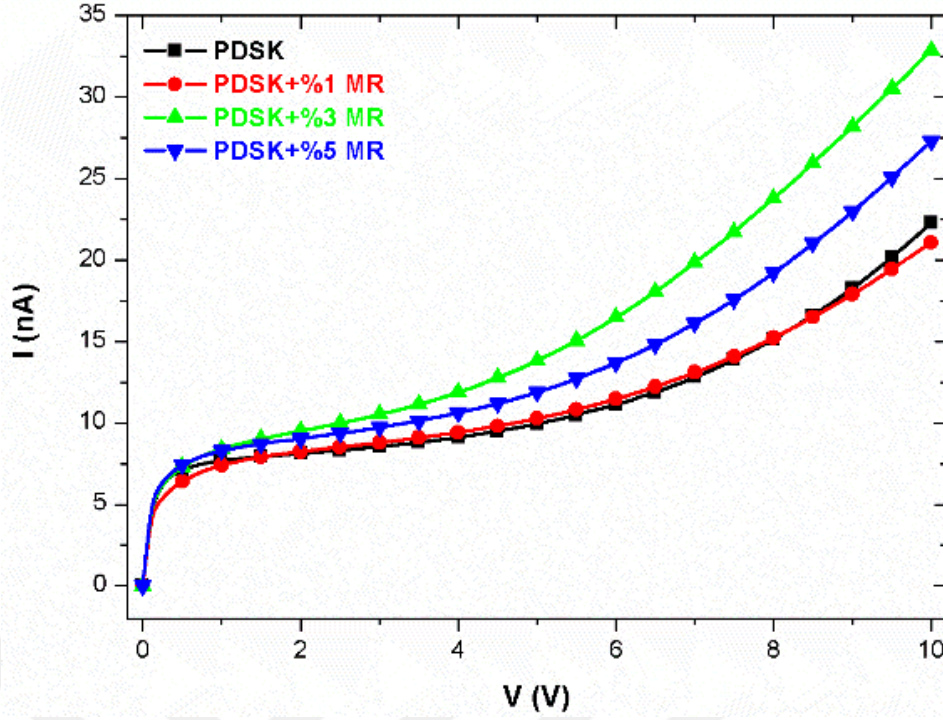
Saf ve MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların, 1 V gerilim değerinde, σ_{ac} -f değişim grafiği Şekil 5.24'te verilmiştir.



Şekil 5.24. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların $\log \sigma_{ac}$ - $\log f$ grafiği.

Artan frekans ile incelenen tüm yapılar için σ_{ac} değerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca düşük frekans bölgesinde boya konsantrasyonunun artışına bağlı olarak σ_{ac} değerinin çok az azaldığı, yüksek frekans bölgesinde ise neredeyse değişmediği görülmüştür. Düşük frekans bölgesinde AC iletkenliğindeki azalma boya, polimer ve sıvı kristal molekülleri arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak tüm kompozit yapılardaki serbest iyonların sayısındaki azalma ile açıklanabilir.

Saf ve MR katkılı PDSK kompozit yapıların akım-gerilim (I-V) grafiği Şekil 5.25 ile verilmiştir. MR katkılanması ile saf PDSK kompozit yapının akım değerinin arttığı görülmüştür. Bu davranışın sebebi MR katkısı ile ortamdaki taşıyıcı yük yoğunluğunun artması olarak değerlendirilmektedir. Elde edilen ölçümlerden konsantrasyonun artışına bağlı olarak %3 MR katkısından sonra bu eğilimin değiştiği ve %5 MR katkılı PDSK kompozit yapıda akım değerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

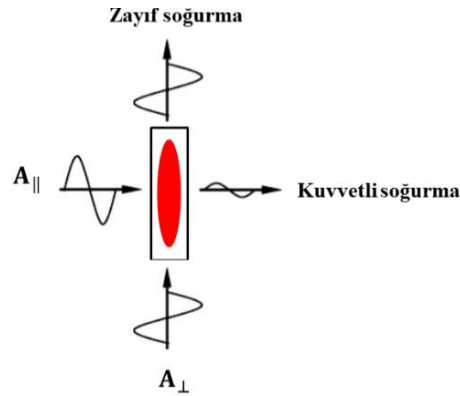


Şekil 5.25. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların I-V grafiği.

5.4.2. Opto-Elektronik Özellikler

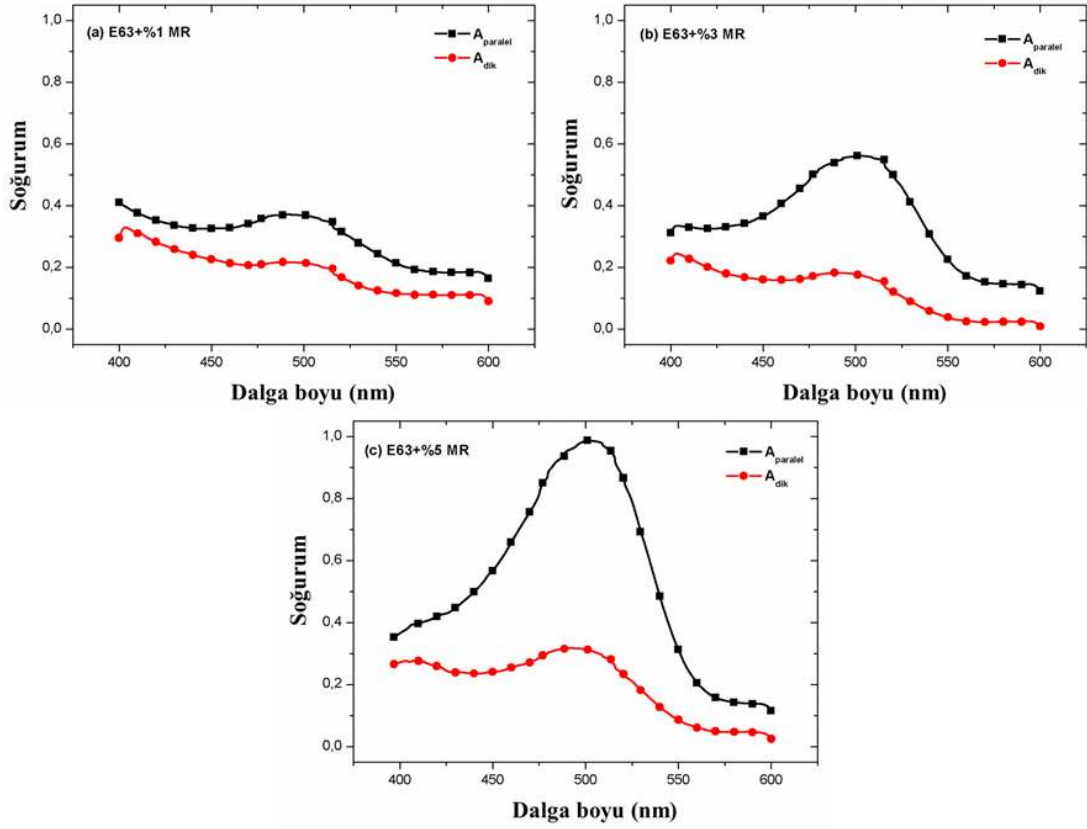
5.4.2.1. Dikroik Oranı

E63 nematik sıvı kristal içerisinde bulunan MR boyanın konsantrasyonuna bağlı olarak %1, %3 ve %5 MR katkılı örneklerin dikroik oranları (DR) ve düzen parametreleri (S) hesaplanmıştır. Dikroik oranları UV-VIS Spectrofotometre cihazı kullanılarak polarizörler yardımıyla ışığın boya moleküllerinin direktörüne paralel ve dik doğrultuda gönderilmesi ile elde edilen maksimum soğurma değerleri ile hesaplanmıştır (Şekil 5.26) [86].



Şekil 5.26. Işığın boya molekülüne paralel ve dik gelme durumunda boyanın soğurma durumunun şematik gösterimi.

Şekil 5.27’de %1, %3 ve %5 MR boya katkılı E63/MR kompozit yapılarının normalize edilmiş paralel ve dik soğurum spektrumları dalga boyuna bağlı olarak verilmiştir.



Şekil 5.27. a) E63+%1 MR b) E63+%3 MR ve c) E63+%5 MR kompozit yapılarının paralel ve dik soğurum spektrumları.

Şekil 5.27’den elde edilen maksimum soğurma değerleri ile hesaplanan dikroik oranı ve düzen parametresi değerleri Çizelge 5.3 ile verilmiştir. Çizelgeden ve soğurum spektrumlarından elde edilen tüm sonuçlar göz önüne alındığında, boya konsantrasyonunun artmasıyla kompozit yapının maksimum soğurma değeri, dikroik oranı ve düzen parametresinin arttığı görülmüştür. Sıvı kristallerde beklendiği gibi, boya konsantrasyonu arttıkça moleküllerin belirli bir yönde yönlenmesi kolaylaşır ve düzen parametresi değeri artar. Düzen parametresi sıvı kristal maddelerin moleküler özelliklerini belirlemede önemli bir parametredir. Numunelerin dikroik oranları 1’den büyüktür ($DR > 1$), bu boya molekülleri ile sıvı kristal molekülleri arasındaki kuvvetli moleküler etkileşimlerden kaynaklanır [57].

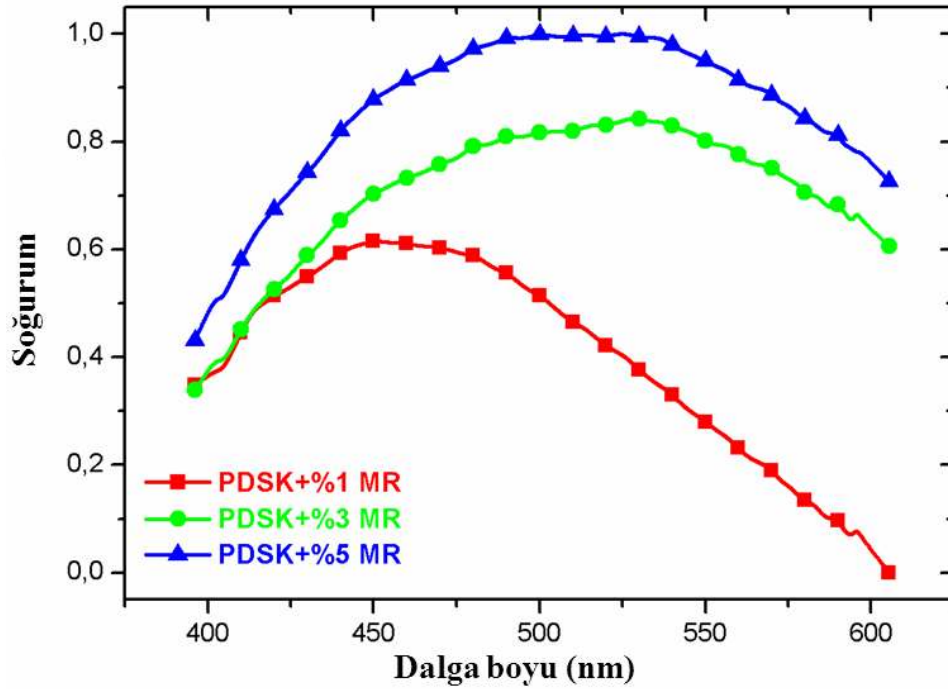
Çizelge 5.3. %1, %3 ve %5 MR katkılı E63 kompozit yapıların DR ve S parametreleri.

Örnekler	$DR=A_{\parallel}/A_{\perp}$	$S=(DR-1)/(DR+2)$
E63+%1 MR	1,68	0,19
E63+%3 MR	3,10	0,41
E63+%5 MR	3,20	0,42

5.4.2.2. Soğurma

Görünür ışık bölgesinde polimer ve sıvı kristal molekülleri neredeyse hiç ışık soğurmadığı için, boya katkılı bir PDSK kompozit yapıda ışığın soğurulması film kalınlığına ve boyanın konsantrasyonuna bağlı olarak kompozit yapı içerisindeki boyadan kaynaklanır [87].

Ağırlıkça %1, %3 ve %5 MR katkılı PDSK kompozit yapılara ait Soğurma-Dalga boyu grafiği Şekil 5.28 ile verilmiştir.



Şekil 5.28. MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların Soğurma-Dalga boyu grafiği.

Grafiğe göre kompozit yapı içerisindeki MR konsantrasyonunun artmasıyla soğurma miktarı da artmaktadır. Buna göre en fazla soğurma %5 MR boya katkılı PDSK kompozit yapıda, en az soğurma ise %1 MR katkılı PDSK kompozit yapıda görülmüştür [87], [88].

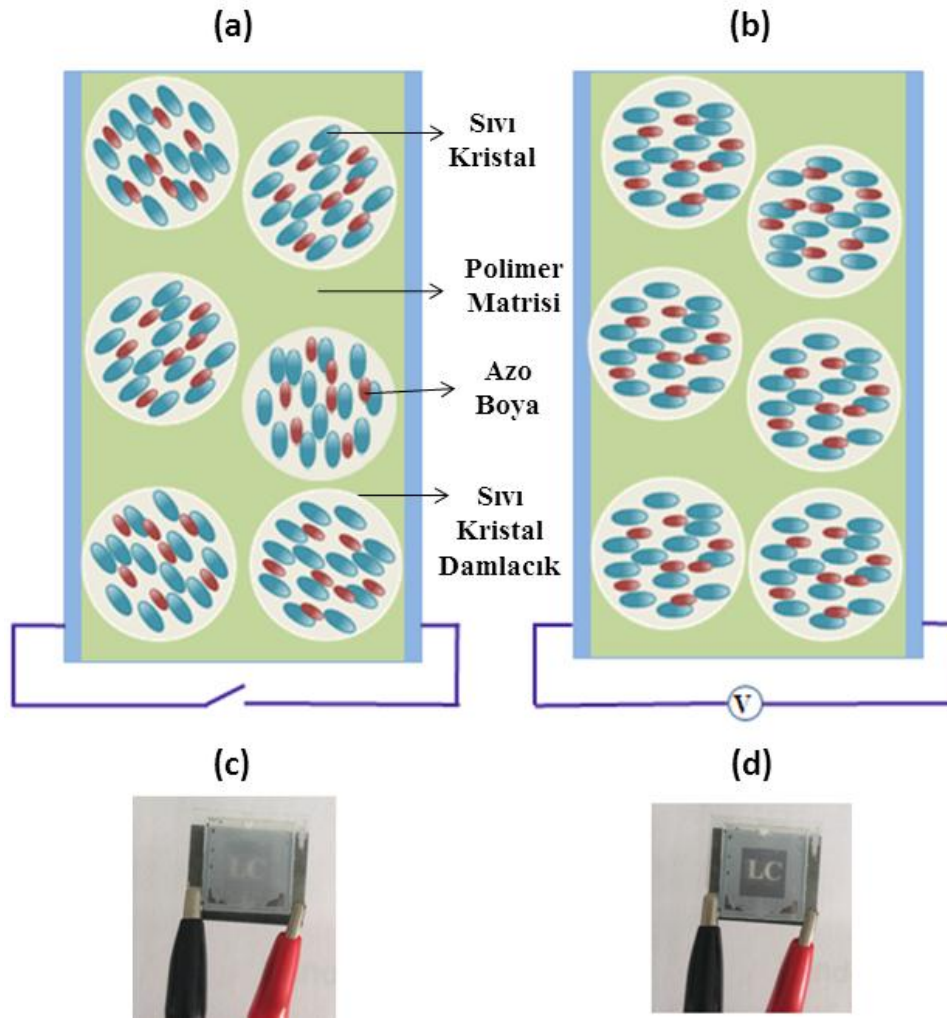
5.4.2.3. Geçirgenlik

Şekil 5.29'da sıvı kristal ölçüm hücresi içinde bulunan MR katkılı PDSK kompozit yapının elektrik alanın uygulandığı ve uygulanmadığı durumda damlacık içindeki moleküler yöneliminin şematik gösterimi ve oluşturulan PDSK filmin orijinal görüntüsü verilmiştir.

Elektrik alanın uygulanmadığı durumda sıvı kristal damlacıkları ve boya molekülleri rastgele bir dağılım gösterirler (Şekil 5.29.(a)) Bu durumda polimerin, sıvı kristalin ve boyanın kırılma indisleri arasında bir uyumsuzluk olduğu için kompozit yapı opak bir görünüme sahiptir (Şekil 5.29.(c)).

Elektrik alanın uygulanması durumunda sıvı kristal damlacıkları ve sıvı kristal damlacıkları içerisinde bulunan boya molekülleri elektrik alan doğrultusunda yönelirler (Şekil 5.29.(b)). Bu durumda polimerin, sıvı kristalin ve boyanın kırılma indisleri eşleştiği için yapı transparan (şeffaf) bir görünüme sahip olur (Şekil 5.29.(d)).





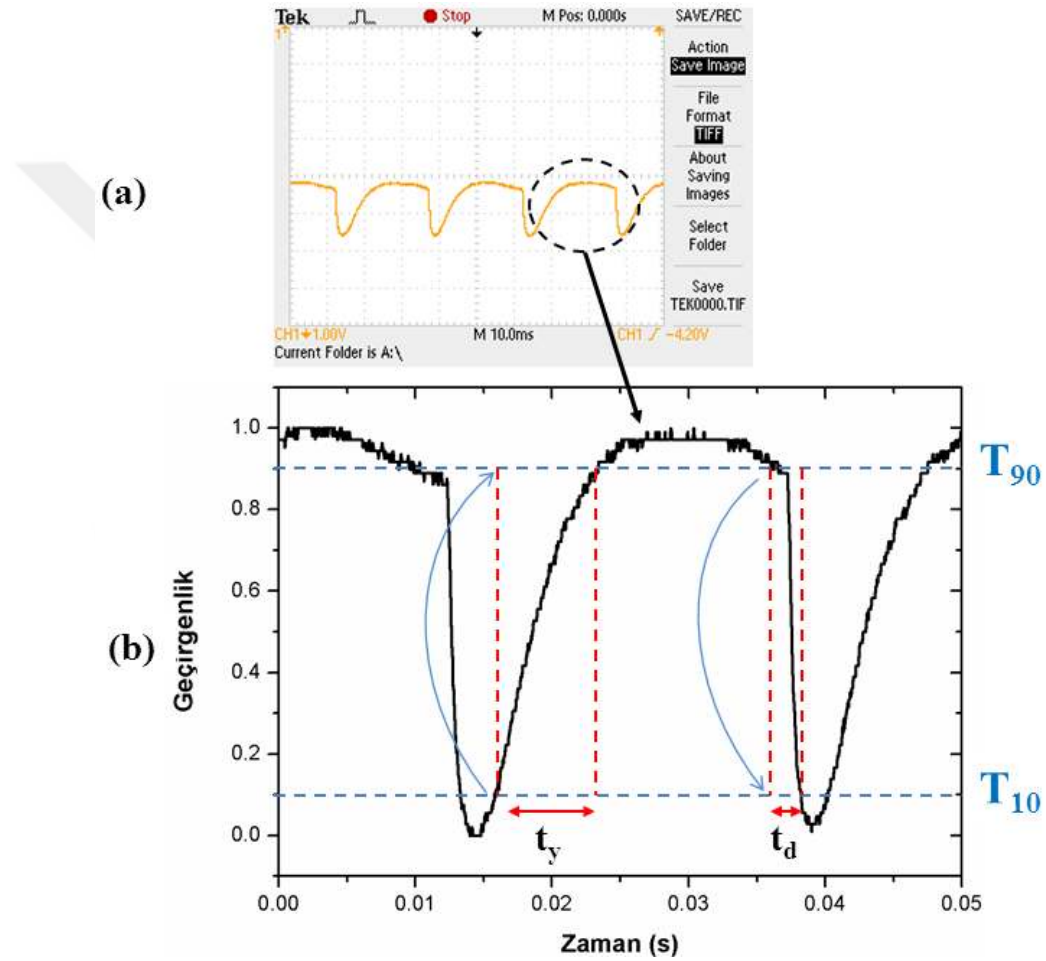
Şekil 5.29. a) Elektrik alanın uygulanmadığı durumda ve b) elektrik alanın uygulandığı durumda MR katkılı PDSK kompozit yapıdaki moleküler yönelimin şematik gösterimi c) elektrik alanın uygulanmadığı durumda ve d) elektrik alanın uygulandığı durumda filmin orijinal görüntüsü.

Sıvı kristal içerisinde çözülmüş olan dikroik bir boya, sıvı kristal molekülünün uzun moleküler eksenini boyunca hizalanır. Polimer matrisinde çözülmüş halde kalan dikroik boya, uygulanan elektrik alandan etkilenmez ve polimer matrisinde rasgele bir yönelim gösterir. Bu nedenle, sadece nematik sıvı kristal damlacık içerisinde çözülmüş boya dikroik özellikler sergileyerek boya katkılı PDSK filmlerin optik tepkisine katkıda bulunabilir.

5.4.2.4. Tepki Süresi

Optik geçirgenlik sistemi kullanılarak 20 Hz kare dalga ve 20 V AC geriliminde saf ve MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların tepki süresi, yükselme süresi ve düşme süresi belirlenmiştir.

Şekil 5.30'da saf PDSK kompozit yapı için osiloskoptan alınan kare dalga örnek olarak verilmiştir ve grafikten bu parametrelerin belirlenmesi için kullanılan yöntem şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.30. PDSK kompozit yapı için kare dalganın a) osiloskop ekran görüntüsü ve b) Geçirgenlik-Zaman grafiği.

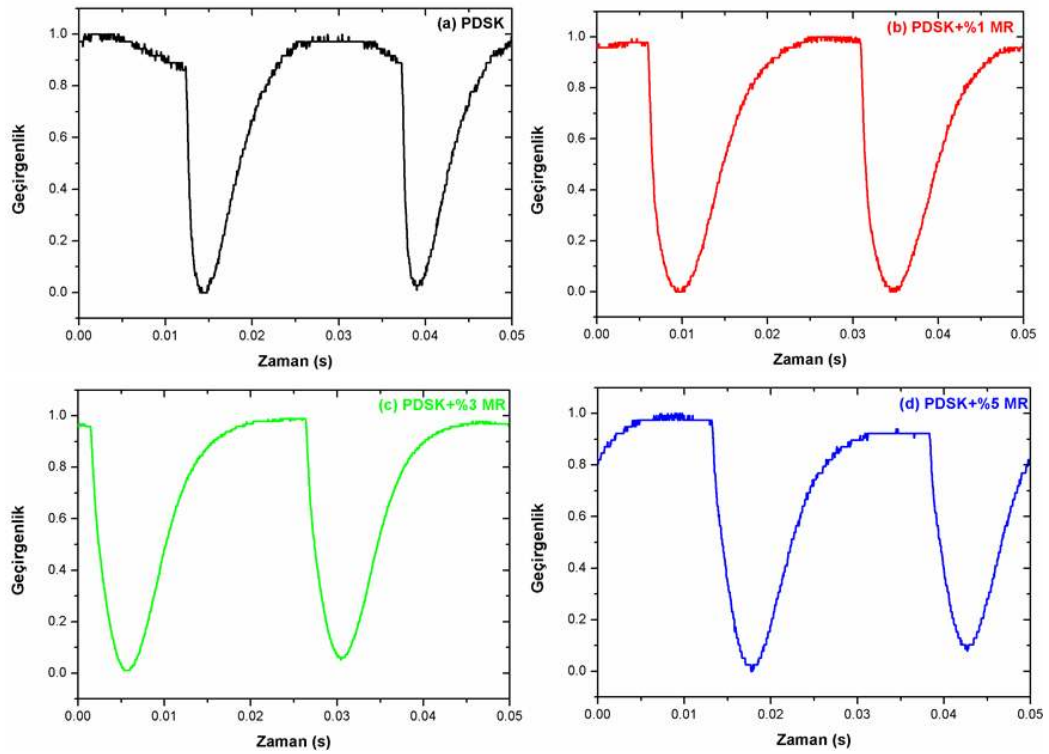
Grafikte gösterildiği gibi PDSK kompozit yapının geçirgenliğinin %10'dan %90'a yükselinceye kadar geçen süreden yükselme süresi; %90'dan %10'a düşene kadar geçen süreden de düşme süresi elde edilmiştir. Bu iki değer toplamı da tepki süresini vermektedir.

Çizelge 5.4. Saf PDSK, PDSK+%1 MR, PDSK+%3 MR ve PDSK+%5 MR kompozit yapılar için yükselme süresi (τ_y), düşme süresi (τ_d) ve tepki süresinin (τ_t) gösterimi.

Örnekler	τ_y (ms)	τ_d (ms)	τ_t (ms)
PDSK	6,92	1,16	8,08
PDSK+%1 MR	7,40	1,76	9,16
PDSK+%3 MR	7,96	2,72	10,68
PDSK+%5 MR	9,08	3,24	12,32

Osiloskoptan alınan veriler ile tüm kompozitler için yükselme süresi, düşme süresi ve tepki süresi, belirlenerek

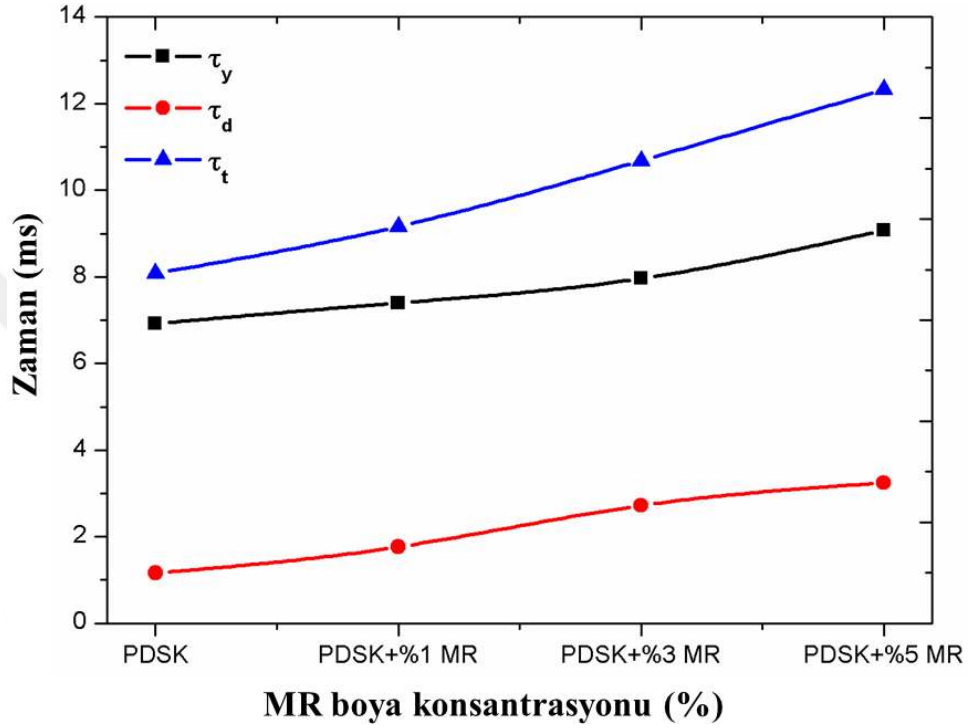
Çizelge 5.4’te verilmiştir. Saf PDSK, %1, %3 ve %5 MR katkılı PDSK yapılarının da Geçirgenlik-Zaman grafiği Şekil 5.31 ile verilmiştir.



Şekil 5.31. a) Saf PDSK b) %1 MR c) %3 MR d) %5 MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların Geçirgenlik-Zaman grafikleri.

Şekil 5.32’de Geçirgenlik- Zaman grafiklerinden hesaplanan yükselme süresinin, düşme süresinin ve tepki süresinin, MR konsantrasyonuna bağlı değişimi görülmektedir. Boya katkısıyla yükselme süresi, düşme süresi ve tepki süresi artmıştır. Bu sonuç düşük boya

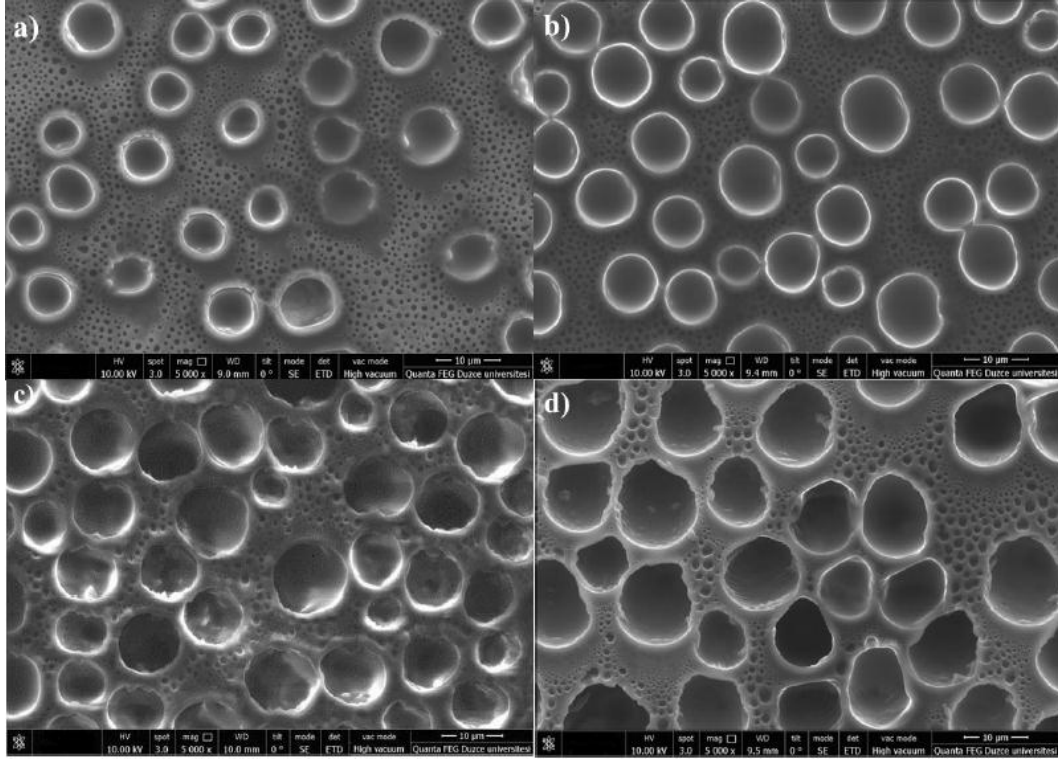
konsantrasyonlarında tepki süresinin daha hızlı olduğu anlamına gelir [29], [56]. Daha yüksek boya konsantrasyonlarında, tepki süresindeki artış boya ve sıvı kristal molekülleri arasındaki atomik elastik ve vizkos kuvvetleri gibi farklı etkileşimlerden kaynaklanmaktadır [76]. Kompozit yapıda artan boya konsantrasyonu viskozitenin artmasına sebep olduğundan incelenen yapılarda moleküllerin tepki sürelerinin arttığı gözlemlenmiştir [21], [75], [89].



Şekil 5.32. Yükselme süresi (τ_y), düşme süresi (τ_d), ve tepki süresinin (τ_t), MR konsantrasyonuna bağlı değişim grafiği.

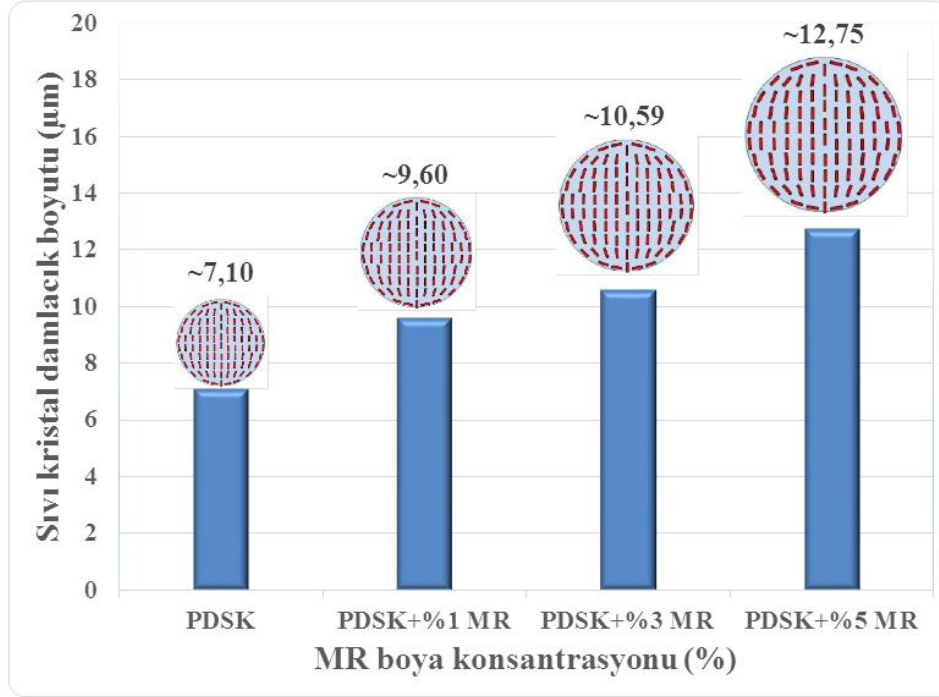
5.4.3. Morfolojik Özellikler

Saf ve MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların morfolojik analizleri için örneklerin SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 5.33'te saf, %1, %3 ve %5 MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.33'te boya konsantrasyonunun artmasıyla sıvı kristal damlacık boyutunun arttığı görülmektedir [29], [75].



Şekil 5.33. a) Saf PDSK b) %1 MR c) %3 MR d) %5 MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların SEM görüntüleri.

Polimer matrisinde dağılmış olan yaklaşık 20 sıvı kristal damlacığının ortalaması alınarak her bir kompozit yapı için ortalama damlacık boyutları belirlenmiştir. Ortalama sıvı kristal damlacık boyutu saf, %1, %3 ve %5 MR boya katkılı PDSK kompozit yapılar için sırasıyla 7,10; 9,60; 10,59 ve 12,75 μm olarak bulunmuştur. Şekil 5.34'te saf PDSK ve MR boya katkılı PDSK kompozit yapıların MR konsantrasyonuna bağlı olarak ortalama sıvı kristal damlacık boyutundaki değişimi özetlenmiştir.



Şekil 5.34. Saf PDSK ve MR boya katkılı kompozit yapıların MR boya konsantrasyonuna bağlı sıvı kristal damlacık boyutu değişim grafiği.

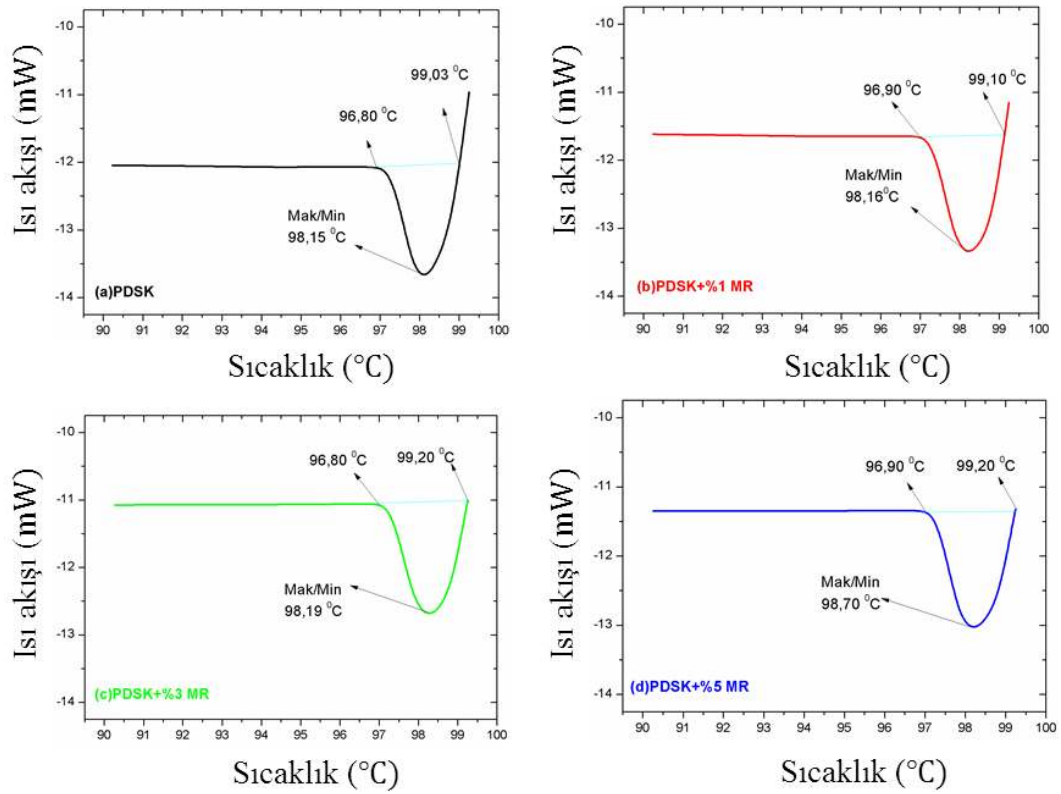
Boya konsantrasyonunun artmasıyla sıvı kristal damlacık boyutundaki artışın bazı olası nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Polimerizasyon sırasında sıvı kristallerin damlacıklara difüzyonu ve polimerlerin de damlacıklardan dışarıya doğru difüzyonu, sıvı kristal damlacıkların büyümesine sebep olur. PDSK yapıya MR boya katkılандığında ya da MR konsantrasyonu artırıldığında kompozit yapının viskozitesi artar [16], [21], [29]. Bu yüzden sıvı kristal moleküllerinin hareketleri kısıtlanır ve moleküllerin çarpışma ihtimali azalır. Sonuç olarak sıvı kristal molekülleri polimer matrisi tarafından tutulur ve damlacık boyutları da artar [22], [28], [90].
- PDSK yapı içerisindeki boya molekülleri polimerizasyon için gerekli olan UV ışığın bir kısmını soğururlar. Bu yüzden boya katkılı PDSK kompozit yapılarda polimerizasyonun tamamlanması için daha fazla süre gerekir. Sıvı kristal damlacıklarının birleşmesi, oluşumu ve büyümesi için daha fazla zaman gerektiğinden, boya katkılanması ile sıvı kristal damlacıklarının büyüklüğü artar [21], [29], [75], [88]. Bu durum aynı zamanda optik yolun uzamasına da sebep olmaktadır [56].

5.4.4. Termal Özellikler

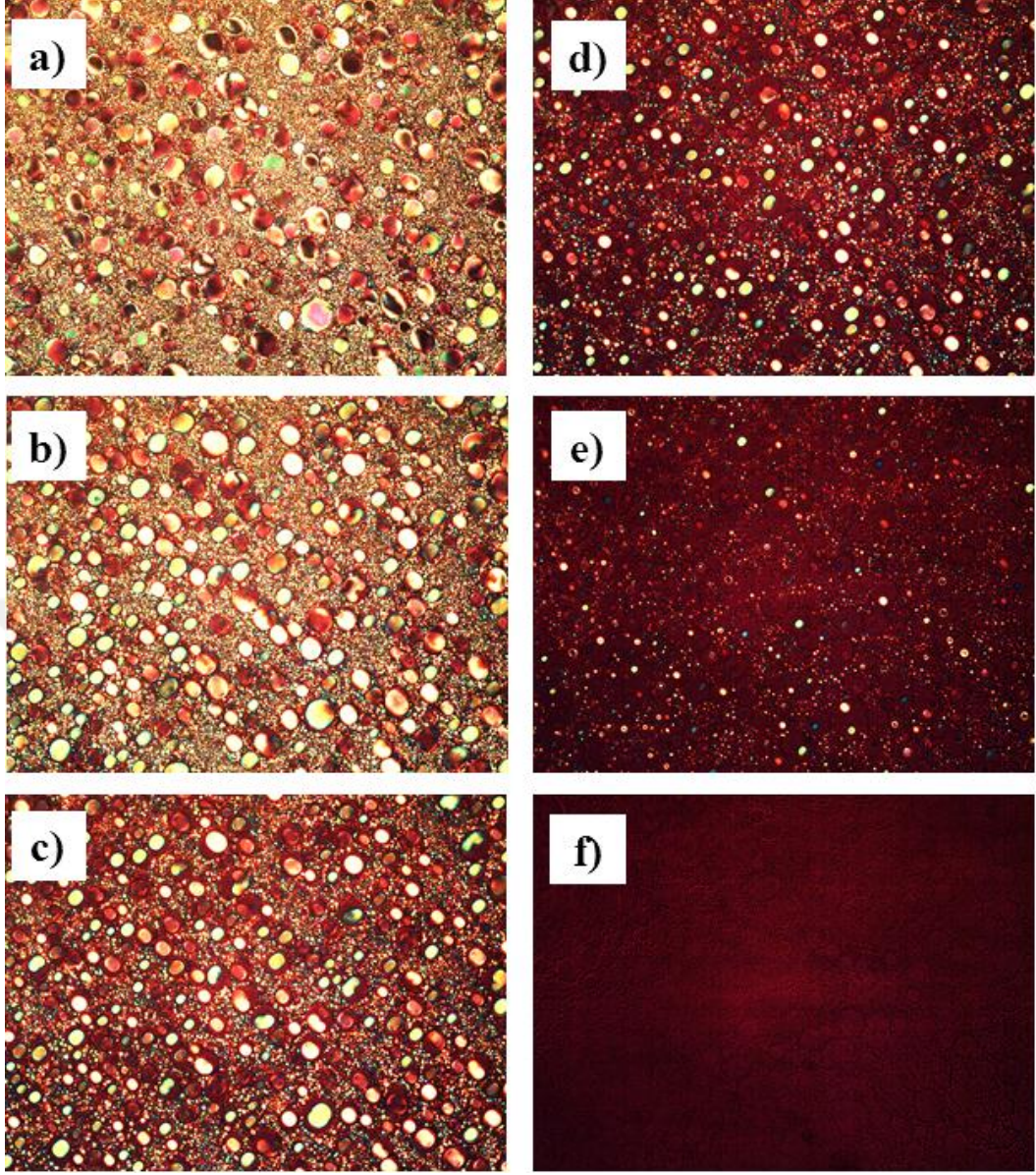
5.4.4.1. Faz Geçiş Sıcaklığı

Saf PDSK ve MR boya katkıli PDSK kompozit yapıların faz geçiş sıcaklıkları (T_{N-I}) diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 5.35.(a-d) sırasıyla saf, %1, %3 ve %5 MR boya katkıli PDSK kompozit yapılar için DSC grafiklerini göstermektedir. Grafiklere bakıldığında saf, %1, %3 ve %5 MR katkıli PDSK kompozit yapılar için T_{N-I} değeri sırasıyla 98,15 °C ; 98,16 °C ; 98,19 °C ve 98,70 °C olarak bulunmuştur.

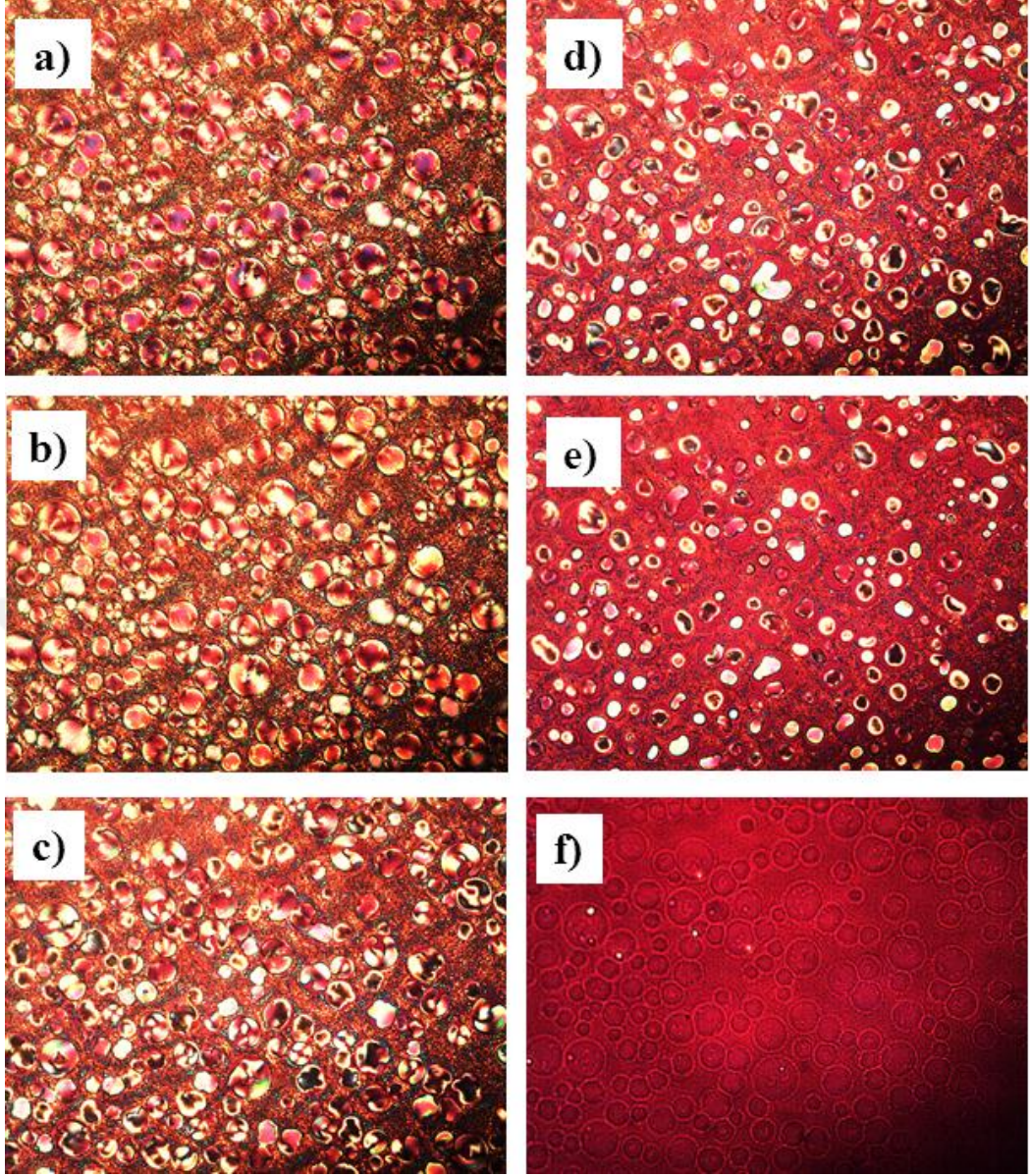


Şekil 5.35. a) Saf PDSK b) %1 MR c) %3 MR ve d) %5 MR boya katkıli PDSK kompozit yapıların DSC grafikleri.

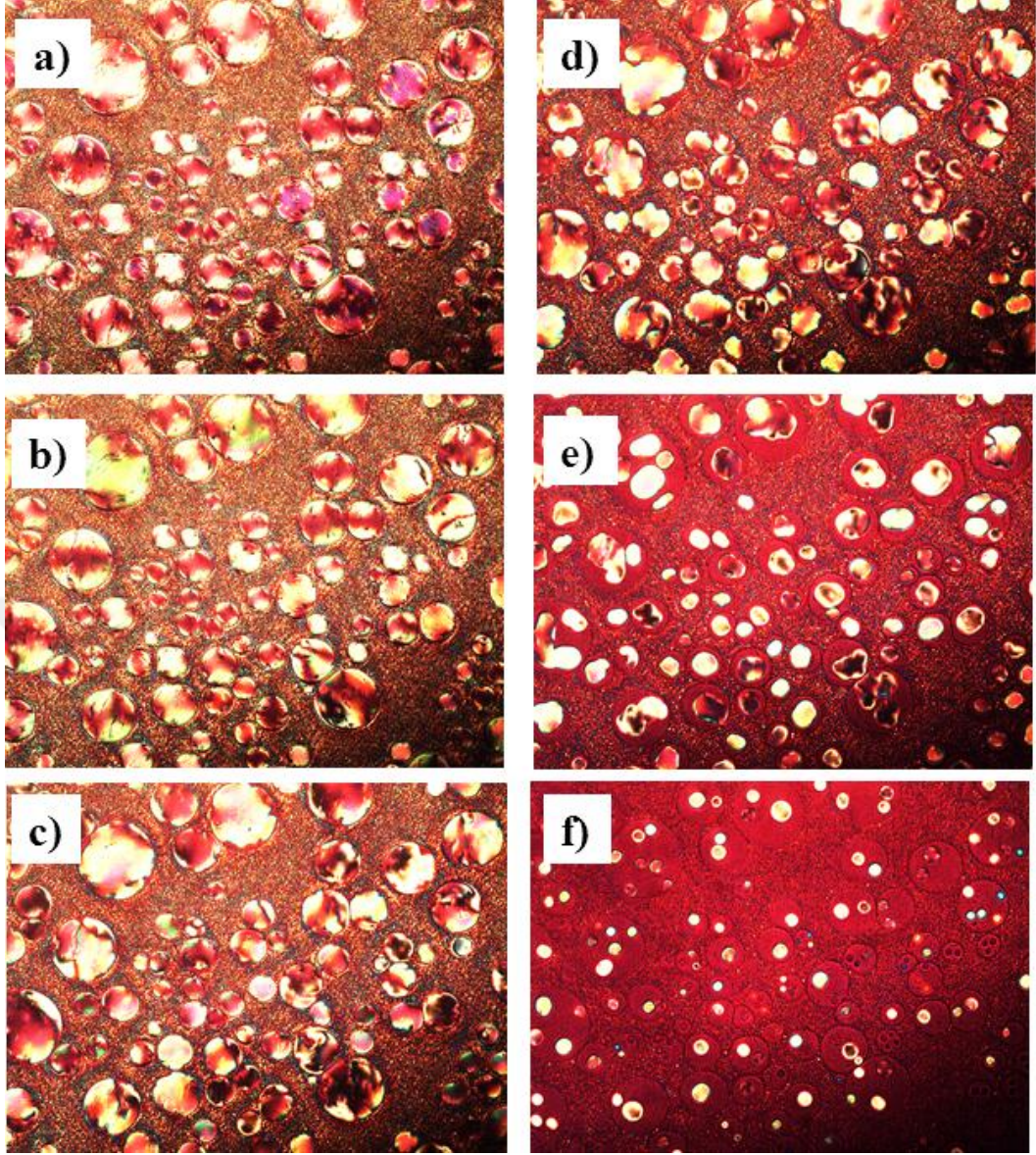
Saf ve boya katkıli PDSK kompozit yapılarının DSC spektrumlarından elde edilen faz geçiş sıcaklık değerlerini desteklemek için örneklerin sıcaklığa bağlı POM görüntüleri de alınmıştır. Şekil 5.36, Şekil 5.37, Şekil 5.38 ve Şekil 5.39 ile sırasıyla saf PDSK, %1, %3 ve %5 MR katkıli PDSK kompozit yapılar için farklı sıcaklıklarda POM görüntüleri verilmiştir.



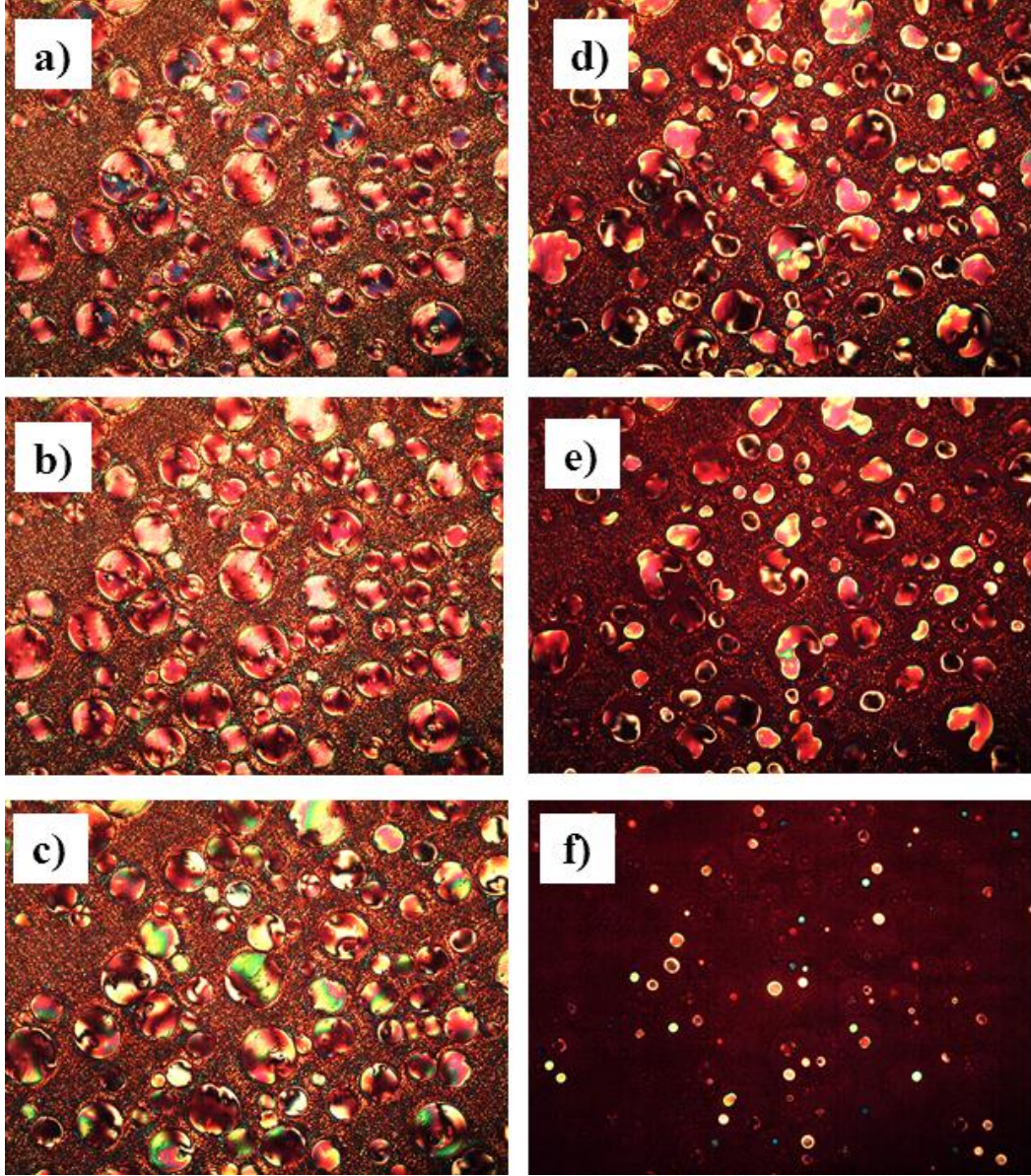
Şekil 5.36. a) 75 °C b) 80 °C c) 85 °C d) 90 °C e) 95 °C ve f) 100 °C sıcaklık değerinde saf PDSK kompozit yapı için POM görüntüleri.



Şekil 5.37. a) 75 °C b) 80 °C c) 85 °C d) 90 °C e) 95 °C ve f) 100 °C sıcaklık değerinde PDSK+%1 MR kompozit yapı için POM görüntüleri.



Şekil 5.38. a) 75 °C b) 80 °C c) 85 °C d) 90 °C e) 95 °C ve f) 100 °C sıcaklık değerinde PDSK+%3 MR kompozit yapı için POM görüntüleri.



Şekil 5.39. a) 75 °C b) 80 °C c) 85 °C d) 90 °C e) 95 °C ve f) 100 °C sıcaklık değerinde PDSK+%5 MR kompozit yapı için POM görüntüleri.

Her bir numune için DSC grafikleri ve POM görüntüleri beraber değerlendirildiğinde PDSK kompozit yapıya MR katkılanmasıyla ve boya konsantrasyonunun artması ile faz geçiş sıcaklıklarında önemli bir değişimin olmadığı görülmektedir. Bu davranışın sebebi boya moleküllerinin yapıya gelen ısı enerjisini soğurması olarak düşünülmüştür [56].

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada E63 kodlu nematik sıvı kristal, NOA65 pre-polimeri ve ağırlıkça %1, %3 ve %5 MR boya kullanılarak polimerizasyon kaynaklı faz ayırma yöntemi ile saf ve boya katkılı PDSK kompozit yapılar oluşturulmuştur. Kompozit yapıların dielektrik, opto-elektronik, morfolojik ve termal özellikleri değişen boya konsantrasyonuna bağlı olarak incelenmiştir.

Tezin birinci bölümünde saf, %1, %3 ve %5 MR katkılı PDSK kompozit yapıların dielektrik özellikleri dielektrik spektroskopik tekniği ile oda sıcaklığında frekansa ve voltaja bağlı olarak incelenmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre dielektrik sabitinin reel ve sanal kısmı, dielektrik anizotropi, relaksasyon frekansı, relaksasyon zamanı, kayıp tanjant, AC iletkenlik gibi önemli dielektrik parametreler belirlenmiştir. Polimer, sıvı kristal ve MR boya molekülleri arasındaki moleküler etkileşimlerden dolayı kompozit yapı içerisinde ki toplam dipol moment azaldığı için kompleks dielektrik sabitinin reel kısmının artan MR konsantrasyonuna bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Sistemin enerji kaybının bir göstergesi olan kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmı da MR konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak azalmıştır. Sıvı kristallerin elektrik alanına karşı gösterdikleri tepkinin bir ölçüsü olan dielektrik anizotropi ($\Delta\epsilon'$) değerinin tüm örnekler için yüksek frekans bölgesinde pozitiften (p-tipi) negatife (n-tipi) geçtiği görülmüştür. Frekansa bağlı dielektrik anizotropi grafiğinden elde edilen geçiş frekansı değerlerine bakıldığında ise artan boya konsantrasyonu ile f_c değerinin azaldığı görülmüştür. Fiziksel mekanizmalardan dolayı sistemin enerjisinde meydana gelen kayıpları ifade eden kayıp tanjant faktörü MR katkısına bağlı olarak ortamda oluşan ekstra iyonlardan dolayı düşük frekans bölgesinde bir artış göstermiştir. Enerji verimliliği açısından önemli bir parametre olan eşik voltajının ve eşik voltajıyla ilişkili olan elastik sabitinin PDSK yapıda boya katkılanması ve bu boyanın artan konsantrasyonu ile azaldığı görülmüştür. Bu sonuç MR katkısının PDSK kompozit yapıda damlacık içindeki moleküler yönelimin daha düşük voltaj değerlerinde gerçekleştiğini ve moleküler anahtarlamanın daha kolaylaştığını göstermektedir. Saf ve boya katkılı PDSK kompozit yapıların Cole-Cole grafikleri incelendiğinde örneklerin Debye modeline uygun olmadığı ve relaksasyon süresinin (τ) artan MR konsantrasyonu

ile azaldığı görülmüştür.

Tezin ikinci bölümünde saf ve boya katkılı PDSK kompozit yapıların opto-elektronik özellikleri araştırılmıştır. Bu bölümde boya katkılı sıvı kristal kompozit yapıların dikroik oranı, düzen parametresi ve soğurum miktarları konsantrasyona bağlı olarak incelenmiştir. Beklenildiği gibi boya konsantrasyonunun artmasıyla dikroik oranı ve buna bağlı olarak sıvı kristal boya karışımından oluşan yapının düzen parametresi değeri artmıştır. Örneklerin dikroik oranları 1'den büyük çıkmıştır. Bu sonuç MR boya molekülleri ile sıvı kristal molekülleri arasında kuvvetli moleküler etkileşim olduğunun bir göstergesidir. Ayrıca sıvı kristal temelli cihazların opto-elektronik özelliklerini belirlemede önemli olan tepki süresi, yükselme süresi ve düşme süresi gibi parametreler optik geçirgenlik sistemi kullanılarak saf ve boya katkılı PDSK kompozit yapılar için belirlenmiştir. Boya konsantrasyonunun artmasıyla ortamın viskozitesinde de bağlı olarak tepki süresinin, yükselme süresinin ve düşme süresinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu, incelenen yapılar için düşük boya konsantrasyonlarında tepki süresinin daha hızlı olduğu sonucunu da beraberinde getirmektedir.

Tezin üçüncü bölümünde saf ve boya katkılı PDSK kompozit yapıların SEM görüntüleri alınarak morfolojik analizleri yapılmıştır. Boya konsantrasyonunun artmasıyla sıvı kristal damlacık boyutunun arttığı görülmüştür.

Tezin dördüncü bölümünde saf ve boya katkılı PDSK kompozit yapıların faz geçiş sıcaklıkları DSC ile belirlenmiştir. Ayrıca örneklerin sıcaklığa bağlı POM görüntüleri de alınarak DSC sonuçları desteklenmiştir. DSC ve POM sonuçları beraber değerlendirildiğinde incelenen bu yapılarda faz geçiş sıcaklığının boya konsantrasyonuna bağlı olarak önemli bir değişim göstermediği tespit edilmiştir.

Saf ve boya katkılı PDSK kompozit yapılara yeterli bir elektrik alan uygulandığında sıvı kristal, boya ve polimerin kırılma indisleri eşleştiği için opak durumdan transparan bir duruma geçtikleri gözlenmiştir. Elde edilen bu yapıların cihaz tabanlı uygulamalar için uygun fonksiyonel malzemeler olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Tez çalışmasının tüm sonuçları beraber değerlendirildiğinde PDSK kompozit yapıya MR katkılanmasının dielektrik ve opto-elektronik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiği ve incelenen kompozit yapının performansını artırdığı görülmektedir. Çalışma sonuçları MR katkılı PDSK yapıların sıvı kristal temelli cihaz uygulamaları için uygun ve umut verici fonksiyonel malzemeler olabileceğini ve bu kompozitlerin teknolojik amaçlar için

düşük enerji gerektiren cihazlarda kullanılabileceğini göstermektedir.

Ülkemizde bu alanda yapılan çalışmalara bakıldığında boya katkılı PDSK kompozit yapıların özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmaya rastlanamamıştır. Yurtdışında bu alanda yapılan çalışmalara bakıldığında ise değişik özelliklerde katkı malzemeleri kullanılarak PDSK kompozit yapıların oluşturulduğu ve farklı özelliklerinin incelendiği çalışmaların olduğu belirlenmiştir. Fakat bu çalışmalarda kompozit yapıların bu denli kapsamlı bir araştırmasının yapılmadığı görülmüştür. Bu tez çalışması, kullanılan polimer, nematik sıvı kristal ve değişen MR boya konsantrasyonları ile ölçümü yapılan fiziksel parametreler açısından özgün bir çalışma niteliğindedir. Bu anlamda hem ulusal hem de uluslararası literatüre büyük katkı sağlayacağı ve yapılan yeni çalışmalara bir öngörü sağlayacağı da düşünülmektedir.

Bu çalışmanın da temelini oluşturan PDSK yapılar, sahip oldukları eşsiz özelliklerinden dolayı son yıllarda yurtdışındaki araştırmacılar tarafından ilgi odağı haline gelmiştir. Dolayısı bu tez çalışması ülkemizde bu konuda çalışacak olan araştırmacılara rehber niteliğinde olup, yeni bakış açıları geliştirmelerine yardımcı olacaktır. Bu manada; ilgili alanda yapılacak yeni çalışmalar için, tez kapsamında katkı malzemesi olarak seçilen MR boyanın farklı konsantrasyonlarının denenmesi, MR boya dışında farklı boyaların ya da nanoparçacıkların kullanılarak yeni PDSK kompozit yapıların oluşturulması ve bu yapıların özelliklerinin incelenmesi önerilebilir. Ayrıca PDSK kompozit yapının özelliklerinin UV kür süresine bağlı olarak değişimini inceleyen farklı kapsamlı çalışmalar da yapılabilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] M. S. Erel, “Bazı kloro ve amino antrakinin yapıları boyarmaddelerin y-h tipi sıvı kristal sistemlerde kullanılabilirliğinin araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye 2012.
- [2] N. Kaya, “Mavi - kırmızı boya ve karbon nanotüp katkıları nematik sıvı kristallerin karakterizasyonu ve uygulanabilirliğinin araştırılması,” Doktora tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.
- [3] Z. Ekici, “Sıvı kristaller, genel özellikleri, sıvı kristallerin sentezi ve uygulama alanları,” Yüksek lisans tezi, Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman, Türkiye, 2014.
- [4] Ş. Üstünel, “Sıvı kristal ikili karışımlarında halperin-lubensky-ma ölçeklenme fonksiyonunun çift kırıcılık ölçümleri ile test edilmesi,” Yüksek lisans tezi, Fizik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [5] C. J. Hsu, L. J. Lin, M. K. Huang, and C. Y. Huang, “Electro-optical Effect of Gold Nanoparticle Dispersed in Nematic Liquid Crystals,” *Crystals*, vol. 7, pp. 1-10, 2017.
- [6] A. S. Pandey, R. Dhar, S. Kumar, and R. Dabrowski, “Enhancement of the display parameters of 4'-pentyl-4-cyanobiphenyl due to the dispersion of functionalised gold nano particles,” *Liquid Crystals*, vol. 38, no. 1, pp. 115–120, 2011.
- [7] C. Wan, Y. Jiao, Q. Sun, J. Li, M. Science, and Z. Agricultural, “Properties of Silver Nanoparticles Embedded into Cellulose Aerogels,” *Polymer composites*, vol. 37, no. 4, pp. 1137–1142, 2016.
- [8] P. K. Tripathi, B. Joshi, and S. Singh, “Pristine and quantum dots dispersed nematic liquid crystal: Impact of dispersion and applied voltage on dielectric and electro-optical properties,” *Optical Materials*, vol. 69, pp. 61–66, 2017.
- [9] S. K. Gupta, D. P. Singh, P. Tripathi, S. Kumar, R. Manohar, and M. C. Varia, “Reduced ionic contaminations in CdSe quantum dot dispersed ferroelectric liquid crystal and its applications,” *Liquid Crystal*, vol. 41, no. 9, pp. 1356–1365, 2014.
- [10] M. J. Cho, H. G. Park, H. J. Jeong, J. W. Lee, Y. H. Jung, D. H. Kim, J. H. Kim, J. W. Lee and D. S. Seo, “Superior fast switching of liquid crystal devices using graphene quantum dots,” *Liquid Crystal*, vol. 41, no. 6, pp. 761–767, 2014.
- [11] W. K. Lee, S. J. Hwang, M. J. Cho, H. G. Park, J. W. Han, S. Song, J. H. Jang and D. S. Seo, “CIS–ZnS quantum dots for self-aligned liquid crystal molecules with superior electro-optic properties,” *Nanoscale*, vol. 5, no. 1, pp. 193–199, 2012.
- [12] N. Kaya, F. Akkurt, and A. Alicılar, “Alignment and reorientation in nematic liquid crystals doped with red dye and carbon nanotube,” *Fullerenes Nanotubes*

and Carbon Nanostructures, vol. 19, no. 4, pp. 262–270, 2011.

- [13] A. Alicilar, N. Kaya, and F. Akkurt, “Phase transitions and molecular orientation in nematic liquid crystals doped with blue-red dye mixtures and carbon nanotubes,” *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*, vol. 21, no. 3, pp. 258–272, 2013.
- [14] M. H. M. Ara, Z. Seidali, and S. H. Mousavi, “Electro-optical properties of dye-doped nematic liquid crystals,” *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 526, no. 1, pp. 130–138, 2010.
- [15] S. P. Yadav, K. K. Pandey, A. K. Misra, and R. Manohar, “Electro-optical behavior of dye doped nematic liquid crystal,” *Acta Physica Polonica A*, vol. 119, no. 6, pp. 824–828, 2011.
- [16] D. Jayoti, P. Malik, and A. Singh, “Analysis of morphological behaviour and electro-optical properties of silica nanoparticles doped polymer dispersed liquid crystal composites,” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 225, pp. 456–461, 2017.
- [17] Y. H. Fan, Y. H. Lin, H. Ren, S. Gauza, and S. T. Wu, “Fast-response and scattering-free polymer network liquid crystals for infrared light modulators,” *Applied Physics Letters*, vol. 84, no. 8, pp. 1233–1235, 2004.
- [18] L. W. May, “Polymer stabilized liquid crystals: topology-mediated electro-optical behavior and applications,” Ph.D. dissertation, Department of Chemical Physics, Kent State University, Ohio, USA, 2016.
- [19] S. H. Lee, T. K. Lim, S. T. Shin, and K. S. Park, “A method for improving contrast ratio of polymer dispersed liquid crystal film using the oriented azo-dye molecules in polymer matrix,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 41, no. 1, pp. 208–210, 2002.
- [20] F. Ahmad, M. Jamil, and Y. J. Jeon, “New developments in the dye-doped polymer dispersed liquid crystals gratings: A review,” *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, vol. 22, no. 8, pp. 659–668, 2017.
- [21] R. R. Deshmukh and A. Katariya Jain, “The complete morphological, electro-optical and dielectric study of dichroic dye-doped polymer-dispersed liquid crystal,” *Liquid Crystal*, vol. 41, no. 7, pp. 960–975, 2014.
- [22] P. Kumar, V. Sharma, C. Jaggi, P. Malik, and K. K. Raina, “Orientational control of liquid crystal molecules via carbon nanotubes and dichroic dye in polymer dispersed liquid crystal,” *Liquid Crystal*, vol. 44, no. 5, pp. 843–853, 2017.
- [23] M. Pande, P. K. Tripathi, A. K. Misra, S. Manohar, R. Manohar, and S. Singh, “Dielectric and electro-optical properties of polymer-stabilized liquid crystal system,” *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, vol. 122, no. 3, pp. 1–9, 2016.
- [24] Y. Kim, K. Kim, K. B. Kim, J. Y. Park, N. Lee, and Y. Seo, “Flexible polymer dispersed liquid crystal film with graphene transparent electrodes,” *Current Applied Physics*, vol. 16, no. 3, pp. 409–414, 2016.
- [25] C. H. Chan, T. Y. Wu, M. H. Yen, C. E. Lin, K. T. Cheng, and C. C. Chen, “Low power consumption and high-contrast light scattering based on polymer-dispersed liquid crystals doped with silver-coated polystyrene microspheres,” *Optics Express*, vol. 24, no. 26, pp. 29963–29971, 2016.

- [26] K. J. Yang, S. C. Lee, and B. D. Choi, "Dye-doped polymer dispersed liquid crystal films for flexible displays," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 49, pp. 1-5, 2010.
- [27] C. C. Hsu, Y. X. Chen, H. W. Li, and J. Hsu, "Low switching voltage ZnO quantum dots doped polymer-dispersed liquid crystal film," *Optics Express*, vol. 24, no. 7, pp. 7063-7068, 2016.
- [28] K. K. Raina, P. Kumar, and P. Malik, "Morphological control and polarization switching in polymer dispersed liquid crystal materials and devices," *Bulletin of Materials Science*, vol. 29, no. 6, pp. 599–603, 2006.
- [29] P. Kumar, V. Sharma, C. Jaggi, and K. K. Raina, "Dye-dependent studies on droplet pattern and electro-optic behaviour of polymer dispersed liquid crystal," *Liquid Crystal*, vol. 44, no. 4, pp. 757–767, 2017.
- [30] P. K. Tripathi, "Electrical and Optical Studies of Some Liquid Crystals," Ph.D. dissertation, Department of Physics, Lucknow University, Lucknow, UP, India, 2013.
- [31] 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.
- [32] O. Köysal, "Azo boya ve fulleren (C60) katkılı nematik sıvı kristallerin elektro-optik özelliklerinin incelenmesi," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2007.
- [33] L. G. Chen, "Thermo-Optical Properties of Polymer Dispersed Liquid Crystals," Ph.D. dissertation, Department of Applied Sciences, RMIT University, Melbourne, Australia, 2007.
- [34] R. Kempaiah, "Dielectric studies of liquid crystal nanocomposites and nanomaterial systems," M.S. thesis, Department of Chemistry and Biochemistry, University of Maryland, College Park, USA, 2016.
- [35] G. Kocakulah, "CdSeS/ZnS kuantum nokta katkılı 5CB nematik sıvı kristalinin elektro-optik ve dielektrik özelliklerinin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2018.
- [36] S. Mukherjee, "Electro-optic response of homeotropic, hole patterned, nematic liquid crystal cells under AC and DC voltage," Ph.D. dissertation, Department of Chemical Physics, Kent State University, Ohio, USA, 2016.
- [37] B. T. Mchem, "Synthesis and Characterisation of Liquid Crystal Gold Nanoparticles," Ph.D. dissertation, Department of Chemistry, University of Hull, East Riding of Yorkshire, England, 2013.
- [38] J. Zhou, "Study of anchoring behavior of nematic fluids at the interface of polymer-dispersed liquid crystals," Ph.D. dissertation, Department of Textile and Fiber Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2003.
- [39] J. Jiang, "Polymer dispersed liquid crystal droplets: Properties and applications," Ph.D. dissertation, Department of Chemical Physics, Kent State University, Ohio, USA, 2018.
- [40] P. Malik, "Study of phase separated polymer dispersed liquid crystal composite

- films,” Ph.D. dissertation, Department of Materials Science, Deemed University, Patiala, India, 2005.
- [41] M. S. Sunay, “Polimer-polimer ve polimer-metaloksit kompozit sistemlerde film oluşum davranışlarının incelenmesi,” Doktora Tezi, Fizik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.
 - [42] O. Hanaizumi, “Study on High- Performance PDLC Optical Devices,” M.S. thesis, Department of Electronic Engineering, Gunma University, Gunma, Japan, 2013.
 - [43] P. S. Drzaic, , *Liquid Crystal Dispersions*, 1th ed., Toh Tuck Link, Singapore :World Scientific, 1995.
 - [44] M. Silva, “Effect of surfactant on PDLC films with and without permanent memory effect,” M.S. thesis, Department of Chemistry, Universidade Nove de Lisboa, Lisbon, Portugal, 2013.
 - [45] A. Masutani, “Guest-host effect of dyes in polymer dispersed liquid crystals,” Ph.D. dissertation, Department of Physics, University of Durham, Durham, England, 2002.
 - [46] P. K. Chan, “Formation and performance of polymer dispersed liquid crystal films,” Ph.D. dissertation, Department of Chemical Engineering, McGill University, Montreal, Canada, 1997.
 - [47] A. Moheghi, “LC/Polymer composites, scattering properties and application in displays,” Ph.D. dissertation, Department of Chemical Physics, Kent State University, Ohio, USA, 2017.
 - [48] L. M. Ganesan, “Coupling of the electrical , mechanical and optical response in polymer / liquid-crystal composites,” Ph.D. dissertation, Department of Mathematics and Natural Sciences, University of Potsdam, Potsdam, Germany, 2010.
 - [49] M. Mucha, “Polymer as an important component of blends and composites with liquid crystals,” *Progress in Polymer Science*, vol. 28, no. 5, pp. 837–873, 2003.
 - [50] Y. J. Liu, Y. B. Zheng, J. Shi, H. Huang, T. R. Walker, and T. J. Huang, “Optically switchable gratings based on azo-dye-doped, polymer-dispersed liquid crystals,” *Optics Letters*, vol. 34, no. 15, pp. 2351–2353, 2009.
 - [51] V. Nimmy John, S. N. Varanakkottu, and S. Varghese, “Flexible, ferroelectric nanoparticle doped polymer dispersed liquid crystal devices for lower switching voltage and nanoenergy generation,” *Optical Materials*, vol. 80, pp. 233–240, 2018.
 - [52] P. Kumar and K. K. Raina, “Morphological and electro-optical responses of dichroic polymer dispersed liquid crystal films,” *Current Applied Physics*, vol. 7, no. 6, pp. 636–642, 2007.
 - [53] P. Malik and K. K. Raina, “Dichroic dye-dependent studies in guest-host polymer-dispersed liquid crystal films,” *Physica B Condensed Matter*, vol. 405, no. 1, pp. 161–166, 2010.
 - [54] Z. Shi, L. Shao, F. Wang, F. Deng, Y. Liu, and Y. Wang, “Fabrication of dye-doped polymer-dispersed liquid crystals with low driving voltage based on nucleophile-initiated thiol-ene click reaction,” *Liquid Crystal*, vol. 45, no. 4, pp.

579–585, 2017.

- [55] V. G. Chigrinov, “Dye, Liquid Crystals,” *Encyclopedia of Color Science and Technology*, vol. 183, no. 1, pp. 1-10, 2015.
- [56] F. Ahmad, M. Jamil, Y. J. Jeon, L. J. Woo, J. E. Jung, and J. E. Jang, “Investigation of nonionic diazo dye-doped polymer dispersed liquid crystal film,” *Bulletin of Materials Science*, vol. 35, no. 2, pp. 221–231, 2012.
- [57] A. Maleki, Z. Seidali, M. S. Zakerhamidi, and M. H. M. Ara, “Dichroic ratio and order parameters of some Sudan dyes doped in nematic liquid crystalline matrix,” *Optik*, vol. 126, no. 24, pp. 5473–5477, 2015.
- [58] F. Akkurt, “Dispers turuncu boya ve karbon nanopartikül katkılı nematik sıvı kristallerin karakterizasyonu ve uygulanabilirliğinin araştırılması,” Doktora tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2009.
- [59] S. K. Gupta, “Dielectric and electro-optical study of nanostructure doped liquid crystals,” Ph.D. dissertation, Department of Physics, Lucknow University, Lucknow, UP, India, 2014.
- [60] J. Mirzaei, “Optical and electro-optical properties of nematic liquid crystals with nanoparticle additives,” Ph.D. dissertation, Department of Chemistry, Manitoba University, Winnipeg, MB, Canada, 2015.
- [61] B. E. Pelleg, “Light Scattering in holographic polymer dispersed liquid crystals,” Ph.D. dissertation, Department of Electrical Engineering, Drexel University, Philadelphia, USA, 2014.
- [62] H. J. Shah, “Engineered interfaces for liquid crystal technology,” Ph.D. dissertation, Department of Electrical Engineering, Drexel University, Philadelphia, USA, 2007.
- [63] 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.
- [64] T. Ataseven, “Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) yapıların dielektrik özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fizik Bölümü, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2011.
- [65] N. Demirci, “K₂Pb₄Nb₁₀O₃₀ - Na₂Pb₄Nb₁₀O₃₀ - K₆W₄Nb₆O₃₀ bileşimlerinin morphotropik faz bölgesi civarında dielektrik ve ferroelektrik özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fizik Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2018.
- [66] İ. Yücedağ, “Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılarda elektrik ve dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi,” Doktora tezi, Endüstriyel Teknoloji Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.
- [67] S. Zengin, “Farklı montmorillonit kil numunelerinin dielektrik özellikleri üzerine nemin etkisi,” Yüksek lisans tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2007.
- [68] M. Yıldırım, A. Allı, G. Önsal, N. Gök, and O. Köysal, “Synthesis & chemical and dielectric characterization of poly (linoleic acid)-g-poly (dimethylaminoethyl

- methacrylate): A novel high- κ graft copolymer,” *Composite Part B*, vol. 117, pp. 43–48, 2017.
- [69] G. Kocakulah, G. Önsal, K. Goksen, İ. Ercan, and 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*, vol. 550, pp. 47-59, 2018.
 - [70] W. Kuang and S. O. Nelson, “Low-frequency dielectric properties of biological tissues:a review with some new insights,” *Transactions of the ASAE*, vol. 41, no. 1, pp. 173–184, 1998.
 - [71] D. Sean, “Phase behavior and electro-optics of dispersions of polymers and low molecular weight liquid crystal,” Ph.D. dissertation, Department of Physics, Kent State University, Ohio, USA, 1993.
 - [72] U. Maschke, X. Coqueret, and M. Benmouna, “Electro-optical properties of polymer-dispersed liquid crystals,” *Macromolecular Rapid Communications*, vol. 23, pp. 159–170, 2002.
 - [73] A. M. Donald, A. H. Windle, and S. Hanna, *Liquid crystalline polymers*, 2th ed., Berlin, Germany: Springer, 2015.
 - [74] E. Kemiklioğlu, “Polymer stabilized and dispersed blue phases,” Ph.D. dissertation, Department of Chemical Physics, Kent State University, Ohio, USA, 2014.
 - [75] V. Sharma, P. Kumar, A. Sharma, Chinky, and K. K. Raina, “Droplet configuration control with orange azo dichroic dye in polymer dispersed liquid crystal for advanced electro-optic characteristics,” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 233, pp. 122–130, 2017.
 - [76] P. Kumar, V. Sharma, and 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*, vol. 251, pp. 407–416, 2018.
 - [77] O. Köysal, M. Gökçen, and M. Yıldırım, “Ultraviolet light response of electrical and dielectric properties in zinc phthalocyanine and fullerene dispersed liquid crystal composites,” *Canadian Journal of Physics*, vol. 93, no. 10, pp. 1207–1212, 2015.
 - [78] A. Katariya Jain and R. R. Deshmukh, “Electro-optical and dielectric study of multi-walled carbon nanotube doped polymer dispersed liquid crystal films,” *Liquid Crystal*, vol. 1545264, pp. 1–12, 2018.
 - [79] P. Khushboo, M. Sharma, and K. K. Raina, “Electro-optic, dielectric and optical studies of NiFe₂O₄-ferroelectric liquid crystal: a soft magnetoelectric material,” *Liquid Crystal*, vol. 43, no. 11, pp. 1671–1681, 2016.
 - [80] Khushboo, P.Sharma, P. Malik, and K. K. Raina, “Dielectric and electro-optical studies of a nickel- ferrite-nanoparticle- doped ferroelectric liquid crystal mixture,” *Phase Transitions A Multinational Journal*, vol. 89, no. 2, pp. 144–154, 2016.
 - [81] M. O. Y. Gursel, B.F. Şenkal, N. Yılmaz Canlı, Z. Güven Özdemir, E. Ahlatcioğlu, and Ö. Yılmaz, “Addition of single-wall carbon nanotubes to a liquid crystal material: Impact on dielectric properties,” *Materials Science in*

Semiconductor Processing, vol. 34, pp. 182–188, 2015.

- [82] D. P. Shcherbinin and E. A. Konshina, “Ionic impurities in nematic liquid crystal doped with quantum dots CdSe/ZnS,” *Liquid Crystal*, vol. 44, no. 4, pp. 648–655, 2016.
- [83] G. Pathak, K. Agrahari, G. Yadav, A. Srivastava, O. Strzezysz, and · Rajiv Manohar, “Tuning of birefringence, response time, and dielectric anisotropy by the dispersion of fluorescent dye into the nematic liquid crystal,” *Applied Physics A*, vol. 124, no. 463, pp. 1–9, 2018.
- [84] G. Pathak, S. Pandey, R. Katiyar, A. Srivastava, R. Dabrowski, K. Garba, and R. Manohar, “Analysis of photoluminescence, UV absorbance, optical band gap and threshold voltage of TiO₂ nanoparticles dispersed in high birefringence nematic liquid crystal towards its application in display and photovoltaic devices,” *Journal of Luminescence*, vol. 192, pp. 33–39, 2017.
- [85] P. Durmuş and M. Yıldırım, “Influence of interfacial layer thickness on frequency dependent dielectric properties and electrical conductivity in Al/Bi₄Ti₃O₁₂/p-Si structures,” *Journal of Vacuum Science & Technology A*, vol. 32, p. 061512, 2014.
- [86] E. Ouskova, J. Vapaavuori, and M. Kaivola, “Self-orienting liquid crystal doped with polymer-azo-dye complex,” *Optical Materials Express*, vol. 1, no. 8, pp. 1463–1470, 2011.
- [87] P. Kumar, Neeraj, S. W. Kang, S. H. Lee, and K. K. Raina, “Analysis of dichroic dye-doped polymer-dispersed liquid crystal materials for display devices,” *Thin Solid Films*, vol. 520, no. 1, pp. 457–463, 2011.
- [88] R. R. Deshmukh and M. K. Malik, “Effect of dichroic dye on phase separation kinetics and electro-optical characteristics of polymer dispersed liquid crystals,” *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 74, no. 2, pp. 215–224, 2013.
- [89] P. Kumar, V. Sharma, Chinky, D. Jayoti, K. K. Raina, and P. Malik, “Impact of dye on the switching responses of polymer dispersed ferroelectric liquid crystal,” *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 647, no. 1, pp. 385–394, 2017.
- [90] A. Fuh and O. Caporaletti, “Polymer dispersed nematic liquid crystal films: The density ratio and polymer’s curing rate effects,” *Journal of Applied Physics*, vol. 66, no. 11, pp. 5278–5284, 1989.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Gülnur ÖNSAL
Doğum Tarihi ve Yeri : 08/10/1988 Antalya
Yabancı Dili : İngilizce, Almanca
E-posta : gulnuronsal@duzce.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Fizik	Düzce Üniversitesi	2019
Y. Lisans	Fizik Öğretmenliği	Gazi Üniversitesi	2016
Lisans	Fizik Öğretmenliği	Hacettepe Üniversitesi	2012
Lise		Çağrı Bey Anadolu Lisesi	2006

YAYINLAR

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. **Önsal, G.**, Kocakulah, G., Kahyaoğlu, A., Köysal, O. (2019). Influence of azo dye concentration on dielectric response in polymer dispersed liquid crystal composites. *Journal of Molecular Liquids*, 284, 607-615.
2. Kocakulah G., **Önsal, G.**, Köysal, O. (2019). Electro-optical and dielectric performance analysis: The influence of azo dye on Polymer/LC composite structures. *Applied Physics A*, 125 (30), 1-8.
3. Kocakulah G., **Önsal G.**, Gökşen, K., Ercan, İ., Köysal, O. (2018). 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*, 550, 47-59.
4. Yıldırım M., Allı A., **Önsal G.**, Gök N., Köysal O. (2017). Synthesis chemical and dielectric characterization of poly (linoleic acid)-g-poly (dimethylaminoethyl

methacrylate): A novel high- κ graft copolymer. *Composites Part B: Engineering*, 117, 43-48.

5. Yıldırım M., Köysal O., **Önsal G.**, Gümüş E. (2016). Effect of iron phthalocyanine FePc concentration on electrical and dielectric properties of the nematic liquid crystal composites. *Journal of Molecular Liquids*, 223, 868-872.
6. Köysal O., Kocakulah G., Yıldırım M., **Önsal G.**, Tüzün Özmen Ö. (2018). Dielectric and performance analysis of cdte quantum dots doped nematic liquid crystal. *Düzce University Journal of Science & Technology*, 6, 254-262.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan

bildiriler:

1. **Önsal G.**, Kocakulah G., Köysal O. Investigation of electro-optical properties of quantum dots doped PDLC composite structure under DC electric field. *International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology*, 22-23 Kasım 2018.
2. Kocakulah G., **Önsal G.**, Köysal O. Investigation of ultraviolet irradiation effect on dielectric properties of phthalocyanine and quantum dot doped nematic liquid crystal composite structures. *International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology*, 22-23 Kasım 2018.
3. **Önsal G.**, Kocakulah G., Köysal O. The role of intermolecular charge transfer on dielectric properties in Cobalt (II) Phthalocyanine and semiconductor quantum dots doped nematic liquid crystal. *Turkish Physical Society 34nd International Physics Congress*, 5-9 Eylül 2018.
4. **Önsal G.**, Kocakulah G., Köysal O. Dielectric investigation of quantum dots doped PMMA/LC composite structure. *Turkish Physical Society 34nd International Physics Congress*, 5-9 Eylül 2018.
5. Kocakulah G., **Önsal G.**, Köysal O. Effect of azo dye on dielectric behaviours of polymer-dispersed liquid crystal. *Turkish Physical Society 34nd International Physics Congress*, 5-9 Eylül 2018.
6. Kocakulah G., **Önsal G.**, Köysal O. UV illumination effect on dielectric characteristic of CDSes/ZnS semiconductor quantum dots doped 4-pentyl-4'-cyanobiphenyl nematic liquid crystals. *Turkish Physical Society 34nd International Physics Congress*, 5-9 Eylül 2018.
7. **Önsal G.**, Güneş, B. Determining Misconceptions about Special Relative Theory by Using a Four-Tire Test. *Groupe International de Recherche sur l'Enseignement de la Physique-Multimedia in Physics Teaching and Learning (GIREP-MPTL) Conference*, 9-13 Temmuz 2018.
8. Aykaç, B., **Önsal G.**, Güneş, B. Investigating possible reasons behind the high school students' attitudes about physics course. *Groupe International de*

Recherche sur l'Enseignement de la Physique-Multimedia in Physics Teaching and Learning (GIREP-MPTL) Conference, 9-13 Temmuz 2018.

9. Yıldırım, M., Kocakulah, G., **Önsal G.**, Köysal, O. Effects of semiconductor quantum dots on the dielectric properties of 4-pentyl-4'-cyanobiphenyl liquid crystalline medium. *4th International Conference on Materials Science and Nanotechnology for Next Generation*, 28-30 Haziran 2017.
10. Şahin, E., Aygün, M., Önder Çelikkanlı, N., Kızımcık, H. Ş., Taşkın, T. Damalı, V. Türk, O., **Önsal, G.**, Güneş, B. Misconceptions about frictional force between solid surfaces. *Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress*. 6-9 Eylül 2016.
11. Kartal, Y. E., Su, M. Türk, O, **Aktaş, G.**, Şahin, E. Fizik öğretmen adaylarının deney tasarlayabilmelerine katkı sağlamaya yönelik bir uygulama. *Turkish Physical Society 30nd International Physics Congress*, 2-5 Eylül 2013.

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Bülbül, M. Ş., **Aktaş, G.** (2013). Fizik dersleri için bağlam temelli drama uygulamaları. *Eğitim ve Öğretim Araştırmaları Dergisi*, 2 (1), 381-389.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

1. Kanlı, U., Kartal, Y. E., **Aktaş, G.**, Küçükay, S. Işık ve gölge kavramları hakkında fen ve fizik öğretmen adaylarının kavramsal anlamaları üzerine kesitsel bir araştırma. *1. Ulusal Fizik Eğitimi Kongresi*. 12-14 Eylül 2013.