

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Mehriban EMEK

**FAZ DÖNÜŞÜMLERİNİN NEMATİK SIVI KRİSTALLERİN
ELEKTROOPTİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA, 2007

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FAZ DÖNÜŞÜMLERİNİN NEMATİK SIVI
KRİSTALLERİN ELEKTRO-OPTİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Mehriban EMEK

DOKTORA TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

**Bu tez 20/03/2007 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği İle
Kabul Edilmiştir.**

İmza

İmza

İmza

Prof.Dr.EmirullahMEHMETOV Doç.Dr.SüleymanYILMAZ Prof.Dr.RamazanESEN

DANIŞMAN

II DANIŞMAN

ÜYE

İmza

İmza

Prof.Dr. Metin Özdemir

Yrd.Doç.Dr. Sami Arıca

ÜYE

ÜYE

Bu tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No:

Prof. Dr. Aziz ERTUNÇ

Enstitü Müdürü

İmza ve Mühür

Bu Çalışma Ç.Ü. Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Fonu Tarafından
Desteklenmiştir.

Proje No: FEF 2004 D6

- **Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

DOKTORA TEZİ

FAZ DÖNÜŞÜMLERİNİN NEMATİK SIVI KRİSTALLERİN ELEKTROOPTİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Mehriban EMEK

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Emirullah MEHMETOV
Yıl: 2007, Sayfa: 161.
Jüri: Prof. Dr. Emirullah MEHMETOV
Doç. Dr. Süleyman YILMAZ
Prof. Dr. Ramazan ESEN
Prof. Dr. Metin OZDEMİR
Yrd. Doç. Dr. Sami ARICA

Bu çalışmada nematik sıvı kristallerde (NSK) optik geçirgenlik; sabit elektrik alanda (DC) elektrooptik efekt; 50 Hz frekanstaki elektrik alanda (AC) elektrooptik efekt incelenmiştir. Çalışmalar NSK'lerin faz geçişlerini içine alan sıcaklık aralığında yapılmıştır.

Öncelikle polarizasyon mikroskopunda sıvı kristal malzemelerin faz dönüşümlerinin gerçekleştiği sıcaklık aralığında görüntüler elde edilmiş, faz dönüşümlerinin gerçekleştiği domain yapılarının oluşumu ve yok edilmesi görüntülenmiştir. Optik yöntemlerle faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklık bölgesinde sıvı kristal malzemelerin optik özellikleri (optik geçirgenlik) incelenmiştir. Bu bölgelerde optik geçirgenliğin önce azaldığı ve sıvı kristallerin nematik fazdan izotropik faza geçtikten sonra saydam hale geldiği görülmüştür. Aynı zamanda sıvı kristallerde elektrooptik efekt incelenmiştir. Sıvı kristallere elektrik alan (DC/AC) uygulandığı zaman, nematik fazdan izotropik faza geçişin farklı sıcaklık aralığında gerçekleştiği ve bu sıcaklık aralığında sıvı kristallerin farklı özellikler sergilediği gözlenmiştir.

Nematik fazdan izotropik faza geçiş başladığı zaman uygulanan elektrik alanın büyüklüğüne göre sistemin optik geçirgenliğinin önce arttığı sonra ise sıcaklığın artışı ile optik geçirgenliğin sıfıra kadar azaldığı görülmüştür. İzotropik faza tam geçtikten sonra sistem yeniden saydam hale gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nematik sıvı kristaller, optik geçirgenlik, elektrooptik efekt, faz geçişleri.

ABSTRACT

PhD THESIS

INFLUENCE OF PHASE TRANSITIONS ON THE ELECTROOPTIC PROPERTIES OF NEMATIC LIQUID CRYSTALS

Mehriban EMEK

**DEPARTMENT OF PHYSICS
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF CUKUROVA**

Supervisor: Prof. Dr. Emirullah MEHMETOV
Year: 2007, Pages: 161.
Jury: Prof. Dr. Emirullah MEHMETOV
Assos. Prof. Suleyman YILMAZ
Prof. Dr. Ramazan ESEN
Prof. Dr. Metin OZDEMIR
Asist. Prof. Dr. Sami ARICA

The objectives of this thesis are, first, to study correlation between the structure and phase transition of some nematic liquid crystals by using optical and electrooptical methods, and second to analyze phase transition between nematic and isotropic phases.

First of all we studied in detail optical anisotropic properties of three nematic liquid crystals: 4'-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile, 4'-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile, 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate by using polarizing microscope. We determined the domain structures in nematic phase of 4'-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile, 4'-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile, 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate liquid crystals and influence of temperature (T) to domain structure.

Then we determined the optical transmission for 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate liquid crystal with and without electric field (AC & DC) and observed anomalies of the optical transmission in the region of nematic-isotropic phase transition.

KeyWords: Nematic liquid crystals, optical transmission, electrooptic effect, phase transitions

TEŞEKKÜR

Bu tezin konusunu veren ve bana akademik çalışma yapmak için bütün imkanları sağlayan, sadece bilimsel çalışmalarımda değil, hayatımın bütün alanlarında kelimenin tam anlamıyla “danışmanım” olan, değerli hocam, Prof.Dr. Emirullah MEHMETOV’a;

Laboratuvar çalışmalarımda eşsiz yardımlarından dolayı sayın hocam Doç.Dr.Süleyman YILMAZ’a;

Maddi, manevi desteğini benden esirgemeyen ve her zaman yanımda olan, hayattaki en büyük destekçim, değerli eşim Mustafa Latif EMEK’e teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER	SAYFA
ÖZ.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Sıvı Kristallerin Tarihçesi.....	1
1.2 Sıvı Kristaller.....	2
1.2.1 Liyotropik, Polimerik ve Termotropik Sıvı kristaller.....	3
1.2.1.1 Liyotropik Sıvı Kristaller.....	4
1.2.1.2 Polimerik Sıvı Kristaller.....	5
1.2.1.3 Termotropik Sıvı Kristaller: Nematikler, Kolesterikler ve Smektikler.....	7
1.2.1.3.(1). Nematik Fazlar.....	7
1.2.1.3.(2). Kolesterik Fazlar.....	9
1.2.1.3.(3). Smektik Fazlar.....	11
1.2.2 Karışımlar (Mixtures) ve Bileşimler (Composites).....	14
1.2.2.1 Karışımlar (Mixtures).....	15
1.2.2.2 Boyanmış (Dye-Doped) Sıvı Kristaller.....	18
1.2.2.3 Polimer-Yayılmış(Polimer-Dispersed)Sıvı Kristaller.....	19
1.3 Sıvı Kristallerin Kimyasal Özellikleri.....	20
1.4 Nematik Sıvı Kristallerin Fiziksel Özellikleri	21
1.4.1 Nematik Sıvı Kristallerin Yapısal Özellikleri.....	21
1.4.1.1 Nematik Düzen Parametresi.....	21
1.4.1.2 Yöne Bağlı Niceliklerin İfade Edilmesi.....	24
1.4.1.3 Asal Eksen Koordinat Sistemi.....	24
1.4.1.4 Laboratuar Koordinat Sistemi.....	25
1.4.1.5 Anizotropi.....	26

1.4.1.6 Tek Eksenli ve İki Eksenli Sistemler.....	27
1.4.1.7 Sıvı Kristal Dizilimleri (Yönelimleri).....	27
1.4.2 Dielektrik Özellikler.....	28
1.4.2.1 Dielektrik Anizotropi.....	28
1.4.2.2 Kapasitans ve Direnç.....	29
1.4.3 Optik Özellikler.....	31
1.4.3.1 Çift Kırılma.....	31
1.4.3.2 Konoskopik Gözlem ve Çift Kırılmanın İşareti	34
1.4.4 Diamanyetik Özellikler.....	34
1.4.4.1 Manyetik Alana Karşılık Elektrik Alanı.....	34
1.4.4.2 Hacimsel Duygunluk.....	35
1.4.5 Elastik Özellikler.....	35
1.4.5.1 Yönlendirici deformasyonları: bükülme, yayılma ve burulma deformasyonu.....	36
1.4.5.2 Süreklilik Teorisi.....	37
1.4.6 Viskozite Özellikleri.....	38
1.4.6.1 Miesowicz Katsayıları.....	39
1.4.6.2 Leslie Katsayıları.....	41
1.4.7 Elektriksel İletkenlik.....	41
1.4.8 Termal İletkenlik.....	42
1.4.8.1 Kararlı Durum Yöntemi.....	43
1.5 Nematik Sıvı Kristallerde Elektrooptik Efeetler.....	44
1.5.1 Dinamik Saçılma (Dynamic Scattering).....	44
1.5.2 Konuk-Ev Sahibi Efeeti (Guest-Host Effect).....	45
1.5.3 Alanla İndüklenmiş Nematik-Kolesterik Faz Geçişİ (Field Induced Nematic-Cholesteric Phase Change).....	46
1.5.4 Mikron-Ölçekli Damlacıklardan Işık Saçılması (Light Scattering by Micron-Sized Droplets).....	47
1.5.5 Burkulmuş Nematik Efeet (Twisted Nematic Effect).....	48
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	51
3. MATERYAL VE METOD.....	81

3.1 Materyal.....	81
3.1.1 Araçlar.....	81
3.1.1.1 Polarizasyon Mikroskobu.....	81
3.1.1.2 Lazer.....	82
3.1.1.3 Mekanik Modülatör (Chopper).....	82
3.1.1.4 Polarizör ve Analyzör (Polaryzer and Analyzer)	84
3.1.1.5 Numune Tutucu (Sample holder).....	84
3.1.1.6 Foto-algılayıcı (Photoreceiver).....	86
3.1.1.7 Lock-in Amplifier.....	87
3.1.1.8 Thermostat (Thermostate).....	87
3.1.1.9 Güç Kaynağı (Power Supply).....	88
3.1.2 Malzeme veya Numunelerin Hazırlanması.....	88
3.1.2.1 ITO Lameller.....	88
3.1.2.2 Sıvı Kristal Numunelerin Hazırlanması.....	88
3.2 Metod.....	92
3.2.1 Deney Düzeneği.....	92
3.2.1.1 Devre.....	92
3.2.1.2 Lock-in Amplifier.....	94
3.2.1.2.(1). Bilgisayara Tanıtılması.....	94
3.2.1.2.(2). RS232 İçin Gerekli Kablo Adaptörü	94
3.2.1.2.(3). Veri Alış-verişi ve Hızı İçin	
Gereken Ayarlar.....	95
3.2.1.2.(4). LabVIEW Programları.....	96
3.2.1.2.(5). RS232 Portunun LabVIEW	
Programına Uyarlanması.....	96
3.2.1.2.(6). Labview Programı ve Kullanılması..	97
3.2.1.2.(7). Sinyal Ölçümünün Yapılması.....	100
3.2.1.2.(8). SR530 VISA Serialin LabWIEW	
ile İlişkilendirilmesi.....	103
4.BULGULAR VE TARTIŞMA.....	105
4.1 4'-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile	105

4.1.1. Optik Geçirgenlik.....	105
4.2 4'-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile	111
4.2.1. Optik Geçirgenlik.....	111
4.3 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[..]octane-1-carboxylate	116
4.3.1 Optik Geçirgenlik.....	116
4.3.2 Sabit Elektrik Alanda (DC) Elektrooptik Efekt.....	121
4.3.3 Değişken Elektrik Alanda (AC) Elektrooptik Efekt.....	139
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	156
KAYNAKLAR.....	158
ÖZGEÇMİŞ.....	162

ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 2.1.	Şekil 2.8'deki grafikten elde edilen d değerleri.....	60
Çizelge 2.2.	Şekil 2.8'deki grafikte kullanılan sembollerin anlamları.....	61
Çizelge 2.3.	Çalışmada kullanılan kolloidlerin karakteristiği.....	73
Çizelge 3.1.	SW2: RS232 Mode Düğmeleri.....	95
Çizelge 4.1.	NSK malzemeye uygulanan sabit, dış elektrik alan (DC) arttıkça T_1 , T_2 , T_3 ve T_4 sıcaklık değerlerindeki değişimi gösteren çizelge.....	139
Çizelge 4.2.	NSK malzemeye uygulanan sabit, dış elektrik alan (DC) arttıkça nematik-izotropik faz geçiş sıcaklık değerindeki değişimi gösteren çizelge.....	139
Çizelge 4.3.	NSK malzemeye uygulanan değişen, dış elektrik alan (AC) arttıkça, T_1 , T_2 , T_3 ve T_4 sıcaklık değerlerindeki değişimi gösteren çizelge.....	153
Çizelge 4.4.	NSK malzemeye uygulanan değişen, dış elektrik alan (AC) arttıkça, nematik-izotropik faz geçiş sıcaklık değerindeki değişimi gösteren çizelge.....	153

ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 1.1.	Katı, Sıvı Kristal ve Sıvının Molekül Yönelimi	3
Şekil 1.2.	Katı ve İzotropik Sıvı Faz Arasındaki Sıvı Kristal Mezofazlar	3
Şekil 1.3.	Sabunların <i>Lamellar</i> veya <i>neat</i> fazı (Chandrasekhar, 1992)	4
Şekil 1.4.	Sabunların <i>Heksagonal</i> veya <i>orta</i> fazı (Chandrasekhar, 1992)	5
Şekil 1.5.	Polimerik sıvı kristalleri üç farklı türü: a) Vinil tür; b) Kevlar polimeri; c) Polipeptit zinciri (Khoo, 1995)	6
Şekil 1.6.	Polimerik sıvı kristaller: a) ana-zincir; b) yan-zincir (Chandrasekhar, 1992).....	6
Şekil 1.7.	Sıvı Kristal Fazları	7
Şekil 1.8.	Nematik Sıvı Kristal	8
Şekil 1.9.	Nematik fazın şematik gösterimi ve nematik sıvı kristalin fotoğrafı	8
Şekil 1.10.	Kolesterik sıvı kristal: helikal yapının şematik gösterimi	9
Şekil 1.11.	DNA Molekülü.....	11
Şekil 1.12.	Smektik Sıvı Kristal.....	11
Şekil 1.13.	Smektik-A fazının; a) molekül dizilimi, b) polarizasyon mikroskobu kullanılarak çekilmiş fotoğrafları.....	12
Şekil 1.14.	Smektik-C fazının; a) molekül dizilimi, b) polarizasyon mikroskobu kullanılarak çekilmiş fotoğrafları	12
Şekil 1.15.	Solda smektik-C* fazının şematik gösterimi, sağda ise aynı fazın eksen üzerindeki görüntüsü verilmiştir	13
Şekil 1.16.	Nematik diskotik ve sütunumsu diskotik faz (Klysubun, 2002)	14
Şekil 1.17.	Sütunumsu sıvı kristaller	14
Şekil 1.18.	İkili ötektik karışımın faz diyagramı. Optimal yoğunlukta en düşük erime sıcaklığı elde edilmiştir (Khoo, 1993)	16
Şekil 1.19.	E7 (EM kimyasallarından) sıvı kristalini oluşturan dört bileşimin moleküler yapıları (Khoo, 1995)	17
Şekil 1.20.	Dikroik <i>boyanmış nematik sıvı kristal</i> : a) Elektrik alan uygulanmadan önce; b) Elektrik alan uygulandıktan sonra (Khoo,1995)	18

Şekil 1.21.	Polimer yayılmış sıvı kristal malzemenin şematik gösterimi; a) dış alanın yokluğunda, yüksek saçılma durumu; b) dış alanın varlığında, şeffaf durumda (Khoo, 1995)	19
Şekil 1.22.	Düzen parametresini tanımlamak için kullanılan geometri	22
Şekil 1.23.	Termotropik sıvı kristallerde nematik düzen parametresinin, S, sıcaklığın, T, fonksiyonu olarak gösterimi. (Kumar, 2001)	22
Şekil 1.24.	Asal eksen ve laboratuvar koordinat sistemi. Malzemenin asal eksen sistemi x eksenini etrafında θ açısı kadar döndürülmüştür, dolayısıyla z ve n paraleldir. (Kumar, 2001)	26
Şekil 1.25.	Homeotropik ve homojen dizilim (Klysubun, 2002)	27
Şekil 1.26.	Sıvı kristaller için dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi. (Kumar, 2001)	28
Şekil 1.27.	Nematik yönlendirici (mavi çizgiler) ve ışık demetinin farklı polarizasyonları (oklar)	31
Şekil 1.28.	Çift kırılmalı malzeme boyunca ilerleyen ışık polarizasyona bağlı olarak bu iki yoldan birini takip edecektir	32
Şekil 1.29.	a)Denge konfigürasyonu; b)Bükülme deformasyonu; c)Yayılma deformasyonu; d)Burulma deformasyonu (Lueder, 2003)	36
Şekil 1.30.	η_1 (a), η_2 (b), η_3 (c) Miesowicz katsayıları için yönlendirici ve hızın yönlerini gösteren geometri. Üstteki levha y-eksenine paralel şekilde hareket ederken hız gradiyenti z-eksenine paraleldir, y-z ise makaslama düzlemidir. (Kumar, 2001)	39
Şekil 1.31.	Yönlendiricinin akımın yönü, v ile θ açısı; hız gradiyenti ile ise ϕ açısı oluşturduğu genel bir durum. Bu durumda v , y-eksenine paraleldir ve hız gradiyenti z-ekseni yönündedir. (Kumar, 2001)... ..	39
Şekil 1.32.	Konuk-ev sahibi sıvı kristal sistemlerde ışığın elektrooptik modülasyonu (a) Alanın kapalı olduğu; (b) Alanın açık olduğu durum (Khoo, 1993)	45
Şekil 1.33.	Elektrik alanla indüklenmiş kolesterik-nematik faz geçişi (Khoo, 1993).....	46

Şekil 1.34.	Çiftlenmiş nematik aygıt geometrisi. Direktör (yönlendirici) ile paralel yönelmiş polarize edici ve analiz edici birbirilerine diktirler	48
Şekil 2.1.	Deney düzeneği: L1, 15 cm'lik dışbükey lens; C, nematik sıvı kristal hücre; S, ekran; E _a , uygulanan elektrik alanı; β _e , gelme açısı	51
Şekil 2.2.	(a) 0 V/cm; (b) 200 V/cm; (c) 300 V/cm; (d) 350 V/cm elektrik alanları uygulandığında oluşan kırınım desenleri	52
Şekil 2.3.	E _{uyg.} =325 V/cm elektrik alanında nematik sıvı kristal (NSK) filminin bal-peteğimsi domenleri	53
Şekil 2.4.	Uygulanan elektrik alanının (E _{uyg.}) fonksiyonu olarak geçen ışık şiddeti	53
Şekil 2.5.	Burkulmuş nematik yapının geçirgenliğinin (teorik) $2qu/p$ 'nin ($=2dDn/l$) fonksiyonu olarak grafiği	55
Şekil 2.6.	Biphenyl ötektik karışımı (—) ve 4-cyano-4'-n-pentyl biphenyl (---) için kırılma indisi verileri	56
Şekil 2.7.	d=9 µm kalınlığında ve θ=60° ve 90° burkulma açısına sahip hücreler için geçirgenlik eğrileri	57
Şekil 2.8.	Geçirgenlik eğrilerinin maksimum ve minimumlarından m'in fonksiyonu olarak Δn/λ'nın deneysel değerlerinin değişimi	58
Şekil 2.9.	Geçirgenlik maksimumlarının m'in fonksiyonu olarak deneysel değerleri	59
Şekil 2.10.	Burkulmuş ve homeotropik durumlarda geçirgenlik ve burkulma açısının, θ, fonksiyonu olarak aydınlatılmış ve karanlık bölge geçirgenlik oranı	61
Şekil 2.11.	Sıvı kristal hücrenin yandan ve üstten şematik olarak gösterimi	63
Şekil 2.12.	(a) $U \leq U_T$ ve (b) $U = 2U_T$ uygulanan alanlarda burkulmuş nematik yönlendirici yapılandırılması	63
Şekil 2.13.	SK hücre için optik platform	65
Şekil 2.14.	(a)Paralel; (b)Dik polarizörler kullanılarak SK hücreden geçen ışık şiddeti. Sürekli eğri deneysel sonuçları, kesikli eğri düzeltmenin	

	olmadığı modelin, çizgiler ise düzeltmenin olduğu modelin sonuçlarını göstermektedir	65
Şekil 2.15.	(1)Yansıma aynası; (2)Gaz tüpü; (3)Polarize edici Brewster penceresi; (4)Ayna; (5)Burkulmuş nematik sıvı kristal; modülatör; (6)AC voltaj sağlayıcı; (7)Analizör; (8)HgCdTe detektörü ve (9)Dijital osiloskop	67
Şekil 2.16.	(a)NSK yönlendirici ve polarizasyon vektörlerinin geometrisi; (b)SK hücre içerisinde moleküler burkulmanın çizimi: moleküler yönlendirici 4d adım uzunluğunda helis çizmektedir	68
Şekil 2.17.	Sürüş (rms) voltaja karşılık ışık geçirgenliği. Geçen ışık şiddeti, modülatör üzerine düşen ışık şiddetine göre normalize edilmiştir	69
Şekil 2.18.	Elektrik alanın varlığında ve yokluğunda aygıtın zamana bağlı davranışı	70
Şekil 2.19.	Çift-katlı burkulmuş nematik sıvı kristal aygıtının çizimi. Her bir katman için burkulma açısı 45° 'dir	71
Şekil 2.20.	E7 ve E7-[ST-ZL] silisyum parçacıkları karışımının yakın kızılötesi bölgesinde dalga boyunun fonksiyonu olarak grafiği (— saf E7,---- %1.3 ST-ZL,.... %3.8 ST-ZL,----- %6 ST-ZL)	73
Şekil 2.21.	(a)E7 ve % 1.3 oranında ST-ZL koloid karışımının 47 μm kalınlığında hücresi için dalga boyunun fonksiyonu olarak geçen ışık şiddeti. Üstteki eğri: hücreye 47 V uygulandığında; alttaki eğri: 0 V uygulandığında. (b)E7 ve % 1 oranında AMT-130 S koloid karışımının 47 μm kalınlığında hücresi için dalga boyunun fonksiyonu olarak geçen ışık şiddeti. Üstteki eğri: hücreye 48 V uygulandığında; alttaki eğri: 0 V uygulandığında	74
Şekil 2.22.	(a) $E=0$; (b) $E=0.03 \text{ V}/\mu\text{m}$ ve (c) $E=0.15 \text{ V}/\mu\text{m}$ alanlarda P ve A çapraz polarizörler arasındaki sıkı paketli hekzagonal tek katmanın fotomikrografları	76
Şekil 2.23.	Geçen ışık şiddetinin zamana bağımlılığı ve damla ekseninin yönelimi. Oklar kare dalga voltaj sinyalinin (A) $0.12 \text{ V}/\mu\text{m}$, (B)	

	0.056 V/ μ m, (C) 0.041 V/ μ m ve (D) 0.026 V/ μ m değerlerinde kapatıldığı zamanı göstermektedir	76
Şekil 2.24.	Farklı oranlarda dendrimer içeren dendrimer/E7 karışımları ile doldurulmuş 17.7 μ m kalınlığında paralel elektrooptik hücreye uygulanan 1 kHz kare dalga AC voltajının fonksiyonu olarak geçirgenliğin grafiği: (---) 5/95; (--) 10/90; (---) 20/80 dendrimer/SK. Referans olarak 7 μ m'lik PDLC hücresinin T-V karakteristiği de verilmiştir (–)	78
Şekil 2.25.	0 % ile 100 % oranları arasında değişen poly(propylene imine) değişik dendrimer miktarları için dendrimer/E7 karışımının DSC ısıtma taramaları	79
Şekil 3.1.	Polarizasyon mikroskobu ve bölümleri	80
Şekil 3.2.	Mikroskop altında incelenen malzemenin görüntüsünün kamerayla bilgisayara aktarılması	81
Şekil 3.3.	Mekanik modülatör	81
Şekil 3.4.	Mekanik modülatör denetleyicisi	82
Şekil 3.5.	Mekanik modülatörün pervane kanatları	82
Şekil 3.6.	Mekanik modülatör ile yapılan tek demet deneyinin şematik gösterimi	83
Şekil 3.7.	Numune tutucunun kapalı durumda şematik görüntüsü	84
Şekil 3.8.	Numune tutucunun açık durumda şematik görüntüsü	84
Şekil 3.9.	Foto-algılayıcı	85
Şekil 3.10.	Polarizör, numune tutucu, analizör ve foto-algılayıcı	85
Şekil 3.11.	SR510/530 Lock-in Amplifier	86
Şekil 3.12.	Termostat	86
Şekil 3.13.	Sıvı kristal numune ve elektrik alanın örneğe uygulanmasının şematik gösterimi	88
Şekil 3.14.	4'-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile	89
Şekil 3.15.	4'-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzemenin faz geçiş sıcaklıklar	89

Şekil 3.16.	4'-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile	89
Şekil 3.17.	4'-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzemenin faz geçiş sıcaklıkları	89
Şekil 3.18.	4-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate	90
Şekil 3.19.	4-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin faz geçiş sıcaklıkları	90
Şekil 3.20.	Deney düzeneğinin devre şeması: Isıtma ve sıcaklık kontrol devresi, Elektrik alan devresi ve Optik ölçüm devresi (üç bağımsız devre)	91
Şekil 3.21.	Deney düzeneğinin fotoğrafı (Harran Üniversitesi, Fizik Bölümü)	92
Şekil 3.22.	Sıvı Kristaller Laboratuvarı (Harran Üniversitesi, Fizik Bölümü) ...	92
Şekil 3.23.	Lock-in Amplifier ve Bilgisayar arasındaki bağlantıyı sağlamak için uyumlu adaptörün hazırlanmasında gereken elektronik eşleştirme	94
Şekil 3.24.	LabVIEW programı başlama sayfası	96
Şekil 3.25.	LabVIEW programında Lock-in Amplifier'in sanal ön paneli(1) ...	97
Şekil 3.26.	LabVIEW programında Lock-in Amplifier'in sanal ön paneli(2) ...	98
Şekil 3.27.	Sinyal ölçümünün yapılması için gereken ilk adım	99
Şekil 3.28.	Sinyal ölçümünün yapılması için ikinci adım	100
Şekil 3.29.	Sinyal ölçümü başladıktan sonraki pencere ekranı	100
Şekil 3.30.	Sinyal ölçümü tamamlandıktan sonraki pencere ekranı	101
Şekil 3.31.	Veriler alındıktan sonra kayıt için sorgu penceresi	101
Şekil 3.32.	LabVIEW programında blok diyagram	102
Şekil 3.33.	Ölçüme başlamadan önce ayarların yapıldığı diyagram	103
Şekil 4.1.	4'-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile malzemesinin kristal halde CCD kamera ile çekilmiş görüntüsü	105
Şekil 4.2.	4'-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile malzemesinin nematik halde CCD kamera ile çekilmiş görüntüsü	105
Şekil 4.3.	4'-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, farklı polarizasyon açılarında	

	optik geçirgenlik eğrileri	107
Şekil 4.4.	4'-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzeme için polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri	108
Şekil 4.5.	Optik geçirgenliğin, 334 K; 339 K ve 349 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri	109
Şekil 4.6.	4'-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzemenin, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi	109
Şekil 4.7.	4'-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile malzemesinin kristal halde CCD kamera ile çekilmiş görüntüsü	110
Şekil 4.8.	4'-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile malzemesinin nematik halde CCD kamera ile çekilmiş görüntüsü	111
Şekil 4.9.	4'-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzemenin 315 K ile 340 K sıcaklık aralığında, farklı polarizasyon açılarında optik geçirgenlik eğrileri	112
Şekil 4.10.	4'-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzeme için polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri	113
Şekil 4.11.	Optik Geçirgenliğin; 321 K, 323 K ve 330 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri	114
Şekil 4.12.	4'-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzemenin, 315 K ile 340 K sıcaklık aralığında, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi	114
Şekil 4.13.	4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate malzemesinin kristal halde CCD kamera ile çekilmiş görüntüsü	115
Şekil 4.14.	4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate malzemesinin nematik halde CCD kamera ile çekilmiş görüntüsü	116
Şekil 4.15.	4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-	

	carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, farklı polarizasyon açılarında optik geçirgenlik eğrileri	117
Şekil 4.16.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri	118
Şekil 4.17.	Optik geçirgenliğin; 335 K, 348 K ve 362 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri	119
Şekil 4.18.	335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi	119
Şekil 4.19.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, sabit, dış elektrik alanının 3V değerinde farklı polarizasyon açılarında optik geçirgenlik eğrileri	121
Şekil 4.20.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının 3V voltaj değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri	122
Şekil 4.21.	Optik geçirgenliğin; 334 K, 347 K ve 361 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri	123
Şekil 4.22.	335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 3V değerinde, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi	123
Şekil 4.23.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, sabit, dış elektrik alanının 6V değerinde farklı polarizasyon açılarında optik geçirgenlik eğrileri	124
Şekil 4.24.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 6V değerinde,	

	polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri	126
Şekil 4.25.	Optik geçirgenliğin; 343 K, 348 K ve 355 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri	126
Şekil 4.26.	4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 6V değerinde, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi	127
Şekil 4.27.	4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, sabit, dış elektrik alanının (DC) 9V değerinde farklı polarizasyon açılarında optik geçirgenlik eğrileri	128
Şekil 4.28.	4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1, -carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının 9V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik	129
Şekil 4.29.	Optik geçirgenliğin; 342 K, 347 K ve 355 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri	130
Şekil 4.30.	4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 9V değerinde, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrileri	131
Şekil 4.31.	4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, sabit, dış elektrik alanının (DC) 3V değerinde farklı polarizasyon açılarında (polarizör ve analizör arasındaki açıyı değiştirirken saat yönüne ters yön seçildi) optik geçirgenlik eğrileri	132
Şekil 4.32.	4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık	

	aralığında ve sabit, dış elektrik alanın 3V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda (polarizör ve analizör arasındaki açıyı değiştirirken saat yönüne ters yön seçildi) optik geçirgenlik eğrileri	133
Şekil 4.33.	Optik geçirgenliğin; 334 K, 347 K ve 358 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri	134
Şekil 4.34.	4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanın (DC) 3V değerinde, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi	135
Şekil 4.35.	4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemedede, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanın (DC) 3V değerinde, polarizör ve analizör paralel durumdan, aralarındaki açı önce saat yönünde daha sonra ise saat yönüne ters yönde 10° arttırılarak elde edilen optik geçirgenlik eğrileri	136
Şekil 4.36.	4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, sabit, dış elektrik alanının (DC) 3V, 6V, 9V değerlerinde ölçülmüş optik geçirgenlik eğrilerinin karşılaştırılması	137
Şekil 4.37.	4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, değişen, dış elektrik alanının (AC) 3V değerinde farklı polarizasyon açılarında optik geçirgenlik eğrileri	138
Şekil 4.38.	4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve değişen dış elektrik alanının (AC) 3V değerinde polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri	139

Şekil 4.39.	Optik geçirgenliğin; 343 K, 348 K ve 353 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri	140
Şekil 4.40.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, değişen, dış elektrik alanının (AC) 3V değerinde optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi	141
Şekil 4.41.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, değişen, dış elektrik alanının (AC) 6V değerinde farklı polarizasyon açılarında optik geçirgenlik eğrileri	142
Şekil 4.42.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve değişen, dış elektrik alanının (AC) 6V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri	143
Şekil 4.43.	Optik geçirgenliğin; 342 K, 347 K ve 355 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri	144
Şekil 4.44.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve değişen, dış elektrik alanının (AC) 6V değerinde, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi	144
Şekil 4.45.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve değişen, dış elektrik alanının (AC) 9V değerinde farklı polarizasyon açılarında optik geçirgenlik eğrileri	145
Şekil 4.46.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve değişen, dış elektrik alanının (AC) 9V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri	146
Şekil 4.47.	Optik geçirgenliğin; 342 K, 348 K ve 353 K sıcaklık değerlerinde	

	polarizasyon açısına göre değişim eğrileri	147
Şekil 4.48.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve değişen, dış elektrik alanının (AC) 9V değerinde, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi	148
Şekil 4.49.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, değişen, dış elektrik alanının (AC) 0V, 3V, 6V, 9V değerlerinde ölçülmüş optik geçirgenlik eğrilerinin karşılaştırılması	149
Şekil 4.50.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, sabit ve değişen dış elektrik alanlarının (DC ve AC) 3V değerinde karşılaştırmalı olarak çizilmiş optik geçirgenlik eğrileri	150
Şekil 4.51.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, sabit ve değişen dış elektrik alanlarının (DC ve AC) 6V değerinde karşılaştırmalı olarak çizilmiş optik geçirgenlik eğrileri	152
Şekil 4.52.	4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, sabit ve değişen dış elektrik alanlarının (DC ve AC) 9V değerinde karşılaştırmalı olarak çizilmiş optik geçirgenlik eğrileri	153

1.GİRİŞ

1.1 Sıvı Kristallerin Tarihçesi

Sıvı kristallerin keşfi yaklaşık olarak 150 yıl öncesine dayanmasına rağmen bu malzemelerin önemi 100 yıl sonra anlaşılmıştır. XIX asrın ortalarında Virchow, Mettenheimer ve Valentin üzerinde çalıştıkları sinir lifinin suyun içine bırakıldığı zaman akışkan bir madde olduğunu ve bu suyun polarize ışık ile aydınlatıldığı zaman ilginç bir davranış sergilediğini görmüşler. Onlar bunun yeni bir faz olduğunun farkına varamadılar fakat sıvı kristal fazını ilk gözlemleyen insanlar idiler. Daha sonra, 1877’de Otto Lehmann çeşitli malzemelerde faz geçişlerini incelemek amacıyla ısıtıcılı polarize mikroskop kullandı. O, malzeme soğutulurken şeffaf sıvı halden bulanık sıvı hale geçtiğini ve daha sonra da kristalleştiğini gördü. Fakat bunu sadece sıvı fazdan kristal faza geçiş yaparken oluşan bir kusur olduğunu düşündü.

1888 yılında Avusturyalı botanist F.R.Reinitzer, *cholesteryl benzoate* adlı organik maddenin, atmosferik basınçta ve 145 °C sıcaklıkta aniden katı fazdan bulanık bir sıvıya dönüştüğünü ve sıcaklığın artması ile bu bulanık sıvının 178 °C sıcaklıkta aniden berrak bir sıvıya dönüştüğünü gözlemledi. Reinitzer bulanık sıvının maddenin yeni fazı olduğunu ortaya atan ilk kişi oldu. 1890 yılına kadar incelenen tüm sıvı kristallik durumlar doğal olarak gerçekleşenler idi. 1890 yılında Gatterman ve Ritschke *p-azoxyanisole* ve *p-azoxyphenetole* adlı maddelerin de aynı davranışı gösterdiğini açıkladılar. Bunlar ilk sentetik sıvı kristaller idi. Bir süre sonra Alman fizikçi O. Lehmann, bulanık görünümlü ara fazın, *cholesteryl benzoate* kristale benzer moleküler yapıya sahip alanlar içerdiğini gösterdi. Bu bulanık sıvılarda dikkati çeken bazı özellikler vardı. Bunlar diğer sıvılar gibi akıcı olup bulundukları kabın şeklini almalarına karşılık, katı kristaller gibi polarize ışıkta çift kırılma özelliğine sahip ve girişim renkleri verebilmekte idiler. Hem katı hem de sıvı özelliklerini aynı anda taşıdıklarından bunlara *sıvı kristal* (LC) adı verilmiştir.

Geçen yüzyılın başlangıcında George Friedel sıvı kristaller üzerine çok sayıda deneyler yaptı. Friedel sıvı kristallerdeki kusurların varlığını ve elektrik alanın etkilerini açıklayan ilk kişidir. O, 1922’de her bir malzemedeki farklı molekül düzenini esas alarak sıvı kristallerin sınıflandırmasını yaptı. 1922 ve İkinci Dünya

Savaşı yılları arasında Oseen ve Zöcher sıvı kristallerin öğrenilmesi için matematiksel temeller geliştirdiler.

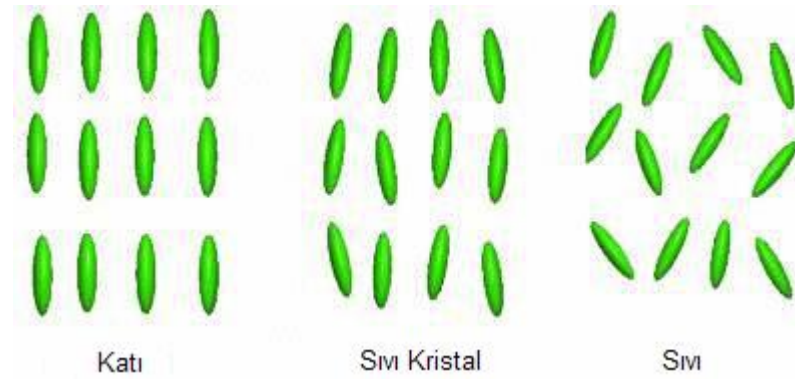
İkinci Dünya Savaşı başladıktan sonra birçok bilim adamı sıvı kristallerin önemli özelliklerinin artık keşfedilmiş olduğuna inanıyorlardı. 1950'lerde Amerika'da Brown'un; Sovyetler Birliği'nde Chistiakoff'un; İngiltere'de Gray ve Frank'ın çalışmaları sıvı kristallere olan ilginin yeniden canlanmasına neden oldu. Maier ve Saupe sıvı kristallerin mikroskobik teorisini geliştirirken; Frank, daha sonra ise Leslie ve Ericksen statik ve dinamik sistemler için sürekli teoriler geliştirdiler ve 1968 yılında bilim adamları ilk defa sıvı kristal göstergeyi (liquid crystal display) tanıttılar. Bundan sonra sıvı kristallere olan ilgi artmaya başladı. İlginin artmasının esas sebeplerinden biri sıvı kristallerin çok değişik özellikler sergilemesi diğeri ise sıvı kristal göstergelere çok büyük ticari merak idi.

Daha sonralar çok sayıda sıvı kristaller sentez edildi ve şimdi, önceden belirlenen özelliklere sahip sıvı kristaller üretmek mümkündür.

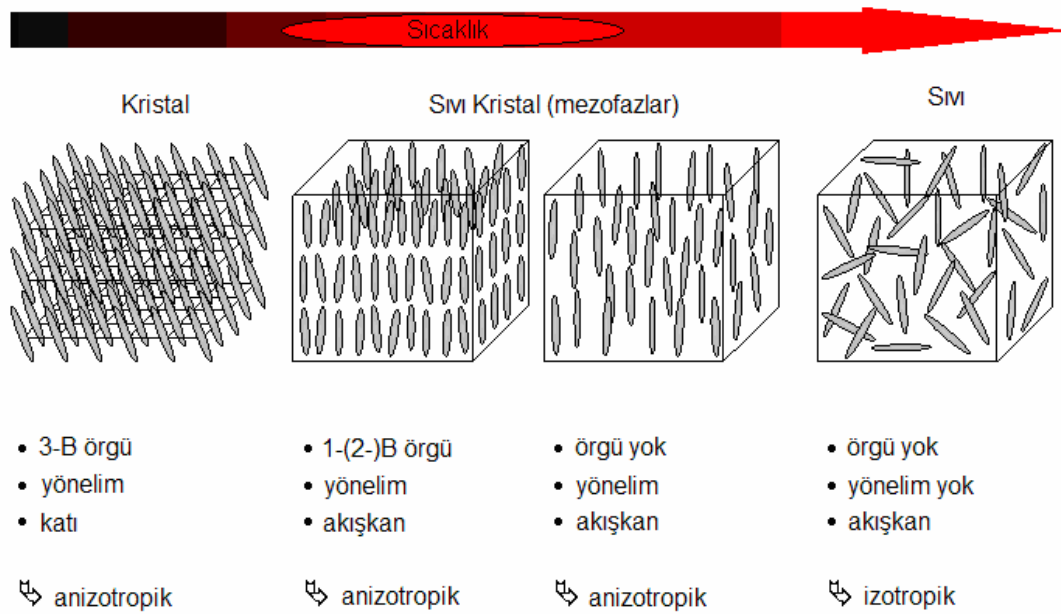
1.2 Sıvı Kristaller

Sıvı kristal malzemeler genellikle bazı ortak özelliklere sahiptir. Bu özelliklerin arasında çubuk şekilli molekül yapısı ve güçlü dipoller veya kolayca polarize olabilir içeriklerdir.

Sıvı kristallik durumu farklı yapan karakteristik moleküllerin, yönlendirici diye adlandırılan ortak eksen boyunca yönelme eğilimleridir. Sıvılarda ise moleküller düzensizdir. Katılarda moleküller oldukça düzenli bir şekilde dizilmişlerdir ve çok az serbestlik derecesine sahiptirler. Sıvı kristallerin karakteristik yönelim düzenleri, geleneksel katı ve sıvı fazlarının arasında yer almaktadır. Her bir faz için moleküllerin yönelimi aşağıdaki diyagramda verilmiştir.



Şekil 1.1. Katı, Sıvı Kristal ve Sıvının Molekül Yönelimi



Şekil 1.2. Katı ve İzotropik Sıvı Faz Arasındaki Sıvı Kristallik Mezofazlar.

Böyle sıra dışı fazlar sergileyen malzemeler çoğunlukla *mezogenler* ve onların bulunabildiği farklı fazlar ise *mezofazlar* adlandırılır. İyi bilinen ve geniş bir şekilde araştırılmış olanlar *termotropikler*, *polimerikler* ve *liotropikler*dir.

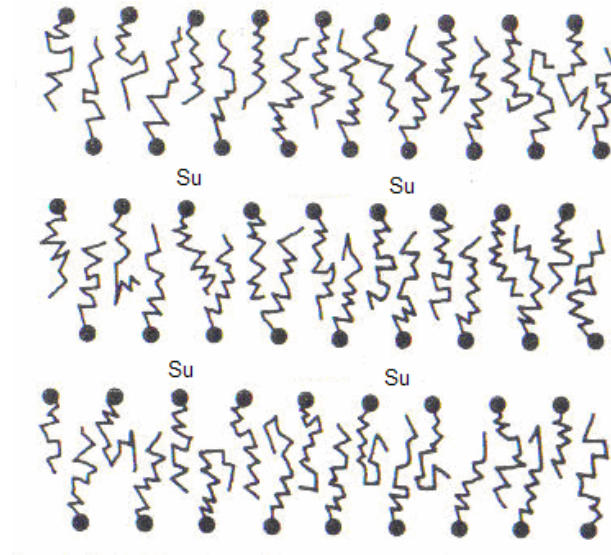
1.2.1 Liyotropik, Polimerik ve Termotropik Sıvı kristaller

Maddenin bu ara hali genellikle yönelim düzenine ve zayıf konumsal düzene sahip olduğu için kristallerin bazı fiziksel özelliklerini taşımaktadır fakat sıvılar gibi akışkanlık özelliği de göstermektedir. Eğer fazlar arasındaki geçişler sıcaklık

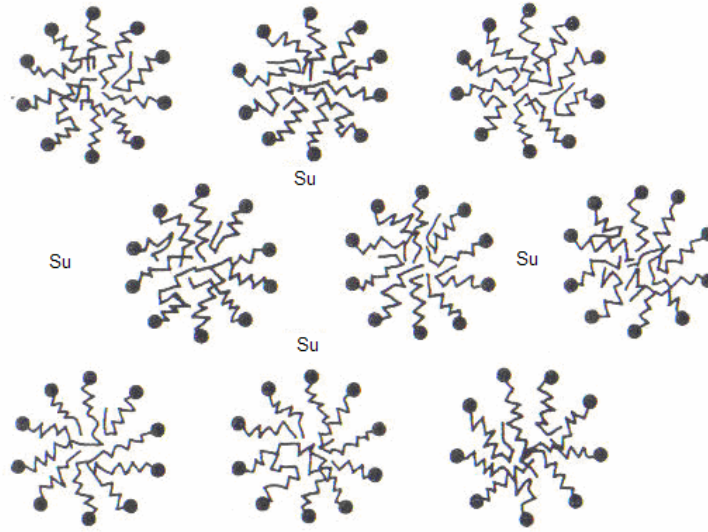
değişimi ile gerçekleşiyorsa, o zaman bunlar *termotropik sıvı kristaller*dir. Farklı bileşenlerin karışımı ile faz geçişleri, yoğunluğa da bağlı olabilirler. Bu tür sıvı kristallere ise *liyotropik sıvı kristaller* adı verilmiştir. Termotropik sıvı kristaller teknik uygulamalarda kullanılırken, liyotropikler biyolojik sistemlerde çok önemlidir. *Polimerik sıvı kristaller* ise temel olarak monomerlerden oluşmuştur.

1.2.1.1 Liyotropik Sıvı Kristaller

Liyotropik sıvı kristaller iki veya daha çok bileşenlerden oluşur (Chandrasekhar, 1992). Genellikle bileşenlerden biri amfifilik moleküller (suyla güçlü bir şekilde etkileşen *hidrofilik* ve suyla etkileşmeyen *hidrofobik* kısma sahip moleküller) ve diğeri ise sudur. Böyle bir sisteme benzer örnek su içinde sabundur (sodium dodecyl sulphate, $C_{12}H_{25}NaSO_4$). Suyun miktarı arttırıldığı zaman birkaç mezofaz elde edilir. Bu mezofazlarda moleküllerin yerleşme çeşitleri şekil 1.3 ve şekil 1.4'te şematik olarak gösterilmiştir, fakat bu yapıların bazı değişik şekilleri mevcuttur.



Şekil 1.3. Sabunların *Lamellar* veya *Düzgümsü (neat)* fazı (Chandrasekhar, 1992)

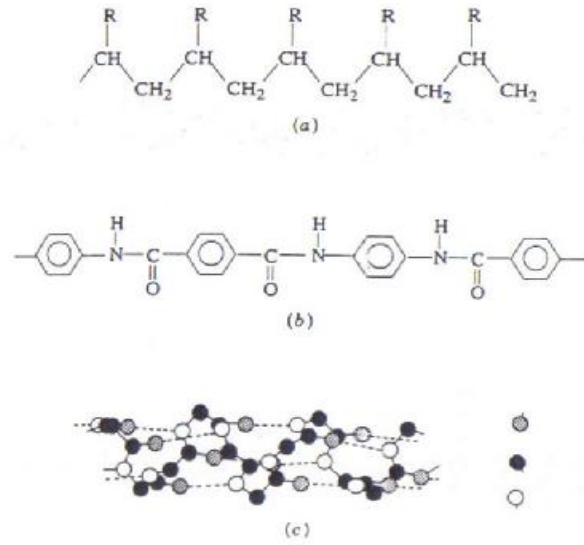


Şekil 1.4. Sabunların *Heksagonal* veya *orta* fazı (Chandrasekhar, 1992)

Lamellar veya *Düzgünsü (neat)* fazda, su komşu katmanların polar uçları arasında sandviçlenirken, düzensiz olan hidrokarbon uçları non-polar ortamdadırlar (şekil 1.3). *Heksagonal* veya *orta* fazda katmanlar yuvarlanarak silindir oluştururlar (şekil 1.4). Belirsiz uzunlukta olan silindirik birimler, diskotiklerin sütunumsu (columnar) fazına benzer bir şekilde heksagonal dizilim oluşturacak şekilde paralel dizilirler (şekil 1.17). Bazı sabun sistemlerinde nematik düzen de gözlenmiştir. Liyotropik sıvı kristaller, bütün canlı sistemlerde olmak üzere doğada bol miktarda mevcuttur. Onların yapıları oldukça karmaşıktır ve açıklanmaya başlanmış olmaları daha çok yenidir.

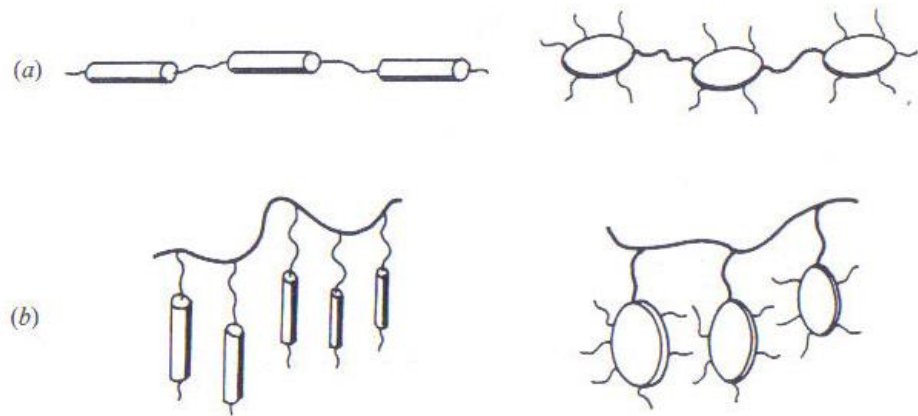
1.2.1.2 Polimerik Sıvı Kristaller

Polimerik sıvı kristaller temel olarak monomerlerin polimer sürümüdür (Khoo, 1995). Polimerler esneklik dereceleri ile ayırt edilmek üzere üç gruba ayrılırlar. *Vinil tür* (şekil 1.5(a)) en esnek olanıdır. *Dupont Kevlar polimeri* (şekil 1.5(b)) yarı esnek; *polipeptit zinciri* (şekil 1.5(c)) ise serttir.



Şekil 1.5. Polimerik sıvı kristalleri üç farklı türü: a) Vinil tür; b) Kevlar polimeri; c) Polipeptit zinciri (Khoo, 1995)

Sıvı kristallik polimerler, mezogenik monomerin moleküler mimari dizilimine istinaden de sınıflandırılır (Chandrasekhar, 1992). *Ana-zincir polimerleri*, katı mezogenik grupların (şekil 1.6(a)) birleşmesi sonucu oluşurlar; bağlantı direk bağ veya esnek bir ayırıcı olabilir. Sıvı kristal *yan-zincir polimerleri* (şekil 1.6(b)) mezogenik monomerlerin uygun polimerik zincire asılıymış gibi birleşmesi ile oluşur. Genellikle polimerik sıvı kristaller, monomerlere kıyasla oldukça yüksek viskoziteye sahip olmaları ile karakterize edilir ve optik depolama uygulamaları için kullanışlı görünüyor.

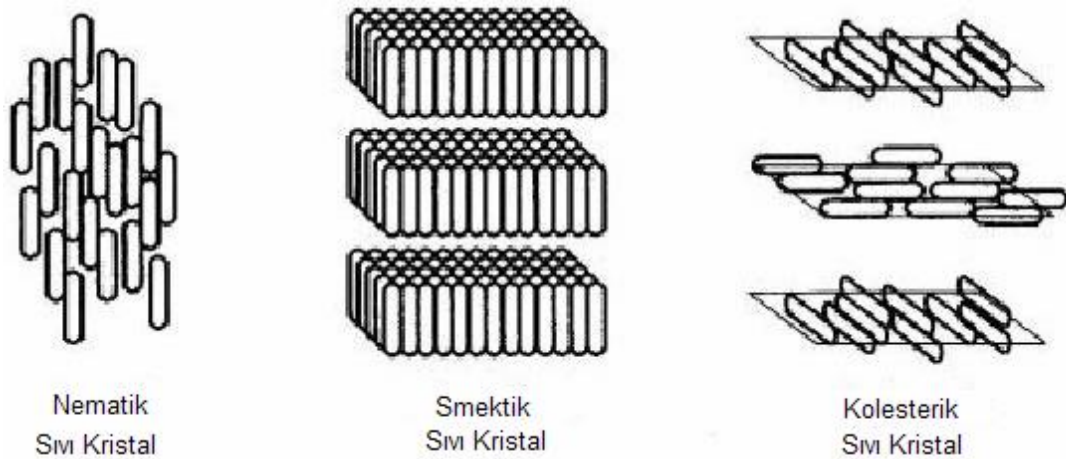


Şekil 1.6. Polimerik sıvı kristaller: a) ana-zincir; b) yan-zincir (Chandrasekhar, 1992)

1.2.1.3 Termotropik Sıvı Kristaller: Nematikler, Kolesterikler ve Smektikler.

Lineer olduğu kadar non-lineer optik özelliklerinden dolayı çok fazla incelenen ve en geniş kullanım alanına sahip olan sıvı kristaller termotropik sıvı kristallerdir (Khoo, 1995). Onlar sıcaklığın fonksiyonu olarak çeşitli sıvı kristallik fazlar sergilemektedirler. Moleküler yapıları oldukça karmaşık olmasına rağmen, onlar çoğunlukla “katı çubuklar” olarak tanıtılmaktadırlar. Bu katı çubuklar birbiriyle etkileşerek farklı, düzenli yapılar oluşturmaktalar. Bunlar termotropik sıvı kristallerin üç ana sınıfıdır: *nematik*, *kolesterik* ve *smektik*. Smektik sıvı kristallerin, moleküllerin konumsal ve yönelimsel düzenine bağlı olarak bazı alt sınıflandırmaları vardır.

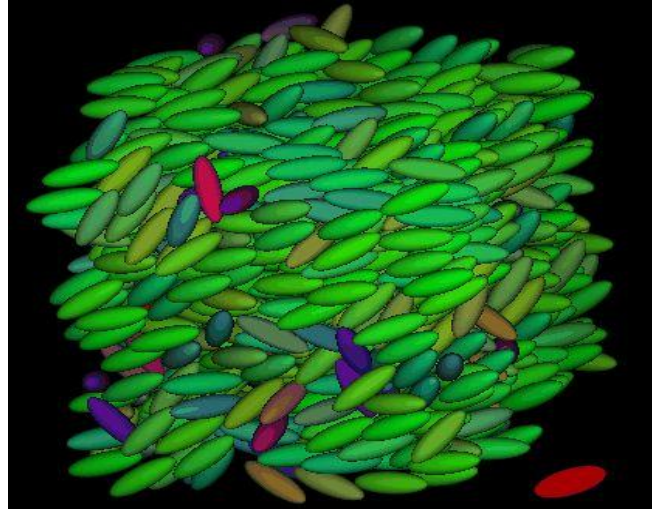
Bu mezofazlar tanımlanmış ve uzun- ve kısa-erimli düzen, yönelimsel dağılım fonksiyonu gibi çok sayıda fiziksel parametre ile karakterize edilmiştir.



Şekil 1.7. Sıvı Kristal Fazları

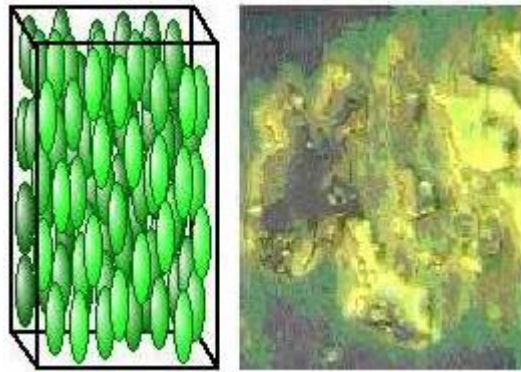
1.2.1.3.(1). Nematik Fazlar

Nematik sıvı kristaller, molekülleri herhangi konumsal (*positional order*) düzene sahip olmayan fakat aynı, yani yönlendirici yönünde yönelme (*orientational order*) eğiliminde olan materyallerdir.



Şekil 1.8. Nematik Sıvı Kristal

Nematik sıvı kristallerde moleküller sadece yönelim düzenine sahiptirler fakat konumsal olarak uzun menzilde bir düzene sahip değildirler. (Nematik kelimesi yunanca νημος=iplik kelimesinden gelmektedir). Bu sıvı kristallere nematik adının verilmesinin sebebi polarize mikroskop altında yapılarının iplik şekilli görünmesinden kaynaklanmaktadır. Tercih edilen yön $\mathbf{n}$ nematik yönlendirici diye adlandırılan birim vektör ile tanımlanabilir.



Şekil 1.9. Nematik fazın şematik gösterimi ve nematik sıvı kristalin fotoğrafı.

Sıvı kristaller anizotropik malzemelerdir ve sistemin fiziksel özellikleri ortalama dizilime göre değişmektedir. Eğer dizilim büyükse malzeme anizotropiktir. Benzer şekilde, eğer dizilim küçük ise malzeme izotropiktir.

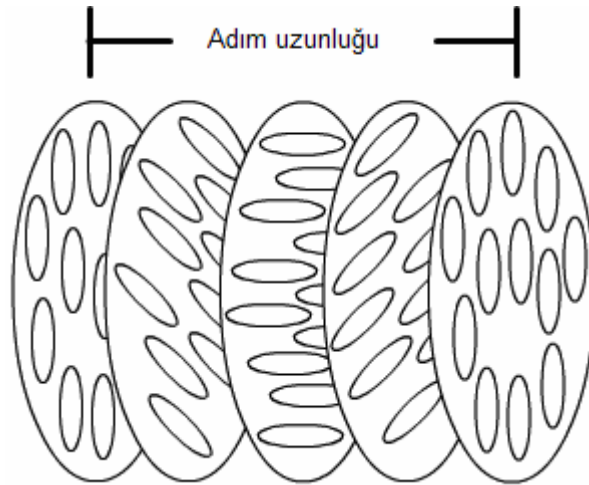
Genel olarak, nematik moleküller merkez simetrisine sahiptirler; fiziksel özellikleri $+\mathbf{n}$ ve $-\mathbf{n}$ yönlerinde aynıdır. Başka deyişle, eğer moleküller daimi elektrik dipolüne sahip iseler (genellikle polar yapı söz konusudur) hacimsel dipol momenti sıfır olacak şekilde diziliyorlar.

Eğer nematik kristal kiral moleküllerden oluşmuş ise, moleküller ayna görüntülerinden farklı olacaklar ve *kolesterik sıvı kristal* oluşmuş olacaktır. Lokal olarak kolesterik sıvı kristaller nematiklere ayırt edilemeyecek kadar benziyorlar fakat tercih edilen yön helis yapısı oluşturuyor ki helis eksenini yönlendiriciye diktir.

Nematik sıvı kristallerin özel bir sınıfına *kiral nematik sıvı kristaller* denir. Kiral, dairesel polarize ışığın bir bileşenini seçerek yansıtma özelliğini ifade etmektedir. Kiral nematik ve kolesterik terimleri birbirleriyle değiştirilerek kullanılmaktadır.

1.2.1.3.(2). Kolesterik Fazlar

Kolesterik (veya kiral nematik) sıvı kristal fazı genellikle biri diğeri ile küçük bir açı oluşturacak şekilde moleküllerin dizilmesine neden olan moleküller arası kuvvetler oluşturan, kiral merkeze sahip nematik mezogenik moleküllerden oluşmuş sıvı kristal fazıdır. Bu da bir üst ve bir alt katmandakine kıyasla burkulmuş yönlendiriciye sahip, oldukça ince, 2-boyutlu nematik benzeri yığınlar şeklinde görünen bir yapının oluşmasına neden oluyor. Bu yapıda, yönlendiriciler aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi katmanın normaline etrafında sürekli helis eğrisi oluşturuyor.

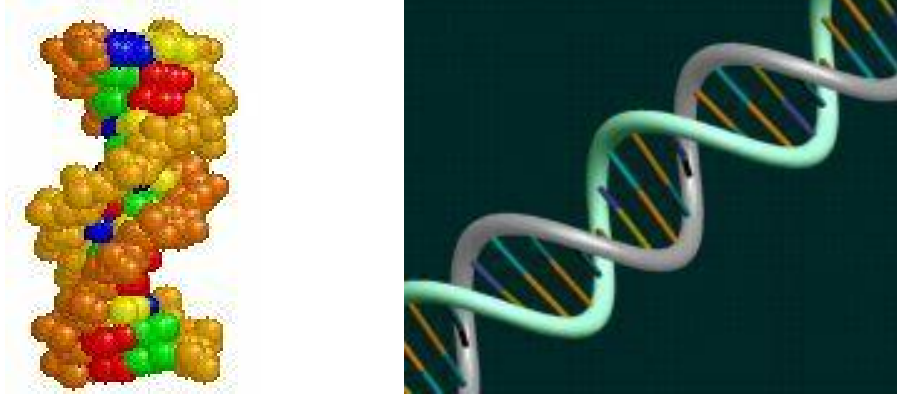




Şekil 1.10. Kolesterik sıvı kristal: helikal yapının şematik gösterimi.

Kolesterik mezofazın önemli bir özelliği adım (pitch) dır. Adım p ile gösterilir ve yukarıdaki şekilde de gösterildiği gibi yönlendiricinin helis boyunca bir tam dönüş yapması için gereken mesafeyi gösteriyor. Kolesterik fazın helis yapısının doğurduğu bir başka sonuç ise, adım uzunluğuna eşit dalga boyuna sahip ışığı seçici yansıma ile yansıtılma özelliğidir. Dolayısıyla adımın uzunluğu görünür bölgedeki ışığın dalga boyuna eşit olduğu durumda renk yansıması olacaktır. Bu etki ardışık katmanlar arasında yönlendiricinin yönünün aşamalı değişiminin sıcaklığa bağımlı olmasını temel almaktadır. Bu sıcaklığa göre yansıyan ışığın dalga boyunun değişmesi sonucu adım uzunluğunu değiştiriyor. Yönlendiricinin değiştiği açı büyütülebilir ki, bu da adım uzunluğunun daralmasına sebep olacaktır. Bu moleküllerin sıcaklığını arttırarak, dolayısıyla onlara daha çok termal enerji vererek yapılabilir. Benzer şekilde, moleküllerin sıcaklığını düşürmek, kolesterik sıvı kristalin adım uzunluğunu büyütüyor. Bu olay, çevrenin sıcaklığını renk yansıması ile gösteren sıvı kristal termometreyi yapmayı mümkün kılıyor. Bu sıvı kristallerin değişik çeşitlerinin karışımı, çoğunlukla sıcaklık farkına hassas olan çok sayıda değişik sensör yapımında kullanılır.

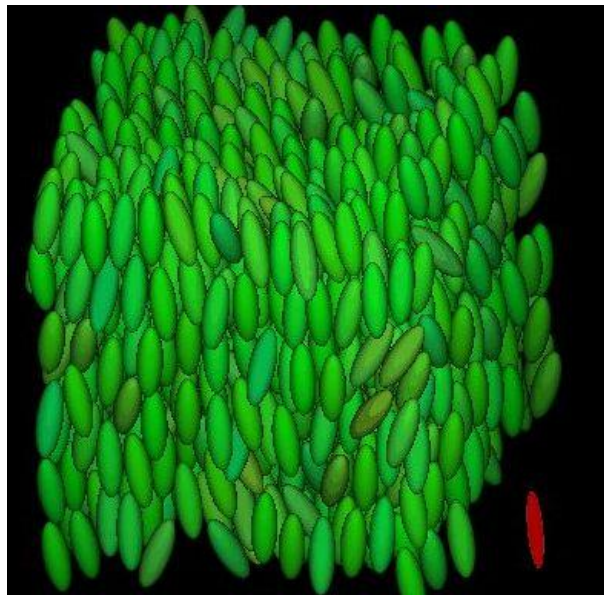
Kolesterik sıvı kristallerin doğadaki en iyi bilinen örneği DNA molekülüdür.



Şekil 1.11. DNA Molekülü

1.2.1.3.(3). Smektik Fazlar

"Smektik" kelimesi Yunanca sabun ($\sigma\mu\epsilon\gamma\mu\alpha$) anlamına gelmektedir. Smektik fazda moleküller nematik fazdaki gibi genel bir yönelim düzeni (*orientational order*) göstermekle beraber kendi aralarında katmanlar veya düzlemler oluşturacak şekilde konumsal düzen (*positional order*) de sergilemektedirler. Hareket bu düzlemlerle sınırlanmıştır ve farklı düzlemler birbiri üzerinde kayarak hareket etmektedir. Düzenin artması smektik fazın nematik faza göre kristale daha çok benzediğini göstermektedir.

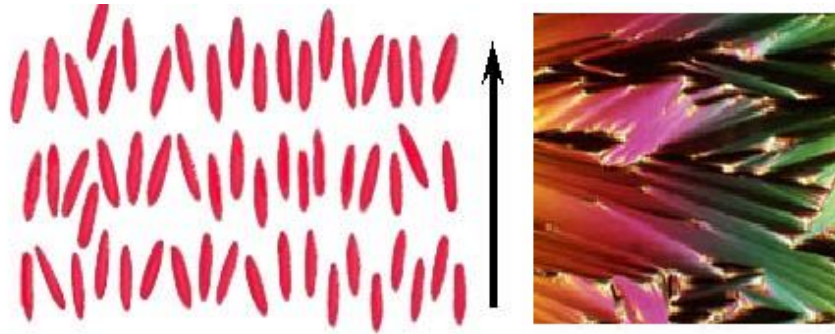


Şekil 1.12. Smektik Sıvı Kristal

Bu mezofazda moleküller katmanlarda sıralanmışlardır. Smektik A (SmA) sıvı kristallerde moleküler yönelim katmanlara dik şekilde yönelmiştir; oysa ki, Smektik C (SmC) fazında yönlendirici eğimlidir. Her ikisi de katmanlar arasında konumsal bir düzen göstermemekte ve dolayısıyla, çoğunlukla iki boyutlu sıvı olarak düşünülmektedir. Kiral moleküllerin SmC fazı SmC* olarak gösterilen helis yapısı oluşturulabilir.

Çok sayıda bileşiğin 12 farklı smektik faz oluşturduğu gözlenmiştir, bununla birlikte burada sadece çok farklı olanlarından bahsedeceğiz.

Smektik-A mezofazında yönlendirici smektik düzleme diktir ve düzlem boyunca özel bir konumsal düzen yoktur. Benzer şekilde, Smektik-B mezofazında yönlendirici smektik düzleme diktir, fakat moleküller düzlem içinde altıgen şebekeler halinde dizilmiştir.



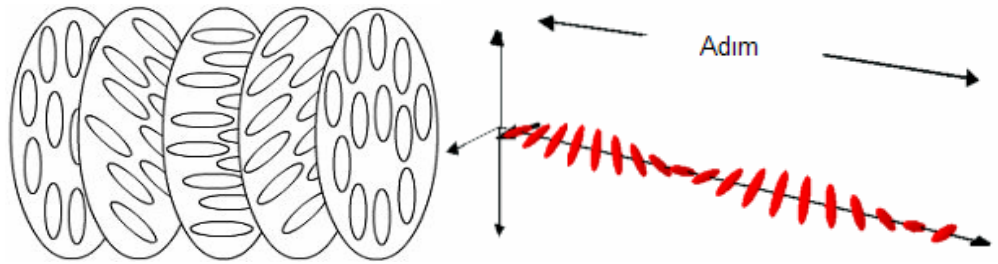
Şekil 1.13. Smektik-A fazının; a) molekül dizilimi, b) polarizasyon mikroskobu kullanılarak çekilmiş fotoğrafları.

Smektik-C mezofazında, moleküller smektik-A mezofazında olduğu gibi dizilmişlerdir, fakat yönlendirici smektik düzlemin normali ile sabit bir açı oluşturacak şekilde yönelmiştir.



Şekil 1.14. Smektik-C fazının; a)molekül dizilimi, b)polarizasyon mikroskobu kullanılarak çekilmiş fotoğrafları.

Nematik fazda olduğu gibi, smektik-C mezofazının da C* ile gösterilen kiral durumu vardır. Smektik-C fazı ile uyumlu olarak yönlendirici smektik katman ile belirli bir açı oluşturacaktır. Aradaki fark ise, bu açının katmandan katmana değişerek helis oluşturmasıdır. Diğer bir şekilde ifade edecek olursak, smektik-C* mezofazında yönlendirici katmana dik veya paralel değildir ve bir katmandan diğerine geçerken dönüyor. Aşağıdaki diyagramda her bir katmanda yönlendiricinin burkulması gösterilmiştir.

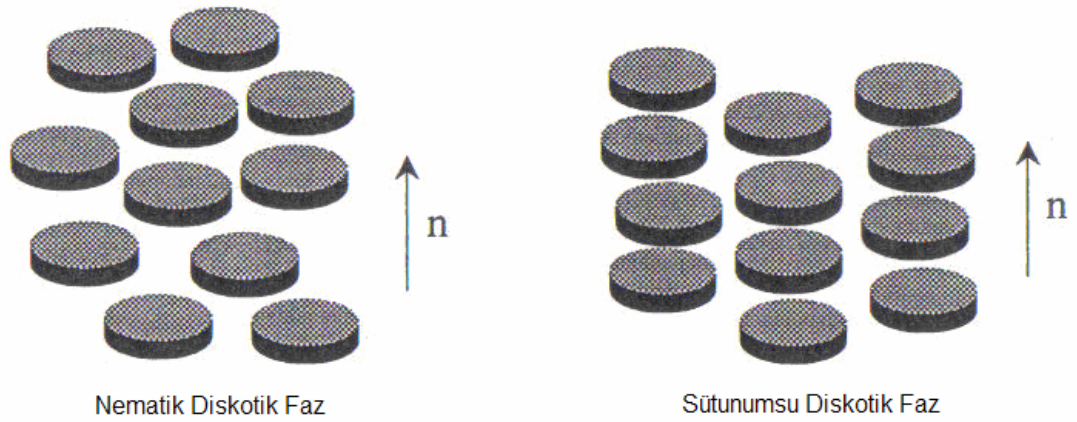


Şekil 1.15. Solda smektik-C* fazının şematik gösterimi, sağda ise aynı fazın eksen üzerindeki görüntüsü verilmiştir.

Bazı smektik mezofazlarda, moleküller üstteki ve alttaki çeşitli katmanlardan etkileniyorlar. Dolayısıyla, gözlenen üç boyutlu düzen düşüktür. Smektik-G fazı bu tip dizilimi gösteren bir örnektir.

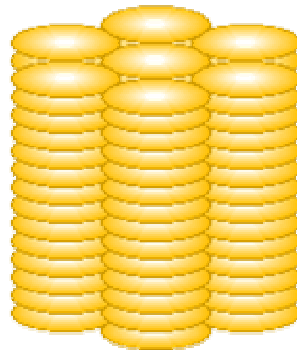
Nematiklere benzer olarak, smektik-A sıvı kristaller optik olarak tek eksenlidirler; yani yönlendirici eksen etrafında dönme simetrisi var. Smektik-C fazı, smektik-A fazından optik olarak iki eksenli olma özelliğinden dolayı farklıdır ve moleküler dizilim tabaka normali ile eğim oluşturacak şekildedir.

Yukarıda adı geçen fazlar *çubuk-şekilli (kalamitik) moleküllere* sahip sıvı kristaller için geçerlidir. Bunun yanı sıra bazı sıvı kristaller ise *disk-şekilli (diskotik) moleküllerden* oluşmuştur. Nematik diskotik ve sütunumsu (columnar) diskotik fazlar bu tür sıvı kristallerin sergilediği fazlara örnektir (Klysubun, 2002):



Şekil 1.16. Nematik diskotik ve sütunumsu diskotik faz (Klysubun, 2002)

Sütunumsu sıvı kristaller daha önce bahsettiğimiz sıvı kristallerden farklıdır. Çünkü bu sıvı kristaller uzun çubuklar şeklindedirler. Bu mezofaz molekül sütunları yığınları ile karakterize edilir. Sütunlar iki boyutlu kristal dizisi oluşturacak şekilde toplanmışlardır. Sütunlar içerisinde moleküllerin dizilimi ve sütunların dizilimi yeni mezofazları ortaya çıkarıyor.



Şekil 1.17. Sütunumsu sıvı kristaller.

1.2.2 Karışımlar (Mixtures) ve Bileşimler (Composites)

Genel olarak saf sıvı kristallerin farklı mezofazları için sıcaklık aralıkları oldukça sınırlıdır (Khoo, 1995). Bu ve diğer fiziksel sınırlamalar, bu malzemelerin pratik kullanımında zorluklar meydana getiriyor. Bunlara istinaden saf sıvı kristallerle esaslı çalışmalar yürütüldüğü zaman endüstriyel uygulamalarda çoğunlukla yapay, fiziksel ve optiksel özelliklere sahip karışımlar, bileşimler ve özel

olarak boyanmış (dop edilmiş) sıvı kristaller kullanılıyor. Sıvı kristallerin sürekli gelişmesi ve yaygın bir şekilde optik teknolojide kullanılmasının sebebi, yeni-malzeme geliştirme çabalarında önemli avantajlardır.

Sıvı kristalin fiziksel özelliklerini değiştirmenin çok sayıda yolu vardır. En temel düzeyde kimyasal bağlar veya atomik gruplar sıvı kristallerin özel bir sınıfına yerleştirilebilir. Bunlara cyanobiphenyl homologus serileri, nCB ($n=1,2,3,\dots$) iyi bir örnektir. Sentezler yoluyla n arttıkça anizotropi, viskoziteler, moleküler büyüklükler ve çok sayıda diğer parametreler büyük ölçüde değişmektedir. Örneğin, $n \leq 4$ olduğunda malzeme nematik faz sergilemez. $n = 5,6,7$ olduğunda malzeme nematik faza sahiptir. $n > 8$ olduğunda ise smektik faz gözlenmeye başlıyor (Khoo, 1995). Fiziksel özelliklerin bazıları yerine koyma yöntemi ile de değiştirilebilir. Örneğin, phenyl zincirinin 2, 3, ve 4 konumlarındaki hidrojen flüor (F) veya klor (Cl) grubu ile yer değiştirilebilir.

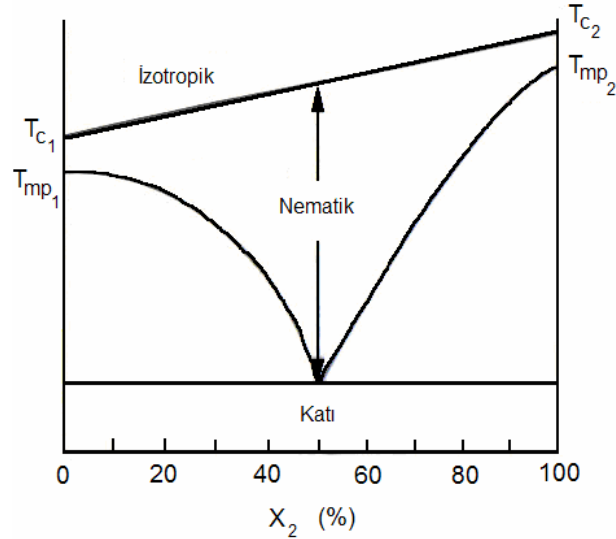
Bu moleküler sentez tekniklerinin yanı sıra, sıvı kristallerin karakteristiklerini çarpıcı bir şekilde geliştirmek için başka fiziksel işlemler de kullanılabilir. Şimdi nematik sıvı kristaller için üç, iyi geliştirilmiş teknikten bahsedeceğiz.

1.2.2.1 Karışımlar (Mixtures)

Tek sıvı kristal malzemenin sıvı kristal sıcaklık aralığı genellikle oldukça sınırlıdır. 4-n-pentyl-4'-cyanobiphenyl (5CB) sıvı kristali 24°C'ta erime noktasına (kristal halden nematik hale geçiş noktası) ve 35.2°C'ta ise aydınlanma noktasına (nematik halden izotropik hale geçiş noktası) sahiptir. Oysa pratik uygulamalar için geniş sıvı kristal aralık (-30°C'tan 100°C'a kadar) arzu edilmektedir. Aygıtların donmaması için düşük erime noktası (melting point), T_{mp} ve işlem esnasında fiziksel özelliklerdeki dalgalanmayı azaltmak için yüksek aydınlanma noktası (clearing point), T_c gerekmektedir.

Sıvı kristal aralığı genişletmenin kullanışlı bir yöntemi ötektik karışım (eutectic mixtures-maksimum erime yeteneği olan karışımlar) formüle etmektir (Khoo, 1993). Şekil 1.19, ikili karışımın faz diyagramını göstermektedir. 1 ve 2 bileşenlerinin nematik aralığı iki dikey sınır eksenleri üzerinde gösterilmiştir. Yatay eksen ikinci bileşenin molar yoğunluğunu (X_2) ifade etmektedir. Uygun molar

yoğunlukta, karışımın erime noktası minimum değerine ulaşmaktadır. Bunun yanı sıra karışımın aydınlanma noktası molar yoğunlukla lineer olarak orantılıdır. Dolayısıyla şekil 1.19’da gösterildiği gibi en uygun yoğunlukta nematik aralık en geniş durumdadır.



Şekil 1.18. İkili ötektik karışımın faz diyagramı. En uygun yoğunlukta en düşük erime sıcaklığı elde edilmiştir (Khoo, 1993).

Ötektik karışımın en uygun karışım oranı Schroder-Van Laar denklemi ile verilmiştir (Khoo, 1993):

$$X_i = \exp \left[\left(\frac{1}{T_{fi}} - \frac{1}{T_i} \right) \frac{\Delta H_{fi}}{R} \right]$$

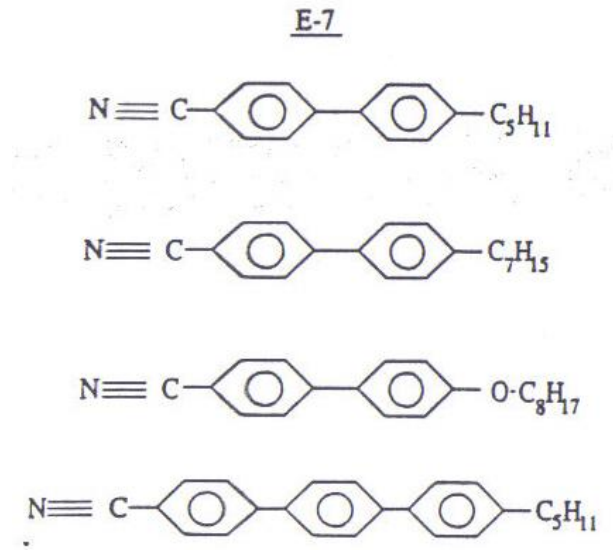
Burada T_i , i bileşeninin karışımındaki erime noktası; ΔH_{fi} , i bileşeninin ısı füzyon entalpi değeri; T_{fi} , i bileşeninin saf haldeyken erime noktası; R gaz sabiti (1.98 cal/mole-K) ve X_i , bileşenin mol değeridir.

Ötektik karışımın aydınlanma sıcaklığı (T_c) bileşenlerin (X_i) aydınlanma sıcaklığından (T_{ci}) tespit edilebilir:

$$T_c = \sum_i X_i T_{ci}$$

Karışımın T_c sıcaklığını arttırmak için yüksek T_{ci} sıcaklıklarına sahip sıvı kristaller kullanılabilir. Bunun yanı sıra erime sıcaklığı ve ΔH değerleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Günümüzdeki araçlarda kullanılan sıvı kristallerin önemli miktarını ötektik karışımlar oluşturmaktadır. İyi bir örnek dört sıvı kristalin karışımı olan E7 (EM kimyasallarından)'dir (Şekil 1.18):



Şekil 1.19. E7 (EM kimyasallarından) sıvı kristalini oluşturan dört bileşimin moleküler yapıları (Khoo, 1995)

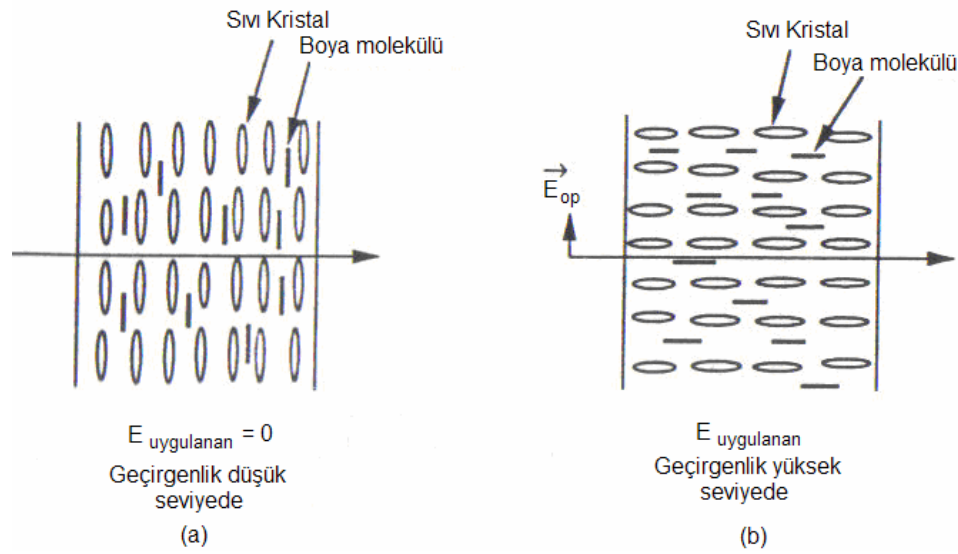
E7'nin optik özellikleri, dielektrik anizotropisi, viskoziteleri karışımda bulunan maddelerin özelliklerinden çok farklıdır. Karışımları oluşturmak bilimsel ilkelerle yönetilen bir sanattır (Khoo, 1995).

Aynı içerik setlerinin farklı yoğunlukları ile oluşturulan sıvı kristal karışımlar fiziksel ve optiksel olarak farklı malzemeler olarak kabul edilmektedir.

Eğer karışımdaki bileşenler kimyasal olarak etkileşime girmiyorsa, karışımın dielektrik sabiti, viskozite, anizotropi gibi fiziksel özellikleri, karışımda bulunan maddelerin molar kısmı c_i ile ifade edilerek $a_m = \sum c_i a_i$ fomülü ile hesaplanabilir (Khoo, 1995).

1.2.2.2 Boyanmış (Dye-Doped) Sıvı Kristaller

Optik özellikler bakımından sıvı kristallerin uygun boya çeşitleri ve uygun şekilde çözünmüş yoğunluklarda boyalarla boyanması özel dikkat gerektirir (Khoo, 1995). Boya moleküllerinin sıvı kristaller üzerindeki en önemli etkisi, onların çok iyi bilinen lineer ve son zamanlarda görüldüğü gibi non-lineer optik özelliklerini değiştirmesidir.



Şekil 1.20. Dikroik *boyanmış nematik sıvı kristal*: a) Elektrik alan uygulanmadan önce; b) Elektrik alan uygulandıktan sonra (Khoo, 1995)

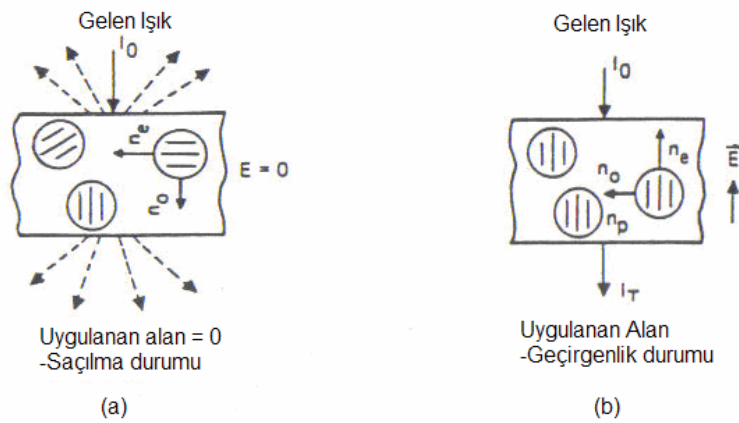
Boya karışımının açık etkisi, belirli dalga boyu aralığında sıvı kristalin soğurmasının artmasıdır. Eğer boya molekülleri foton soğurulması sonucu bazı fiziksel veya yönelimsel değişimlere uğruyorlarsa ev sahipliği yapan sıvı kristalin yönelimini de etkileyerek non-lineer optik etkilerin ortaya çıkmasına neden olurlar.

Optik ve elektrooptik uygulamalarda sık kullanılan diğer etki ise konuk-ev sahibi (*guest-host effect*) etkisidir. Bu çözünmüş dikroik boyaların katsayılarının boya moleküllerinin uzun (optik) eksenine paralel veya dik polarize olmuş optik alanlar için farklı olması gerçeğini kullanmaktadır. Genel olarak dikroik boya molekülü uzun eksenine paralel polarizasyona sahip optik alanda uzun eksenine dik polarizasyona sahip optik alandakinden daha çok soğurma yapmaktadır. Bu

moleküller genellikle şekil olarak uzatılmış ve ev sahibi (host) nematik sıvı kristaller tarafından yönlendirilebilmekte ve yeniden yönlendirilebilmektedir. Buna istinaden hücrenin geçirgenliği dış alanın uygulanması ile çevrilebilir.

1.2.2.3 Polimer-Yayılmış (Polimer-Dispersed) Sıvı Kristaller

Boya moleküllerinin varlığı sıvı kristallerin soğurma özelliklerini değiştirdiği gibi sıvı kristallerin içerisine yayılmış farklı kırılma indisine sahip malzemeler de karışımın saçılma özelliklerini değiştirmektedir (Khoo, 1995). *Polimer-yayılmış sıvı kristaller* mikron boyutlarındaki sıvı kristal damlacıklarının polimer matrisinin içine yerleştirmekle oluşturulur. Bu rasgele yönelmiş sıvı kristal damlacıklarının optik indisleri, dış alanın yokluğunda, sınırda kristal-polimer etkileşimine bağlı olmaktadır ve bu nedenle rasgele dağılım kabul görmektedir. Bu büyük saçılmaya neden olmaktadır. Dış alan uygulandığı zaman damlacıklar yönelmekte ve sistem sıvı kristal damlacıklarının kırılma indisinin izotropik polimer zeminin kırılma indisi ile uyum sağlamasından dolayı şeffaf görünmektedir.



Şekil 1.21. Polimer yayılmış sıvı kristal malzemenin şematik gösterimi; a) dış alanın yokluğunda, yüksek saçılma durumu; b) dış alanın varlığında, şeffaf durumda (Khoo, 1995)

Polimer-yayılmış sıvı kristaller birkaç sene önce tanıtılmıştır. Böylesine bileşik sıvı kristal malzemeler hazırlamak için çok sayıda teknik geliştirilmiştir.

1.3 Sıvı Kristallerin Kimyasal Özellikleri

Thermotropik ve liyotropik sıvı kristaller farklılık gösteriyorlar, fakat birçok yönden de benzerdirler.

Termotropik davranma birçok sıvı kristallerde gerçekleşiyor. Bu malzemeler sıvı kristal durumuna geçişlerin termal yolla gerçekleşmesi ile tanımlanıyorlar. Bunlar şu anlama gelmektedir: katı maddenin sıcaklığını yükselterek veya sıvının sıcaklığını düşürerek sıvı kristal durumuna geçilebilir. Termotropik sıvı kristaller iki türe ayrılmaktadır:

- ◆ Enantiotropik sıvı kristaller;
- ◆ Monotropik sıvı kristaller.

Enantiotropik sıvı kristaller, katı maddenin sıcaklığı yükseltildiğinde ve sıvı maddenin sıcaklığı düşürüldüğünde sıvı kristal fazına geçiş yapabilen sıvı kristallerdir. Monotropik sıvı kristaller için de aynı şeyler doğrudur fakat bu sıvı kristaller ya katı maddenin sıcaklığı yükseltilerek ya da sıvı maddenin sıcaklığı düşürülerek elde edilebilirler.

Termotropik mezofazlardan farklı olarak, liyotropik sıvı kristal geçişleri sıcaklık değişimleri sonucu değil, çözücü etkisiyle gerçekleşiyor. Liyotropik mezofazlar bileşiği meydana getiren mezogenlerin çözücünün etkisiyle toplanmaları sonucu meydana geliyor. Liyotropik mezogenler genellikle “amphiphilic” 'tir, yani onlar hem “lyophilic” (çözücü çekici) hem de “lyophobic” (çözücü itici) kısımlardan oluşmuştur. Bu da onların çözücünün varlığında micellar yapılar oluşturmalarına neden oluyor, çünkü “lyophobic” uçlar bir arada kalmaya devam ederken “lyophilic” uçlar çözeltinin içine doğru ilerliyor. Çözeltinin yoğunluğu arttıkça ve çözelti soğutuldukça, miceller'in ölçüleri büyüyor ve sonuçta birleşiyorlar. Bu yeni oluşmuş sıvı kristal durumunu çözücünden ayırt ediyor.

Oldukça çok sayıda kimyasal bileşiklerin bir veya daha çok sıvı kristal fazları sergiledikleri bilinmektedir. Kimyasal birleşmedeki önemli farklılıklara rağmen, bu moleküller kimyasal ve fiziksel özelliklerinde bazı ortak vasıflara sahiptirler.

1.4 Nematik Sıvı Kristallerin Fiziksel Özellikleri

Sıvı kristallerin fiziksel özellikleri iki türde sınıflandırılabilir: birincisi düzenli faza ait olan ve uzun-erimli düzen ve kristallik fiziksel özelliklerle karakterize edilen; diğeri ise düzensiz faza ait olan ve kısa erimli düzen ve akışkanlık özellikleri ile karakterize edilendir. Bu düzen parametrelerinin her ikisi de, sıcaklığın faz geçiş sıcaklığı olan T_C sıcaklığına sağdan veya soldan yaklaşması durumunda sıcaklığa kritik bağımlılık sergiliyorlar (Khoo, 1995).

Nematik sıvı kristaller en çok incelenen sıvı kristal türüdür. Onlar aynı zamanda en çok kullanılan sıvı kristallerdir. Bunun nedeni, nematiklerin, sıvı kristallerin ikili doğasına – akıcılık ve kristallik yapı – en iyi şekilde örnek olmasıdır. Onlar sıvılar gibi akıcılık özellikleri sergilemektedir ve bu özelliği tarif etmek için *hidrodinamik teoriler* gerekmektedir. Diğer taraftan ise, onların kristallik özellikleri, katılara veya kristallere ait teorik formalizm gerektirmektedir: *süreklilik teorisi* (*continuum theory*). Optik özelliklerini incelemek için ise, elektronik yapılar ve özelliklerine müracaat etmek gerekmektedir (Khoo, 1995).

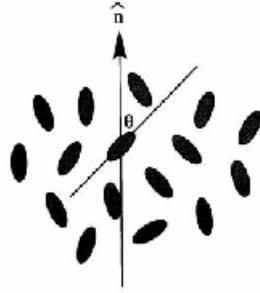
1.4.1 Nematik Sıvı Kristallerin Yapısal Özellikleri

1.4.1.1 Nematik Düzen Parametresi

Nematik sıvı kristal moleküllerinin ortalama yönelimine yön eksenini veya yönlendirici denir. Nematik sıvı kristallerde yönelim düzeninin miktarı makroskopik moleküler yönelimin bu yöne göre ortalamasının alınmasıyla elde edilebilir. θ ve $\theta + \pi$ yönelimleri eşdeğerdir. Bu da fiziksel özelliklerinin $+\mathbf{n}$ ve $-\mathbf{n}$ yönlerinde aynı olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla sistemin enerjisi de aynıdır. Bu, nematik düzen parametresinin, θ açısının çift fonksiyonu olması gerektiğini göstermektedir (Kumar, 2001). Düzen parametresi ikinci mertebeden Legendre polinomunun ortalaması olarak elde edilebilir (Klysubun, 2002):

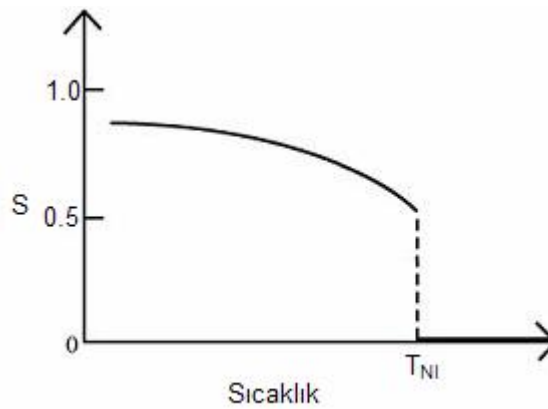
$$S = \langle P_2(\cos q) \rangle = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 q - 1 \rangle \quad (1.1)$$

Burada θ molekülün çubuk eksenini ile yönlendirici arasındaki açıdır.



Şekil 1.22. Düzen parametresini tanımlamak için kullanılan geometri.

Eğer nematik sıvı kristalin tüm molekülleri kusursuz bir şekilde yönlendiriciye paralel yönelmişlerse, $S=1$, ki bu da maddenin katı halde olduğunu gösterir. Tüm moleküller tamamen rasgele yönlerde iseler, çubuk eksenleri tüm yönlerde eşit olasılıklarda bulunurlar, $S=0$. Yani madde izotropik, başka ifadeyle sıvı haldedir. Genellikle termotropik sıvı kristal fazlarında düzen parametresi 0.3 ile 0.9 değerleri arasındadır. Hem katı hem de sıvı halde iken S 'nin nümerik değeri, izotropik faza yaklaştıkça azalmakta ve izotropik faza geçiş sıcaklığında süresiz bir şekilde kaybolmaktadır ve izotropik fazda sıfıra eşittir. Bu da *aydınlanma sıcaklığı* (*clearing point*) olarak da bilinen nematik-izotropik faz geçişi sıcaklığına (T_{NI}) karşılık gelmektedir (Kumar, 2001).



Şekil 1.23. Termotropik sıvı kristallerde nematik düzen parametresinin, S , sıcaklığın, T , fonksiyonu olarak gösterimi. (Kumar, 2001)

Düzen parametresini tanımlamanın diğer bir yolu ise dördüncü mertebeden Legendre polinomunu kullanmaktır (Klysubun, 2002):

$$S = \langle P_4(\cos q) \rangle = \frac{1}{8} \langle 35 \cos^4 q - 30 \cos^2 q + 3 \rangle \quad (1.2)$$

Deneysel olarak düzen parametresi birkaç yolla ölçülebilir. Nükleer manyetik rezonans (NMR), optik çift kırılma ve Raman saçılma deneyleri bunlara birer örnektir.

Aşağıdaki parametreler sıvı kristal yapısını tanımlamaktadır.

- ◆ Konumsal Düzen (Positional Order)
- ◆ Yönelim Düzeni (Orientational Order)
- ◆ Zincir Yönelim Düzeni (Bond Orientational Order)

Bu parametrelerin her biri sıvı kristal numunenin düzenliliğinin derecesini tarif ediyor. Konumsal düzen molekül grubunun öteleme düzeninin (kristal malzemelerin gösterdiği özelliklerin) mertebesini gösteriyor. Yönelim Düzeni, moleküllerin uzun mesafe bazında yönlendirici yönünde yönelme eğilimlerini ifade ediyor. Zincir yönelim düzeni en yakın komşu moleküllerin merkezlerini birleştiren çizgi olarak tanımlanır. Bu çizgi boyunca moleküller arasındaki mesafelerin eşit olması gerekmektedir.

Sıvı kristal bileşiklerinin çoğu, sıvı kristal durumunda birden çok fazın gözlendiği ve polimorfizm diye adlandırılan özellik sergiliyorlar. Sıvı kristal materyallerin "alt fazları"nı tanımlamak için "mezofaz" terimi kullanılmaktadır. Mezofazlar, numunedeki düzenin derecesini, ya bir veya iki yönde düzen oluşturmak ya da moleküllerin ilerleme hareketine sahip olmasına izin vererek, değiştirilmesi sonucu ortaya çıkıyor.

Nematik sıvı kristallerin yönlendirici yönünde yönelme eğilimi *anizotropinin* yaranmasına neden oluyor. Bu malzemenin özelliklerinin yöne bağlı olduğu anlamına gelmektedir. Örneğin, odun parçasını damarları boyunca kesmek, ters yönde kesmekten daha kolaydır. Nematik sıvı kristallerin anizotropik yapısı, bu kristalleri çeşitli uygulamalarda bilim adamları ve mühendisler tarafından kullanılan eşsiz bir malzemeye dönüştürmüştür.

1.4.1.2 Yöne Bağlı Niceliklerin İfade Edilmesi

Yöne bağlı niceliklerin nasıl ifade edilmesi gerektiğini anlamak için elektrik duygunluk örneğine bakalım.

Elektrik alanı, $\mathbf{E}$, dielektrik malzemeye uygulandığı zaman, malzemede indüklenmiş polarizasyon yoğunluğu, $\mathbf{P}$, gelişmektedir. Zayıf elektrik alanları için:

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi^e \mathbf{E} \quad (1.3)$$

Burada χ^e elektrik duygunluk ve ϵ_0 ise serbest uzayın (vakum) geçirgenliğidir. Aydınlanma sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda, başka ifadeyle izotropik fazda χ^e skaler nicelik olup; polarizasyon, $\mathbf{P}$, elektrik alanına, $\mathbf{E}$, paraleldir. Nematik fazda $\mathbf{P}$ 'nin $\mathbf{E}$ 'ye paralel olması mutlak değildir ve χ^e tek bir skaler ile tanımlanamamaktadır. Artık burada elektrik duygunluk, rankı 2 olan tensördür. Bu ise indüklenen polarizasyonun, uygulanan alanın yönünün nematik malzemenin simetri eksenlerine göre nasıl yönlendiğine bağlı olduğu gerçeğini yansıtmaktadır. Üç boyutta rankı 2 olan tensör $3 \times 3 = 9$ bileşene sahiptir. Nematik fazın simetrisi bu bileşenlerin bazılarının birbiriyle bağlantılı olmasını gerektiriyor. Tek eksenli nematik sıvı kristal fazında bağımsız bileşenlerin sayısı ikiye düşüyor (Kumar, 2001).

1.4.1.3 Asal Eksen Sistemi

Tek eksenli nematik fazda, yönlendiriciye, $\mathbf{n}$, paralel yöndeki duygunluğun, $c_{||}^e$; yönlendiriciye, $\mathbf{n}$, dik yöndeki duygunluktan, $c_{\perp}^e$, farklı olduğu ve yönlendiriciye dik yöndeki tüm yönlerin eşdeğer olduğu gözlenmiştir. Bu durumda z eksenli yönünde elektrik duygunluk tensörünü, χ^e , oluşturmak mümkündür:

$$c^e = \begin{bmatrix} c_{\perp}^e & 0 & 0 \\ 0 & c_{\perp}^e & 0 \\ 0 & 0 & c_{||}^e \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Tensör simetrik ve köşegendir ve sadece iki bağımsız bileşeni vardır. Asal eksenlerin herhangi birisi ile aynı yöne sahip elektrik alanı, $\mathbf{E}$, için $\mathbf{P}$ ve $\mathbf{E}$ paraleldir.

İndüklenmiş polarizasyon, $\mathbf{P}$, her zaman uygulanan alana, $\mathbf{E}$, paralel olmayacaktır. Bu, anizotropik malzemeler için genel bir özelliktir. Eğer koordinat sistemi, fazın simetri eksenleri üzerine kurulursa, elektrik duygunluk tensörü veya başka iki ranklı tensör, köşegen olacaktır (Kumar, 2001).

1.4.1.4 Laboratuar Koordinat Sistemi

Çoğu zaman deneylerde laboratuar koordinat sistemi seçilmektedir ki, bu da nematik fazın asal eksen sistemi ile çakışmamaktadır. Bu durumda niceliklerin asal eksen sisteminden laboratuar sistemine veya tersine dönüşümünün nasıl yapılacağını bilmek gerekmektedir. Bir koordinat sisteminden başka bir koordinat sistemine geçişin $\mathfrak{R}$ ortogonal matrisi ile tanımlanan dönme işlemi ile yapıldığı bilinmektedir. $\mathfrak{R}$ matrisinin tersi $\mathfrak{R}^{-1}$ ile verilmiştir ve $\mathfrak{R}\mathfrak{R}^{-1}=\mathfrak{R}^{-1}\mathfrak{R}=\mathbf{I}$; burada $\mathbf{I}$, 3x3 birim matrisidir ve $\mathfrak{R}^{-1}$ matrisi, $\mathfrak{R}$ matrisinin satır ve sütunlarının değiştirilmesi sonucu elde edilmiştir. Polarizasyon ve elektrik alanını, asal eksen sisteminde $\mathbf{P}$ ve $\mathbf{E}$ ile laboratuar sisteminde ise P_L ve E_L ile göstererek aşağıdaki dönüşümleri yazabiliriz:

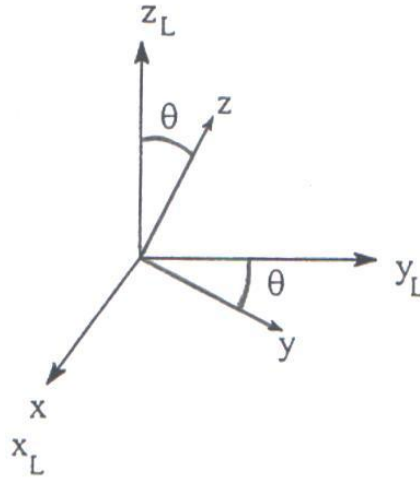
$$\begin{aligned} \vec{P}_L &= \mathfrak{R} \cdot \vec{P} \\ \vec{E}_L &= \mathfrak{R} \cdot \vec{E} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Laboratuar koordinat sisteminde elektrik duygunluk tensörü:

$$c_L^e = \mathfrak{R} \cdot c^e \cdot \mathfrak{R}^{-1} \quad (1.6)$$

Yönlendiricinin, $\mathbf{n}$, laboratuar sisteminde yz düzleminde yerleştiği ve z eksenini ile θ açısı oluşturduğu (Şekil 1.24) durumda (Kumar, 2001):

$$\mathfrak{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q & \sin q \\ 0 & -\sin q & \cos q \end{bmatrix} \quad (1.7)$$



Şekil 1.24. Asal eksen ve laboratuvar koordinat sistemi. Malzemenin asal eksen sistemi x eksenini etrafında θ açısı kadar döndürülmüştür, dolayısıyla z ve $\mathbf{n}$ paraleldir. (Kumar, 2001)

$$c_L^e = \mathfrak{R} \cdot c^e \cdot \mathfrak{R}^{-1} = \begin{bmatrix} c_{\perp}^e & 0 & 0 \\ 0 & c_{\perp}^e \cos^2 q + c_{\parallel}^e \sin^2 q & (c_{\parallel}^e - c_{\perp}^e) \sin q \cos q \\ 0 & (c_{\parallel}^e - c_{\perp}^e) \sin q \cos q & c_{\perp}^e \sin^2 q + c_{\parallel}^e \cos^2 q \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

1.4.1.5 Anizotropi

Köşegen dışındaki bileşenlerde ortaya çıkan $c_{\parallel}^e - c_{\perp}^e$ terimine, dielektrik duygunluk anizotropi denir:

$$\Delta c^e = c_{\parallel}^e - c_{\perp}^e \quad (1.9)$$

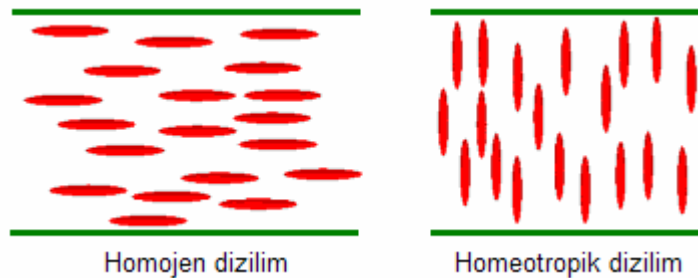
Bu terim sıvı kristallerin öğrenilmesinde önemli bir rol üstlenmektedir. İyi bir yaklaşımla, Δc^e , S ile orantılıdır ve ölçümleri düzen parametresini, S, bulmak için kullanılabilir. Anizotropinin benzer tanımlamaları iletkenlik, difüzyon v.s. gibi diğer fiziksel özellikler için de kullanılmıştır. Bunun yanı sıra her bir molekül için de anizotropi tanımlanabilir. Şunu da belirtmek gerekir ki moleküler anizotropi düzen parametresinden, S, bağımsızdır (Kumar, 2001).

1.4.1.6 Tek Eksenli ve İki Eksenli Sistemler

Tek eksenli (uniaxial) sistemlerde (Tek eksenli silindirik simetriye sahip sistemler) duygunluk ve diğer fiziksel özellikler, sadece iki bağımsız bileşene sahip iki ranklı tensör ile tanımlanabilir. Fakat iki eksenli sistemler (biaxial) daha az simetriye sahip olduklarından üç bağımsız parametre bulunmaktadır. İki eksenli sistemlerdeki durumu göz önünde canlandırmak için sıvı kristal moleküllerinin yan taraflarından birinin uzun, diğerinin ise geniş olduğu düşünülebilir. Bu durumda moleküller uzun eksenleri etrafında serbest bir şekilde dönemezler. Bu fazda düzeni tarif etmek için ilave parametreler gerekmektedir (Kumar, 2001).

1.4.1.7 Sıvı Kristal Dizilimleri (Yönelimleri)

Termotropik sıvı kristal numunede, destekleyici alt tabakayı mekanik ve/veya kimyasal olarak farklı şekillerde işleyerek molekül dizilimlerinin çeşitli türleri elde edilebilir (Klysubun, 2002). Eğer alt tabaka, polar uçları bu tabaka tarafında toplanan amfifilik moleküllerin ince bir filmi (örneğin, HTAB (hexadecyl-trimethyl-ammonium-bromide) maddesi) ile kaplanırsa, termotropik sıvı kristal molekülleri, yönlendiricileri alt tabakaya dik olacak şekilde dizileceklerdir. Bu yapılandırmaya (configuration) homeotropik dizilim denir. Eğer alt tabaka nazık bir şekilde sürülürse, termotropik sıvı kristal molekülleri, yönlendiricileri alt tabakanın sürülme yönüne paralel olacak şekilde dizilirler. Bu yapılandırma homojen veya planar (düzlemsel) dizilim olarak adlandırılır. Burulma ve süper burulma dizilimleri ise çoğunlukla göstergelerde kullanılır.



Şekil 1.25. Homeotropik ve planar dizilim (Klysubun, 2002)

1.4.2 Dielektrik Özellikler

Kapasitörün levhaları arasına dielektrik malzeme yerleştirildiği zaman kapasitansın ϵ faktörü kadar artacağı bilinmektedir. Burada ϵ malzemenin dielektrik geçirgenliği olup boşluğun geçirgenliği (ϵ_0) referans alınarak verilmiştir. Bu şartlar altında dielektrik malzeme polarize olmuştur ve net polarizasyon (**P**) uygulanan elektrik alanının büyüklüğüne (**E**) ortamın elektrik duygunluğu (χ^e) ile bağlıdır:

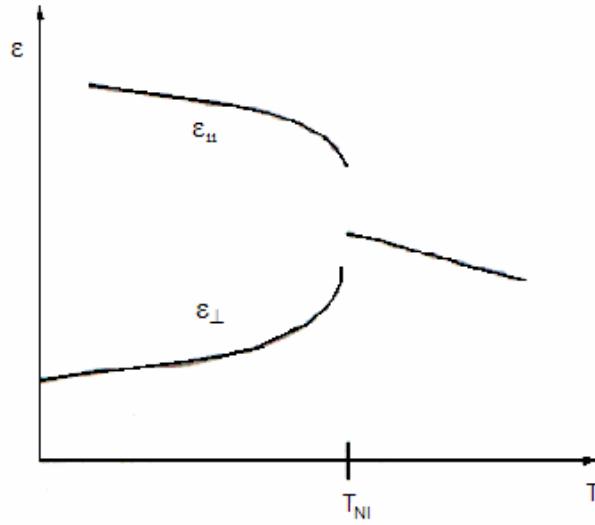
$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi^e \vec{E} \quad (1.10)$$

1.4.2.1 Dielektrik Anizotropi

Eğer dielektrik malzeme nematik sıvı kristal ise, o zaman kapasitans ölçümü sırasında ortaya iki farklı dielektrik geçirgenlik değeri çıkacaktır: 1) yönlendiricinin (**n**) levhalara dik şekilde yöneldiği durumda $\epsilon_{\perp}$ değeri ve 2) yönlendiricinin (**n**) levhalara paralel şekilde yöneldiği durumda ise $\epsilon_{\parallel}$ değeri. Sıvı kristal moleküllerinde cyano grupları (CN) sıklıkla kullanılmakta ve onların büyük dipol momentleri geçirgenliğin oldukça büyük anizotropisini oluşturmaktadır ki, bu da genel olarak $e_{\perp} \approx 5$ ve $e_{\parallel} \approx 20$ civarındadır. Bu iki değer arasındaki fark dielektrik anizotropiyi oluşturmaktadır:

$$\Delta e = e_{\parallel} - e_{\perp} \quad (1.11)$$

Δe , izotropik fazda ($S=0$) kaybolacak, kusursuz bir şekilde yönelmiş olan kristal fazda ise ($S=1$) en yüksek değerini alacaktır.



Şekil 1.26. Sıvı kristaller için dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi. (Kumar, 2001)

Herhangi başka sınırlamanın (constraint) olmadığı durumda, yönlendirici, serbest enerjiye bu katkının minimize olacağı şekilde dönecektir. İki olasılık vardır: yönlendirici alana paralel şekilde yönlenerak pozitif anizotropiye ($e_{||} > e_{\perp}$), alana dik şekilde yönlenerak negatif anizotropiye ($e_{||} < e_{\perp}$), neden olur. Belirli araçlarda (Raynes & Shanks, 1974) kullanılabilen ilginç değişim, frekansın artmasıyla geçirgenlik anizotropisinin (ve dolayısıyla alanla indüklenmiş yönelimin) işaretinin tersine çevrilmesidir.

Dielektrik anizotropi aynı zamanda frekansın da fonksiyonudur. Elektrik duygunluk (χ^e) gibi nematik fazda geçirgenlik de rankı ikiye eşit olan (3x3 matrisi) tensördür. Dielektrik geçirgenlik ile duygunluk arasındaki bağıntı:

$$e = I + c^e \quad (1.12)$$

ile verilmiştir. Burada I, 3x3 birim matristir. Asal eksen ve laboratuvar sistemi ekseninde elektrik duygunluk (χ^e) ifadeleri yukarıdaki denklemler ve (4.3) ve (4.6) denklemleriyle bulunabilir (Kumar, 2001).

1.4.2.2 Kapasitans ve Direnç

Sıvı kristal malzemeden hazırlanmış örneğin kapasitans ve direncini yaklaşık olarak bulmak mümkündür (Kumar, 2001). Amacımız optik gözlem yapılmasına izin

verecek ince saydam hücre oluşturmaktır. İletken oksit film ile kaplanmış temiz cam levhalarla işe başlayabiliriz. Gerçekte bu paralel levhalara sahip kapasitörden başka bir şey değildir ve elektrostatikten de bildiğimiz gibi kapasitans:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{d} \quad (1.13)$$

şeklinde hesaplanır, burada A kaplanmış cam levhaların yüzey alanı, d levhalar arasındaki mesafe, ve $\epsilon_0=8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m. Levhaların yüzey alanının $A=10^{-4}$ m² (boyutları 1cm x 1cm) ve $\epsilon=5$ olduğunu varsayarsak:

$$\begin{array}{lll} C = 443 \text{ pF} & d = 10 \text{ } \mu\text{m} \text{ için} & (\text{"ince film"}) \\ C = 44 \text{ pF} & d = 100 \text{ } \mu\text{m} \text{ için} & (\text{"kalın film"}) \end{array}$$

Buluruz. Yönlendiricinin, **n**, farklı yönelimleri için kapasitansın değeri elbette ki farklı olacaktır. $\Delta\epsilon=1$ olduğundan yola çıkarak homeotropik ve planar yönelimler arasındaki kapasitans farkını bulabiliriz:

$$\begin{array}{ll} \Delta C = 88 \text{ pF} & d = 10 \text{ } \mu\text{m} \\ \Delta C = 9 \text{ pF} & d = 100 \text{ } \mu\text{m} \end{array}$$

Genellikle $f=1$ kHz frekansında sıvı kristal malzemenin direnci 10^6 Ω m mertebesinde dir. Hücrenin direnci:

$$R = r \frac{d}{A} \quad (1.14)$$

Formülü ile bulunabilir. Yukarıdaki örnekler için direnç değerlerini hesaplayacak olursak:

$$\begin{array}{ll} R = 0.1 \text{ M}\Omega & d = 10 \text{ } \mu\text{m} \\ R = 1 \text{ M}\Omega & d = 100 \text{ } \mu\text{m} \end{array}$$

Kolaylık açısından her iki yönelimde de direncin eşit olduğu varsayılabilir.

Hücreyi karakterize etmek için hem direnç, R, hem de kapasitans, C, belirlenmelidir. Yüksek frekanslarda (birkaç yüz kHz'in üzerinde) kapasitans ve

direnç ölçümü için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Böylesine yüksek frekanslarda dielektrik sabiti frekansa bağlı olacaktır.

1.4.3 Optik Özellikler

Sıvı kristallerin optik özelliklerini anlamak için kırılma indisinin öğrenilmesi birinci derecede öneme sahiptir. Polarizasyon mikroskopunda sıvı kristali incelerken rengârenk yapılar gözlenmektedir. Bunun nedeni ışığın hızının dalga boyuna bağlı olması ve polarizasyon düzleminin yönlendiriciye göre nasıl yönlenmesidir. Bu olaylardan ilkinde *dispersiyon*, ikincisine ise *çift kırılma* denir. Optik frekanslarda (10^{15} Hz civarında) saydam izotropik malzeme için kırılma indisinin karesi, malzemenin yüksek-frekans elektrik geçirgenliğine eşittir:

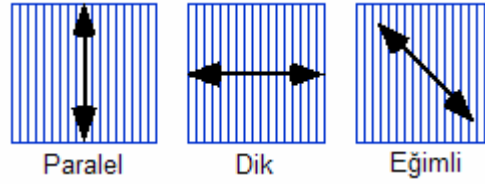
$$\begin{aligned} n_{II}^2 &= e_{\infty II} \\ n_{\perp}^2 &= e_{\infty \perp} \end{aligned} \quad (1.15)$$

Burada $\perp$ ve II, yönlendiriciye dik ve paralel yönü göstermektedir. Elektromanyetik dalganın optik alan ile etkileşimi dielektrik tensörü aracılığıylaadır. Önemli olan dalganın ilerleme yönü değil de, elektromanyetik dalganın elektrik alanının yönü yani polarizasyonun yönüdür. Yani

- Optik eksene (yönlendiriciye) paralel olan polarizasyon olağan (ordinary) kırılma indisini ($n_0=n_{\perp}$) görmektedir.
- Optik eksene (yönlendiriciye) dik olan polarizasyon olağan üstü (extraordinary) kırılma indisini ($n_0=n_{II}$) görmektedir.

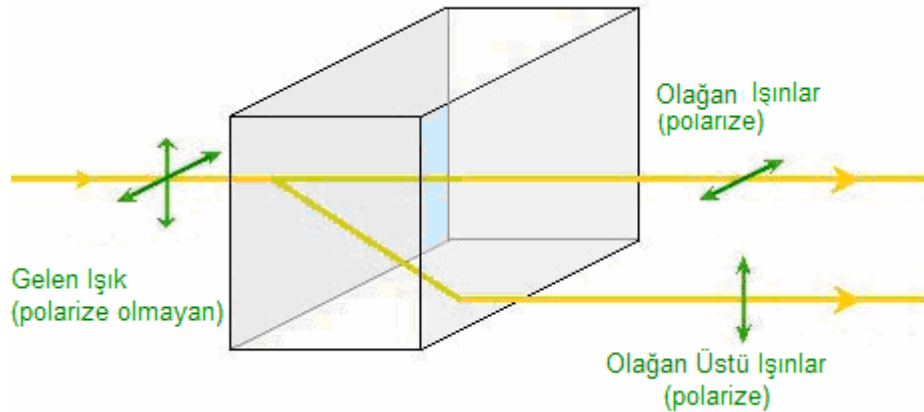
1.4.3.1 Çift Kırılma

Sıvı kristaller, anizotropik yapılarından dolayı, çift kırılmaya neden olan malzemelerdir. Bu yüzden onlara çift kırılmalı denir. Sıvı kristallerin iki kırılma indisi vardır. Yönlendiriciye paralel bir şekilde polarize olan ışık, yönlendiriciye dik şekilde polarize olan ışıktan daha farklı bir kırılma indisine sahiptir. Yani farklı hızlarla ilerlemekteler. Aşağıdaki diyagramda mavi çizgiler yönlendiricinin alanını, oklar ise polarizasyon vektörünü gösteriyor.



Şekil 1.27. Nematik yönlendirici (mavi çizgiler) ve ışık demetinin farklı polarizasyonları (oklar).

Böylece, ışık nematik sıvı kristal gibi çift kırılmalı bir malzemeye girdiğinde, ışık demeti *olağan ışınlar* (ordinary rays) ve *olağan üstü ışınlar* (extraordinary rays) bileşenlerine ayrılıyor. Bu bileşenler farklı hızlarla ilerledikleri için, dalgalar arasında faz farkı ortaya çıkıyor. Bu ışınlar, çift kırılmalı malzemeyi terk etmek üzere tekrardan birleştiklerinde, bu faz farkından dolayı polarizasyon durumu değişiyor.



Şekil 1.28. Çift kırılmalı malzeme boyunca ilerleyen ışık polarizasyona bağlı olarak bu iki yoldan birini takip edecektir.

Malzemenin çift kırılma özelliği, olağan ve olağan üstü ışınların kırılma indisleri arasındaki farkı gösteren Δn ile karakterize edilir. Malzemenin kırılma indisi ışığın vakumdaki hızının söz konusu malzemedeki hızına oranına eşit olduğu için yönlendiriciye dik şekilde ilerleyen ve yönlendiriciye göre paralel ve dik şekilde polarize olan dalgalar için:

$$n_e = \frac{c}{v_{II}} \quad (1.16)$$

$$n_0 = \frac{c}{v_{\perp}} \quad (1.17)$$

Çift kırılmanın alabileceği en yüksek değeri

$$\Delta n = n_e - n_0 \quad (1.18)$$

İlerleme yönüne bağlı olarak Δn sıfır ile en yüksek değeri arasında bir değer almaktadır. $n_e > n_0$ şartı pozitif tek eksenli malzemeyi tarif etmektedir, nematik sıvı kristaller bu kategoridedir. Genelde nematik sıvı kristaller için n_0 yaklaşık olarak 1.5 ve maksimum fark, Δn , 0.05 ile 0.5 arasında değişmektedir.

Malzemenin uzunluğu ise başka bir önemli parametredir, çünkü faz kayması ışığın çift kırılmaya sahip malzeme boyunca ilerlemesi esnasında artmaktadır. Çift kırılma ve uzunluk parametrelerinin doğru birleşimi sonucunda herhangi polarizasyon durumunun elde edilmesi mümkündür.

Burada ortamda optik yol kavramından bahsetmek yerinde olur. Çünkü az önce bahsettiğimiz çift kırılmaya sahip malzemede farklı hızlarla ilerleyen iki dalga bileşenleri için optik yollar arasındaki fark dalga ortamda ilerledikçe polarizasyon durumunda değişmeye neden oluyor. Kristal içinde (l) mesafesi kat eden dalga için optik yolu (nl) ile gösterirsek, iki dalga bileşeni için optik yolların farkı:

$$l(n_e - n_0) = l\Delta n \quad (1.19)$$

olacaktır. İki bileşen arasında faz farkı ($2\pi l\Delta n/\lambda_v$) olacaktır, burada λ_v vakumdaki dalga boyudur.

Malzemenin çift kırılma özelliğinin olması anizotropik olmasından kaynaklanıyor ve sıvı kristallerin anizotropisi sıcaklığa kuvvetli bir şekilde bağımlılık sergiliyor. Bu bağımlılık nematik fazdan izotropik faza geçerken kayboluyor. Dolayısıyla çift kırılma sıcaklığa ciddi bir bağımlılık gösteriyor.

1.4.3.2 Konoskopik Gözlem ve Çift Kırılmanın İşareti

Çift kırılmanın işareti denildiğinde $n_e - n_o$ farkı kastedilmektedir. Tek eksenli pozitif malzemelerde olağan ışınlar, olağan üstü ışınlardan daha hızlı ötelenmektedir. Negatif malzemelerde ise tersi doğrudur. Çift kırılmanın işareti polarize ışık mikroskopunda konoskopik gözlem ile belirlenebilmektedir. Çapraz polarizörler altındaki nematik sıvı kristal örneğin homeotropik yönelimi söz konusu ise girişim deseni oluşmaktadır. Desen, görüş alanını dört çeyreğe bölmektedir. Bu desen “Maltese çaprazı” olarak adlandırılmaktadır. Alternatif yöntem, analizörün üzerindeki lensi (Bertrand lensi) tarif etmektedir. Her iki durumda da görüntü kuvvetli bir şekilde yakınsayan ışık demeti ile oluşturulmaktadır. Bir sonraki aşama ise, sarı ışıkta tam dalga gecikmesine neden olan gypsum levhasını kullanmaktır. Gypsum levhayı kullandığımızda çeyrek kısımlar mavi ve sarıya dönüşüyor. Tek eksenli pozitif kristalde yavaş eksenin yönü mavi çeyrekleri, negatif kristalde ise sarı çeyrekleri ikiye bölecektir (Kumar, 2001).

1.4.4 Diamanyetik Özellikler

Çoğu organik malzemeler gibi sıvı kristaller de diamanyetiktir. Yani, uygulanan manyetik alanın moleküller üzerindeki etkisi sonucunda manyetik alana ters yönde yönelmiş manyetik moment indüklenmektedir. Sıvı kristal malzemede moleküller anizotropik olduğundan indüklenen manyetik momentin büyüklüğü, uygulanan alanın molekül eksenine göre nasıl yönlendiğine bağlıdır. Hidrokarbon zincirlerinin diamanyetik anizotropisi aromatik halkalarının anizotropi değerinden iki derece daha düşüktür. Dolayısıyla moleküler yapıda benzen halkaları mevcut iseler, moleküllerin diamanyetik davranışında üstünlük sergiliyorlar (Kumar, 2001).

1.4.4.1 Manyetik Alana Karşılık Elektrik Alanı

Manyetik etkileşimler elektrik etkileşimlerden birkaç derece daha düşüktür. Bu nedenle de elektromanyetik dalgaın ötelenmesi tartışılırken manyetik etkileşimler tamamen ihmal edilmektedirler. Ayrıca diamanyetik malzemelerde indüklenmiş manyetik dipol momentleri arasındaki etkileşim zayıf olduğundan iç manyetik alan ihmal edilebilir; bu nedenle malzemenin özelliklerinin moleküler

duygunluğa dayanarak yorumlanması, dielektrik özelliklere kıyasla oldukça sadeleştirilmiştir. Bunun yanı sıra elektrik alanların tersine, statik manyetik alanlar, elektrotlarda yük toplanmasında veya kimyasal reaksiyonlara neden olmazlar. Bu suretle, manyetik alanlar kullanılarak yapılan deneysel ve teorik çalışmalar, elektrik alanlarından daha önemli avantajlar sunuyor. Diğer taraftan ise manyetik alanlar, aygıt uygulamalarında anahtarlama (switching) için pratik değildir (Kumar, 2001).

1.4.4.2 Hacimsel Duygunluk

Manyetik momentler arasındaki etkileşimler öylesine küçüktür ki, indüklenmiş manyetik moment, en iyi yaklaşımla

$$\vec{m} = \mu_0^{-1} \chi \vec{B} \quad (1.20)$$

Burada $\vec{m}$, manyetik moment; μ_0 , boşluğun manyetik geçirgenliği; χ , birim hacimde manyetik duygunluk tensörü ve $\vec{B}$ ise uygulanan manyetik indüksiyondur. Ortalama diamanyetik duygunluk, $\bar{c}$:

$$\bar{c} = \frac{1}{3}(c_{\parallel} + 2c_{\perp}) \quad (1.21)$$

Ve diamanyetik anizotropi

$$\Delta c = c_{\parallel} - c_{\perp} \quad (1.22)$$

ile verilmiştir. Burada $c_{\parallel}$, yönlendiriciye paralel yöndeki manyetik duygunluk ve $c_{\perp}$ ise yönlendiriciye dik yöndeki manyetik duygunluktur.

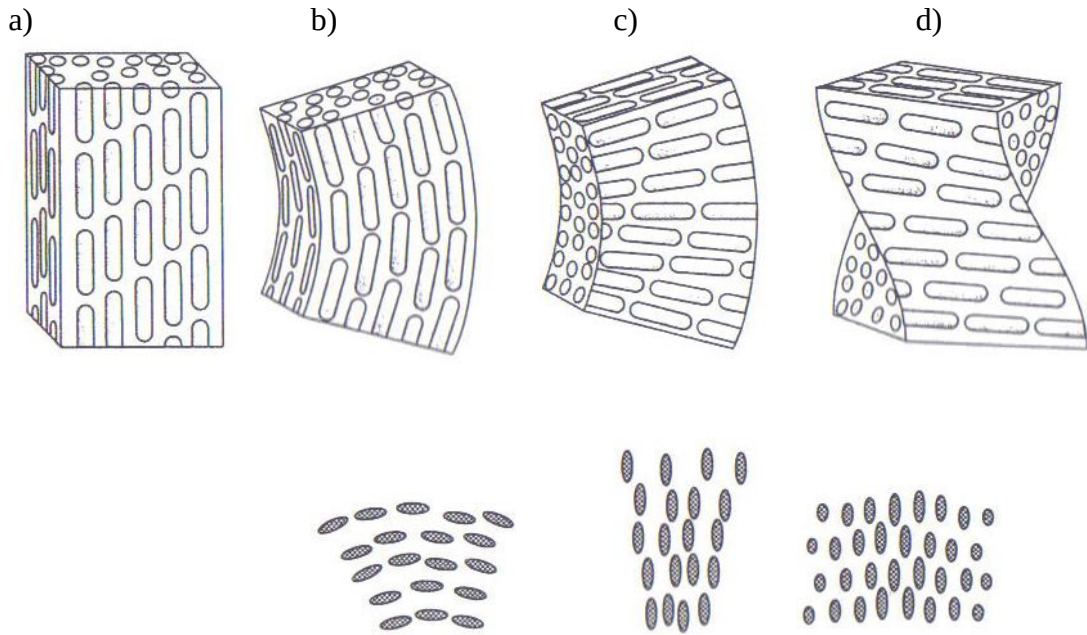
Yukarıda söz edilen duygunluklar hacimsel duygunluklardır. Çoğunlukla kütle ve molar duygunluklar da kullanılmaktadır (Kumar, 2001).

1.4.5 Elastik Özellikler

Termotropik sıvı kristallerin fiziksel özelliklerinin araştırılması veya termotropik sıvı kristallere dayalı belirli teknik aygıtların yapılması için sıvı kristal iki katlı tabaka arasına yerleştirilir. Sonuç olarak, kendi yapısına bağlı olarak ve sıvı

kristal molekülleri ile katlı tabakalar arasındaki etkileşmelerden dolayı sıvı kristal belli deformasyon etkisi altında kalır (Nesrullazade, 2001).

Bükülme deformasyonu (bend deformation), yayılma deformasyonu (splay deformation), ve burulma deformasyonu (twist deformation) nematik sıvı kristallerde farklı üç temel yönlendirici eksen deformasyonudur (Lueder, 2003):



Şekil 1.29. a) Denge konfigürasyonu; b) Bükülme deformasyonu; c) Yayılma deformasyonu; d) Burulma deformasyonu (Lueder, 2003)

1.4.5.1 Yönlendirici deformasyonları: bükülme, yayılma ve burulma deformasyonu

İki paralel cam levha arasına yerleştirilmiş ve homeotropik yönelimli monodomen ince nematik sıvı kristal filmi inceleyelim. Yönlendirici, levhaların yüzeyine kuvvetli bir şekilde demirlenerek (anchored) dik olarak yönlenmiştir. Şimdi ise üstteki levhaya eğim vermeye çalışalım. Eğer yönlendirici her iki yüzeye de demirlenmiş olarak kalmaya devam ederse film içindeki yönelim her iki yüzeyde de demirlenmeye uyum sağlamak için değişmek durumunda kalır (Şekil 1.29(b)). Yönlendirici değişiminin film boyunca düzgün olduğunu varsayalım. Deformasyon yönlendirici alanının çizgilerinin bükülmesine neden olduğundan bu deformasyon türüne *bükülme deformasyonu* denir. Düzgün homojen yönelimli ince nematik sıvı

kristal filmini ele alalım. Deforme olmadan önce yönlendirici alanı, arasında bulunduğu tabakaya paralel çizgiler setinden oluşmuştur. Üstteki levhaya eğim verildiğinde farklı deformasyon türü elde edilir. Buna *yayılma deformasyonu* denir (Şekil 1.29(c)). Burada yönlendirici alan radyal yöne sahiptir. Üçüncü temel deformasyon türü ise düzgün homojen yönelime sahip filmdeki üst levhanın alt levha ile belirli bir açı oluşturacak şekilde döndürüldüğü zaman elde edilir. Burada yönlendirici aynı düzlemde kalır. Buna *burulma deformasyonu* denir (Şekil 1.29(d)) (Kumar, 2001).

1.4.5.2 Süreklilik Teorisi

Yukarıdaki örneklerde deformasyon durumunda, yönlendirici, konumla değişmektedir. Deformasyonların, moleküler boyutlarla kıyaslandığında ihmal edilebilir olduğunun varsayarak, sıvı kristalin sürekliliğini düşünebiliriz. Bu yaklaşım, yönlendiricinin, konumun fonksiyonu olarak tanımlanmasına ve $\mathbf{n}(\mathbf{r})$ 'nin uzaysal türevlerinin deformasyonun bir ölçütü olarak kullanılmasına izin vermektedir. Bu durumda deformasyon halinde elastik enerji, $\mathbf{n}(\mathbf{r})$ 'nin türevlerinin ikinci mertebeden ifadesidir (Kumar, 2001).

$\hat{n}(\hat{F})$ 'nin uzaysal değişimine tekabül ettiğinden, deformasyon enerjilerindeki temel parametreler çeşitli uzaysal türevler olarak yazılabilir [$\hat{n}(\hat{F})$ 'nin bükülmeleri, yani $\hat{\nabla} \times \hat{n}(\hat{F})$, $\hat{\nabla} \cdot \hat{n}(\hat{F})$ v.s.]. İlk defa Frank (1958) tarafından geliştirilen süreklilik teorisine göre bu üç deformasyona eşlik eden serbest-enerji yoğunlukları (birim hacme düşen enerji):

$$\text{Yayılma Deformasyonu:} \quad F_1 = \frac{1}{2} k_{11} [\hat{\nabla} \cdot \hat{n}]^2 \quad (1.23)$$

$$\text{Burulma Deformasyonu:} \quad F_2 = \frac{1}{2} k_{22} [\hat{n} \cdot (\hat{\nabla} \times \hat{n})]^2 \quad (1.24)$$

$$\text{Bükülme Deformasyonu:} \quad F_3 = \frac{1}{2} k_{33} [\hat{n} \times (\hat{\nabla} \times \hat{n})]^2 \quad (1.25)$$

şeklinde verilmiştir. Dolayısıyla nematik sıvı kristalin elastik serbest enerjisi:

$$F = \frac{1}{2}k_{11}[\vec{\nabla} \cdot \hat{n}]^2 + \frac{1}{2}k_{22}[\hat{n} \cdot (\vec{\nabla} \times \hat{n})]^2 + \frac{1}{2}k_{33}[\hat{n} \times (\vec{\nabla} \times \hat{n})]^2 \quad (1.26)$$

olacaktır. Burada k_{11}, k_{22}, k_{33} genellikle Frank veya Oseen-Frank elastik sabitleri olarak adlandırılmaktalar ve kuvvet birimine sahiptirler. Çoğu çubuk-şekilli moleküllere sahip nematikler için bu sabitler 10^{-11} N mertebesinde ve k_{33} katsayısı moleküllerin çubuk şeklinde olmasından dolayı bu katsayılar içerisinde en büyük olanıdır. Sıcaklık arttıkça elastik sabitler azalmaktadır. Teorik incelemelerde sıklıkla bu üç sabitin eşit olduğunu varsaymak daha uygun olmaktadır. Bu yaklaşıma *tek sabit yaklaşımı* denir. Pratikte, yönlendirici aynı anda birden fazla deformasyona uğramış olabilir. Nematik sıvı kristal filmin levhalarına eğim vererek veya döndürerek elde edilen deformasyonlar dışında, levhaları birbirine paralel şekilde kaydırarak da deformasyon oluşturulabilir. Buna *makaslama deformasyonu* denir (Kumar, 2001).

1.4.6 Viskozite Özellikleri

Elastik sabitleri tartışırken, deformasyonların etkisiyle moleküllerin akmadığını varsaydık. Şimdi ise deformasyona uğramış nematik sıvı kristal filmdeki moleküllerin akmaya başladığını varsayalım. İki paralel levha arasına yerleştirilmiş nematik sıvı kristali ele alalım. Eğer alttaki levha sabit tutulur ve üstteki levha sabit $\mathbf{v}$ hızıyla alttaki levhaya ve y-eksenine paralel bir şekilde kaydırılırsa, moleküller akışkanlık özelliği sergileyeceklerdir. Eğer $\mathbf{v}$ küçük ise Newton Akışkanları için levhaların birim alanına düşen kuvvet veya stres, σ :

$$s = \eta \left(\frac{dv}{dz} \right) \quad (1.27)$$

Burada η , $ML^{-1}T^{-1}$ boyutuna sahiptir ve Pa-s ile ölçülen viskozite katsayısı; dv/dz ise hız gradyentidir. İzotropik sıvı için η 'nın sıcaklıkla değişimi:

$$s \propto \exp\left(\frac{E}{k_B T}\right) \quad (1.28)$$

Burada E, moleküllerin birbiri üzerinde kayıp geçmesi için gereken enerjiyi ölçen “aktivasyon enerjisi”dir.

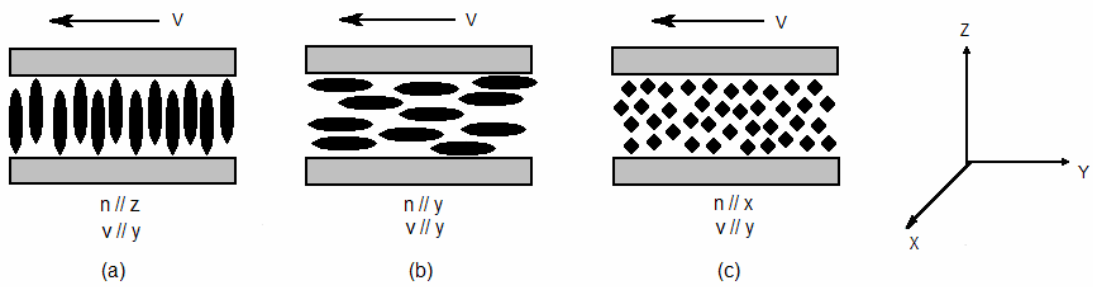
1.4.6.1 Miesowicz Katsayıları

Nematik sıvı kristal için stres (σ) yönlendiriciye ($\mathbf{n}$) bağlı olacaktır. Şekil 1.30’da gösterilen sınırlama geometrilerini inceleyelim. Burada $\mathbf{v}$ hızı y-ekseni ve hız gradiyentinin ($d\mathbf{v}/dz$) ise z-ekseni yönünde olduğu varsayılmıştır. Hız ve hız gradiyentinin belirlediği yz-düzlemi makaslama düzlemidir. Yönlendiricinin, güçlü manyetik alan kullanılarak, hız gradiyentine paralel yönlenmeye zorlandığı deneyde (Şekil 1.30(a)) η_1 viskozite katsayısı ölçülmüştür. Yönlendiricinin hız vektörüne paralel olduğu deneyde ise η_2 viskozite katsayısı ölçülmüştür (Şekil 1.30(b)). Sonuç olarak ise yönlendiricinin makaslama düzlemine dik olduğu durumda η_3 viskozite katsayısının ölçülmesi için deney yapılmıştır (Şekil 1.30(c)). Pratikte bu üç katsayı farklı değerlere sahiptir. Örneğin, 25 °C’ta MBBA için Viskozite değerleri Gahwiller tarafından aşağıdaki şekilde rapor edilmiştir (Gahwiller, 1971):

$$h_1 = 103 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$h_2 = 24 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

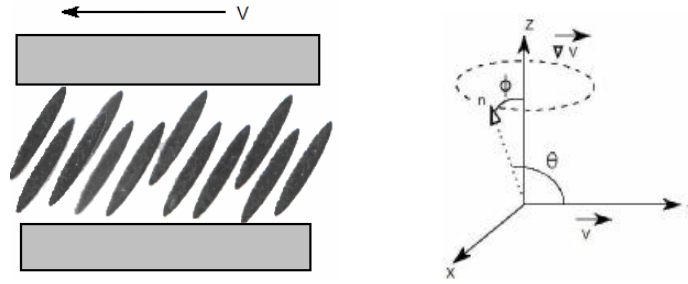
$$h_3 = 42 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$



Şekil 1.30. η_1 (a), η_2 (b), η_3 (c) Miesowicz katsayıları için yönlendirici ve hızın yönlerini gösteren geometri. Üstteki levha y-eksenine paralel şekilde hareket ederken hız gradiyenti z-eksenine paraleldir, y-z ise makaslama düzlemidir. (Kumar, 2001)

Açık bir şekilde görülmektedir ki, viskozite katsayıları, düzen parametresine (S) bağımlıdır ve izotropik faza geçişte eşit olacaklardır. Düzen parametresi sıcaklığa bağımlı olduğundan viskozite katsayıları da $[\eta_i (i=1,2,3)]$ sıcaklığa bağımlı olacaklardır. Üç viskozite katsayısı η_i , Miesowicz katsayıları olarak bilinmektedir.

Nematik sıvı kristal malzemenin molekülleri Şekil 1.30(a) ve Şekil 1.30(b) arasında bir geometriye yani daha genel bir geometriye sahip oldukları duruma bakalım (Şekil 1.31):



Şekil 1.31. Yönlendiricinin akımın yönü, $\mathbf{v}$ ile θ açısı; hız gradiyenti ile ise ϕ açısı oluşturduğu genel bir durum. Bu durumda $\mathbf{v}$, y-eksenine paraleldir ve hız gradiyenti z-ekseni yönündedir. (Kumar, 2001)

Yönlendirici hız ile θ açısı, hız gradiyenti ile ise ϕ açısı oluşturuyor. Bu durumda ölçülen viskozite $\eta(\phi, \theta)$ olacaktır:

$$\begin{aligned}
 h(0, p/2) &= h_1 \\
 h_2(0, 0) &= h_2 \\
 h_3(p/2, p/2) &= h_3 \\
 h_1(q, f) &= h_1 \sin^2 q \cos^2 f + h_2 \cos^2 q + h_3 \sin^2 q \sin^2 f + h_{12} \cos^2 q \sin^2 q \cos^2 f
 \end{aligned} \tag{1.29}$$

η_{12} yeni bir terimdir ve moleküllerin uçlarındaki gerilim olarak düşünülebilir. Bu katkı üç sınırlama durumunda kaybolmakta ve $\theta=45^\circ$ ve $\phi=0^\circ$ durumunda ise en yüksek değerini almaktadır. Beşinci viskozite katsayısı ise *dönme viskozite katsayısıdır* (rotational viscosity coefficient) ki bu da birim hacme düşen viskoz torkun (N_v) yönelim açısının (θ) zamana göre değişimidir:

$$N_v = -g_1 \left(\frac{dq}{dt} \right) \quad (1.30)$$

Burada γ_1 dönme viskozite katsayısıdır ve η_1 , η_2 , η_3 , η_{12} viskozite katsayıları ile birlikte tek-eksenli nematik malzemenin viskozite katsayılarının setini oluşturmaktadır (Kumar, 2001).

1.4.6.2 Leslie Katsayıları

Yukarıda bahsedilen viskozite katsayıları daha kolay anlaşılmasına rağmen, viskozite özelliklerinin teorik çalışmalarında farklı katsayılar seti kullanılmaktadır. En geneli Leslie (1966) tarafından tanıtilen ($\{\alpha_j\}$) settir:

$$\begin{aligned} a_1 &= h_{12} \\ a_2 &= (-h_1 + h_2 - g_1) / 2 \\ a_3 &= (-h_1 + h_2 + g_1) / 2 \\ a_4 &= 2h_3 \\ a_5 &= (2h_1 + h_2 - 3h_3 - g_1) / 2 \end{aligned} \quad (1.31)$$

1.4.7 Elektriksel İletkenlik

Uygulanan elektrik alanının ($\mathbf{E}$) etkisiyle ortamda oluşan yük taşınması:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1.32)$$

denklemleri verilmiştir. Burada $\mathbf{J}$ akım yoğunluğu ve σ ise iletkenlik tensörüdür. Serbest yük taşıyıcılarına sahip iletkenler için bu Ohm yasasıdır. Tek-eksenli sıvı kristal için σ , yönlendiriciye paralel ($\sigma_{\parallel}$) ve dik ($\sigma_{\perp}$) iki, başlıca değere sahip rankı iki olan bir tensördür. σ , malzemenin doğasına bağlı olarak çok farklı mertebeden değerler alabilir. Liyotropik sıvı kristaller yüksek iyonik yoğunluğa sahip olduklarından dolayı yüksek iletkenliğe sahiptirler. Diğer taraftan ise çoğu termotropik sıvı kristaller dielektriktir. Başka bir ifadeyle, serbest yük taşıyıcılarına sahip değiller ve iletkenlik yoktur. Pratikte, yüksek derecede saflaştırılmış

bileşimlerde bile iyonik yük taşıyıcıları bulunmaktadır. Elektrik yüklü safsızlıkların (charged impurities) yanı sıra, bileşiğin zayıf bir şekilde ayrışması ve metal elektrotlardan enjekte olan yükler, iletkenliğe katkıda bulunabilirler. Yüksek derecede polar moleküller için polarizasyon akım yoğunluğunun da katkısı bulunmaktadır (Kumar, 2001):

$$J_p = \frac{dP}{dt} \quad (1.33)$$

Birçok çalışmalarda, malzemeler, iyonik maddelerden kontrollü miktarda karıştırılıyor. İyonik bileşiklerle mukayesede termotropik sıvı kristallerin iletkenliği genellikle düşüktür. Her iki durumda da ölçümler, 1 kHz mertebesinde ac voltajlar kullanılarak yapılır. Bunun, elektrotların polarizasyonundan, kimyasal reaksiyonlardan ve elektrolizden kaçınmak gibi birkaç nedeni vardır. İletken hücrelerin tasarımı, ölçülecek iletkenliğin büyüklüğüne bağlıdır. İyonik malzemeler için elektrotlar arasındaki mesafe 1 cm mertebesinde olup çok büyüktür. Düşük iletkenliğe sahip malzemeler için elektrotlar arasındaki mesafe 1 mm ve daha küçük mertebelerdedir, hücrenin enine kesiti büyük olup birkaç cm^2 mertebesinde.

1.4.8 Termal İletkenlik

Isı difüzyonu:

$$J = -k^t \cdot \nabla T \quad (1.34)$$

Denklemlerle tanımlanmıştır. Burada J, ısı akısı (birim zamanda birim alana düşen enerji); T, sıcaklık (zamanın ve konumun fonksiyonu); k^t , termal iletkenlik tensörüdür (Landau ve Lifshitz, 1970). Konveksiyon ve radyasyon yolu ile ısı transferinin ihmal edilebilir seviyede olduğunu varsayıyoruz. Uzay ve zamanda sıcaklık dağılımını tarif eden denklem:

$$rc \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [k^t \cdot \nabla T] \quad (1.35)$$

ki, bu da ikinci mertebeden kısmi diferansiyel denklemdir. Yoğunluk (ρ) ve spesifik ısı (c) da sıcaklığın fonksiyonu olabileceği gerçeği denklemi daha da karmaşık hale getiriyor. ρ ve c birer sabit olsalar bile difüzyon denkleminin çözümü elementer olmayan fonksiyonlar içermektedir. Sıcaklık dağılımının zaman içerisinde sabit kalması durumu oldukça sadeleştirmektedir. Bu duruma kararlı durum (steady-state) denir.

1.4.8.1 Kararlı Durum Yöntemi

Kararlı durumda $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$. İnce numuneler için, mesela iki levha arasındaki sıvı kristal film için, levhalara paralel olan yz düzleminde sıcaklık dağılımının sabit olduğunu varsayabiliriz. Buna ilaveten, eğer yönlendirici x-ekseni paralel bir şekilde ve film boyunca düzgün olarak yönelmişse bu durumda sıcaklık gradiyenti $\frac{dT}{dx}$ sabit olup $\frac{\Delta T}{d}$ 'ye eşit olacaktır ki, burada ΔT levhalar arasındaki sıcaklık farkı, d ise filmin kalınlığıdır. Bu varsayımlarla, ısı difüzyon denklemi:

$$J = -k_{xx}^t \cdot \frac{\nabla T}{d} \quad (1.36)$$

$J=AQ$ denklemini kullanarak (burada A filmin yüzey alanı ve Q ise birim zamanda daha yüksek sıcaklığa sahip levhadan malzemeye akan ısıdır):

$$k_{xx}^t = \frac{dJ}{A\Delta T} \quad (1.37)$$

Benzer denklemler homojen yönelim için de kullanılarak $k_{\perp}^t$ ölçülebilir. Termal iletkenlik katsayısını ölçmek için kararlı durum deney setinin düzeneği aşağıdaki gibidir: Hücre iki bakır levha ile hazırlanmıştır. Levhalardan birinin sıcaklığı sabit tutulmuştur. Diğer levha ise sabit oranla elektrik akımı ile ısıtılmıştır. Levhalar naylon vidalarla birbirine tutturulmuş, malzeme alanı conta ile kapatılmıştır. Malzemenin kalınlığı 0.75 mm civarındadır. ΔT iki bakır levha

arasındaki sıcaklık farkı olarak ölçülmüştür. Birim zamandaki ısı akışı (Q), ısıtılan levhadaki kaybolan elektrik gücü ile belirlenmiştir. Malzemenin kalınlığı, yüzey yönelim etkilerini minimize etmek için yeterli derecede yüksek değere sahiptir. Yönlendiriciye paralel ve dik yöndeki ana değerler, manyetik alan kullanılırken yönlendiriciyi uygun yönde tutarak elde edilmiştir. MBBA ve PAA için sonuçlar yönlendiriciye paralel yöndeki iletkenliğin daha büyük olduğunu gösteriyor.

1.5. Nematik Sıvı Kristallerde Elektrooptik Etkiler

Sıvı kristallerin önemli özelliklerinden biri, elektrik alan uygulanması sonucu optik özelliklerinin (kırılma indisi, v.b.) değişmesidir. Buna elektrooptik etki denir. Uygulanan dış elektrik alan, sıvı kristal yönlendiricilerinin ilk durumlarını deforme etmekte ve dolayısıyla nüfuz eden ışık demetinin faz ya da genliğini değiştirmektedir. Dış elektrik alan ortadan kalktığı zaman yönlendiriciler, sıvı kristalin türüne ve fiziksel mekanizmasına bağlı olarak ya ilk durumlarına geri dönecek ya da son durumlarını korumaya devam edeceklerdir. Dinamik saçılma, konuk-ev sahibi efekti, alanla indüklenmiş nematik-kolesterik faz geçişi, mikron-ölçekli damlacıklardan ışık saçılması ve burkulmuş nematik efekt, nematik sıvı kristallerde elektrooptik efektlerdir.

1.5.1. Dinamik Saçılma (Dynamic Scattering)

DC veya düşük frekanslı AC alanı nematik sıvı kristal hücreye uygulandığı zaman, iletkenlik anizotropisinden kaynaklanan iyonik hareketlilik, elektro-hidrokinamik akım oluşturmaktadır. Sıvı kristalde türbülans oluşmakta ve ışığı kuvvetli bir şekilde saçmaktadır. Genellikle bu efektin oluşması için gereken dc alanı 10^4 V/cm düzeyindedir (Khoo, 1993).

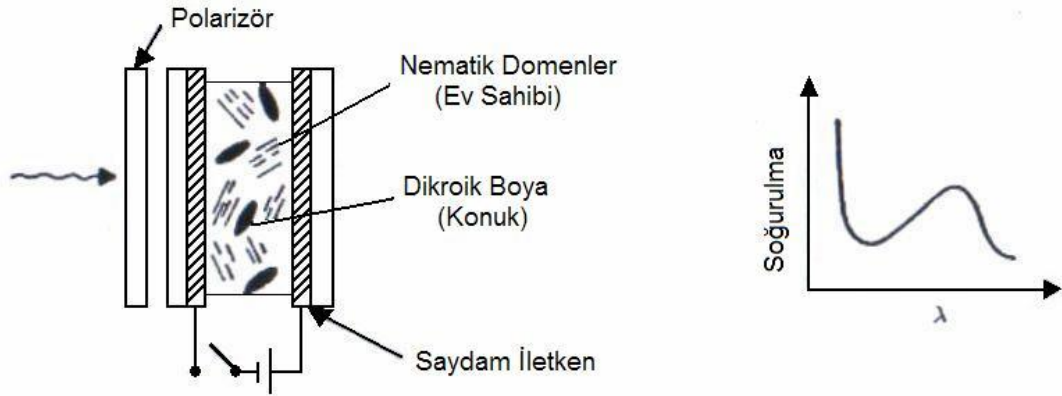
Dinamik saçılma göstergeleri (Heilmeyer ve ark., 1968) şimdi nadiren kullanılmalarına rağmen sıvı kristal göstergelerin ilk kuşağıdır. Onların çalışma tarzı elektro hidrokinamik efektte (Helfrich, 1969) bağlıdır. Bu efekt, düzeni karışıklık içine iterek ışık saçılmasına neden oluyor ki, bu da düzgün şekilde yönelmiş aydınlık sıvı kristal zemininde görülmektedir. Maksimum ve minimum ışık şiddetleri arasındaki kontrast oranı yaklaşık 20:1 ve yanıt süresi 200 ms'dir. Dinamik saçılma

$\Delta e < 0$ 'ya sahip malzemeler gerektirmektedir ve ilk zamanlarda böyle malzemeler kararsız idiler ve göstergelerin kısa ömürlü olmasına neden oluyorlardı. Şimdi uygun kararlı malzemeler bulunmasına rağmen, dinamik saçılma göstergelerinin işleyişi ve kullanımı bir takım faktörlerle sınırlanmıştır: yeterli saçılma için gereken yüksek elektrik iletkenliğinden kaynaklanan kısa ömürlülük; daha yüksek güç tüketimi; kararsızlık; düşük görülebilirlik şeklinde sıralanabilir.

1.5.2. Konuk-Ev Sahibi Efekti (Guest-Host Effect)

Konuk-ev sahibi sistemleri (Heilmeyer ve Zanoni, 1968), az miktarda (% 1-5) dikroik boyanın sıvı kristal malzemede çözünmesi ile elde edilir. Ev sahipliği yapan malzemenin, çalışmanın yapılacağı spektral bölgede yüksek derecede saydamlık sergilemesi gerekmektedir. Kontrast oranını kuvvetlendirmek için dikroik boya moleküllerinin bir polarizasyonda kuvvetli, diğer polarizasyonda ise zayıf soğurmaya sahip olması da istenen durumdur. Konuk-ev sahibinin elektrooptik efekti şekil 1.32'deki şematik diyagramda tasvir edilmektedir. Elektrik alanının kapalı olduğu durumda boya molekülleri ışık demetinin polarizasyonuna hemen hemen paralel olup, kuvvetli soğurma gerçekleştirmektedirler. Sıvı kristal yönlendiricileri, alan ile yönlendirildiklerinde boya molekülleri de yönlenmekte ve soğurulma azalmaktadır.

Konuk-ev sahibi sistemi kullanan aygıtların kontrast oranı dikroik oran, boya moleküllerinin yoğunluğu ve hücre kalınlığına bağlıdır. Genelde bu oran 50:1 civarındadır (Khoo, 1993)



(a) Konuk-Ev Sahibi Sistemi - Alan Yok



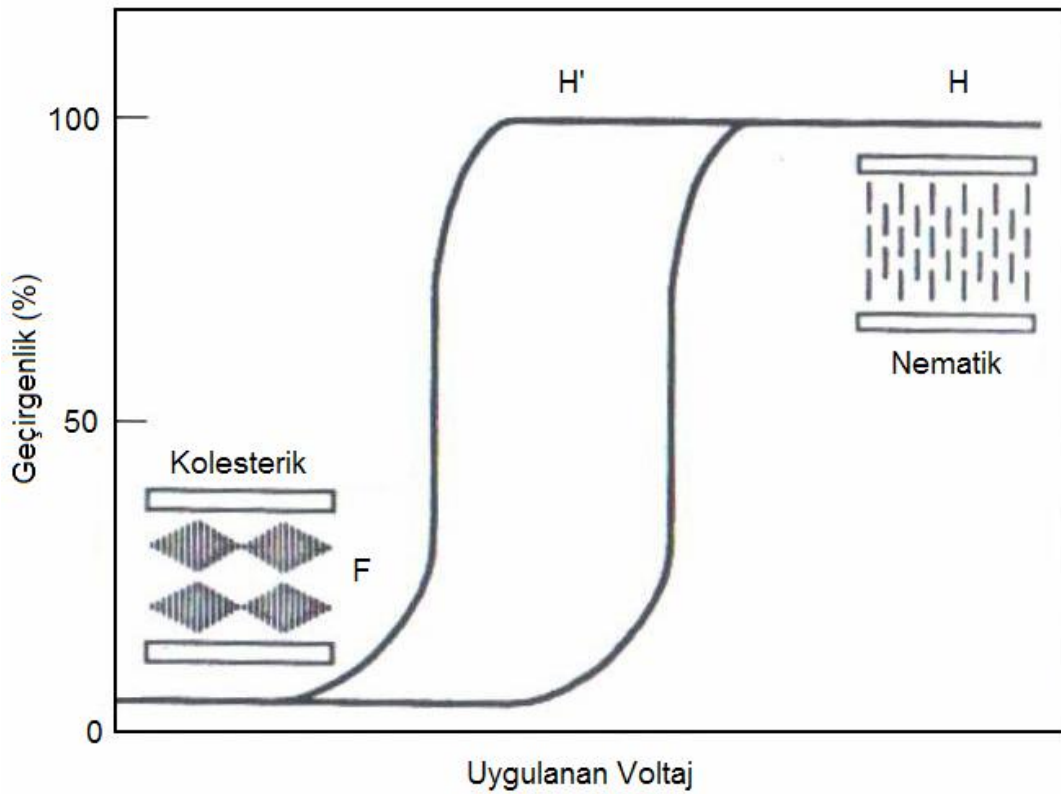
(b) Konuk-Ev Sahibi Sistemi - Alan Var

Şekil 1.32. Konuk-ev sahibi sıvı kristal sistemlerde ışığın elektrooptik modülasyonu
(a) Alanın yokluğunda; (b) Alanın varlığında (Khoo, 1993)

1.5.3. Alanla İndüklenmiş Nematik-Kolesterik Faz Geçişi (Field Induced Nematic-Cholesteric Phase Change)

Elektrik alanla indüklenmiş nematik-kolesterik faz geçişi deneysel olarak gözlenmiş olup (Wysocki ve ark., Heilmeyer ve ark.), göstergelerde kullanılmıştır (Mochizuki ve ark.). Sıvı kristal başlangıçta kristal fazda olup (şekil 1.33'de F ile gösterilmiştir) helis eksenini cam levhalara paralel olan helikal yapıya sahiptir. Gelen ışık saçılmakta ve hücre sütsü beyaz görünmektedir. Uygulanan elektrik alan 10^5 V/cm değerinin üzerine çıktığı zaman, helis yapısı bozulacak ve yönelmiş nematik faz, H, ortaya çıkacaktır. Hücre saydam görünecektir.

Voltaj düşürüldüğü zaman, ara nematik fazın, H', oluştuğu gözlenecektir (Lin-Hendel, 1982). H' fazında sıvı kristal hücrenin yüzeylerine yakın bölgelerdeki yönlendiriciler, homeotropic yönelimde kalmaya devam ederken, hacim içerisindeki yönlendiriciler eğimli düzen oluşturuyorlar. Dolayısıyla histerezis eğrisi oluşmaktadır. Uygulanan voltaj tamamen ortadan kaldırıldığında sıvı kristal yönlendiriciler birkaç milisaniye içinde başlangıç saçılma durumuna döneceklerdir (Khoo, 1993).



Şekil 1.33. Elektrik alanla indüklenmiş kolesterik-nematik faz geçişi (Khoo, 1993)

1.5.4. Mikron-Ölçekli Damlacıklardan Işık Saçılması (Light Scattering by Micron-Sized Droplets)

Polimer matris içerisinde yayılmış mikron ölçekli sıvı kristal damlacıkları görünür bölgede önemli derecede ışık saçılmasına neden oluyor (Ferguson, 1985; Doane ve ark., 1986). Voltajın kapalı olduğu durumda böylesine bir ışık saçılmasına neden olan fiziksel mekanizma, sıvı kristal damlacıkları ve ev

sahipliği yapan polimer arasındaki kırılma indisi uyumsuzluğudur. Voltajın açık olduğu durumda, damlacıklar alan yönünde yöneleceklerdir. Sıvı kristalin olağan kırılma indisi polimerin indisi ile uyum sağlamaktadır. Sonuç olarak, az miktarda saçılma gerçekleşmekte ve ışığın büyük bir kısmı geçmektedir. Bu tür elektrooptik modülasyonun avantajlarından biri, polarize ışık gerektirmemesidir (polarizör gerekmemektedir). Dolayısıyla optik verim bir hayli artmaktadır (Khoo,1993).

1.5.5. Burkulmuş Nematik Efekt (Twisted Nematic Effect)

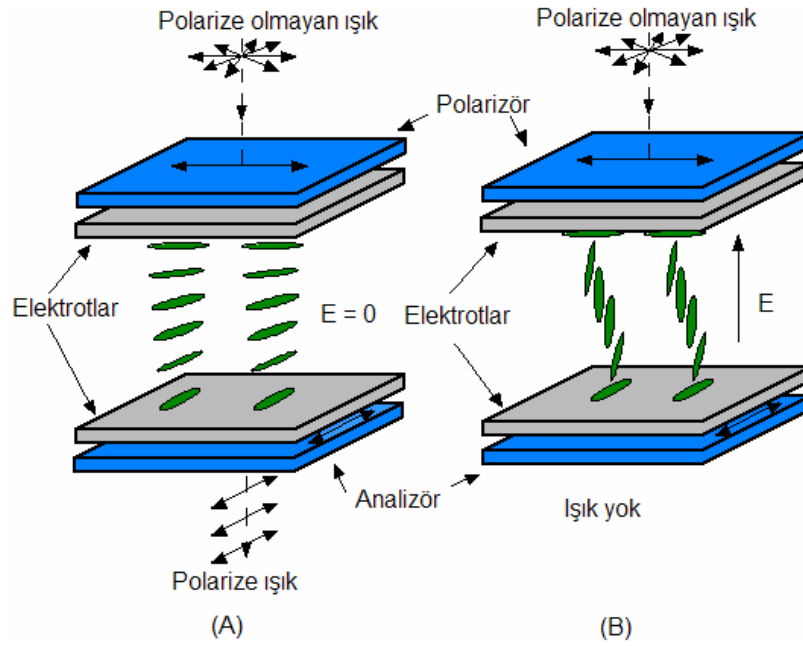
Burkulmuş nematik efekt Schadt ve Helfrich tarafından keşfedilmiş ve ilk defa 1971 yılında Fergason tarafından tanıtılmıştır. Bu burkulmuş nematik sıvı kristallerin ilk başarılı uygulaması idi. Bu ilk aygıtta sıvı kristal, çapraz polarize ediciler ve elektrotlar arasına hapsedilmiştir.

Polarize olmayan ışık, polarize edici filtreden geçerken sadece bir düzlem boyunca olan polarizasyon diğer tarafa geçebilmektedir. Birlikte kullanılan iki polarize edici, bir birilerine göre yönelmelerine bağlı olarak ışığı farklı şekilde geçirmektedirler.

Örneğin, eğer iki polarize edici, polarizasyon düzlemleri birbirine dik olacak şekilde yerleştirilmişse ışık bloke oluyor. Eğer polarize edicilerin polarizasyon düzlemleri paralel ise, birinci filtreden geçen tüm ışık ikinci filtreden de geçecektir.

Burkulmuş nematik (Twisted Nematic) hücre aşağıdakilerden oluşmaktadır:

- ◆ Her biri elektrot gibi davranan saydam iletken kaplamalı (örneğin, indium tin oxide) iki cam levha;
- ◆ Hücre aralıklarını dikkatle kontrol edebilmek için ayırıcılar;
- ◆ İki çapraz polarize edici (polarize edici ve analiz edici);
- ◆ Nematik sıvı kristal malzemesi.



Şekil 1.34. Çiftlenmiş nematik aygıt geometrisi. Direktör (yönlendirici) ile paralel yönelmiş polarize edici ve analiz edici birbirilerine diktirler.

Saydam elektrotların sıvı kristalle temas eden yüzeyleri bir yönde pürüzlülük yaratacak şekilde ince polimer tabakası ile kaplanmıştır. Nematik sıvı kristal molekülleri, uzun eksenleri bu yönde yönelecek şekilde dizilme eğilimi gösteriyorlar. Cam düzlemler, üst elektrotun hemen yanındaki moleküllerin alt elektrotun yanındaki moleküllerle doğru açı oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir (şekil 1.34.A). Her bir polarize edicinin polarizasyon eksenini hemen yanındaki elektrotun yüzeyinde oluşturulmuş pürüzlülük yönü ile aynı yönde olacak şekilde yerleştirilmiştir.

Elektrik alanın yokluğunda nematik yönlendirici, hücre içinde 90 derecelik burkulma yapıyor (Bu nedenle de "burkulmuş nematik sıvı kristal" adını almıştır). Polarize olmayan ışık birinci polarize filtreye giriyor ve sıvı kristal moleküllerinin yerel yönelimleri ile aynı düzlemde polarizasyona sahip ışık şeklinde terk ediyor. Hücre içinde sıvı kristal moleküllerinin burkulmuş düzeni daha sonra optik dalga yönlendirici (wave guide) gibi davranıyor ve polarizasyon düzlemini 90 derece döndürüyor. Neticede ikinci polarize ediciye ulaşan ışık buradan rahatlıkla geçiyor. Bu durumda sıvı kristal şeffaftır.

Elektrotlara voltaj uygulandığı zaman, sıvı kristal molekülleri elektrik alan yönünde yöneliyorlar ve hücrenin optik dalga yönlendirici özelliği kayboluyor (Şekil 1.34.B). Bu durumda hücre sıvı kristalin olmadığı durumdaki gibi siyah görünüyor. Elektrik alan kaldırıldığı zaman moleküller eski burkulmuş hallerine dönüyor ve hücre yeniden şeffaf görünüyor.

Dijital saatler ve hesap makinelerinde alttaki polarize edicinin altına ayna yerleştirilmiştir. Voltajın uygulanmadığı durumda ışık hücreden geçerek aynadan yansıyor, böylece yönünü ters çevirerek hücrenin tepesinden geri çıkıyor ve gümüşümsü görüntü ortaya çıkıyor. Elektrik alan uygulandığı zaman, elektrik alanı ile aynı yönde yönelmiş sıvı kristal molekülleri ışığın polarizasyonunu etkilemiyor. İkinci polarize edici gelen ışığın aynaya ulaşmasını engelliyor. Yansıyan ışık olmadığı için hücre siyah (karanlık) görünüyor. Elektrotlar, rakamların veya harflerin parçaları şeklinde iseler, alfa-nümerik göstere oluşturacak şekilde açılıp kapatılabilir. Bu tür pasif göstergeler ışıklandırma yardımı ile yalnız başına çalışabilmektedir ki, bu da anları batarya ile çalışan aletler için ideal yapmaktadır.

2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

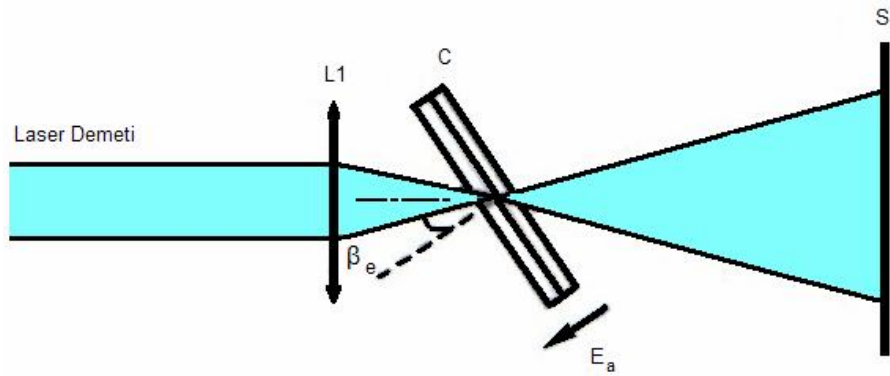
Song ve Lee'nin (2006) bildirdiğine göre, Zolotko ve arkadaşları (1980) nematik sıvı kristal hücre üzerine odaklanmış lazer demetinin gönderilmesi sonucu çoklu kırınım halka-desenlerinin (multiple diffraction ring-pattern) indüklendiğini rapor etmiştir. Dielektrik anizotropiden dolayı Freedericksz eşik değerinin üzerinde bir değere sahip elektrik alanının nematik sıvı kristal hücrenin moleküllerini yeniden yönlendireceği iyi bilinmektedir. Freedericksz eşik değeri, elektrik alanının, sıvı kristal hücre moleküllerinin yönelimini değiştirdiği değerini ifade etmektedir. Uygulanan elektrik alanının belirli bir eşik değerinin üzerinde iken domenler de (domains) oluşabileceği ve kuvvetli bir şekilde ışık saçılmasına neden olacağının Williams tarafından gözlemlendiği de Song ve Lee tarafından rapor edilmiştir. Bununla birlikte nematik sıvı kristal hücresi üzerinde elektrik alanının etkileri özellikle de pozitif dielektrik anizotropi ve homeotropik yönelim tam olarak anlaşılmamıştır (Medya ve ark., 1999). Song ve Lee (2006) homeotropik nematik sıvı kristal hücrede lazerle indüklenmiş öz-faz modülasyonuna bağlı halka deseni üzerinde uygulanan elektrik alanının etkilerinin sonuçlarını ortaya koymuşlardır. Elektrik alanın genel olarak halka deseni üzerinde iki tür etkisinin olduğunu deneysel olarak gösterdiler.

4'-(n-pentyl)-4-cyanobiphenyl (5CB) ve 4'-(n-octyloxy)-4-cyanobiphenyl (8OCB) nematik sıvı kristallerin % 65 ve % 35 oranında karıştırılması sonucu elde edilen ötektik karışım (nematik aralık: 5-50 °C) kullanılmıştır. Homeotropik dizilim, indiyum-tin oksit kaplamalı (ITO) lameller üzerinde sörfaktan (surfactant-bir sıvının yüzey gerilimini azaltan madde) octadecyltrichlorosilane sürülerek oluşturulan 100µm kalınlıklı nematik sıvı kristal hücrede elde edilmiştir. Hazırlandıktan sonra malzemenin homeotropik yönelimi çapraz-polarize optik mikroskopla da doğrulanmıştır. Deneyler sırasında ortamın sıcaklığı kontrollü olarak 24.0±0.5 °C'ta sabit tutulmuştur.

Genel olarak, elektrik alan, büyüklüğüne bağlı olarak nematik sıvı kristal hücreler üzerinde üç tür etkiye sahiptir: (1) Freedericksz eşik değerinin üzerinde bir büyüklüğe sahip elektrik alan nematik sıvı kristal hücrelerini yönlendirir; (2) Daha büyük ve yeterli değerlerde domen oluşumu ortaya çıkıyor ve bu da yoğun ışık saçılmasıyla sonuçlanıyor; (3) Daha da büyük değerlerde ise nematik sıvı kristal

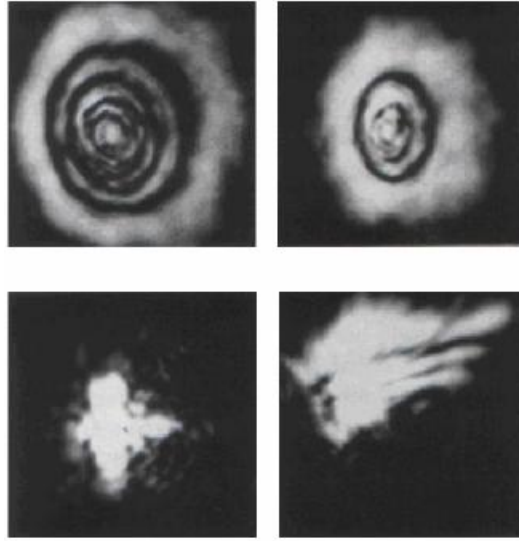
hücrede türbülant akım ortaya çıkıyor ki, bu da dinamik ışık saçılmasıyla sonuçlanıyor.

Deney düzeneği şekil 2.1’de gösterilmiştir. 8 mW gücünde ve 514.5 nm dalga boyunda Ar-iyon lazer demeti nematik sıvı kristal üzerine $\sim 120 \mu\text{m}$ çapında ve $\beta_e=30^\circ$ açıyla gönderiliyor.



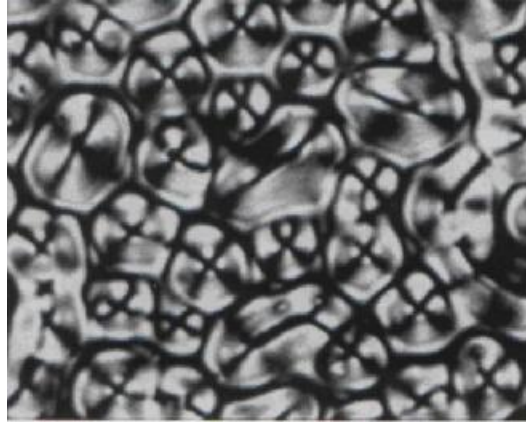
Şekil 2.1. Deney düzeneği: L1, 15 cm’lik dışbükey lens; C, nematik sıvı kristal hücre; S, ekran; E_a , uygulanan elektrik alanı; β_e , gelme açısı.

Elektrik alan uygulanmadan önce ekranda ~ 6 halka gözlenmektedir (şekil 2.2(a)). Elektrik alan uygulandığında desendeki halkaların sayıları ve boyutları küçülecektir. Bu küçülme, elektrik alanının büyüklüğü arttıkça daha da artacak ve $E_{uyg.}$ ’nın sabit değerlerinde kararlı olacaktır. Şekil 2.2(b), $E_{uyg.}$ ’nın 0’dan 200 V/cm’ye yükseltildiğinde halka deseninde oluşan değişimin tipik bir sonucunu göstermektedir. $E_{uyg.}$, 300 V/cm’ye yükseltildiğinde, halka deseni 1-2 halka olacak şekilde küçülüyor ve zaman geçtikçe şekli bozulmaya başlıyor. 6-7 dakika sonra halka deseni düzensiz kırınım desenine dönüşüyor (şekil 2.2(c)). $E_{uyg.}$, 300 V/cm’den 350 V/cm’ye yükseltildiğinde bu kırınım deseni, yoğun ışık saçılmasının eşlik ettiği kanada-benzer desene dönüşüyor (şekil 2.2(d)).



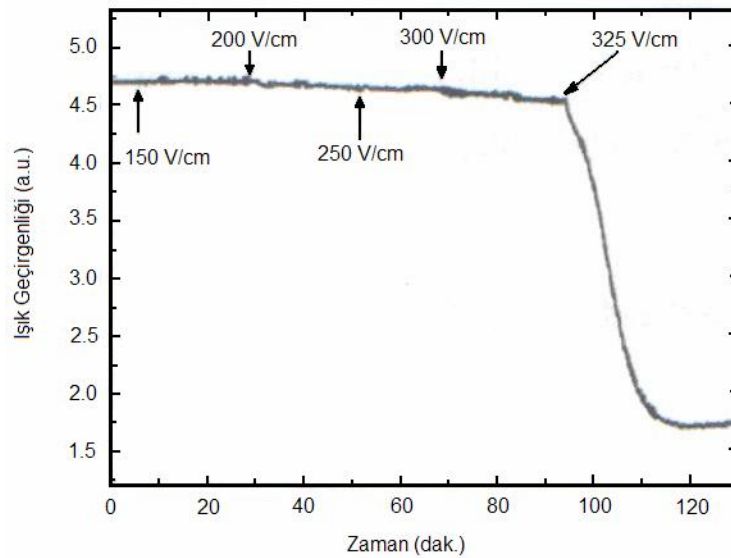
Şekil 2.2. (a) 0 V/cm; (b) 200 V/cm; (c) 300 V/cm; (d) 350 V/cm elektrik alanları uygulandığında oluşan kırınım desenleri.

Deney tekrarlanarak, $E_{uyg.}$ değıştikçe desen değışiminin yeniden oluşabileceğı (azalma veya artma) ve 300 V/cm'nin altında gözlenebilir bir histerezis oluşamayacağı görülmüştür. $E_{uyg.} > 300$ V/cm olduğunda her seferde benzer kırınım deseni değışimi ve yoğun ışık saçılması gözlenebilmesine rağmen, düzensiz şekilli kırınım deseni sürekli değıştiğı gözlenmiştir. Homeotropik nematik sıvı kristal hücrede $E_{uyg.}$, molekülleri hücre yüzeyine dik yönde yönlendireceğinden Freedericksz geçişi ihmal edilebilir. Gerçekte de $E_{uyg.}$, 300 V/cm'nin altında değışirken yapıda herhangi bir değışiklik gözlenmemiştir. Düzgün karanlık bir alan görünmektedir. $E_{uyg.}$ yükseltilerek 325 V/cm'nin üzerine çıktığında karanlık bölge değışmeye ve titreyen ışık deseni gözlenmeye başlamıştır ki, bu da malzemede kolektif molekül hareketinin ortaya çıktığını gösteriyor. $E_{uyg.}$ 'yı daha fazla yükselterek 800 V/cm'ye çıkartılması yoğun molekül hareketine ve konvektif akımlara neden olmuştur. $E_{uyg.} = 325$ V/cm'yi 2-3 dakika süreyle uyguladıktan sonra bölgesel bal peteğine-benzer domenler görünmeye başlamıştır. 8-9 dakika sonra 60 ile 100 μm arasında değışen boyutlara sahip domenler tüm hücre boyunca dağılmış ve kararlı domen yapı oluşmuştur. Şekil 2.3'te $E_{uyg.} = 325$ V/cm'de oluşan domenler gösterilmiştir.



Şekil 2.3. $E_{uyg.}=325$ V/cm elektrik alanında nematik sıvı kristal (NSK) filminin bal-peteğimsi domenleri.

Uygulanan elektrik alanının ($E_{uyg.}$) fonksiyonu olarak geçen ışık şiddeti ölçümleri şekil 2.4'te gösterilmiştir. $E_{uyg.} < 300$ V/cm için geçen ışık şiddeti hemen hemen sabittir ve $E_{uyg.} = 325$ V/cm olduğunda % 60'ı saçılmıştır ve ışık saçılmasının kararlı hale gelmesi için gereken zaman, şekil 2.4'ten da görüldüğü gibi 8 dakika olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.4. Uygulanan elektrik alanının ($E_{uyg.}$) fonksiyonu olarak geçen ışık şiddeti.

Geleneksel burkulmuş nematik yapı (Schadt ve Helfrich, 1971) paralel cam levhalar arasındaki nematik sıvı kristal filminden oluşmaktadır. Cam levhaların yüzeyi, moleküller yüzeye paralel bir şekilde yönelirken film içinde 90°'lik dönme

gerçekleştirecek şekilde işlenmiştir. Gooch ve Tarry (1975) sıvı kristal burkulmuş nematik yapının, geleneksel olarak 90°'lik açıdan farklı burkulma açıları ile elde edilebileceğini gösterdiler. Burkulmuş nematik yapı, kolesterik yapıya benzerdir. Aralarındaki önemli fark ise burkulmuş nematik yapıda toplam burkulma açısı film yüzeyleri ile belirlenirken, kolesterik yapıda dönmenin adım uzunluğunu malzemenin fiziksel özellikleri belirlemektedir.

Pratikte filmin çıkış yüzeyindeki yönlendiriciye dik yönelmiş polarizörden geçen ışık şiddetinin

$$T = \frac{\sin^2 \left[q(1+u^2)^{1/2} \right]}{(1+u^2)} \quad (2.1)$$

formülü ile verildiğini varsaymak oldukça kullanışlıdır. Burada $u = \frac{pd\Delta n}{ql}$ ve θ burkulma açısı, d hücrenin kalınlığı, Δn nematik malzemenin kırılma indisinin anizotropisi ve l geçen ışığın dalga boyudur. Şekil 2.5'te çizilmiş olan denklem (2.1) geçirgenliğin dalga boyu ile salınım yaptığını öngörmektedir. Dalga boyu azaldıkça bu salınımların genliği azalmakta ve kısa dalga boylarında geçirgenlik sıfıra gitmektedir. T 'nin sıfır ve maksimum değerleri:

$$q(1+u^2)^{1/2} = m \frac{p}{2} \quad (2.2)$$

İle verilmiştir. Burada m tamsayıdır. Çoğu zaman u oldukça büyük olup (2.2) denklemi:

$$q \cdot u = m \frac{p}{2} \quad (2.3)$$

Olarak yazılabilmektedir.

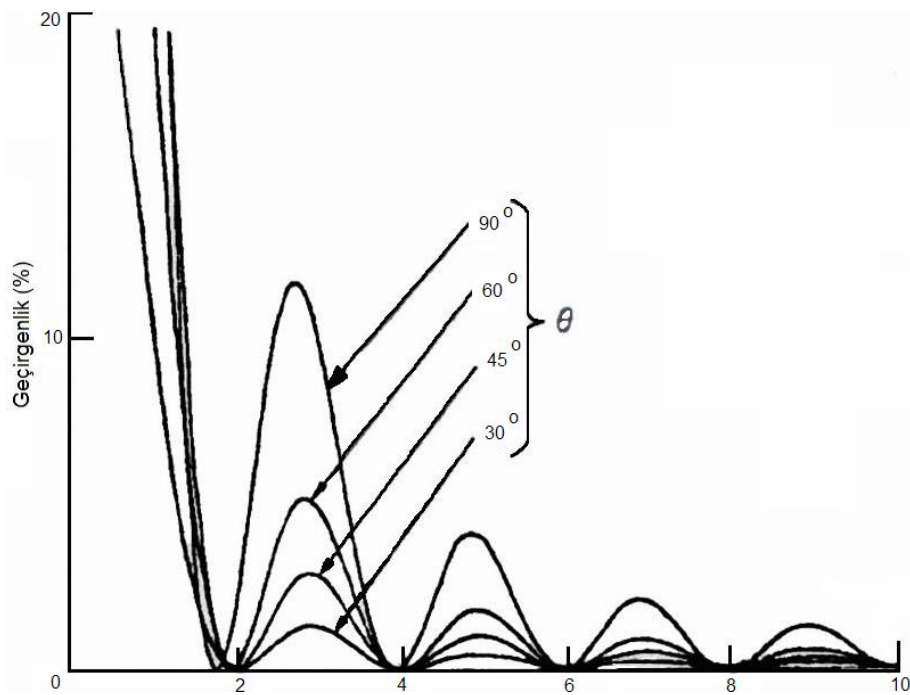
Dolayısıyla geçirgenliğin sıfır değerleri için

$$\frac{2d\Delta n}{l} = m \quad \begin{cases} T = 0 \\ m = \text{çift} \end{cases} \quad (2.4)$$

Ve maksimum değerleri için

$$\frac{2d\Delta n}{l} = m \quad \begin{cases} T = T_{\max} \\ m = \text{tek} \end{cases} \quad (2.5)$$

Dolayısıyla burkulmuş nematik yapının ideal davranışının $l \ll pd\Delta n$ olduğu durumda $u \otimes \mathbb{Y}$ durumunda gerçekleşmesine rağmen, geçirgenliğin sıfır değerleri dalga boyunun denklem (2.4) ile verildiği belirli değerlerinde gerçekleşiyor.



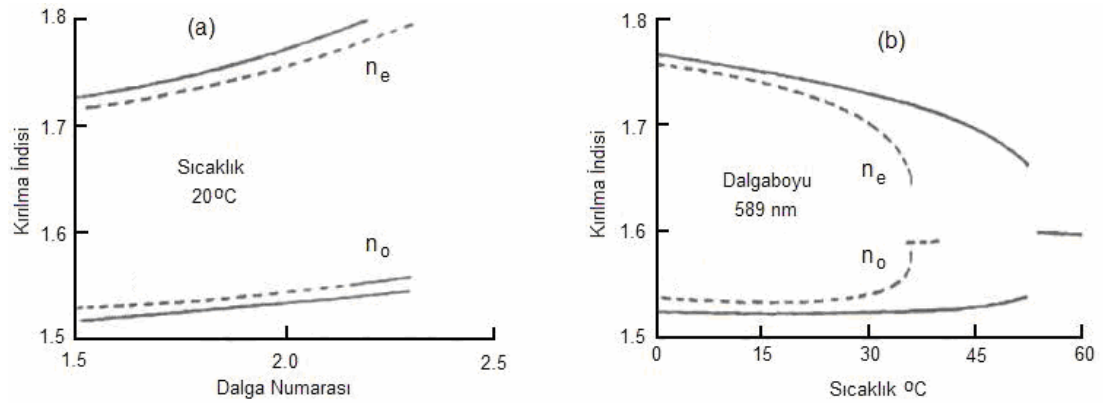
Şekil 2.5. Burkulmuş nematik yapının geçirgenliğinin (teorik) $2\theta u/\pi$ 'nin ($=2d\Delta n/\lambda$) fonksiyonu olarak grafiği.

Kalınlıkları 6 μm ile 25 μm arasında değişen ve burkulma açıları 90, 60, 45 ve 30° olan birkaç sıvı kristal (SK) hücre hazırlanmıştır. Bu hücrelerin yönelimleri Janning (1972) ve Guyon ve ark. (1973) tarafından tanımlanan eğimli buharlaştırma yöntemi ile oluşturulduğunu Gooch ve Tarry (1975) rapor etmişlerdir. SiO₂ normale 60° açıyla buharlaştırıldığında, gerçek homojen yönelim elde edilir ki, burada moleküller yüzeye paralel dizilmişlerdir.

Kullanılan SK malzeme Gray ve ark. tarafından tanıtılan (1973) cyanobiphenyl bileşiklerinin ötektik karışımıdır:

- 4 - pentyl – 4 – biphenylcarbonitrile (5CB);
- 4 - pentyloxy – 4 – biphenylcarbonitrile (5OCB);
- 4 - heptyloxy – 4 – biphenylcarbonitrile (7OCB);
- 4 - octyloxy – 4 – biphenylcarbonitrile (8OCB);

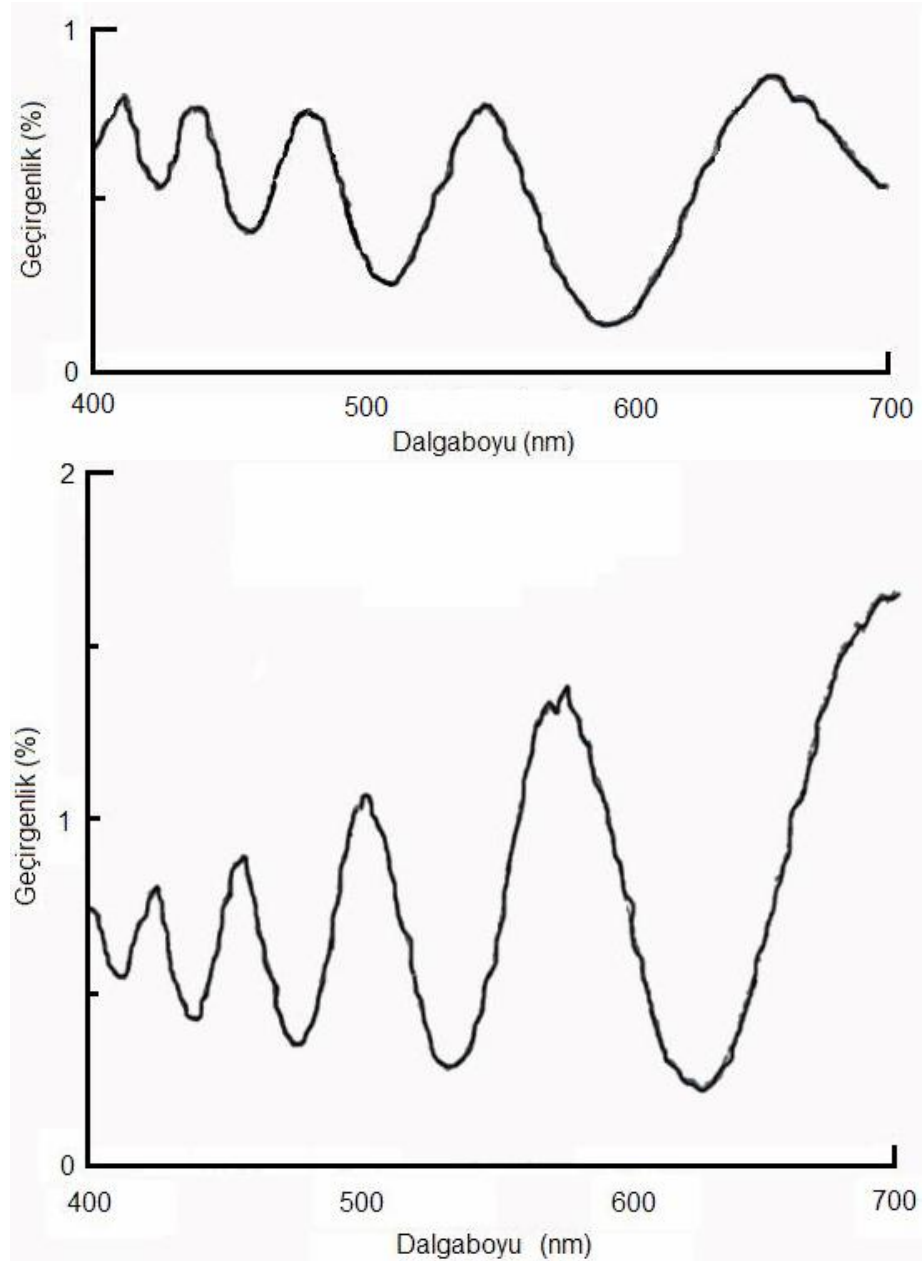
Karışım -2’den +54°C’a kadar nematik sıcaklık aralığına sahiptir.



Şekil 2.6. Biphenyl ötektik karışımı (—) ve 4-pentyl-4-biphenylcarbonitrile (----) için kırılma indisi verileri.

Oda sıcaklığında kırılma indisinin anizotropisi 450 nm’de 0.25’ten 650 nm’de 0.21’e kadar değişim gösteriyor.

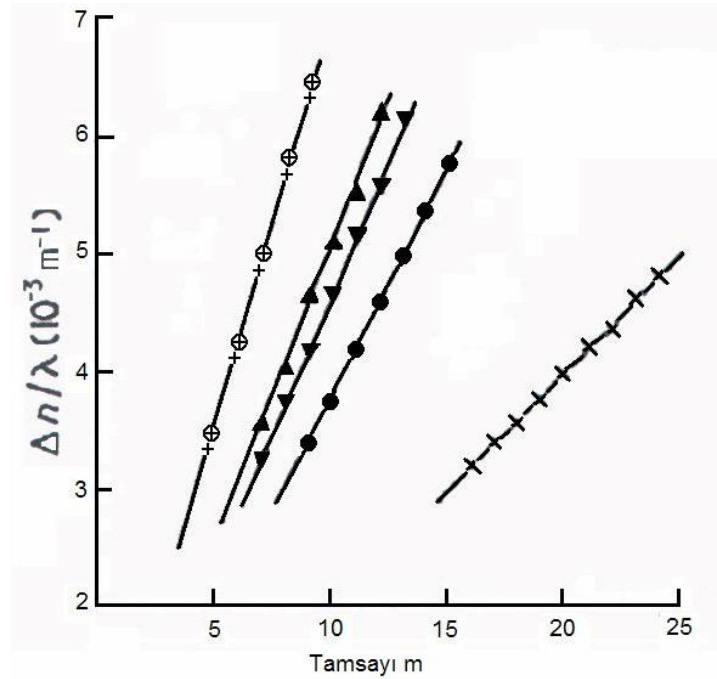
Geçirgenlik eğrileri şekil 2.7’deki gibi elde edilmiştir. Çok sayıda hücreden elde edilen sonuçlar iki genel özellik göstermiştir. Birincisi, dalga boyu değiştikçe geçirgenlik salınım yapmaktadır: dalga boyu azaldığında salınımın genliği de azalmaktadır. Bu sonuçların denklem (2.1)’in öngörülleri ile niteliksel uyum içinde olduğu görülmüştür.



Şekil 2.7. $d=9 \mu\text{m}$ kalınlığında ve $\theta=60^\circ$ ve 90° burkulma açısına sahip hücreler için geçirgenlik eğrileri.

İkincisi, dalga boyu azaldıkça geçirgenlik bileşeni artmaktadır. Genelde eğer geçirgenlik eğrisinin minimumundan geçen çizgi çizilirse, söz konusu dalga boyunda hücre kalınlığı ile lineer bir şekilde artmakta fakat burkulma açısından bağımsız kalmaktadır. Saçılma, dalga boyunun fonksiyonu olarak λ^{-4} ve λ^{-3} arasında değişmektedir.

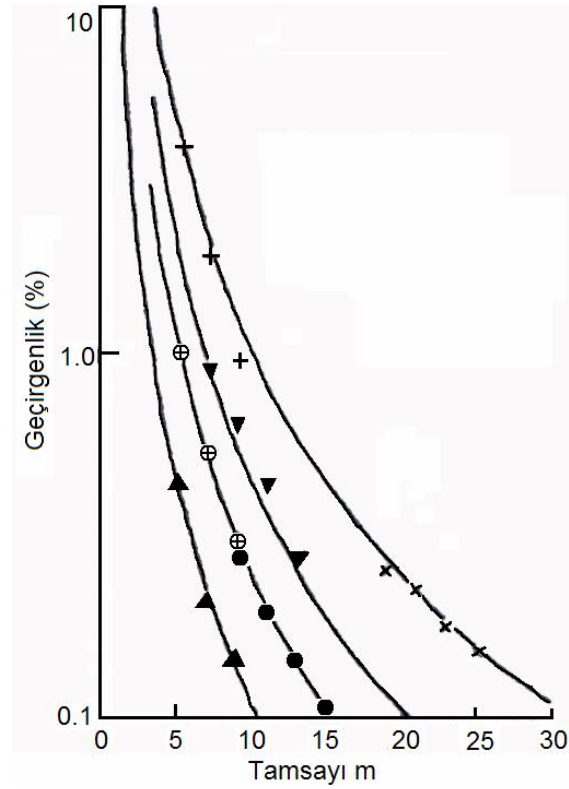
(2.3) denkleminin geçerliliğini test etmek için geçirgenlik maksimumu ve minimumunun dalga boyu pozisyonları, birkaç SK hücreleri ve uygun $\Delta n/\lambda$ değerleri için 400-700 nm dalga boyu aralığında ölçülmüştür. (2.4) ve (2.5) denklemleri herhangi SK hücresi için m değerine karşılık $\Delta n/\lambda$ 'nin çiziminin eğimi $1/2d$ olan bir doğru olduğunu öngörmektedir. Ayrıca eğer tamsayılar doğru bir şekilde seçilirse, çift tamsayıları geçirgenliğin minimumuna karşılık gelirken doğru orijinden geçecektir. Şekil 2.8, bu fazda seçilen m tamsayılarına karşılık $\Delta n/\lambda$ 'nin deneysel değerlerinin çizimini göstermektedir. Bu doğrular orijinden geçmekte ve onların eğiminden hesaplanan SK hücre kalınlıkları bilinen değerlerle iyi bir uyum sergilemektedir. Şekil 2.9'te geçirgenlik maksimumlarının deneysel değerleri m 'in tek değerlerinin fonksiyonu olarak çizilmiştir.



Şekil 2.8. Geçirgenlik eğrilerinin maksimum ve minimumlarından m 'in fonksiyonu olarak $\Delta n/\lambda$ 'nin deneysel değerlerinin değişimi.

Çizelge 2.1. Şekil 2.8'deki grafikten elde edilen d değerleri.

Hücre burkulma açısı (derece)				Nominal Kalınlık 10^{-6} m
30	45	60	90	
—	7.1 (⊕)	—	7.1 (⊕)	6
9.4 (▲)	—	100.0 (▼)	—	9
—	13.2 (●)	—	—	12
—	—	—	24.7 (✕)	25



Şekil 2.9. Geçirgenlik maksimumlarının m'in fonksiyonu olarak deneysel değerleri.

Çizelge 2.2. Şekil 2.8'deki grafikte kullanılan sembollerin anlamları.

d (10 ⁻⁶)	Burkulma Açısı (derece)			
	30	45	60	90
6	—	⊕	—	+
9	▲	—	▼	—
12	—	●	—	—
25	—	—	—	×

Aynı burkulma açısına sahip SK hücrelerinin geçirgenlik değerlerinin aynı çizgi üzerinde yer aldığı fakat hücrenin kalınlığına bağlı olarak çizginin farklı bölgelerinde bulunduğu görülmüştür. Şekil 2.9'da çizilen eğriler, m'in uygun değerlerindeki geçirgenlik maksimumlarının öngörülen değerleri kullanılarak çizilmiştir. Bu eğrilerin deneysel değerlerle iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar geçirgenliğin mutlak değeri kadar, aydınlatılmış ve karanlık bölge geçirgenlik oranının (contrast ratio) da önemli olduğu bazı özel aygıtlar için oldukça önemli bir olgudur.

Eğer aygıtın geniş spektral aralıkta çalıştığı düşünülürse bulanık (veya mat) durumda efektif geçirgenlik denklem (2.1) ile öngörülen geçirgenlik değerinin ortalamasının alınması ile elde edilir. $\sin^2 \left[q(1+u^2)^{1/2} \right]$ Teriminin ortalamasını alınırsa:

$$T_1 \cong \frac{1}{2} \frac{1}{1+u^2} \cong \frac{q^2}{2} \left(\frac{p^2 d^2 \Delta n^2}{l^2} + q^2 \right)^{-1} \quad (2.6)$$

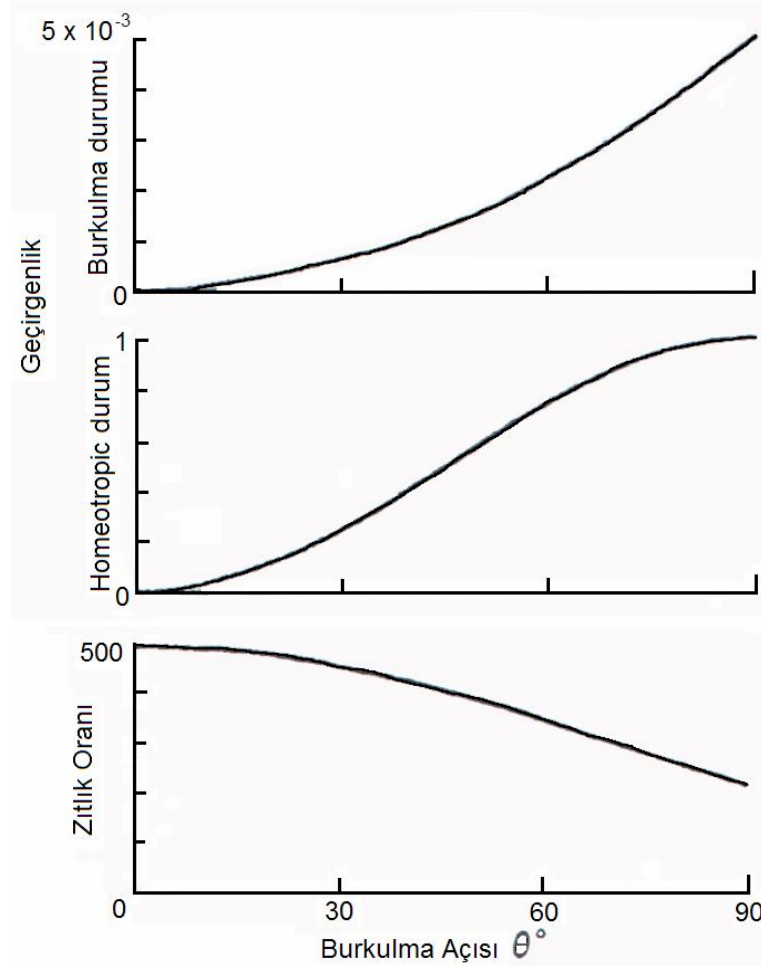
Homeotropik durumda geçirgenlik, $\theta+90^\circ$ 'lik açıyla eğimli polarizör çiftlerinden geçen geçirgenlikle verilmiştir:

$$T_0 \cong \sin^2 q \quad (2.7)$$

Dolayısıyla aydınlatılmış ve karanlık bölge geçirgenlik oranı, R:

$$R \cong 2 \frac{\sin^2 q}{q^2} \left(\frac{p^2 d^2 \Delta n^2}{l^2} + q^2 \right) \quad (2.8)$$

$\Delta n=0.25$, $\lambda=500$ nm ve $d= 10$ μm değerleri için denklem (2.6), (2.7) ve (2.8) şekil 2.10'da çizilmiştir.



Şekil 2.10. Burkulmuş ve homeotropik durumlarda geçirgenlik ve burkulma açısının, θ , fonksiyonu olarak aydınlatılmış ve karanlık bölge geçirgenlik oranı.

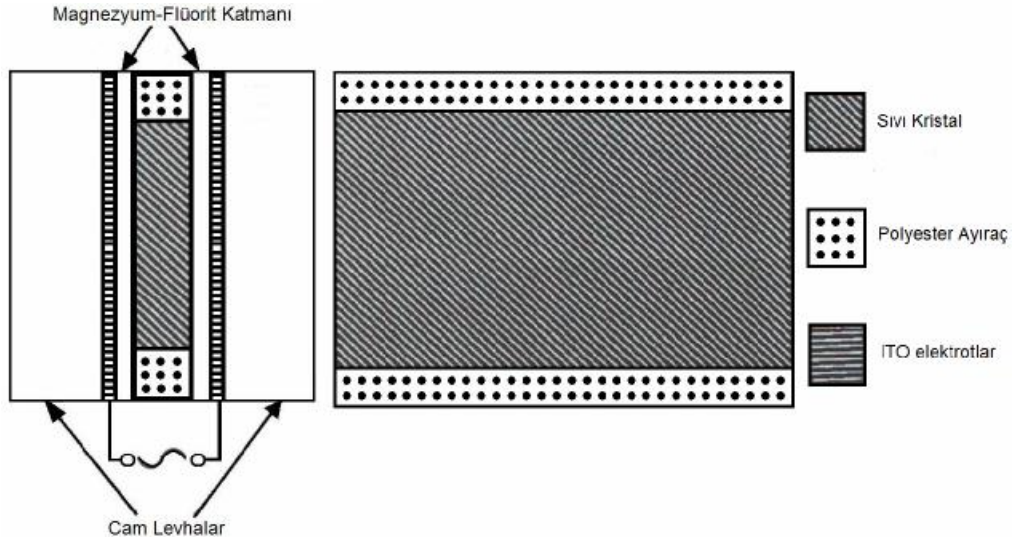
Şekil 2.10'dan da görüldüğü gibi aydınlatılmış ve karanlık bölge geçirgenlik oranı, θ azaldıkça artmaktadır. Geleneksel olarak pratik durumda, 45°'lik burkulma açısındaki aydınlatılmış ve karanlık bölge geçirgenlik oranı, 90°'lik burkulma açısındakinden 2 kat daha fazladır. $\theta \rightarrow 0$ limitinde, bu oran $2 (\pi d \Delta n / \lambda)^2$ 'nin maksimum değerine doğru gitmektedir fakat bu geçirgenliğin sıfır olduğu çözümsüz

ve pratik olmayan duruma tekabül ediyor. Alternatif bir durum ise burkulma açısını 90° 'nin altında tutarken hücrenin kalınlığını azaltmaktır. Bu da iyi bilinen, burkulma açısını değiştirmeden ve aydınlatılmış ve karanlık bölge geçirgenlik oranını azaltmadan hücrenin yanıt verme zamanlarını (response time) azalması avantajıdır.

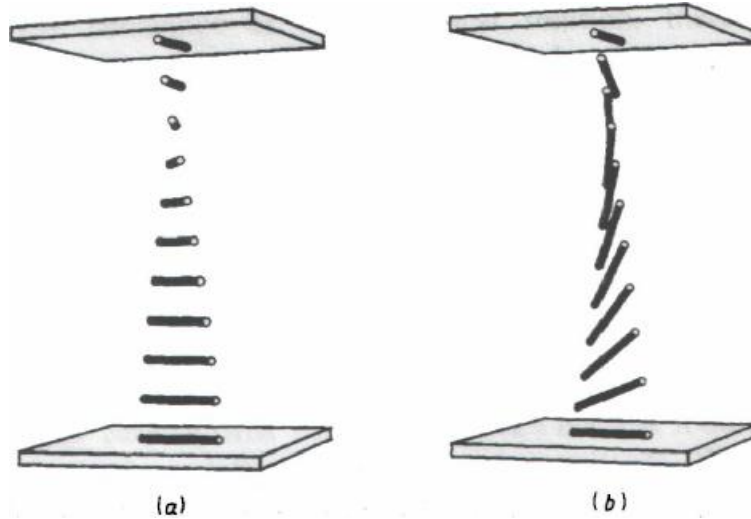
90° 'nin altında burkulma açısına sahip hücrelerin ikinci önemli özelliği ise ters yönde burkulma alanlarının oluşmasıdır. Geleneksel 90° 'lik açıya sahip aygıtlarda burkulma yapısı sol-yönlü veya sağ yönlü olabilir. Bu durumda zıt burkulmaya sahip alanlar arasında kusurlar görülmektedir. Çoğunlukla bu sorunun burkulma açısının yönünü belirlemek için kolesterik malzeme eklenerek üstesinden gelinmektedir. Bununla birlikte, 90° 'nin altında burkulma açısına sahip hücrelerde zıt burkulma yapıları θ veya $\theta-180^\circ$ açısına sahiptirler. Bunlar dejenere değildir ve sadece θ açısına sahip yapılar oluşmaktadır.

MacGregor (1988), burkulmuş nematik konuk-ev sahibi sıvı kristallerin optik özelliklerinin modellenmesini çalışmıştır. Konuk-ev sahibi sıvı kristallerde az miktarda dikroik boya (konuk) nematik sıvı kristalde (ev sahibi) çözünmüş olup boya öyle seçilmiştir ki, maksimum soğurma eksenini yönlendiriciye paralel yönelmekte ve nematik sıvı kristalin viskoelastik ve dielektrik özellikleri değişmemektedir. Burkulmuş nematik sıvı kristallerde dielektrik ve optik anizotropi, hücreden geçen ışığın modüle edilmesi için kullanılmaktadır. Şekil 2.11'de sıvı kristal (SK) hücrenin nasıl yapıldığı şematik olarak gösterilmiştir. Hücrenin özellikleri ise tablo 2.1'de gösterilmiştir. Saydam ve iletken indiyum tin oksit (ITO) levhaları SK hücreye voltaj uygulanmasına imkân sağlamaktadır. Magnezyum-flüorit, yüzey normaline otuz derecelik bir açıyla eğimli olarak hücre duvarlarına püskürtülmüş (buharlaştırma yöntemi ile) ve 120 ± 10 nm kalınlıktadır. Polyester levha hücre duvarları arasında ayırıcı oluşturmak için kullanılmıştır. Hücre kohezyon kuvveti ile Roche LC-1263 karışımı ile doldurulmuştur. Hücre, yönlendirici ön ve arka düzlemlere dik olacak şekilde toplanmıştır. Magnezyum-flüorit katmanlarının yapısı hücre duvarlarına yakın SK moleküllerinin yönlenmesine ve sonuçta burkulmuş yönlendirici yapılandırmasının oluşmasına neden oluyor. SK hücre, nematik-izotropik geçiş

sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa kadar ısıtılıp daha sonra soğumaya bırakıldığında, tüm hücre boyunca düzgün burkulmuş nematik yapı oluşuyor (Şekil 2.12(a)).



Şekil 2.11. Sıvı kristal hücrenin yandan ve üstten şematik olarak gösterimi.



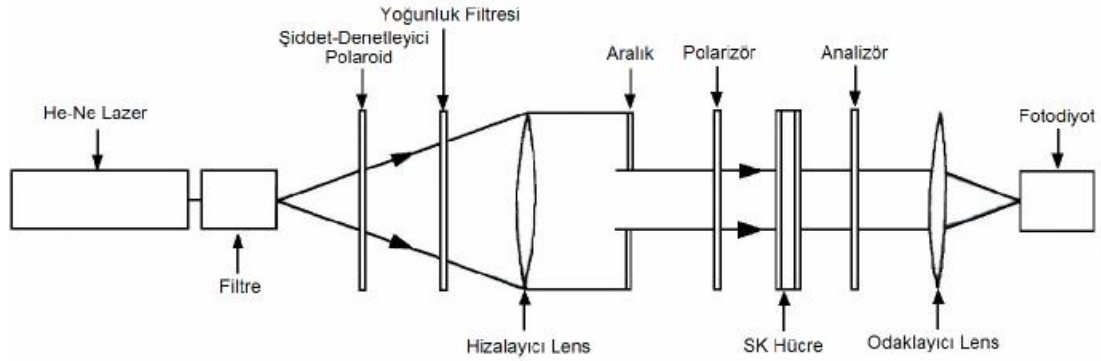
Şekil 2.12. (a) $U \leq U_T$ ve (b) $U = 2U_T$ uygulanan alanlarda burkulmuş nematik yönlendirici yapılandırılması.

ITO elektrotlarına, U_T eşik voltaj değerinin üzerinde bir voltaj uygulanırsa, yönlendirici yapılandırması bozulmaktadır (Şekil 2.12 (b)). Eşik değerinin altında bir voltaj uygulandığında ise ön yüzeydeki yönlendiriciye paralel polarize olan lineer polarize ışık hücreye nüfuz ederek düzgün burkulmuş yapı boyunca yönlendirilmekte

ve konuk boya molekülleri tarafından güçlü bir şekilde soğurulmaktadır. Bununla birlikte eşik voltaj değerinin üzerindeki voltajlarda moleküller hücre duvarlarına paralel yönlenmemektedir. Dalga yönlendirme özelliği ortadan kalktığından ve boya moleküllerinin soğurması azaldığından ışık geçirgenliği artmaktadır.

SK hücrenin optik özellikleri Maxwell denklemlerinin çözülmesi ile elde edilir. MacGregor'un (1988) bildirdiğine göre, Berreman (1973), izotropik ortam için geçen ve yansıyan elektromanyetik alanların, SK üzerine gönderilen enine elektromanyetik alanı tanımlayan 4 vektör üzerinde işlem yapan 4×4 öteleme matrisini kullanarak nasıl hesaplanabileceğini göstermiştir. Yine MacGregor (1988) Montgomery'nin (1980), bu metodu hücredeki izotropik katmanları hesaba katmak için genişlettiğini bildirmiştir. Pratikte çözüm, bilgisayarlarda yapılabilir. Bunun için etkin bir yol SK katmanını ince dilimlere bölmektir. Daha sonra öteleme matrisi her bir dilim için hesaplanarak, SK katmanının tümü için öteleme matrisinin hesaplanması için çarpılacaklardır. Öteleme matrisinin elemanları kalın katmanlara göre ince dilimler için çok daha hızlı yakınsayan kuvvet serilerinin açılımı olduğundan bu yöntem, sıvı kristali tek kalın katman olarak işlemekten çok daha etkili bir yöntemdir. Konuk-Ev sahibi sıvı kristallerinin optik özelliklerini tanımlamak için dikroik boyanın neden olduğu soğurmayı hesaba katmak gerekiyor. Born ve Wolf (1980) bunu yapmanın basit yolunun, sanal bileşenleri doğrudan soğurma katsayıları ile orantılı olan karmaşık (complex) kırılma indisleri kullanarak Maxwell denklemlerini yazmak olduğunu rapor etmişlerdir (MacGregor, 1988). Maxwell denklemlerinin karmaşık sürümü kullanıldıktan sonra Berreman'ın yöntemi takip edilebilir. Çözüm şeklinin soğurmanın olmadığı durumdan tek farkı reel kırılma indislerinin karmaşık kırılma indisleri ile değiştirilmesidir. Kaplayıcı cam, ITO ve magnezyum-flüorit katmanları için de öteleme matrisleri hesaplanır. Bu matrisler birbirleriyle çarpıldıktan sonra, sıvı kristal katmanının öteleme matrisi ile çarpılır ve nihai vektör elde edilir. Yansıyan ve geçen elektromanyetik alanlar nihai vektörden elde edilirler.

Deneyisel çalışmalar için kullanılan optik platform şekil 2.13'te gösterilmiştir. 5 mW'lık He-Ne lazer kaynağından yayılan ışık demeti filtreden geçtikten sonra lensle paralel duruma getirilmektedir.

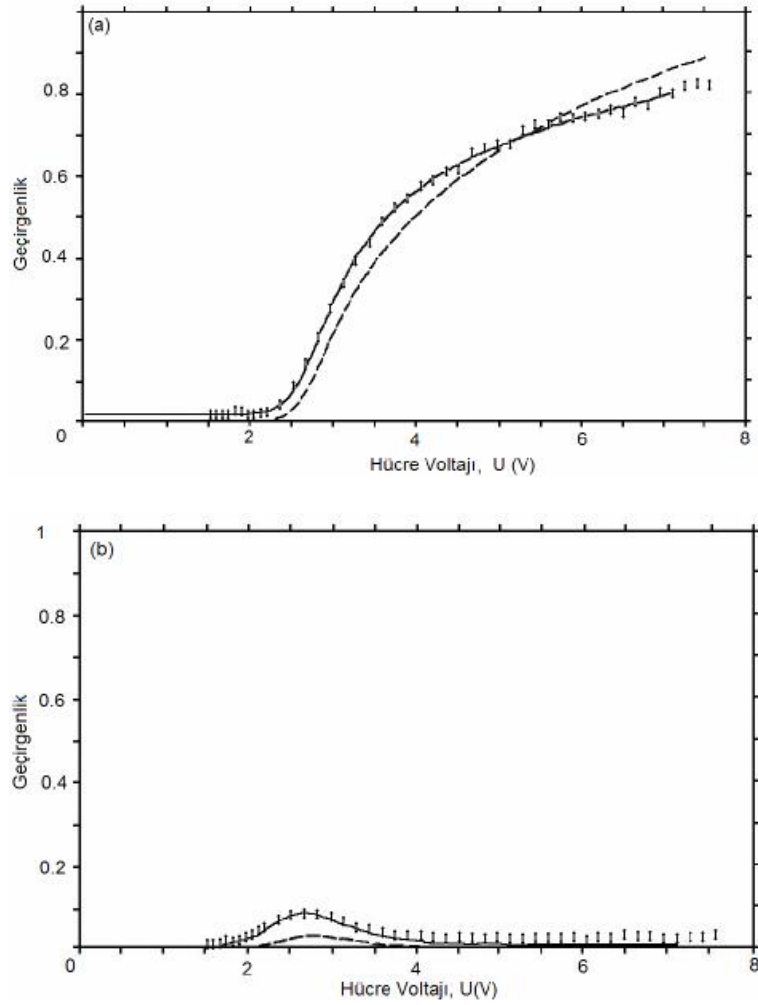


Şekil 2.13. SK hücre için optik platform.

Işık demetinin çapı aralıktan (aperture) geçtikten sonra 3 mm'ye düşüyor ve daha sonra demet polarizörden geçerek SK hücreye giriyor. SK hücreden geçen ışın ikinci polarizörle analiz edildikten sonra ikinci lens geçen ışık demetini foto diyot üzerine odaklıyor.

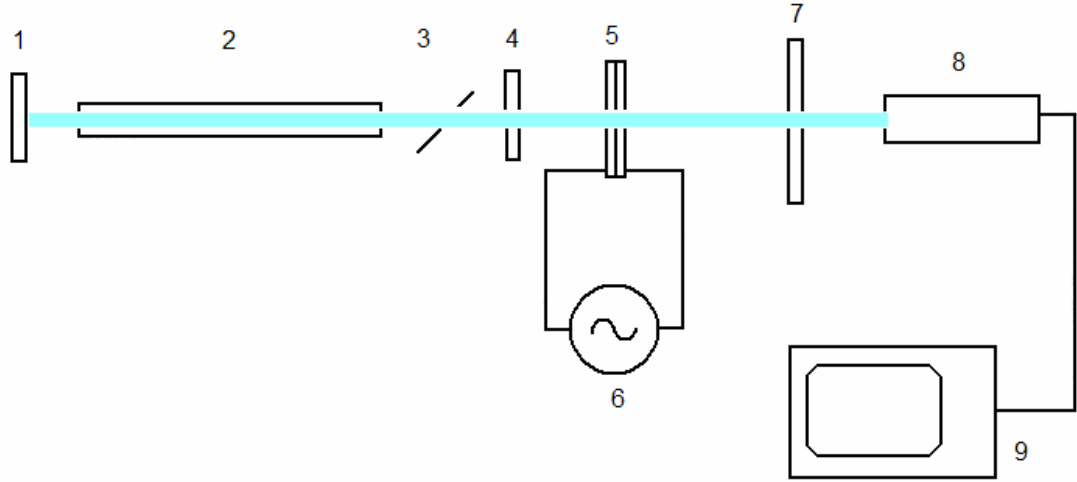
13 μm 'lik konuk-ev sahibi sıvı kristalinin geçirgenliğinin deneysel sonuçları ve moleküler düzensizlik düzeltmesinin (molecular disorder correction) olduğu ve olmadığı durumda teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar şekil 2.14 (a) ve (b) 'de birbirine paralel ve dik yönelmiş polarizörler için çizilmiştir. Düzeltmenin olduğu durumda, düzeltme faktörü, σ , 1.2 olarak seçilmiştir.

Moleküler düzensizlik düzeltmesinin olduğu durumda teori ve deney arasında uyumun önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Yüksek voltajlarda, düzeltmenin olduğu modelde öngörmede küçük sistematik hata olduğu görülmüştür. Bunun, yönelimsel dalgalanmaların elektrik alanından kaynaklanmadığı varsayımından dolayı ortaya çıktığı düşünülüyor. Pratikte, uygulanan alanın artması bu dalgalanmaları bastırmaktadır ve düzeltmenin olmadığı model daha gerçekçi sonuçlar vermektedir.



Şekil 2.14. (a) paralel; (b) dik polarizörler kullanılarak SK hücreden geçen ışık şiddeti. Sürekli eğri deneysel sonuçları, kesikli eğri düzeltmenin olmadığı modelin, çizgiler ise düzeltmenin olduğu modelin sonuçlarını göstermektedir.

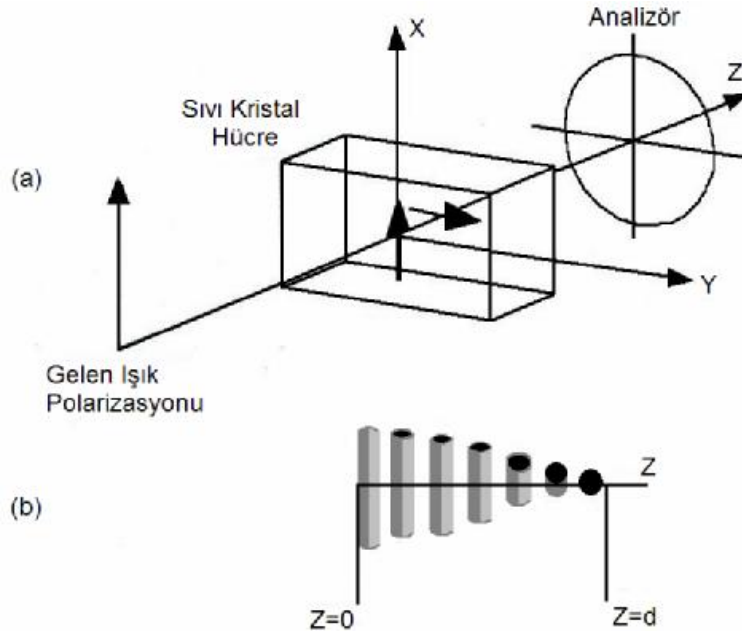
Brugioni ve Meucci (2004), orta-kızılötesi spektral bölgede lazer demetini modüle etmek için tasarlanmış burkulmuş (twisted) nematik sıvı kristal ışık modülatörü karakterize etmişlerdir. Optik özellikler ve anahtarlama süresinin (switching times) özellikleri anlatılmıştır. 10.6 μm dalga boyunda çalışmak çok sayıda sınırlamalar getirmektedir ki, bunlar dikkatli bir şekilde incelenmiştir. Özellikle de temel zorluk Mauguin şartı ($d\Delta n \gg \lambda$) sağlanmadığı için sınırlanan aygıtın geçirgenlik etkinliğidir (transmission efficiency).



Şekil 2.15. (1) Yansıma aynası; (2) Gaz tüpü; (3) Polarize edici Brewster penceresi; (4) Ayna, (5) Burkulmuş nematik sıvı kristal modülatör; (6) AC voltaj sağlayıcı; (7) Analizör; (8) HgCdTe detektörü ve (9) Dijital osiloskop.

Deney seti şekil 2.15'te gösterildiği gibidir. Işık kaynağı $10.6 \mu\text{m}$ dalga boyunda çalışan CO_2 lazeridir. Lazer ışığı $\hat{x}$ ekseninde lineer polarize olmuştur. Işık demeti sıvı kristal elektrooptik ışık modülatörüne varmadan önce serbest uzayda 1 m yol almaktadır. Hücre, $d=10.6 \mu\text{m}$ kalınlığında Mylar ayırıcı (spacer) ile ayrılmış 4 mm kalınlığında germanyum levhalardan oluşmuştur. Bu iki levha sıvı kristalin yapışkan ile kirlenmesinden kaçınmak için yapışkan ile değil de mekanik yolla birbirinin üzerine oturtulmuştur. Hücre E7 (4-pentyl-4'-cyanobiphenyl ve tryphenyl karışımı) maddesi ile doldurulmuştur. Bu sıvı kristal malzeme oda sıcaklığında nematik faz ve pozitif dielektrik anizotropi sergilemektedir. $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ dalga boyunda ve $T=25^\circ\text{C}$ sıcaklıkta E7'nin kırılma indisi $n_o = 1.49$ ve $n_e = 1.69$ olup $dn = n_e - n_o = 0.2$. Ge levhaların yüzeyleri çok ince polimer PAA (poly(acrylic asit)) katmanı ile kaplanmıştır. Bu katman moleküllerin Ge levhalara paralel yönelerek homojen yönelimin oluşması için tek yönlü bir şekilde sürülmüştür (rubbed). Yönelimin kalitesi polarizasyon mikroskobu ile test edilmiştir. İki, sürülmüş Ge levha 70° 'lik burkulma açısı oluşturacak şekilde monte edilmiştir. Hücre, nematik sıvı kristal (NSK) ile doldurulduktan sonra burkulma açısı 90° 'ye kadar çıkmıştır. Bu iki aşamalı dönme NSK moleküllerinin hepsinin aynı yönde

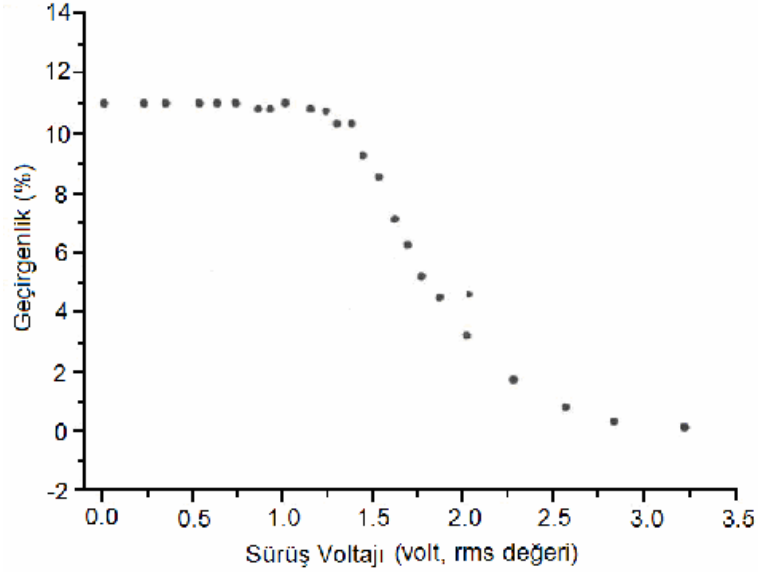
dönmesine izin veriyor. Eğer referans sistemini şekil 2.16'daki gibi alırsak yönlendirici $\hat{z}$ 'nin fonksiyonu olacaktır: $\hat{n}(z) = \cos(pz/2d)\hat{x} + \sin(pz/2d)\hat{y}$. Hücre, gelen dalganın polarizasyonu yönlendiriciye, $\hat{n}$, paralel olacak şekilde ($z = 0$) yerleştirilmiştir.



Şekil 2.16. (a) NSK yönlendirici ve polarizasyon vektörlerinin geometrisi; (b) SK hücre içerisinde moleküler burkulmanın çizimi: moleküler yönlendirici $4d$ adım uzunluğunda helis çizmektedir.

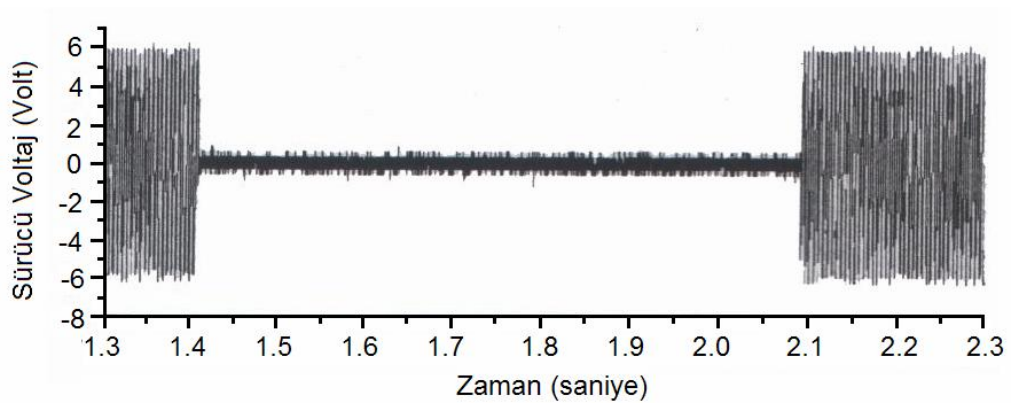
AC voltaj sağlayıcı (voltage supply), Ge levhalara dik yönde yönelmiş elektrik alanını NSK'ya uygulamak için, levhalara birleştirilmiştir. Güç kaynağının frekansı 10 kHz olup voltaj değerleri 0 ile 12 V arasında değişmektedir. Oda sıcaklığında Ge yüksek iletkenliğe sahip olması onu, kızılötesi radyasyon bölgesinde elektrot olarak kullanmak için uygun bir madde haline getiriyor. Bu dalga boyunda görünür bölge dalga boyundan farklı olarak cam levhalar kullanmak mümkün değil, çünkü cam levhalar bu bölgede tamamen bulanık görünüyorlar. Ge kullanmada geri çekilmenin esas sebeplerinden biri de onun yüksek lineer soğurma katsayısına ($a_G = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$) sahip olmasıdır ki, bu da geçirgenliği azaltmaktadır. Analizör NSK hücresinden sonra polarizöre dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Geçen ışığın zamana bağımlılığını (temporal behaviour) algılamak için HgCdTe detektörü

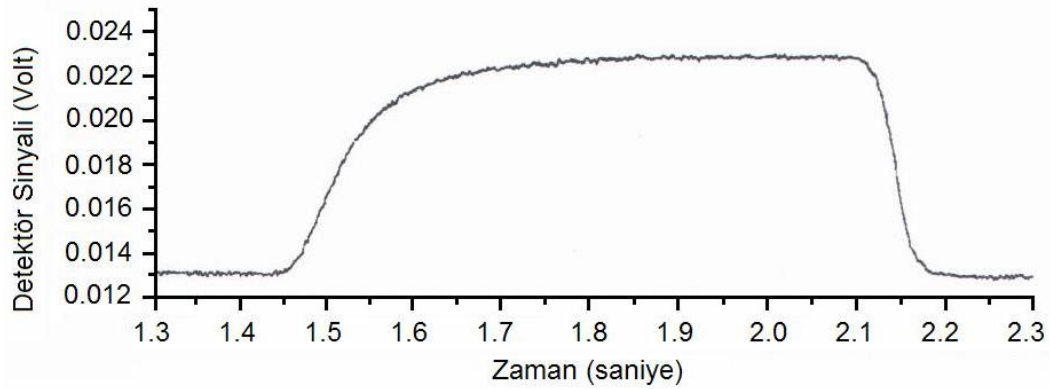
kullanılmıştır. Moleküler burkulma lineer polarize ışığın eliptik polarize olmasına neden oluyor. Analizör ise geçirgenlik eksenine paralel olan ışık bileşenini seçerek geçmesine izin veriyor.



Şekil 2.17. Sürüş (rms) voltaja karşılık ışık geçirgenliği. Geçen ışık şiddeti, modülatör üzerine düşen ışık şiddetine göre normalize edilmiştir.

Elektrooptik aygıtlar için karakteristik anahtarlama zamanlarının bilinmesi oldukça önemlidir. Sürüş voltajı (driving voltage) kapatıldıktan sonra ışık sinyalinin maksimum değerinin %10'una yükselmesi için gereken zaman, τ_g , gecikme zamanı ölçülmüştür: $\tau_g = 72 \pm 4$ ms (şekil 2.18).





Şekil 2.18. Elektrik alan uygulandığı ve uygulanmadığı durumda aygıtın zamana bağlı davranışı.

Diğer karakteristik zaman ise yükselme zamanı, τ_y , olup sürüş voltajı kapatıldıktan sonra ışık sinyalinin maksimum değerinin % 10'undan % 90'na kadar yükselmesi için gereken zaman olarak tanımlanmıştır: $\tau_y = 160 \pm 6$ ms. Sürüş voltajı açıldıktan sonra ışık sinyalinin maksimum değerinin % 90'ından % 10'una düşmesi için gereken zaman, τ_f , düşüş zamanı da ölçülmüştür. 2.14 V uygulanan sürüş voltajı için bu zaman $\tau_d = 50 \pm 3$ ms olarak bulunmuştur. En yavaş yanıt verme zamanının yükselme zamanı, τ_y , olduğu görülmüştür ki bu da teknolojik uygulamalarda sınırlayıcı zamandır. τ_y zamanı NSK moleküllerinin yeniden yönlenme dinamiğinden kaynaklanmaktadır ve NSK katmanının kalınlığına kuvvetli bir şekilde bağımlılık gösteriyor. 10 μm kalınlığındaki hücre için τ_y zamanı teorik olarak hesaplanabilir:

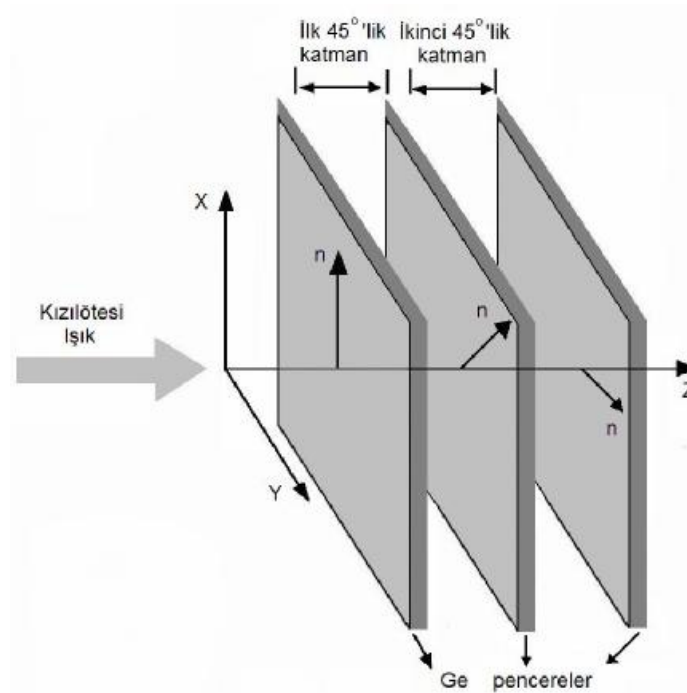
$$t_y = \frac{g_1 d^2}{\left[K_{11} + \frac{(K_{33} - 2K_{22})}{4} \right] p^2} \quad (2.10)$$

burada K_{11} , K_{22} ve K_{33} üç elastik katsayıyı, γ_1 rotasyonel viskoziteyi ve d ise hücre kalınlığını gösteriyor. $K_{11} = 9.2 \times 10^{-12}$ N, $K_{22} = 7.1 \times 10^{-12}$ N, $K_{33} = 16.2 \times 10^{-12}$ N ve $\gamma_1 = 0.15$ Pa·s değerlerini kullanarak $\tau_y = 157$ ms olarak bulunur. $d = 20$ μm kalınlık için ise $\tau_y = 627$ ms bulunur. $d = 45$ μm için (en uygun geçirgenlik) $\tau_y = 3.2$ s.

Modülatörü, daha etkin bir aygıtın bileşeni olarak nasıl kullanılacağını incelemek için çok katlı aygıt durumuna bakılmıştır. Şekil 2.19'da görüldüğü gibi çift katlı NSK aygıt incelenmiştir. Bu aygıt tek katının kalınlığı 10 μm ve her bir

kattaki burkulma açısının $\pi/4$ olduğu iki sıvı kristal hücrenin birleştirilmesi gibi düşünülebilir.

Birinci NSK katmanı için $0 < \theta < \pi/4$, ikinci NSK katmanı için ise $\pi/4 < \theta < \pi/2$. Bu aygıt, $20 \mu\text{m}$ kalınlığında ve $\pi/2$ burkulma açısına sahip tek katlı NSK hücrelerine optik olarak eşdeğerdir. Bu çift katlı aygıtın yürütülmesi için gereken tek şey, % 1'lik soğurma yapan germanyum levhasının eklenmesi olacaktır. İkinci NSK katmanı % 5 kadar daha fazla soğurmaya neden oluyor. Böyle bir aygıt için, analizörün de soğurma yaptığını hesaba katarsak, geçirgenlik % 38 olacaktır. Bu çift katlı aygıtta her bir NSK katmanının kalınlığını $20 \mu\text{m}$ alınırsa, bu değer $\cong \% 74$ 'e yükselecektir, daha önce de söylendiği gibi $\tau_y = 627 \text{ ms}$. Bu aygıtlarda anahtarlama zamanları tek katlı NSK katmanının kalınlığı ile belirlendiğinden tek elementli aygıtlardaki gibidir. Dolayısıyla geçirgenliğin etkinliği artarken anahtarlama zamanları değişmemektedir.



Şekil 2.19. Çift-katlı burkulmuş nematik sıvı kristal aygıtının çizimi. Her bir katman için burkulma açısı 45° 'dir.

Bu modülatör orta-kızılotesi lazer ışığını; mekanik bileşenleri, örneğin ışık kesici (chopper) ve mekanik kepenkler (mechanical shutters) olmaksızın modüle

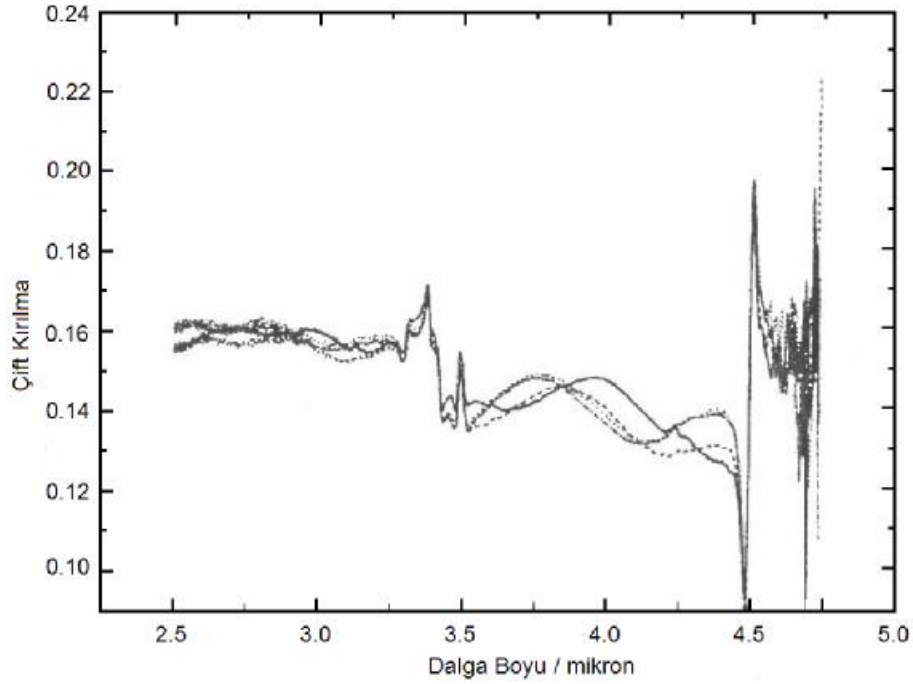
etmek için kullanışlıdır. Tek katlı hücrenin geçirgenliği oldukça düşüktür, fakat bu aygıt daha etkili modülatörler elde etmek için çok katlı NSK hücrelerinde ara basamak olarak kullanılabilir.

Diorio ve arkadaşları (2002), işlenmemiş ITO tabakaları arasına yerleştirilmiş koloidal silisyum nanoparçacıklı nematik sıvı kristaller (NSK) ve dikroik boya (dichroic dye) eklenmiş koloidal silisyum nanoparçacıklı NSK'lerin optik ve elektrooptik davranışını incelemişlerdir.

Bazı elektrooptik uygulamalarda sıvı kristallerin optik çift kırılma (Δn) değeri oldukça önemlidir. Bu çalışmadaki ölçümler oda sıcaklığında, spektrometre ve polarizörler kullanılarak yapılmıştır. Çift kırılma ölçümlerinin sonuçları şekil 2.20'de grafikte gösterilmiştir. Dört önemli gözlem yapılmıştır. Bunlardan birincisi, 3.5 ve 4.5 μm civarında karakteristik rezonans gözlenmektedir; Bu rezonanslar E7 verilerinde de (Khoo, 1993) gözlenmektedir. İkincisi, çalışma bölgesinde çift kırılma, hem saf E7 hem de E7-koloidal silisyum nanoparçacıkları karışımı için dalga boyundan bağımsızdır. Bu sonuçlar daha önce karışımı olmayan E7 için yapılan çalışmalarla uyum içinde olup % 6'dan daha az nanoparçacık karışımlarında ve kuvvetli yönelimin olduğu katmanlarda silisyum nanoparçacıklarının optik çift kırılmayı tahrip etmediğinin altını çizmektedir. Üçüncüsü, çift kırılma silisyum yoğunluğundan bağımsızdır. Bu, çift kırılmanın aygıtın çalışmasında oldukça önemli olduğu durumlarda NSK kullanımına izin vermektedir. Son olarak ise bu çalışmada elde edilen çift kırılma değerinin tahmin edilenden daha küçük (0.025) olmasıdır. Bu da numunelerin spektrometre içine tam yerleştirilmemesinden kaynaklanıyor olabilir.

Çizelge 2.3. Çalışmada kullanılan kolloidlerin karakteristiği.

Tür (Nissan)	SiO ₂ / %	Karıştırıldığı sıvı	Büyüklik / nm
MT-ST	30	Methanol	12-14
MA-ST-S	30	Methanol	8-10
MA-ST-UP	15	Methanol	Uzatılmış
ST-ZL	40	Su	70-100
AMT-130S	40	Methanol	?

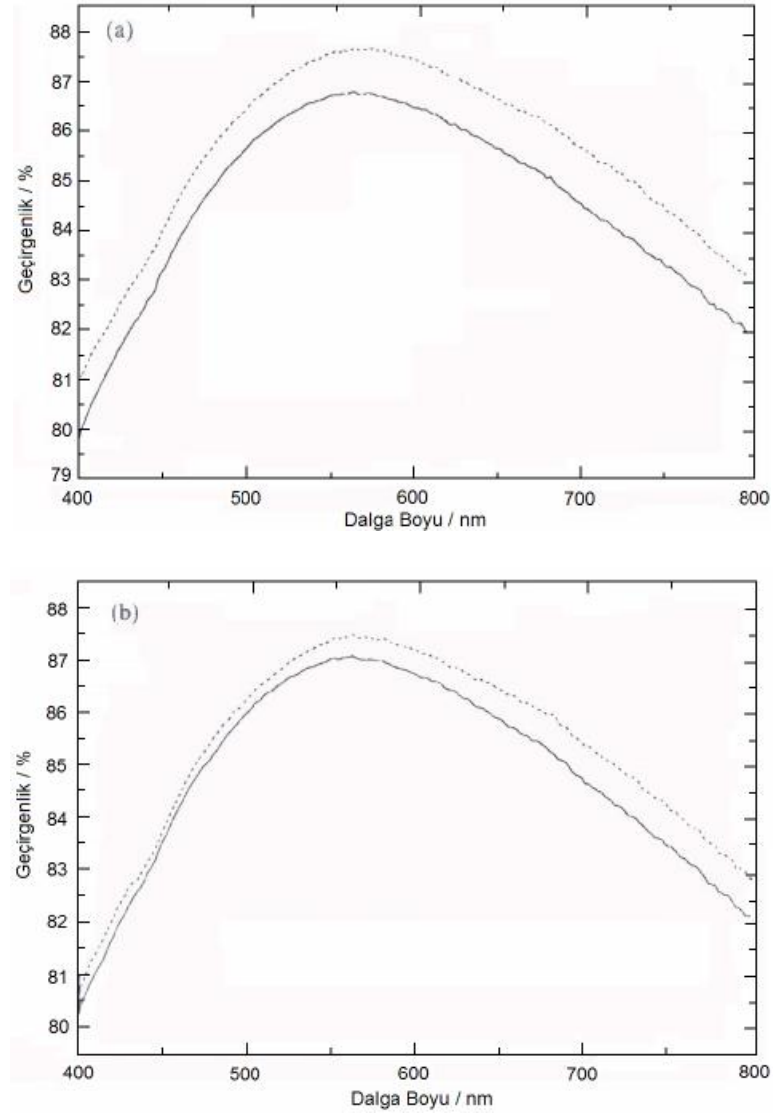


Şekil 2.20. E7 ve E7-[ST-ZL] silisyum parçacıkları karışımının yakın kızılötesi bölgesinde dalga boyunun fonksiyonu olarak grafiği (— saf E7,---- %1.3 ST-ZL,.... %3.8 ST-ZL,-.-.- %6 ST-ZL)

İki farklı, doldurulmuş NSK'den geçen ışık miktarı şekil 2.21'de grafikte gösterilmiştir. Görünür ışık bölgesinde geçirgenlikteki maksimum değişim %10'dan daha azdır. Ayrıca voltajın yokluğundaki ve varlığındaki durumlar arasındaki değişim de çok azdır.

Çeşitli sayıda ve yoğunlukta koloid kullanılmıştır. Uzatılmış yapı etkili olmamaktadır. Bununla birlikte hem küçük (MA-ST-S) hem de büyük (ST-ZL ve AMT-130 S) boyuttaki koloid nanoparçacıkları ile iyi optik performans elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, bu hücreler saçılmanın nanoparçacık yoğunluğuna bağlılığını sergilemektedir. Silisyum yoğunluğu arttıkça saçılan ışık miktarı artarak en yüksek değerini almakta ve daha sonra azalmaktadır. Maksimum saçılma, yaklaşık olarak %1-2 yoğunluk oranında gerçekleşmektedir. Böylesine bir davranış, protein çözeltilerinde de (Siezen ve ark., 1985) gözlenmekte olup şöyle bir açıklaması vardır: Saçılmadaki artış, saçılma merkezlerinin sayısının artmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek yoğunluktaki saçılma, saçılma merkezlerinin konumları arasındaki ilişkiden dolayı azalmaktadır. Örneğin saçılma merkezleri arasında çok iyi

ilişki olan kusursuz kristaller oldukça az ışık saçmaktadır. Dolayısıyla orta derecede bir yoğunlukta saçılmada pik gözlenmektedir.



Şekil 2.21. (a) E7 ve % 1.3 oranında ST-ZL koloid karışımının 47 μm kalınlığında hücresi için dalga boyunun fonksiyonu olarak geçen ışık şiddeti. Üstteki eğri: hücreye 47 V uygulandığında; alttaki eğri: 0 V uygulandığında. (b) E7 ve % 1 oranında AMT-130 S koloid karışımının 47 μm kalınlığında hücresi için dalga boyunun fonksiyonu olarak geçen ışık şiddeti. Üstteki eğri: hücreye 48 V uygulandığında; alttaki eğri: 0 V uygulandığında.

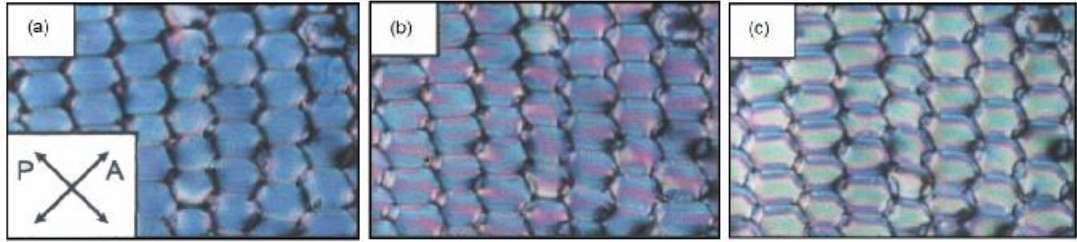
Fernandes ve arkadaşları (2003) bipolar nematik sıvı kristal damlacıklarının elektrooptik özelliklerini araştırmışlardır. Polimerle kapsüle edilmiş nematik sıvı

kristalin (polimer-encapsulated nematic liquid crystal) iki ve üç boyutlu dizinini temel alan aygıtların elektro-optiği, plastik alt tabaka üzerinde birleştirilebilen geniş-alan esnek göstergelerin yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu aygıtlar genellikle, bipolar damlacıkların $\mathbf{n}$ nematik yönlendiricisi damlacığın zıt kutuplarında yerleşen tekil noktalar arasında yönelmiş olarak modellenir. Tekil noktaların çevresinde yönlendirici, $\mathbf{n}$, π 'nin katları kadar dönmektedir. Bipolar damlacıkların anahtarlama için genellikle kritik Freedericksz alanından, E_C , daha yüksek elektrik alanının, E , uygulanması gerektiği düşünülmekteydi. Bu, yönlendiriciyi elektrik alan yönünde yönlendirerek, damlacıkların efektif kırılma indisini değiştirmekte ve geçen ışıktaki saçılmayı azaltarak aygıtı çalıştırmaktadır.

Bu çalışmada eşdeğere yakın, iyi tanımlanmış nematik damlacıkların düzenli dizini incelenmiş ve anahtarlama mekanizması hakkındaki günümüzdeki anlayışın yeniden gözden geçirilmesi gerektiği görülmüştür. Nematik damlacıklar incelenmiş ve kritik Freedericksz alanının olmadığı gözlenmiştir. Buna karşılık elektrik alanı, E , ile ortalama bipolar yönlendirici alanını yeniden yönlendiren yüzey bölgesidir. Ayrıca bu tepki elektrik alanının oldukça küçük değerlerinde bile vardır.

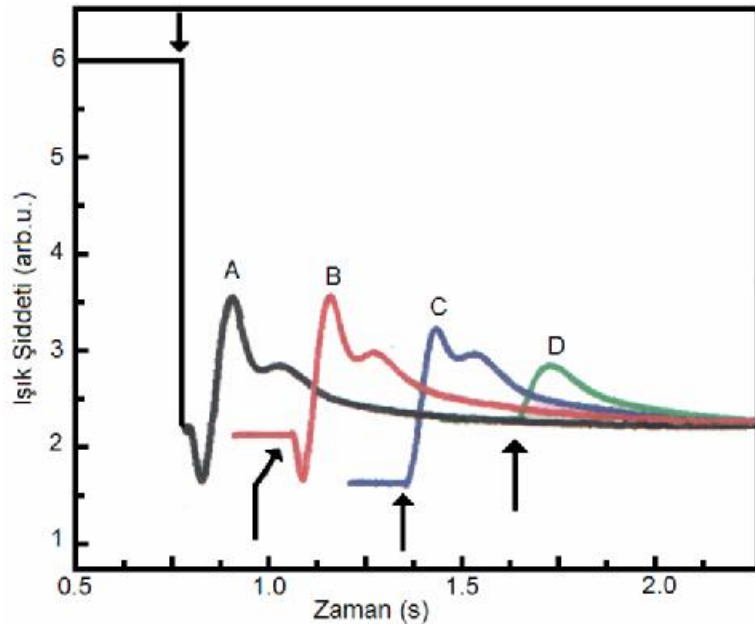
% 1 oranında polyvinyl alcohol (PVA) içeren suya 4-pentyl-4-cyanobiphenyl (5CB) karıştırılır. İndium Tin Oxide (ITO) kaplanmış cam üzerine karışım konulur. Su buharlaştıktan sonra sıvı kristal damlacıklar kendiliklerinden sıkı paketli hegzagonal (HCP-hexagonally closed packed) tek katman oluşturmak üzere kümeleniyorlar. PVA, damlacıklarının düzlemsel sınır şartlarının etkisiyle bir araya gelip birleşmelerini engelliyor. Bunun üzerine filmin normal boyunca ITO kaplı cam levha eklenerek 1 kHz frekanslı bipolar kare dalga şeklinde elektrik alanı uygulanır.

Elektrik alanının yokluğunda ($E=0$) çekilmiş fotomikrograf şekil 2.22 (a)'da verilmiştir. Filmin kalınlığı $39 \mu\text{m}$ 'dir. Elektrik alan uygulandığında beklenmedik davranış gözlenmektedir. Damlacıklarda çift kırılma azaltmaktadır. Şekil 2.22 (b) ve (c)'deki renk değişimi bunu göstermektedir. Çevirim için uygulanan alanının kritik değeri yoktur. $E \geq 2.0 \text{ V}/\mu\text{m}$ için optik çift kırılma tamamen kaybolmakta ve nematik yönlendirici elektrik alan yönünde yönlenmektedir.



Şekil 2.22. (a) $E=0$; (b) $E=0.03 \text{ V}/\mu\text{m}$ ve (c) $E=0.15 \text{ V}/\mu\text{m}$ alanlarda P ve A çapraz polarizörler arasındaki sıkı paketli heksagonal tek katmanın fotomikrografları.

Foto diyot kullanılarak elektrik alan kaldırıldıktan sonra geçen ışık demetinin şiddeti zamanın fonksiyonu olarak ölçülmüş ve şekil 2.23'te çizilmiştir. A'dan D'ye kadar olan eğriler azalan E-alanlarını, oklar ise elektrik alanının kapatıldığı anı göstermektedir. $E=0.11 \text{ V}/\mu\text{m}$ 'den daha büyük değerlere sahip elektrik alanları durumunda geçen ışığın şiddetinde 6 ekstremim gözlenmektedir. Bu salınımlar, girişimden kaynaklanmaktadır. Elektrik alan $E=0.11 \text{ V}/\mu\text{m}$ 'nin altında iken B, C ve D eğrilerinde de görüldüğü gibi birkaç ekstremim noktası gözlenmektedir.



Şekil 2.23. Geçen ışık şiddetinin zamana bağımlılığı. Oklar kare dalga voltaj sinyalinin (A) $0.12 \text{ V}/\mu\text{m}$, (B) $0.056 \text{ V}/\mu\text{m}$, (C) $0.041 \text{ V}/\mu\text{m}$ ve (D) $0.026 \text{ V}/\mu\text{m}$ değerlerinde kapatıldığı zamanı göstermektedir.

Van Boxtel ve arkadaşları (2004), dendrimer karıştırılmış nematik sıvı kristallerin optik özelliklerini incelemişlerdir. Elektrooptik anahtarlamalar için alternatif yaklaşım, SK sürekli dizisinde gömülmüş küçük yarı çaplı (<20 nm) küresel silisyum parçacıkları yöntemiyle geliştirilmiştir. Bu çalışmada dendrimer molekülleri kullanılarak yayılan fazın büyüklük oranı daha küçük değerlerle (2-3 nm) sınırlandırılmıştır. Dendrimerler, düzenli üç boyutlu mimariye sahip tamamen sentetik, çok dallı makro moleküllerdir. Bu sıra dışı, çok fonksiyonlu moleküllerin tanıtımından bu yana homojen katalizörler, konuk-ev sahibi sistemleri gibi çok sayıda kullanım alanları olmuştur. Dendrimerler çoğunlukla kusursuz küresel yapıya sahip katı (rigid) moleküller olarak tanımlanmaktadır. Buna rağmen bu moleküllerin düzen ve toplu davranışının kimyasal çevreye oldukça bağımlı olduğu görülmektedir.

Dendrimer doldurulmuş nematikler cyanobiphenyllerin ve cyanoterphenyl'in karışımından oluşan 4 bileşenli SK E7 ($n_e=1.7462$, $n_o=1.5216$) malzemesinden hazırlanmıştır. Bu malzeme % 51 oranında 4-n-pentyl-4'-cyanobiphenyl (5CB), % 25 oranında 4-n-heptyl-4'-cyanobiphenyl (7CB), % 16 oranında 4-n-octyloxy-4'-cyanobiphenyl (80CB) ve % 8 oranında 4-n-pentyl-4'-cyanoterphenyl (5CT) karışımından oluşmuştur. Beşinci nesil poly(propylene imine) dendrimerleri kullanılmıştır. Ultrasonik karıştırma yöntemi ile chloroform belirli miktarda SK E7 maddesi ile karıştırıldıktan sonra belirli miktarda dendrimer homojen yayılmıştır. Daha sonra chloroform buharlaştırılmıştır. Anti paralel yönelmiş sınır şartlarına sahip elektrooptik hücreler dendrimer yayılmış SK ile $\sim 120^\circ\text{C}$ 'ta kohezyon kuvvetinin yardımı ile doldurulmuştur. Bundan sonra hücreler, SK E7 maddesinin saydamlaşma sıcaklığının altına kadar soğutulmuştur.

Hücrelerin elektrooptik karakteristiği amplifier kullanılarak kaydedilmiştir. Geçirgenlik-voltaj karakteristiği, 5V/s hızla 0.5 V'luk basamaklarla artan 1 kHz kare dalga a.c. voltajları uygulanarak belirlenmiştir. Aydınlanma için 100 W'lık halojen ışık kaynağı kullanılmıştır. Hücreler alüminyum numune tutucuda 10 cm yükseklikte tutulmuştur. Dedektör açıklığı 0.2 mm'dir.

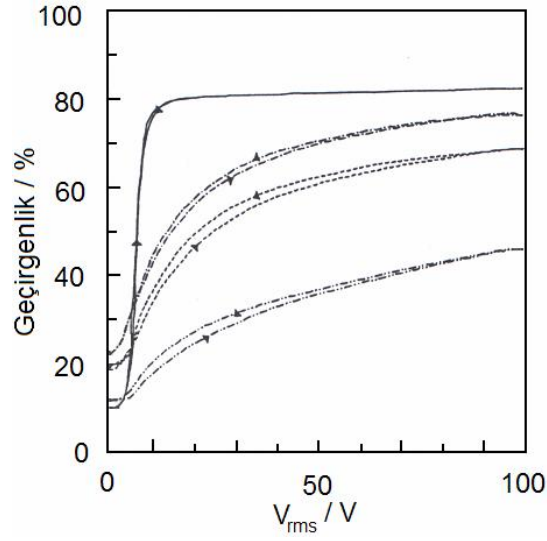
5 μm 'lik boşluğa sahip hücre 20/80 w/w oranında dendrimer/E7 karışımıyla doldurulmuştur. Mikroskopla bakıldığında dendrimer moleküllerinin $\sim 20 \mu\text{m}$ çapında geniş, küresel kümeler halinde toplandıkları gözlenmiştir. Çapraz

polarizörlerle bakıldığında dendrimer kümelerine yakın bölgelerde SK moleküllerinin düzeninin bozulduğu ve rasgele yönelim kazandığı görülmektedir. Diğer bölgelerde E7 maddesi halen düzgün tek yönlü yönelime sahiptir. Buradan SK matrisinde dendrimerlerin varlığının polidomen SK yapısının oluşumuna neden olduğu görülmektedir.

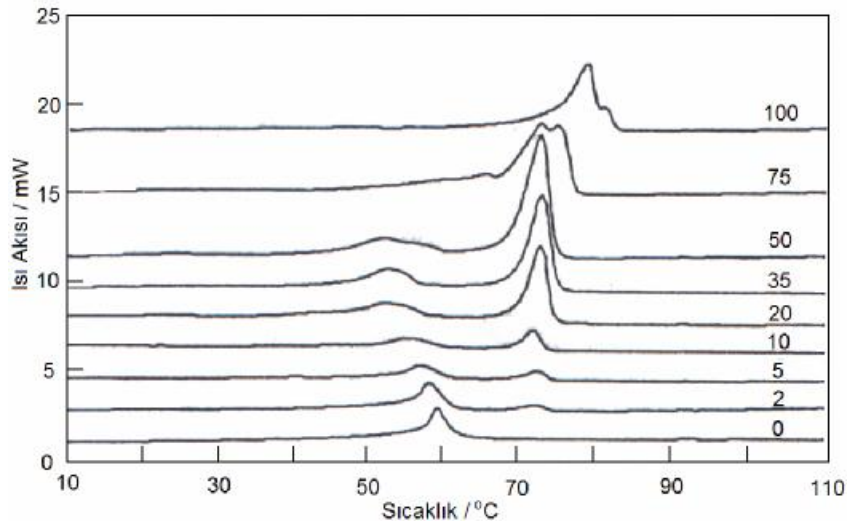
Dendrimer doldurulmuş SK'lerde polidomen yapının kuvvetli ışık saçılmasının ortaya çıkmasına neden olduğu görülmüştür. Elektrik alanın uygulanması ile birlikte daha homojen SK yönelimi ortaya çıkmakta, bu SK domenleri arasındaki kırılma indisi farkını azaltmakta ve sonuç itibariyle daha saydam durum ortaya çıkmaktadır.

Farklı oranlarda dendrimer/E7 karışımları içeren 17.7 μm kalınlığında paralel elektrooptik hücre için voltajın artırıldığı ve azaltıldığı taramalarda geçirgenlik, uygulanan voltajın fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Dendrimer oranı arttıkça geçirgenlik azalmaktadır. Bu, muhtemelen dendrimer ve SK arasındaki kırılma indisi uyumsuzluğundan kaynaklanmaktadır. Dendrimer karışımının çok fazla miktarda ışık saçabilme özelliği iki-fazlı malzemenin faz davranışı ile bağlantılıdır. Dendrimer, yarı kristallik durumdan izotropik duruma geçerken SK E7 malzemesinden daha yüksek T_{NI} sıcaklığına sahiptir. İzotropik fazdan oda sıcaklığına kadar soğutulurken dendrimer, SK E7'den daha önce izotropik-nematik faz geçişini gerçekleştiriyor.

Dendrimer doldurulmuş nematiklerin diğer önemli özelliği, elektrooptik eğrilerdeki histerezisin çok küçük olmasıdır. Yani voltaj-aşağı taramalardaki geçirgenlik hemen hemen voltaj-yukarı taramalardaki geçirgenliğe eşittir. Histerezisin yokluğu, voltajın uygulanması ve kaldırılmasından sonra SK moleküllerinin aynı yönelimsel rotayı takip ettiklerinin altını çizmektedir. SK malzemeye karıştırılmış dendrimer, SK'da yüksek derecede tercih edilen yönelimsel rota oluşmasını zorlamakta ve histerisisin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.



Şekil 2.24. Farklı oranlarda dendrimer içeren dendrimer/E7 karışımları ile doldurulmuş 17.7 μm kalınlığında paralel elektrooptik hücreye uygulanan 1 kHz kare dalga a.c. voltajının fonksiyonu olarak geçirgenliğin grafiği: (---) 5/95; (--) 10/90; (-.-) 20/80 dendrimer/SK. Referans olarak 7 μm 'lik PDLC hücresinin T-V karakteristiği de verilmiştir (—)



Şekil 2.25. 0 % ile 100 % oranları arasında değişen poly(propylene imine) değişik dendrimer miktarları için dendrimer/E7 karışımının DSC ısıtma taramaları.

3. MATERYAL VE METOD

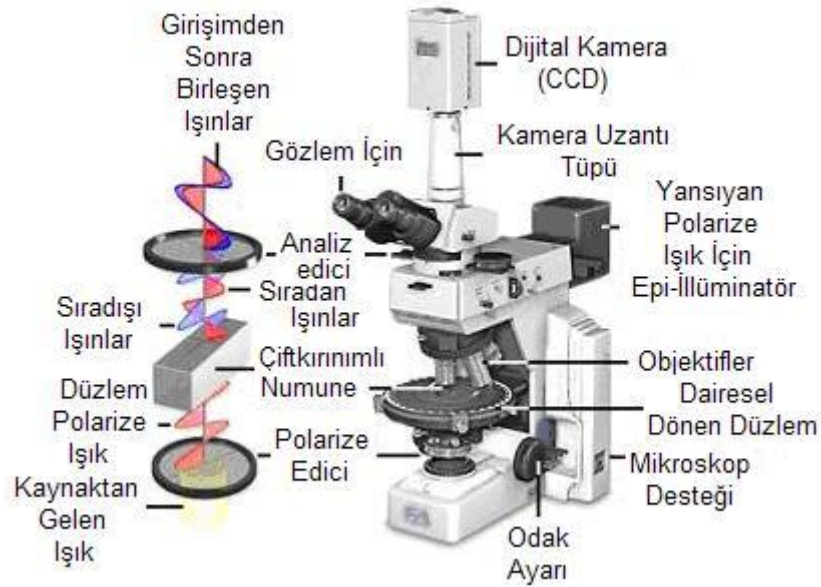
3.1 Materyal

3.1.1 Araçlar

3.1.1.1 Polarizasyon Mikroskobu

Mezofazların karakterizasyonu için

- Polarizasyon Mikroskobu
- Mikroskop aksesuarları gerekmektedir:
 1. Isıtma Masası (heating stage) 350°C'a kadar ısıya dayanabilmektedir;
 2. Mikroskop, ısıtma masası için yeterli çalışma alanına sahiptir ve büyük objektif, üzerine odaklanabilmektedir;
 3. Dönen objektifler;
 4. Beş objektif (10x, 20x, 25x, 40x ve 63x);
 5. CCD kamera.



Şekil 3.1. Polarizasyon mikroskobu ve bölümleri.

Sıvı kristal numune hazırlandıktan sonra polarizasyon mikroskobunun ısıtma masası üzerinde ısıtma-soğutma işlemi sırasında CCD kamera ile sıvı

kristalde ısınma ve soğuma sırasındaki faz dönüşümleri gözlemlendi ve farklı fazlarda görüntüler alınarak kaydedildi.



Şekil 3.2. Mikroskop altında incelenen malzemenin görüntüsünün kamerayla bilgisayara aktarılması.

3.1.1.2 Lazer

Ölçümlerde, 1mW gücünde ve 632.8 nm dalga boyunda ışık yayan He-Ne lazeri (PHYWE) kullanılmıştır.

3.1.1.3 Mekanik Modülatör (Chopper)



Şekil 3.3. Mekanik modülatör.

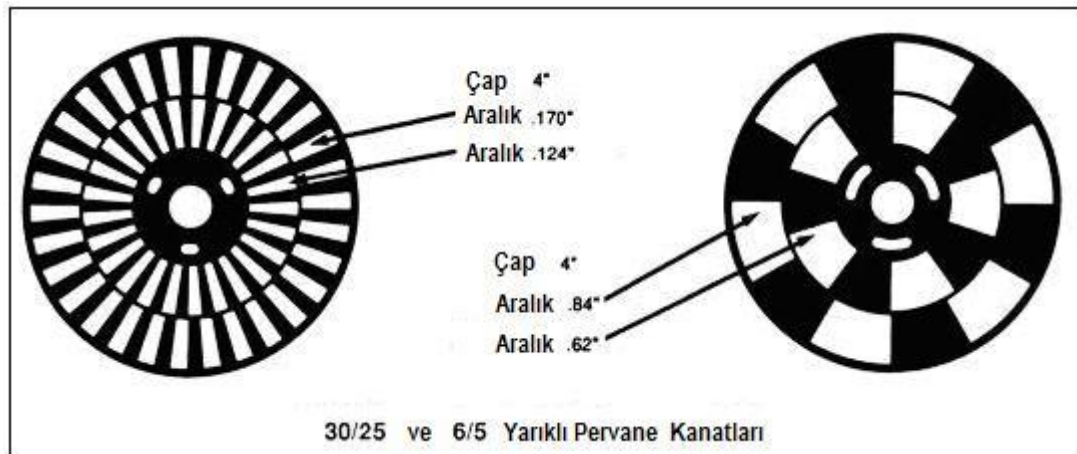
Mekanik modölatör lazer kaynaktan gelen sabit ışık demetini sinüzoidal ışık demetine dönüştürmek amacıyla kullanılmaktadır.

SR540 mekanik modölatör basit ölçümlerden tek demet, çift-demet ve intermodölasyon deneylerine kadar tüm optik kesme gereksinimlerini ele almaktadır. SR540, dört rakamlı frekans göstergesine, ön-panel frekans denetleyicisine, analog voltaj frekans denetleyicisi ve seçilebilir işletim modlarına sahip iki referans çıktısına sahiptir.



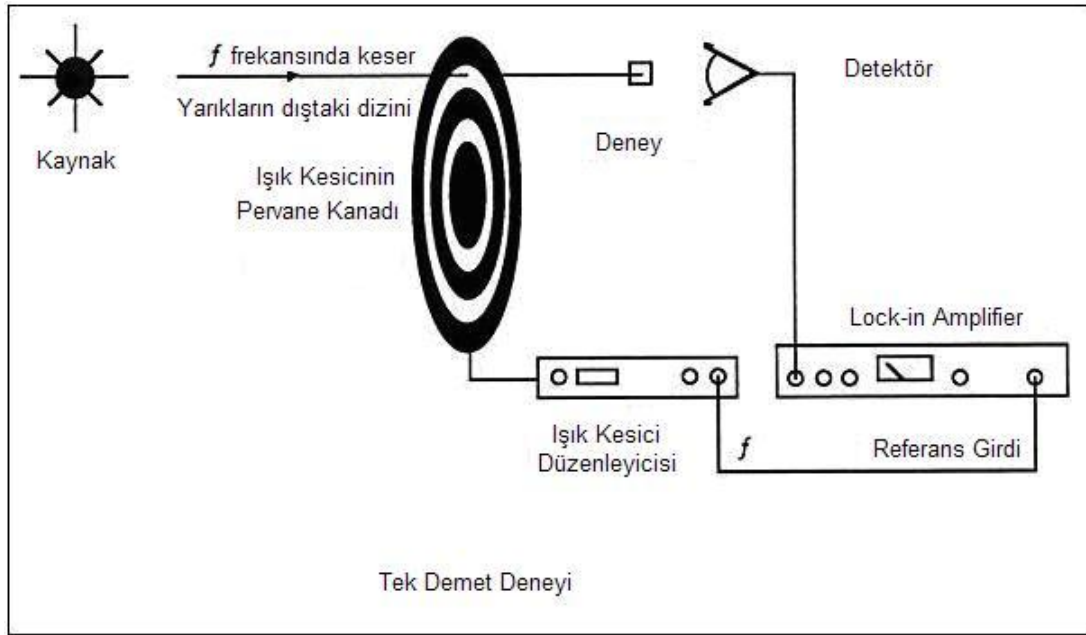
Şekil 3.4. Mekanik modölatör denetleyicisi.

Mekanik modölatörün iki adet alüminyum kanadı vardır: 5/6 yarıklı pervane kanadı 400 Hz'in üzerindeki frekanslar için ve 25/30 yarıklı pervane kanadı ise 3.7 kHz'in üzerindeki frekanslar içindir. Referans çıktılar, frekansların toplamı ve farkının yanı sıra her bir uzun, dar yarıklar dizinine karşılık gelen frekansları sağlamaktadır.



Şekil 3.5. Mekanik modölatörün pervane kanatları.

Tek demetle yapılan deneylerde ışık demeti dar, uzun yarıkların dıştaki dizini tarafından kesilmektedir ve sağ BNC'den gelen referans çıktı lock-in amplifier'ın frekansını ışık kesicinin frekansına kilitlemek için kullanılmaktadır. İçteki uzun, dar yarıkların dizini sol BNC'nin referans çıktısı olduğu durumda da kullanılabilir. Her iki durumda da REFERENCE MODE “yukarı” pozisyonundadır.



Şekil 3.6. Mekanik modülatör ile yapılan tek demet deneyinin şematik gösterimi.

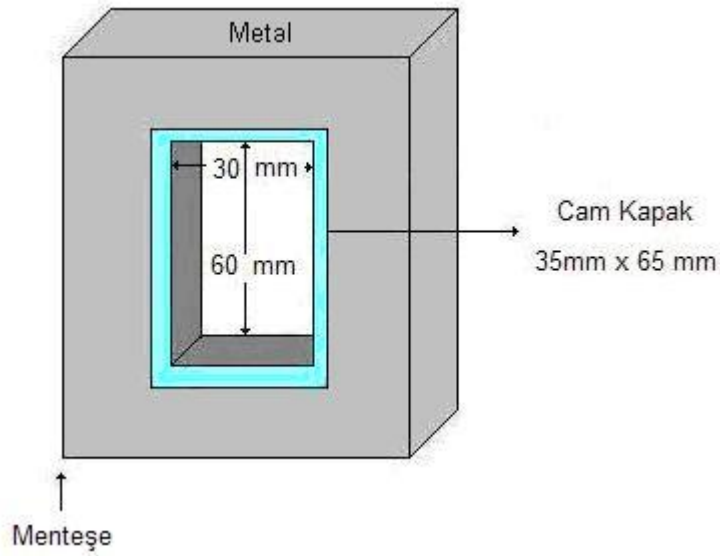
Mekanik modülatör frekansının 225~330 Hz gibi 50 Hz (şebeke frekansı)'nin tam katı olmayan frekanslarda seçilmesi ölçümlerin sağlıklı olmasını sağlar.

3.1.1.4 Polarizör ve Analizör (Polaryzer and Analyzer)

Ölçümlerde kullanılan ışık demetini polarize etmek ve numuneden geçen ışığın polarizasyonunu incelemek için polarizör ve analizör kullanıldı. Öncelikle birbirine paralel yerleştirilen polarizör ve analizör arasındaki açı değiştirilerek polarizör-numune-analizör sisteminin optik geçirgenlik ölçümleri yapıldı.

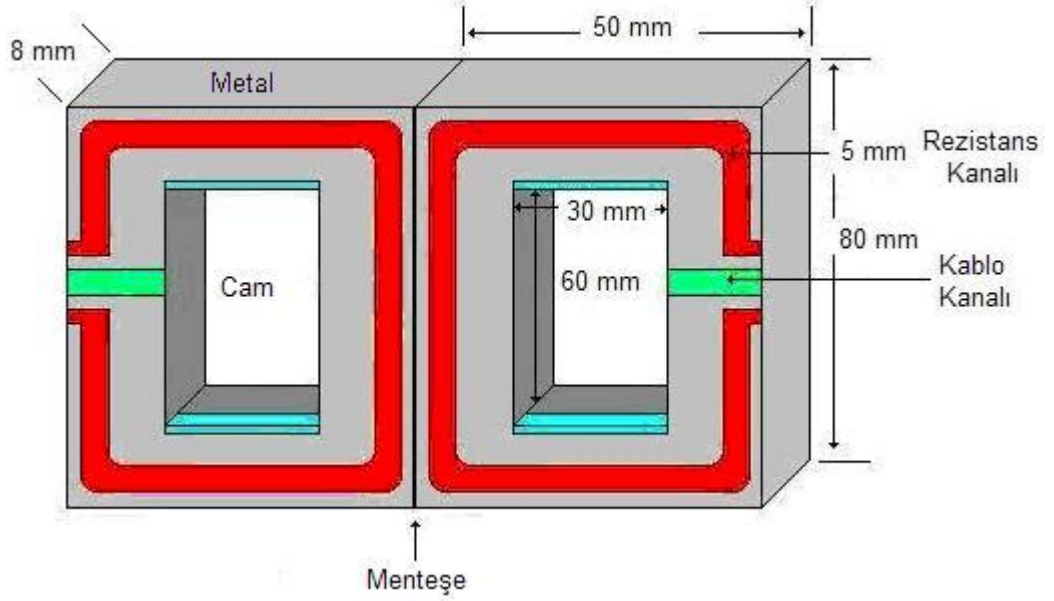
3.1.1.5 Numune Tutucu (Sample holder)

Numuneyi ısıtırken ve elektrik alan uygulanırken çevre koşullarından etkilenmemesi amacıyla yalıtım yapmak için açılıp kapanan iki kollu çerçeve şeklinde olan numune tutucu hazırlandı. Numune tutucu yapılırken yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması açısından antimon alaşım kullanıldı.



Şekil 3.7. Numune tutucunun kapalı durumda şematik görüntüsü.

Rezistans kanalına, ısıtmayı temin etmek için kablo yerleştirildi. Kablo kanalı ise elektrik alan uygulanması için kablo ve termometre girişi için kullanıldı. Bu kabloların her birine kısa devre olmaması için yalıtım yapıldı.



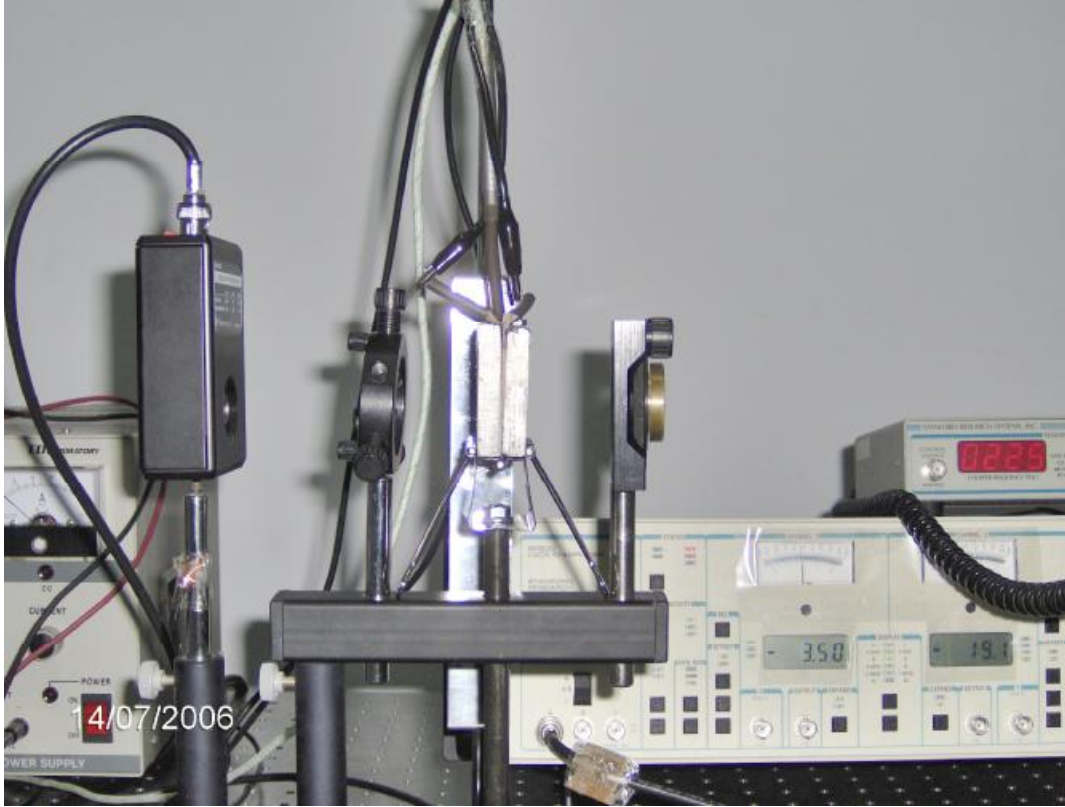
Şekil 3.8. Numune tutucunun açık durumda şematik görüntüsü.

3.1.1.6 Foto-Algılayıcı (Photoreceiver)

Lazerden yayılan ve sıvı kristal malzemeden geçen ışığın algılanması için Geniş Alan UV Foto-algılayıcı (Large-Area UV Photoreceiver) kullanılmıştır.



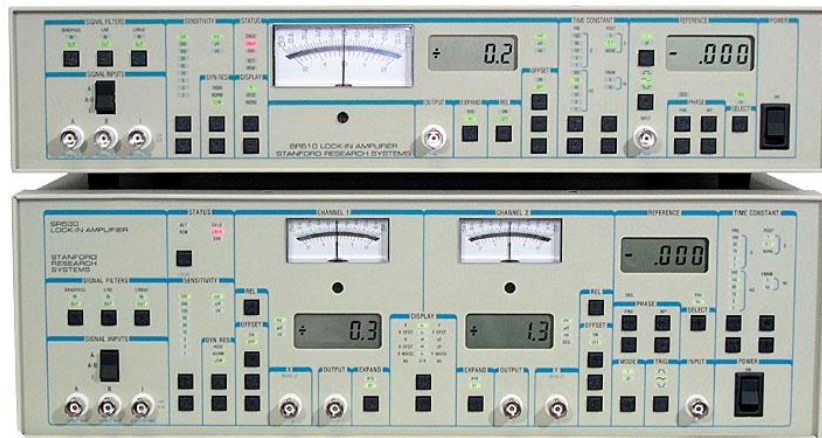
Şekil 3.9. Foto-algılayıcı.



Şekil 3.10. Polarizör, numune tutucu, analizör ve foto-algılayıcı.

3.1.1.7 Lock-in Amplifier

Lock-in Amplifier kullanmadaki amaç sinyalleri gürültüden ayırmak ve yükseltmektir.



Şekil 3.11. SR510/530 Lock-in Amplifier.

3.1.1.8 Termostat (Thermostate)

Ölçümler esnasında mikro kontrolör ile tasarlanmış ayarlanabilir zaman oransal kontrol yapabilen çift kontaklı dijital sıcaklık kontrol cihazı olarak 7272 D tipi endüstriyel elektronik sıcaklık denetleyicisi kullanılmıştır.



Şekil 3.12. Termostat.

Ölçümler sırasında termostat, sıcaklık artışı 3 °C/dakika hızla gerçekleşecek şekilde ayarlandı.

3.1.1.9 Güç Kaynağı (Power Supply)

Ölçümler sırasında sıvı kristal numuneye elektrik alan uygulamak ve sıvı kristal numuneyi ısıtmak amacıyla AC/DC güç kaynağı (ED345BM) kullanılmıştır.

3.1.2 Malzeme veya Numunelerin Hazırlanması

3.1.2.1 ITO Lameller

Sıvı kristal numuneleri hazırlarken Indium-Tin-Oxide (InTiO_3) kaplamalı cam lameller kullanılmıştır. Bunun nedeni, lamellerin iletken olmasıdır. İki adet cam lamel üst-üste koyularak, sonra bir biri üzerinde kaydırılır ve her birinin kenarları çıkıntı oluşturacak şekilde yerleştiriliyor. Indium-Tin-Oxide kaplamalı lamellerin

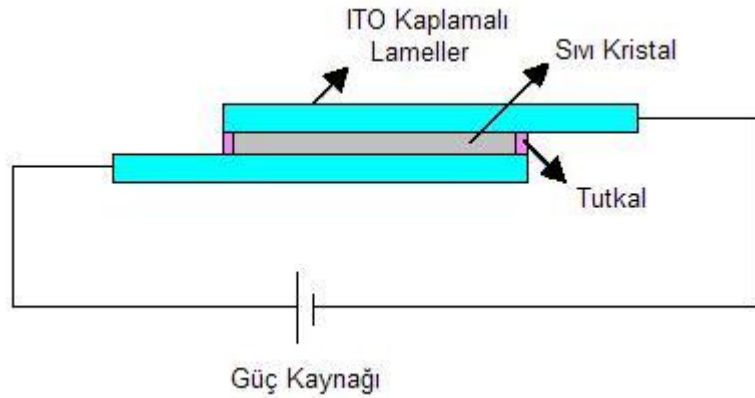
- Kalınlığı: 1.12 mm
- Uzunluğu: 72 mm
- Genişliği: 26 mm

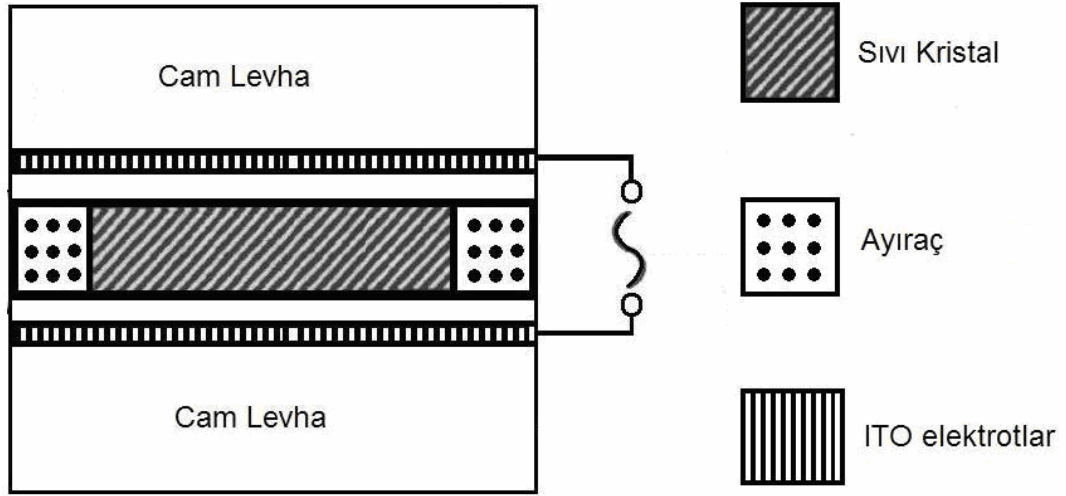
ITO lameller daha ekonomik olması için dört eşit parçaya ayrılmıştır. Dolayısıyla numune hazırlanırken kullanılan lamellerin boyutları aşağıdaki şekilde değişti:

- Kalınlığı: 1.12 mm
- Uzunluğu: 36 mm
- Genişliği: 13 mm

3.1.2.2 Sıvı Kristal Numunelerin Hazırlanması

Lamellerin orta kısmında boşluk oluşacak şekilde kenar aralarına hem ayıraç hem de yapıştırıcı rolü göreceğ (spacer) malzeme yerleştiriliyor (kalınlığı 0.085×10^{-3}). Dolayısıyla üst-üste konularak yapıştırılmış iki lamelin toplam kalınlığı yaklaşık olarak 4.665×10^{-3} m oluyor. Sıvı kristal malzeme lamellerden birinin çıkıntı oluşturan kenarının üzerine ilave ediliyor. Sıvı kristali ekledikten sonra kohezyon kuvvetinin (sıvıların yüzey gerilimi kuvveti) etkisiyle sıvı kristal iki lamel arasındaki bölgeye akacaktır. Daha sonra sıvı kristal malzemenin buharlaşmasını veya lamellerin arasından dışarı akmasını önlemek amacıyla kenarları ağaç tutkalı (sk ile etkileşimin olmaması amacıyla) ile yapıştırılmıştır.



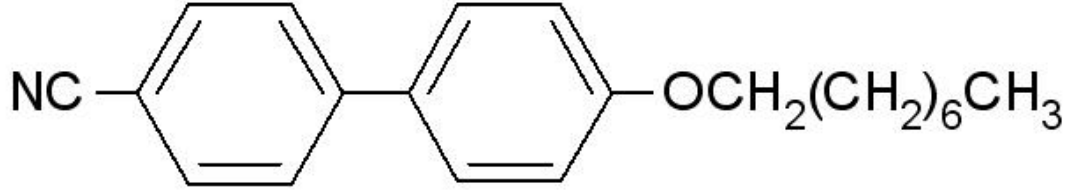


Şekil 3.13. Sıvı kristal numune ve elektrik alanın örneğe uygulanmasının şematik gösterimi.

Numune hazırlandıktan sonra sıvı kristal malzemelerin farklı fazlarını ve faz geçişlerini gözlemlemek için aşağıdaki mikroskop işlemi yapıldı:

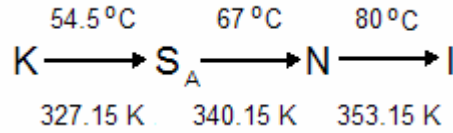
1. Hazırlanan numuneler tek tek oda sıcaklığında ısıtma tablasının üzerine koyuldu.
2. Numuneleri 2°C/dakika hızla ısıtmak için 0.5 A'lık akım uygulandı. Malzemeler kristal ve nematik durumda iken görüntüler alındı.
3. Numuneler soğumaya bırakıldı.
4. Numuneleri 2°C/dakika hızla ısıtarak soğumaya bırakma işlemi 3 defa tekrar edildi.

1. numune:



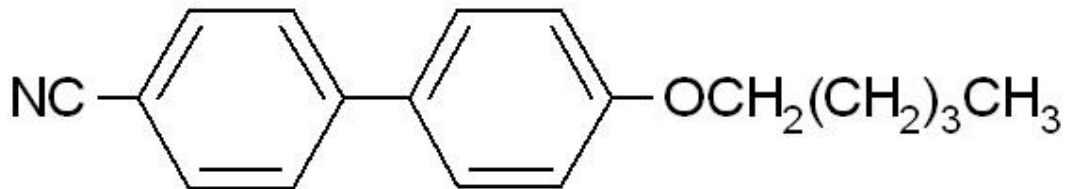
Şekil 3.14. 4'-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile.

Sıvı kristalin faz geçiş sıcaklıkları aşağıdaki gibidir (Khoo, 1993):



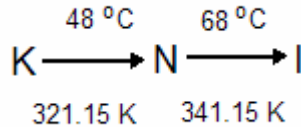
Şekil 3.15. 4'-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzemenin faz geçiş sıcaklıkları.

2.numune:



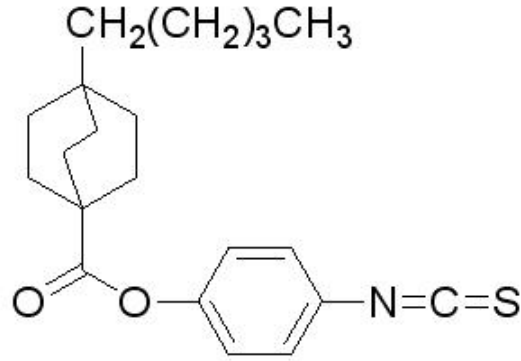
Şekil 3.16. 4'-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile.

Sıvı kristalin faz geçiş sıcaklıkları aşağıdaki gibidir (Khoo, 1993):



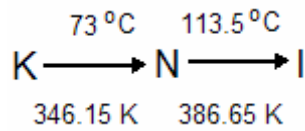
Şekil 3.17. 4'-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzemenin faz geçiş sıcaklıkları.

3.numune:



Şekil 3.18. 4-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate.

Sıvı kristalin faz geçiş sıcaklıkları aşağıdaki gibidir (Sigma Aldrich):

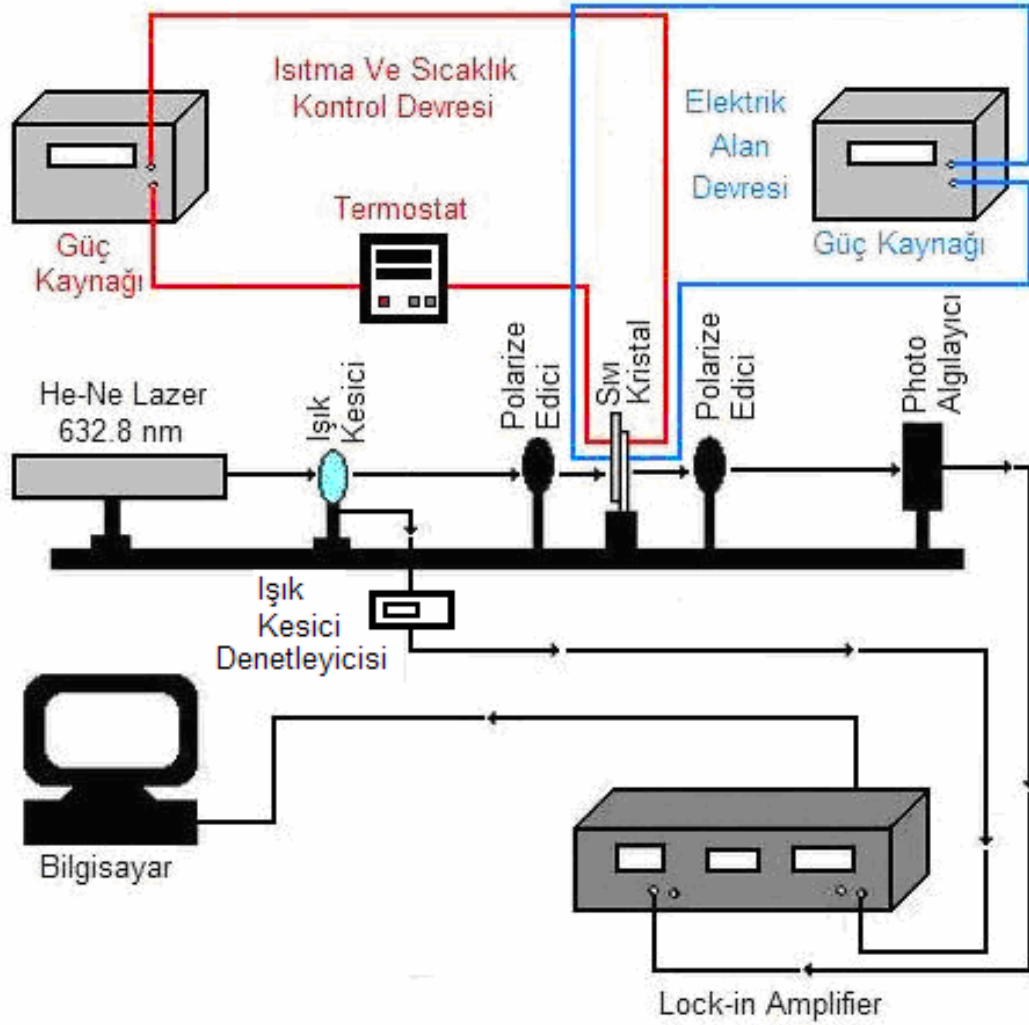


Şekil 3.19. 4-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin faz geçiş sıcaklıkları.

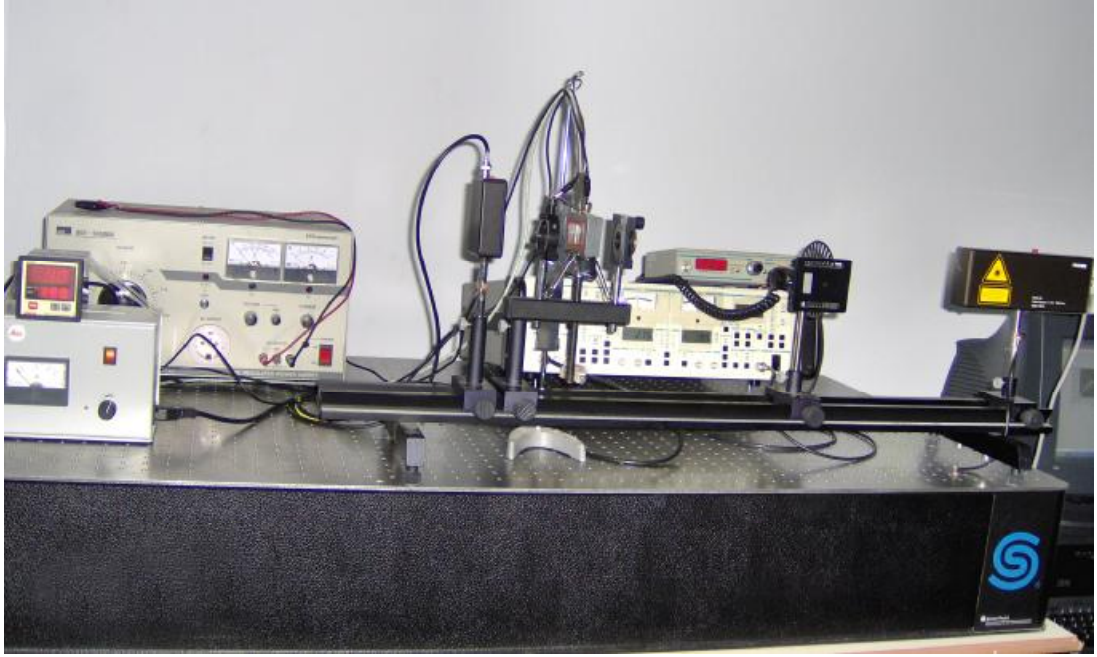
3.2 METOD

3.2.1 Deney Düzeneği

3.2.1.1 Devre



Şekil 3.20. Deney düzeneğinin devre şeması: Isıtma ve sıcaklık kontrol devresi, Elektrik alan devresi ve Optik ölçüm devresi (3 bağımsız devre).



Şekil 3.21. Deney düzeneği (Harran Üniversitesi, Fizik Bölümü).



Şekil 3.22. Sıvı Kristaller Laboratuvarı (Harran Üniversitesi, Fizik Bölümü).

3.2.1.2 Lock-in Amplifier

3.2.1.2.(1). Bilgisayara Tanıtılması

Lock-in Amplifier'ın bilgisayara bağlanması veya tanıtılması için 2 portu var:

- GPIB;
- RS232.

GPIB PC çıkışını kullanmak için Fortran Program Dilinde yazılmış:

- Altcond.for; Convert.for; Cumulat.for; Lcinf.for; Lfconv.for; Lsep.for; Lwc.for; Measure.for; T3plot.for; Xypq.for; Yzconv.for;

Programları veya

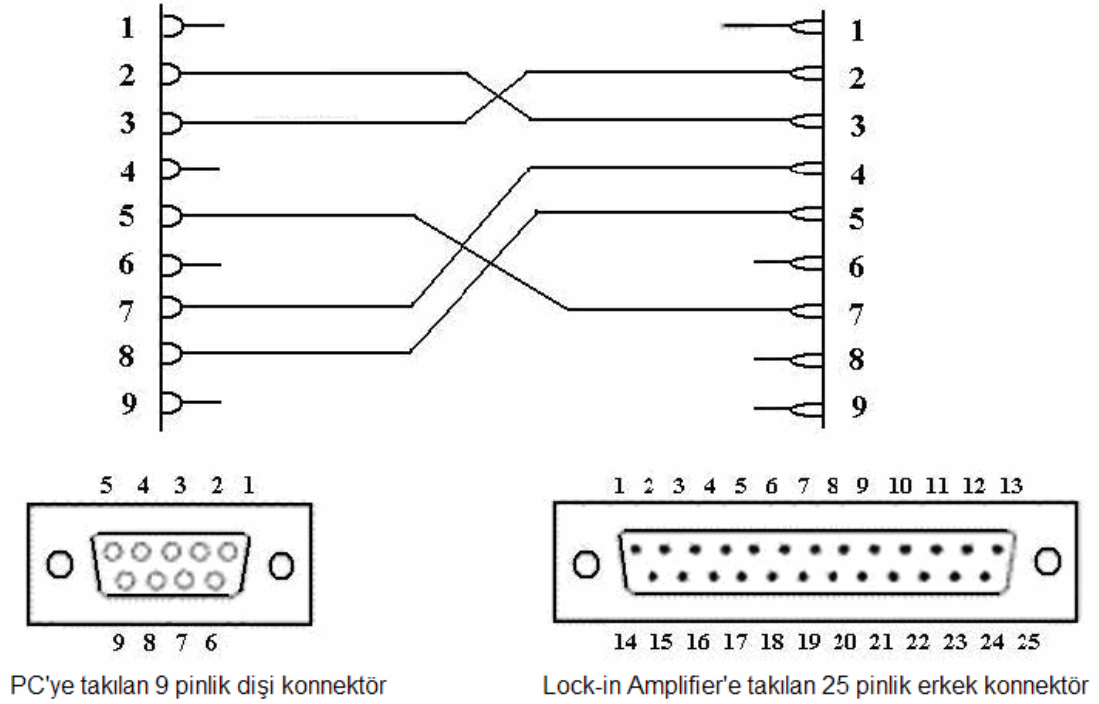
- LabVIEW Programları

kullanılmaktadır.

Deney setini Şekil 3.17'deki gibi kurduktan sonra Lock-in Amplifier ile PC arasındaki bağlantıyı sağlamak için Lock-in Amplifier'ın RS232 portunu kullandık.

3.2.1.2.(2). RS232 İçin Gerekli Kablo Adaptörü

RS232 port için 25-pin erkek lock in amplifier konektörünü 9-pin dişi COM konektörü ile eşleştirdik. Bu dönüşüm aşağıdaki elektronik kablo şemasında verilmiştir.



Şekil 3.23. Lock-in Amplifier ve Bilgisayar arasındaki bağlantıyı sağlamak için uyumlu adaptörün hazırlanmasında gereken elektronik eşleştirme.

3.2.1.2.(3). Veri Alış-verişi ve Hızı İçin Gereken Ayarlar

Bilgisayarın Cihazı tanıması, veri alışverişi ve hızı için lock-in amplifierin arkasında bulunan RS232 portu için hazırlanmış SW2 adında 6 adet mode düğmesi vardır. Bunlar yukarı ve aşağı formatında tablodaki gibi ayarlanmalıdır:

Tablo 3.1. SW2: RS232 Mode Düğmeleri.

Bit 1	Bit 2	Bit 3	Bit 4	Bit 5	Bit 6
Yukarı	Yukarı	Yukarı	Yukarı	Aşağı	Aşağı
19200			Tek parite	Parite açık	Echo açık

Tablodaki sisteme göre; 1, 2 ve 3 düğmeleri yukarı iken iletişim 19200 paritesiyle gerçekleşir. 4 düğmesi tek ve çift pariteyi, 5 düğmesi paritenin, 6 düğmesi ise tekrarlamamanın açık veya kapalı olduğunu gösterir.

3.2.1.2.(4). LabVIEW Programları

LabVIEW programları sanal aletler (virtual instruments-VI) olarak adlandırılmaktadır, çünkü onların görüntüsü ve işletim sistemleri osiloskop ve multimetre gibi fiziksel aletlerin işletim sistemini taklit etmektedir. LabVIEW; veri almak, analiz etmek, görüntülemek ve depolamak için kapsamlı araç seti içermektedir.

LabVIEW programında kullanıcı, kontrol ve göstergelerden oluşan kullanıcı arayüzü veya ön panel oluşturmaktadır. Kontroller; düğmeler, itme düğmeleri, çevirmeler ve diğer girdi mekanizmalarıdır. Göstergeler ise grafikler, LED'ler ve diğer çıktı görüntülemelerdir.

LabVIEW programı; GPIB, PXI, VXI, RS232 ve RS485 aletleri gibi veri alma, görme ve hareket kontrol araçları ile PC'nin donanım sistemi arasında bağlantı kurmaktadır.

3.2.1.2.(5). RS232 Portunun LabVIEW Programına Uyarlanması

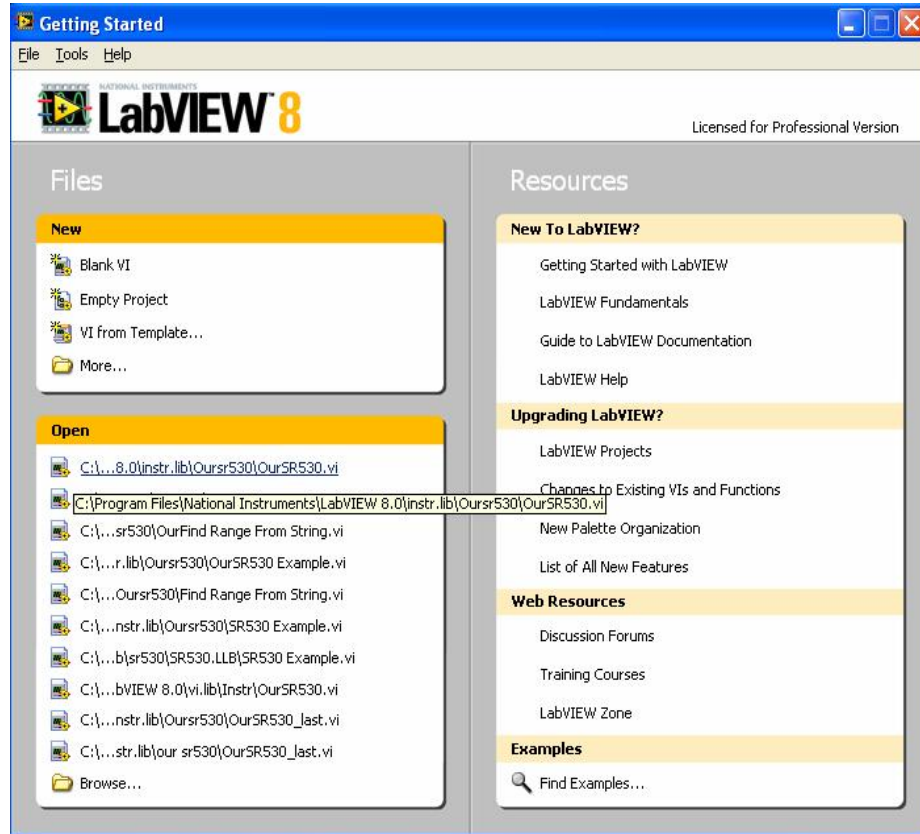
Lock-in amplifier için geliştirilen LabVIEW programı normalde GPIB bağlantısını desteklemektedir. RS232 çıkışını kullandığımızdan dolayı LabVIEW üzerinde GBIP ayarlarını RS232 ayarlarına VISA bağlantısı ile dönüşüm yaptırmak gerekiyor.

LabVIEW programında SR530 Lock-in amplifiyeri görmek için en uygun sürücü SR560 sürücüsüdür. Bu sürücü <C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 8.0\instr.lb> direktörünün altına atılmıştır.

LabVIEW 8.0 programı içinde GBIP ile ilgili akış diagramını RS232 portuna göre VISA programıyla uyarlamaktır. Örneğin; GBIP write, GBIP read vs. bağlantı noktaları şemada sırasıyla VISA serial write, VISA serial read vs. ile değiştirilmiştir. Artık LabVIEW programı RS232 bağlantısını tanımış olur.

3.2.1.2.(6). LabVIEW Programı ve Kullanılması

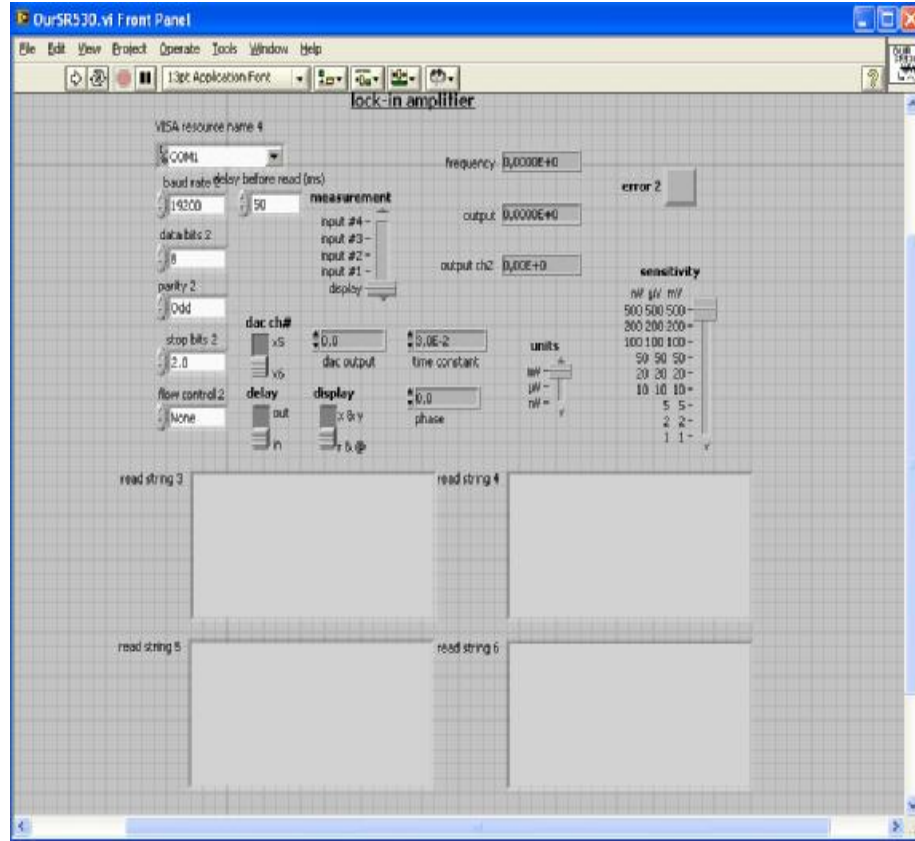
LabVIEW programını açtığımızda karşımıza aşağıdaki ekran gelir. Yapmamız gereken şey [SR530.vi](#) programını açmaktır¹.



Şekil 3.24. LabVIEW programı başlama sayfası.

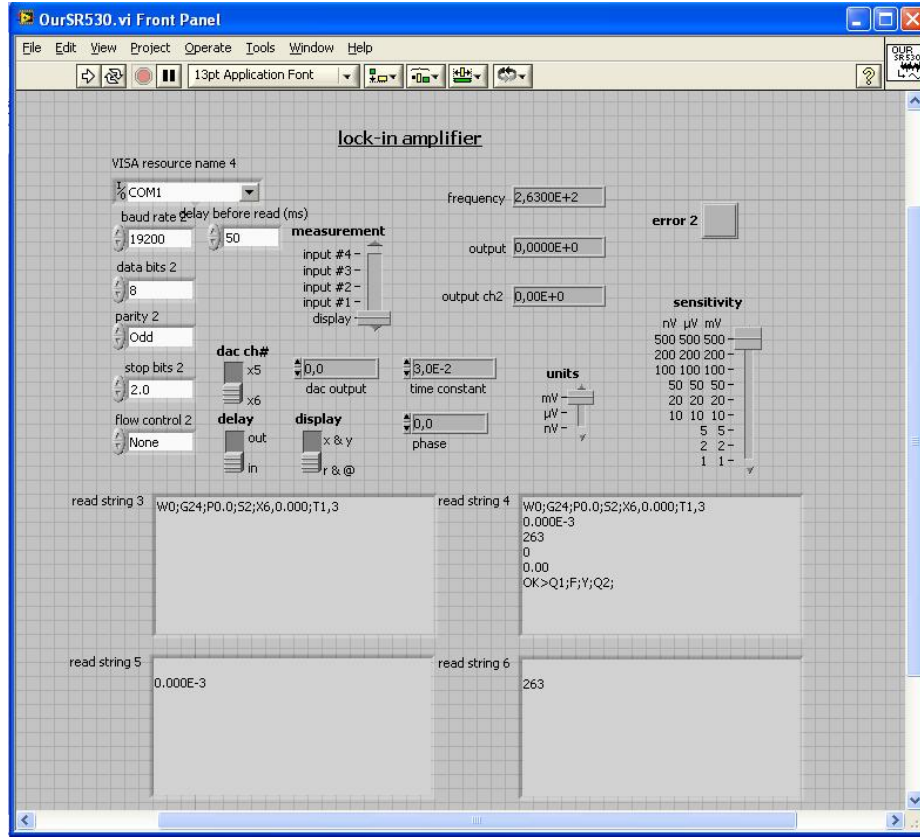
Böylece karşımıza aşağıdaki [SR530.vi Front Paneli](#) gelecektir. Bu panel bize elimizdeki Lock-in amplifierin sahip olduğu ön panel göstergelerini ifade eder. Gerekli ayarlamaları yaptıktan sonra kaydetmek gerekir. Sistem artık ölçüme hazırdır.

¹ Biz kendimiz uyarladığımızdan [OurSR530.vi](#) dedik.



Şekil 3.25. LabVIEW programında Lock-in Amplifier'in sanal ön paneli(1).

Sistemi test ettiğimizde, aşağıdaki sonuçları elde ederiz. Sistem komutlarımıza yerinde cevap veriyor mu diye ön paneldeki göstergeler verileri ile karşılaştırmalıyız. Örneğin, cihazın ön panelinde frekans nedir, programda ne gözüktüyor, sensitivity nedir, programda ne gözüktüyor, göstergeler neyi gösteriyor, programda neyi veriyor. Bunlar teker teker karşılaştırılır.



Şekil 3.26. LabVIEW programında Lock-in Amplifier'in sanal ön paneli(2).

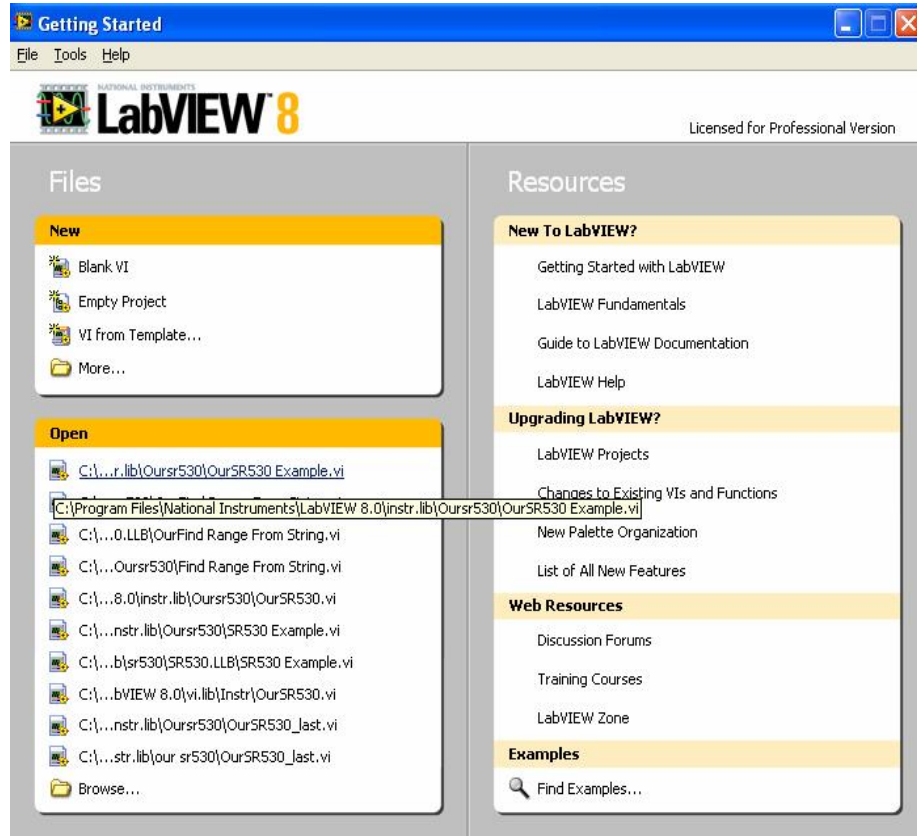
Ön panelle ilgili bazı önemli bilgiler;

- Eğer; zaman ertelemesi yapıyorsak, on (false) yapmıyorsak off (true) olmalı².
- Gösterge R (magnitude) ve ϕ (Phase shift) verilerini ölçecekse false, X (RCos ϕ) ve Y (RSin ϕ) verilerini ölçecekse true ayarında olmalıdır.
- Eğer, dac channel # X5 ise true, X6 ise false olmalıdır.
- Time constant, 0,950 saniye ise, delaydan gelecek ise 0,050 saniye ise iterasyon aralığı toplam 1 saniye olacaktır. Yani verileri 1 saniye aralıklarla alacaktır.
- Units 0 ise nV, 1 ise μ V, 2 ise mV mertebesini gösterir.

² Bunları Cntrl E tuşuyla bu panelin Block diagramda sağlayabiliriz.

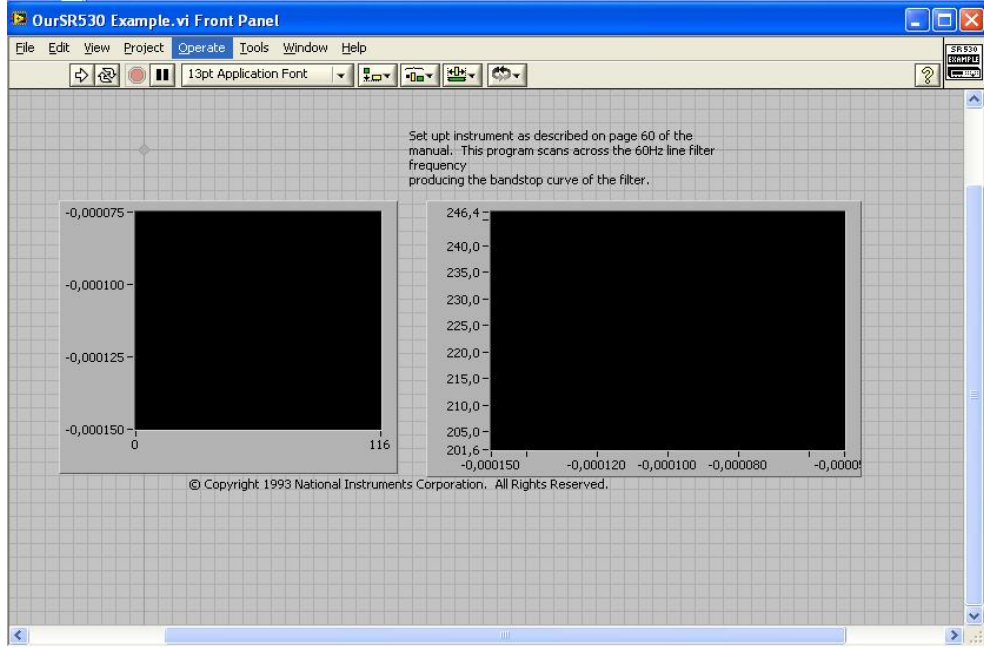
3.2.1.2.(7). Sinyal Ölçümünün Yapılması

Sinyal ölçmeye başlamak için LabVIEW 8.0 programında numunelerden, [SR530 Example.vi](#) kliklenerek grafik ön paneli bulunur.



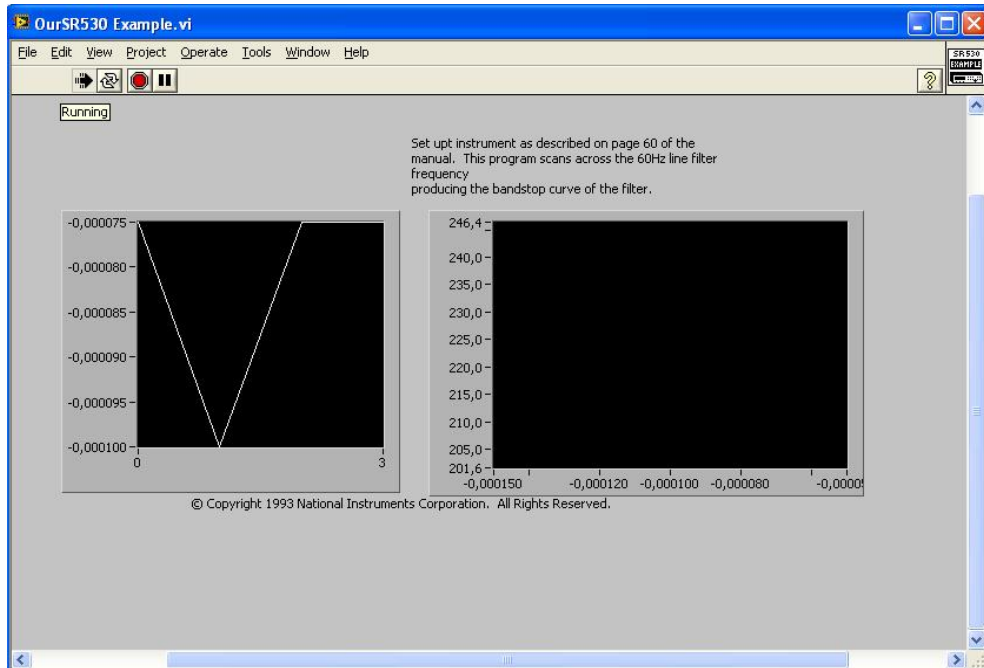
Şekil 3.27. Sinyal ölçümünün yapılması için gereken ilk adım.

SR530 Example.vi Front Panel karşımıza çıkacaktır. Sistemimiz hazır ise ilk ölçümü almak için paneldeki RUN tuşunu kliklememiz yeterlidir. Belirlediğimiz iterasyon aralığında veri alınmaya başlayacaktır.



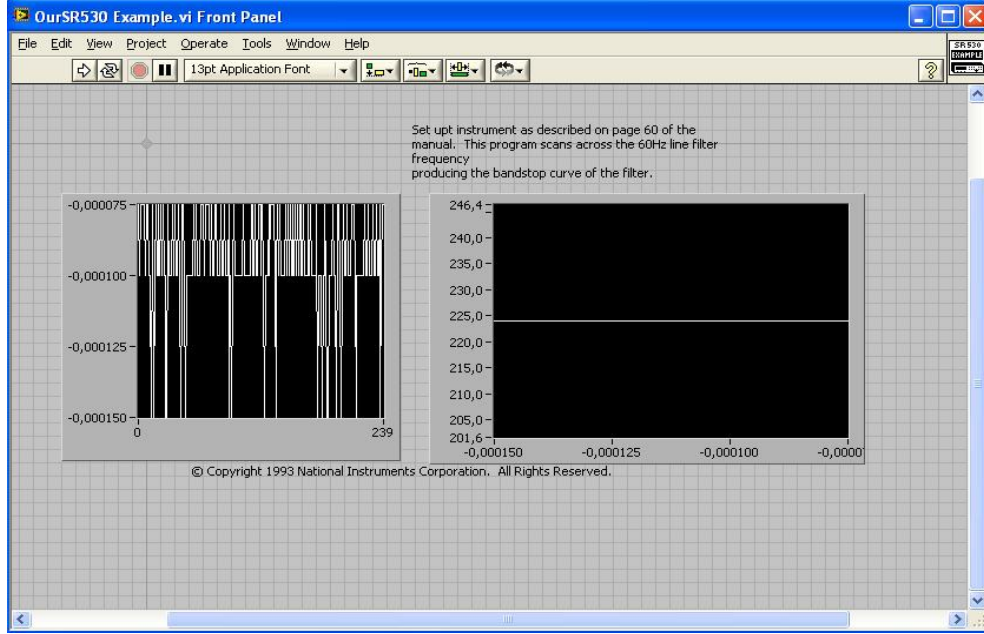
Şekil 3.28. Sinyal ölçümünün yapılması için ikinci adım.

Ölçüm yapmaya başlanılmıştır. Panelde soldaki grafik iterasyona karşı genlik değişimini verir. Dolayısıyla zaman aralığında gerilimin değişimi gözlenir. Sağdaki grafik ise kilitlenmiş (locked) frekansı gösterecektir.



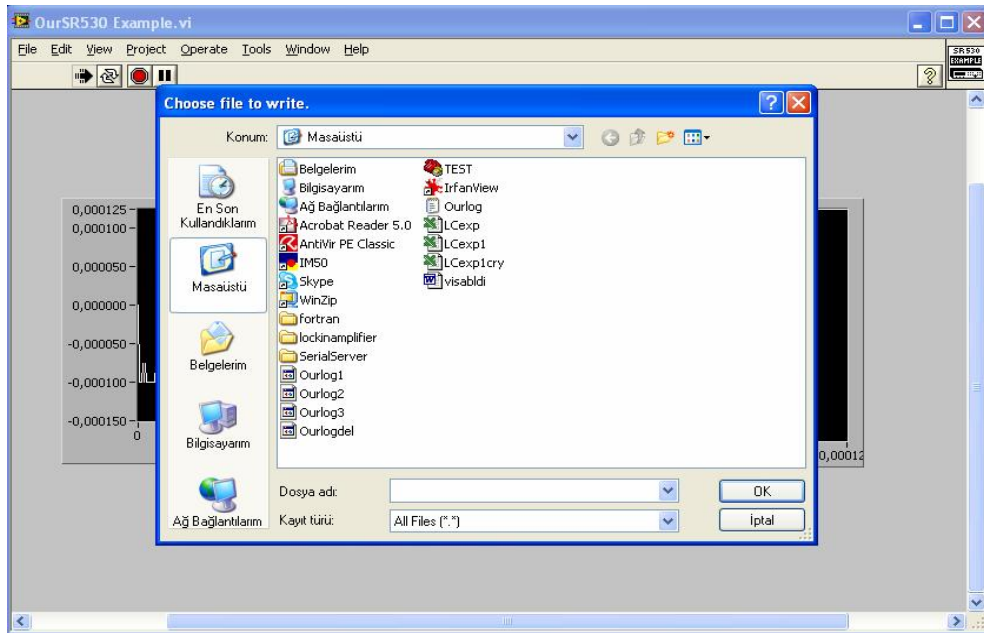
Şekil 3.29. Sinyal ölçümü başladıktan sonraki pencere ekranı.

Veri alındıktan sonra frekans şeklinde görüldüğü gibi sabit kalır.



Şekil 3.30. Sinyal ölçümü tamamlandıktan sonraki pencere ekranı.

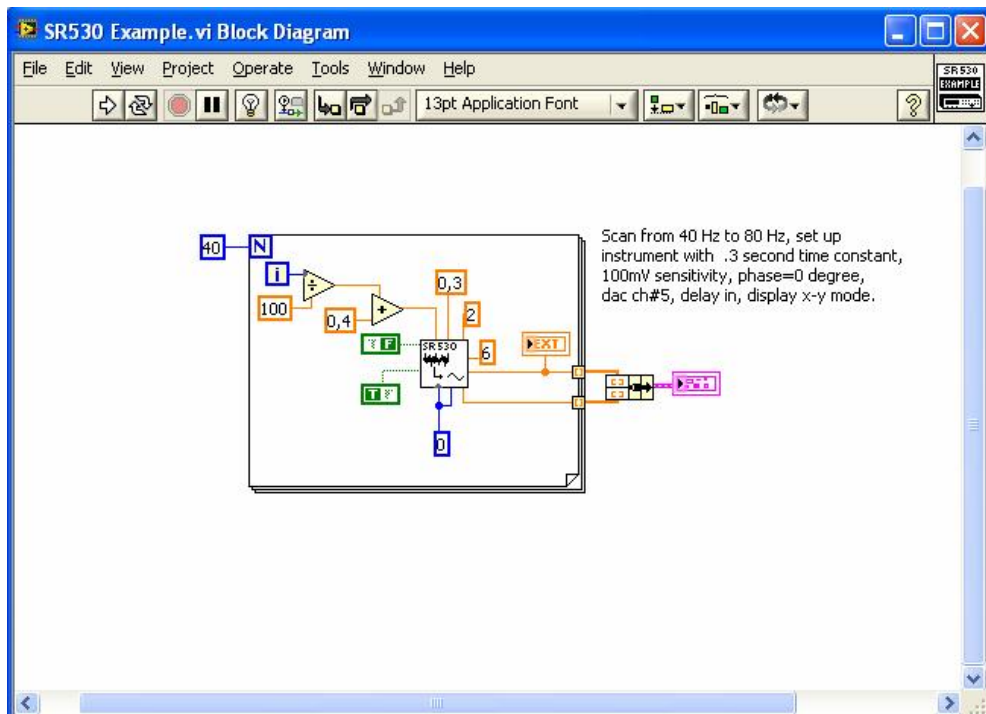
Veriler tamamlandıktan sonra kayıt için sorgu penceresi gelir. Veriler istenen formatta kaydedilip, grafikler çizdirilebilir.



Şekil 3.31. Veriler alındıktan sonra kayıt için sorgu penceresi.

3.2.1.2.(8). SR530 VISA Serialin LabVIEW ile İlişkilendirilmesi

RS530 Example.vi programı açılır. **Cntrl E** tuşlarıyla ilgili programın Block Diagram'ına geçilir. Bu diyagramdaki önceki yapılandırma (configuration) yerine bizim hazırladığımız yapılandırma fonksiyon paletlerinden aranıp, bulunduktan sonra seçilir ve uygun bağlantılar yapılır. Bu program orijinalinde GBIP bağlantısına göre hazırlanmış Ön Panel göstergelerini içerir. Bizim yaptığımız değişikliklerden sonra artık sistem RS232 üzerinde çalışmaya başlar.



Şekil 3.32. LabVIEW programında blok diyagram.

Ön paneli ilgilendiren ayrıntılar aşağıdaki şemada verilmiştir. Burada iterasyon sayacı, zaman sabitleri, hassaslık, faz, zaman erteleme, gösterge verileri, frekans ve veri sonuçlarını ilgilendiren tüm ayarlamalar mevcuttur. Bu ayarları ölçüm sistemimize göre ayarladıktan sonra, deneye başlamamıza engel kalmamıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bilindiği gibi nematik sıvı kristallerin en geniş uygulama alanları optik ve optoelektronik sistemleri içermektedir. Bu bakımdan NSK'lerin fiziksel özellikleri arasında optik ve elektrooptik özellikler en önemli özelliklerdendir. Çalışmamızda Materyal ve Metod Bölümü'nde belirlediğimiz yöntem ve deney setlerini kullanarak aşağıdaki ölçümler yapılmıştır:

1. optik geçirgenlik;
2. sabit elektrik alanda (DC) elektrooptik efekt;
3. değişken elektrik alanda (AC) elektrooptik efekt.

Malzeme olarak ise:

1. 4-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile;
2. 4-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile;
3. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate

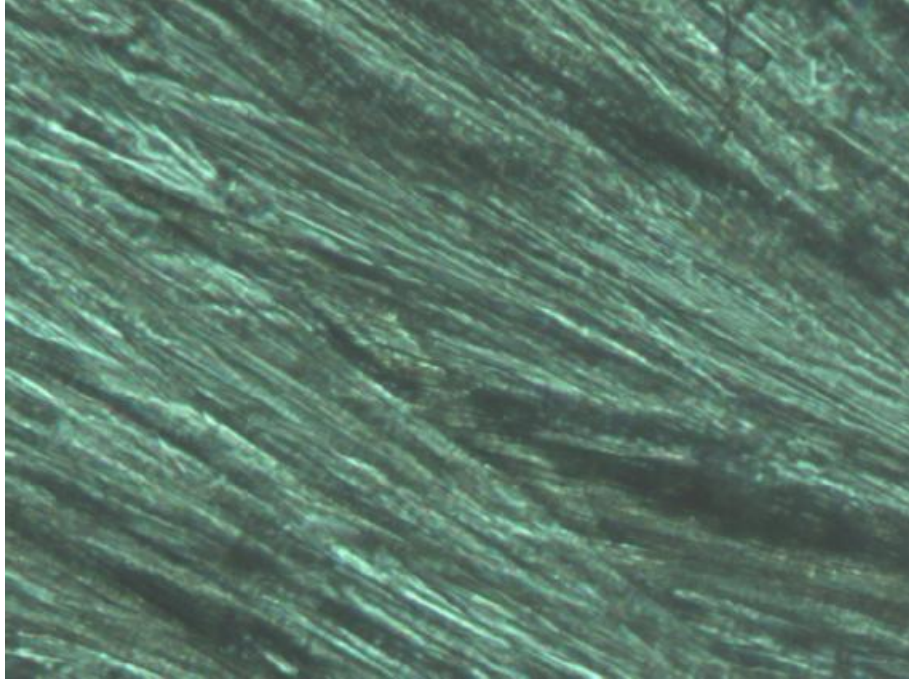
kullanılmıştır. Tüm bu çalışmalar NSK faz geçişlerini içine alan sıcaklık aralığında yapılmıştır. Aynı zamanda sistemden geçen ışığın polarizasyonunun dış etkenlere bağlı olarak nasıl değiştiği de incelenmiştir. Bu çalışmaların hepsi araştırılan üç malzemenin her biri için yapılmıştır.

4.1 4-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile

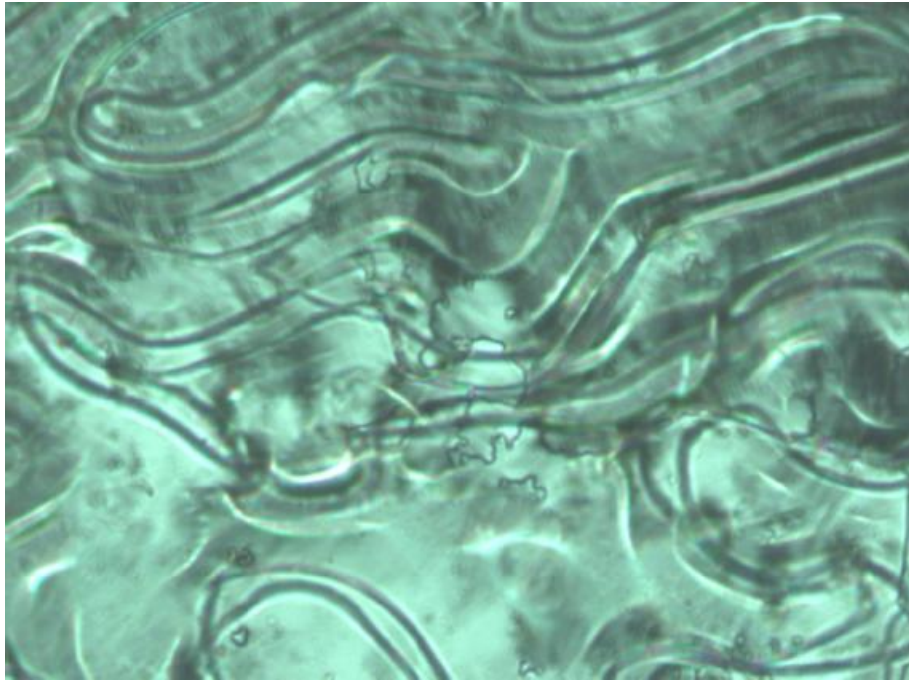
4.1.1 Optik Geçirgenlik

İlk olarak 4-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzemeyi inceledik.

Sıvı kristal numune hazırlandıktan sonra polarizasyon mikroskobunun ısıtma masası üzerinde ısıtma-soğutma işlemi sırasında CCD kamera ile sıvı kristalde ısınma ve soğuma sırasındaki faz dönüşümleri gözlemlendi ve farklı fazlarda (kristal ve nematik) görüntüler alınarak kaydedildi.



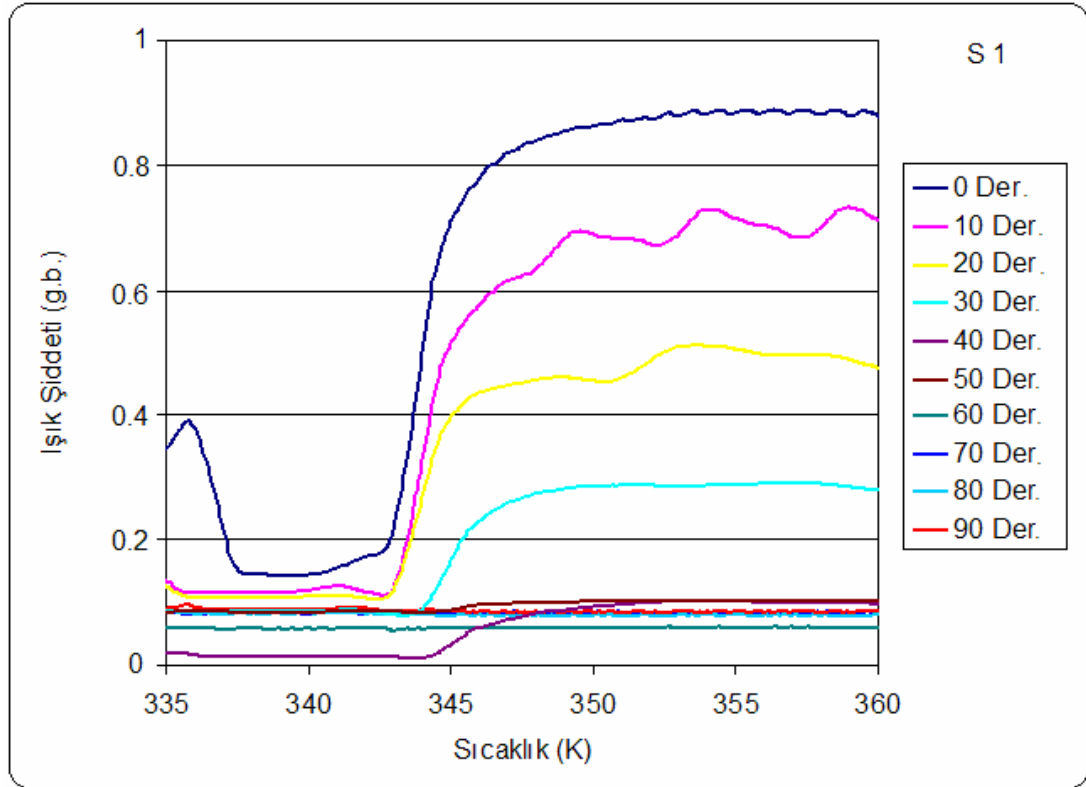
şekil 4.1. 4-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile malzemesinin kristal halde CCD kamera ile çekilmiş görüntüsü.



şekil 4.2. 4-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile malzemesinin nematik halde CCD kamera ile çekilmiş görüntüsü.

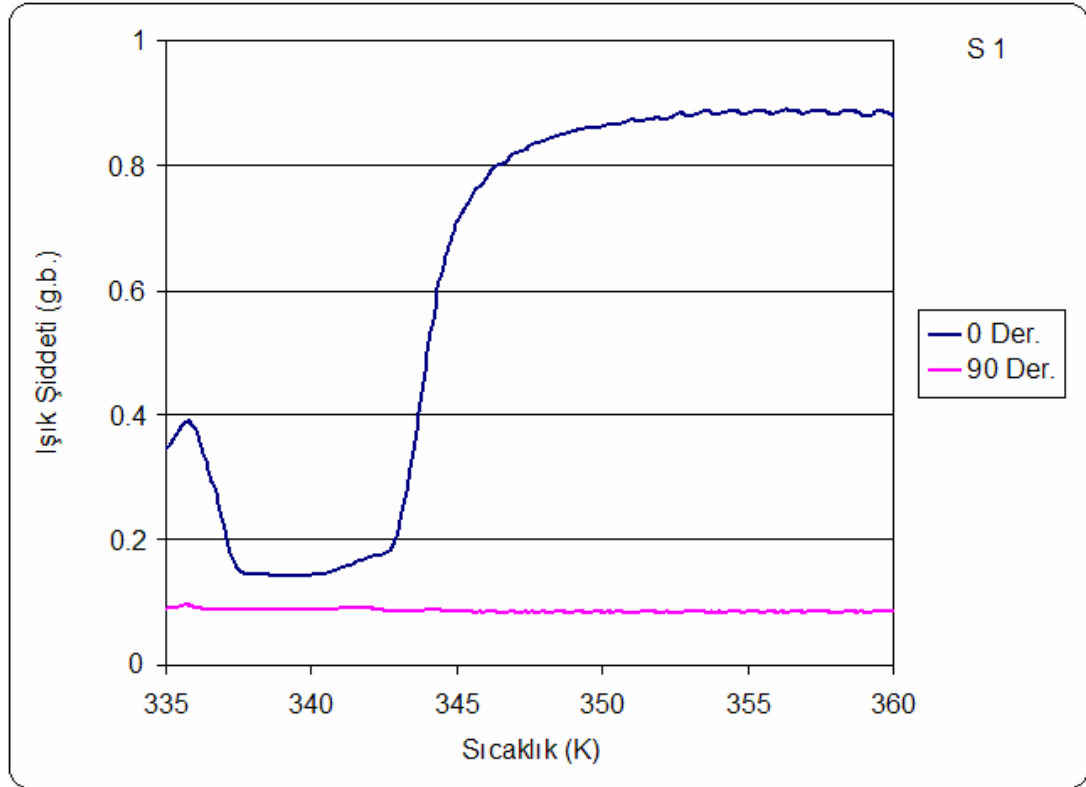
Bu malzeme için ölçümler 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında yapıldı. Başlangıçta birbirine paralel yönelmiş polarizör ve analizör arasındaki açı 10°'lik adımlarla arttırılarak, optik geçirgenlik sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldü. Ölçümlerin sonuçları şekil 4.3'teki grafikte verilmiştir.

Grafikten de görüldüğü gibi numunemiz ısıtıldığı zaman $T_1=336$ K sıcaklığından başlayarak sistemden geçen ışığın şiddeti azalıyor. $T_2=337.5$ K sıcaklığında minimum değere ulaşıyor ve $T_3=342.5$ K sıcaklığından başlayarak keskin artıyor ve $T_4=350$ K sıcaklığından sonra optik geçirgenlik doyuma ulaşıyor. Bu çalışmanın sonucu olarak şunu söyleyebiliriz ki, sinyalin azalması ve belirli bir sıcaklık aralığında minimum düzeyde gerçekleşmesi bu sıcaklık aralığında faz dönüşümünün gerçekleşmesine bağlıdır ve daha sonra sistemimiz izotropik faza geçmesi ile optik geçirgenliğin arttığını gözlemlemekteyiz. Sistem nematik fazdan izotropik faza geçtiğinde ve faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklık aralığında sistemde gerçekleşen yapı bozukluğu sistemdeki saçılmaları artırıyor ve bundan dolayı optik geçirgenlik minimum düzeyde seyretmektedir. Şunu da söylemek gerekiyor ki analizörün açısı değiştirildiğinde (0°'den 90°'ye kadar) sistemin optik geçirgenliği, faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklık aralığında minimum düzeyde olup birbirine yakın optik geçirgenlik değerlerinde seyretmekte ve izotropik faza geçildiğinde ise optik geçirgenliğin maksimum değerleri farklılık göstermektedir. Yani izotropik fazda Polarizör-NSK-Analizör sisteminden geçen ışığın polarizasyon açısına göre değişimi maksimumdan minimum değerine kadar değişiyor. Bu izotropik fazın tümüyle gerçekleştiğinin kanıtıdır. Bunu şekil 4.4'te daha iyi görmekteyiz.



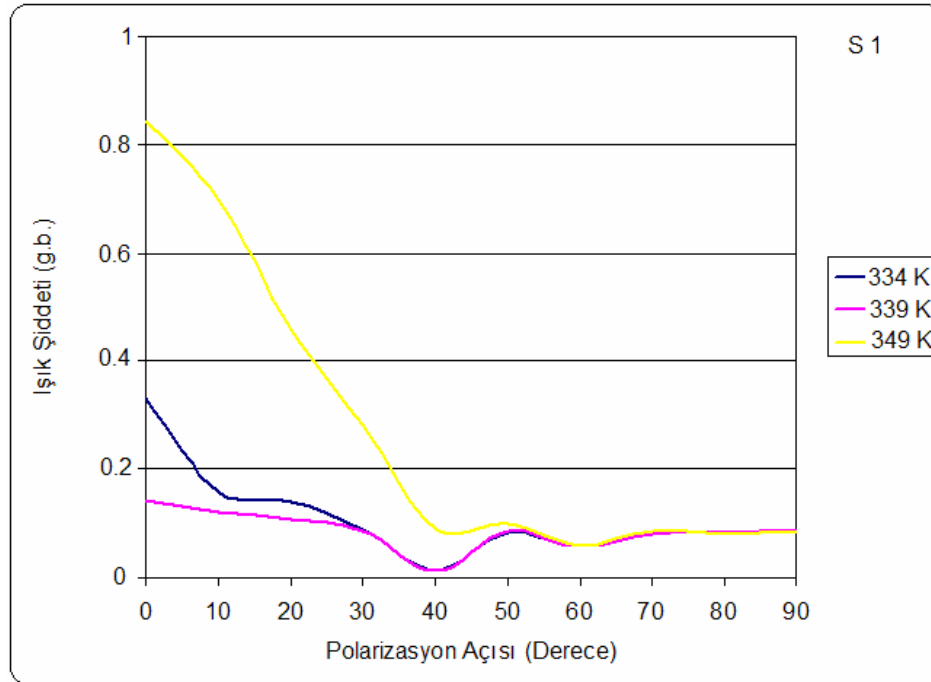
Şekil 4.3. 4-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, farklı polarizasyon açılarında optik geçirgenlik eğrileri.

4-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda ölçülen ışık şiddeti şekil 4.4'teki grafikte karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.

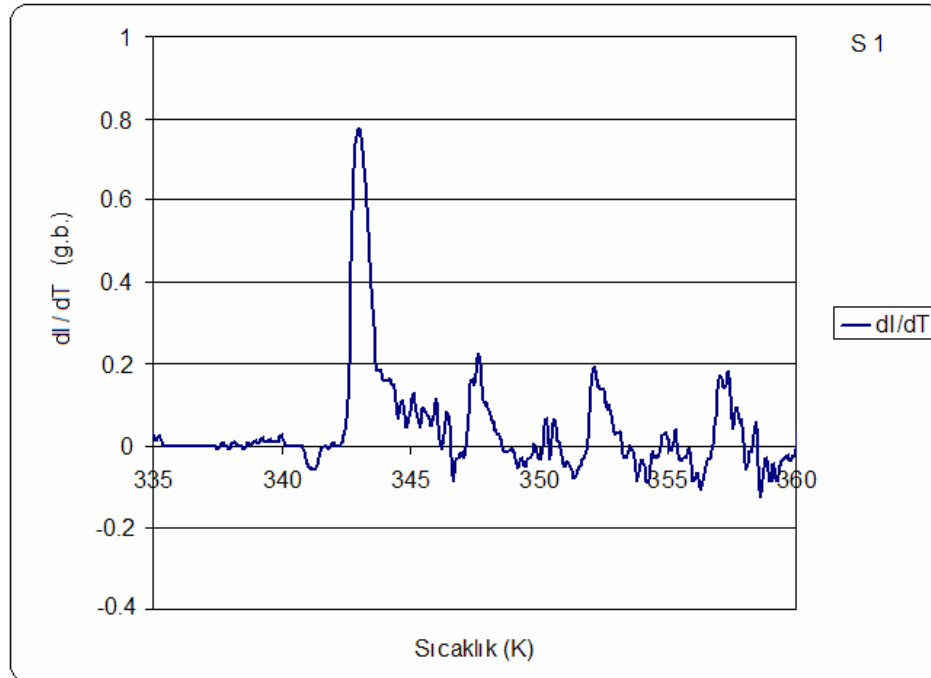


Şekil 4.4. 4-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzeme için polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri.

Şekil 4.5'te optik geçirgenliğin farklı sıcaklıklarda (334 K; 339 K ve 349 K) polarizasyon açısına göre değişimi verilmiştir. Seçilmiş sıcaklıklar nematik fazı, faz dönüşüm sıcaklığını ve izotropik fazı göstermektedir. Bu grafikte de saydamlığın izotropik fazda nematik faza göre daha yüksek olduğu faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklıklarda ise yüksek saçılmadan dolayı saydamlık minimum düzeydedir. Sistemin saydamlığının sıcaklığa göre değişimini daha net görmemiz için modülasyon spektrumunda şekil 4.6'daki grafikte verdik. Bu grafikte sistemin optik geçirgenliğinin hangi noktada minimum ve maksimum değere ulaştığını görebiliyoruz. Sıfır noktası 336 K ile 338 K sıcaklık değerinde gerçekleşmektedir. (Literatürde faz geçiş sıcaklığı 328 K ile 353 K arasındadır.)



Şekil 4.5. Optik geçirgenliğin, 334 K; 339 K ve 349 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri.



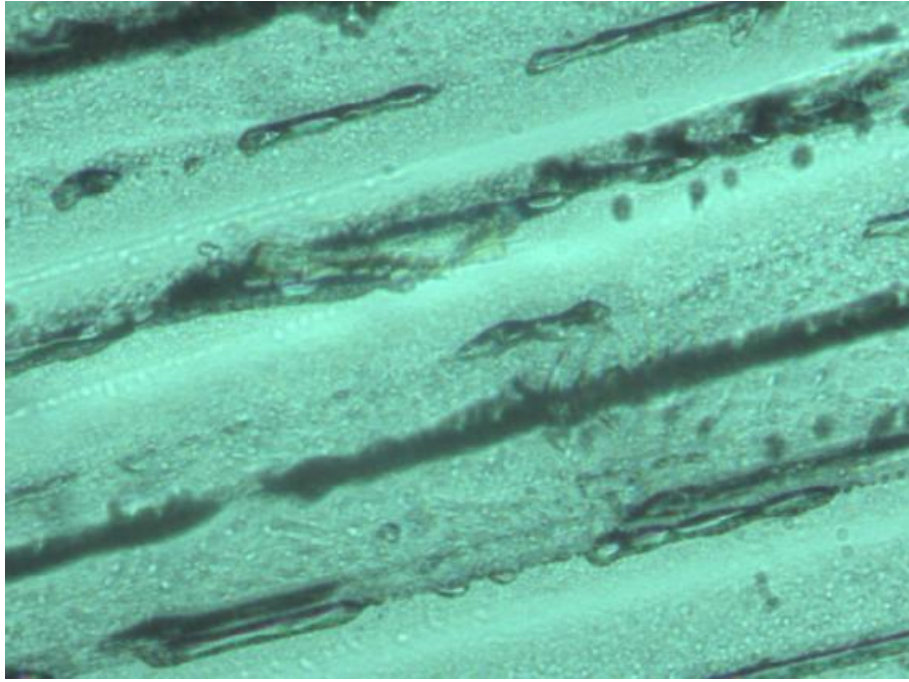
Şekil 4.6. 4-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzemenin, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi.

4.2 4-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile

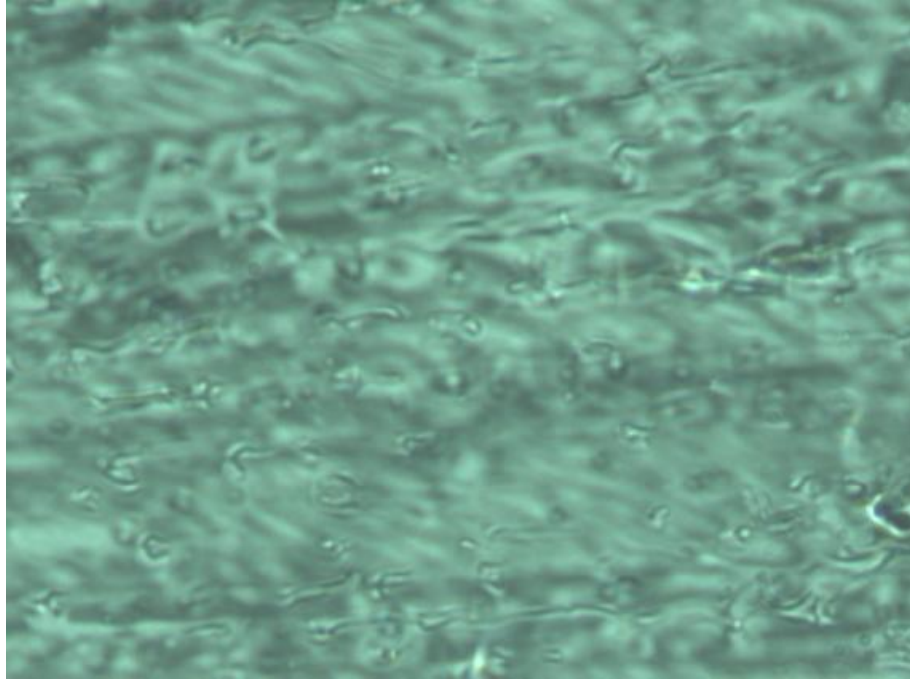
4.2.1 Optik Geçirgenlik

İkinci olarak 4-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzemeyi inceledik.

Sıvı kristal numune hazırlandıktan sonra polarizasyon mikroskobunun ısıtma masası üzerinde ısıtma-soğutma işlemi sırasında CCD kamera ile sıvı kristalde ısınma ve soğuma sırasındaki faz dönüşümleri gözlemlendi ve farklı fazlarda (kristal ve nematik) görüntüler alınarak kaydedildi.



Şekil 4.7. 4-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile malzemesinin kristal halde CCD kamera ile çekilmiş görüntüsü.

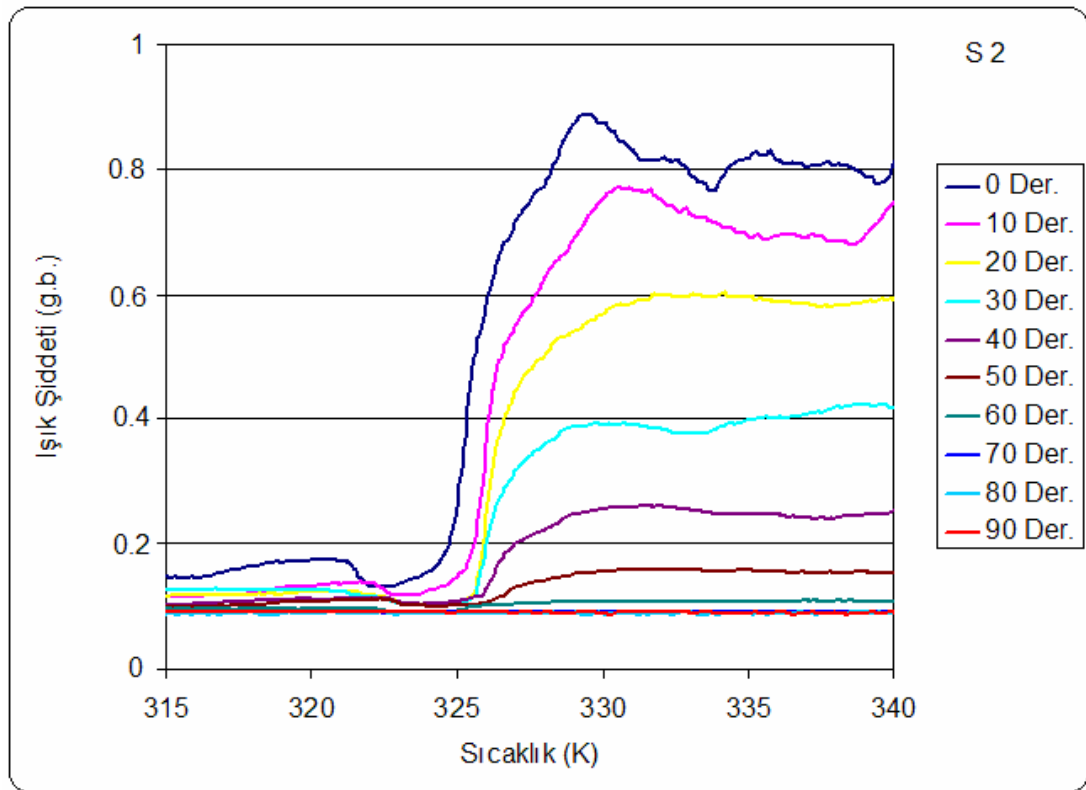


Şekil 4.8. 4-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile malzemesinin nematik halde CCD kamera ile çekilmiş görüntüsü.

Bu malzeme için ölçümler 315 K (42°C) ile 340 K (67°C) sıcaklık aralığında yapıldı. Başlangıçta birbirine paralel yönelmiş polarizör ve analizör arasındaki açı 10°'lik adımlarla arttırılarak, geçen ışığın şiddeti sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldü. Ölçümlerin sonuçları şekil 4.9'daki grafikte verilmiştir.

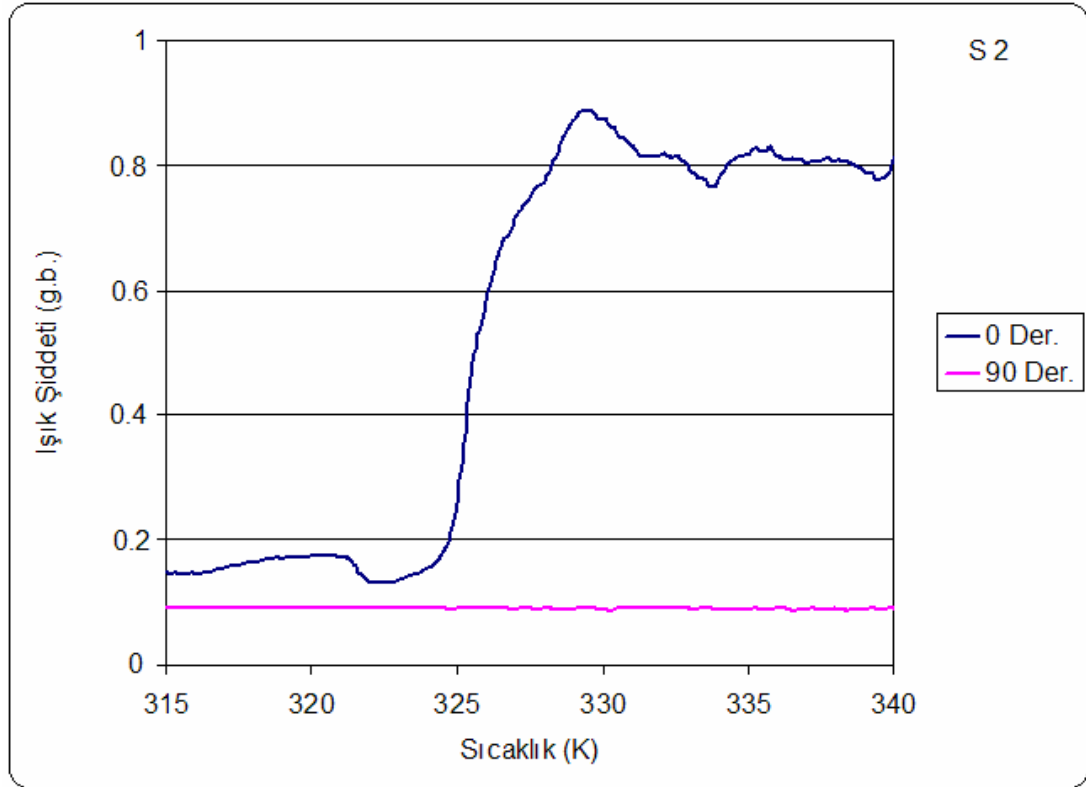
Grafikten de görüldüğü gibi numunemiz ısıtıldığı zaman $T_1=321$ K sıcaklığından başlayarak sistemden geçen ışığın şiddeti azalıyor. $T_2=323$ K sıcaklığında minimum değere ulaşıyor. $T_3=326$ K sıcaklığından başlayarak keskin artıyor ve $T_4=329$ K sıcaklığından sonra optik geçirgenlik doyuma ulaşıyor. Bu çalışmanın sonucu olarak şunu söyleyebiliriz ki, sinyalin azalması ve belirli bir sıcaklık aralığında minimum düzeyde gerçekleşmesi bu sıcaklık aralığında faz dönüşümünün gerçekleşmesine bağlıdır ve daha sonra sistemimiz izotropik faza geçmesi ile optik geçirgenliğin arttığını gözlemlemekteyiz. Sistem nematik fazdan izotropik faza geçtiğinde ve faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklık aralığında sistemde gerçekleşen yapı bozukluğu sistemdeki saçılmaları artırıyor ve bundan dolayı optik geçirgenlik minimum düzeyde seyretmektedir. Şunu da söylemek gerekiyor ki analizörün açısı değiştirildiğinde (0°'den 90°'ye kadar) sistemin optik geçirgenliği,

faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklık aralığında minimum düzeyde olup birbirine yakın optik geçirgenlik değerlerinde seyretmekte, izotropik faza geçildiğinde ise optik geçirgenliğin maksimum değerleri farklılık göstermektedir. Yani izotropik fazda Polarizör-NSK-Analizör sisteminden geçen ışığın polarizasyon açısına göre değişimi maksimumdan minimum değerine kadar değişiyor. Bu izotropik fazın tümüyle gerçekleştiğinin kanıtıdır. Bunu şekil 4.10'da daha iyi görmekteyiz.



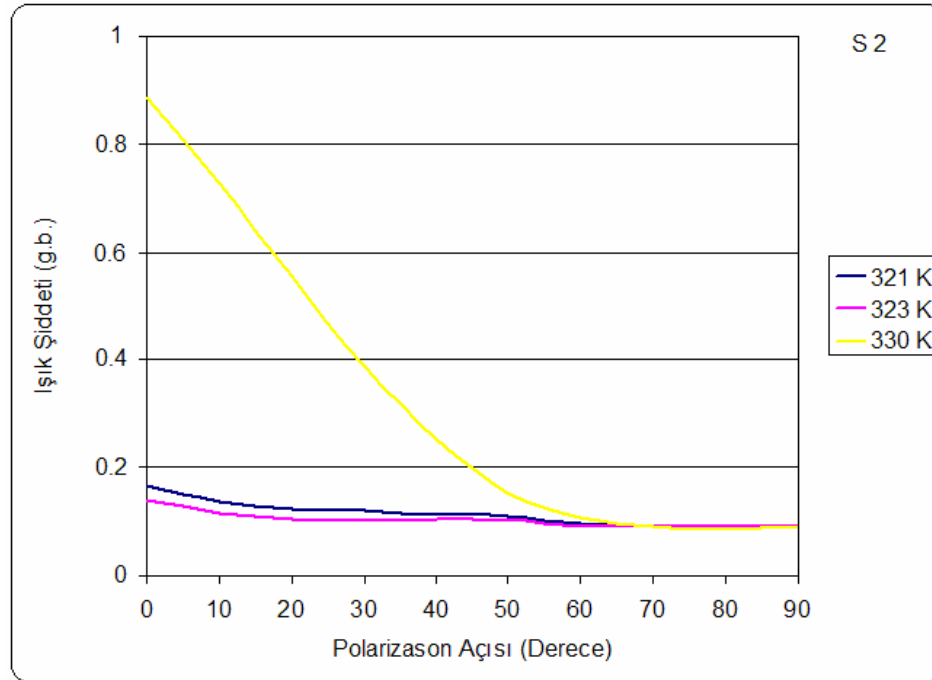
Şekil 4.9. 4-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzemenin 315 K ile 340 K sıcaklık aralığında, farklı polarizasyon açılarında optik geçirgenlik eğrileri.

4-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzeme için 315 K ile 340 K sıcaklık aralığında, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda ölçülen ışık şiddeti şekil 4.10'daki grafikte karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.

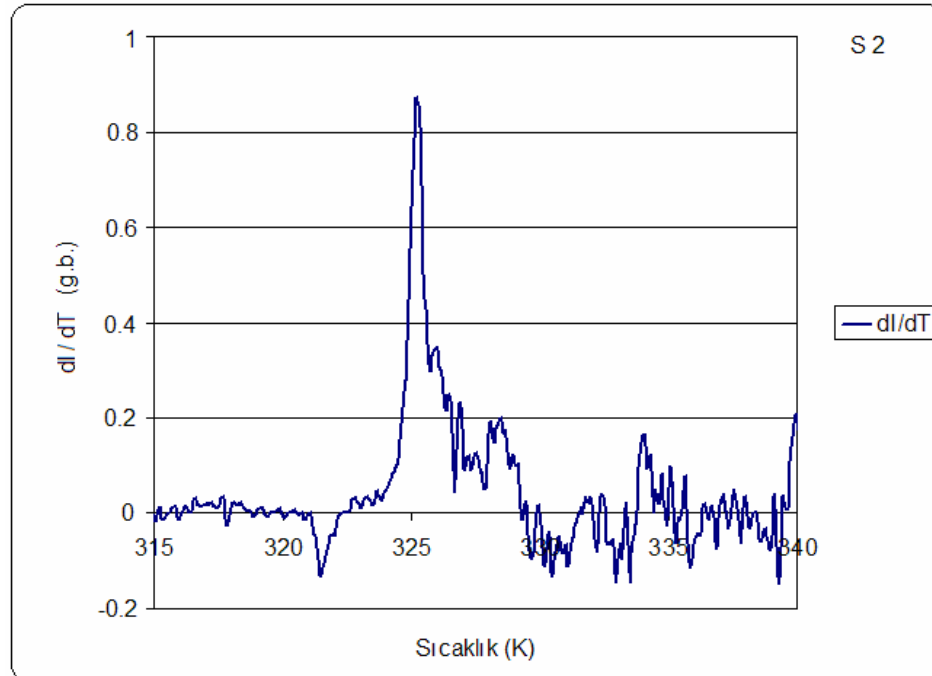


Şekil 4.10. 4-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzeme için polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri.

Şekil 4.11’de optik geçirgenliğin farklı sıcaklıklarda (321 K, 323 K ve 330 K) polarizasyon açısına göre değişimi verilmiştir. Seçilmiş sıcaklıklar nematik fazı, faz dönüşüm sıcaklığını ve izotropik fazı göstermektedir. Bu grafikte de saydamlığın izotropik fazda nematik faza göre daha yüksek olduğu faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklıklarda ise yüksek saçılmadan dolayı saydamlık minimum düzeydedir. Sistemin saydamlığının sıcaklığa göre değişimini daha net görmemiz için modülasyon spektrumunda şekil 4.12’deki grafikte verdik. Bu grafikte sistemin optik geçirgenliğinin hangi noktada minimum ve maksimum değere ulaştığını görebiliyoruz. Sıfır noktası 322 K sıcaklık değerinde gerçekleşmektedir.



Şekil 4.11. Optik Geçirgenliğin; 321 K, 323 K ve 330 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri.



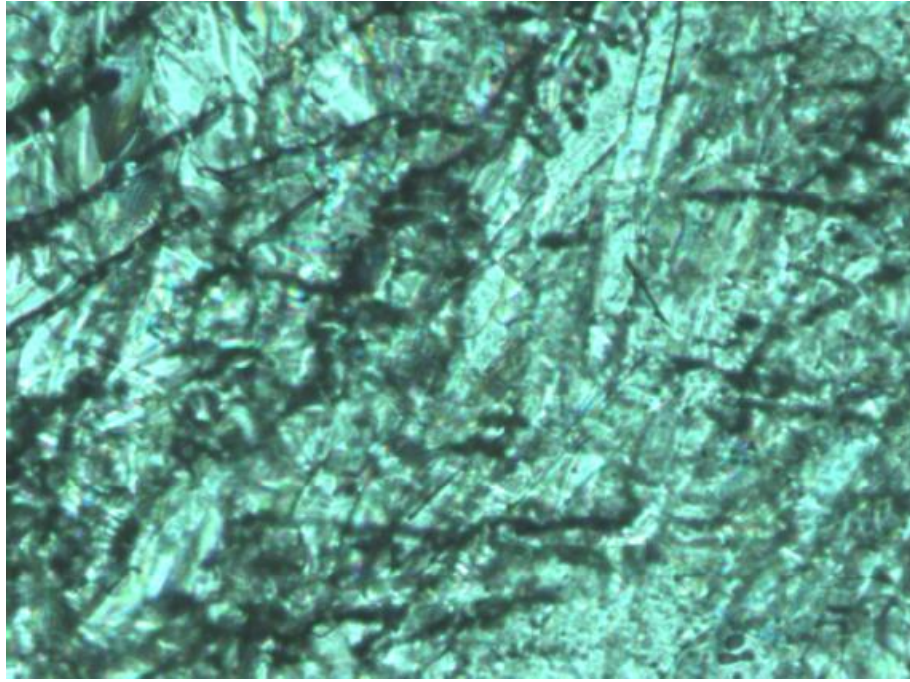
Şekil 4.12. 4-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile sıvı kristal malzemenin, 315 K ile 340 K sıcaklık aralığında, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi.

4.3 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate

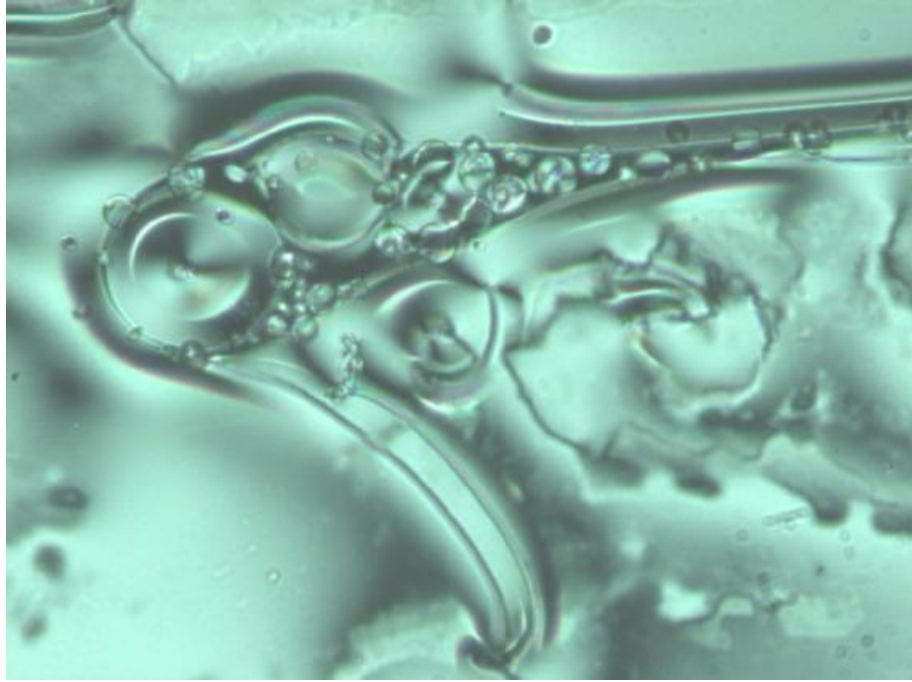
4.3.1 Optik Geçirgenlik

Son olarak 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemeyi inceledik.

Sıvı kristal numune hazırlandıktan sonra polarizasyon mikroskobunun ısıtma masası üzerinde ısıtma-soğutma işlemi sırasında CCD kamera ile sıvı kristalde ısınma ve soğuma sırasındaki faz dönüşümleri gözlemlendi ve farklı fazlarda (kristal ve nematik) görüntüler alınarak kaydedildi.



Şekil 4.13. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate malzemesinin kristal halde CCD kamera ile çekilmiş görüntüsü.

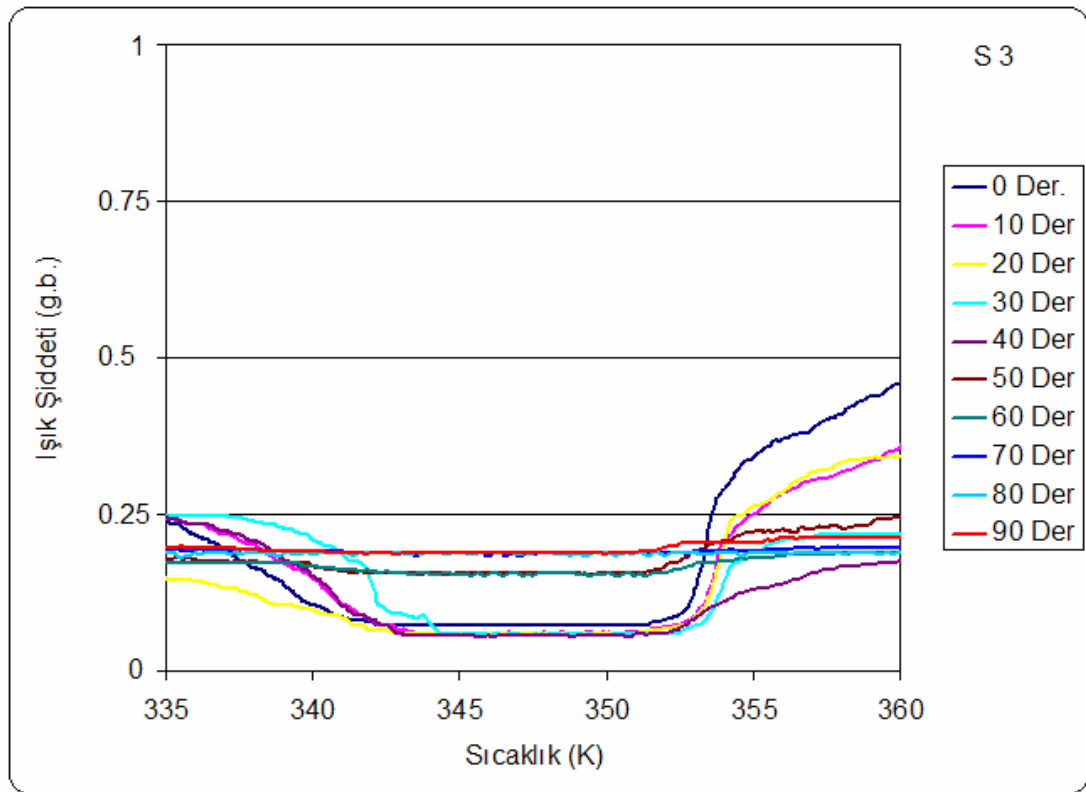


Şekil 4.14. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate malzemesinin nematik halde CCD kamera ile çekilmiş görüntüsü.

Bu malzeme için ölçümler 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında yapıldı. Başlangıçta birbirine paralel yönelmiş polarizör ve analizör arasındaki açı 10°'lik adımlarla artırılarak, optik geçirgenlik sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldü. Ölçümlerin sonuçları şekil 4.15'deki grafikte verilmiştir.

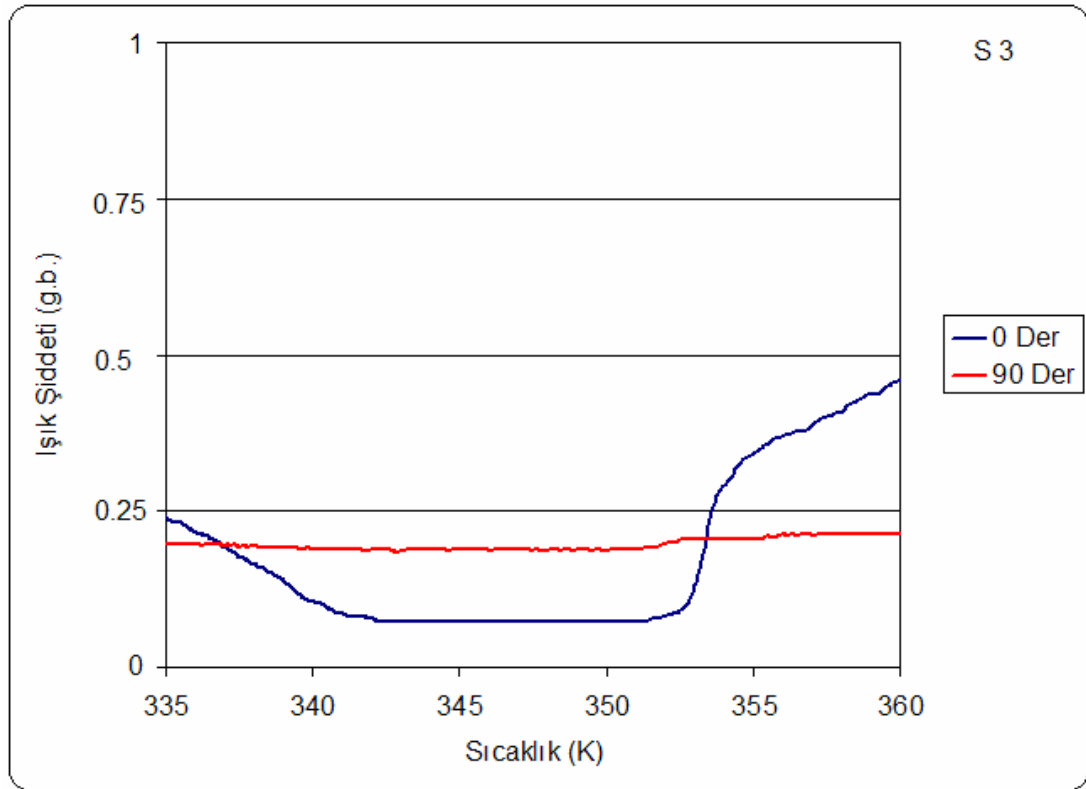
Grafikten de görüldüğü gibi numunemiz ısıtıldığı zaman $T_1=335$ K sıcaklığından başlayarak sistemden geçen ışığın şiddeti azalıyor. $T_2=343$ K sıcaklığında minimum değere ulaşıyor. $T_3=353$ K sıcaklığından başlayarak keskin artıyor ve $T_4=360$ K sıcaklığından sonra optik geçirgenlik doyuma ulaşıyor. Bu çalışmanın sonucu olarak şunu söyleyebiliriz ki, sinyalin azalması ve belirli bir sıcaklık aralığında minimum düzeyde gerçekleşmesi bu sıcaklık aralığında faz dönüşümünün gerçekleşmesine bağlıdır ve daha sonra sistemimiz izotropik faza geçmesi ile optik geçirgenliğin arttığını gözlemlemekteyiz. Sistem nematik fazdan izotropik faza geçtiğinde ve faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklık aralığında sistemde gerçekleşen yapı bozukluğu sistemdeki saçılmaları artırıyor ve bundan dolayı optik geçirgenlik minimum düzeyde seyretmektedir. Şunu da söylemek gerekiyor ki

analizörün açısı değiştirildiğinde (0° 'den 90° 'ye kadar) sistemin optik geçirgenliği, faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklık aralığında minimum düzeyde olup birbirine yakın optik geçirgenlik değerlerinde seyretmekte, izotropik faza geçildiğinde ise optik geçirgenliğin maksimum değerleri farklılık göstermektedir. Yani izotropik fazda Polarizör-NSK-Analizör sisteminden geçen ışığın polarizasyon açısına göre değişimi maksimumdan minimum değerine kadar değişiyor. Bu izotropik fazın tümüyle gerçekleştiğinin kanıtıdır. Bunu şekil 4.16'da daha iyi görmekteyiz.



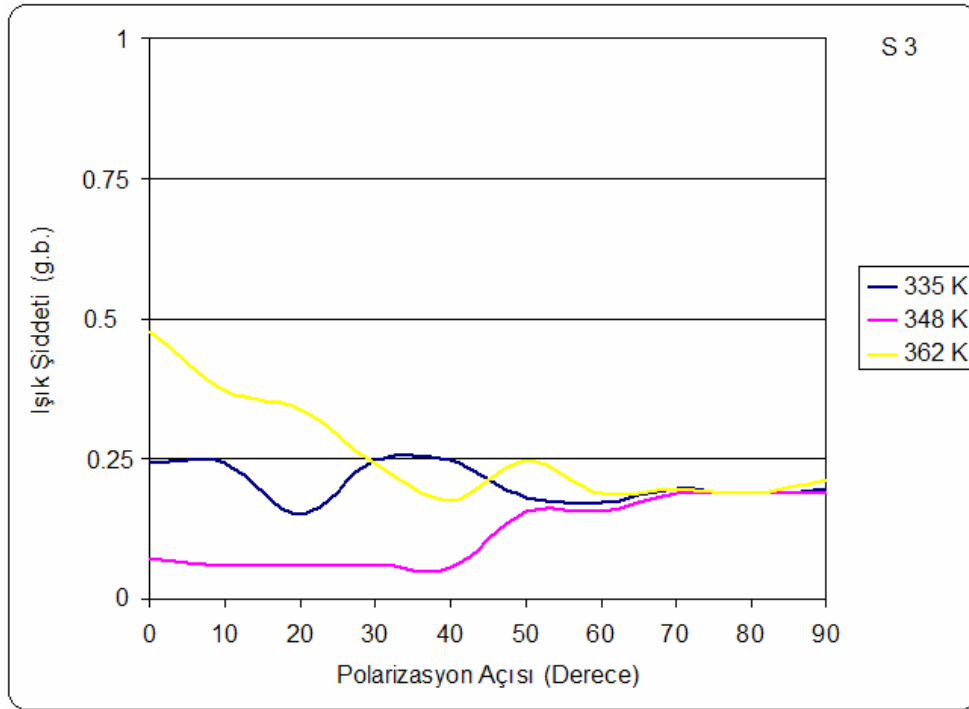
Şekil 4.15. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, farklı polarizasyon açılarında optik geçirgenlik eğrileri.

4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda ölçülen ışık şiddeti şekil 4.16'daki grafikte karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.

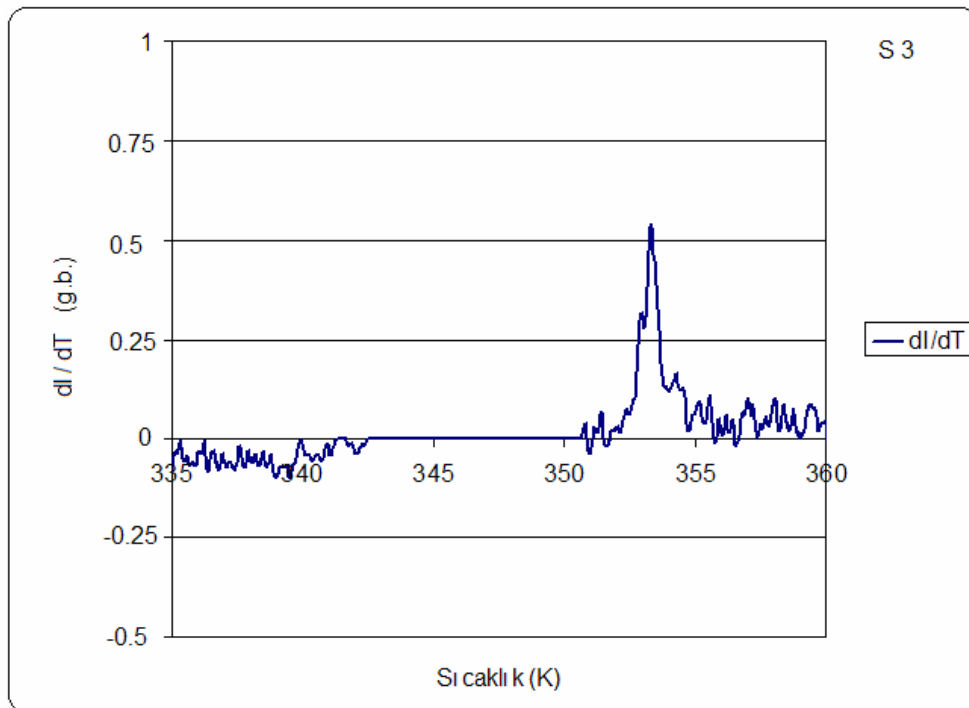


Şekil 4.16. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri.

Şekil 4.17'de optik geçirgenliğin farklı sıcaklıklarda (335 K; 348 K ve 362 K) polarizasyon açısına göre değişimi verilmiştir. Seçilmiş sıcaklıklar nematik fazı, faz dönüşüm sıcaklığını ve izotropik fazı göstermektedir. Bu grafikte de saydamlığın izotropik fazda nematik faza göre daha yüksek olduğu faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklıklarda ise yüksek saçılmadan dolayı saydamlık minimum düzeydedir. Sistemin saydamlığının sıcaklığa göre değişimini daha net görmemiz için modülasyon spektrumunda şekil 4.18'deki grafikte verdik. Bu grafikte sistemin optik geçirgenliğinin hangi noktada minimum ve maksimum değere ulaştığını görebiliyoruz. Sıfır noktası 343 K ile 351 K sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. (Literatürde faz geçiş sıcaklığı 346 K ile 387 K arasındadır.)



Şekil 4.17. Optik geçirgenliğin; 335 K, 348 K ve 362 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri.

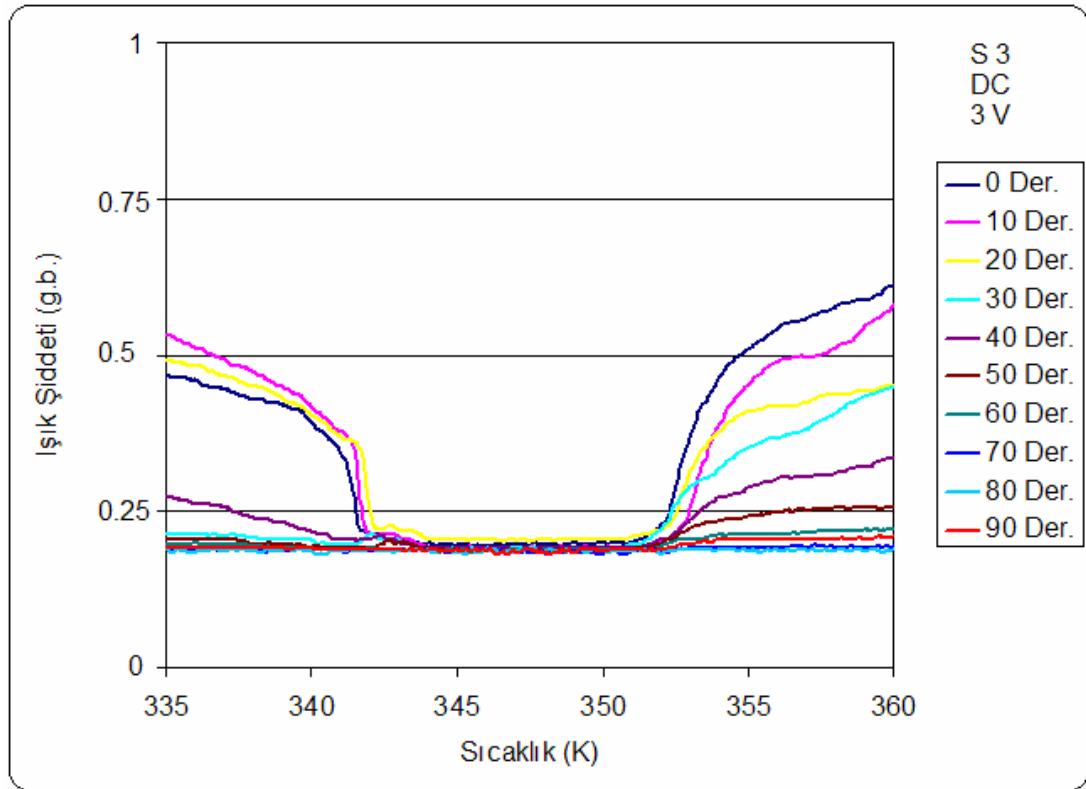


Şekil 4.18. 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi.

4.3.2 Sabit Elektrik Alanda (DC) Elektrooptik Efekt

Araştırdığımız her üç malzemede de optik geçirgenlik incelendikten sonra bu malzemeleri sabit, dış elektrik alanda inceledik. Dış elektrik alan ışığın yayılma yönünde uygulanmıştır. Bu durumlara boyuna (longitudinal) elektrooptik efekt denir. Sisteme uyguladığımız voltaj değerleri 3V, 6V, 9V'tur. İlk başta polarizör ve analizörün arasındaki açı 0° olarak belirlenmiş olup sisteme elektrik alan uygulanıyor ve bu elektrik alanda sistemin sıcaklığı değiştirilerek optik geçirgenlik inceleniyor. Bu durumda elektrik alan uyguladığımız sistemin optik geçirgenliği, elektrik alan uygulamadığımız zaman optik geçirgenliğe nazaran daha düşüktür. Ama faz dönüşüm sıcaklık aralığı daha geniş görünmektedir. Sistemin saydamlığının daha büyük sıcaklık aralığında minimum düzeyde seyretmesi uygulanan elektrik alanın NSK'in yönelim yapısını aynı sıcaklıkta daha çabuk bozmakta ve bundan dolayı sistemdeki ışık saçılmalarının yüksek düzeyde seyretmesine bağlıdır.

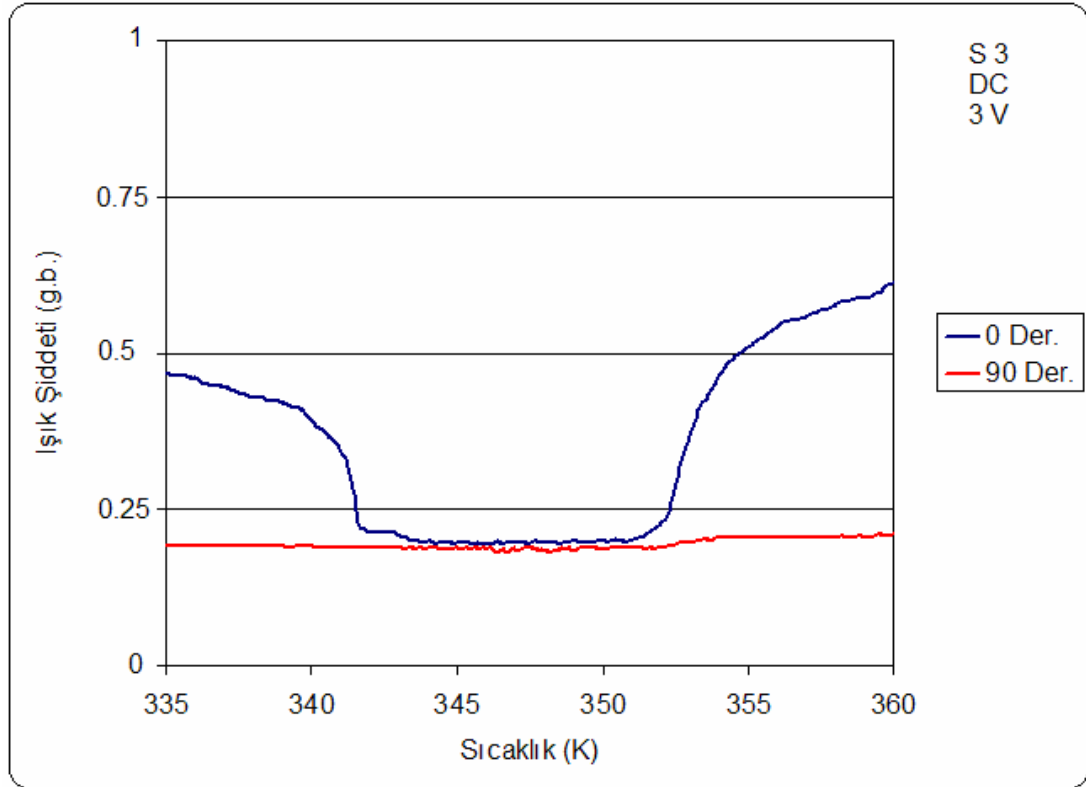
4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemeyi 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 3V değerinde inceledik. Başlangıçta birbirine paralel yönelmiş polarizör ve analizör arasındaki açı 10° 'lik adımlarla arttırılarak, geçen ışığın şiddeti sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldü. Ölçümlerin sonuçları şekil 4.19'daki grafikte verilmiştir.



Şekil 4.19. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, sabit, dış elektrik alanının 3V değerinde farklı polarizasyon açılarında optik geçirgenlik eğrileri.

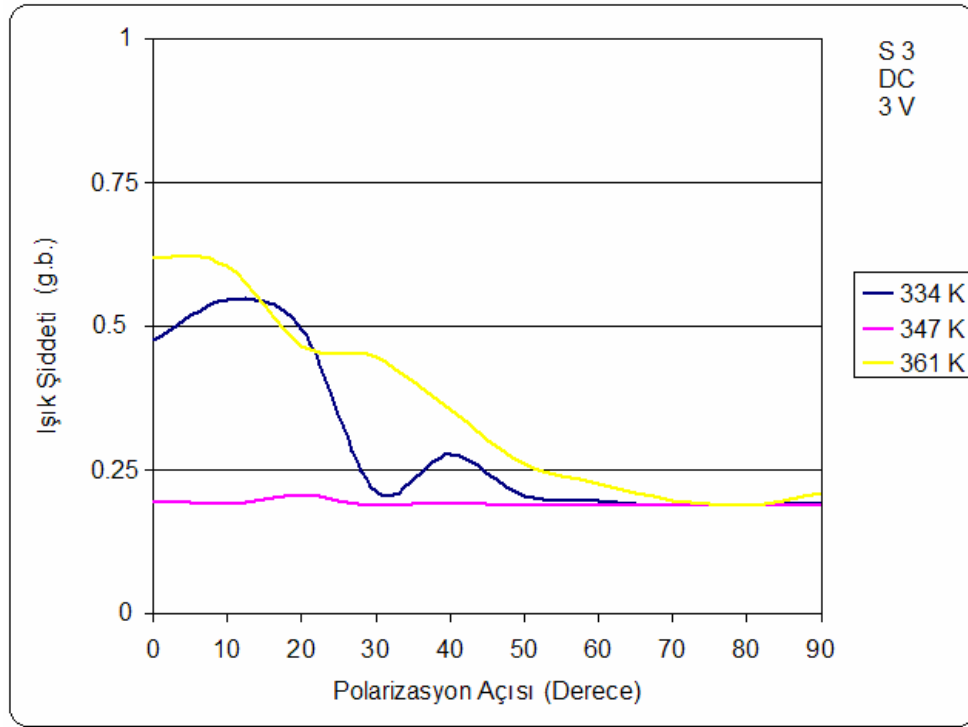
Grafikten de görüldüğü gibi numunemiz ısıtıldığı zaman $T_1=335$ K sıcaklığından başlayarak sistemden geçen ışığın şiddeti azalıyor. $T_2=342$ K sıcaklığında minimum değere ulaşıyor. $T_3=352$ K sıcaklığından başlayarak keskin artıyor ve $T_4=360$ K sıcaklığından sonra optik geçirgenlik doyuma ulaşıyor. Optik geçirgenliğin nematik fazdaki değerleri ile izotropik fazdaki değerleri birbirine daha yakındır.

4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 3V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda ölçülen ışık şiddeti şekil 4.20'deki grafikte karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.

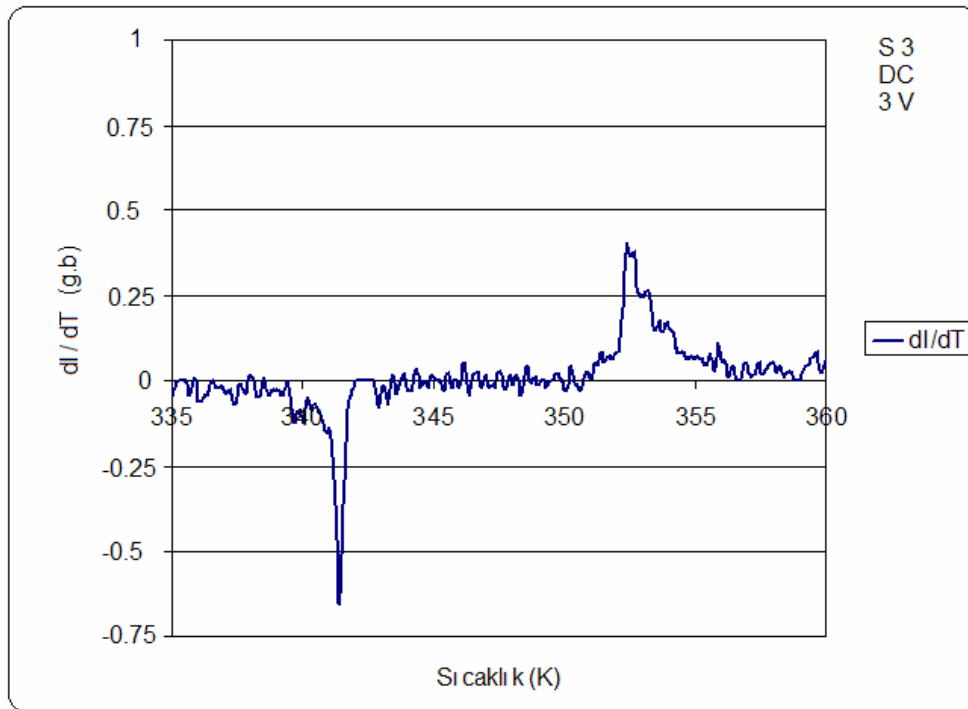


Şekil 4.20. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının 3V voltaj değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri.

Şekil 4.21'de optik geçirgenliğin farklı sıcaklıklarda (334 K; 347 K ve 361 K) polarizasyon açısına göre değişimi verilmiştir. Seçilmiş sıcaklıklar nematik fazı, faz dönüşüm sıcaklığını ve izotropik fazı göstermektedir. Bu grafikte de saydamlığın izotropik fazda nematik faza göre daha yüksek olduğu faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklıklarda ise yüksek saçılmadan dolayı saydamlık minimum düzeydedir. Sistemin saydamlığının sıcaklığa göre değişimini daha net görmemiz için modülasyon spektrumunda şekil 4.22'deki grafikte verdik. Bu grafikte sistemin optik geçirgenliğinin hangi noktada minimum ve maksimum değere ulaştığını görebiliyoruz. Sıfır noktası 342 K ile 343 K sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir.

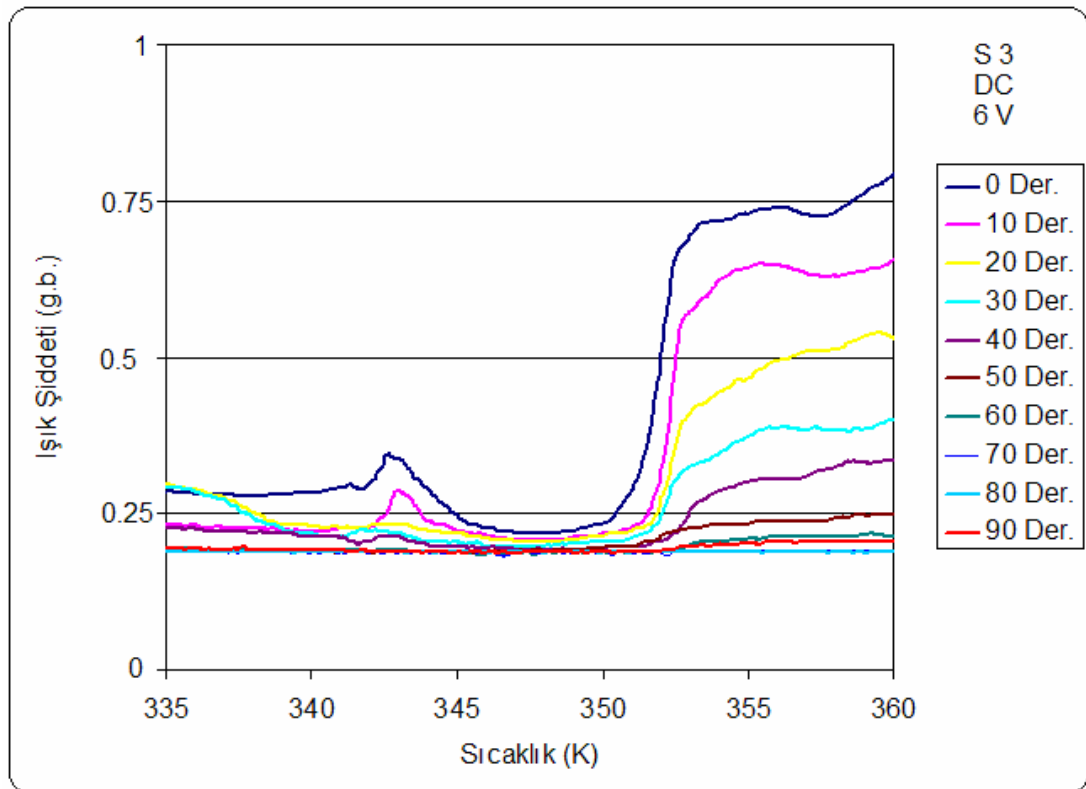


Şekil 4.21. Optik geçirgenliğin; 334 K, 347 K ve 361 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri.



Şekil 4.22. 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 3V değerinde, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi.

4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemeyi 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 6V değerinde inceledik. Başlangıçta birbirine paralel yönelmiş polarizör ve analizör arasındaki açı 10°'lik adımlarla artırılarak, geçen ışığın şiddeti sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldü. Ölçümlerin sonuçları şekil 4.23'teki grafikte verilmiştir.

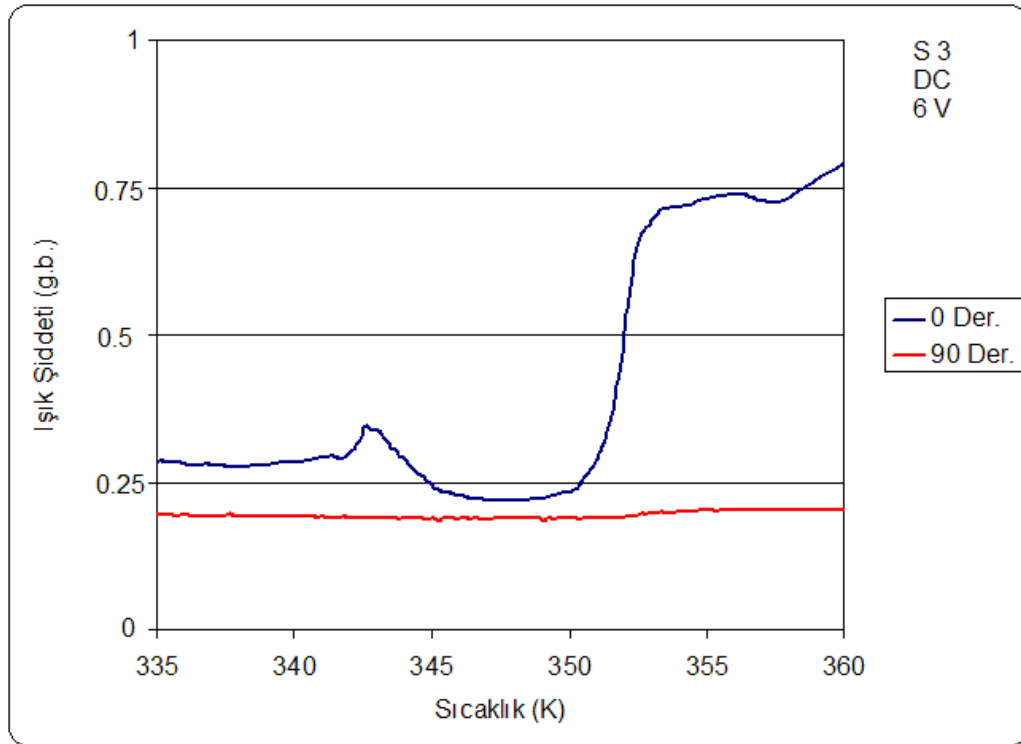


Şekil 4.23. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, sabit, dış elektrik alanının 6V değerinde farklı polarizasyon açılarındaki optik geçirgenlik eğrileri.

Grafikten de görüldüğü gibi numunemiz ısıtıldığı zaman $T_1=343$ K sıcaklığından başlayarak sistemden geçen ışığın şiddeti azalıyor. $T_2=347$ K sıcaklığında minimum değere ulaşılıyor. $T_3=351$ K sıcaklığından başlayarak keskin artıyor ve $T_4=355$ K sıcaklığından sonra optik geçirgenlik doyuma ulaşılıyor. Bu elektrik alanında ise optik geçirgenlik nematik fazda daha düşük düzeyde seyrediyor ama izotropik fazda saydamlık düzeyi oldukça yüksekte seyretmektedir. DC elektrik

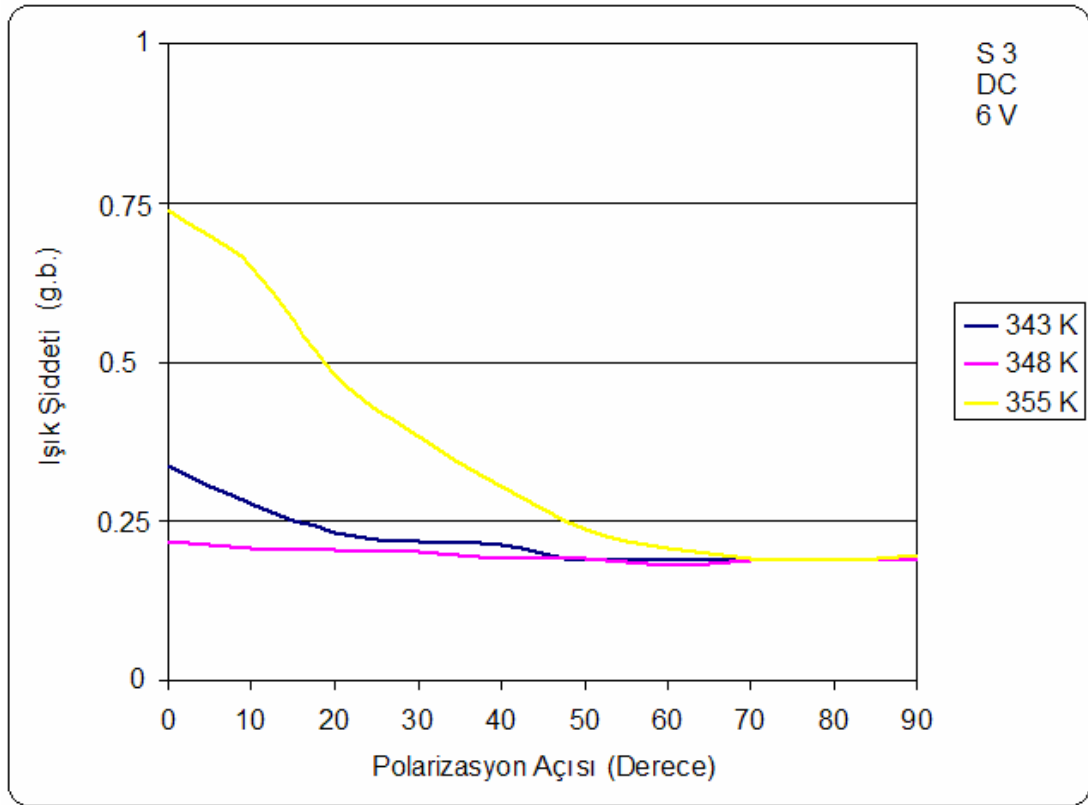
alan uygulamalarında faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklıklarda optik geçirgenlik $E=0$ olduğundan farklı olarak $T_1 \leq T \leq T_2$ aralığında bir maksimumdan geçmektedir. Faz dönüşümü sıcaklık bölgesindeki maksimum sıcaklığa bağlı yapı bozulmalarından dolayı gerçekleşen saçılmanın elektrik alanında farklı seyretmesine bağlıdır. Yani başlangıçta sıcaklığa bağlı yapı bozulmaları daha yavaş gerçekleşiyor ve uygulanan elektrik alan bu bozulmaların gerçekleşmesine engel oluyor ama sıcaklığın artışı yapı bozulmalarını hızlandırıyor ve dış elektrik alanı bu bozulmalara engel olamıyor.

4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 6V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda ölçülen ışık şiddeti şekil 4.24'teki grafikte karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.

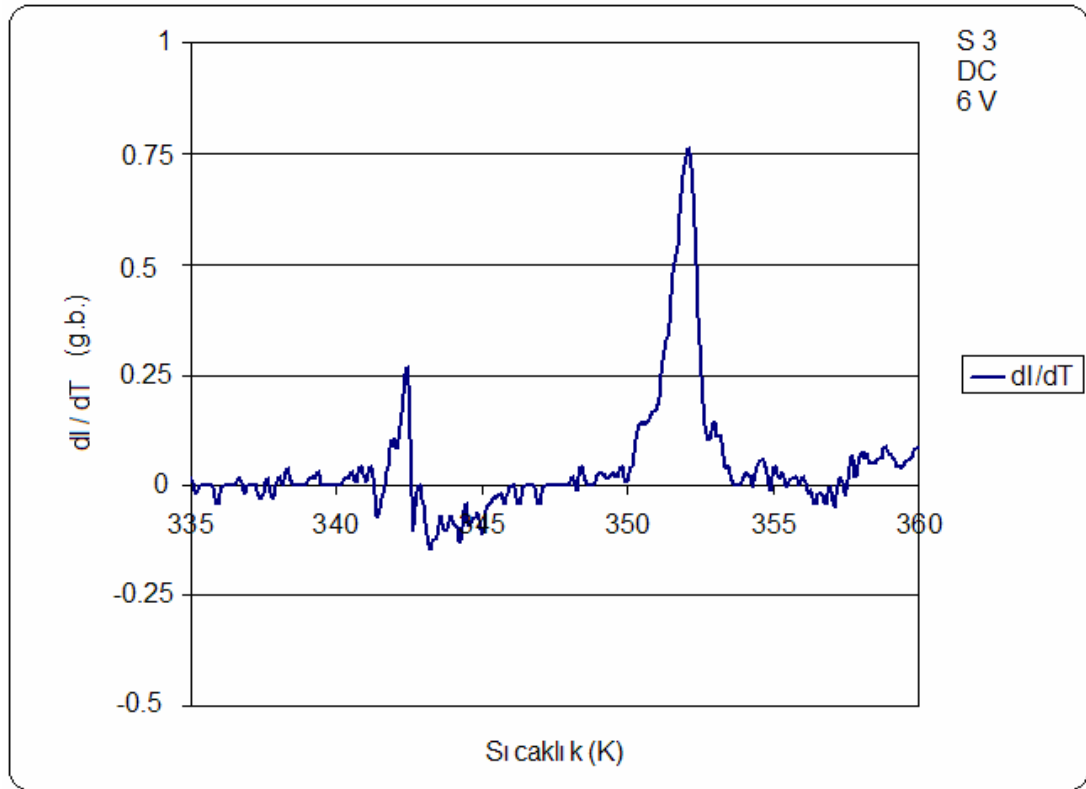


Şekil 4.24. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 6V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri.

Şekil 4.25'te optik geçirgenliğin farklı sıcaklıklarda (343 K; 348 K ve 355 K) polarizasyon açısına göre değişimi verilmiştir. Seçilmiş sıcaklıklar nematik fazı, faz dönüşüm sıcaklığını ve izotropik fazı göstermektedir. Bu grafikte de saydamlığın izotropik fazda nematik faza göre daha yüksek olduğu faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklıklarda ise yüksek saçılmadan dolayı saydamlık minimum düzeydedir. Sistemin saydamlığının sıcaklığa göre değişimini daha net görmemiz için modülasyon spektrumunda şekil 4.26'daki grafikte verdik. Bu grafikte sistemin optik geçirgenliğinin hangi noktada minimum ve maksimum değere ulaştığını görebiliyoruz. Grafikten de görüldüğü gibi sıfır noktası 347 K ile 348 K sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir.

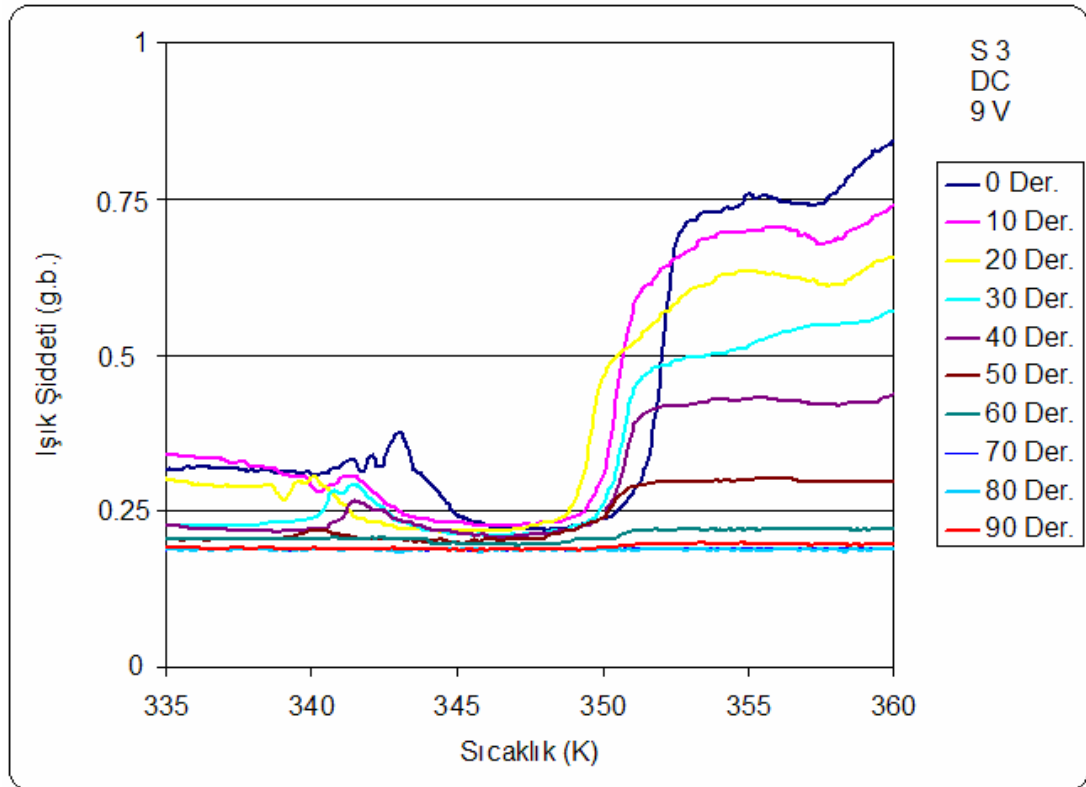


Şekil 4.25. Optik geçirgenliğin; 343 K, 348 K ve 355 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri.



Şekil 4.26. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 6V değerinde, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi.

4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemeyi 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 9V değerinde inceledik. Başlangıçta birbirine paralel yönelmiş polarizör ve analizör arasındaki açı 10°'lik adımlarla arttırılarak, geçen ışığın şiddeti sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldü. Ölçümlerin sonuçları şekil 4.27'deki grafikte verilmiştir.

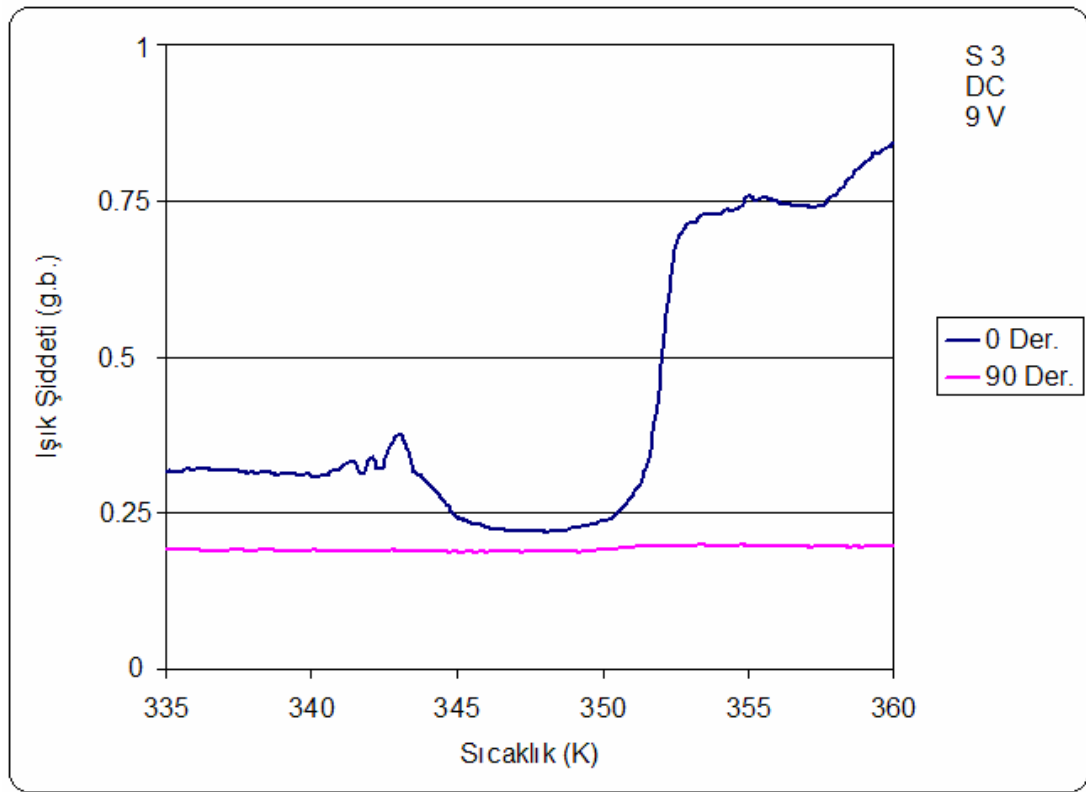


Şekil 4.27. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, sabit, dış elektrik alanının (DC) 9V değerinde farklı polarizasyon açılarında optik geçirgenlik eğrileri.

Grafikten de görüldüğü gibi numunemiz ısıtıldığı zaman $T_1=343$ K sıcaklığından başlayarak sistemden geçen ışığın şiddeti azalıyor. $T_2=345$ K sıcaklığında minimum değere ulaşıyor. $T_3=350$ K sıcaklığından başlayarak keskin artıyor ve $T_4=353$ K sıcaklığından sonra optik geçirgenlik doyuma ulaşıyor. Bu elektrik alanında ise optik geçirgenlik nematik fazda daha düşük düzeyde seyrediyor ama izotropik fazda saydamlık düzeyi oldukça yüksekte seyretmektedir. DC elektrik alan uygulamalarında faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklıklarda optik geçirgenlik $E=0$ olduğundakinden farklı olarak $T_1 \leq T \leq T_2$ aralığında bir maksimumdan geçmektedir. Faz dönüşümü sıcaklık bölgesindeki maksimum sıcaklığa bağlı yapı bozulmalarından dolayı gerçekleşen saçılmanın elektrik alanında farklı seyretmesine bağlıdır. Yani başlangıçta sıcaklığa bağlı yapı bozulmaları daha yavaş gerçekleşiyor ve uygulanan elektrik alan bu bozulmaların gerçekleşmesine engel oluyor ama

sıcaklığın artışı yapı bozulmalarını hızlandırıyor ve dış elektrik alanı bu bozulmalara engel olamıyor.

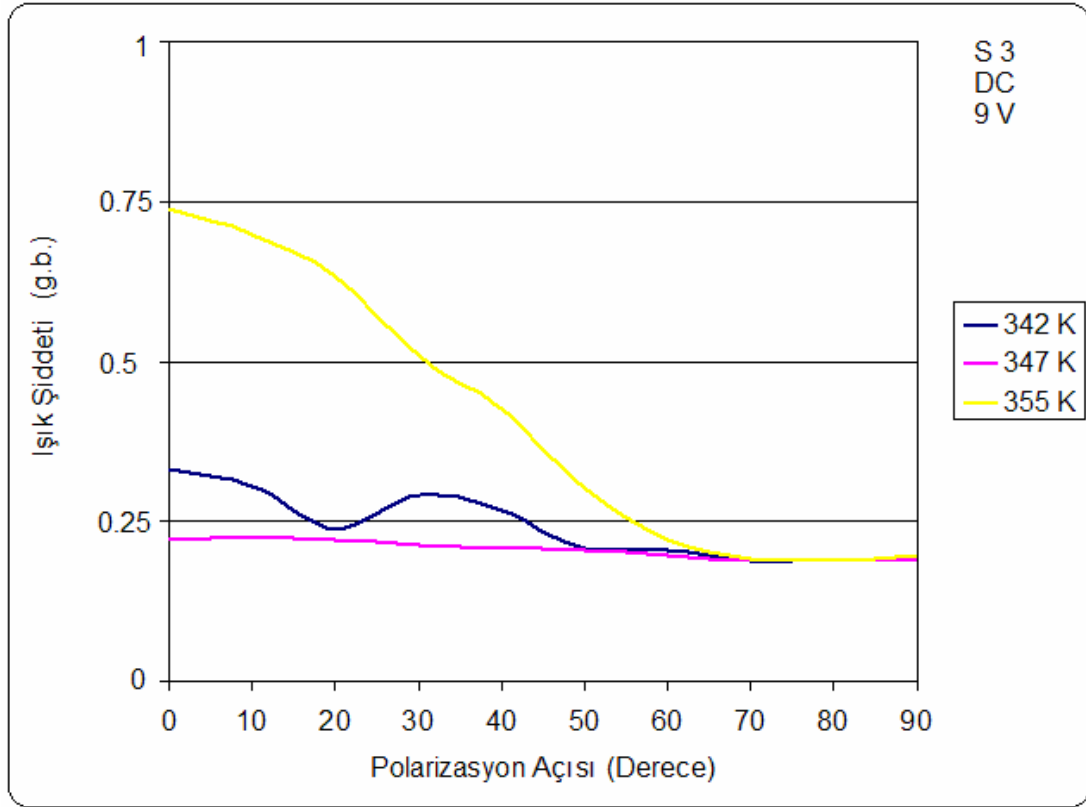
4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 9V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda ölçülen ışık şiddeti şekil 4.28'deki grafikte karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.



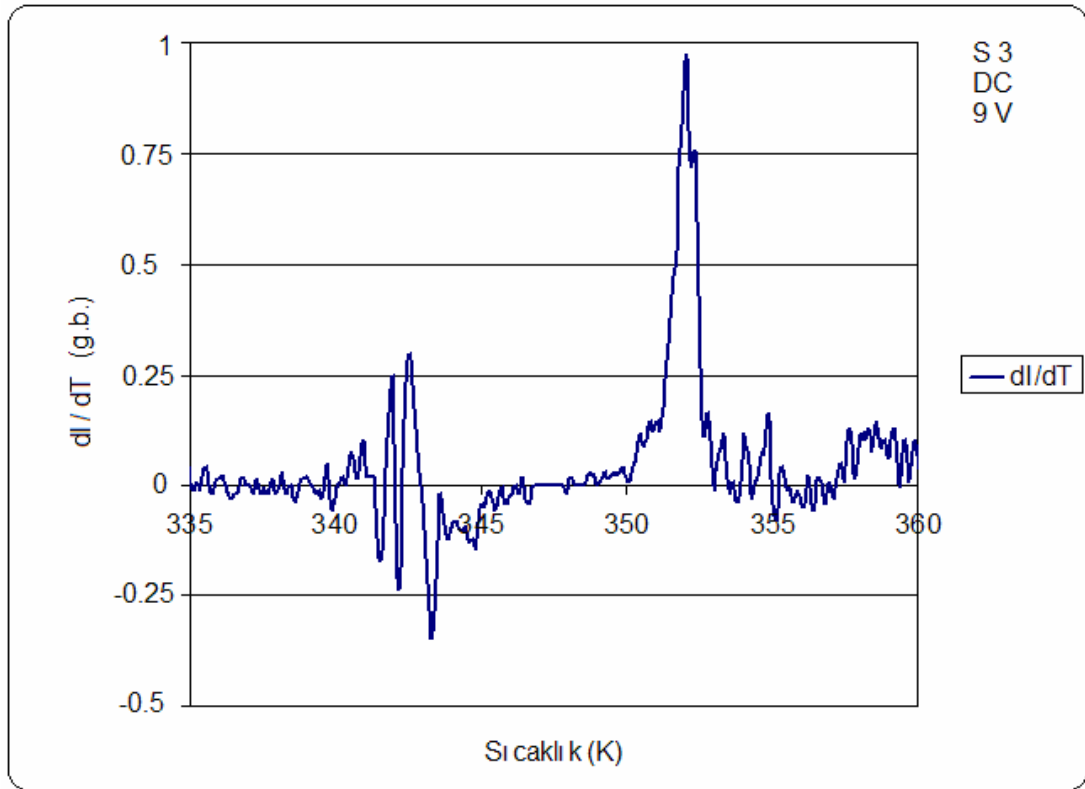
Şekil 4.28. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının 9V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik.

Şekil 4.29'da optik geçirgenliğin farklı sıcaklıklarda (342 K; 347 K ve 355 K) polarizasyon açısına göre değişimi verilmiştir. Seçilmiş sıcaklıklar nematik fazı, faz dönüşüm sıcaklığını ve izotropik fazı göstermektedir. Bu grafikte de saydamlığın izotropik fazda nematik faza göre daha yüksek olduğu faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklıklarda ise yüksek saçılmadan dolayı saydamlık minimum düzeydedir. Sistemin

saydamlığının sıcaklığa göre değişimini daha net görmemiz için modülasyon spektrumunda şekil 4.30'daki grafikte verdik. Bu grafikte sistemin optik geçirgenliğinin hangi noktada minimum ve maksimum değere ulaştığını görebiliyoruz. Grafikten de görüldüğü gibi sıfır noktası 347 K ile 348 K sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir.

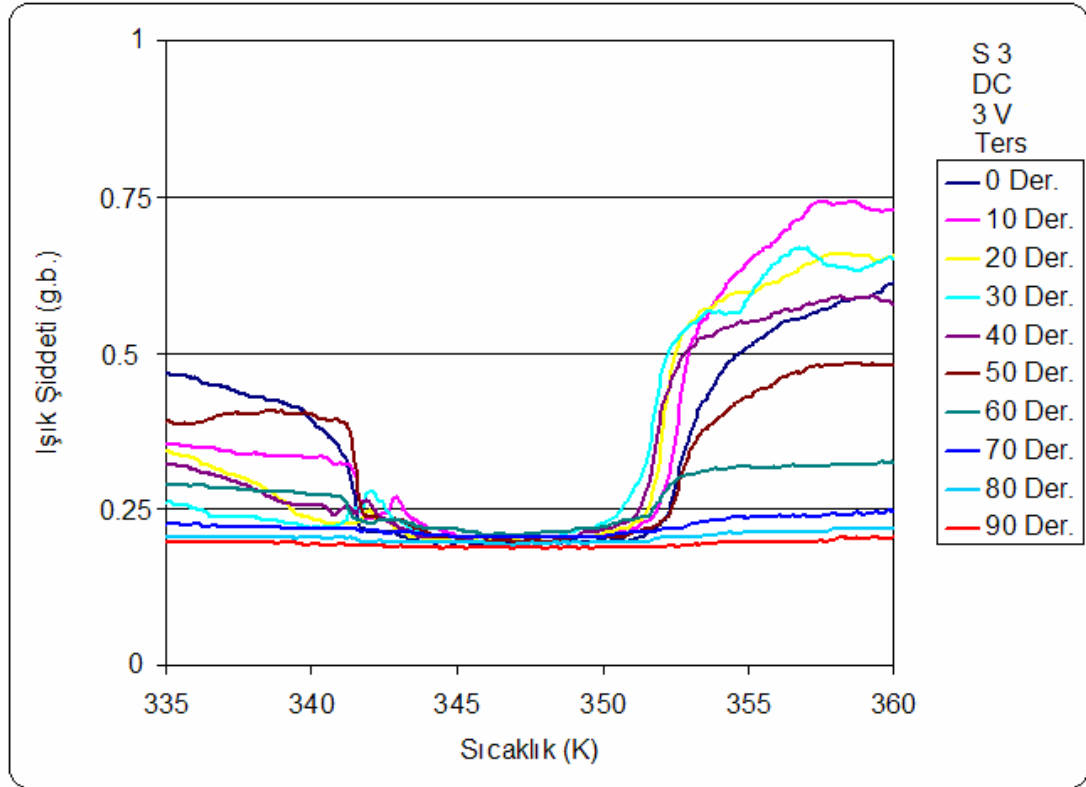


Şekil 4.29. Optik geçirgenliğin; 342 K, 347 K ve 355 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri.



Şekil 4.30. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 9V değerinde, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrileri.

4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemeyi 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 3V değerinde inceledik. Başlangıçta birbirine paralel yönelmiş polarizör ve analizör arasındaki açı 10°'lik saat yönüne ters yönde adımlarla arttırılarak, geçen ışığın şiddeti sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldü. Ölçümlerin sonuçları şekil 4.31'deki grafikte verilmiştir.

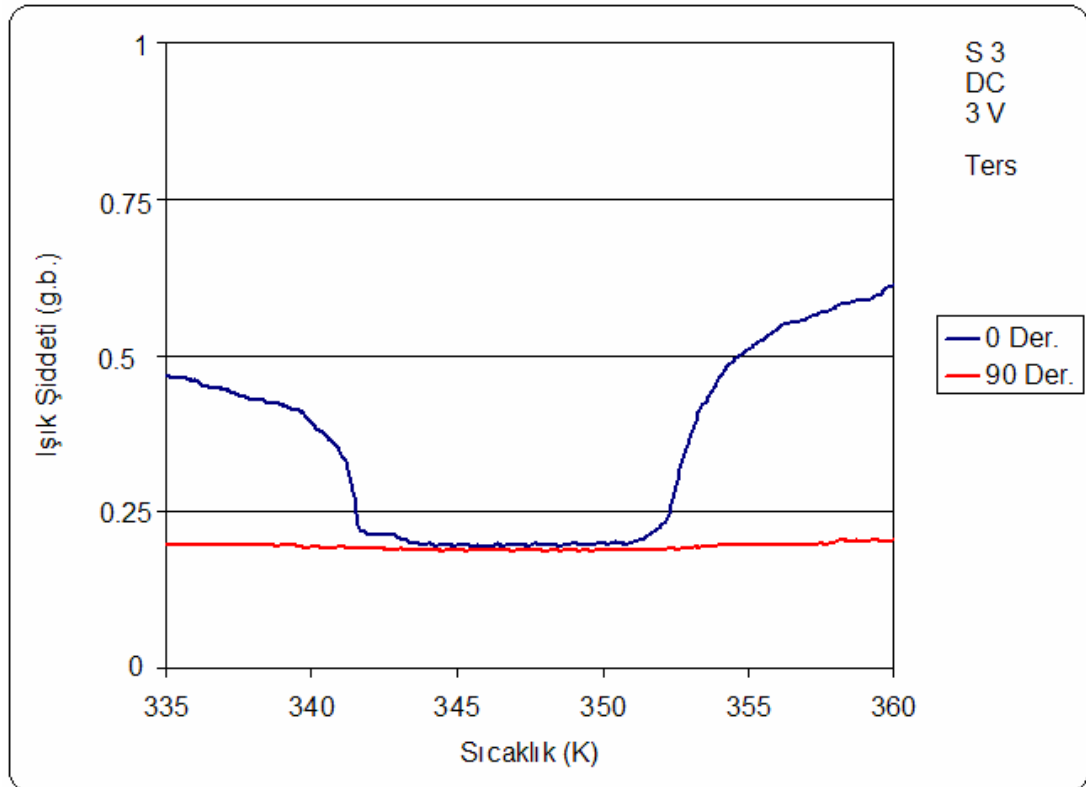


Şekil 4.31. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, sabit, dış elektrik alanının (DC) 3V değerinde farklı polarizasyon açılarında (polarizör ve analizör arasındaki açıyı değiştirirken saat yönüne ters yön seçildi) optik geçirgenlik eğrileri.

Grafikten de görüldüğü gibi numunemiz ısıtıldığı zaman $T_1=340$ K sıcaklığından başlayarak sistemden geçen ışığın şiddeti azalıyor. $T_2=344$ K sıcaklığında minimum değere ulaşıyor. $T_3=351$ K sıcaklığından başlayarak keskin artıyor ve $T_4=357$ K sıcaklığından sonra optik geçirgenlik doyuma ulaşıyor. . Bu elektrik alanında ise optik geçirgenlik nematik fazda daha düşük düzeyde seyrediyor ama izotropik fazda saydamlık düzeyi oldukça yüksekte seyretmektedir. DC elektrik alan uygulamalarında faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklıklarda optik geçirgenlik $E=0$ olduğundakinden farklı olarak $T_1 \leq T \leq T_2$ aralığında bir maksimumdan geçmektedir. Faz dönüşümü sıcaklık bölgesindeki maksimum sıcaklığa bağlı yapı bozulmalarından dolayı gerçekleşen saçılmanın elektrik alanında farklı seyretmesine bağlıdır. Yani başlangıçta sıcaklığa bağlı yapı bozulmaları daha yavaş gerçekleşiyor ve uygulanan elektrik alan bu bozulmaların gerçekleşmesine engel oluyor ama

sıcaklığın artışı yapı bozulmalarını hızlandırıyor ve dış elektrik alanı bu bozulmalara engel olamıyor.

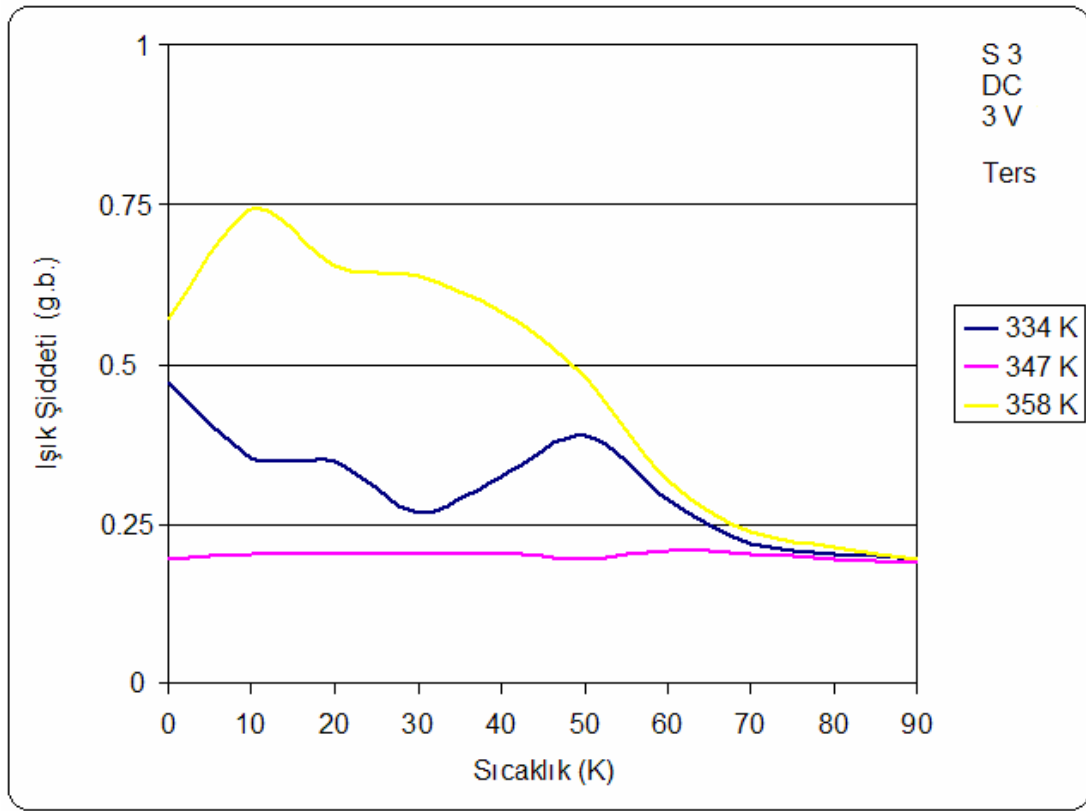
4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 3V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda (polarizör ve analizör arasındaki açıyı değiştirirken saat yönüne ters yön seçildi) ölçülen ışık şiddeti şekil 4.32'deki grafikte karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.



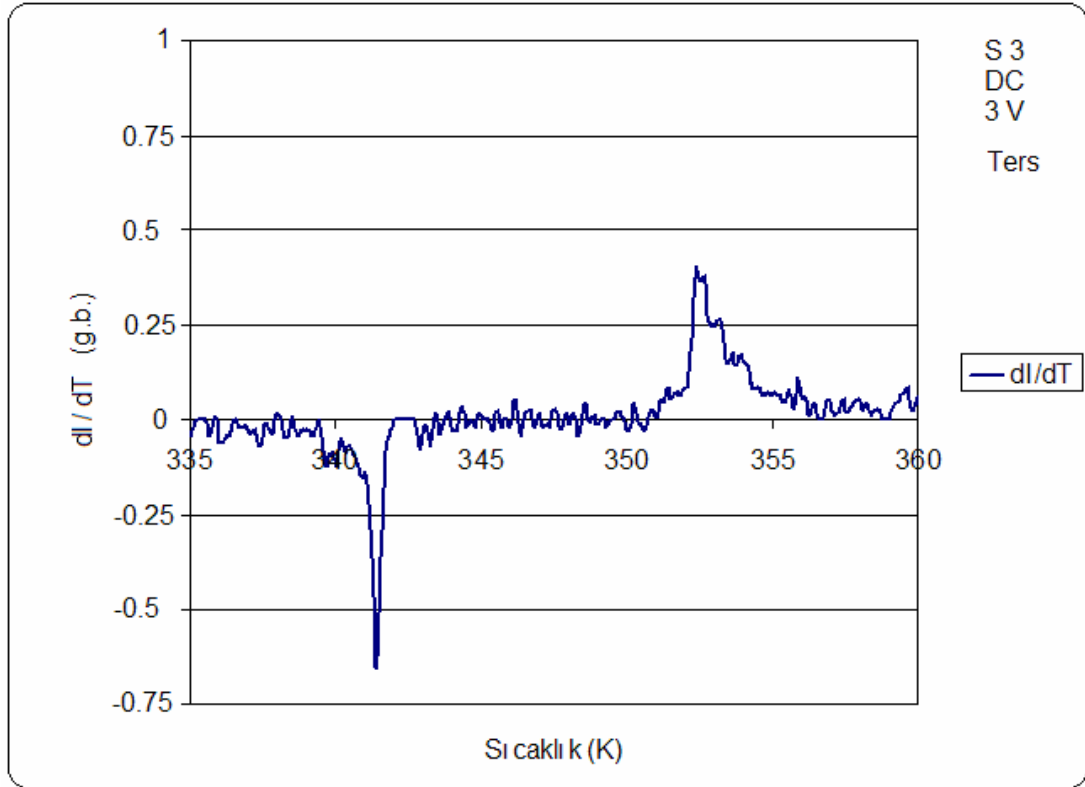
Şekil 4.32. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının 3V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda (polarizör ve analizör arasındaki açıyı değiştirirken saat yönüne ters yön seçildi) optik geçirgenlik eğrileri.

Şekil 4.33'te optik geçirgenliğin farklı sıcaklıklarda (334 K; 347 K ve 358 K) polarizasyon açısına göre değişimi verilmiştir. Seçilmiş sıcaklıklar nematik fazı, faz dönüşüm sıcaklığını ve izotropik fazı göstermektedir. Bu grafikte de saydamlığın

izotropik fazda nematik faza göre daha yüksek olduğu faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklıklarda ise yüksek saçılmadan dolayı saydamlık minimum düzeydedir. Sistemin saydamlığının sıcaklığa göre değişimini daha net görmemiz için modülasyon spektrumunda şekil 4.34'teki grafikte verdik. Bu grafikte sistemin optik geçirgenliğinin hangi noktada minimum ve maksimum değere ulaştığını görebiliyoruz. Grafikten de görüldüğü gibi sıfır noktası 342 K ile 343 K sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir.

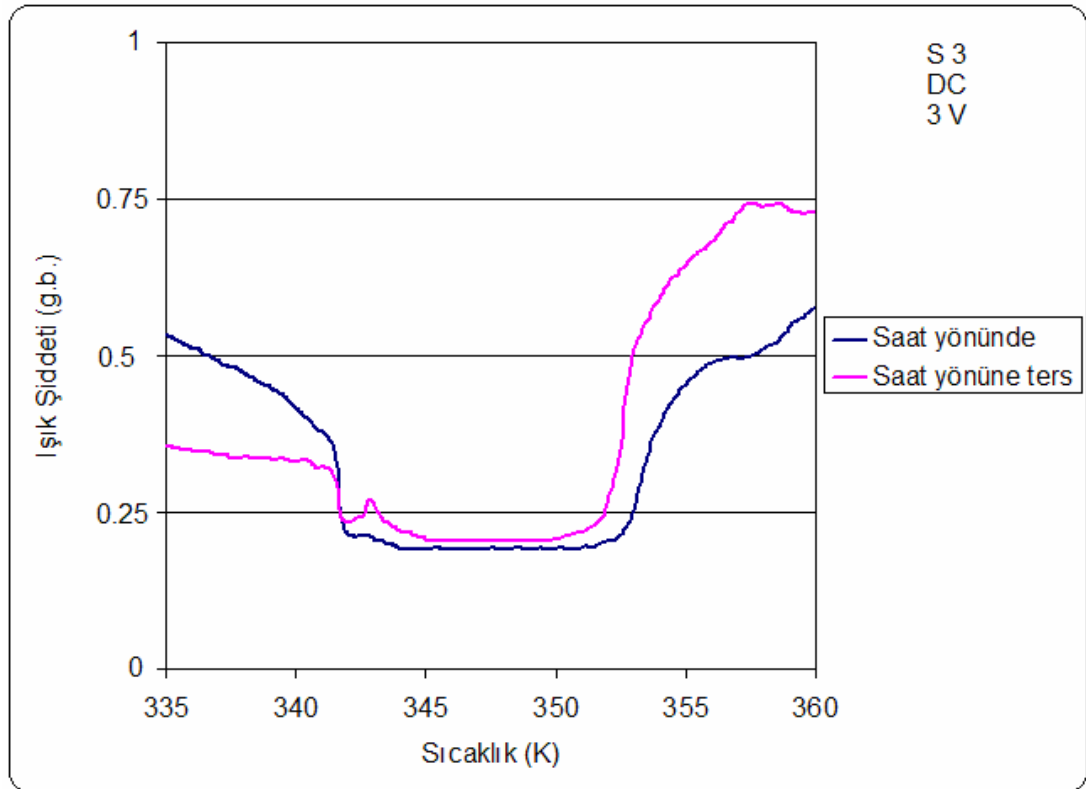


Şekil 4.33. Optik geçirgenliğin; 334 K, 347 K ve 358 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri.



Şekil 4.34. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 3V değerinde, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi.

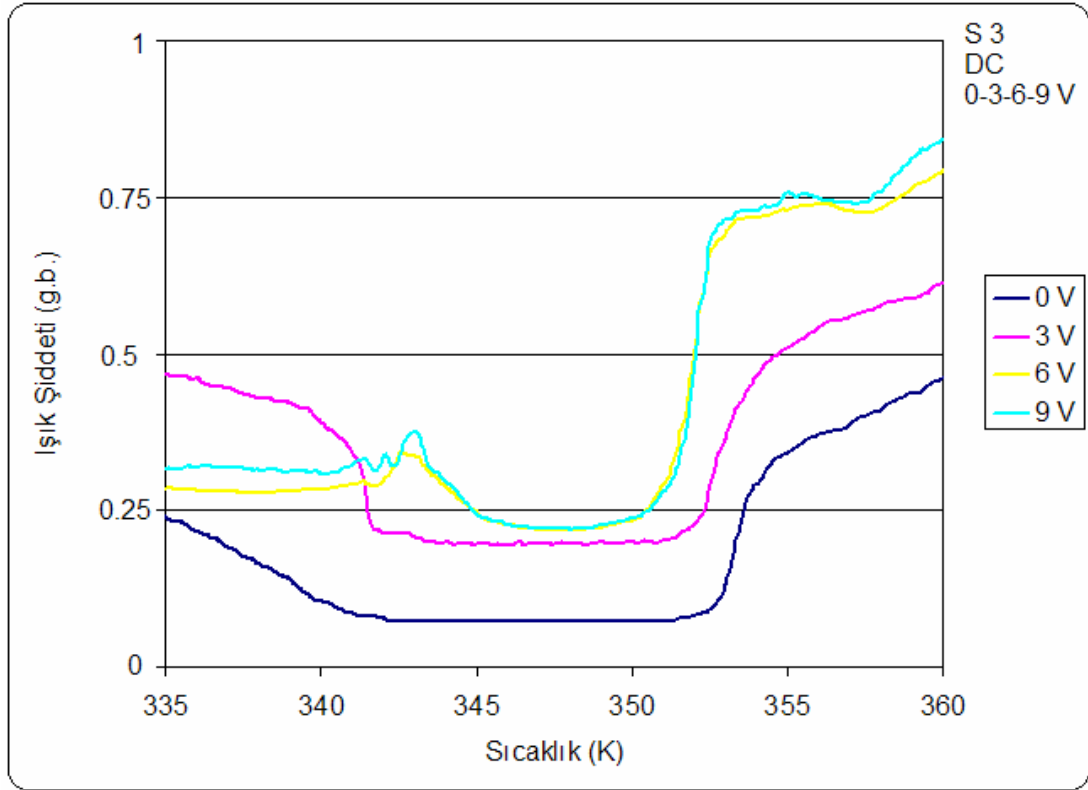
Sabit, dış elektrik alanının (DC) 3V değerinde ve 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin geçirgenliği polarizör ve analizör paralel durumdan, aralarındaki açı önce saat yönünde daha sonra ise saat yönüne ters yönde 10° arttırılarak ölçümler alınmış ve şekil 4.35'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.35. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemede, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve sabit, dış elektrik alanının (DC) 3V değerinde, polarizör ve analizör paralel durumdan, aralarındaki açı önce saat yönünde daha sonra ise saat yönüne ters yönde 10° artırılarak elde edilen optik geçirgenlik eğrileri.

Şunu söylemekte de yarar var ki, analizörün başlangıç durumuna göre sağ ve sol yönde değişmesi birbirinden farklı sonuçlar vermekte ve bu da malzememizin optik aktiviteye sahip olduğunu göstermektedir. Malzememizin kalınlığı (optik yol) oldukça küçük olduğundan dolayı optik aktivite değerleri daha detaylı ölçümü mümkün değil.

Sabit, dış elektrik alanının (DC) 3V, 6V, 9V değerlerinde ve 335 K (62°C) ile 360K (87°C) sıcaklık aralığında, 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemede elektrooptik efekt ölçülmüş ve şekil 4.36'da karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.



Şekil 4.36. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, sabit, dış elektrik alanının (DC) 3V, 6V, 9V değerlerinde ölçülmüş optik geçirgenlik eğrilerinin karşılaştırılması.

Uyguladığımız elektrik alanın şiddeti arttığında nematik fazdaki optik geçirgenlik azalmakla beraber izotropik fazdaki geçirgenlik artmakta ve izotropik faza geçme noktası kaymaktadır. NSK malzemeye uygulanan sabit, dış elektrik alan (DC) arttıkça T_1 ve T_2 sıcaklıkları artma; T_3 ve T_4 sıcaklıkları ise azalma eğilimi gösteriyor (Çizelge 4.1). Bu, bize şunu göstermektedir: uygulanan elektrik alanı arttıkça nematik fazdan izotropik faza geçişler daha keskin ve daha küçük sıcaklık aralığında gerçekleşiyor. Yani faz geçiş aralığı daralmaktadır.

Çizelge 4.1. NSK malzemeye uygulanan sabit, dış elektrik alan (DC) arttıkça T_1 , T_2 , T_3 ve T_4 sıcaklık değerlerindeki değişimi gösteren çizelge.

DC Alan / Sıcaklık	T_1 (K)	T_2 (K)	T_3 (K)	T_4 (K)
0 V	335	343	353	360
3 V	335	342	352	360
6 V	343	347	351	355
9 V	343	345	350	353

Bildiğimiz gibi, Freedericksz eşik değerinin üzerinde bir büyüklüğe sahip elektrik alan nematik sıvı kristal hücrelerini yönlendiriyor; daha büyük değerlerde ise domen oluşumu ortaya çıkıyor ve bu da yoğun ışık saçılmasıyla sonuçlanıyor. Grafikten görüyoruz ki, sabit elektrik alanının 3V değerinde ani bir artış gösteren optik geçirgenlik, 6V ve 9V değerlerinde hemen hemen aynı değerlerde seyretmektedir. Buradan vardığımız sonuç şudur: bu malzeme için Freedericksz eşik değeri 3V'un altındadır. Ve elektrik alanının 6V ve 9V değerlerinde optik geçirgenliğin azalması domen yapıdan dolayı ortaya çıkan ışık saçılmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.2. NSK malzemeye uygulanan sabit, dış elektrik alan (DC) arttıkça nematik-izotropik faz geçiş sıcaklık değerindeki değişimi gösteren çizelge.

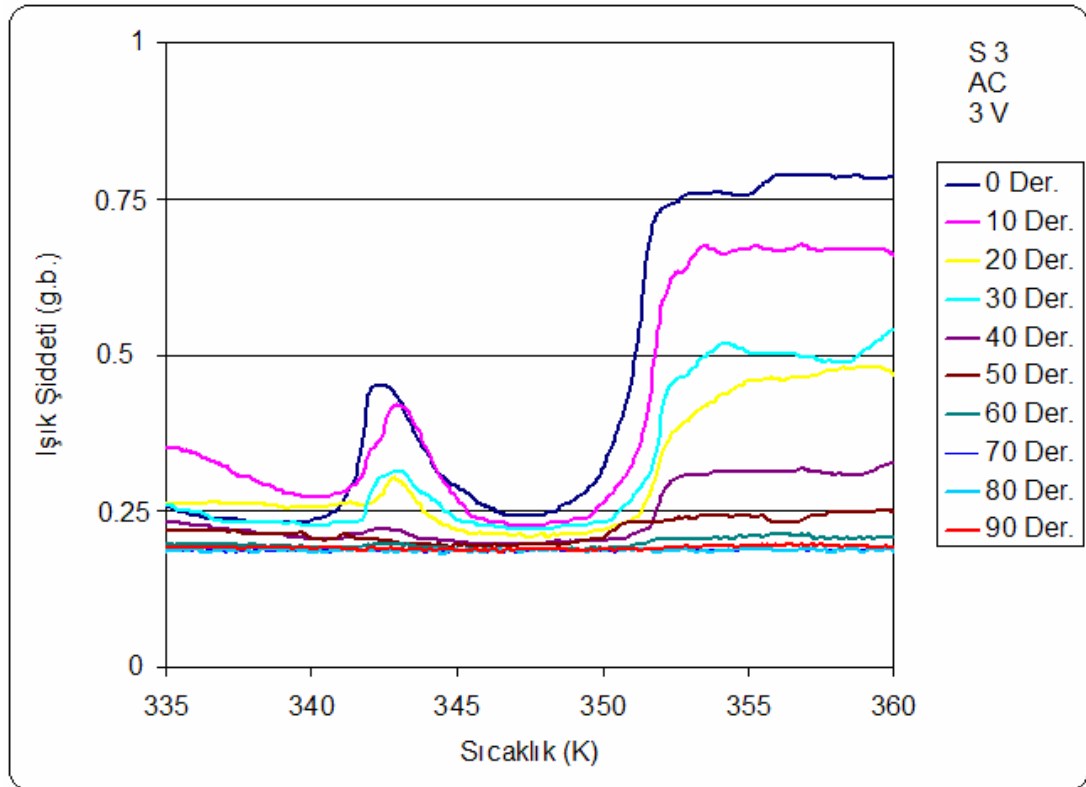
DC Alan	T_C
0 V	343 K-351 K
3 V	342 K-343 K
6 V	347 K-348 K
9 V	347 K-348 K

4.3.3 Değişken Elektrik Alanda (AC) Elektrooptik Etki

Son olarak 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemeyi değişen, dış elektrik alanda (AC) inceledik. Bu malzeme için ölçümler 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında ve 3V, 6V, 9V'ta yapıldı.

Başlangıçta birbirine paralel yönelmiş polarizör ve analizör arasındaki açı 10° 'lik adımlarla arttırılarak, optik geçirgenlik sıcaklığın fonksiyonu olarak değişen, dış elektrik alanının 3V olduğu durumda ölçüldü. Ölçümlerin sonuçları şekil 4.37'deki grafikte verilmiştir.

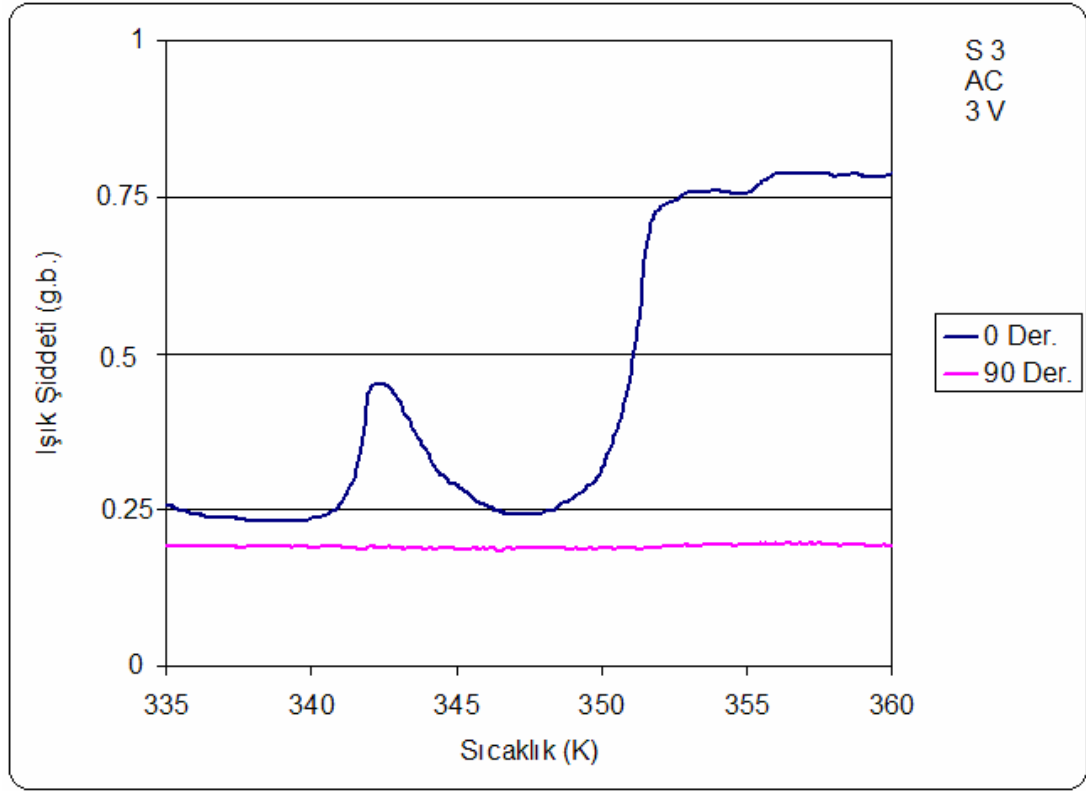
Grafikten de görüldüğü gibi numunemiz ısıtıldığı zaman $T_1=343$ K sıcaklığından başlayarak sistemden geçen ışığın şiddeti azalıyor. $T_2=347$ K sıcaklığında minimum değere ulaşıyor. $T_3=350$ K sıcaklığından başlayarak keskin artıyor ve $T_4=353$ K sıcaklığından sonra optik geçirgenlik doyuma ulaşıyor.



Şekil 4.37. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, değişen, dış elektrik alanının (AC) 3V değerinde farklı polarizasyon açılarında optik geçirgenlik eğrileri.

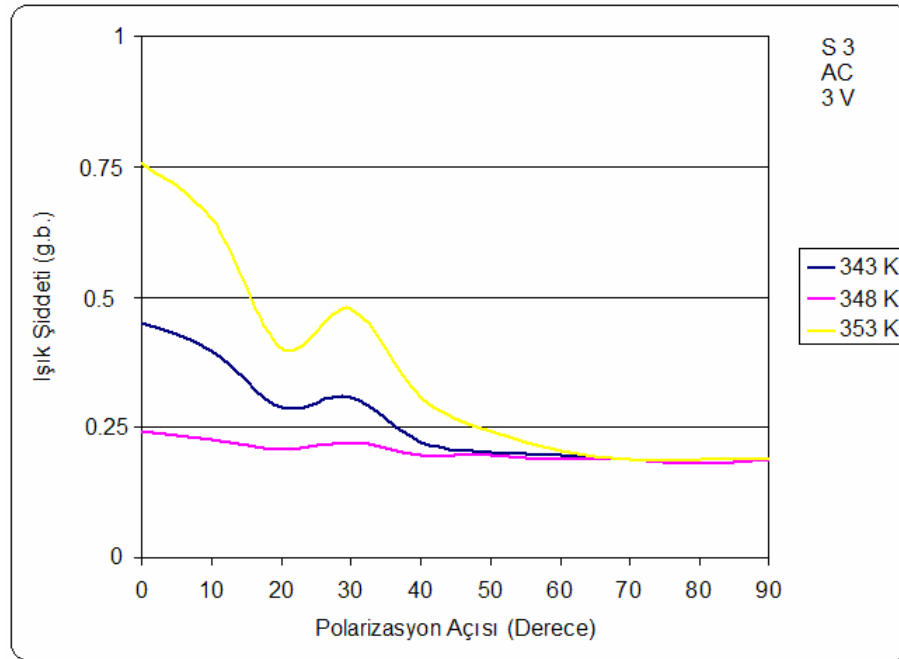
4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında ve 3V (AC) değişen, dış elektrik alanında, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik

yöneldiği durumda ölçülen ışık şiddeti şekil 4.38'deki grafikte karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.

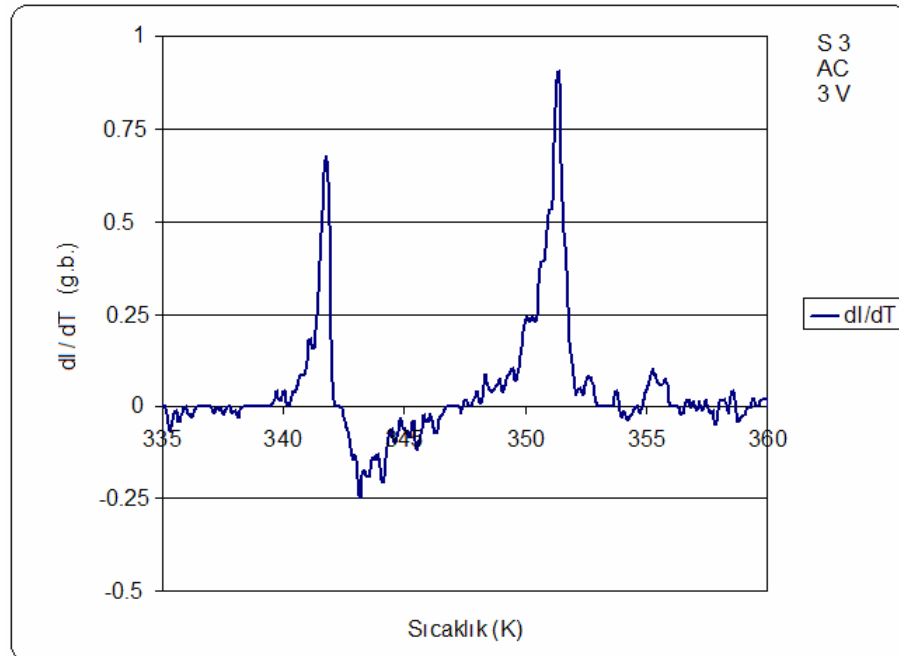


Şekil 4.38. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve değişen dış elektrik alanının (AC) 3V değerinde polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri.

Şekil 4.39'da optik geçirgenliğin farklı sıcaklıklarda (343 K; 348 K ve 353 K) polarizasyon açısına göre değişimi verilmiştir. Seçilmiş sıcaklıklar nematik fazı, faz dönüşüm sıcaklığını ve izotropik fazı göstermektedir. Bu grafikte de saydamlığın izotropik fazda nematik faza göre daha yüksek olduğu faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklıklarda ise yüksek saçılmadan dolayı saydamlık minimum düzeydedir. Sistemin saydamlığının sıcaklığa göre değişimini daha net görmemiz için modülasyon spektrumunda şekil 4.40'daki grafikte verdik. Bu grafikte sistemin optik geçirgenliğinin hangi noktada minimum ve maksimum değere ulaştığını görebiliyoruz. Grafikten de görüldüğü gibi sıfır noktası 346 K ile 347 K sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir.

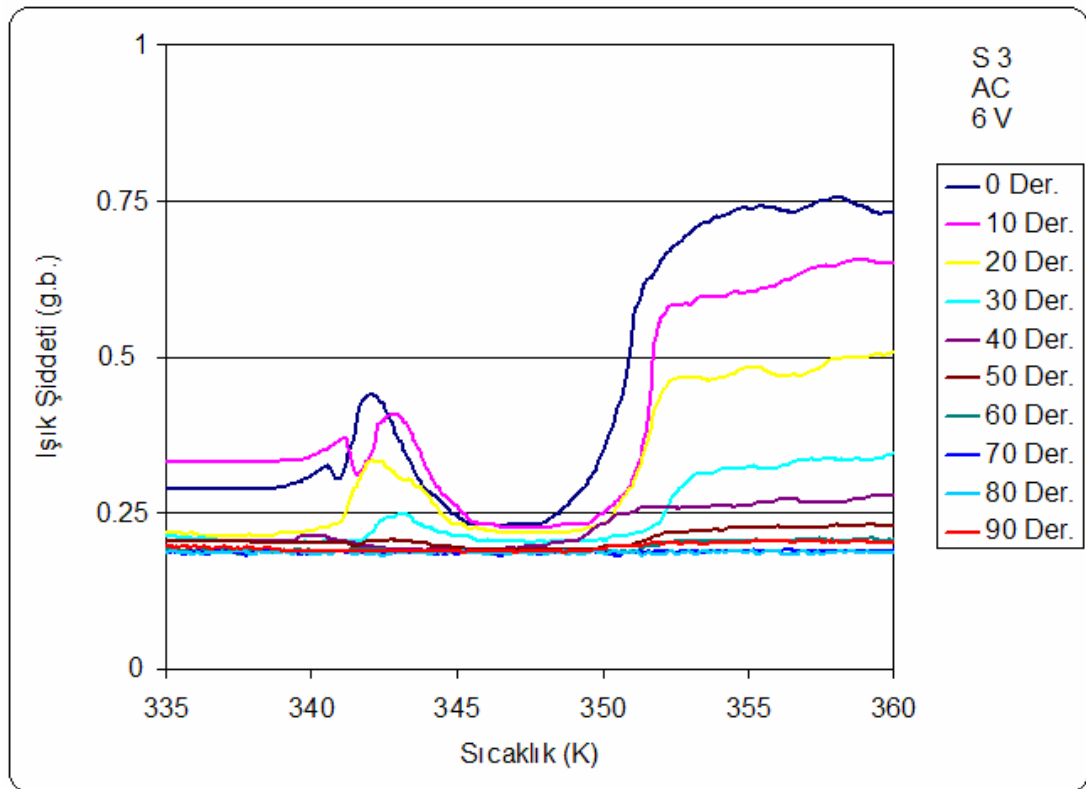


Şekil 4.39. Optik geçirgenliğin; 343 K, 348 K ve 353 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri.



Şekil 4.40. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, değişen, dış elektrik alanının (AC) 3V değerinde optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi.

4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemeyi 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında ve değişen, dış elektrik alanının (AC) 6V değerinde inceledik. Başlangıçta birbirine paralel yönelmiş polarizör ve analizör arasındaki açı 10°'lik adımlarla arttırılarak, optik geçirgenlik sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldü. Ölçümlerin sonuçları şekil 4.41'deki grafikte verilmiştir.

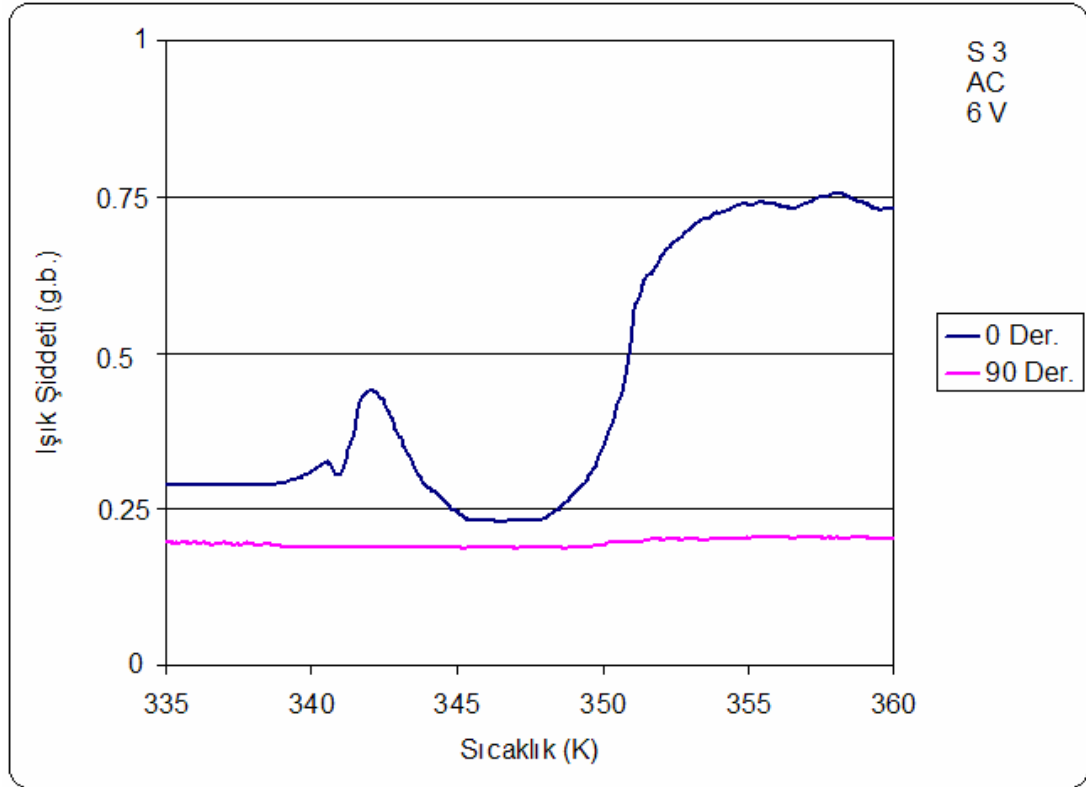


Şekil 4.41. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında, değişen, dış elektrik alanının (AC) 6V değerinde farklı polarizasyon açılarındaki optik geçirgenlik eğrileri.

Grafikten de görüldüğü gibi numunemiz ısıtıldığı zaman $T_1=343$ K sıcaklığından başlayarak sistemden geçen ışığın şiddeti azalıyor. $T_2=346$ K sıcaklığında minimum değere ulaşılıyor. $T_3=349$ K sıcaklığından başlayarak keskin artıyor ve $T_4=355$ K sıcaklığından sonra optik geçirgenlik doyuma ulaşılıyor.

4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında ve değişen, dış

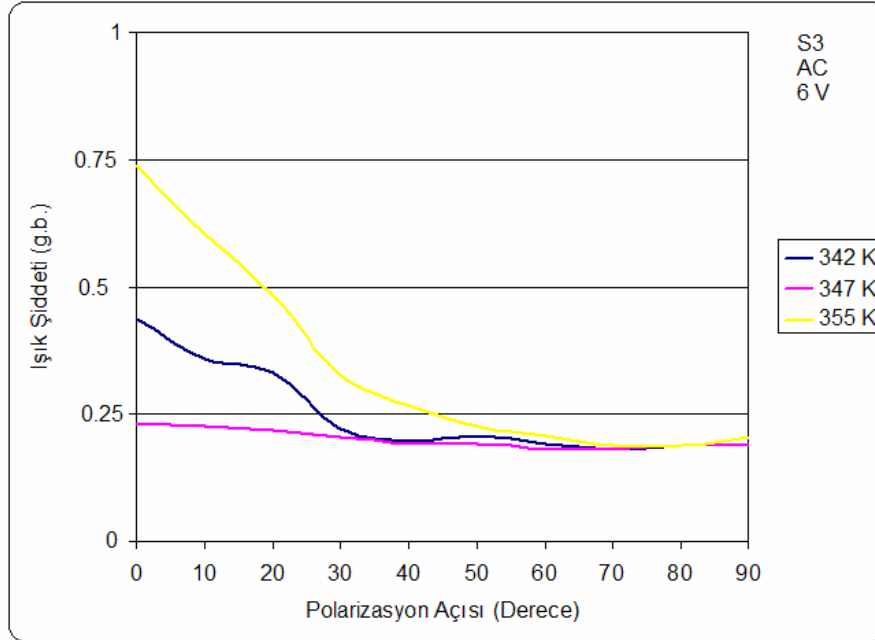
elektrik alanının (AC) 6V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda ölçülen optik geçirgenlik şekil 4.42'deki grafikte karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.



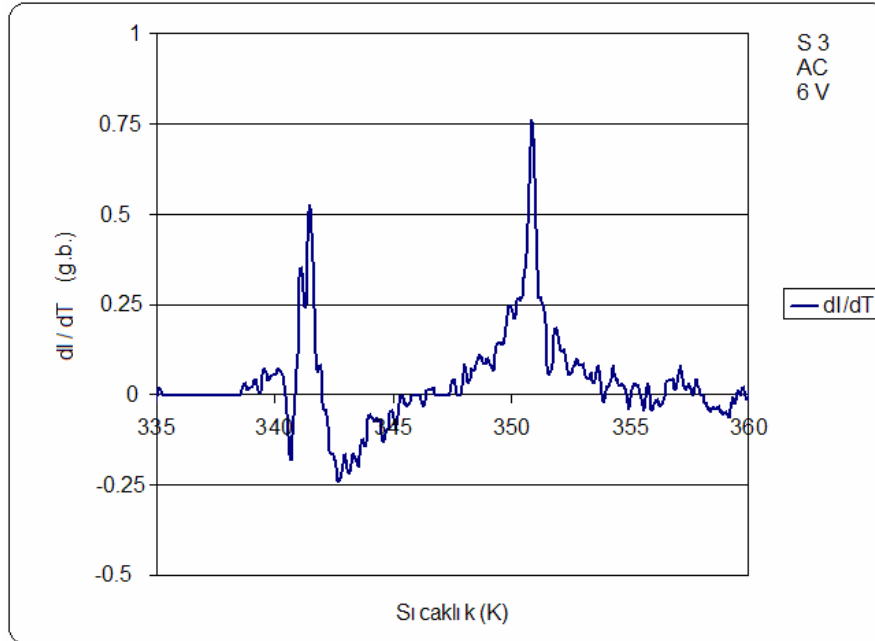
Şekil 4.42. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve değişen, dış elektrik alanının (AC) 6V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri.

Şekil 4.43'te optik geçirgenliğin farklı sıcaklıklarda (342 K, 347 K ve 355 K) polarizasyon açısına göre değişimi verilmiştir. Seçilmiş sıcaklıklar nematik fazı, faz dönüşüm sıcaklığını ve izotropik fazı göstermektedir. Bu grafikte de saydamlığın izotropik fazda nematik faza göre daha yüksek olduğu faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklıklarda ise yüksek saçılmadan dolayı saydamlık minimum düzeydedir. Sistemin saydamlığının sıcaklığa göre değişimini daha net görmemiz için modülasyon spektrumunda şekil 4.44'teki grafikte verdik. Bu grafikte sistemin optik geçirgenliğinin hangi noktada minimum ve maksimum değere ulaştığını

görebiliyoruz. Grafikten de görüldüğü gibi sıfır noktası 346 K ile 347 K sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir.

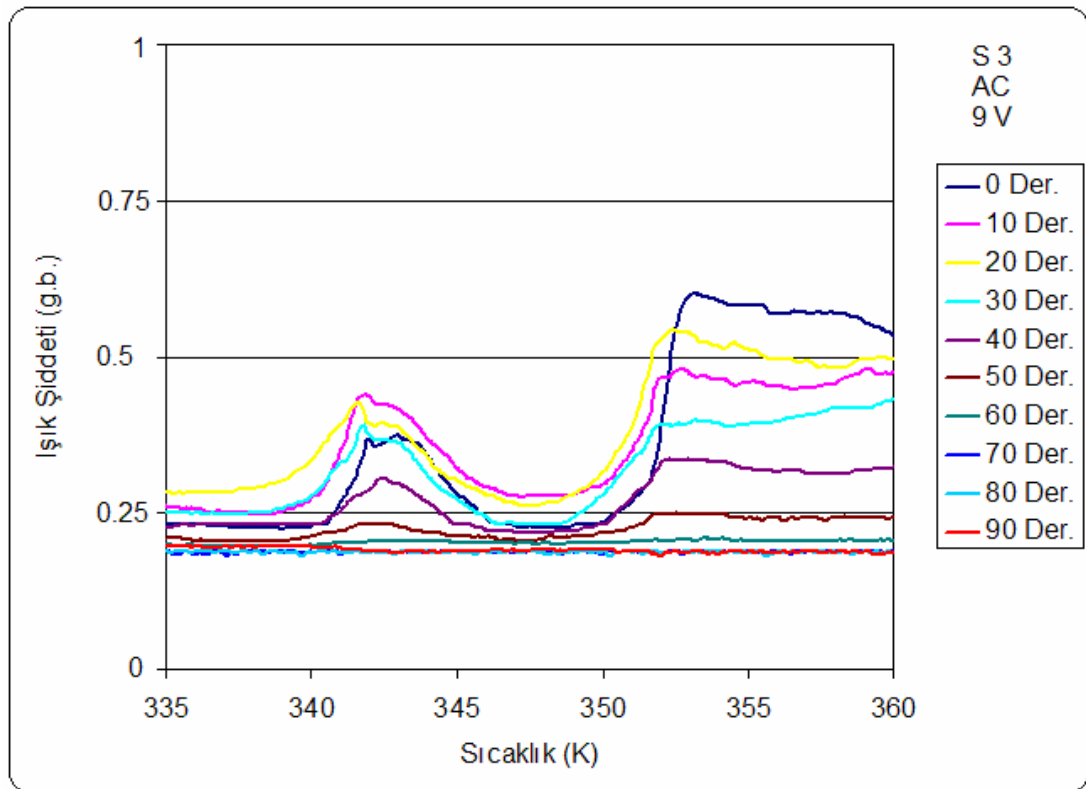


Şekil 4.43. Optik geçirgenliğin; 342 K, 347 K ve 355 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri.



Şekil 4.44. 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve değişen, dış elektrik alanın (AC) 6V değerinde, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi.

4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemeyi 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında ve değişen, dış elektrik alanının (AC) 9V değerinde inceledik. Başlangıçta birbirine paralel yönelmiş polarizör ve analizör arasındaki açı 10°'lik adımlarla artırılarak, geçen ışığın şiddeti sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçüldü. Ölçümlerin sonuçları şekil 4.45'deki grafikte verilmiştir.

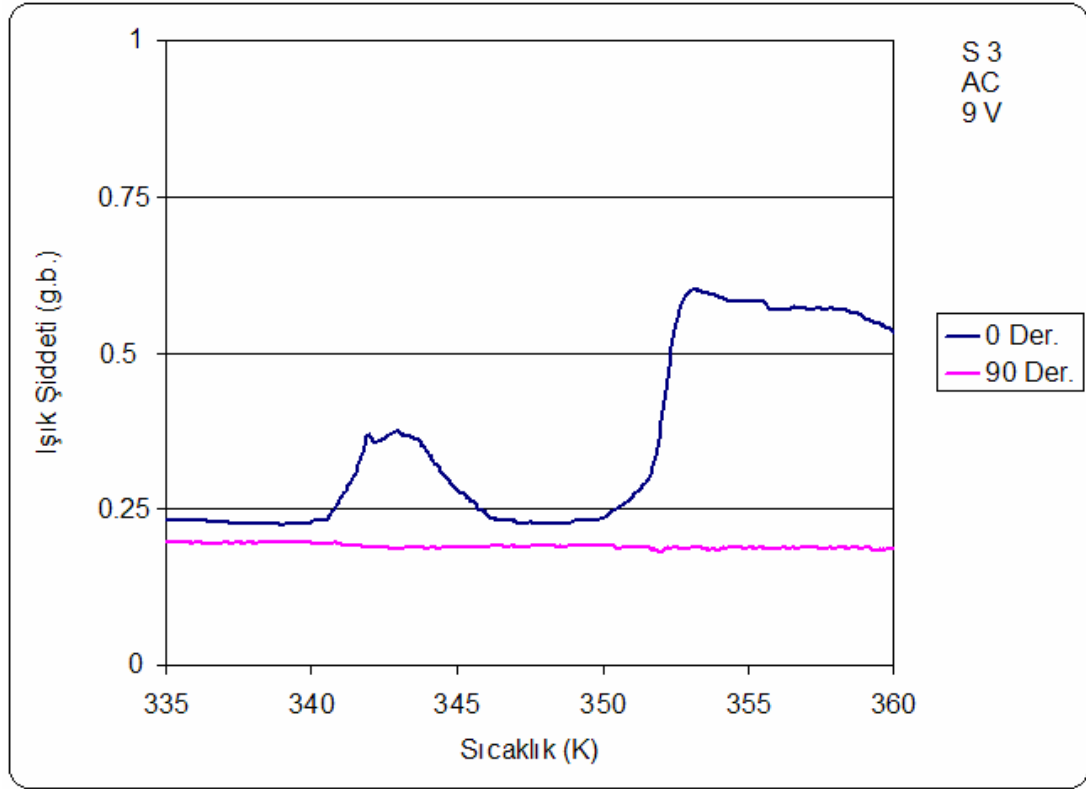


Şekil 4.45. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve değişen, dış elektrik alanının (AC) 9V değerinde farklı polarizasyon açılarındaki optik geçirgenlik eğrileri.

Grafikten de görüldüğü gibi numunemiz ısıtıldığı zaman $T_1=342$ K sıcaklığından başlayarak sistemden geçen ışığın şiddeti azalıyor. $T_2=347$ K sıcaklığında minimum değere ulaşıyor. $T_3=350$ K sıcaklığından başlayarak keskin artıyor ve $T_4=353$ K sıcaklığından sonra optik geçirgenlik doyuma ulaşıyor.

4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında ve değişen, dış

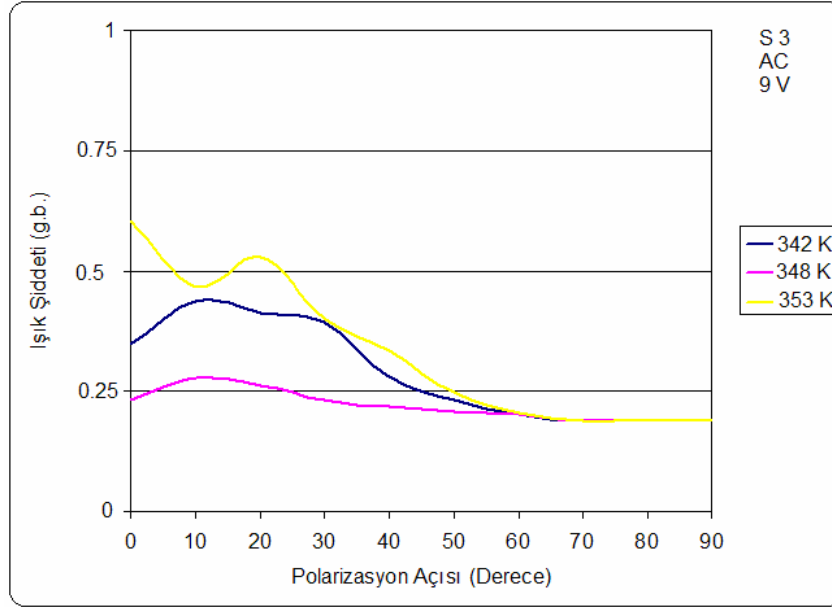
elektrik alanının (AC) 9V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda ölçülen ışık şiddeti şekil 4.46'daki grafikte karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.



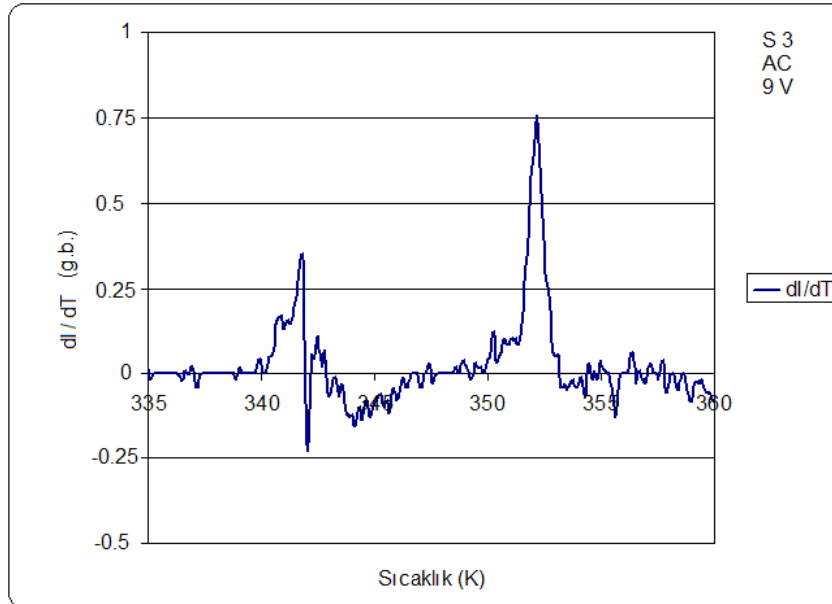
Şekil 4.46. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzeme için 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve değişen, dış elektrik alanın (AC) 9V değerinde, polarizör ve analizörün birbirine paralel ve dik yöneldiği durumda optik geçirgenlik eğrileri.

Şekil 4.47'de optik geçirgenliğin farklı sıcaklıklarda (342 K, 348 K ve 353 K) polarizasyon açısına göre değişimi verilmiştir. Seçilmiş sıcaklıklar nematik fazı, faz dönüşüm sıcaklığını ve izotropik fazı göstermektedir. Bu grafikte de saydamlığın izotropik fazda nematik faza göre daha yüksek olduğu faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklıklarda ise yüksek saçılmadan dolayı saydamlık minimum düzeydedir. Sistemin saydamlığının sıcaklığa göre değişimini daha net görmemiz için modülasyon spektrumunda şekil 4.48'deki grafikte verdik. Bu grafikte sistemin optik geçirgenliğinin hangi noktada minimum ve maksimum değere ulaştığını

görebiliyoruz. Grafikten de görüldüğü gibi sıfır noktası 348 K ile 349 K sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir.

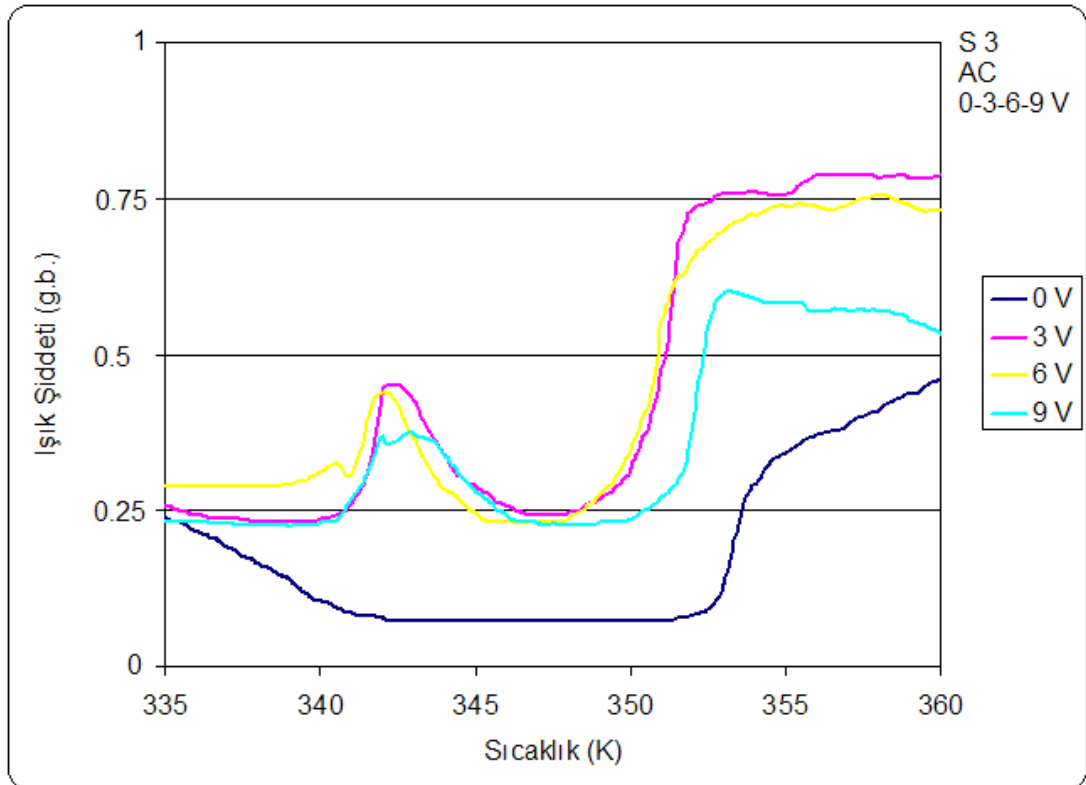


Şekil 4.47. Optik geçirgenliğin; 342 K, 348 K ve 353 K sıcaklık değerlerinde polarizasyon açısına göre değişim eğrileri.



Şekil 4.48. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin, 335 K ile 360 K sıcaklık aralığında ve değişen, dış elektrik alanının (AC) 9V değerinde, optik geçirgenliğinin sıcaklığa göre değişim eğrisi.

Değişen, dış elektrik alanının (AC) 3V, 6V, 9V değerlerinde ve 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin geçirgenliği ölçülmüş ve şekil 4.49'da karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.



Şekil 4.49. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, değişen, dış elektrik alanının (AC) 0V, 3V, 6V, 9V değerlerinde ölçülmüş optik geçirgenlik eğrilerinin karşılaştırılması.

NSK'ler uygulama açısından elektrooptik anahtar veya elektrooptik modülatör olarak kullanıldıkları için biz elektrooptik efekti AC voltaj uygulayarak da yaptık. Uyguladığımız voltaj aralığı 3V, 6V, 9V olarak belirlendi.

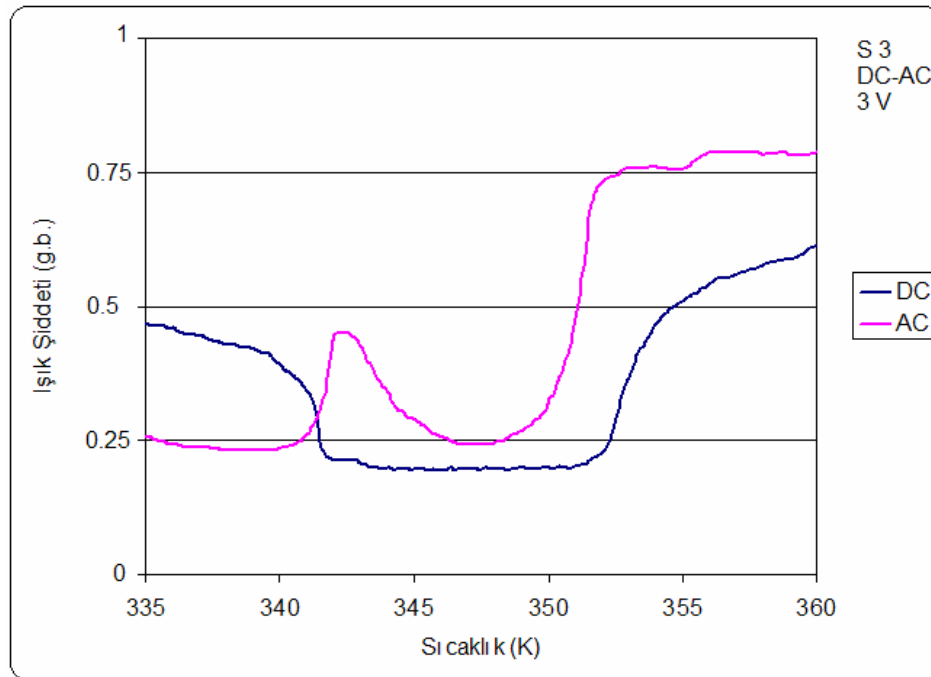
AC elektrik alanında yapılan deneyler voltajın artması ile sistemin optik geçirgenliğinde çok fazla değişim olmadığını gösteriyor ve ancak nematik fazdan izotropik faza geçiş sıcaklık aralığının daralmasına ve izotropik fazda saydamlığın değişmesine sebep oluyor (Çizelge 4.3). Genel olarak bu malzeme ile yapılan

elektrooptik ölçümler diğer malzemelerle yapılan elektrooptik ölçümlerden farklılık göstermemektedir.

Çizelge 4.3. NSK malzemeye uygulanan değişen, dış elektrik alan (AC) arttıkça, T_1 , T_2 , T_3 ve T_4 sıcaklık değerlerindeki değişimi gösteren çizelge.

AC Alan / Sıcaklık	T_1 (K)	T_2 (K)	T_3 (K)	T_4 (K)
0 V	335	343	353	360
3 V	343	347	350	353
6 V	343	346	349	355
9 V	342	347	350	353

Sabit ve değişen dış elektrik alanlarının (DC ve AC) 3V değerlerinde ve 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin geçirgenliği ölçülmüş ve şekil 4.50'de karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.



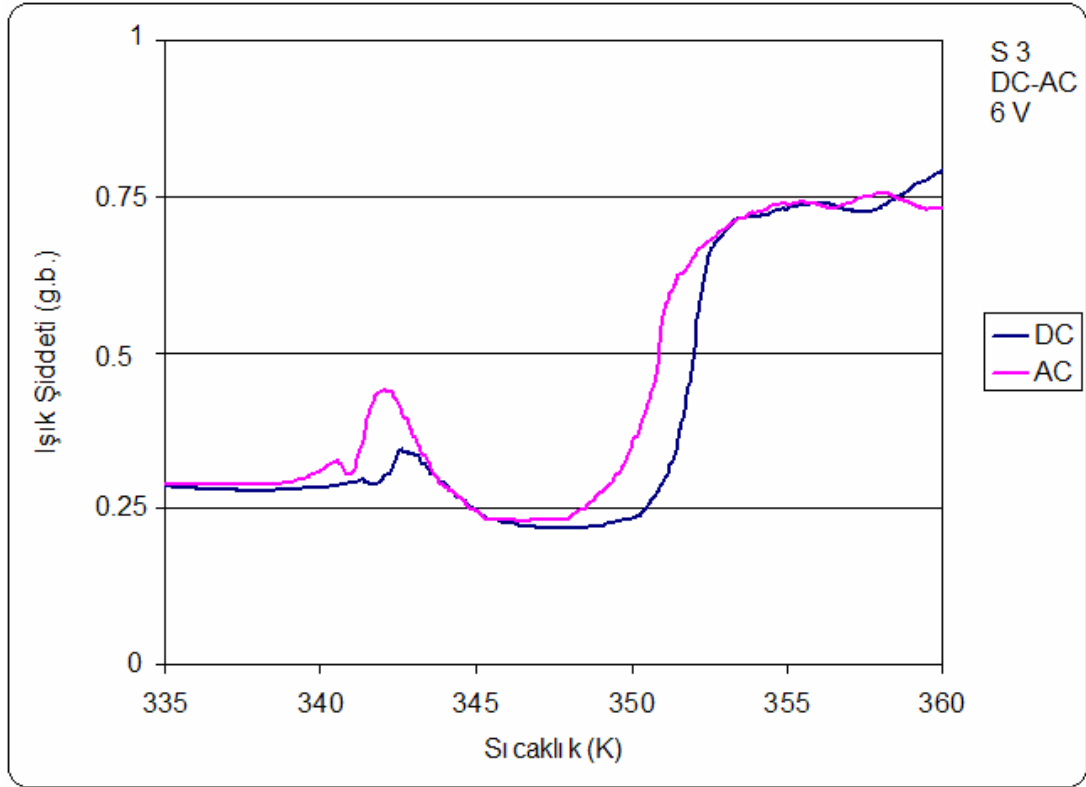
Şekil 4.50. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, sabit ve değişen dış elektrik alanlarının (DC ve AC) 3V değerinde karşılaştırmalı olarak çizilmiş optik geçirgenlik eğrileri.

Sabit elektrik alanda (DC) yapılan çalışmalardan farklı olarak değişen elektrik alanda (AC) yapılan ölçümler faz dönüşümü sıcaklığı aralığında önce saydamlığın arttığını, sonra ise DC elektrik alanında olduğu gibi azaldığını, 350 K sıcaklığın üzerinde ise yeniden saydam hale geldiğini görüyoruz. DC elektrooptik efektinden farklı olarak faz dönüşümünün gerçekleşmesi gereken sıcaklıklarda ($T > 340$ K) sistemin önce saydam hale geldiğini, sonra ise DC elektrooptik efektte olduğu gibi optik şiddetin minimumundan geçerek artıyor. Faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklıklarda (340K-345K) saydamlığın artması fikrimizce, AC alanda moleküllerin yönelimini düzenliyor ve farklı sıvı kristal kümelerinin farklı yönlerdeki yönelimlerini engellemektedir. Bundan dolayı sistem daha saydam hale geliyor ama daha yüksek sıcaklıklarda tüm kümeler aynı yönelimlere sahip oldukları için sıvı kristalin tüm noktalarında faz dönüşümü homojen olarak gerçekleştiğinden dolayı 345 K- 350 K sıcaklık aralığında saydamlık minimumdan geçerek artmaya başlıyor. Bunu şekil 4.36'da daha bariz şekilde görmekteyiz.

Çizelge 4.4. NSK malzemeye uygulanan değişen, dış elektrik alan (AC) arttıkça, nematik-izotropik faz geçiş sıcaklık değerindeki değişimi gösteren çizelge.

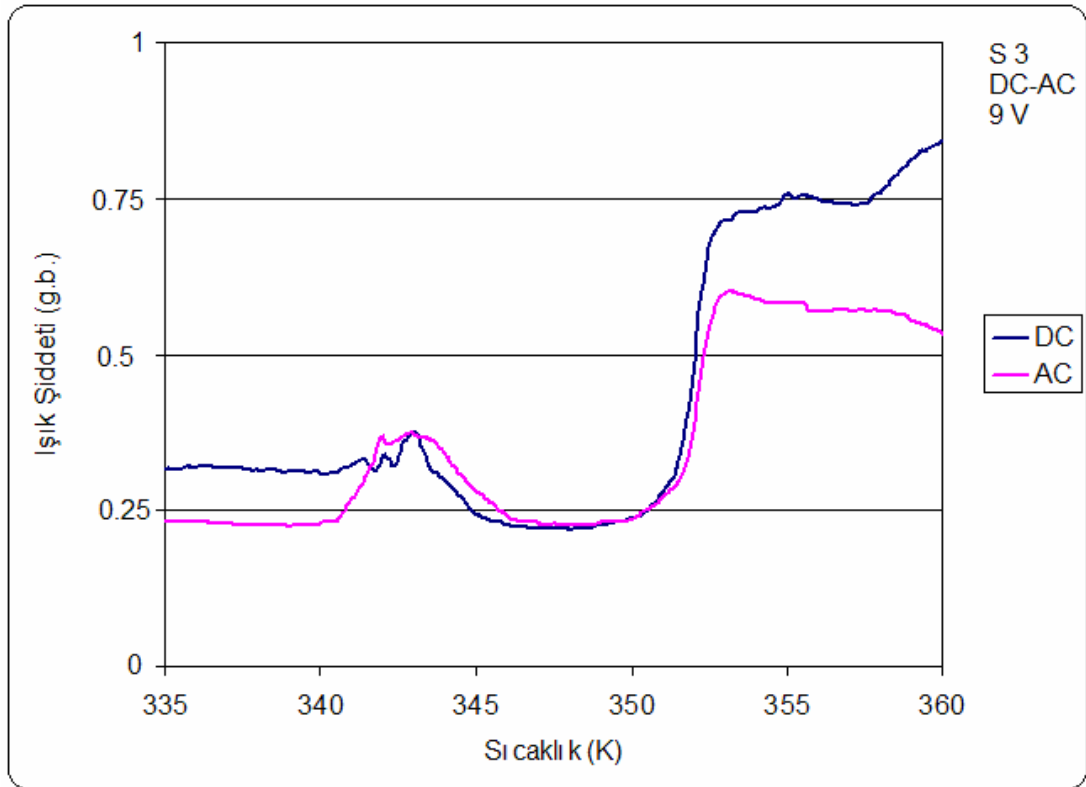
AC Alan	T_C	
0 V		343 K-351 K
3 V	339 K-340 K	346 K-347 K
6 V	336 K-339 K	346 K-347 K
9 V	336 K-339 K	348 K-349 K

Sabit ve değişen dış elektrik alanlarının (DC ve AC) 6V değerlerinde ve 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin geçirgenliği ölçülmüş ve şekil 4.51'de karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.



Şekil 4.51. 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, sabit ve değişen dış elektrik alanlarının (DC ve AC) 6V değerinde karşılaştırmalı olarak çizilmiş optik geçirgenlik eğrileri.

Sabit ve değişen dış elektrik alanlarının (DC ve AC) 9V değerlerinde ve 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, 4'-isothiocyantophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin geçirgenliği ölçülmüş ve şekil 4.52'de karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.



Şekil 4.52. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemenin 335 K (62°C) ile 360 K (87°C) sıcaklık aralığında, sabit ve değişen dış elektrik alanlarının (DC ve AC) 9V değerinde karşılaştırmalı olarak çizilmiş optik geçirgenlik eğrileri.

Sonuç olarak,

1. 4-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile;
2. 4-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile;
3. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate

malzemelerinde MATERYAL VE METOD bölümünde gösterilen deney setinde optik geçirgenlik ve elektrooptik efekt incelenmiş olup bu malzemelerin optik özelliklerinin sıcaklığa, ışığın polarizasyonuna ve uygulanan dış elektrik alana bağımlılığı gösterilmiştir.

5. SONUÇLAR

Çalışmada,

1. 4-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile;
2. 4-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile;
3. 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate

sıvı kristal malzemelerde nematik-izotropik faz dönüşümleri optik ve elektrooptik yöntemlerle incelenmiş olup aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Polarizasyon mikroskopunda 4-(Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile; 4-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile; 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemelerin faz dönüşümleri gerçekleşen sıcaklık aralığında görüntüler elde edilmiş faz dönüşümlerinin gerçekleştiği domain yapılarının oluşumu ve yok edilmesi görüntülenmiştir.
2. Optik yöntemlerle faz dönüşümü gerçekleşen sıcaklık bölgesinde 4-Octyloxy)-4-biphenylcarbonitrile; 4-(Pentyloxy)-4-biphenylcarbonitrile; 4'-isothiocyanatophenyl-4-pentylbicyclo[2.2.2]octane-1-carboxylate sıvı kristal malzemelerin optik özellikleri (optik geçirgenlik) incelenmiştir. Bu bölgelerde optik geçirgenliğin azaldığı ve sıvı kristallerin nematik fazdan izotropik faza geçtikten sonra saydam hale geldiği görülmüştür. Bunun sıvı kristallerin yapısal özelliklerinden kaynaklandığını düşünmekteyiz.
3. Aynı sıvı kristallerde elektrooptik efekt incelenmiştir. Yaptığımız çalışmalar gösterdi ki, sıvı kristallere elektrik alan (DC/AC) uyguladığımız zaman, nematik fazdan izotropik faza geçiş farklı sıcaklık aralığında gerçekleşir ve bu sıcaklık aralığında sıvı kristallerimiz farklı özellikler sergiliyorlar. Nematik fazdan izotropik faza geçiş başladığı zaman uygulanan elektrik alanın büyüklüğüne göre sistemin optik geçirgenliği önce artıyor sonra ise sıcaklığın artışı ile optik geçirgenlik sıfıra kadar azalıyor. İzotropik faza tam geçtikten sonra sistem yeniden saydam hale geliyor. Elektrooptik efekt

incelendiğinde nematik fazdan izotropik faza geçiş esnasında görülen anomali (optik geçirgenliğin artması) tarafımızdan yorumlanmıştır. Faz dönüşümünün başlangıç noktasında sistem dış etkenlere (elektrik alan) daha duyarlı olduğunda sıvı kristallere uygulanan elektrik alan sıvı kristalin yapısını düzenli hale getiriyor ve domenlerin yönü aynı yöne yönelmiş oluyor. Sıcaklık arttıkça ise elektrik alanın etkisi azalıyor ve sistemin saydamlığı izotropik faza ulaşana kadar minimum düzeylerde kalıyor.

KAYNAKLAR

- BERREMAN, D. W., 1973, J. Opt. Soc. Am. 63:1374-1380.
- BORN, M. and WOLF, E., 1980, Principles of Optics, 6th edn, Pergamon, Oxford, p613.
- BORN, M. and WOLF, E., 1957, Fundamentals of Optics, McGraw-Hill, London, p676.
- BRUGIONI, S. and MEUCCI, R., 2004, Liquid Crystal Twisted Nematic Light Modulator for the Infrared Region, J.Opt.A: Pure Appl.Opt. 6:6-9.
- CHANDRASEKHAR, S., 1992, Liquid Crystals, Cambridge University Pres, Cambridge.
- DOANE, J. W., VAZ, N. A., WU, B. G., and S. ZUMER, 1986, Field Controlled Light Scattering from Nematic Microdroplets, Appl. Phys. Lett. 48, 269.
- FERGASON, J. L., 1985, Polymer Encapsulated Nematic Liquid Crystals for Display and Light Control Applications, SID Digest, 16, 68.
- FERNANDES-NIEVES, A., LINK, D.R., RUDHARDT, D., WEITZ, D.A., 2003, Electro-optics of Bipolar Nematic Liquid Crystal Droplets, APS/123-QED.
- FRANK, F.C., 1958, Discuss, Faraday Soc.25:19.
- GAHWILLER, 1971, Ch., Phys. Lett. A 36:311.
- GOOCH, C. H. and TARRY, H. A., 1975, The Optical Properties of Twisted Nematic Liquid Crystal Structures with Twist Angles $\leq 90^\circ$, J. Phys. D. : Appl. Phys., Vol.8:1575-1584.
- GRAY, G. W., HARRISON, K. J., and NASH, J. A., 1973, Electron. Lett. 9:130-131.
- GUYON, E., PIERANSKI, P., and BOIX, M., 1973, Lett. Appl. Engng Sci. 1:19-24.
- HEILMEIER, G. H., ZANONI, L. A. and BARTON, L. A., 1968, Dynamic Scattering: A New Electro-Optik Effect in Certain Classes of Nematic Liquid Crystals, Proc. IEEE 56, 1162; Also, 1968, Dynamic Scattering in Nematic Liquid Crystals, Appl. Phys. Lett. 13, 46.
- HEILMEIER, G. H., ZANONI, L. A., 1968, Guest-Host Interactions in Nematic Liquid Crystals: A New Electro-Optic Effect, Appl. Phys. Lett. 13, 91.

- HEILMEIER, G. H. and GOLDMACHER, J. E., 1968, A New Electric-Field-Controlled Reflective Optical Storage Effect in Mixed-Liquid Crystal Systems, *Appl. Phys. Lett.* 13, 132.
- JANNING, J. L., 1972, *Appl. Phys. Lett.* 21:173-174.
- KHOO, I.C., 1993, *Optics and Nonlinear Optics of Liquid Crystals*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
- KHOO, I.C., 1995, *Liquid Crystals: Physical Properties and Nonlinear Optical Phenomena*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- KHOO, I.C., and WU, S.T., 1993, *Optics and Nonlinear Optics of Liquid Crystals*, World Scientific, New Jersey, p.90.
- KLYSUBUN, P., 2002, *Nonlinear Optical Studies of Dye-Doped Nematic Liquid Crystals*, Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Physics, Virginia, 150.
- KUMAR, S., 2001, *Liquid Crystals: Experimental Study of Physical Properties and Phase Transitions*, Cambridge University Press, Cambridge.
- LANDAU, L. D., and LIFSHITZ, 1970, *Theory of Elasticity*, 2nd Ed., Pergamon Press, Oxford.
- LESLIE, F. M., 1966, *Q. J. Mech. Appl. Math.*, 19:367; *Arch. Ration. Mech. Anal.*, 1968, 28:265.
- LIN-HENDEL, C.G., 1981, Tristability in the Electric-Field-Induced Phase Transformation of Liquid Crystal Films, *Appl. Phys. Lett.* 38, 615; Also, 1982, Electric-Field-Induced Texture and Phase Transformation of Liquid Crystal Films, *J. Appl. Phys.* 53, 916.
- LUEDER, E., 2003, *Liquid Crystal Displays: Addressing Schemes and Electro-Optical Effects*, John Wiley & Sons, England.
- MACGREGOR, A. R., 1988, Modelling the Optical Properties of Twisted Nematic Guest-Host Liquid Crystals, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 21:1438-1446.
- MEDYA, R. K., CHOUDHARY, R. N. P., MAHAPATRA, P. K., 1999, *Liquid Crystals* 26:795.

- MOCHIZUKI, A., GONDO, H., WATANULA, T., SAITO, K., IKEGAMI, K., and OKUYAMA, H., Nematic-Cholesteric LCD Using Hysteresis Behavior, 1985, SID Technical Digest, 16, 135.
- MONTGOMERY, G. P., 1980, J. Opt. Soc. Am. 70:287-300.
- NESRULLAZADE, A., 2001, Sıvı Kristaller: Yapıları, Özellikleri, Uygulamaları.
- NICOLETTA, F.P., CUPELLI, D., FILPO G.De, and CHIDICHIMO, G., 2003, Nematic Liquid Crystal Droplets with an Enhanced Quasi-Linear Electro-Optical Response, Liquid Crystals, Vol.30, No.10, 1171-1174.
- RAYNES, E.P., 1983, Electro-Optic and Thermo-Optic Effects in Liquid Crystals, Phil. Trans. R. Soc. Lond, A309:167-178.
- SCARAMUZZA, N., STRAGI, G., and VERSACE, C., 2001, Electro-Optic Behaviour of a Non-Polar Nematic Liquid Crystal and Its Mixtures, Liquid Crystals, 28(2):307-312.
- SCHADT, M., and HELFRICH, W., 1971, Appl. Phys. Lett. 18:127-128.
- SIEZEN, R. J., FISCH, M. R., SLINGSBY, C., and BENEDEK, G. B., 1985, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 82:1701.
- SIKHARULIDZE, D., CHILAYA, G., PRAEFCKE, K. and BLUNK, D., 1997, Preliminary Communication: First Observation of an Optically Controlled Electro-Optic Effect in Nematic-Discotic Liquid Crystals, Liquid Crystals, 33(3):439-442.
- SONG, L. ve Lee, W. K., 2006, Laser Induced Self-Phase Modulation in Nematic Liquid Crystals and Effects of Applied DC Electric Field, Optics Communications 259:293-297.
- VAN BOXTEL, M. C. W., WUBBENHORST, M., TURNHOUT, J. VAN, BASTIAANSEN C. W. M. and BROER, D. J., 2004, Orientational Properties and Dynamics of Nematic Liquid Crystals Mixed with Dendrimers for Electro-Optical Switches, Liquid Crystals, 31(9):1207-1218.
- WYSOCKI, J. J., ADAMS, J. and HAAS, W., Electric-Field-Induced Phase Change in Cholesteric Liquid Crystals, 1968, Phys. Rev. Lett. 20, 1024.

ZOLOTKO, A. S., KITAEVA, V. N., KROO, N., SOBOLEV, N. N., CSILLAG, L.,
1980, JETP Lett. 32:158.

ÖZGEÇMİŞ

15 Nisan 1975 tarihinde Bakü’de (Azerbaycan) doğdum. 1982-1992 tarihleri arasında Baku 246 No’lu okulda ilkokul, ortaokul ve lise tahsilimi tamamladım. 1992 yılında Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nü kazandım. 1992-1993 eğitim-öğretim yılında Ankara Üniversitesi Türkçe Öğretim Merkezi (TÖMER) Konya Şubesi’nde Türkçe; 1993-1994 eğitim-öğretim yılında ise Çukurova Üniversitesi Yabancı Diller Eğitim Merkezi’nde (YADEM) İngilizce Dil Hazırlık eğitimi aldım. Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nde 1994 yılında başladığım eğitimimi 1998 yılında tamamladım. Aynı yıl Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Eğitimime başladım. 2001 yılında Yüksek Lisans eğitimim bitirerek Doktora eğitimime başladım.