



**ENTEGRE OPTİK AYGITLARIN KARARLILIK VE GÜVENİLİRLİK
ANALİZİ**

Seval DÖNERTAŞ

**DOKTORA TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Seval DÖNERTAŞ

19/11/2021

ENTEĞRE OPTİK AYGITLARIN KARARLILIK VE GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Seval DÖNERTAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2021

ÖZET

Bu çalışmanın amacı; entegre optik aygıtların entegrasyon, paketlenme, test ve karakterizasyon süreçlerini analiz ederek seri üretime uygun olup olmadıklarını saptamaktır. Analizler doğrultusunda, 500'den fazla entegre optik aygıtın fiber bütünleme çalışmaları yapılmıştır ve durum D geometrisinde üretilen aygıtlar üretim hattında tercih edilmiştir. Isısal testler referans alınarak aygıtların geçen/kalan sınıflandırması yapılmıştır. Epoksi bölgelerindeki gerilim değişimi termomekanik simülasyonlar gerçekleştirilerek analiz edilmiştir, böylece deneysel bulguların desteklenmesi hedeflenmiştir. Bölge 1 üzerinde indüklenen gerilim birikmesinin önemli bir gerilim mekanizması olduğu teyit edilmiştir. Dalgakılavuzu nüvesi içerisinde indüklenen gerilim seviyesinin optik geçirgenlik üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Paketleme çalışmalarında tip 1 uygulaması kullanılarak, tekrar edilebilir ısısal testlerde aygıtlardaki güç salınımının giderildiği gözlemlenmiştir. Paketleme aşamasından sonra açık döngü sistemde elektriksel karakterizasyonlar yapılmıştır. Silikon bazlı koruyucu kaplama yapılan aygıtlarda reset sinyal pikine rastlanmamıştır. -40 °C – (+85) °C sıcaklık aralığında uygulanan ısısal testlerde sıcaklığa bağlı yarı dalga gerilimi değişimi 560 ppm/°C civarında ölçülmüştür ve bu değer literatür araştırmalarından elde edilen sonuçlar ile tutarlı olduğu saptanmıştır. Kapalı döngü sistemde ısısal yaşlandırma işlemine bağlı olarak performans kararlılık testleri yapılmıştır. 4 farklı aygıt ile yapılan testler sonucunda, tekrarlanan sıcaklık döngüleri sayesinde dünya dönüşünde meydana gelen eğimde yaklaşık 10 kat iyileşme olduğu gözlenmiştir. Interferometre analizlerinde ise kristal içi polarizasyon sönümlenme oranı değişimi, farklı fiber ek noktalarındaki ve fiber taşıyıcı/aygıt arayüzündeki girişim durumları analiz edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda; entegre optik aygıtın kutuplanma değeri 50 dB olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak; bu tezde aygıtların sensör içinde ve sensörden bağımsız olarak analizleri yapılmış olup, ürün bazında isterleri sağlayan aygıtlar seri üretim sürecine dahil edilmiştir. Üretilen entegre optik aygıtlarına çok fonksiyonlu entegre optik aygıt adı verilmiştir. Bu aygıtlar; taktik ve navigasyon seviye fiber optik dönüölçer sensörlerinin temel yapıtaşı olarak kabul edilmektedir.

Bilim Kodu : 20217
Anahtar Kelimeler : Entegre optik aygıt, Termomekanik simülasyon, Isısal test
Sayfa Adedi : 163
Danışman : Prof. Dr. Elif ORHAN

STABILITY AND RELIABILITY ANALYSIS OF INTEGRATED OPTICAL DEVICES

(Ph. D. Thesis)

Seval DÖNERTAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2021

ABSTRACT

The aim of this study is to determine whether the integrated optical devices are suitable for the mass production by analyzing their integration, packaging, test and characterization processes. In accordance with the analyses, the fiber integration operations of more than 500 devices were carried out and the devices which were produced according to case D geometry were preferred in the production line. By taking as a reference of thermal tests, “successful/fail” classification of the devices were made. The stress variation in the epoxy regions was analyzed by carrying out thermomechanical simulations, so the verification of the experimental findings was aimed. It was confirmed that the stress accumulation induced on region 1 is an important stress mechanism and also it was appointed that this stress accumulation affects the device stability critically. The effect of the induced stress level through the waveguide core on the optical transmission was investigated. In the packaging studies, it was observed that the power fluctuation during repeatable thermal tests could be eliminated by the usage of type 1 application. After the packaging step, the electrical characterizations were carried out in the open-loop system. The reset signal peak was not encountered for the devices coated with the silicone based conformal coating. The temperature dependent half-wave voltage variation was measured around 560 ppm / °C during thermal tests between -40 °C and +85 °C temperature values and it was understood that this value is consistent with the results obtained from the literature researches. In the closed-loop system, performance stability tests based on the thermal aging operation were made. At the end of the test results of four different devices, almost 10 fold recovery in the slope of the earth rate was observed thanks to the repetitive thermal cycles. In the interferometer analyses, the polarization extinction ratio variation inside the device crystal, interference situations at different splice points and between fiber pigtail carrier/device interface were analyzed. In consequence of the evaluations, the polarization of the integrated optical device was measured 50 dB. Finally, in this thesis the analyses of the devices inside and outside the FOG sensor were practiced and so the devices which ensure the requirements in terms of a product were incorporated to the mass production process. The produced integrated optical devices were entitled as multi functional integrated optical chip. These devices are approved as principal milestone of tactic and navigation grade fiber optic gyroscope sensors which are used in military applications.

Science Code : 20217

Key Words : Integrated optical device, Thermomechanical simulation, Thermal test

Page Number : 163

Supervisor : Prof. Dr. Elif ORHAN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında, akademik alandaki yönlendirmeleri ile doktora eğitimim süresince beni daima motive eden, manevi desteğiyle beni bu süreç içerisinde teşvik eden, bilimsel yayın çalışmalarımın bir plan dahilinde gerçekleştirilmesine önemli katkıları olan sayın Prof. Dr. Elif ORHAN'a yürekten teşekkür ederim.

İhtiyaç duyduğum her türlü teknik altyapı desteğini bana sunan, deneysel çalışmalarımın gerçekleştirilmesine olanak sağlayan Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM) kurucusu ve direktörü sayın Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Yayın çalışmalarım sırasında bana yol gösteren, iş hayatım boyunca vizyon edinmemi sağlayan, on yılı aşkın süredir birlikte çalıştığım ekip liderim sayın Dr. Mutlu GÖKKAVAS'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim süresi boyunca akademik alandaki yönlendirmeleri ile bana ilham veren, yayın çalışmalarımın gerçekleştirilmesine imkan tanıyan tez izleme komitesi üyelerinden İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı öğretim üyesi sayın Prof. Dr. Sema BİLGE OCAK ve Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumunda görev yapan sayın Doç. Dr. Canan AYDAŞ'a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımda doğrudan ve dolaylı olarak olumlu yönde katkıda bulunmuş olan ekip arkadaşlarıma katkılarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. ENTEGRE OPTİK AYGITLARIN HASSAS HİZALAMA YÖNTEMİ İLE FİBER ENTEGRASYONU	9
2.1. Optik Fotolitografi Tekniği ve Aşamaları.....	9
2.2. Optik Aygıtların Hassas Hizalama Yöntemi ile Fiber Entegrasyonu	11
2.2.1. Geometrik konfigürasyon değişiminin entegre optik aygıtın kararlılık ve güvenilirlik analizlerine etkisi.....	18
2.2.2. D durumu için aygıt uzunluğunun entegre optik aygıt kararlılığına etkisi.....	22
2.2.3. UV uygulama sürecinin ve ön katılaşmanın entegre optik aygıt güvenilirliği üzerine etkisi	23
2.2.4. Pozlama süresinin entegre optik aygıt güvenilirliği üzerine etkisi	26
3. ENTEGRE OPTİK AYGIT MODELLEMESİ VE TERMO MEKANİK SİMÜLASYONLAR.....	33
3.1. Üç Boyutlu Entegre Optik Aygıt Modellemesi.....	34
3.2. Malzeme Parametrelerinin Tanımlanması	38
3.3. Örgü Parametrelerinin Tanımlanması ve Örgü Analizi	39
3.4. Sınır Koşulları Tanımlanması	43

	Sayfa
3.5. Modül Tipinin Belirlenmesi	47
3.6. Analiz Tipinin Belirlenmesi	48
3.7. Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	49
3.8. Sıcaklık Yükleme Altında Dalgakılavuzu Bölgesindeki Gerilim Dağılımı ve Güç Akışı Analizi	54
3.9. Entegre Optik Aygıtların Oda Sıcaklığındaki Optik Karakterizasyonları	59
4. ENTEGRE OPTİK AYGITLARIN PAKETLEME SÜREÇLERİ VE İSİSAL DÖNGÜ ANALİZLERİ	63
4.1. Entegre Optik Aygıtların Paketleme Süreci Aşamaları	63
4.2. Tip 1 ve Tip 2 İşlemi Uygulanan Entegre Optik Aygıtların Isısal Döngü Karakterizasyonları.....	71
5. AÇIK DÖNGÜ FİBER OPTİK DÖNÜ ÖLÇER SİSTEMİ İÇERİSİNDEKİ ELEKTRİKSEL KARARLILIK ANALİZİ.....	79
5.1. Literatür Değerlendirmeleri	79
5.2. Koruyucu Kaplama Uygulama Yöntemleri	83
5.2.1. Fırça ile uygulama.....	84
5.2.2. Daldırma.....	84
5.2.3. Sprey koruyucu kaplama.....	84
5.2.4. Otomatik sprej koruyucu kaplama	85
5.3. Açık Döngü FOD Sistematiği	85
5.4. Açık Döngü Sistemde Optik Bütünleme Çalışmaları	95
5.5. Koruyucu Kaplama Malzeme Çeşitleri ve Özellikleri	100
5.6. Farklı Koruyucu Kaplama Malzemelerinin Entegre Optik Aygıtların Elektriksel Performansına Etkisi	104
5.7. Entegre Optik Aygıtların Sıcaklığa Bağlı Yarı Dalga Geriliminin İrdelenmesi .	118
6. İSİSAL YAŞLANDIRMA İŞLEMİNE BAĞLI PERFORMANS KARARLILIK ANALİZLERİ	123
6.1. Kapalı Döngü Sistem Yapısı	123

Sayfa

6.2. Sıcaklığa Bağlı Dönü Analizi ve Eğim Karakterizasyonu	126
7. İNTERFEROMETRE YÖNTEMİ İLE KRİSTAL İÇİ KUTUPLANMA ANALİZİ	131
7.1. İnterferometre Düzenegi Kurulumu	131
7.2. Teorik Hesaplamalar ve Kutuplanma Karakteristiği Analizi	134
7.3. SLD Işık Kaynağı ile Gerçekleştirilen Çalışmalar	140
7.3.1. Pompa akımının değişimine göre dalga boyu kayma analizi	142
7.3.2. SLD yükseltme işleminin pik çözünürlüğüne etkisinin irdelenmesi.....	143
8. SONUÇ	149
KAYNAKLAR	157
ÖZGEÇMİŞ	163

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Bütünlenen aygıtların yapısal geometrilerine göre sınıflandırılması.....	18
Çizelge 2.2. Durum A, B, C ve D için fiber bütünleme aşamasında kullanılan UV poz parametreleri.....	26
Çizelge 3.1. 5 farklı durum ve yapısal geometri tanımlaması	35
Çizelge 3.2. Malzemelerin fiziksel özellikleri	38
Çizelge 3.3. Durum A, B, C, D ve E için bileşenlerin örgü parametrelerinin tanımlanması	40
Çizelge 3.4. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen toplam geçirgenlik ve ayırma oranı analizleri.....	60
Çizelge 3.5. Durum A, B, C ve D için aygıtların toplam geçirgenlik değerine göre sınıflandırılması.....	60
Çizelge 5.1. Farklı MIOD aygıtları için tampon tabaka analizleri	82
Çizelge 5.2. Koruyucu kaplama temel parametreleri.....	102
Çizelge 5.3. AZ testleri yapılan aygıtlar ve kullanılan koruyucu kaplama malzemeleri	107
Çizelge 5.4. Koruyucu kaplama uygulanan aygıtlar için reset sinyali test sonuçları	107
Çizelge 5.5. SiO ₂ kaplaması gerçekleştirilen aygıtlar için reset sinyali test sonuçları ...	108
Çizelge 5.6. Koruyucu kaplama malzemesi uygulanan entegre optik aygıtlar için V _π ölçüm sonuçları	108
Çizelge 5.7. SiO ₂ kaplaması yapılan entegre optik aygıtlar için V _π ölçüm sonuçları.....	116
Çizelge 5.8. Sıcaklık duyarlılık katsayıları	120
Çizelge 7.1. İnterferometre düzeneğinde kullanılan bileşenler için bazı parametrik veriler	136
Çizelge 7.2. Simetrik optik yol durumları	138
Çizelge 7.3. A, B, C ve D için girişim piki analizi	139
Çizelge 7.4. S parametre tanımlaması.....	139

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Optik fotolitografi basamakları.....	9
Şekil 2.2. Y-çiftleyici geometrisine sahip optik aygıt.....	11
Şekil 2.3. Optik fiber katmanlarının ön kesit görüntüsü.....	12
Şekil 2.4. Giriş entegrasyon test düzeneği şeması	13
Şekil 2.5. Çıkış entegrasyon test düzeneği şeması.....	15
Şekil 2.6. Geçen ve kalan aygıt için sıcaklık test grafikleri a) Geçen aygıt sıcaklık test profili. b) Kalan aygıt sıcaklık test profili.....	20
Şekil 2.7. 4 farklı geometrik konfigürasyon için geçen/kalan aygıt istatistiği.....	21
Şekil 2.8. 4 farklı geometrik konfigürasyon için yüzdesel dağılım analizi	22
Şekil 2.9. Durum D için aygıt uzunluğuna göre geçen/kalan aygıt istatistiği.....	22
Şekil 2.10. Durum D için aygıt uzunluğuna göre yüzdesel dağılım analizi	23
Şekil 2.11. Durum A, B, C ve D için ön katılma varlığında ve yokluğunda geçen/kalan aygıt istatistiği	25
Şekil 2.12. Durum A, B, C ve D için ön katılma işlemine göre yüzdesel dağılım analizi	25
Şekil 2.13. Durum A için pozlama süresinin değişimine göre geçen/kalan aygıt istatistiği	27
Şekil 2.14. Durum A için pozlama süresinin değişimine göre yüzdesel dağılım analizi	27
Şekil 2.15. Durum B için pozlama süresinin değişimine göre geçen/kalan aygıt istatistiği	28
Şekil 2.16. Durum B için pozlama süresinin değişimine göre yüzdesel dağılım analizi	29
Şekil 2.17. Durum C için pozlama süresinin değişimine göre geçen/kalan aygıt istatistiği	30
Şekil 2.18. Durum C için pozlama süresinin değişimine göre yüzdesel dağılım analizi	30
Şekil 2.19. Durum D için pozlama süresinin değişimine göre geçen/kalan aygıt istatistiği	31

Şekil	Sayfa
Şekil 2.20. Durum D için pozlama süresinin değişimine göre yüzdesel dağılım analizi	32
Şekil 3.1. 3 boyutlu entegre optik aygıt modellemesi.....	34
Şekil 3.2. 5 farklı yapısal durum şematik gösterimi a) Durum A b) Durum B c) Durum C d) Durum D e) Durum E	36
Şekil 3.3. Epoksi katmanları için bölge tanımlaması.....	36
Şekil 3.4. Durum A, B, C, D ve E için örgü analizi.....	41
Şekil 3.5. LiNbO_3 anizotropik özellikleri tanımlaması a) Entegre optik aygıt yapısının ön kesit görüntüsü ve kristal yönelimi b) Temel vektör koordinat sistemi c) Simülasyon sonundaki kristal yönelimi	46
Şekil 3.6. Simülasyon çalışmalarında kullanılan sıcaklık test profili	50
Şekil 3.7. Durum A, B, C, D ve E için yüksek ve düşük sıcaklıklarda bölge 1 üzerindeki gerilim dağılımı analizi a) $T=+85^\circ\text{C}$ 'de b) $T=-40^\circ\text{C}$ 'de	51
Şekil 3.8. Durum E için gerilim ve sıcaklık analizleri a) $T=85^\circ\text{C}$ 'deki gerilim dağılımı b) $T=85^\circ\text{C}$ 'deki sıcaklık dağılımı c) $T=-40^\circ\text{C}$ 'deki gerilim dağılımı d) $T=-40^\circ\text{C}$ 'deki sıcaklık dağılımı	52
Şekil 3.9. Tüm durumlar için bölge 1, 2 ve 3 üzerindeki gerilim dağılımı a) $T=85^\circ\text{C}$ 'de b) $T=-40^\circ\text{C}$ 'de	53
Şekil 3.10. Bölge 1 için sıcaklık değişimine göre gerilim analizi karşılaştırması a) $T_1=-40^\circ\text{C}$ ve $T_2=-55^\circ\text{C}$ 'de b) $T_3=85^\circ\text{C}$ ve $T_4=120^\circ\text{C}$ 'de.....	54
Şekil 3.11. Dalgakılavuzu, kapak, LiNbO_3 kristal ve epoksi bileşiminden oluşan yapının örgü analizi	55
Şekil 3.12. Dalgakılavuzu bölgesindeki gerilim konsantrasyonunun incelenmesi.....	55
Şekil 3.13. Dalgakılavuzu bölgesindeki gerilim analizi a) $T=85^\circ\text{C}$ 'de b) $T=-40^\circ\text{C}$ 'de	56
Şekil 3.14. Oda sıcaklığında dalgakılavuzu nüvesi içindeki örgü dağılımı ve güç akışı a) Örgü dağılımı b) Gerilim-bağımsız durum için güç akışı b) Gerilim-bağımlı durum için güç akışı analizi	58
Şekil 3.15. Gerilim-bağımsız (0) ve gerilim-bağımlı (1) durum için $T=-40^\circ\text{C}$, $T=-55^\circ\text{C}$, $T=85^\circ\text{C}$ ve $T=120^\circ\text{C}$ 'de dalgakılavuzu içindeki güç akışı analizi	59
Şekil 3.16. Durum A, B, C ve D kategorisinde üretilen entegre optik aygıtların toplam geçirgenlik değerine göre istatistiksel dağılımı	61
Şekil 4.1. Tip 1 fiber sabitleme işlemi uygulanan entegre optik aygıtın kararlılık döngü analizi	73

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. Tip 2 fiber sabitleme işlemi uygulanan entegre optik aygıtın kararlılık döngü analizi	74
Şekil 4.3. M_1 için sıcaklık döngü analizleri a) Tip 1 işlemi öncesi b) Tip 1 işlemi sonrası.....	75
Şekil 4.4. M_2 için sıcaklık döngü analizleri a) Tip 1 işlemi öncesi b) Tip 1 işlemi sonrası.....	76
Şekil 4.5. M_3 için sıcaklık döngü analizleri a) Tip 1 işlemi öncesi b) Tip 1 işlemi sonrası.....	76
Şekil 4.6. M_4 için sıcaklık döngü analizleri a) Tip 1 işlemi öncesi b) Tip 1 işlemi sonrası.....	77
Şekil 4.7. M_5 için sıcaklık döngü analizleri a) Tip 1 işlemi öncesi b) Tip 1 işlemi sonrası.....	77
Şekil 5.1. Rampa sinyali ve faz modülasyon kayması ile meydana gelen beslem sinyali	81
Şekil 5.2. FOD şematik yapısı	85
Şekil 5.3. Er enerji diyagramı	86
Şekil 5.4. ASE ışık kaynağı blok diyagramı	87
Şekil 5.5. Dedektör çıkışındaki interferogram	88
Şekil 5.6. Kare dalga beslem modülasyonu	89
Şekil 5.7. Açık döngü FOD sistem yapısı şematik gösterim	90
Şekil 5.8. Dedektör çıkış sinyali ve V_π gerilimi analizi.....	93
Şekil 5.9. Durum D kategorisindeki 100 adet entegre optik aygıt için V_π değişimi analizi	106
Şekil 5.10. M_6 için reset piki karakterizasyonu	110
Şekil 5.11. M_7 için reset piki karakterizasyonu	110
Şekil 5.12. M_8 için reset piki karakterizasyonu	111
Şekil 5.13. M_9 için reset piki karakterizasyonu.....	112
Şekil 5.14. M_{10} için reset piki karakterizasyonu (a) Silikon uygulama öncesi (b) Silikon uygulama sonrası	113
Şekil 5.15. M_{11} için reset piki karakterizasyonu (a) Seyreltik Dow Corning uygulama öncesi (b) Seyreltik Dow Corning uygulama sonrası	115

Şekil	Sayfa
Şekil 5.16. M_{12} için reset piki karakterizasyonu	116
Şekil 5.17. M_{13} için reset piki karakterizasyonu	117
Şekil 5.18. M_{14} için reset piki karakterizasyonu	117
Şekil 5.19. $LiNbO_3$ tabanlı aygıtın faz modülasyon kısmının yapısı [49]	118
Şekil 5.20. Yarı dalga geriliminin sıcaklığa göre değişimi.....	121
Şekil 6.1. Kapalı döngü sistem yapısı.....	123
Şekil 6.2. Kapalı döngü FOD sistem yapısı.....	124
Şekil 6.3. M_{16} için sıcaklığa bağlı dönü değişimi a) Tüm testler b) İlk test c) Son test .	127
Şekil 6.4. M_{17} için sıcaklığa bağlı dönü değişimi a) Tüm testler b) İlk test c) Son test .	127
Şekil 6.5. M_{18} için sıcaklığa bağlı dönü değişimi a) Tüm testler b) İlk test c) Son test .	128
Şekil 6.6. M_{19} için sıcaklığa bağlı dönü değişimi a) Tüm testler b) İlk test c) Son test .	128
Şekil 7.1. Kutuplanma karakterizasyonu için kurulan fiber tabanlı interferometre deney düzeneği ve Mach-Zehnder interferometresi	132
Şekil 7.2. OYF yöntemine dayalı değerlendirme analizi	134
Şekil 7.3. Kristal içi PER ve fiber ek noktalarındaki girişim durumları analizi	137
Şekil 7.4. SLD ışık kaynağı mekanizması	142
Şekil 7.5. Farklı pompa akım değerlerine göre dalga boyu kayma analizi.....	143
Şekil 7.6. SLD yükseltme çalışmaları a) Pompa akımı ile sinyal gücü arasındaki ilişki b) Bant genişliği analizi.....	144
Şekil 7.7. $I=0$ ve $I=100$ mA için pik karakterizasyonu a) $I=0$ iken b) $I=100$ mA iken...	145
Şekil 7.8. $I=200$ mA ve $I=300$ mA için pik karakterizasyonu a) $I=200$ mA iken b) $I=300$ mA iken	145
Şekil 7.9. $I=400$ mA ve $I=500$ mA için pik karakterizasyonu a) $I=400$ mA iken b) $I=500$ mA iken	145
Şekil 7.10. Referans pik için ASE ve SLD ile alınan ölçümlerin karşılaştırması.....	146

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Dalgakılavuzu ve elektrot mikroskop görüntüleri a) Dalgakılavuzu görüntüsü b) Elektrot görüntüsü	10
Resim 2.2. Kesimleri tamamlanan optik aygıt örnekleri	11
Resim 2.3. Entegre optik aygıtın giriş entegrasyon aşaması	14
Resim 2.4. Giriş ucu bütünlenmiş entegre optik aygıtın mikroskop görüntüsü.....	15
Resim 2.5. Çiftli fiber taşıyıcı ile hizalanmış olan optik aygıt görüntüsü	16
Resim 2.6. Bütünlenen MIOC aygıtı	17
Resim 2.7. Durum A, B, C ve D için yanal mikroskop görüntüleri.....	19
Resim 3.1. Durum A, B, C ve D için gerçek aygıt görüntüleri ile simülasyon ortamında oluşturulan modellerin karşılaştırılması	37
Resim 3.2. Dört farklı örgü eleman yapısı.....	42
Resim 3.3. Sıcaklık sınır koşulu için zamana bağlı parametrik tanımlamaların ve sıcaklık test profilinin oluşturulması a) Parametrik tanımlamalar b) Sıcaklık test profili	44
Resim 3.4. Sıcaklık sınır koşulunun oluşturulması a) Sıcaklık koşulu atanması b) Sıcaklık fonksiyonu tanımlanması	45
Resim 3.5. Temel vektör sistemi tanımlanması	47
Resim 3.6. Zamana bağlı analiz program arayüzü.....	49
Resim 4.1. PCB bileşenleri	64
Resim 4.2. PCB gövde çalışmaları a) Gövde üzerine yapıştırıcı uygulanması b) Aygıtın PCB gövde üzerine yapıştırılması.....	65
Resim 4.3. PCB taşıyıcı çalışmaları a) PCB gövde üzerine yapıştırıcı uygulaması b) PCB taşıyıcı parçasının gövde üzerine sabitlenmesi.....	65
Resim 4.4. Fiber çiftlenimli entegre optik aygıt görüntüsü	66
Resim 4.5. Entegre optik aygıt elektrotları ve PCB taşıyıcı üzerindeki bakır yüzeyler arasında elektriksel tel ile bağlantı yapılması.....	66
Resim 4.6. Entegre optik aygıt kutulaması	67
Resim 4.7. Kablo bağlantısı yapılmış bir entegre optik aygıt yapısı	67

Resim	Sayfa
Resim 4.8. Aygıtın giriş ve çıkış kollarındaki fiberlerin sabitlenmesi	68
Resim 4.9. Giriş fibere koruyucu tüp takılması	68
Resim 4.10. Tip 1 uygulaması a) Tüp takma b) Fiber sabitleme	69
Resim 4. 11. Tip 1 uygulaması için tüpün uç noktasından fiber sabitleme işlemi	70
Resim 4.12. Tip 2 uygulaması a) Tüp takma b) Fiber sabitleme	70
Resim 4.13. Kapak kapatma ve sabitleme işlemi	71
Resim 4.14. Sıcaklık test konfigürasyonu a) Sıcaklık test düzeneğinin şematik gösterimi b) Deneysel sıcaklık test düzeneği	72
Resim 5.1. Açık döngü deney düzeneği.....	91
Resim 5.2. Farklı geometrik yapıda üretilen entegre optik aygıtlar	95
Resim 5.3. Açık döngü test düzeneği.....	95
Resim 5.4. Fiber ek işleminde kullanılan malzemeler	96
Resim 5.5. Fiber ek işlemi aşamaları	97
Resim 5.6. Entegre optik aygıt ile fiber sarımın optik bütünleme çalışması	98
Resim 5.7. Aygıt ve sarımın fiberler toparlandıktan sonraki hali.....	98
Resim 5.8. Optik bütün	99
Resim 5.9. Optik bütünün manyetik kalkan içerisine yerleştirilmesi	99
Resim 5.10. Açık döngü sistemde hazırlanmış olan optik bütünün son hali	100
Resim 5. 11. Fırçalama yöntemi ile aygıt yüzeyine koruyucu kaplama uygulanması....	104

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
%	Yüzde
°C	Derece
μm	Mikrometre
A	Amper
a	$E_x(t)$ için genlik katsayısı
A	Genlik
Au	Altın
B	Çiftkırınım
b	$E_y(t)$ için genlik katsayısı
c	Işık hızı
C	Elastikiyet tensörü
C_p	Sabit basınçta öz ısı
d	Pozisyon
D	Çap
dB	Desibel
dk	Dakika
E	Elastikiyet modülü
E_1	1.ışık dalgası için elektrik alan genliği
E_2	2.ışık dalgası için elektrik alan genliği
Er	Erbiyum
$E_x(t)$	x eksenindeki kutuplanma bileşeni
$E_y(t)$	y eksenindeki kutuplanma bileşeni
f	Hızlı eksen
G	Elektrotlar arasındaki mesafe
GHz	Gigahertz
GPa	Gigapascal
I	Ortalama elektro manyetik şiddet

Simgeler**Açıklamalar**

I_1	1.ışık dalgası için elektro manyetik şiddet
I_2	2.ışık dalgası için elektro manyetik şiddet
InGaAs	İndiyum Galyum Arsenit
k	Isısal iletkenlik
K	Kelvin
k_1	1.ışık dalgası için dalga vektörü
k_2	2.ışık dalgası için dalga vektörü
kg	Kilogram
L	Uzunluk
Li^+	Lityum iyonu
$LiNbO_3$	Lityum Niyobat
m	Metre
mA	Miliamper
MHz	Megahertz
ml	Mililitre
mm	Milimetre
mm^2	Milimetrekaare
MPa	Megapascal
n	Kırılma indisi
n_e	Olağandışı kırılma indisi
nm	Nanometre
OH^-	Hidroksil iyonu
P_1	Entegre optik aygıt 1.kol çıkış gücü
P_2	Entegre optik aygıt 2.kol çıkış gücü
P_i	Işık kaynağı giriş gücü
ppm	Milyonda bir
Q	Hacimsel ısı
r	Elektro optik katsayısı
r_{33}	3x3 indisli elektro optik katsayısı
s	Yavaş eksen
S	İki ortagonal mod arasındaki optik yol hesabı
S	Gerilme tensörü

Simgeler**Açıklamalar****Si₃N₄**

Silisyum Nitrür

SiO₂

Silisyum Dioksit

sn

Saniye

t

Süre

T

Sıcaklık

Ti

Titanyum

V

Gerilim

V_π

Yarı-dalga gerilimi

V_{π/2}

Çalışma gerilimi

W

Isı enerjisi

X

Büyütme faktörü

x

Konum

z

İletim mesafesi

α

Isısal genleşme katsayısı

η

Poisson oranı

λ

Dalga boyu

π

Pi katsayısı

ρ

Yoğunluk

τ

Işığın fiber içerisinde geçiş süresi

Ω

Dönü hızı

ω₁

1.ışık dalgası için elektro manyetik dalga frekansı

ω₂

2.ışık dalgası için elektro manyetik dalga frekansı

ε

Gerilim tensörü

φ

Faz kayması

φ_f

Kare dalga tarafından üretilen faz

φ_j

Rampa dalga tarafından üretilen faz miktarı

φ_s

Fiber sarım içerisindeki faz kayması

Kısaltmalar**Açıklamalar****a.a**

Alternatif Akım

ADC

Analog-Sayısal Dönüştürücü

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ANS	Ataletsel Navigasyon Sistemi
AO₁	1.Kol Ayırma Oranı
AO₂	2.Kol Ayırma Oranı
ASE	Yükseltilmiş Uyarılmış Yayılım
d.a	Doğru Akım
DAC	Sayısal-Analog Dönüştürücü
EDFA	Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç
FD	Fotodedektör
FOD	Fiber Optik Dönü ölçer
FPGA	Alanda Programlanabilir Kapı Dizisi
FT	Fiber Taşıyıcı
FWHM	Yarı Tepe Genişliği
IFOD	İnterferometrik Fiber Optik Dönü ölçer
IOC	Entegre Optik Çip
IOD	Entegre Optik Aygıt
MIOC	Çok Fonksiyonlu Entegre Optik Çip
MIOD	Çok Fonksiyonlu Entegre Optik Aygıt
MZI	Mach-Zehnder İnterferometresi
NI	National Instrument
NOA	Norland Optik Yapıştırıcı
OYF	Optik Yol Farkı
PC	Polarizasyon Kontrolcüsü
PCB	Baskı Devre Kartı
PDE	Kısmi Diferansiyel Eşitlik
PDKBB	Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
PER	Polarizasyon Sönümlenme Oranı
PIN	p-Katkısız-n
PM	Polarizasyon Korumalı
PV	Pik Var
PY	Pik Yok
RFOD	Halka Fiber Optik Dönü Ölçer
RH	Bağıl Nem

Kısaltmalar**Açıklamalar****RTV**

Oda Sıcaklığında Sertleştirme

SEA

Sonlu Elemanlar Analizi

SLD

Süper Işımalı Diyot

SM

Tek Modlu

TG

Toplam Geçirgenlik

UV

Mor Ötesi

VOA

Değişken Optik Zayıflatıcı

WDM

Dalga Boyu Bölmeli Çoklayıcı



1. GİRİŞ

Entegre optiğin alanı; güdümlü optik aygıtların teori, fabrikasyonu ve uygulama alanları ile ilgilidir. Bu yapılarda; ışık ışınları yonga plakasının yüzeyinden ilerleyecek şekilde kılavuzlanmıştır ve dalga boyu mertebesinde boyutlara sahip bir alana hapsolmuştur. Klasik optiğe benzer şekilde pasif operasyonları yürüten güdümlü dalga aygıtları; mikroelektronik tabanlı fabrikasyon teknikleri kullanılarak oluşturulabilmektedir. Bu teknikler kullanılarak; klasik elektro optik etki prensibine göre çalışan ferroelektrik malzemeler, modulatör gibi aktif aygıtlar üretilebilmektedir. Aktif aygıtlar bileşik yarıiletkenlere entegre şekilde üretilerek, lazerler, dedektörler ve optik yükselteçler ile birlikte kullanılmaktadır. Pasif ve aktif aygıtların tek bir devrede birlikte kombinasyonu entegre optik aygıt (Integrated Optical Device-IOD) olarak tanımlanmaktadır [1].

Entegre optik alanındaki ilerlemeler; 1970 senesinden beri zaman içerisinde hızlı bir şekilde ilerleme kaydetmiştir. Bu ilerlemenin sebepleri; yüksek kalitedeki malzemelerin piyasadaki varlığı, mikroelektronik işleme tekniklerinin kullanımda olması ve fiber optik sistemlerin hızla ilerleme kaydetmesi ve yaygınlaşmasıdır. Entegre optiğe duyulan ilgi; diğer optik teknolojilerine göre çok daha fazla avantajları olmasından kaynaklanmaktadır. Bunlar; geniş elektriksel bant genişliğine sahip olması, düşük güç tüketimi, boyut olarak az yer kaplaması ve güvenilirlik düzeylerinin yüksek olması gibi özellikleri kapsamaktadır. Entegre optik aygıtlar optik fiberlerle de uyumlu oldukları için ve bir arada kullanılabildikleri için kullanılan devre elemanlarının ayrı paketlemesine ihtiyaç duyulmamaktadır. Bundan dolayı maliyet açısından kazanç sağlanmaktadır [1].

Entegre optik teknolojisi çok geniş uygulama alanlarına sahiptir. Bu uygulamaların çoğu; tek modlu fiber optik sistemler ile entegrasyonunu kapsamaktadır. Öncelikli kullanım alanları; dijital ve analog iletişim sistemleri, fiber optik sensörler ve sinyal işlemedir. Entegre optik aygıtlar yüksek hızlı dijital iletişim sistemleri ve fiber optik dönü ölçer (FOD) sensörleri için sektörde önemli yapıtaşları olarak kabul edilmektedir [1].

FOD; konum değişikliklerini algılayan bir sensördür [2,3]. Navigasyon teknolojisinde en başarılı dönü ölçer sensörlerinden birisi olarak kabul edilmektedir ve uydu, denizaltı gibi çeşitli uygulama alanları mevcuttur. FOD sistemleri; Ataletsel Navigasyon Sistemleri (ANS), uçak, uzay mekiği ve güdümlü mekanizmalarında kullanılmaktadırlar [4]. Bu

sensörler; zıt yönde ilerleyen elektromanyetik dalgalar arasındaki faz farkını ölçerek, zıt yönde ilerleyen bu sinyaller arasında yol farkına dayalı dönü ölçümü yapmak amacıyla tasarlanmışlardır [4,5] ve bahsedilen bu etki Sagnac etkisi [5,6,7] olarak adlandırılmaktadır. Diğer bir ifadeyle; FOD sistemi döndüğü zaman, fiber sarımın etrafında zıt yönlü dolaşan ışık ışınları arasında bir faz farkı meydana gelmektedir [6] ve bu faz farkı dünya dönüşünün hızıyla orantılıdır [4]. Literatür çalışmaları incelendiğinde iki farklı konfigürasyon mevcuttur: İnterferometrik Fiber Optik Dönü Ölçer (IFOD) ve Rezonant Fiber Optik Dönü Ölçer (RFOD). Optik yol farkı iki şekilde ölçülebilir: a) frekansı RFOD'un içinde ölçerek, b) girişim yapan iki ışının fazını IFOD içinde ölçerek. RFOD araştırma çalışmalarında kullanılmaktadır ve dönü ölçer performansı gerisaçılım gürültüsü ile sınırlandırılmıştır [4]. IFOD sistemleri ise; yüksek güvenilirlik, geniş dinamik menzil, düşük güç tüketimi ve düşük maliyet gibi bazı avantajlara sahiptir, bu sebeple RFOD sistemlerine göre daha iyi bir alternatif olarak değerlendirilmektedir [4].

Optik dönü ölçer etkisi ilk olarak 1913 senesinde Sagnac tarafından gösterilmiştir [8] ve optik dönü ölçerlerin uygulamaları Sagnac etkisi esas alınarak gerçekleştirilmiştir [2,7]. Çalışma prensibi Sagnac etkisi ile ilişkili olan FOD sensörleri [5,6,7] ışık kaynağı, fiber sarım ve entegre optik aygıt gibi bazı temel bileşenleri içermektedir [6,9,10,11,12]. Tez çalışması sırasında kurulan FOD interferometresinin ana bileşenleri ise 1x2 çiftleyici, kutuplayıcı, entegre optik aygıt ve fiber sarımdır. 1x2 çiftleyici; gelen ışığın gücünü ikiye bölen tek modlu, kutuplayıcı özelliği olmayan fiber optik komponentlerdir, ayrıca ışık kaynağından gelen optik sinyali 50/50 (3 dB) ayırma oranında bölerek fiber sarım içerisinden ilerlemesini sağlamaktadır.

FOD sistemlerinde kullanılan diğer bir bileşen de kutuplayıcılardır. Kutuplayıcı; FOD gibi interferometrik sensörlerde önemli bir görev üstlenmektedir. Fotodedektörden okunan Sagnac çıkış sinyalinin doğru ve hassas bir şekilde ölçülebilmesi için, ışık kaynağından gelen sinyalin tek bir kutuplanma doğrultusunda olması gerekmektedir. Kutuplayıcının sistemde kullanılmasını gerektiren bir diğer sebep ise, ışık dalgasının fazını bir elektro optik faz modülatörü ile modüle ederken doğrusal kutuplanmış ışığa ihtiyaç duyulmasıdır [13]. Kutuplayıcının temel görevi; kutuplanmamış ışığı filtreleyerek ışığın tek bir kutuplanma doğrultusunda geçmesine izin vermektir. Kutuplayıcıların çıkış fiberleri genellikle polarizasyon korumalı (Polarization Maintaining – PM) fiberlerden oluşmaktadır. Böylece; fiber çıkışından elde edilen ışık ışınları bozulma olmaksızın doğrusal olarak kutuplanmış

olur. Işığın kutuplamak için çeşitli yöntemler mevcuttur. Serbest uzayda kullanılan bazı ekipmanlar FOD sistemleri içerisine entegre edilebilir; ancak verimlilik kaybı, maliyet, geometrik ölçüler, mekanik ve termal kararlılık gibi etkiler de göz önünde bulundurulduğunda çok fazla dezavantaja sahiptir. Bu sebeple; fiber optik tabanlı kutuplayıcılar FOD sistemleri için en iyi seçenek olarak değerlendirilmektedir.

FOD sistemlerinin diğer önemli alt bileşeni fiber sarımlardır. Sagnac etkisi fiber sarım parametreleri ile yakından ilişkilidir. Fiber sarımların performansı, ölçülecek dönünün hassasiyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu tez çalışmasında; entegre optik aygıtların performansına ve kararlılığına yönelik çalışmalar ele alınacağı için, fiber sarım teknolojisi kapsam dışı kalmaktadır.

FOD alt sistem bileşenlerinden bir diğeri; entegre optik aygıtlardır. Fiber optik tabanlı dönü ölçerlerde; entegre optik aygıt olarak elektro optik modülatörler kullanılmaktadır. Elektro optik modülatörler; elektro optik etki prensibine göre çalışan sinyal kontrollü aygıtlardır. Uygulanan elektriksel etki ile ışığın fazı, frekansı, genliği veya kutuplanması değiştirilebilmektedir. FOD sistemlerinde kullanılan en temel elektro optik modülatörler faz modülatörleridir. İsminden de anlaşılacağı gibi; bu tip yapılarda elektriksel bir etki ile ışığın fazı değiştirilmektedir. Elektriksel etki olarak genellikle gerilim etkisi kullanılmaktadır. Literatür taraması yapıldığında; faz modülatörü üretiminde genellikle Lityum Niyobat (LiNbO_3) kristal malzemesinin kullanıldığı görülmektedir. LiNbO_3 malzemesi elektro optik etki prensibine göre çalışmaktadır. Bu etki, elektrik alan altında kırılma indisinde değişimin meydana gelmesini açıklamaktadır [14]. Elektro optik etki optoelektronik teknolojisinde önemli bir yere sahiptir. Bu etkiyi gözlemleyebilmek için anizotropik veya izotropik kristaller kullanılmaktadır. FOD uygulamaları için LiNbO_3 sıkça tercih edilmektedir. LiNbO_3 anizotropik bir kristaldir. Diğer bir ifadeyle; optik ve elektriksel özellikleri yöne bağlıdır, kristalin farklı yönelim ve doğrultularında karakteristik özellikleri değişmektedir. Bunu yanı sıra; telekomünikasyonda önem arz eden 1550 nm dalga boyunda % 80'e yakın geçirgenlik değerine sahiptir [15].

Faz modülatörünün en temel elemanı dalgakılavuzudur. Dalgakılavuzu; litografik teknikler aracılığı ile LiNbO_3 kristali içinde katkılandırma yapılarak LiNbO_3 kristalinin kırılma indisinin artırılmasıyla oluşmaktadır. Işığın dalgakılavuzu içinde ilerleyebilmesi için; kristalin ön ve arka yüzleri parlatılmakta ve mikrometre hassasiyetinde hassas hizalama

tekniki ile kristalin giriş ve çıkış uçlarına fiber bağlantısı yapılmaktadır. Fiber eşleme işlemi sırasında dalgakılavuzunun giriş ve çıkış kolları PM fiber taşıyıcılar ile hizalanmaktadır [2,16,17,18,19]. Dalgakılavuzu kolları ve fiber taşıyıcıların hizalanmasından sonra [16,18,20], giriş ve çıkış fiber taşıyıcıları dalgakılavuzunun giriş ve çıkış kollarına ultraviyole (UV) ışık altında sertleşen epoksi kullanılarak yapıştırılmaktadır [2,18].

Faz modölatörleri tek giriş ve tek çıkışa sahip entegre optik aygıtlardır. Sagnac interferometresi konfigürasyonuna göre, FOD sensörlerinde tek girişli ve iki çıkışlı Y-geometrisine sahip entegre optik aygıtlar kullanılmaktadır. Laboratuvarlarımızda üretilen entegre optik aygıtlar bu tasarıma uygun olarak üretilmiştir. Y-eklem yapısı; temiz oda koşullarında ultraviyole (UV) fotolitografi tekniği ile LiNbO_3 altaş üzerinde oluşturulmaktadır. Bu teknikte; UV ışık altında istenilen maske yapısı altaş üzerine çıkartılmaktadır. Fotolitografi işlemi sonunda; 3 dB ayırma oranına sahip dalgakılavuzları LiNbO_3 altaş üzerine oluşturulmaktadır. Elektrotlar aracılığı ile uygulanan gerilim aygıtı sürmekte, böylece kırılma indisinde değişim meydana getirerek iki kol arasında faz farkı oluşturmaktadır.

Literatür çalışmaları da incelendiğinde; Y eklem yapısındaki entegre optik aygıtların çok fonksiyonlu entegre optik aygıt (Multi Functional Integrated Optical Chip-MIOC) olarak adlandırıldığı görülmektedir. MIOC; FOD içerisinde kaydadeğer bir bileşen görevindedir [2,10,16,21] ve sensör performansı için gereken üç ayrı temel özelliğe sahiptir [11,21,17,22] (faz modülasyonu, kutuplanma ve gelen sinyali 3 dB olacak şekilde ayırma). MIOC'un Y-geometrisine sahip dalgakılavuzu yapısı gelen ışığı iki kola ayırmaktadır [23,5,16,19] ve ikiye ayrılan ışık ışınları fiber sarımın etrafında ilerlemektedir. Aygıt elektrotlarına dış bir sürücü gerilim uygulanarak LiNbO_3 malzemesinin kırılma indisi değişmektedir [24]. İki ışık dalgası arasında meydana gelen faz kaymasının asıl sebebi ise kırılma indisi parametresindeki değişimdir. MIOC'un FOD sistemleri içerisine entegre edilmesi yapıyı basitleştirmekte, hassasiyeti iyileştirmekte ve FOD'un kararlılığını artırmaktadır [6].

Literatür araştırmalarında belirtildiği gibi; MIOC için en uygun altaş malzemesi elektro-optik özelliklerinden dolayı [17,18,19] ve kararlı kimyasal özelliklerinden [17] dolayı LiNbO_3 'tür. Fabrikasyon prosesinde genellikle iki yöntemden birisi kullanılmaktadır: titanyum (Ti) metal difüzyonu veya tavllanmış proton değiş tokuşu (Annealed Proton Exchange-APE) [19,25]. Metal difüzyonunda katkı malzemesi olarak genellikle Ti

malzemesi kullanılmaktadır. Katkılandırılmış bölgenin çevresi; tıpkı bir fiber optik kablonun kılıfı gibi davranmaktadır. Litografik maskeleme yöntemi ile ince film halinde Ti şeritleri kristal üzerine oluşturulabilmektedir. Daha sonra kristal 1000 °C'lere varan yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak, alttaş üzerine kaplanan Ti metali kristal içine difüz etmektedir. Böylece, kırılma indisi artırılarak dalgakılavuzu yapısı meydana gelmektedir. Bu tez kapsamında fabrikasyon aşamasında Ti difüzyonu yöntemi kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı; MIOC adı verilen entegre optik aygıtların üretim sonrasındaki bazı karakteristik özelliklerini saptamak, ürün seviyesinde aygıtların kararlı yapıda çalıştığını doğrulamak ve bu doğrultuda güvenilir olup olmadığını saptamaktır. Tezin ana hacmini entegre optik aygıtlar oluşturduğu için, FOD'un diğer bileşenleri kapsam dışında kalmaktadır ve görece çok az değinilecektir. Tez başlığından anlaşılabileceği gibi hazırlanan bu tez çalışmasının ana konusu kararlılık ve güvenilirlik terimleri üzerindedir. Kararlılık ve güvenilirlik kavramları her ne kadar eş anlamlı kelimeler gibi algılsa da; mühendislik uygulamalarında iki kavram arasında farklılık vardır. Güvenilirlik; tekrar edilen ölçümler yürütülürken, testin doğruluğu ve düzgünlüğü hakkında bilgi edinilmesini sağlayan göstergedir. Diğer bir ifadeyle; aynı test defalarca uygulanırken ölçüm çıktıları arasındaki tutarlılık olarak adlandırılabilir. Test güvenilirliği zaman içinde meydana gelen değişiklikleri analiz etmenin en açık biçimi olarak tanımlanabilir. Bunun yanı sıra; bilim insanları ve mühendisler, yüksek ölçüde güvenilir bir testin zaman içinde kararlı bir yapı sergilediğini öngörmektedirler. Bu iki tanım baz alınırse eğer güvenilirlik, bir testin birden fazla kez uygulandığı durumda tekrar edilebilirliği; oysaki kararlılık, gerçekleştirilen bir testin çıktısının doğru ya da yanlış olmasından bağımsız olarak, kısa dönemli tutarlılık sergilemesidir. Kararlılık ve güvenilirlik ifadeleri birbirini tamamlayan ifadelerdir. Kararlılık olmadan güvenilir bir sistemden bahsedilemez. Buna karşılık; bir sistem güvenilir olmasa dahi kararlı bir yapıdan bahsedilebilmektedir.

Bu konuda yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde, entegre optik aygıtların karakteristik özellikleri üzerinde gerçekleştirilen çalışmaların mevcut olduğu saptanmıştır. Bir literatür çalışmasında; MIOC aygıtlarının geçirgenlik spektrumunun ortalama dalga boyu kayması sıcaklık değişimlerine göre analiz edilmiştir [2]. Bu çalışmaya göre; sıcaklık değişimleri sebebiyle optik aygıt ve fiber arasındaki bağlantıda bozulmalar meydana gelmektedir. Bu sebeple; fiber ile aygıt arasındaki hizalamadan kaynaklı durumları analiz etmek için, sonlu elemanlar analizi (SEA) yöntemi aracılığı ile termo mekanik simülasyonlar ve hesaplamalar

yapılmıştır [2]. Başka bir çalışmada; MIOC eş kapasitansının sıcaklık bağımlılığı ve modülasyon faz kaymasındaki kararsızlıkları üzerindeki etkileri irdelenmiştir [5]. FOD performansının yanısıra; fiber optik aygıtların sıcaklık döngüleri mekanik açıdan güvenilirlik için dikkate alınması gereken diğer bir husustur. Yayınlanmış bir çalışmada; fiber optik akım sensörlerinde kullanılan faz modülatörleri üretiminde kullanılan malzemelerin, farklı ısısal genleşme katsayılarından dolayı indüklenen termo mekanik gerilim üzerinde durulmuştur [26]. Buna bağlı olarak da; ısısal gerilim ile ilişkilendirilmiş olan mekanik deformasyonun saptanmasında sıcaklık döngü performanslarının kritik düzeyde öneme sahip olduğu vurgulanmıştır. Bu yayın çalışmasında ayrıca; modülatör aygıtlarının fiber bağlantısı aşaması sırasında kullanılan yapıştırıcıların uzun döngülü kararlılık ve güvenilirliklerini analiz etmek amacıyla çevresel testler yürütülmüştür [26].

Literatür çalışmaları incelenmeye devam edildiğinde; LiNbO_3 tabanlı entegre optik aygıtların potansiyel bozulma analizlerinin de ayrı bir çalışma olarak ele alındığı görülmektedir [27]. Bu çalışmada [27]; genel olarak 4 farklı bozulma mekanizmasının varlığından bahsedilmiştir. Bunlar; paketleme kaynaklı, fiber kaynaklı, mekanik kaynaklı ve dalgakılavuzu-elektrot kaynaklı olarak 4 kategoriye ayrılmaktadır. Paketin sızdırmazlık özelliğinden kaynaklanan hatalar paketleme hatasına örnek olarak gösterilebilir. Fiber bozulmaları; LiNbO_3 aygıt-fiber arayüzündeki epoksi katmanında meydana gelen bozulmalar ve statik yorulmadan kaynaklı fiber bozulmalarını kapsamaktadır. Bunların arasında aygıt-fiber arasındaki epoksi üzerinde indüklenen bozulma en kritik olan bozulma tipi olarak bilinmektedir. Mekanik kaynaklı bozulmalar; dalgakılavuzunda kısa devreye yol açacak şekilde LiNbO_3 yüzeyinde mikro çatlakların ilerlemesini kapsamaktadır. Dalgakılavuzu/elektrot kaynaklı bozulmalar ise; optik dalgakılavuzunun özelliklerinin değişmesi ile sonuçlanan difüzyon kaynaklı bozulmaları, elektrotları oluşturan metallerin LiNbO_3 içine difüzyonunu ve yüzey safsızlıkları ile sonuçlanan elektrot bozulmalarını içermektedir.

Üretilen entegre optik aygıtlar fiber optik dönü ölçer gibi savunma sanayi uygulamalarında kullanılacağı için, aygıtların özellikle askeri standartlarda üretilebiliyor olması ve üretim sonrası paketleme aşaması son derece önemlidir. Bu aygıtların belirli isterleri sağlayacak şekilde üretimi, üretim sonrası testleri ve yapılan testler sonrasındaki kararlılık, dayanıklılık ve güvenilirlik analizi aygıtların entegre edildiği ana sistemin performansı ve kararlılığı ile

doğrudan ilişkilidir. Diğer bir ifadeyle; aygıtlar isterleri sağlayacak yapıda tasarlandığında ve üretildiğinde entegre edildikleri sistemin performansına da olumlu ölçüde etki etmektedir.

Literatür çalışmaları irdelendiğinde; entegre optik aygıtın ürün seviyesinde testlerini konu alan bir tez ya da yayın çalışmasına rastlanmamıştır. Literatürdeki bu açıktan faydalanarak; savunma sanayi endüstrisinde önem arz eden mühimmatlara ve askeri araçlara entegre edilen FOD sensörlerinin alt sistem bileşenlerinden birisi olan entegre optik aygıtların, seri üretim sürecine uygun olarak tasarlanan ve uygulanan testlerini, bununla birlikte ilgili teorik çalışmaları konu alan bir tez yazılması uygun görülmüştür.

Bütün bu gerekçeler doğrultusunda; yürütülen bu tez çalışması temel olarak 6 teknik ana bölümden oluşmaktadır. 2. Bölüm’de; hassas hizalama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen fiber entegrasyon çalışmalarına yer verilmiştir. Ayrıca; geometrik konfigürasyon değişiminin entegre optik aygıtların kararlılıklarına etkisi irdelenmiştir. Durum A, B, C ve D olarak adlandırılan dört farklı aygıt geometrisi yapısı için karşılaştırmalı istatistiksel analizler aktarılmıştır. Bunun yanı sıra; UV pozlama parametreleri kriter alınarak yapılan fiber entegrasyon çalışmaları Ar-Ge kapsamında değerlendirilmiştir. Pozlama süresinin geometrik konfigürasyon değişimi referans alınarak, geçen/kalan aygıt istatistiğine etkisi üzerinde durulmuştur. 3. Bölüm’de; entegre optik aygıtların modelleme ve simülasyon çalışmalarına yer verilmiştir. Aygıt yapısının üç boyutlu modellemesi gösterilmiş, beş farklı yapısal durum (A, B, C, D ve E) için aygıt ile fiber taşıyıcı arayüzündeki epoksi üzerinde indüklenen gerilim seviyesinin değişimi sıcaklığa bağlı olarak analiz edilmiştir. Bu bölümde ayrıca örgü parametrelerinin gerilim seviyesine nasıl etki ettiğine dair teorik bilgilere de yer verilmiştir. Çalışmalar sıcaklık değişimleri altında değerlendirildiği için; farklı sıcaklık değerlerinde, tanımlanmış farklı epoksi bölgeleri üzerinde indüklenen termo mekanik gerilim analizi de yapılmıştır. Bunun haricinde; dalgakılavuzu bölgesinde termomekanik etkilere bağlı optik geçirgenlik analizleri ele alınmıştır. Yapısal durum değişiminin dalgakılavuzu üzerinde indüklenen gerilim seviyesine nasıl etki ettiği ise bir başka araştırma konusunu oluşturmuştur. Deneysel çalışmalar kapsamında oda sıcaklığında durum A, B, C ve D için optik geçirgenlik analizleri istatistiksel veriler ışığında değerlendirilmiştir. 4. Bölüm’de; entegre optik aygıtların paketleme yöntemi ve ısısal kararlılıklarının irdelenmesi üzerinde durulmuştur. Paketleme süreci aşamaları ilgili görsellerle aktarılmıştır. Tip 1 ve tip 2 adı verilen iki farklı yöntemle paketlenen entegre optik aygıtların ısısal döngü test sonuçları grafiksel olarak karşılaştırılmıştır ve aygıtların ısısal kararlılıkları mercek altına

alınmıştır. 5. Bölüm’de; açık döngü FOD sistem yapısı teorik ve deneysel olarak açıklanmıştır. Buna ek olarak; koruyucu kaplama çeşitleri, temel özellikleri ve uygulama yöntemleri detaylı olarak anlatılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında; açık döngü sistemde optik bütünleme çalışmalarına yer verilmiştir. Bütünlenen aygıtlara farklı tipte koruyucu kaplama epoksileri uygulanarak, Ar-Ge çalışmaları kapsamında açık döngü sistemde reset sinyali analizleri gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 100 adet entegre optik aygıtın oda sıcaklığında ölçülmüş yarı-dalga gerilimleri grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak; -40 °C ; +60 °C arasında 0,2 °C/dk sıcaklık değişim hızı ile uygulanan sıcaklık değişimleri altında tek bir aygıt için yarı-dalga geriliminin değişimi irdelenmiştir. 6. Bölüm’de; kapalı döngü FOD sistem yapısı literatür çalışmaları kapsamında anlatılmıştır ve şematik olarak sistem yapısı aktarılmıştır. Sıcaklık değişimleri altında dünya dönüşünün değişimi takip edilmiştir. Dönü verisindeki eğim sorununun, ısısal yaşlandırma çalışmaları ile giderildiği gözlemlenmiştir. Böylece; sistem içerisinde iken, aygıt performansındaki kararlılık ve güvenilirlik seviyesi artırılmıştır. 7. Bölüm’de; interferometre yöntemi kullanılarak entegre optik aygıtların kristal içi kutuplanma karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Fiber ek noktalarındaki girişim durumlarını analiz etme ve aygıtın kutuplanma değerini fiber ek noktalarındaki parazitlenme etkilerinden ayırt ederek bağımsız olarak değerlendirebilme, bu bölümün başlıca konuları arasında yer almaktadır.

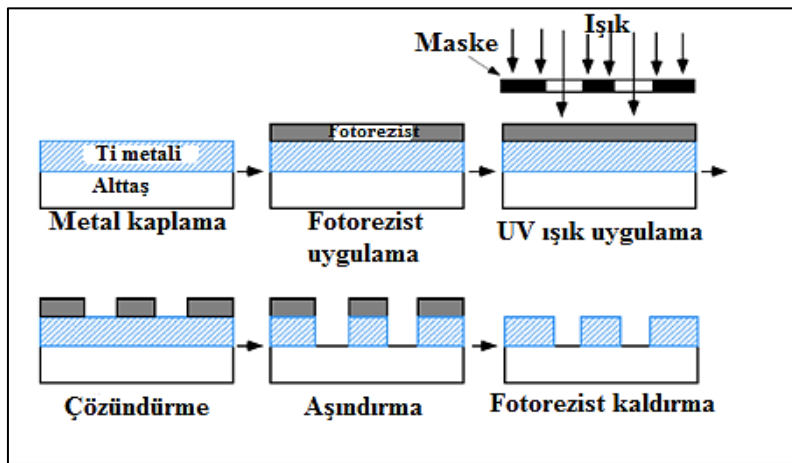
2. ENTEGRE OPTİK AYGITLARIN HASSAS HİZALAMA YÖNTEMİ İLE FİBER ENTEGRASYONU

Bu bölümde; litografi yöntemi ile üretilen Y-geometrisine sahip aygıtların fiber entegrasyon çalışmaları ve fiber çiftlenimli entegre optik aygıt haline geçiş süreci çalışmaları anlatılmıştır. Ayrıca, entegrasyon süreci sırasındaki optik karakterizasyon çalışmaları da detaylandırılmıştır.

Entegre optik aygıtların hassas hizalama yöntemi ile entegrasyonu öncesinde, fotolitografi tekniği yöntemi ile temiz oda koşullarında üretim çalışmaları yapılmıştır. Fotolitografi ve buna bağlı olarak gerçekleştirilen temiz oda proses çalışmaları tezin kapsamı dışında kaldığı için; süreç hakkında genel bilgi vermek amacıyla bu bölümde sadece alt başlık altında özetlenmiştir.

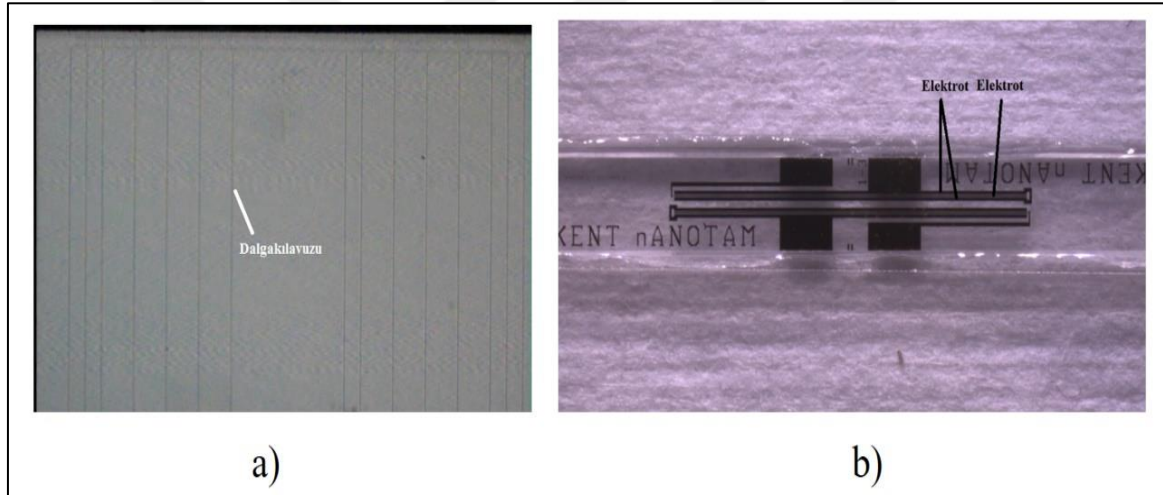
2.1. Optik Fotolitografi Tekniği ve Aşamaları

Optik fotolitografi; maske üzerindeki şeklin ışıığa duyarlı bir kimyasal malzeme olan fotorezistle kaplı bir alttaş üzerine aktarıldığı ve buna bağlı olarak bir dizi aşamanın gerçekleştirildiği bir işlemdir. UV fotolitografi olarak da adlandırılmaktadır. Bu tez çalışmasında; UV litografi tekniği ile LiNbO_3 alttaş üzerinde optik dalgakılavuzları oluşturulmuştur. Dalgakılavuzu; ışığın içinde ilerlediği optik ortamdır. UV fotolitografi tekniğinin aşamaları Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



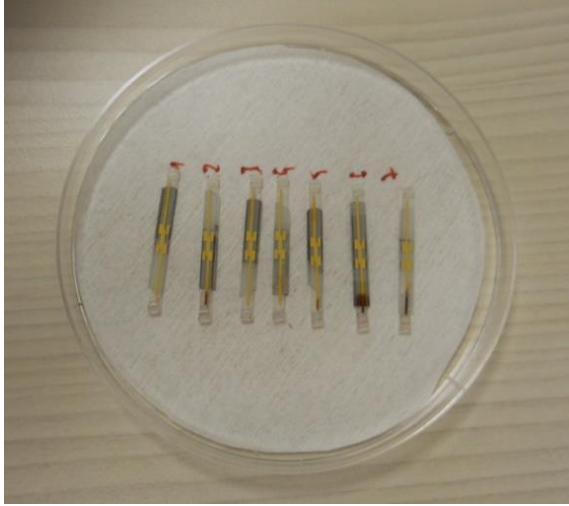
Şekil 2.1. Optik fotolitografi basamakları [28]

Entegre optik aygıtlar; aynı zamanda elektro optik aygıtlardır. Diğer bir ifadeyle; daha önce anlatıldığı gibi uygulanan bir elektrik alan ile kristalin kırılma indisinde değişim meydana gelmektedir. Aygıtı dış bir kaynak ile sürebilmek ve gerilim uygulayabilmek için, aygıt yüzeyi üzerinde elektrotların varlığına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda; optik ve elektriksel olarak aygıtı çalışır düzeyde tutabilmek için, temiz oda koşullarında hem dalgakılavuzu litografisi hem de elektrot litografisi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Optik litografi aşamasında; yaklaşık 7 μm genişliğinde Ti difüzyonlu dalgakılavuzları alttaş üzerinde oluşturulurken, elektrot litografisi aşamasında ise Altın (Au) elektrotlar yapı üzerine maske hizalama yöntemi ile oluşturulmuştur. Litografisi tamamlanan örneklerin dalgakılavuzu ve elektrotlarının mikroskop altındaki büyütülmüş görüntüleri Resim 2.1’de gösterilmiştir.



Resim 2.1. Dalgakılavuzu ve elektrot mikroskop görüntüleri a) Dalgakılavuzu görüntüsü b) Elektrot görüntüsü [28]

Litografi aşamalarından sonra tıraşlama ve parlatma yapılmıştır. Bu işlemler; üretilen aygıtların ışık geçen ön yüzeylerinin pürüzsüz ve düzgün olmasını sağlamak amacıyla yapılmıştır. Bu sayede; optik kayıp azaltılarak aygıtın çalışma performansı artırılmış olmaktadır. Tıraşlama ve parlatma sonrasında ise, alttaş üzerine maskeleme ile oluşturulan her bir örnek kesim cihazında kesilerek ayrılmıştır. Kesilen aygıtlar Resim 2.2’de gösterilmiştir. Resim 2.2’de gösterilen her bir parça optik aygıt olarak adlandırılmaktadır.

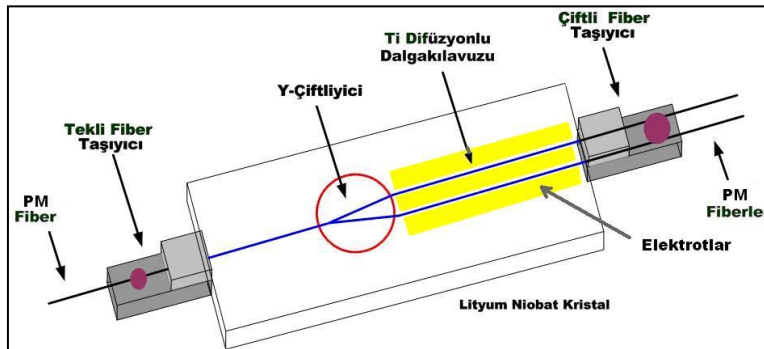


Resim 2.2. Kesimleri tamamlanan optik aygıt örnekleri

2.2. Optik Aygıtların Hassas Hizalama Yöntemi ile Fiber Entegrasyonu

Optik aygıtların litografi fabrikasyonu ile üretiminden sonra optomekanik konumlandırma mekanizması ile fiber entegrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Entegrasyon; optik aygıt ile fiberin içinde bulunduğu bir taşıyıcının UV geçirgen bir epoksi ile birbirine yapıştırılması işlemidir. Deneysel çalışmalar kapsamında; aygıt ve fiber ilk olarak kaba hizalama ile, daha sonra mikron hassasiyetine sahip 6 eksenli hizalama ekipmanlarıyla optimum ışık gücü elde edilene kadar hizalanmıştır. Literatür çalışmalarında; hassas hizalama yöntemi ile elde edilmiş aygıt çalışmasına yer verilmiştir [18].

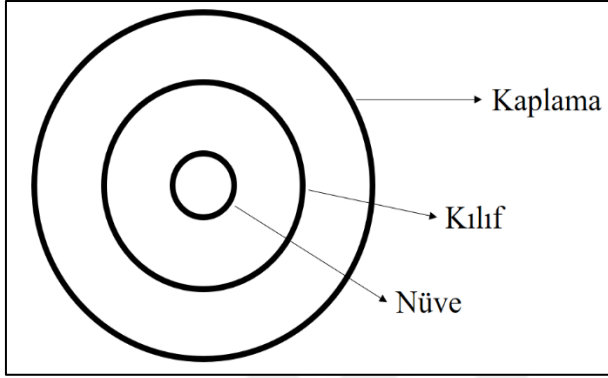
Optik aygıtların her birinde tek koldan giren ışık ışını çıkışta iki kola ayrılmaktadır [18]. Y-çiftleyici adını bu özelliğinden dolayı almıştır. Şekil 2.2’de, Y-çiftleyici yapısına sahip optik aygıtın fiber taşıyıcı ile yapılandırıldıktan sonraki görüntüsü şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Y-çiftleyici geometrisine sahip optik aygıt

Şekil 2.2’de; aygıtın giriş/çıkış kollarında tekli/çiftli fiber taşıyıcıların olduğu görülmektedir ve aygıtın entegrasyon sonrasındaki durumu tasvir edilmiştir.

Entegrasyon çalışmasında; 80 μm kılıf çapına sahip PM fiber kullanılmıştır. Fiber; içinde ışık ışınlarının kılavuzlandığı ve genellikle camdan yapılmış aktif iletim ortamlarıdır. Şekil 2.3’te gösterildiği gibi; nüve, kılıf ve kaplama olmak üzere 3 ana katmandan oluşmaktadır.



Şekil 2.3. Optik fiber katmanlarının ön kesit görüntüsü

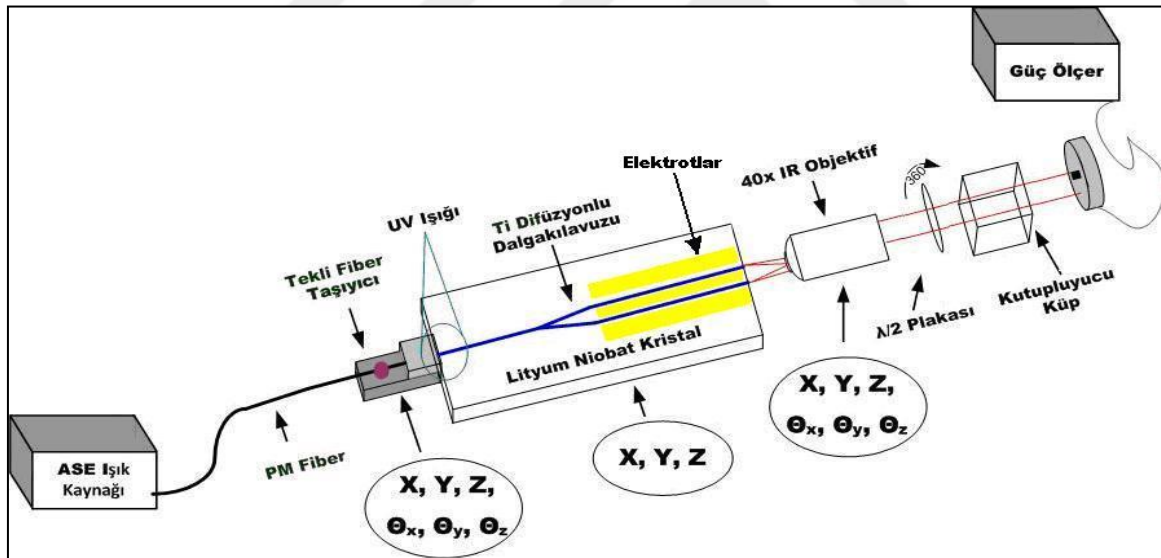
Nüve; ışığın ilerlediği katmandır. Genellikle çapı 6 μm – 10 μm arasında değişmektedir. Kılıf ise nüveyi dıştan sarar ve çapı fiber tipine göre değişmektedir. Telekomünikasyon alanında kullanılan fiber genellikle 125 μm çapında standart tek modlu (Single Mode-SM) ve kutuplanmanın rasgele olduğu fiber olmasına rağmen; FOD sistemlerinde genellikle 80 μm çapında PM fiber tercih edilmektedir. Kaplama katmanı; en dış tabakadır ve fiberi dış etkenlere karşı koruyan, zarar görmesini engelleyen bir yapıya sahiptir. 80 μm kılıf çapına sahip fiberler için kaplama çapı 165 μm ; 125 μm kılıf çapına sahip fiberler için ise kaplama çapı 250 μm ’dir.

Fiber; tam yansıma kuralına göre çalışmaktadır. Diğer bir ifadeyle; nüveyi oluşturan malzemenin kırılma indisi kılıf malzemesinin kırılma indisinden daha büyük değere sahiptir. Kılıf indisi; nüve indisine göre yaklaşık %1 oranında daha düşük bir değerdedir. Bu sebeple; nüve içinde ilerleyen ışık ışınları tam yansıma kuralına göre kılıf içine sızamayacak, bu durumda fiberin nüvesinde ilerleyen optik sinyal, fiber çıkışına minimum kayıpla ulaşacaktır. Katman malzemeleri değişiklik gösterebilir. Bu tez çalışmasında kullanılan fiberin nüve ve kılıf katmanı camdan yapılmış iken, kaplama malzemesi plastikten üretilmiştir. Fiberin diğer iletim ortamlarına göre (elektiriksel iletim vb.) en büyük avantajı iletim kaybının çok düşük olmasıdır. Bu özellik; fiber optik haberleşmede sıkça

kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Entegrasyon çalışmalarında; 80 μm kılıf çapına sahip PM fiberler kullanılmıştır ve tez çalışmasında adı geçen yerlerde kısaca “80 PM” olarak bahsedilecektir.

Fiber taşıyıcı olarak tanımlanan malzeme; iki cam parça arasına 80 PM fiberin yerleştirilmesiyle elde edilmektedir. Bazı durumlarda; cam yerine LiNbO_3 malzemesi tercih edilmektedir. Bu bölümde anlatılacağı gibi, optik aygıtların giriş ve çıkış uçlarına fiber taşıyıcı parça yapıştırılmaktadır. Taşıyıcı fiberi ile ışık kaynağı fiberi ek yapılarak taşıyıcı fiberi içinden ışık geçirilebilmekte, böylece entegre optik aygıtın içine ışık ışınları yönlendirilebilmektedir.

Entegrasyon çalışmaları kapsamında; ilk olarak giriş entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Deney çalışmalarında kullanılan giriş entegrasyon düzeneği Şekil 2.4’te şematik olarak betimlenmiştir.

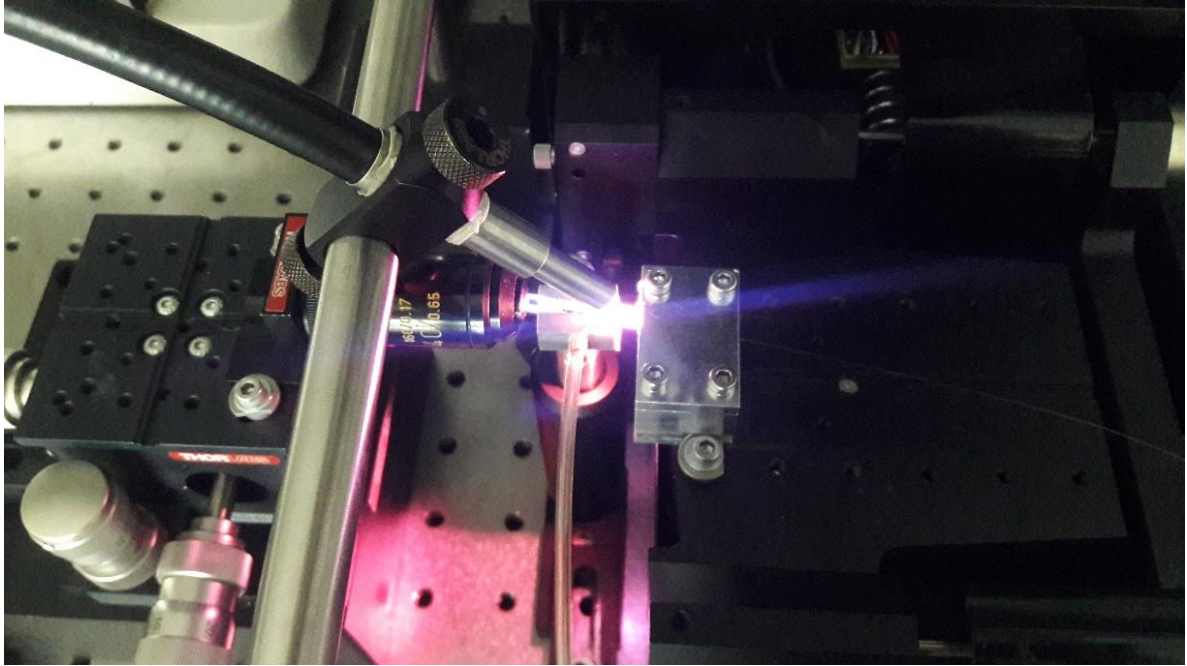


Şekil 2.4. Giriş entegrasyon test düzeneği şeması

Yapılması istenen entegrasyon işleminin amacı; Y-çiftleyici geometrisine sahip optik aygıtların giriş kısmını tek PM fiber taşıyan tekli fiber taşıyıcı ve çıkış kısmını iki tane PM fiber taşıyan çiftli fiber taşıyıcı unsuruyla UV ışık altında sertleşebilen bir epoksi kullanarak kalıcı bir şekilde bütünlemektir.

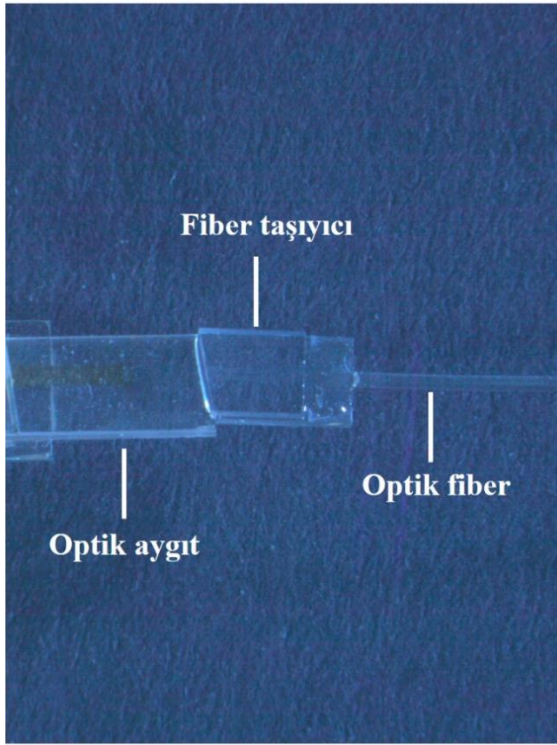
Entegrasyon için hazır olan aygıt düzgün bir şekilde Şekil 2.4’te gösterilmiş olan düzeneğe yerleştirilmiştir. İlk adım; aygıt girişinin tekli fiber taşıyıcı ile bütünlenmesiyle

gerçekleştirilmiştir. Bu işlem; fiber taşıyıcının LiNbO_3 kristali ile temas edecek olan yüzeyine UV ışık altında sertleşen epoksinin uygulanması ile başlamıştır. Daha sonra; taşıyıcı ve LiNbO_3 tabanlı optik aygıtın birbirine hizalanması ve pozisyonlarının maksimum optik güç ve PER (Polarization Extinction Ratio - polarizasyon sönümlenme oranı) değeri sağlayacak şekilde ayarlanması, 3 eksenle elle kontrol edilebilen objektifle ve bilgisayarla kontrol edilebilen 6 eksenli optomekanik konumlandırma mekanizmalarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu hizalama esnasında; aygıtın her iki çıkış kolundaki optik güç ve PER değerleri; objektif yardımıyla serbest uzayda ve gerçek zamanda ölçülmüştür. Optik güç ve PER değerleri azami noktaya ulaşacak şekilde taşıyıcı ve kristal yüzeyleri birbirine hizalandıktan sonra, Resim 2.3'te gösterildiği gibi kırılma indisi eşleme özelliği olan ve taşıyıcı/kristal arayüzüne uygulanmış epoksi malzemesi UV ışık altında sertleştirilmiştir.



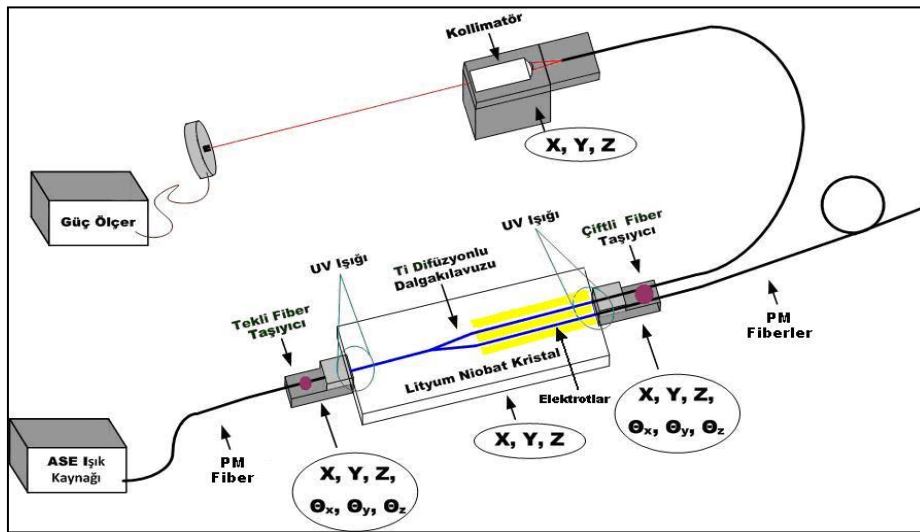
Resim 2.3. Entegre optik aygıtın giriş entegrasyon aşaması

Bu işlemten sonra; giriş ucu bütünlenmiş bir entegre optik aygıt elde edilmiş olur. Giriş ucu bütünlenmiş aygıtın mikroskop görüntüsü Resim 2.4'te gösterilmiştir.



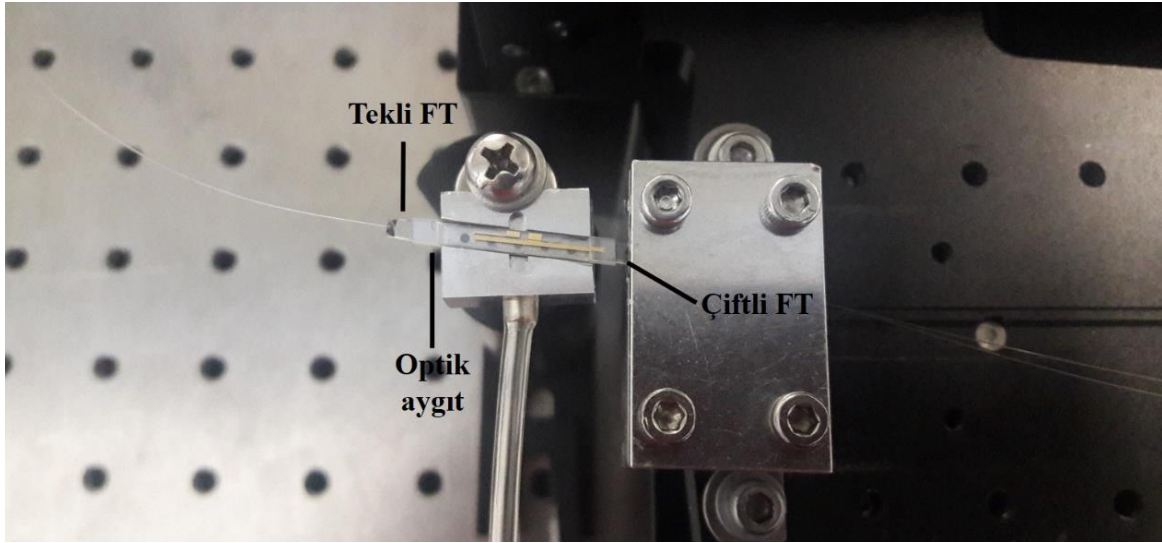
Resim 2.4. Giriş ucu bütünlenmiş entegre optik aygıtın mikroskop görüntüsü [28]

Giriş tarafının bütünlenmesinden sonra, ikinci aşama olarak çift çıkışa sahip olan aygıtın çiftli fiber taşıyıcı parçası ile çıkış bütünlemesi yapılmıştır. İlk kolun entegrasyon aşamasında olduğu gibi, çiftli taşıyıcının kristale temas eden yüzeyine UV ışıqla sertleşen epoksi uygulanmıştır. Çıkış entegrasyon düzeneği Şekil 2.5'te betimlenmiştir.



Şekil 2.5. Çıkış entegrasyon test düzeneği şeması

Aygıtın çıkış entegrasyonunda giriş entegrasyonundan farklı olarak; çiftli taşıyıcının fiberleri iki detektöre direkt olarak takılmış ve bu aşamada objektif kullanılmamıştır. Böylece optik güç kontrolü dedektör kullanılarak takip edilmiştir. Her iki fiber çıkışında optik güç değerleri azami noktaya ulaşacak şekilde hizalama yapılmıştır. Taşıyıcı ve optik aygıtın birbirine hizalanması ve pozisyonlarının maksimum optik güç değeri sağlayacak şekilde ayarlanması, bilgisayarla kontrol edilen konumlandırma mekanizması yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Resim 2.5'te bu hizalama işlemi gösterilmiştir.



Resim 2.5. Çiftli fiber taşıyıcı ile hizalanmış olan optik aygıt görüntüsü

UV geçirgen ve kırılma indisi eşleme özelliği olan epoksi, fiber taşıyıcı ve optik aygıt arasına uygulanarak sertleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir (Bkz. Resim 2.3). Bu aşamadan sonra MIOC entegre optik aygıtı tümüyle bütünlenmiş olmaktadır. Resim 2.6'da, entegrasyon çalışmaları sonunda elde edilen MIOC aygıtı gösterilmiştir.



Resim 2.6. Bütünlenen MIOC aygıtı

Entegrasyon çalışmalarından sonra; geçirgenlik ve ayırma oranı hesaplamaları yapılmıştır. Geçirgenlik; aygıtın her iki kolundan ölçülen optik güç değerlerinin giriş gücüne oranlanması ile elde edilmektedir. Ayırma oranı ise; her bir kolun ışığı yönlendirme oranı olarak tanımlanabilir. Geçirgenlik eşitliği Eş. 2.1’de, ayırma oranı eşitlikleri ise sırasıyla Eş. 2.2 ve Eş. 2.3’teki gibi ifade edilmektedir.

$$TG (\%) = \left(\frac{P_1 + P_2}{P_i} \right) * 2 * 100 \quad (2.1)$$

$$AO_1 (\%) = \left(\frac{P_1}{P_1 + P_2} \right) * 100 \quad (2.2)$$

$$AO_2 (\%) = \left(\frac{P_2}{P_1 + P_2} \right) * 100 \quad (2.3)$$

Burada; P_i ışık kaynağı giriş gücü, P_1 1.kol çıkış gücü, P_2 2.kol çıkış gücü, TG toplam geçirgenlik, AO_1 1.kol için ayırma oranı ve AO_2 2.kol için ayırma oranı olarak tanımlanmıştır. TG ifadesi 2 ile çarpılmıştır. Bunun nedeni; ışık kaynağı kutuplu olmadığı durumda, fiberin hızlı ve yavaş eksenine yönlendirilen ışık ışınlarının aygıt içinden geçmesi olarak açıklanabilir. Rastgele kutuplanma durumu söz konusu olduğundan dolayı, her iki kutuplanma durumundaki ışık ışınlarının varlığından söz edilmektedir. Entegrasyon çalışmalarında kutuplanmamış ışık kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen bütünleme çalışmalarında 650’den fazla aygıt üzerinde çalışılmıştır. Aygıtların seri üretim süreçlerinde belirlenen isterleri sağlamaları için, bazı kriterler referans alınarak çalışmalar yürütülmüştür. Bahsedilen kriterler; aygıtların ürün haline dönüşürken dikkate alınan kararlılık ve güvenilirlik koşulları ile doğru orantılıdır. Bu değerlendirmeler kapsamında kararlılık ve güvenilirliği etkileyen temel faktörler; aygıtın geometrik konfigürasyonu, aygıt uzunluğu, ön katılaşmanın varlığı ve farklı aygıt konfigürasyonlarına göre UV pozlama süresinin değişimi olarak tanımlanmıştır. Alt bölümlerde; seri üretim sürecine dahil olan entegre optik aygıtlar için bu faktörlerin etkileri detaylı olarak irdelenmiştir.

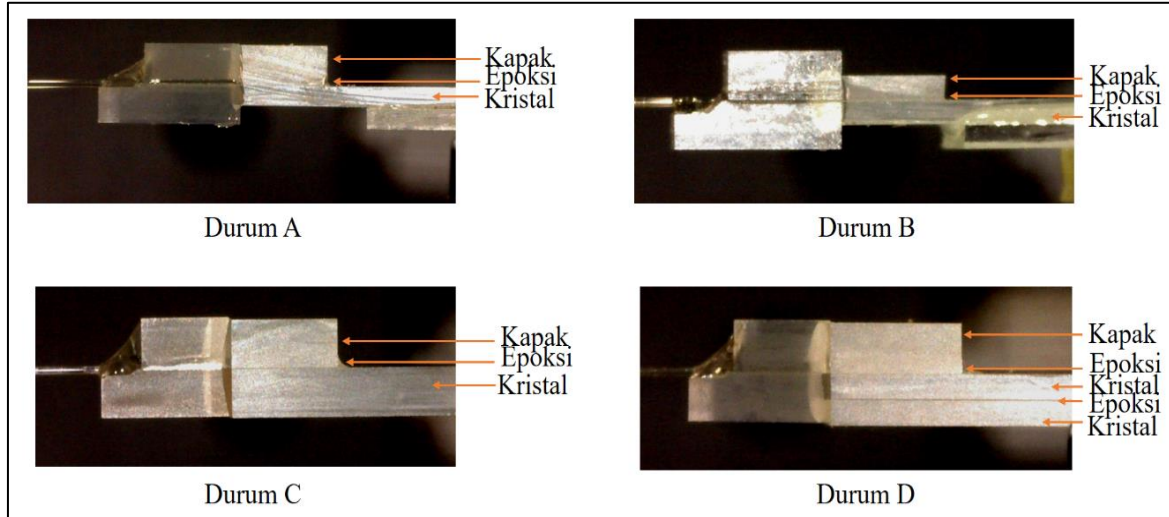
2.2.1. Geometrik konfigürasyon değişiminin entegre optik aygıtın kararlılık ve güvenilirlik analizlerine etkisi

Fiber bütünleme çalışmasında anlatıldığı gibi; entegre optik aygıt, fiber taşıyıcı ve optik aygıtın bir UV geçirgen yapıştırıcı ile hassas hizalama yöntemi kullanılarak birbirine yapıştırılması ile elde edilmektedir. Fiber taşıyıcılar; ticari olarak tedarik edilmekte olup boyutları standarttır. Temel olarak; optik aygıtın fabrikasyonu için laboratuvar çalışmalarında kullanılan LiNbO_3 alttaş 0,5 mm kalınlığında olup, kullanılan fiber taşıyıcı ise 2 mm kalınlığındadır. Aygıt ile taşıyıcı arasındaki yükseklik farkını azaltmak amacıyla; kapak adı verilen simetrik parçalar aygıt yapısına eklenmiştir. Kapak parçaları LiNbO_3 malzemesinden yapılmış olmakla beraber; tüm kristal yapısı bileşenlerin birbirine UV geçirgen epoksi ile istifleterek yapıştırılması ile oluşturulmuştur. Yürütülen çalışmada; bütünlenen aygıtlar kristal kalınlığı ve kapak kalınlığına göre 4 farklı yapısal geometride sınıflandırılmıştır ve bu yapısal geometriler “durum” olarak adlandırılmıştır. Bu durumlar; Çizelge 2.1’de açıklanmıştır.

Çizelge 2.1. Bütünlenen aygıtların yapısal geometrilerine göre sınıflandırılması

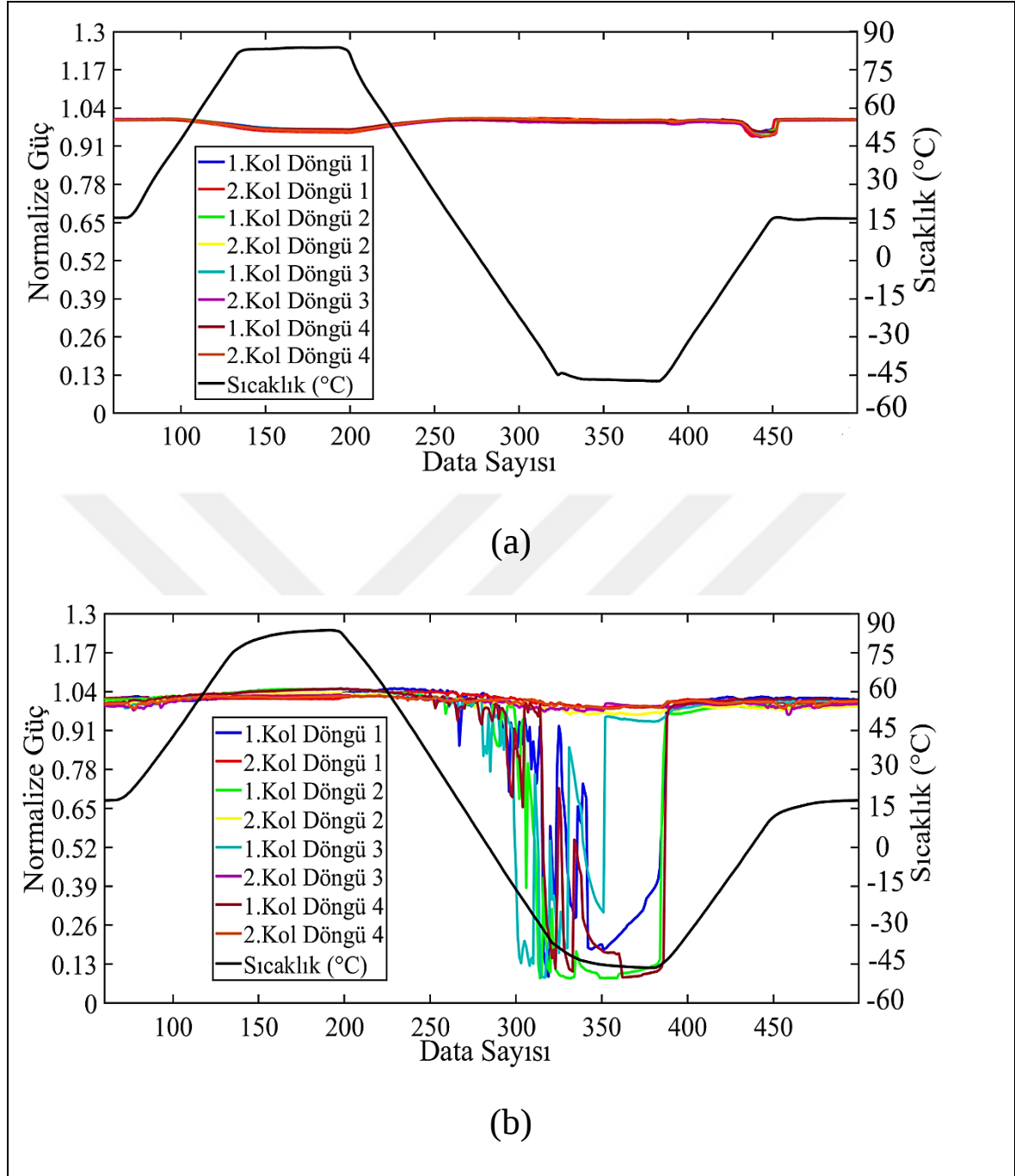
Durum	Yapısal Geometri
A	0,5 mm kristal + 1 mm kapak
B	0,5 mm kristal + 0,5 mm kapak
C	1 mm kristal + 1 mm kapak
D	0,5 mm kristal + 0,5 mm kristal + 1 mm kapak

Çizelge 2.1’de belirtildiği gibi; 4 farklı yapısal durum A, B, C ve D olarak adlandırılmıştır. Örnek verilecek olursa; durum A için kristal kalınlığı 0.5 mm ve kapak kalınlığı 1 mm’dir. Resim 2.7’de; durum A, B, C ve D için yapısal konfigürasyonların yanal mikroskop görüntüleri gösterilmiştir.



Resim 2.7. Durum A, B, C ve D için yanal mikroskop görüntüleri

Geometrik durum değişiminin aygıt performansına etkisini irdelemek amacıyla; üretilen her bir aygıt sıcaklık testine tabi tutulmuştur. Sıcaklık test profili; 2 °C/dk sıcaklık eğimi ile -40 °C ile +90 °C arasında 4 döngü olacak şekilde tasarlanmıştır. Sıcaklık testlerinde başarılı olan aygıtlar “Geçti”; başarısız olan aygıtlar ise “Kaldı” olarak etiketlenmiştir. Geçti/Kaldı analizinde; aygıtın her iki kolundan gelen sinyalin tüm test süresi boyunca toplamı, her iki koldan gelen sinyalin toplamının ilk datasına normalize edilmiş ve tüm test aralığında performans kalitesini belirlemek için %20 eşik değeri belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle; %20’nin altında toplam kayıp sergileyen aygıtlar “Geçti”, %20’nin üstünde toplam kayıp sergileyen aygıtlar ise “Kaldı” olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 2.6’da, geçen ve kalan aygıtların örnek grafikleri temsili olarak gösterilmiştir.

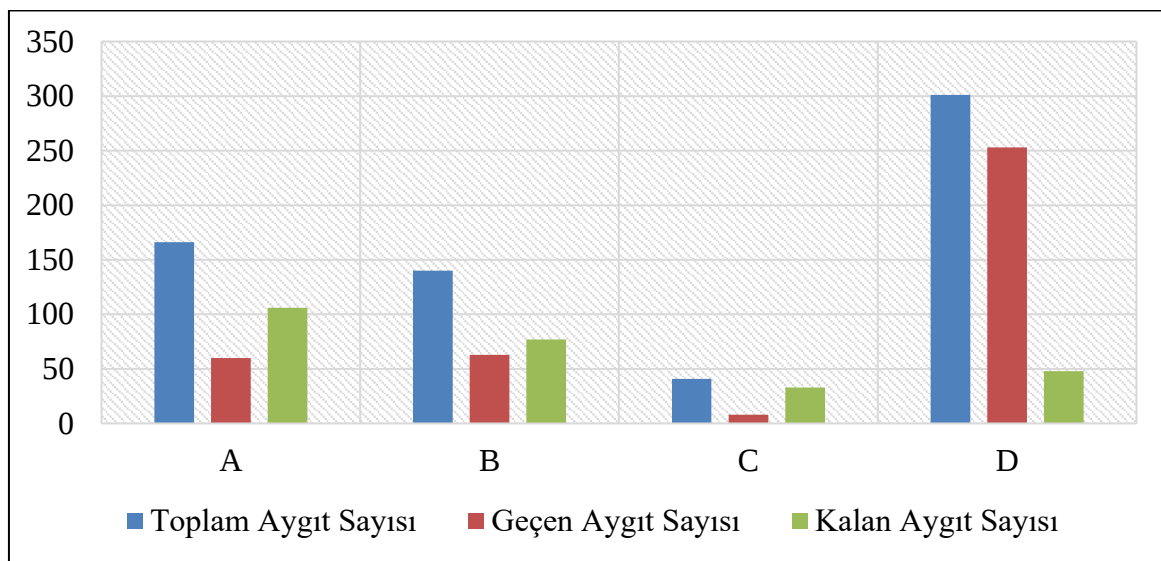


Şekil 2.6. Geçen ve kalan aygıt için sıcaklık test grafikleri a) Geçen aygıt sıcaklık test profili. b) Kalan aygıt sıcaklık test profili

Şekil 2.6 incelendiğinde; -40°C ; $+90^{\circ}\text{C}$ aralığında 4 döngü halinde sıcaklık test profili uygulanmıştır. Şekil 2.6a'da; entegre optik aygıtın her iki kolu için ayrı ayrı analiz yapılmıştır ve tüm test süresince çıkış sinyalinde herhangi bir bozulma tespit edilmemiştir. Oda sıcaklığına datada az miktarda bir salınım olmuştur, ancak bu salınım ihmal edilebilir düzeydedir. Şekil 2.6b'de ise; tüm test süresi boyunca aygıtın tek kolunda herhangi bir bozulma gözlenmezken, diğer kolunda düşme eğilimi meydana gelmiştir. Bu grafikte toplam

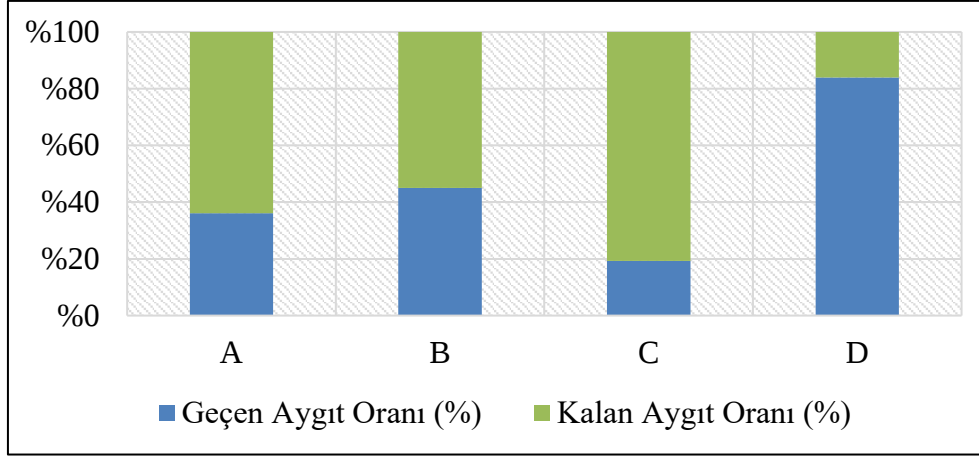
kaybın %20'nin üstünde söylenebilir. Tüm bunlar dikkate alındığında; Şekil 2.6a'daki test profiline sahip aygıt “geçen” kategorisinde, Şekil 2.6b'deki test profiline sahip aygıt ise “kalan” kategorisinde yer almaktadır.

FOD sensörlerine entegre edilmek üzere; durum A, B, C ve D kategorisinde toplam 648 adet entegre optik aygıt üretimi yapılmıştır ve aygıtların fiber entegrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Geçen ve kalan aygıtlara yönelik yapılmış olan istatistiksel analizler Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. 4 farklı geometrik konfigürasyon için geçen/kalan aygıt istatistiği

Şekil 2.7'deki histogram incelendiğinde; D grubunda bütünlenen aygıt sayısının en yüksek düzeyde olduğu görülmektedir. Testlerde başarılı olan aygıt sayısı incelendiğinde; durum D için bu oranın yüksek olduğu söylenebilir. Üretilen aygıtların büyük bir çoğunluğunun D konfigürasyonunda olması; seri üretim aşamasında kalite ve güvenilirliğin sağlanması açısından önem arz etmektedir. Şekil 2.8'de ise; geçen/kalan aygıt analizi yüzdelik (%) oranlarda ifade edilmiştir.

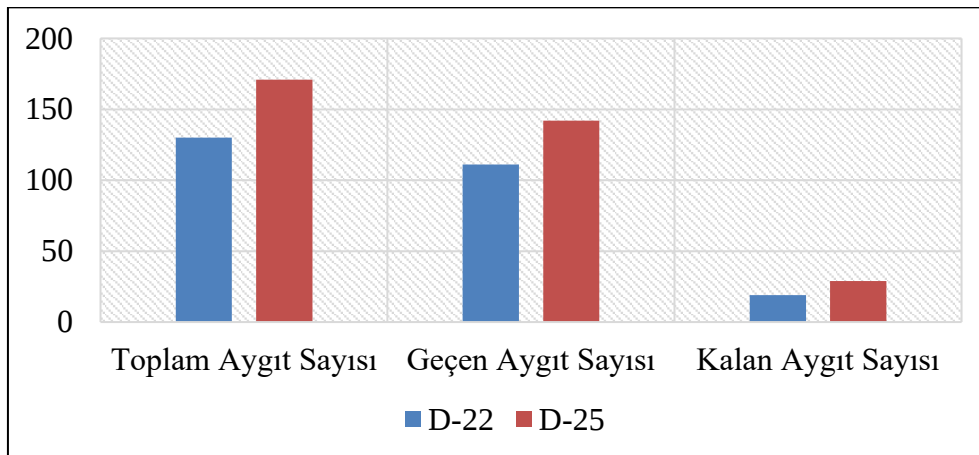


Şekil 2.8. 4 farklı geometrik konfigürasyon için yüzdesel dağılım analizi

Şekil 2.8’de de görüldüğü gibi; durum D için geçen aygıt oranı %80’in üzerinde seyrederken, durum C’de ise kalan aygıt oranı %80’in üzerinde seyretmektedir.

2.2.2. D durumu için aygıt uzunluğunun entegre optik aygıt kararlılığına etkisi

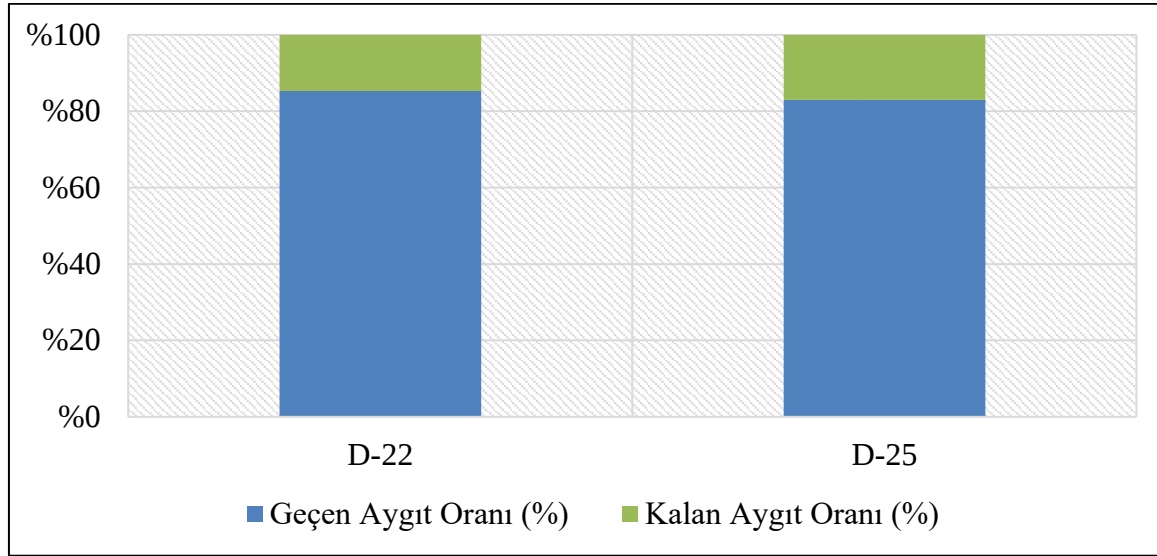
D durumunda entegre edilen aygıtlar 22 mm ve 25 mm uzunluğunda olacak şekilde üretilmişlerdir. Sırasıyla D-22 ve D-25 olacak şekilde kodlanmışlardır. Uzunluk değişimine göre geçen/kalan aygıt istatistiği yapılmıştır. D durumunda toplam 301 aygıt bütünlenmiş olup, bunların 130’u 22 mm; 171’i ise 25 mm uzunluğundadır. Uzunluk değişiminin aygıt performansına etkisi irdelenmiştir. İlgili istatistiksel analizler Şekil 2.9’da grafiksel olarak belirtilmiştir. Geometrik konfigürasyonda olduğu gibi, aygıt uzunluğunun kararlılık ve güvenilirlik üzerine olan etkisini irdelemek amacıyla sıcaklık test sonuçları referans olarak alınmıştır.



Şekil 2.9. Durum D için aygıt uzunluğuna göre geçen/kalan aygıt istatistiği

Şekil 2.9 incelendiğinde; D-22 ve D-25 grubunda geçen aygıt sayısının kalan aygıt sayısına göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Yüzdesel dağılım olarak Şekil 2.10'da görüldüğü gibi; her iki grupta da geçen aygıt oranlarının benzer seviyede ve % 80'in üzerinde olduğu söylenebilir.



Şekil 2.10. Durum D için aygıt uzunluğuna göre yüzdesel dağılım analizi

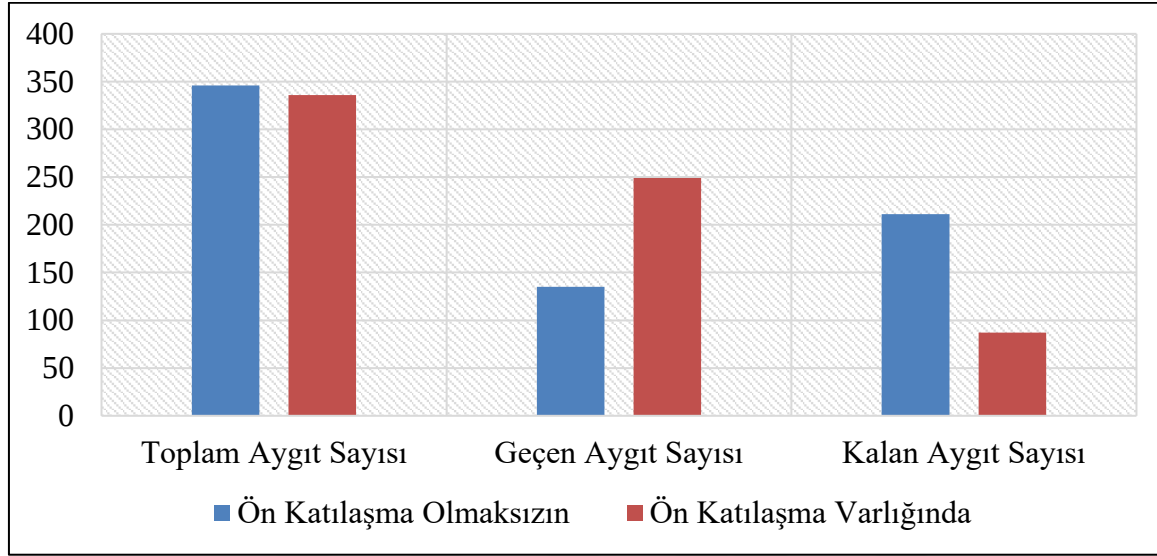
2.2.3. UV uygulama sürecinin ve ön katılaşmanın entegre optik aygıt güvenilirliği üzerine etkisi

Aygıtın giriş ve çıkışındaki bütünleme çalışmalarında; aygıt ile fiber taşıyıcı arasında UV ışık altında sertleşebilen bir epoksi kullanılmıştır. Kullanılan epoksi renksiz ve saydam bir yapıdadır. Bununla birlikte; sıvı polimer bir malzemedir, tek bileşenlidir ve UV ışığa maruz kaldığında sertleşmektedir. Sertleşme zamanı; olabildiğince hızlıdır, dakika mertebesinde sertleşme işlemi gerçekleşmektedir. Bu tip epoksi malzemelerinde; sertleşme zamanı genel olarak uygulanan yüzeyin özelliğine ve kullanılan UV ışığın enerji miktarına bağlıdır. Entegrasyon çalışmalarında kullanılan UV epoksi cam yüzeylere, metallere ve fiber bazlı malzemelere iyi seviyede optik düzeyde bağlanma özelliği sergilemektedir. Genellikle optik fiber uygulamalarının yanı sıra; ticari optik, uzay ve askeri uygulamalara yönelik olarak aynaları, prizmaları ve lensleri yapıştırmak için önerilen bir malzemedir. Ayrıca; düşük çekme özelliğine sahiptir. Tüm bu karakteristik özellikler; değişen çevre koşullarında yapıştırıcı malzemesinin uzun dönem performansına katkı sağlamaktadır. Sertleştirme aşamasında kullanılan UV ışığın dalga boyu 320 nm – 380 nm aralığındadır. Bu tip epoksiler

için çoğu optik uygulamalarında; sertleşme işlemi iki adımda gerçekleştirilmektedir. İlk olarak kısa süreli ön katılaşma (precure) aşaması uygulanmaktadır. Entegrasyon çalışmalarında; fiber taşıyıcı ve aygıtın en yüksek seviyede optik güç elde edilecek şekilde ince hizalama yöntemiyle birbirine hizalanması gerekmektedir. Epoksinin sertleşmesi için UV ışık uygulanırken bu hizalamanın bozulmaması gerekmektedir. Bu sebeple; ön katılaşma için sertleşme süresi, ilk bağlanmayı sağlayacak şekilde yeterli ve kısa olmalıdır. Ön katılaşma sonrası tam katılaşma (fullcure) aşamasına geçilmektedir. Tam katılaşma işleminde, yapıştırıcının çözücü madde içerisinde tam çapraz bağlanması gerçekleşmektedir. Ön katılaşma genellikle birkaç dakika içinde tamamlanırken, tam katılaşma ise en az 10 dakika olacak şekilde uygulanmaktadır. Tam katılaşma sağlandığında; epoksi çok iyi düzeyde bağlanma sergilemektedir. Tam bağlanma sağlanabilmesi için, yapıştırma işlemi tamamlandıktan sonra yaşlandırma testi uygulanmaktadır. Yaşlandırma işlemi; oda sıcaklığında veya değişken sıcaklık değerlerinde yapılabilir. Oda sıcaklığında yapılacak olan yaşlandırma işlemi için, yaklaşık en az 72 saat sonra temas yüzeyi ve yapıştırıcı arasında kimyasal bağlanma gerçekleşmektedir. Bunun yanı sıra; 50 °C’de 12 saat süre boyunca yaşlandırma sağlanabilmektedir. Yaşlandırma işlemi süre ve sıcaklığa bağlı olduğu için; numune daha yüksek sıcaklık değerlerinde daha kısa süre tutularak en uygun bağlanma düzeyi elde edilebilir. Tez çalışmasındaki fiber taşıyıcı/aygıt, ya da aygıtın ana gövdesi ile o gövdeye eşlik eden diğer alt bileşenler arasında aynı epoksi kullanılmıştır. Bu epoksi; yaşlandırma öncesinde -15 °C ile 60 °C arasındaki sıcaklıklara kadar dayanabilirken, yaşlandırma sonrasında -150 °C’den +125 °C’ye varan sıcaklık aralıklarında dayanıklılık göstermektedir.

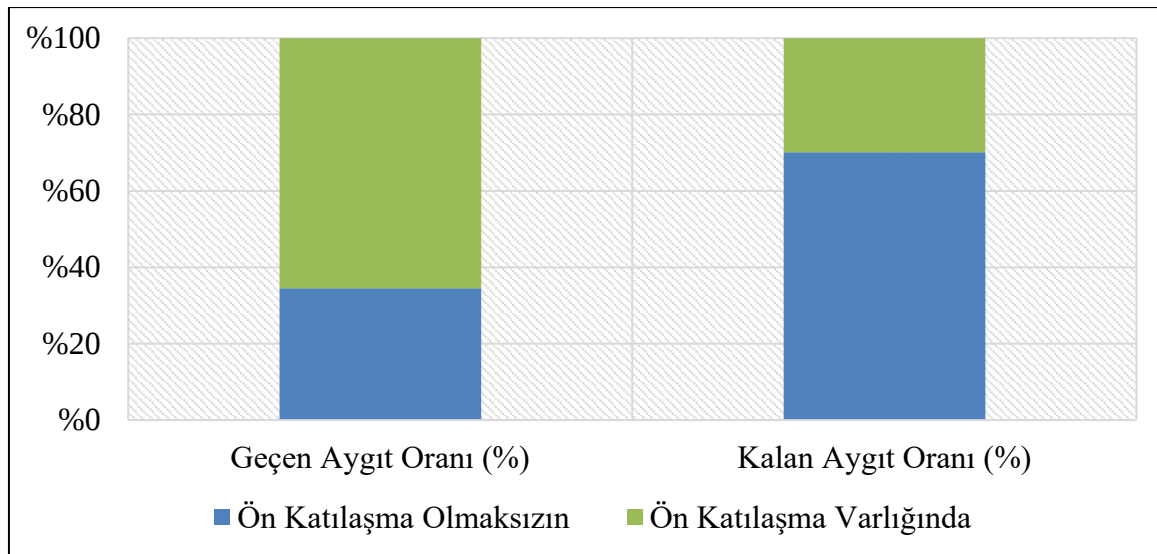
Üretilen entegre optik aygıtlar sıcaklığa duyarlı aygıtlardır. Diğer bir ifadeyle; kullanılan epoksi tipi malzemelerin farklı sıcaklık değerlerindeki davranışı son derece önem arz etmektedir. Bu konuda yayımlanan bazı literatür çalışmaları da incelenmiştir. Sabit ve yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen hızlandırılmış testlerin, optik yapıştırıcıların uzun dönem kararlılığını incelemek amacıyla uygulanması tercih edilmektedir [26]. Bu çalışmada aynı zamanda; fiber optik kablolar ve bazı mekanik parçaları etkileyen mekanik titreşim, yüksek basınç, aşındırma ve UV poz (exposure) gibi çevresel gerilim faktörleri üzerinde durulmuştur. Literatür çalışmaları referans alınarak tez çalışması kapsamında; entegrasyon aşamasında kullanılan UV geçirgen epoksinin UV poz parametreleri dikkate alınmıştır. Gerçekleştirilen fiber entegrasyon çalışmalarında; ön katılaşma varlığında ve yokluğunda iki farklı durum için istatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 2.11’deki histogram’da 4

farklı geometrik durum için ön katılaşma varlığında ve yokluğunda iki farklı koşul için geçen/kalan aygıt istatistiği yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre; ön katılaşma olmaksızın bütünlenen entegre optik aygıtlarda kalan oranı yüksek iken, ön katılaşma varlığında bütünlenen entegre optik aygıtlarda geçen oranı yüksektir.



Şekil 2.11. Durum A, B, C ve D için ön katılaşma varlığında ve yokluğunda geçen/kalan aygıt istatistiği

Şekil 2.12’de görüldüğü gibi; yüzdesel dağılımla ifade edildiğinde ise ön katılaşma varlığında, tüm durumlar için geçen aygıt oranının %70’in üzerinde seyrettiği görülmektedir.



Şekil 2.12. Durum A, B, C ve D için ön katılaşma işlemine göre yüzdesel dağılım analizi

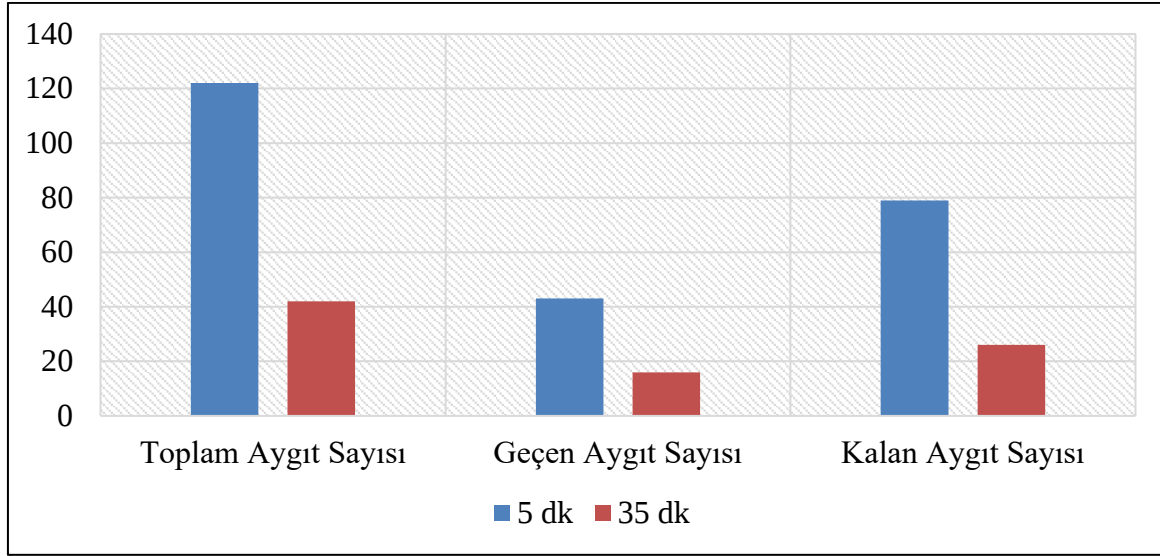
2.2.4. Pozlama süresinin entegre optik aygıt güvenilirliği üzerine etkisi

UV poz parametreleri kapsamında; uygulanan ışık şiddeti ve pozlama süresinin entegre optik aygıtların çalışma performansına etkisi irdelenmiştir. Bütünlenen 650’den fazla aygıt için en yüksek pozlama şiddeti %50 olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda; durum A, B ve C için toplam ışık şiddetinin %50’si uygulanacak şekilde 5 dk ve 35 dk pozlama süresinde aygıtların performans kararlılığı analiz edilmiştir. Durum D için ise; “kademeli” olarak adlandırılan pozlama reçetesi uygulanmıştır. Durum A, B ve C için ön katılaşma işlemi uygulanmazken, durum D için ön katılaşma işlemi %1, %3 ve %5 ışık şiddetinde 1’er dk süre ile gerçekleştirilmiştir. İlgili UV pozlama parametreleri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Durum A, B, C ve D için fiber bütünleme aşamasında kullanılan UV poz parametreleri

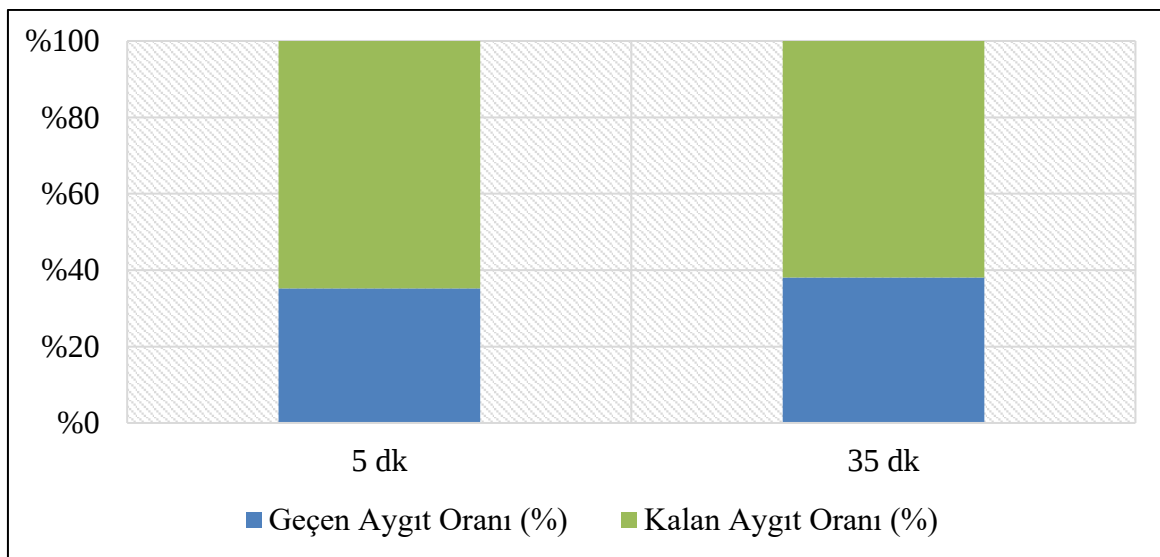
Durum	Pozlama Şiddeti (%)	Pozlama Süresi (dk)		Ön Katılaşma
A	50	5	35	Yok
B	50	5	35	Yok
C	50	5	35	Yok
D	1	1		Var
	3	1		
	5	1		
	8	5		
	50	30		

Durum A için pozlama süresine bağlı olarak geçen/kalan aygıt istatistiği Şekil 2.13’te gösterildiği gibidir. Bu grafiğe göre; bir grup aygıt %50’de 5 dk süre boyunca UV ışık altında bütünlenirken, bir grup aygıt ise %50 UV pozlama şiddetine 35 dk süre boyunca maruz bırakılmıştır. Ön katılaşma olmadığından dolayı; 5 dk ve 35 dk pozlama süresi için her iki durumda da kalan aygıt sayısının geçen aygıt sayısından fazla olduğu görülmektedir. Bu durum; aygıt performansında azalma ve kararlılıkta bozulma ile sonuçlanmıştır.



Şekil 2.13. Durum A için pozlama süresinin değişimine göre geçen/kalan aygıt istatistiği

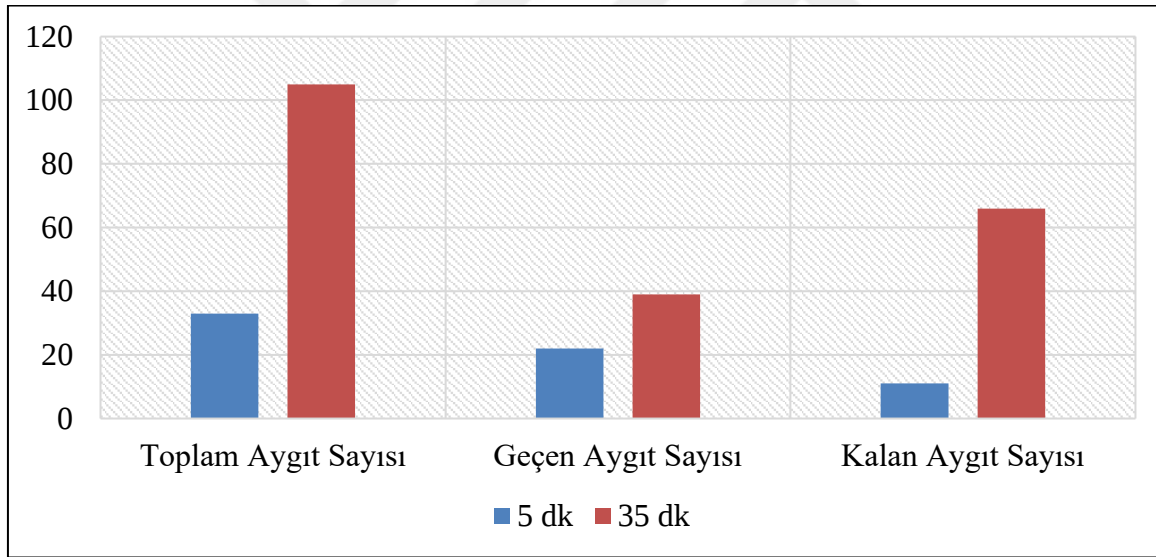
Şekil 2.13'teki istatistiksel veriler dikkate alınarak Şekil 2.14'te belirtildiği gibi yüzdesel dağılım analizi de yapılmıştır. Yapılan analizler doğrultusunda; her iki koşulda kalan aygıtların yüzdesel oranının geçen aygıtların oranına göre fazla olduğu ve yaklaşık %60 dolaylarında sabitlendiği tespit edilmiştir. Kalan aygıtların geçen aygıtlardan oransal olarak fazla olmasının sebebi ön katılaşma olmaması ile ilişkilendirilebilir. Ön katılaşma işlemi; epoksi sertleşme işleminin mekanik açıdan daha sağlam olmasına olanak sağlamakta, böylece aygıtların kararlılık ve güvenilirlik seviyelerinin artmasına ortam hazırlamaktadır. Bu sebeple; durum A için ön katılaşma işlemi olmadığından dolayı bozulma varlığından söz edilebilir.



Şekil 2.14. Durum A için pozlama süresinin değişimine göre yüzdesel dağılım analizi

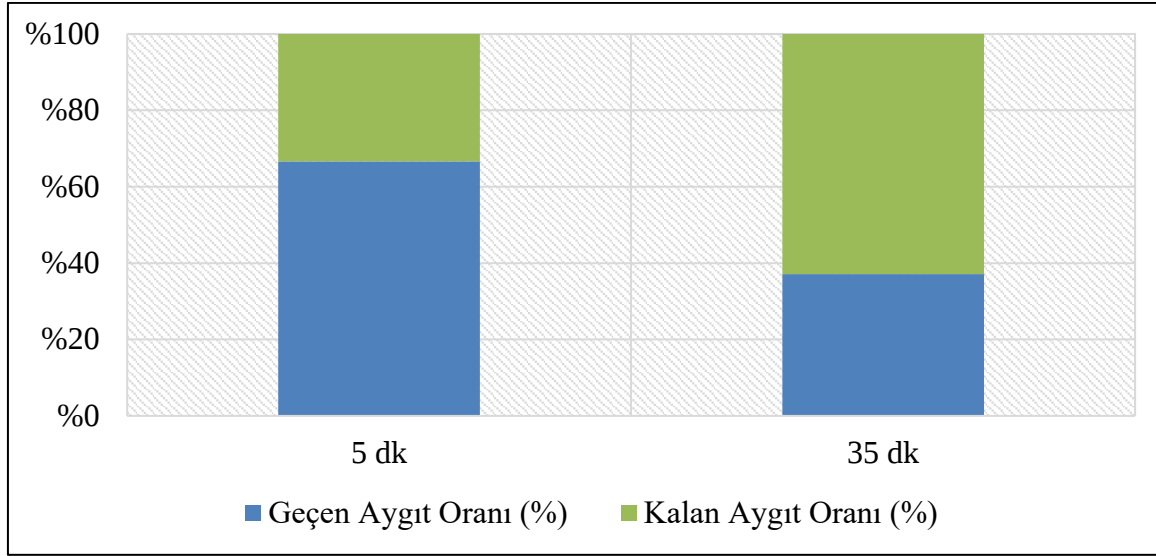
Durum A için her ne kadar geçen ve kalan aygıt oranları yaklaşık eşit olsa da; 35 dk pozlama süresi için başarılı kabul edilen aygıt sayısının, 5 dk pozlama süresi ile kıyaslandığında daha yüksek olduğu söylenebilir. Bunun sebebinin ise; ön katılma olmasa dahi daha uzun süre pozlama işlemi mekanik ve geometrik açıdan dayanıklılığı artırmakta, böylece çevresel testlerde başarı oranının yükselmesini sağlamaktadır.

Durum B için pozlama süresine bağlı olarak geçen/kalan aygıt istatistiği Şekil 2.15'te gösterildiği gibidir. Durum A'da olduğu gibi; bir grup aygıt %50'de 5 dk süre boyunca UV ışık altında bütünlenirken, bir grup aygıt ise %50 UV pozlama şiddetine 35 dk süre boyunca maruz bırakılmıştır. Durum B için; durum A'nın aksine 5 dk pozlama süresinde bütünlenen ve sıcaklık testlerinde başarılı olup geçen aygıt sayısı, 35 dk pozlama süresinde bütünlenen ve sıcaklık testlerinde başarılı olan aygıt sayısına nazaran daha fazladır. Durum B için ön katılma işlemi uygulanmamıştır.



Şekil 2.15. Durum B için pozlama süresinin değişimine göre geçen/kalan aygıt istatistiği

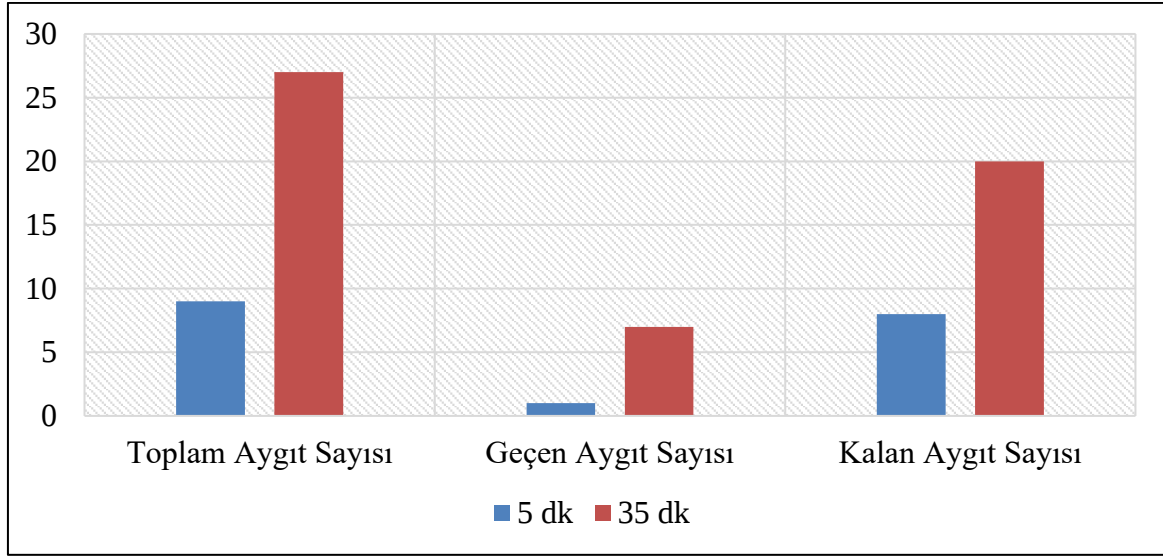
Şekil 2.15'teki histogram dikkate alınarak, yüzdesel dağılım analizi yapılmıştır. Şekil 2.16'da gösterildiği gibi; 5 dk için isterleri sağlayan aygıtların oranı tüm dağılım içinde %66,6 iken, 35 dk için %37,1 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.16. Durum B için pozlama süresinin değişimine göre yüzdesel dağılım analizi

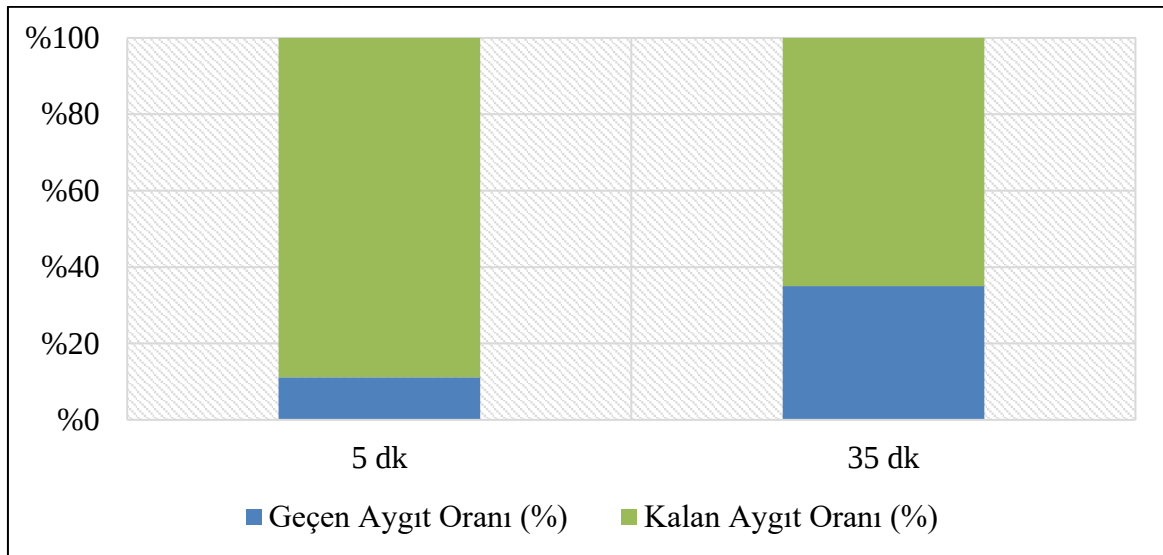
Şekil 2.16 incelendiğinde; geçen ve kalan aygıt oranlarının durum A'nın aksine eşit düzeyde olmadığı görülmektedir.

Durum C için de benzer şekilde analizler yapılmıştır. Tez kapsamında yürütülen çalışmalarda; fiber bütünleme çalışmaları ilk olarak sırasıyla durum A ve durum B kategorisinde üretilen MIOC aygıtları için yürütülmüştür. İstatistiksel çalışmalar doğrultusunda; bu iki kategoride üretilen aygıtlar için gerekli isterlerin yerine getirilemediği ve seri üretim açısından değerlendirildiğinde istenilen düzeyde aygıt kararlılığının sağlanamadığı tespit edilmiştir. Aygıt geometrisindeki değişimin testler sonundaki performansını etkilediği sonucuna varıldığı için, bir sonraki aşama olarak durum C kategorisindeki aygıtların pozlama süresine göre analiz edilmesine karar verilmiştir. Şekil 2.17'de; durum C için pozlama süresi değişimine göre yapılan istatistiksel değerlendirmeler gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Durum C için pozlama süresinin değişimine göre geçen/kalan aygıt istatistiği

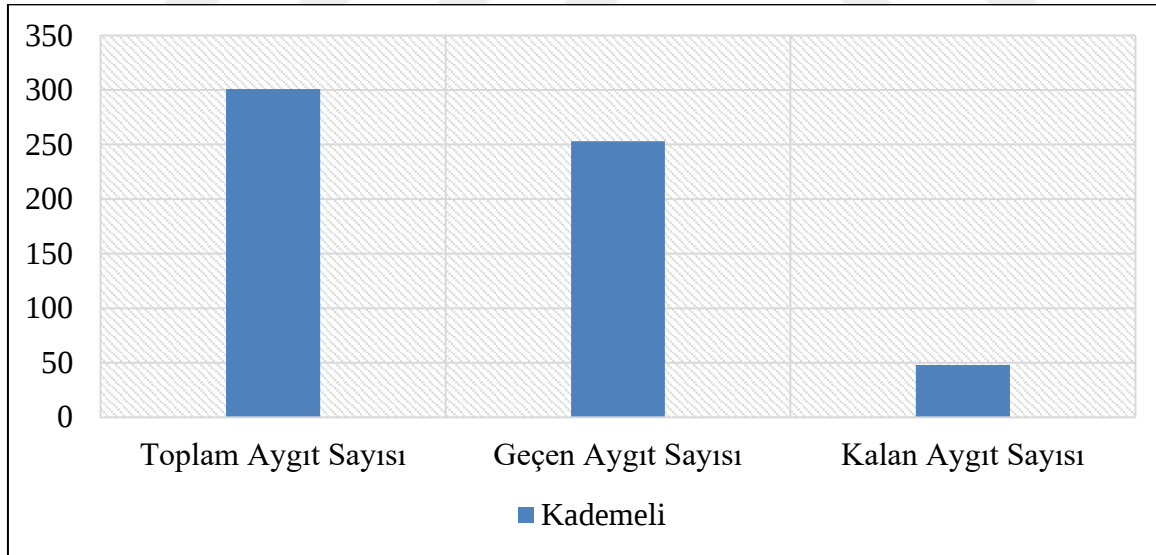
Şekil 2.17'ye göre; durum C kategorisindeki toplam aygıt sayısı, durum A ve durum B'ye ait aygıt sayısına göre oldukça düşük düzeydedir. Buna rağmen; grafikteki veriler ışığında pozlama süresinden bağımsız olarak kalan aygıt sayısının daha fazla olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 2.18'de ise; bu analiz yüzdesel değişim olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.18. Durum C için pozlama süresinin değişimine göre yüzdesel dağılım analizi

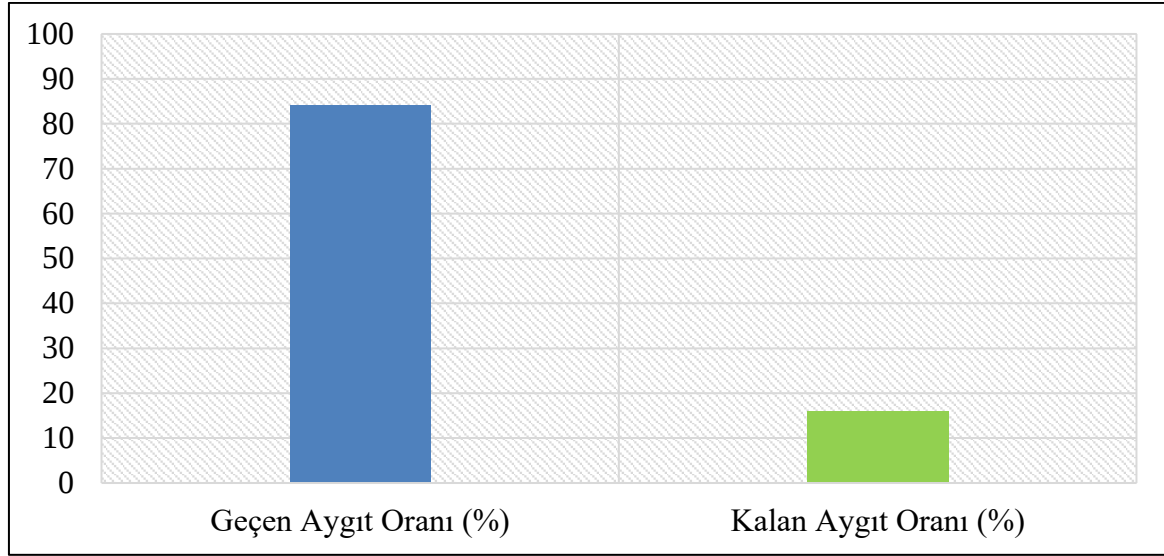
Yüzdesel dağılım verilerine göre; bozulan aygıt sayısı her iki grupta %50'nin üzerinde seyretmektedir. Bu sonuçlar; durum C'nin kararlı bir yapı sergilemediğini ortaya koymaktadır.

Durum A, B ve C için yapılan tüm analizler değerlendirilmiştir ve geometrik oluşumun önemli ölçüde aygıt performansını etkilediği kanıtlanmıştır. Diğer bir taraftan da; pozlama parametrelerinin önemli bir etken olduğu istatistiksel verilerle doğrulanmıştır. Tüm bu veriler dikkate alındığında; geometrik oluşumun ve pozlama süresinin değiştirilmesi öngörülmüştür. Bu kapsamda; durum C aygıt yapısı değiştirilerek 0,5 mm kalınlığında iki kristal birbirine epoksi ile istiflenmiştir ve istiflenen kristallerin üzerine 1 mm kalınlığında kapak parçası yapıştırılmıştır. Bu geometrik oluşum durum D olarak adlandırılmıştır. Durum D kategorisinde toplam 301 adet entegre optik aygıt üretilmiştir. Durum A, B ve C için yapılan değerlendirmeler sonucunda; ön katılaşma işleminin önem arz ettiği sonucuna varılmıştır. Bu üç kategoride üretilen aygıtların fiber bütünleme aşamasında ön katılaşma uygulanmadığı için aygıtın performansına yönelik güvenilir sonuçlar elde edilememiştir. Bu sebeple; pozlama süresi “kademeli” olarak değiştirilmiştir (Bkz. Çizelge 2.2). Özet olarak; geometrik durum ve pozlama süresi değiştirilerek 301 adet aygıt için çalışmalar yürütülmüştür. Durum D için; pozlama süresinin değişimine göre yapılan ilgili istatistiksel analizler Şekil 2.19’da gösterilmiş olup, performans açısından değerlendirildiğinde geçen aygıt sayısının baskın oranda fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 2.19. Durum D için pozlama süresinin değişimine göre geçen/kalan aygıt istatistiği

Yüzdesel olarak ifade edildiğinde ise, Şekil 2.20’de gösterildiği gibi %80 üstünde kararlılık sağlandığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.20. Durum D için pozlama süresinin değişimine göre yüzdesel dağılım analizi

Yapılan incelemeler ve değerlendirmeler doğrultusunda; durum D’deki yapısal geometriye uygun olarak üretilen entegre optik aygıtların seri üretim sürecinde kullanıma uygun olduğu ve bununla birlikte fiber entegrasyon çalışmalarında “kademeli” pozlama süresinin tercih edilmesinin aygıt verimliliğine büyük oranda katkı sağladığı tespit edilmiştir.

3. ENTEGRE OPTİK AYGIT MODELLEMESİ VE TERMO MEKANİK SİMÜLASYONLAR

2. Bölüm’de; aygıtların geometrik yapılanmalarının sıcaklık testlerini etkilediği sonucuna varılmış ve bu durum aygıt performansı ile ilişkilendirilmiştir. Bu bölümde ise; fiber entegrasyon çalışmaları referans alınarak, entegre optik aygıtların sıcaklık değişimi altındaki mekanik davranışları ve aygıtın belirli noktalarında indüklenen termo mekanik gerilimler 3 boyutlu modellemeler ile analiz edilmiştir.

Bu konuda yayınlanan literatür çalışmaları detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda; fiber optik sensör uygulamalarında kullanılan MIOC veya benzeri aygıtların simülasyon çalışmalarına çok fazla yer verilmediği sonucuna varılmakla beraber, MIOC ile fiber taşıyıcı arayüzündeki dinamikleri inceleyen ve buna bağlı olarak arayüzeydeki ötelenmeleri esas alan bir yayın çalışmasına [2] rastlanması, bu makalenin tez çalışmasında referans olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır. Bu yayın çalışmasında; MIOC’un üç boyutlu modellemesi ve malzeme tanımlaması yapılmıştır. Hassas hizalama yöntemi ile fiber bütünlemesi gerçekleştirilirken, aygıt-taşıyıcı arayüzündeki ötelemeler sıcaklık değişimi etkisi altında irdelenmiştir. Buna bağlı olarak; MIOC geçirgenlik spektrumunun ortalama dalga boyu hesaplaması yapılmıştır. Ayrıca; simülasyon çalışmalarında toplam ötelenme ısısal gerilim ile ilişkilendirilmiştir. Literatür araştırmalarında entegre optik aygıtların modelleme ve simülasyon çalışmalarını konu alan çok fazla yayın ile karşılaşmadığı için; bu açıktan yararlanılarak teorik çalışmalar yürütülmüştür ve parametrik bazı analizler yapılmıştır.

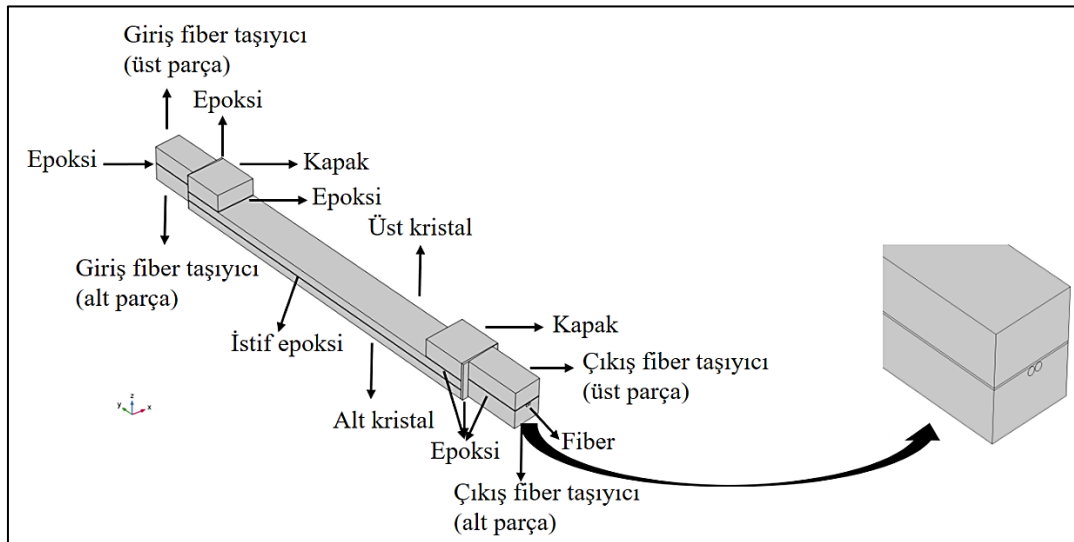
Bu bölümde; ilk olarak aygıt üç boyutlu olarak modellenmiştir ve sonrasında her bir parçanın malzeme tanımlaması yapılmıştır. Modelin tamamı oluşturulduktan sonra analiz tipi, sınır koşulu hakkında bilgi verilmiş ve örgü analizleri yapılmıştır. Değişken sıcaklık aralığında bir profil uygulanarak zamana bağlı analizlerle epoksi katmanları üzerinde meydana gelen yapısal değişimler termo mekanik analizler ile irdelenmiştir. Epoksi tabakalarının yanı sıra; dalgakılavuzu üzerinde indüklenen gerilim değişimi de analiz edilmiştir ve durum C, D ve E için teorik düzeyde grafiksel değerlendirmeler yapılmıştır. Bunun yanı sıra; seri üretim sürecinde üretilen entegre optik aygıtların oda sıcaklığında gerçekleştirilen optik karakterizasyonları simülasyon ortamından elden edilen veriler ile kıyaslanarak teorik/deneysel karşılaştırma yapılması sağlanmıştır.

3.1. Üç Boyutlu Entegre Optik Aygıt Modellemesi

Tez kapsamında yürütülen simülasyon çalışmalarında COMSOL 5.5 yazılımı kullanılmış olup, analizler Çoklu fizik arayüzünde gerçekleştirilmiştir. Analiz ve çözümlemelerde SEA yöntemi kullanılmıştır. SEA; sayısal bir çözümleme tekniğidir. SEA ile yapısal veya sıvısal davranışlar, ısısal iletim ve elektro manyetik dalga analizleri üzerinde çalışılabilmektedir. Normal şartlar altında; bahsedilen bu prosesler parçalı diferansiyel eşitlikler (PDE) kullanılarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte; bir bilgisayarın bu tip PDE'leri çözebilmesi için son birkaç yüzyılda çeşitli sayısal çözümleme teknikleri geliştirilmiştir ve en bilinen teknik ise SEA tekniğidir.

Çoklu fizik arayüzünde; Isı Transfer ve Katı Mekanik modülleri bir arada kullanılmıştır. Çoklu fizik; iki farklı modülün birleştirilerek ısısal değişimler altında malzemenin maruz kaldığı mekanik gerilimin hesaplanmasına ve modelin farklı noktalarında bazı yapısal parametrelerin konsantrasyonlarının hem nicelik hem de nitelik bakımından irdelenmesine olanak sağlamıştır.

Simülasyon çalışmaları kapsamında; ilk olarak Şekil 3.1'de gösterildiği gibi 3 boyutlu MIOC entegre optik aygıt modellemesi yapılmıştır.



Şekil 3.1. 3 boyutlu entegre optik aygıt modellemesi

Aygıt geometrisine dahil olan tüm bileşenler, oluşturulan modelde gösterilmiştir. Aygıtın temel bileşenleri; giriş ve çıkış fiber taşıyıcısı, epoksi, kapak, fiber ve kristal olarak

sıralanmaktadır. Şekil 3.1 daha detaylı incelenecek olursa eğer; fiber taşıyıcıların alt ve üst olmak üzere iki parçadan oluştuğu görülmektedir. Giriş ve çıkış fiberler; fiber taşıyıcının alt ve üst parçası arasına yerleştirilmiştir ve UV geçirgen bir epoksi ile ara bölgeye sabitlenmiştir. Prosesimizde kullanılan alttaş kristaller en düşük 0,5 mm kalınlığında ve fiber taşıyıcılar 2 mm kalınlığında olduğundan dolayı, fiber taşıyıcılar ve alttaş kristal arasında yükseklik farkı meydana gelmektedir. Nitekim; 2.Bölüm’de fiber bütünleme çalışmalarında benzer şekilde bir açıklamaya yer verilmiştir. Simülasyon modellemelerinde de; fiber taşıyıcı ve kristal arasındaki yükseklik farkını azaltmak amacıyla iki adet simetrik kapak entegre optik aygıt yapısına eklenmiştir. Bunun yanı sıra; Şekil 3.1’deki toplam kristal, iki adet tek kristal LiNbO_3 alttaşın UV geçirgen bir epoksi ile birbirine istiflenerek yapıştırılması ile elde edilmiştir. Daha genelleştirme yapmak gerekirse; yapıdaki tüm alt bileşenler birbirine UV geçirgen epoksi ile yapıştırılmıştır. Bu bölümde anlatılacak olan simülasyon çalışmalarında toplam 5 farklı geometrik durum için analizler gerçekleştirilmiştir. Ancak bir model üzerinde bileşenleri detaylandırmak amacıyla örnek olması açısından Şekil 3.1’de sadece durum D modellemesine yer verilmiştir.

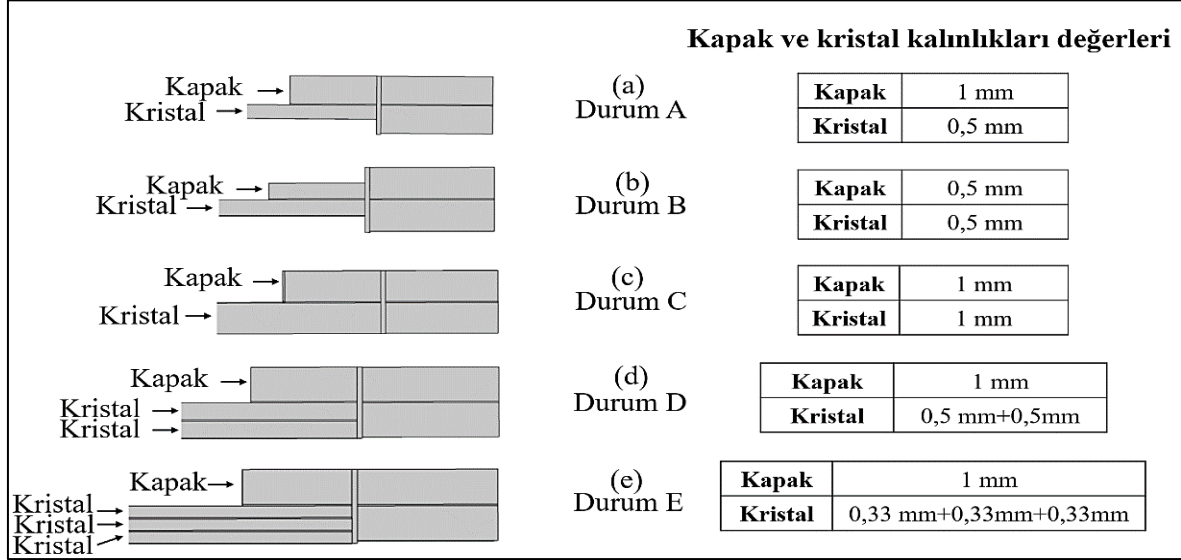
Simülasyonlar 5 farklı yapısal durum için gerçekleştirilmiştir. Bunlar Çizelge 3.1’de; kapak ve kristal kalınlıkları belirtilerek listelenmiştir.

Çizelge 3.1. 5 farklı durum ve yapısal geometri tanımlaması

Durum	Yapısal Geometri
A	0,5 mm kristal + 1 mm kapak
B	0,5 mm kristal + 0,5 mm kapak
C	1 mm kristal + 1 mm kapak
D	0,5 mm kristal + 0,5 mm kristal + 1 mm kapak
E	0,33 mm kristal + 0,33 mm kristal + 0,33 mm kristal + 1 mm kapak

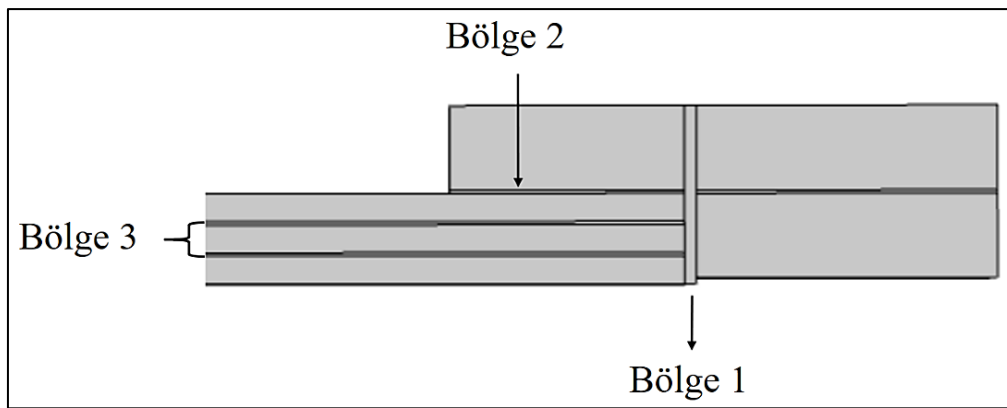
Çizelge 3.1’deki yapısal durumlar kısmına, tezin 2. Bölümünde fiber entegrasyon çalışmaları anlatılırken değinilmişti. Fiber entegrasyon çalışmaları kapsamında durum A, B, C ve D olarak 4 farklı kategoriye değinilmiştir. Bunun sebebi; deneysel olarak 4 farklı yapısal geometride aygıtların üretilmiş olmasıdır. Simülasyon çalışmalarında ise bunlara ek olarak durum E adı altında bir geometrik modele daha yer verilmiştir. Durum E; sadece simülasyon düzeyinde anlatılmıştır, bu konfigürasyonda deneysel olarak aygıt üretilmemiştir.

Durum A, B, C, D ve E olarak adlandırılan 5 farklı geometrik yapı; kapak ve kristal kalınlıkları ile birlikte yanal kesitten şematik olarak Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. 5 farklı yapısal durum şematik gösterimi a) Durum A b) Durum B c) Durum C d) Durum D e) Durum E

Yürütülen simülasyon çalışmalarında; epoksi üzerinde indüklenen gerilim ve bazı yapısal değişimler analiz edildiği için, analiz kısmında kolaylık olması açısından yapıdaki epoksi katmanlarına numara verilmiştir. Şekil 3.3’te; modeldeki epoksi katmanları için bölge numaralandırma işlemi gösterilmiştir.

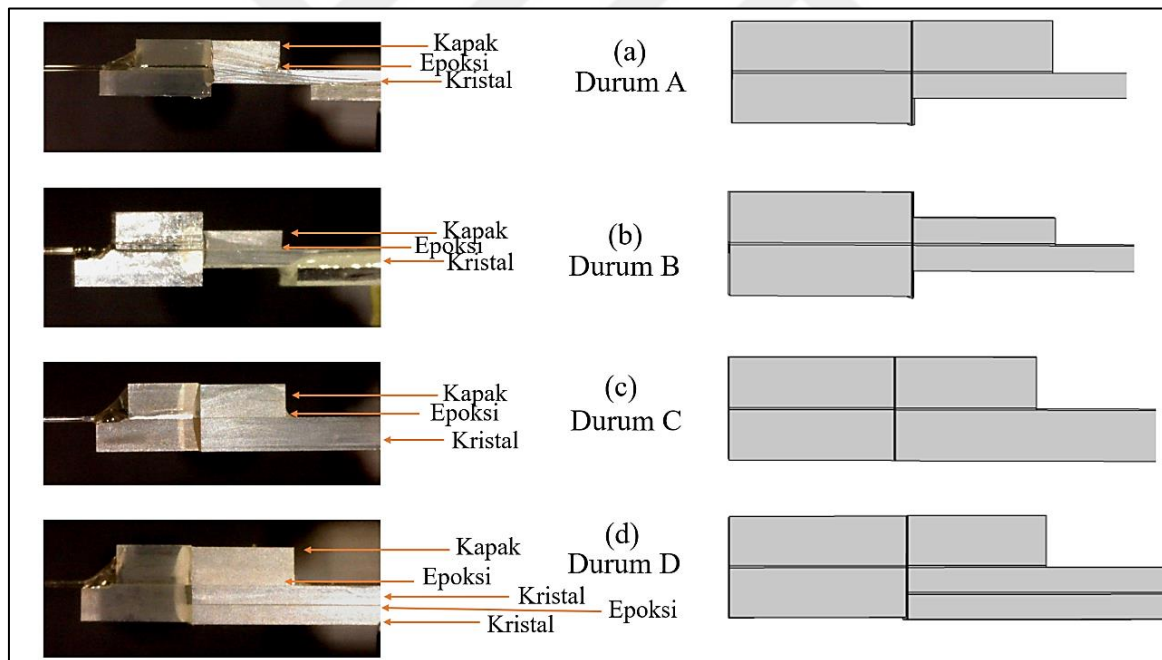


Şekil 3.3. Epoksi katmanları için bölge tanımlaması

Bölge 1; fiber taşıyıcı ile kristal arasındaki epoksi tabakasını, bölge 2; üst kristal ve kapak arasındaki epoksi tabakasını ve bölge 3 ise durum D ve E için kristaller arasındaki istif epoksi tabakasını temsil etmektedir. Bölge 1’de; giriş-çıkış uçlarındaki fiber taşıyıcılar/aygıt kristali

arasında kalan her iki epoksi yapısı da dikkate alınmıştır. Entegre optik aygıt yapısı simetrik olduğu için; benzer şekilde bölge 2'den bahsederken giriş ve çıkış uçlarındaki kapaklar/üst kristal arasındaki epoksi tabakaları göz önünde bulundurulmuştur. Bölge 3 ise; yapıda var olan tüm istif epoksileri içermektedir. Alt ve üst fiber taşıyıcı arasındaki epoksi katmanını simülasyonlar sırasında ihmal edilmiştir. Diğer bir ifadeyle; taşıyıcılar arasındaki epoksi katmanının örgü tipi; yapıdaki diğer epoksi katmanlarının örgü tipinden farklıdır. Bu sebeple; taşıyıcılar arasındaki epoksi katmanlarının yapının geri kalanı ile kıyaslanması uygun görülmemiştir. Örgü analizleri bölümünde; farklı boyutlardaki bileşenler için örgü çözümlemesi detaylı olarak anlatılacaktır.

Resim 3.1'de; durum A, B, C ve D kategorisinde üretilen aygıtların yanal mikroskop görüntüleri ile simülasyon ortamında oluşturulan modellerin karşılaştırmalı hali gösterilmiştir.



Resim 3.1. Durum A, B, C ve D için gerçek aygıt görüntüleri ile simülasyon ortamında oluşturulan modellerin karşılaştırılması

Resim 3.1'de durum E'ye yer verilmemiştir. Bunun nedeni; durum E'nin sadece simülasyon ortamında teorik olarak ele alınmış olmasıdır. Bu kategoriye ait herhangi bir aygıt üretimi yapılmamıştır. Mikroskop görüntülerinde; epoksinin arayüzey bölgelerde mikrometre kalınlığında ince bir hat halinde yer aldığı görülmektedir. Durum A ve durum B incelendiğinde; fiber taşıyıcı ve kristal/kapak bileşimi arasında yükseklik farklı olduğu

açıkça görülmektedir. Buna karşın; durum C ve durum D için ise fiber taşıyıcı ve kristal/kapak bileşimi arasında yükseklik farkı bulunmamaktadır. Kullanılan alttaş kristal ve kapak kalınlıklarının farklı olması bu duruma sebebiyet vermektedir.

3.2. Malzeme Parametrelerinin Tanımlanması

Simülasyonun diğer bir adımı bileşenlerin malzeme parametrelerinin belirlenmesidir. Çizelge 3.2’de; entegre optik aygıt yapısını oluşturan bileşenlerin malzemeleri ve bu malzemelerin fiziksel özelliklerine yer verilmiştir.

Çizelge 3.2. Malzemelerin fiziksel özellikleri

Bileşen	Malzeme	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	η	k (W/(m.K))	α (x10 ⁻⁶) (1/K)
Fiber	SiO ₂	2170	66,3	0,15	1,30	0,55
Kristal ve kapak	LiNbO ₃	4690	170	0,25	5,6	2,1 ve 16,7
Dalgakılavuzu	Ti:dif LiNbO ₃	4700	175	0,26	6,1	2 ve 16,5
Epoksi	UV geçirgen	1231	1,03	0,48	0,15	65
Fiber taşıyıcı	LiNbO ₃	4690	170	0,25	5,6	2,1 ve 16,7

Çizelge 3.2’de gösterilen sembollerden; ρ , yoğunluk; E, Young Modülü; η , Poisson Oranı; k, ısısal iletkenlik ve α , ısısal genleşme katsayısı olarak tanımlanmıştır. η parametresi malzemenin enine ve boyuna gerinim değerlerinin birbirine oranı olarak tanımlandığı için boyutsuz bir birimdir. LiNbO₃; piezoelektrik¹ ve anizotropik bir malzemedir. Diğer bir ifadeyle; fiziksel özellikleri kristal doğrultusuna bağlıdır. Buna ek olarak; tek eksenli bir malzemedir, iki eksendeki malzeme özellikleri diğer üçüncü ekseninden farklıdır. Bu sebeple; Çizelge 3.2’de gösterildiği gibi LiNbO₃ malzemesi iki farklı ısısal genleşme katsayısı değerine sahiptir.

¹ Piezoelektrik malzemeler mekanik bir etki sonucu elektriksel olarak değişime uğrayan malzemelerdir.

3.3. Örgü Parametrelerinin Tanımlanması ve Örgü Analizi

Örgü analizi simülasyon çalışmalarının önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Literatür çalışmaları incelendiğinde entegre optik aygıtların örgü analizlerini konu alan çalışmalara çok fazla rastlanmamış olmasına rağmen; montaj aparatları gibi daha genel amaçlı kullanılan objelerin simülasyon çalışmalarını ele alan makaleler ve tezler detaylı olarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizinde örgü oluşumu önemli bir yere sahiptir. COMSOL arayüzünde; analiz tipinde bağımsız olarak kullanıcı kontrollü örgü ve fizik kontrollü örgü olmak üzere iki çeşit örgüleme yöntemi bulunmaktadır [29]. Fizik kontrollü örgü opsiyonu; COMSOL çoklu fizik ara yüzünün, model içindeki simülasyon ayarlarına uygun otomatik bir örgü oluşturmaya olanak sağlamaktadır [29]. Fizik kontrollü olarak oluşturulan örgünün toplam eleman boyutu değiştirilebilmektedir, böylece örgü yapısı yenilenmektedir. Fizik kontrollü örgüde eleman boyutu, yapıyı oluşturan bileşenlerin boyutuna göre değişmektedir. Bu durum; her bir bileşenin boyutları ile orantılı eleman sayısına sahip olmasına sebep olmaktadır. Kullanıcı kontrollü örgü yapısında ise; eleman boyutları ve örgü tipleri isteğe bağlı olarak biçimlendirilebilmektedir. Modellenen entegre optik aygıt yapısı birden fazla parçadan oluştuğu için ve bu parçaların her biri birbirinden farklı görünüm oranına ve farklı boyutlara sahip olduğu için, fizik kontrollü otomatik örgü modeli tanımlamak çok etkili bir yöntem değildir ve örgülerin bağlanma noktalarındaki uyumsuzluklardan dolayı işlem sırasında birçok hata ve uyarı mesajları alınmasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı bu çalışmada, fizik kontrollü örgü yerine kullanıcı kontrollü örgü yapısı tanımlanmıştır. Diğer bir ifadeyle; kristal, kapak, epoksi ve fiber gibi modeli oluşturan bileşenlerin hepsine ayrı ayrı örgü tipi tanımlanmıştır ve eleman boyutları da isteğe göre oluşturulmuştur. Karşılaştırmalı bir analiz yapabilmek için; örgüleme çalışmaları bölge 1, 2 ve 3 olarak adlandırılan epoksi tabakalarının örgü eleman sayısı dikkate alınarak yürütülmüştür. Daha önce değinildiği gibi; COMSOL simülasyonlarında SEA yöntemi kullanılmaktadır. SEA yöntemi; örgülerin matematiksel modellemeler ile çözümlenmesine dayalı olduğu için, örgü analizlerinin etkisi sonuçların karşılaştırılması için kritik öneme sahiptir. Elde edilen analiz sonuçlarının örgüden bağımsız olarak değerlendirilmesi için ilk olarak uzaysal ayrıştırma etkisinin dikkate alınması gerektiği [30] bilinmektedir. Bütün bu değerlendirmeler dikkate alındığında; bölge 1, 2 ve 3 için örgü eleman sayıları 5 farklı durumun her birisi için aynı veya benzer rakamlarda olacak şekilde belirlenmiştir. Böylece; örgü eleman yapısının analiz sonuçlarına etkisi en aza indirgenmiş olacak ve tutarlı veriler elde edilmiş olacaktır. Çizelge

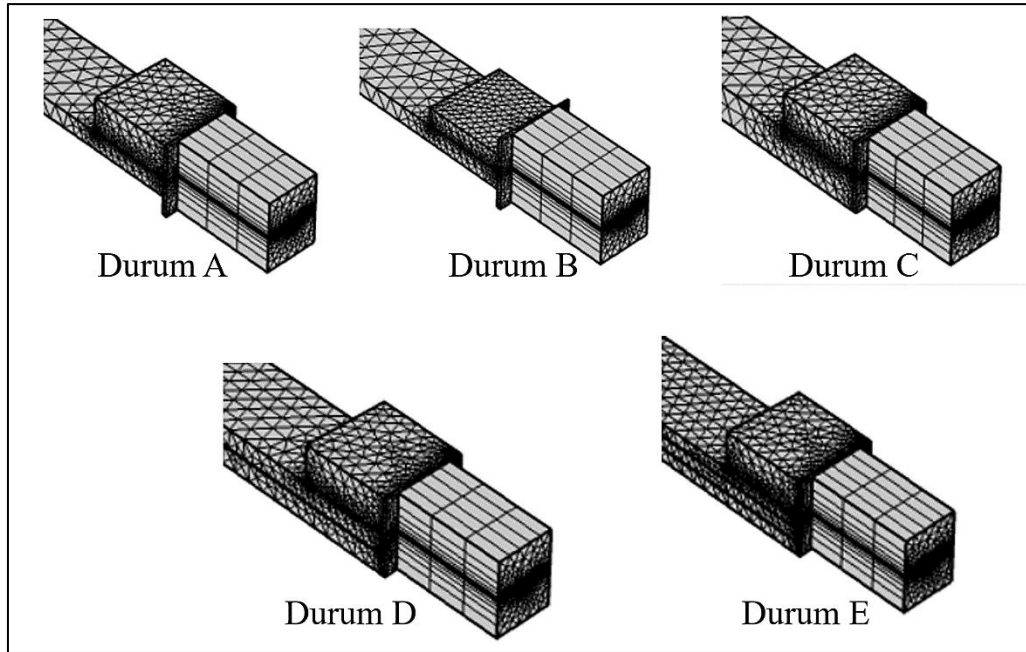
3.3'te; beş farklı durumda hem tüm bileşenler için örgü boyutları belirtilmiş olup hem de tanımlanmış epoksi bölgeleri için eleman sayıları gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Durum A, B, C, D ve E için bileşenlerin örgü parametrelerinin tanımlanması

Durum	Örgü Boyutu				Epoksi Tabakaları İçin Örgü Boyutu		
	Epoksi	Kristal	Kapak	İstif Epoksi	Bölge 1	Bölge 2	Bölge 3
A	Finer	Extra fine	Extremely fine	-	6865	7347	-
B	Finer	Extra fine	Extremely fine	-	6958	7310	-
C	Finer	Extremely fine	Extremely fine	-	6962	7716	-
D	Finer	Finer	Extremely fine	Fine	7391	7335	5251
E	Finer	Fine	Extremely fine	Fine	7665	7308	10906

Epoksi tabakaları üzerinde indüklenen gerilim dağılımı analiz edildiği için; bu bölgelerin doğru bir şekilde çözümlenmesi önem arz etmektedir. Epoksi katmanları ve diğer bileşenler arasındaki boyut farkından kaynaklanan yüksek görünüm oranı örgüleme işlemini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple; çalışmalar analiz işleminin yapılabilmesini olanak sağlayacak örgü boyutu ve tipi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu durumda; simülasyon sırasında harcanan zaman ve kullanılan bilgisayar hafızasından tasarruf sağlanmış olmaktadır. Bununla bağlantılı olarak; Çizelge 3.3 incelendiğinde; bölgesel olarak örgü eleman sayılarının benzer seviyede olması amaçlanmıştır. Yapıdaki epoksi katmanları üzerinde değerlendirme yapılacağı için, istif epoksi hariç diğer tüm epoksi katmanlarının örgü boyutu “finer” olarak seçilerek örgü boyutu sabit tutulmuştur. Yapıdaki tüm bileşenlerin örgü tipi ve boyutu belirlenirken; analiz sonuçlarını matematiksel olarak etkilemeyecek şekilde parametre tanımlaması yapılmıştır. Diğer bir ifadeyle; analizlerin sadece yapısal ve ısısal etkilerden kaynaklı değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Şekil 3.4’te; beş farklı yapısal durum için örgüleme çalışmaları şematik olarak gösterilmiştir.

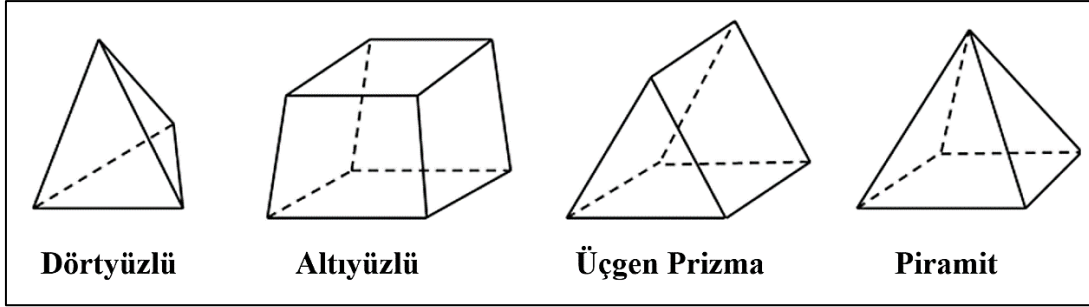


Şekil 3.4. Durum A, B, C, D ve E için örgü analizi

Durumların örgü analizleri incelendiğinde; fiber taşıyıcılara “swept” örgü tipi uygulandığı görülmektedir. “Swept” örgü tipi Türkçe diline “tarama” örgü olarak çevrilmektedir. Tarama örgü; COMSOL çoklu fizik arayüzünde geometrik ayrıştırma tekniği olarak bilinmektedir ve genellikle ince geometriler, dönemeçli şekiller için kullanılması tercih edilmektedir. Tarama örgü bir kaynak sınır bölgesinde başlar ve belirtilmiş bir hedef sınır bölgesi boyunca yapıyı tarama olanağı sağlar [31]. COMSOL yazılımının son sürümlerinde tarama örgü tipi daha otomatik hale getirilmiştir. Ayrıca; kullanıcı tarafından tanımlanan kaynak ve hedef sınırlarının azaltılmasına olanak sağlanmıştır. Daha önce belirtildiği gibi; örgüleme SEA’nın temel şartlarından birisidir. Hızlı ve doğru bir simülasyon için; farklı durumlarda hangi örgü tipinin kullanılması gerektiğini bilmek kritik öneme sahiptir. “Dört yüzlü (tetrahedral)” ve “üçgen (triangular)” örgü tipleri; ince yapılarda özellikle çarpık boyutlar için gereğinden daha fazla eleman sayısının üretilmesine sebebiyet vermektedir. Bu sebeple; tarama örgü ile altı yüzlü veya prizmatik elemanlar üretilerek çok daha az eleman sayısı ile orantısız boyutlar, kolaylıkla ve etkili bir biçimde işlenebilmektedir. Bu örgü tipi aynı zamanda; yapısal, ısısal, akustik, elektromanyetik ve kimyasal gibi birçok simülasyon arayüzünde tercih edilmektedir. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmasında; fiber taşıyıcılar arasında ince bir katman halinde epoksinin yer alması, tarama örgü tipinin kullanılmasını

desteklemiştir. Dört yüzlü veya üçgen gibi örgü çeşitlerinin kullanılması durumunda oluşturulan örgü eleman sayısı geometrinin boyutuna göre çok fazla sayıda olabilir. Daha yoğun bir örgü modeli simülasyon süresini uzatmaktadır. Eğer çok iyi şekilde örgülenen bölgelerdeki fiziksel özelliklerin değişimi önem arz etmeyecek düzeyde ise, yoğun ve sıkı örgü modeli ihmal edilebilir seviyede kabul edilebilmektedir. Bunun gibi ihmal edilebilecek düzeyde olan örgü yapıları için tarama örgü yapısının kullanılması elverişli olmaktadır.

Tarama örgü tipinin haricinde; genel olarak 4 çeşit üç boyutlu örgü eleman tipi bulunmaktadır. Bunlar; dört yüzlü (tetrahedral), altı yüzlü (hexahedral), üçgen prizma (triangular prisms) ve piramit (pyramids) olarak gruplandırılmıştır. Bu yapılar Resim 3.2’de betimlenmiştir.



Resim 3.2. Dört farklı örgü eleman yapısı [32]

Örgü elemanları, herhangi bir üç boyutlu modelde örgü oluşturmak için çeşitli kombinasyonlarda kullanılmaktadırlar. Dört yüzlü elemanlar; COMSOL çoklu fizik uygulamalarında çoğu analiz arayüzü için en bilinen ve geleneksel eleman tipidir. Diğer bir ifadeyle; herhangi bir üç boyutlu model geometrinin şekli ve topolojisinden bağımsız olarak dört yüzlü elemanlar ile örgülenebilmektedir. Buna ek olarak; uyarlanabilir örgü düzeltmesi (adaptive mesh refinement) ile birlikte kullanılabilen tek eleman tipidir. Bu sebeplerden ötürü; dört yüzlü eleman tipi simülasyonlarda tercih edilen ilk seçenek olarak değerlendirilmektedir.

Altı yüzlü, üçgen prizma ve piramit olarak adlandırılan diğer üç farklı eleman tipi ise gerekçeli bazı durumlarda kullanılmaktadır. Dikkat edilmesi gereken bir nokta ise; belirlenen bir geometride bu eleman yapıları ile her zaman örgü oluşturulamaz. Örgüleme algoritması; bu tip yapıları oluşturmak için genellikle çok daha fazla girdiye ihtiyaç duymaktadır. Bundan dolayı; çözümleme karmaşıklığına sebep olmamak amacıyla altı yüzlü,

üçgen veya piramit elemanlarına gerçekten ihtiyaç duyulup duyulmadığı sorgulanmaktadır. Piramit yapılar; sadece altıyüzlü ve dörtyüzlü örgüler arasında geçiş sağlamak amacıyla kullanılmaktadırlar. COMSOL çoklu fizik uygulamalarında; altıyüzlü ve üçgen prizma elemanlarını kullanmaktaki ilk gerekçe, örgüleme işleminde oluşturulan eleman sayısının önemli ölçüde azaltılması olarak tanımlanmaktadır. Bu tip örgü elemanları yüksek görünüm oranına² sahiptirler. Oysa ki; dörtyüzlü örgü yapısı oluşturmak için kullanılan algoritma görünüm oranını küçültme eğiliminde olacaktır [32]. Eğer yapıda; mercek altında olmayan ve analiz sonucu önem arz etmeyen bölgeler var ise, yüksek görünüm oranını sağlayan altıyüzlü ve üçgen prizma gibi elemanların kullanılması çok daha elverişlidir [32].

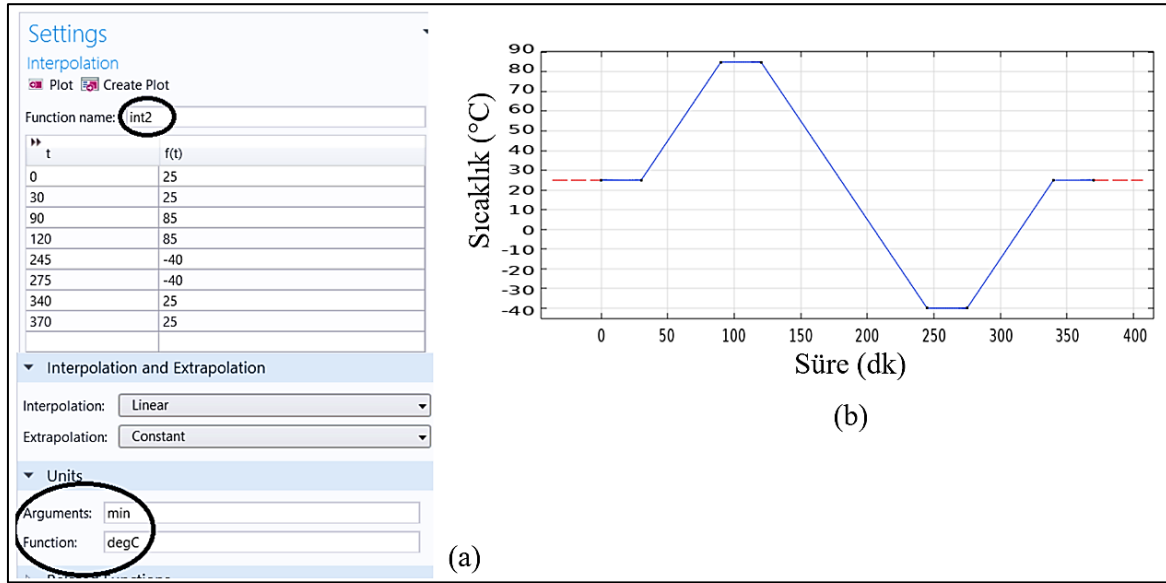
Bu çalışmadaki entegre optik aygıt modelinde fiber taşıyıcısının ön yüzeyine üçgen prizma eleman yapısı atanmıştır (Bkz. Şekil 3.4). Fiber taşıyıcı bileşeninin termo mekanik analizlere etkisi dikkate alınmadığı için, ön yüzeyi üçgen elemanlar ile örgülenerek fiber taşıyıcıların tamamı taranarak örgüleme işlemi tamamlanmıştır. Taşıyıcının içine gömülü halde bulunan fiberler yaklaşık 8 μm çapındadır. Taşıyıcının iki boyutlu ön yüz geometrisi ise mm boyutlarındadır. Bu durumda; fiberin çapı ve taşıyıcının ön yüz boyutları referans alındığında; görünüm oranı yaklaşık 1000 seviyesinde olmaktadır. Görünüm oranının yüksek olması; üçgen prizma eleman yapısının kullanılmasını desteklemektedir. Örgü analizi ile ilgili bazı dökümanlar incelendiğinde; en küçük ve en büyük boyutlu geometriler arasındaki fark 10^{-3} mertebesinde (diğer bir ifadeyle; küçük ve büyük boyutlu geometriler arasında 1000 kat fark oluşması anlamına gelmektedir) ise altıyüzlü ve prizma tipi örgü elemanlarının kullanılması uygun görülmektedir [32]. Modeldeki kristal alttaşlara, bölge 1, 2 ve 3 olarak adlandırılan epoksi tabakalarına ve kapaklara ise dörtyüzlü örgü elemanı atanmıştır. Bu bölgelerdeki yapısal analizler önem arz ettiği için ve görünüm oranı; taşıyıcı-fiber ikilisi ile karşılaştırıldığında çok daha küçük olduğundan dolayı dörtyüzlü örgü elemanının kullanılması sonuçların doğru bir şekilde değerlendirilmesine ortam hazırlamıştır.

3.4. Sınır Koşulları Tanımlanması

Malzeme tanımlaması ve örgü oluşturma işleminden sonra; modeli oluşturan parçalara sınır koşulları atanmıştır. Sınır koşulları; yürütülen analizlerin doğru sonuçlar vermesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu simülasyon çalışmasında kullanılan ısı transfer ve katı mekanik

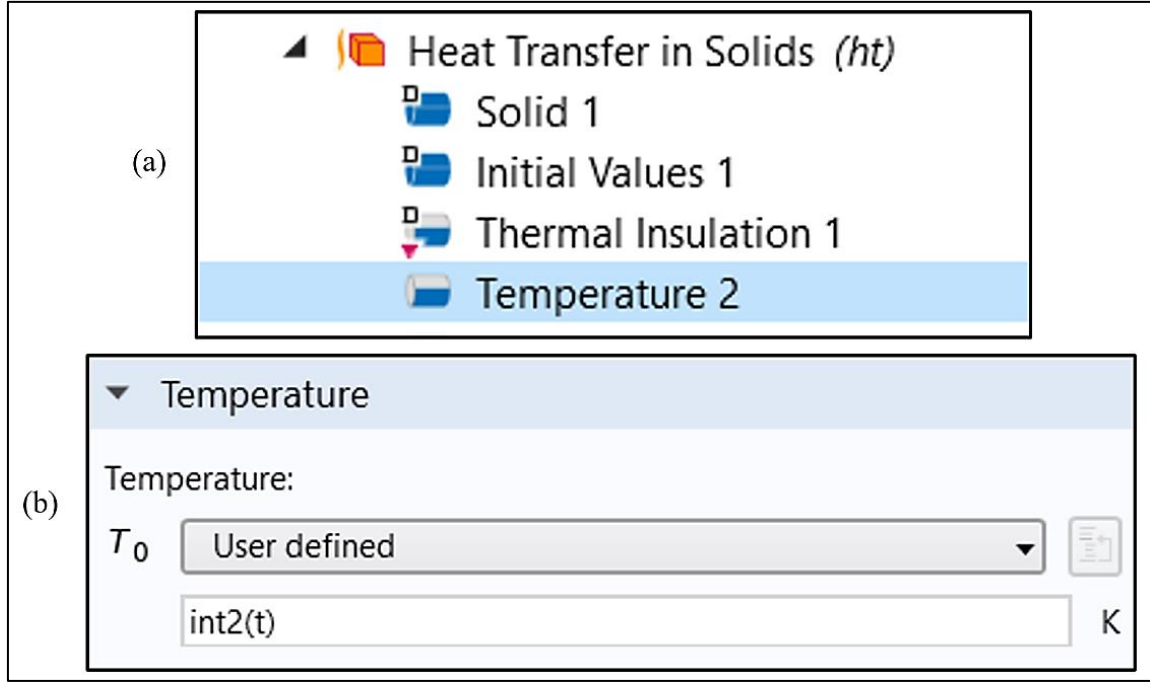
² Görünüm oranı; en uzun kenarın en kısa kenara oranı olarak tanımlanmaktadır.

modülleri için ayrı ayrı sınır koşulları tanımlanmıştır. Bu kapsamda; yapılan araştırmalar doğrultusunda ısı transfer arayüzü için sıcaklık sınır koşulu kullanılması uygun görülmüştür. Sıcaklık koşulu; üç boyutlu yapının alt yüzeyine uygulanmıştır. Analizler zamana bağlı olarak yürütüldüğü için; sıcaklık sınır koşulu tanımlaması öncesinde zamana bağlı sıcaklık profili oluşturulmuştur. Resim 3.3'te; bu profile yönelik grafik verisi ve bu kapsamda gerçekleştirilen parametrik tanımlamalar yer almaktadır.



Resim 3.3. Sıcaklık sınır koşulu için zamana bağlı parametrik tanımlamaların ve sıcaklık test profilinin oluşturulması a) Parametrik tanımlamalar b) Sıcaklık test profili

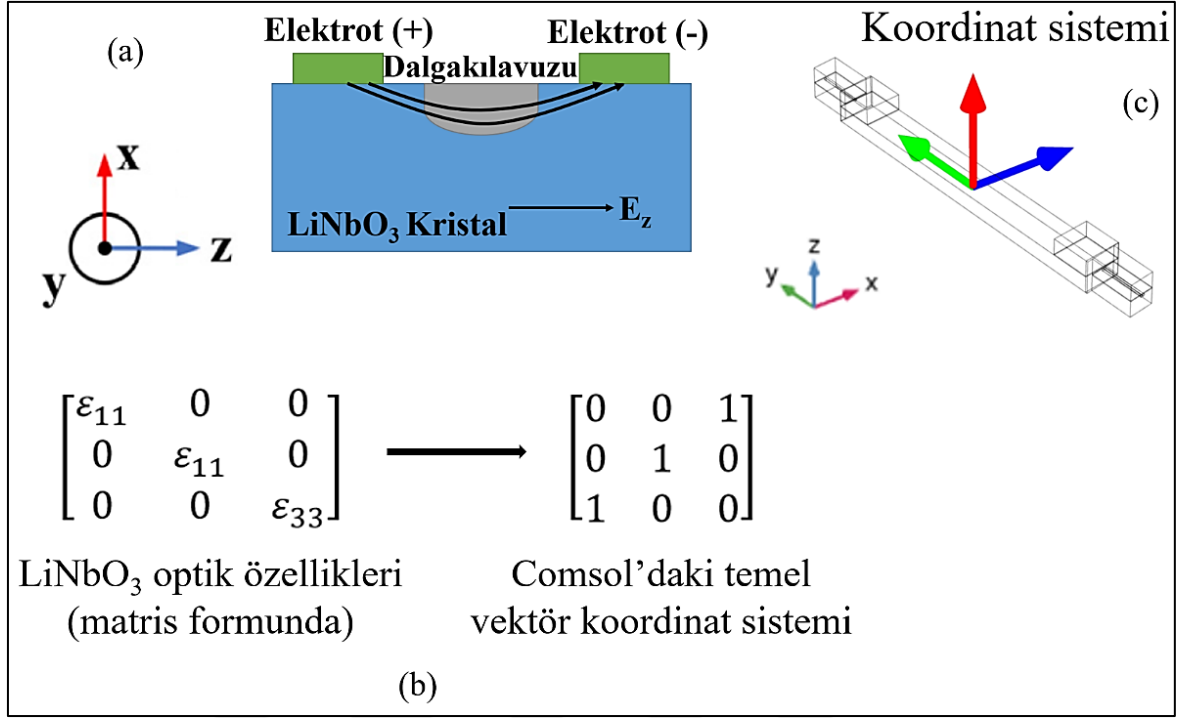
Simülasyon programının enterpolasyon (interpolation) arayüzünde; Resim 3.3a'da gösterildiği gibi zaman ve sıcaklık verileri girilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus; Resim 3.3a'da "Units" bölümünde grafiğin x ve y koordinat eksenlerinin tanımlanması gerekliliğidir. "Arguments" sekmesinde; grafiğin x eksenini zamanı betimlediği için "min" olarak tanımlanmıştır. "Function" sekmesinde ise; grafiğin y eksenini sıcaklığı betimlediği için "degC" olarak tanımlanmıştır. Her iki sekmede birimlerin tanımlanması kullanıcıya bağlı olup değişiklik gösterebilmektedir. Sonuç olarak; Resim 3.3b'de zamana bağlı sıcaklık test profili oluşturulmuştur. Dikkat edilmesi gerek diğer bir husus ise; profil oluşturulduktan sonra sıcaklık sınır koşulu sekmesine fonksiyonun doğru bir şekilde girilmesidir. Resim 3.4a'da; "Temperature2" olarak belirtilen sekme oluşturulmuş olup, Resim 3.4b'de ise "T₀" olarak belirtilen parametreye sıcaklık girdisi eklenmesi istenmiştir ve bu parametre "int2(t)" fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.



Resim 3.4. Sıcaklık sınır koşulunun oluşturulması a) Sıcaklık koşulu atanması b) Sıcaklık fonksiyonu tanımlanması

Isı transfer modülünün yanı sıra; katı mekanik modül arayüzü için de sınır koşulları tanımlanmıştır. Yapıyı oluşturan tüm bileşenler birbirine yapıştırıldığı için [33]; “rigid motion suppression” seçeneği en uygun sınır koşulu olarak belirlenmiş olup, yapıyı oluşturan tüm parçalara uygulanmıştır.

Kullanılan LiNbO_3 kristalinin yönelimi de sınır koşulu oluşturma aşamasında dikkate alınmıştır. LiNbO_3 ; piezoelektrik bir malzemedir. Piezoelektrik malzemeler anizotropik malzemeler olduğu için, bu tip malzemelerin fiziksel özellikleri yönetime bağlıdır [34]. Yapılan laboratuvar çalışmalarında; x-kesimli ve y-ilerlemeli LiNbO_3 kristaller kullanılarak fabrikasyon çalışmaları yürütülmüştür. Bu tip bir kristal için; dalgakılavuzu y eksenini boyunca uzanmaktadır, elektrik alan ise, maksimum modülasyon katsayısını elde etmek için z eksenini boyunca uygulanmıştır. x eksenini ise kristal yüzeyine dik (normal) pozisyonlanmıştır [17]. Bu sebeple; simülasyon çalışmalarında kristal yönelim dönüşümü dikkate alınmıştır. Şekil 3.5’te; x-kesimli LiNbO_3 alttaşın özellikleri kristal yönelimine göre tanımlanmıştır.



Şekil 3.5. LiNbO₃ anizotropik özellikleri tanımlaması a) Entegre optik aygıt yapısının ön kesit görüntüsü ve kristal yönelimi b) Temel vektör koordinat sistemi c) Simülasyon sonundaki kristal yönelimi

Şekil 3.5a'da; x-kesimli entegre optik aygıt yapısının ön kesit görüntüsü şematik olarak gösterilmektedir. x-kesim özelliği yapısından kaynaklanarak, dalgakılavuzu iki elektrot arasında kalacak şekilde fotolitografi maskesi tasarlanmış ve buna uygun olarak maske hizalama ve optik litografi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Oklarla gösterildiği üzere; elektrik alanın zıt kutuplu iki elektrot arasında z yönünde aktığı aşıkardır. y ekseninin sayfa düzleminden dışarı doğru olduğu varsayılarak ışık ışınlarının aygıt içerisinde bu yönde ilerlediği bilinmektedir. x eksenini ise kesim düzlemi olarak; y ve z eksenine dik olacak şekilde konumlanmıştır. Simülasyon arayüzünde; şematik olarak betimlemenin yanı sıra; kristal koordinat sistemini malzeme koordinat sistemi ile ilişkilendiren vektör seti tanımlanmıştır. Buna; temel vektör koordinat sistemi (base vector coordinate system) adı verilmektedir ve bu dönüşüm Comsol arayüzünde Şekil 3.5b'de gösterildiği gibi ortagonal koordinat sisteminin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Simülasyon çalıştırdıktan sonra; x, y ve z eksenleri Şekil 3.5c'de gösterildiği gibi dönüştürülmüştür. İlk durumdaki koordinat eksenleri renk kodları ile tanımlanmıştır. Modülatör yapısı üzerinde dönüşmüş hali gösterilmiştir. Renk kodları referans alındığında; y ekseninin yönünün değişmediği, z ekseninin modülatör yönüne dik olarak konumlandığı ve x ekseninin ise diğer iki eksene dik olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bu durumda; x-kesimli LiNbO₃ kristal yapısı elde edilmiştir.

Kristal yönelimini tanımlamak için belirtilen temel vektör sistemi Resim 3.5'te gösterilmiştir.

Settings
Base Vector System

Label: Base Vector System 2

Name: sys2

▼ Settings

— Coordinate names

First	Second	Third
x1	x2	x3

— Base vectors

	x	y	z
x1	0	0	1
x2	0	1	0
x3	1	0	0

— Simplifications

☐ Assume orthonormal

☒ Make orthonormal

▼ Relative to System from Geometry

Work plane: xy-plane

Resim 3.5. Temel vektör sistemi tanımlanması

3.5. Modül Tipinin Belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında; sıcaklığa bağlı yapısal analizler yürütülecektir. Bu sebeple; kullanılacak modüller ısı transfer modülü ve katı mekanik modülüdür. Önceki bölümlerde bu modüllere değinilmişti. Modülleri tek tek seçmek yerine; ısısal gerilim seçilerek otomatik olarak her iki modülün çalışma arayüzüne eklenmesi sağlanmıştır. Isısal gerilim modülünün ortaya çıkardığı diğer bir durum; çoklu fizik adı altında ısı transfer ve katı mekanik modüllerinin işlevsel olarak birbirine bağlandığı gerçeğidir. Böylelikle; ilk önce ısısal çözümlemeler yapılacak ve elde edilen sonuçlar yapısal analiz için kullanılacaktır.

Isı transfer ve katı mekanik modülü için çözülen ana denklemler; Eş. 3.1, Eş. 3.2 ve Eş. 3.3'teki gibi ifade edilmiştir.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q + Q_{ted} \quad (3.1)$$

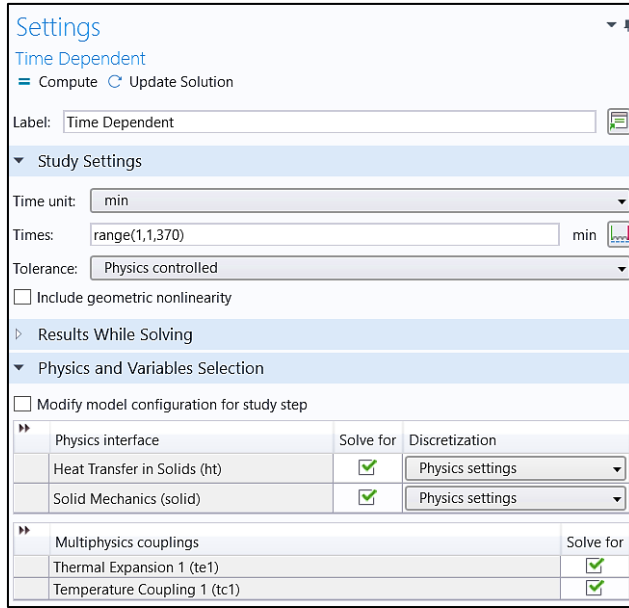
$$S = S_{ad} + C : (\epsilon - \epsilon_{inel}) \quad (3.2)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2} [\nabla u]^T + \nabla u \quad (3.3)$$

Eş. 3.1; ısı transfer eşitliğini açıklamaktadır. Burada; T sıcaklık, ρ yoğunluk, C_p sabit basınçta öz ısı, Q hacimsel ısıyı simgelemektedir. Eş. 3.2; katı mekanik analizi ile ilgili bir denklemdir ve malzemenin gerilme-gerinim ilişkisini açıklamaktadır. Bu eşitlikte; S gerilme tensörü, C elastikiyet tensörü ve ϵ ise gerinim tensörüdür. Eş. 3.3'te gerinim tensörünün açık ifadesine yer verilmiştir.

3.6. Analiz Tipinin Belirlenmesi

Analizler zamana bağlı olarak yürütülmüştür. Simülasyon arayüzünde; “time-dependent analysis” olarak ilgili arayüz seçilmiştir. Zamana bağlı analiz; alan değişkenleri zaman içinde değişim gösterdiği durumlarda kullanılmaktadır. Örneğin; ısı transferinde, zaman içinde meydana gelen sıcaklık değişimlerini hesaplamak amacıyla tercih edilmektedir. Katı mekanik modülünde ise; zamana bağlı değişken deformasyonları ve geçici yüklemelere maruz kalan katı hareketlerini hesaplamak amacıyla kullanılmaktadır. Zamana bağlı simülasyonlar için önem arz eden diğer bir husus; başlangıç sınır değerleri ve uygulanan sınır koşullarının simülasyon başlangıç zamanında eşleşip eşleşmediğini kontrol etmektir. Eğer uyuma olmaz ise, fiziksel olmayan durum söz konusudur ve çözümlemeye engel teşkil etmektedir. Yapılan simülasyon çalışmalarında; özellikle kullanılan sınır koşulu ve örgü yapısının analiz türüne doğrudan etki ettiği gözlemlenmiştir. İlgili analiz arayüzünün görüntüsü Resim 3.6'da gösterilmiştir.

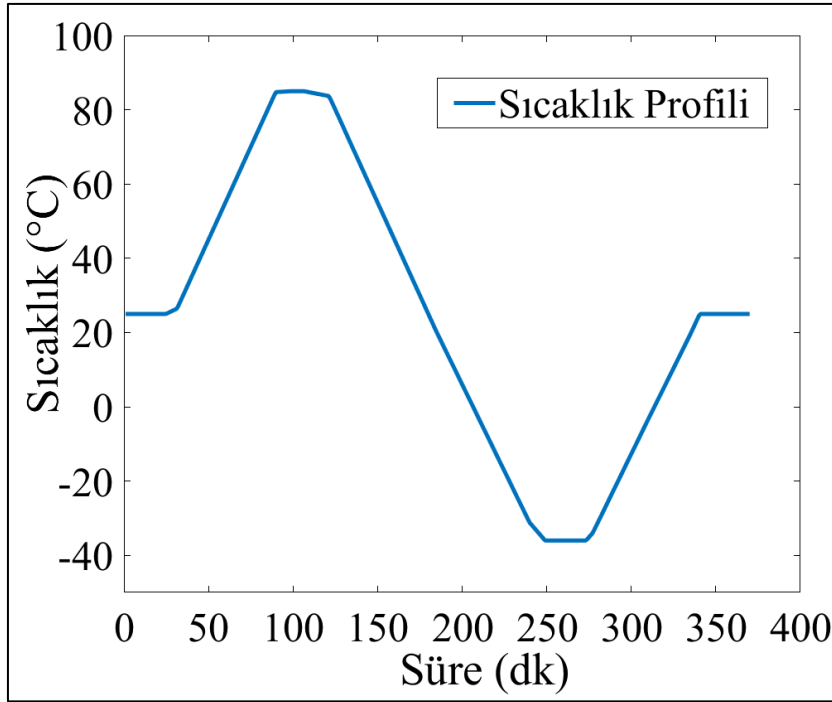


Resim 3.6. Zamana bağlı analiz program arayüzü

Resim 3.6’da gösterildiği gibi; analizin yürütülebilmesi için gerekli temel parametreler, zaman aralığı ve kullanılacak zaman birimidir. Termo mekanik çalışmalar yürütüldüğü için, ısı transfer ve katı mekanik modüllerinin her ikisi de analiz ve çözümleme işlemlerine dahil edilmiştir.

3.7. Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Zamana bağlı simülasyonlar; 5 farklı yapısal durum göz önünde bulundurularak yürütülmüştür. Çalışmalar Şekil 3.6’da gösterildiği gibi, 1 °C/dk sıcaklık hızı ile -40 °C ; +85 °C sıcaklık aralığında yürütülmüştür.



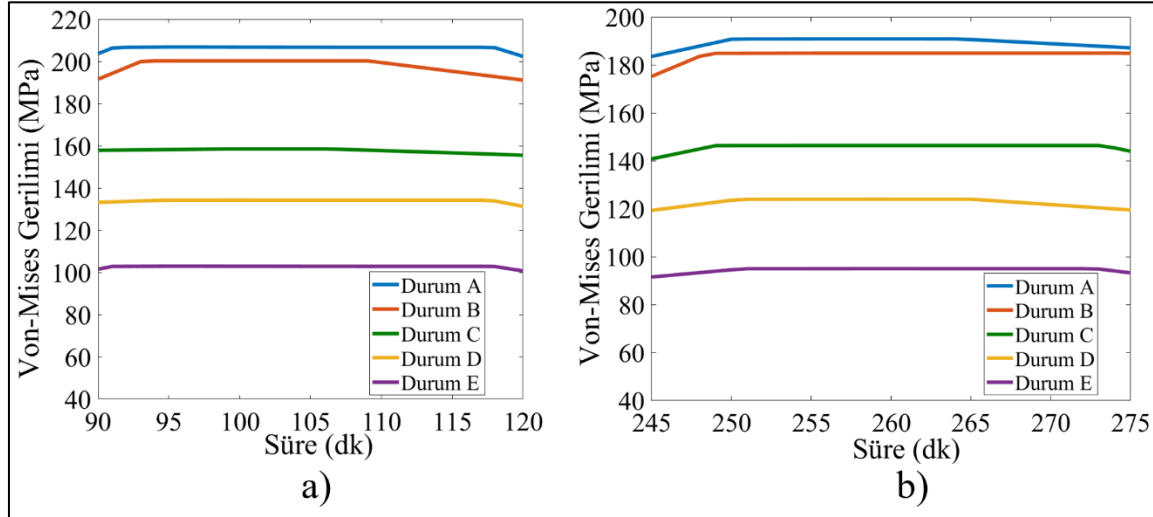
Şekil 3.6. Simülasyon çalışmalarında kullanılan sıcaklık test profili

Test profili dikkate alındığında; 95 dk – 125 dk zaman aralığında +85 °C'ye ulaşılırken; 255 dk – 285 dk zaman aralığında ise -40 °C'ye ulaşılmaktadır.

Tez çalışmasında genel olarak Von-Mises gerilim dağılımı analizi yapılmıştır. Von-Mises gerilimi; bir malzemenin şeklinde meydana gelen deformasyon ile ilişkilendirilen bir gerilim türüdür. Malzeme bilimi ve mühendisliğinde Von-Mises gerilimi formüllerle de ifade edilebilmektedir. Von-Mises gerilimi; malzemelerin herhangi bir yükleme durumu altında akma dayanımını öngörebilmek amacıyla kullanılmaktadır. Tez çalışması kapsamında; analiz edilecek olan malzemelerde ısısal etkiler altında meydana gelen şekil değişimi elastik bölgede kalmaktadır. Diğer bir ifadeyle; ısısal etkiler altında bozulan aygıtlar test sonunda düzelmektedir ve çıkış sinyalleri neredeyse başlangıç seviyesi ile aynı değere ulaşmaktadır (Bkz. Şekil 2.6). Sıcaklık etkisi altında malzemede herhangi bir kalıcı değişim olmamaktadır. Bu sebeple; analiz edilecek gerilim türü “Von-Mises gerilimi” olarak belirlenmiştir.

Simülasyon çalışmaları; ilk olarak bölge 1 epoksi katmanı dikkate alınarak yürütülmüştür. Fiber taşıyıcı ve LiNbO₃ optik aygıt arayüzündeki epoksi katmanının deformasyonu fiber optik aygıtın güvenilirliğini bozan bozulma mekanizmalarından biri olarak kabul edildiği için [27]; analizler ilk olarak bölge 1 (Bkz. Şekil 3.3) kapsamında tüm yapısal durumlar

referans alınarak yürütülmüştür. Şekil 3.7’de; bölge 1 üzerinde indüklenen gerilim dağılımı grafiksel olarak analiz edilmiştir.

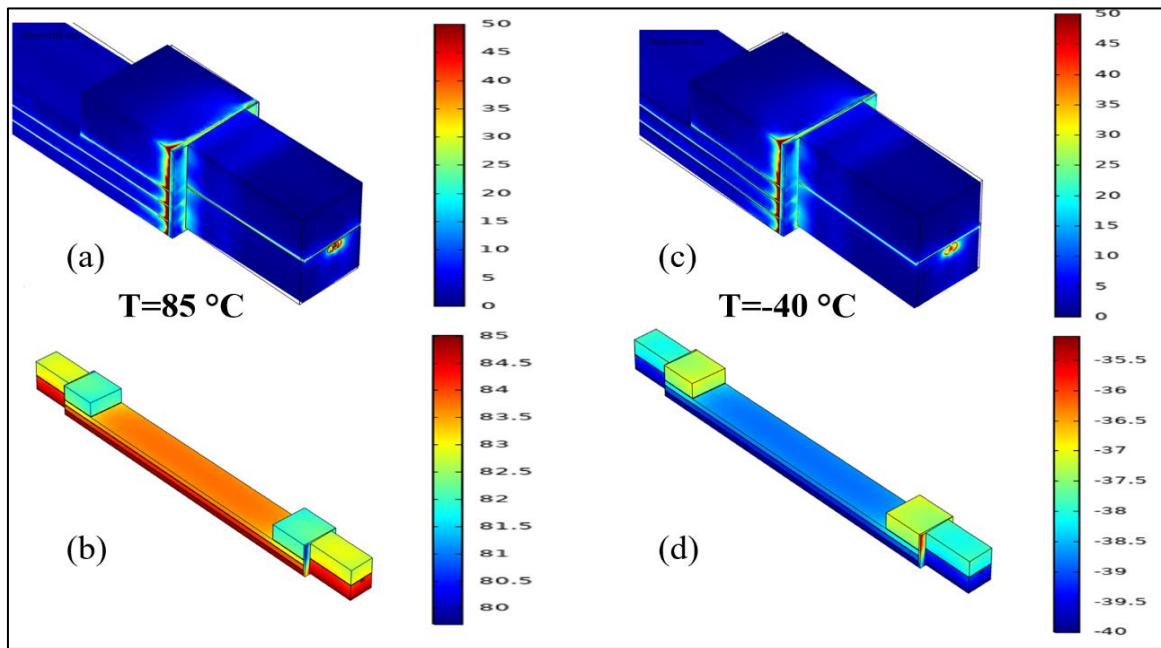


Şekil 3.7. Durum A, B, C, D ve E için yüksek ve düşük sıcaklıklarda bölge 1 üzerindeki gerilim dağılımı analizi a) T=+85 °C’de b) T=-40 °C’de

Şekil 3.7a’da; T=+85 °C civarındaki gerilim yoğunluğu gösterilirken, Şekil 3.7b’de ise T=-40 °C civarındaki gerilim yoğunluğu gösterilmektedir. Grafiklerden de anlaşılabileceği gibi; fiber optik aygıtın yapısal değişimi gerilim seviyesi üzerinde kayda değer bir etki yaratmaktadır. Durum A fiber taşıyıcı ve optik aygıt arasında kalan epoksi tabakası üzerinde en yüksek düzeyde gerilim indüklerken, durum E en düşük seviyede gerilim indüklemektedir. Burada şu açıklama yapılabilir: durum E iki ayrı tek kristalden oluşmaktadır ve bu kristaller birbirine epoksi ile yapıştırılmıştır. Bileşen sayısı bu konfigürasyonda daha fazla olduğu için, örgü eleman sayısının diğer durumlarla kıyaslandığında daha yüksek olması normaldir. Durum E için bölge 1’in örgü eleman sayısı 7665 iken, durum A için 6865’tir. Normal şartlarda; örgü eleman sayısının artması, matematiksel olarak daha yoğun bir çözümleme işlemi gerektireceği için gerilim seviyesinin artması beklenebilir. Ancak durum E yapısında yer alan bölge 1 bileşeni en yüksek örgü eleman sayısına sahip olmasına rağmen (Bkz. Çizelge 3.3), gerilim konsantrasyonu en düşük düzeyde kalmıştır. Durum E’de daha düşük seviyede gerilim indüklenmesi, bu konfigürasyonun teorikte elverişli ve üretime uygun bir yapı olabileceğini ortaya koymaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışmada; fiber taşıyıcı ve aygıt arasındaki bileşim bölgesinde, sıcaklık değişimleri sebebiyle meydana gelen gerilim yoğunluğu üzerinde odaklanılmıştır. Bu konu ile bağlantılı olarak; bir literatür çalışmasında bahsedilen bileşim

bölgesindeki ısısal gerilim simülasyonlar aracılığı ile benzer şekilde analiz edilmiştir [2] ve indüklenen gerilimden kaynaklanan toplam yerdeğiştirme analizi makalenin başlıca konusunu oluşturmuştur. İncelenen bu tip makaleler [2] yazılan bu teze referans olmakla birlikte, gerçekleştirilen analizlerin doğru bir şekilde ilerlediğini ve literatürle tutarlı bir seviyede olduğunu gözler önüne sermektedir.

Bölge 1 üzerinde indüklenen en düşük gerilim seviyesi durum E’de elde edildiği için, gerilim ve sıcaklık dağılımı bu geometrik yapı için Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

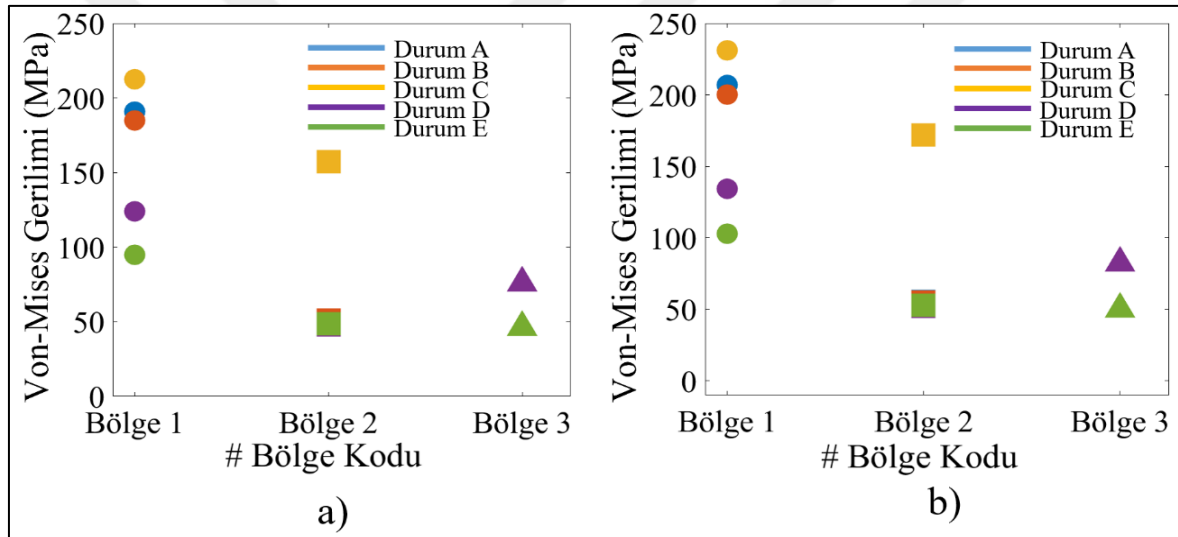


Şekil 3.8. Durum E için gerilim ve sıcaklık analizleri a) $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki gerilim dağılımı b) $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki sıcaklık dağılımı c) $T=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki gerilim dağılımı d) $T=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki sıcaklık dağılımı

Şekil 3.8a ve Şekil 3.8b; $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de tüm yapı için gerilim ve sıcaklık değişimlerini gösterirken, Şekil 3.8c ve Şekil 3.8d ise $T=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki gerilim ve sıcaklık değişimlerini temsil etmektedir. Doğru bir görsel karşılaştırma yapabilmek için; yüksek ve düşük sıcaklıklarda gerilim seviyesi aynı aralıkta sabitlenmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi; sıcaklık etkisiyle fiber taşıyıcı/aygıt arasındaki birleşim bölgesinde kenar çeperlere doğru gerilim seviyesi artmaktadır. Bu durum; bahsedilen bölgede sıcaklık değişimi esnasında deformasyon varlığına işaret etmektedir. Ayrıca; kapak parçalarının köşelerinde modelin geri kalanına göre nispeten daha fazla gerilim indüklendiği görülmektedir. Bu yoğunlaşmanın sebebi; geometrik tekillik (singularity) olarak açıklanmaktadır.

Kullanılan fiber taşıyıcılar ticari malzemelerdir ve laboratuvar koşullarımızda üretilmemektedir. Bu sebeple; alt ve üst fiber taşıyıcılar arasındaki epoksi katmanları simülasyonlar sırasında ihmal edilmiştir. Buna ek olarak; bu bölgenin örgü tipi, diğer epoksi bölgelerine atanan örgü tiplerinden farklıdır. Örgü yapıları farklı olduğu için çözümleme işlemi de farklı olmaktadır. Dolayısıyla; bu bölgeyi yapının geri kalanı ile karşılaştırmak uygun görülmemiştir.

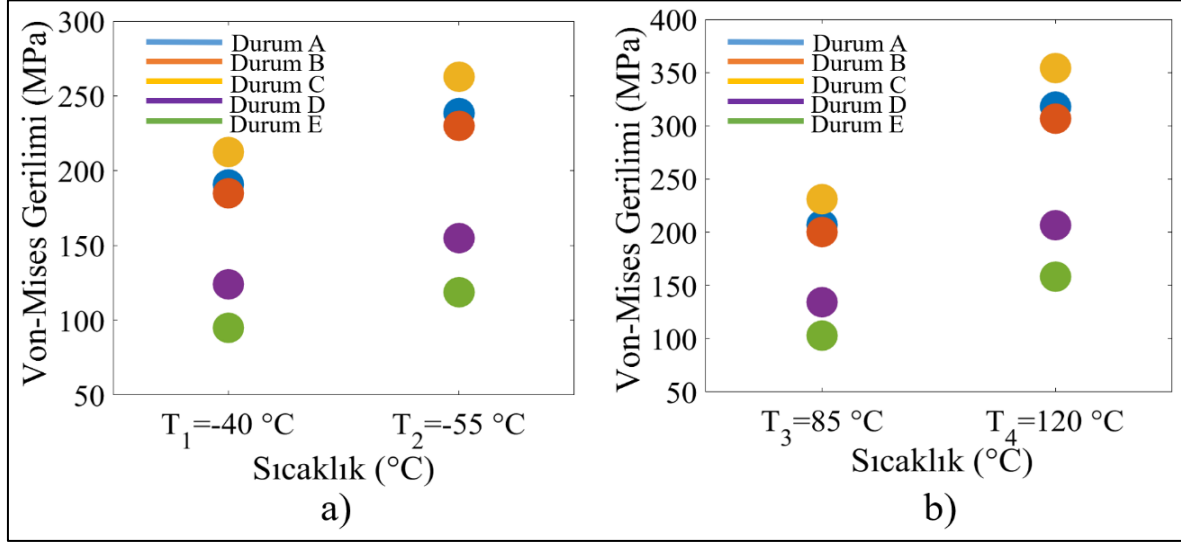
Bölge 1, bölge 2 ve bölge 3'ün gerilim dağılımı analizi yüksek ve düşük sıcaklık bölgelerinde tüm durum yapıları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9'da sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Tüm durumlar için bölge 1, 2 ve 3 üzerindeki gerilim dağılımı a) T=85 °C'de b) T=-40 °C'de

Şekil 3.9a ve Şekil 3.9b'de; bölge 1, 2 ve 3 olarak adlandırılan epoksi tabakaları sırasıyla daire, kare ve üçgen imleçler ile temsil edilmiştir. Yüksek ve düşük sıcaklıklarda herbir durum yapısı için bölge 1'in, bölge 2 ve bölge 3 ile kıyaslandığında en yüksek seviyede gerilime sahip olduğu açıkça görülmektedir. Diğer bir ifadeyle; LiNbO₃ kristal ile fiber taşıyıcılar arasındaki epoksi tabakası fiber optik aygıtın mekanik dayanımını baskılayan ana kaynak olarak değerlendirilebilir. Bölge 3 epoksi tabakası sadece durum D ve E'de mevcut olduğu için A, B ve C geometrilerinde dikkate alınmamıştır. Ayrıca, maksimum ve minimum gerilim seviyeleri arasındaki fark %50 bandında kalmaktadır. Bu sonuç; bölge 1 üzerinde indüklenen gerilim seviyesinin önem arz ettiğini göstermektedir. Durum E her ne kadar simülasyonlara dahil edilse de; deneysel hesaplamalara dahil edilmemiştir.

Sıcaklık artış ve azalışının etkisini irdelemek amacıyla; Şekil 3.10'da gösterildiği gibi, bölge 1 için $T=-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ve $T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de çalışmalar yürütülmüştür.



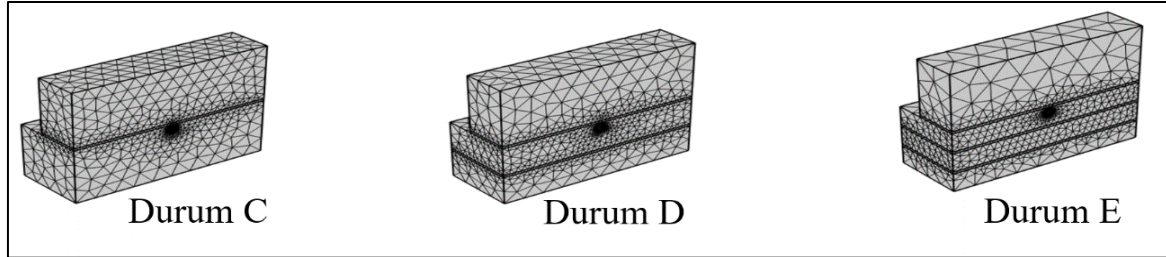
Şekil 3.10. Bölge 1 için sıcaklık değişimine göre gerilim analizi karşılaştırması a) $T_1 = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $T_2 = -55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de b) $T_3 = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $T_4 = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de

Sıcaklık artış veya azalışı farketmeksizin, uç sıcaklık değerlerinin bölgesel olarak gerilim yoğunluğunu artırdığı aşıkardır. Şekil 3.10a'da görüldüğü gibi; sıcaklık $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye düşürüldüğünde, bölge 1 üzerindeki gerilim seviyesi durum D için 155 MPa'a ve durum E için ise 120 MPa'a yükselmektedir. Benzer şekilde Şekil 3.10b incelendiğinde ise; sıcaklık değeri $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseltildiğinde, durum D için gerilim seviyesi 210 MPa'a kadar artmakla birlikte, durum E için 160 MPa seviyelerine ulaşmaktadır. Bu sonuçlar; sıcaklık artış ve azalışının ısısal gerilim faktörü olduğunu göstermekte ve yapıda deformasyon kaynaklı bazı mekanik kusurlara sebep olabileceği öngörülmektedir.

3.8. Sıcaklık Yükleme Altında Dalgakılavuzu Bölgesindeki Gerilim Dağılımı ve Güç Akışı Analizi

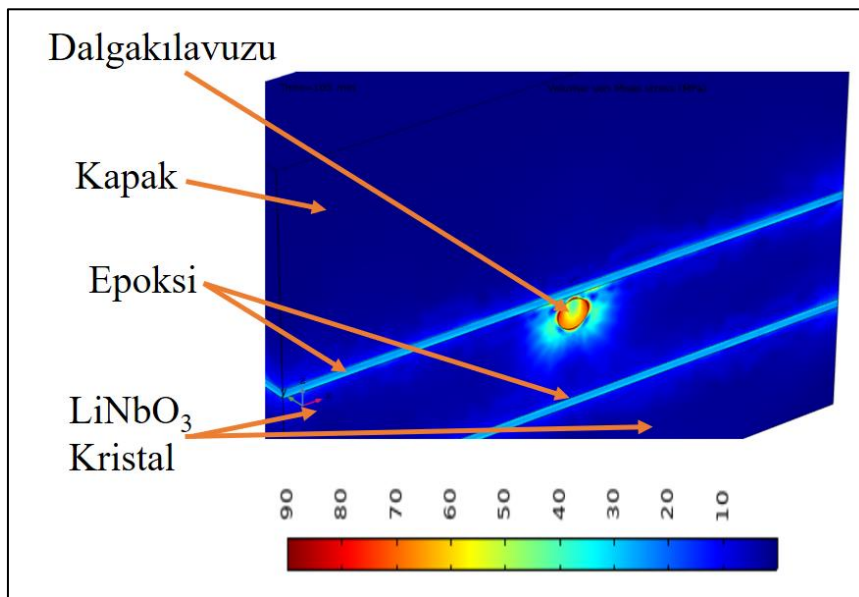
Mekanik bozulmaların yanı sıra; sıcaklık yüklemeleri altında meydana gelen iç gerilim, yapı üzerinde kaydadeğer bir etki yaratmaktadır ve dalgakılavuzu üzerinde kırılma indisi kararsızlıkları ile sonuçlanan bazı olumsuzluklara sebep olmaktadır [35]. Bu konudaki literatür çalışması referans alınarak; çalışmalarımızda dalgakılavuzu üzerinde indüklenen gerilim termo mekanik simülasyonlar ile analiz edilmiştir. Dalgakılavuzu malzemesi olarak Ti difüzyonlu LiNbO_3 seçilmiştir (Bkz. Çizelge 3.2). Matematiksel çözümleme süresini

azaltmak ve çözümlemeyi yapacak olan bilgisayarın hafızasından yer kazanabilmek amacıyla; örgüleme işlemini kolaylaştırması açısından sadece dalgakılavuzu, kapak, LiNbO_3 kristal ve epoksi tabakalarını (bölge 2/bölge 3) içeren nispeten çok daha az boyutlu bir alan dikkate alınmıştır. Çalışmalar tüm durumlar için yürütülmesine rağmen, Şekil 3.11’de durum C, D ve E için örgü analizi örnek olması açısından gösterilmiştir.



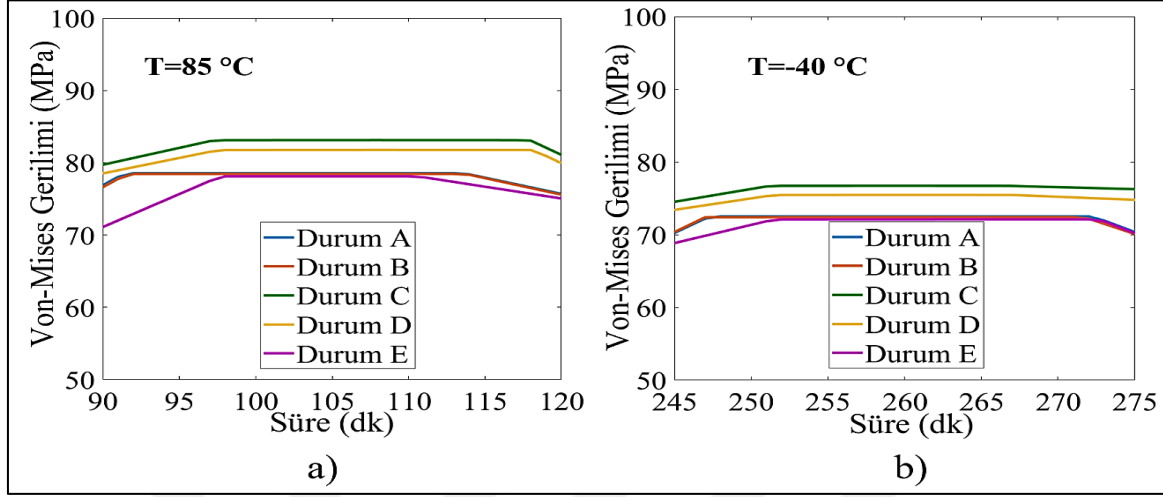
Şekil 3.11. Dalgakılavuzu, kapak, LiNbO_3 kristal ve epoksi bileşiminden oluşan yapının örgü analizi

Güvenilir bir analiz yapabilmek amacıyla; dalgakılavuzu bölgesinin örgü eleman boyutu modelin geri kalanından daha küçük olacak şekilde ayarlanmıştır. Asıl incelenecek bölge dalgakılavuzu bölgesi olduğundan dolayı, bu alanın örgü yapısı yüksek çözünürlüklü olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 3.12’de gösterildiği gibi; sıcaklık yüklemesi altında en yoğun gerilim birikmesi dalgakılavuzunun kenar çeperlerinde oluşmaktadır. Yapılan incelemeler ve değerlendirmeler doğrultusunda; yüksek/düşük sıcaklık veya yapısal durum farketmeksizin Şekil 3.12’de olduğu gibi benzer bir dağılım elde edildiği saptanmıştır.



Şekil 3.12. Dalgakılavuzu bölgesindeki gerilim konsantrasyonunun incelenmesi

Bunun yanı sıra; tüm durumlar için dalgakılavuzu bölgesinde indüklenen gerilim, nicelik bakımından Şekil 3.13'teki gibi grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.13. Dalgakılavuzu bölgesindeki gerilim analizi a) $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de b) $T=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de

İncelemeler doğrultusunda; Şekil 3.13a ve Şekil 3.13b'de tüm durumlar için benzer seviyede sonuçlar elde edilmiştir. Durum E haricindeki diğer geometriler dikkate alındığında; maksimum ve minimum gerilim seviyeleri arasındaki fark %5-%6 bandında kalmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında; dalgakılavuzu nüvesi içerisinde indüklenen gerilime bağlı optik geçirgenlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Çizgisel gerilim-optik eşitliği; Eş. 3.4'teki gibi tanımlanmaktadır.

$$\Delta n_{ij} = -B_{ijkl}S_{kl} \quad (3.4)$$

Burada; Δn_{ij} kırılma indisi tensörü, B_{ijkl} gerilim-optik tensörü ve S_{kl} gerilim tensörü olarak tanımlanan parametrelerdir. İlgili eşitlikler tensör formunda gösterilmektedir [36,37]. Kırılma indisi bileşenleri Eş. 3.5, 3.6 ve 3.7'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. n_0 , gerilim-bağımsız durum için kırılma indisi parametresini tanımlamaktadır.

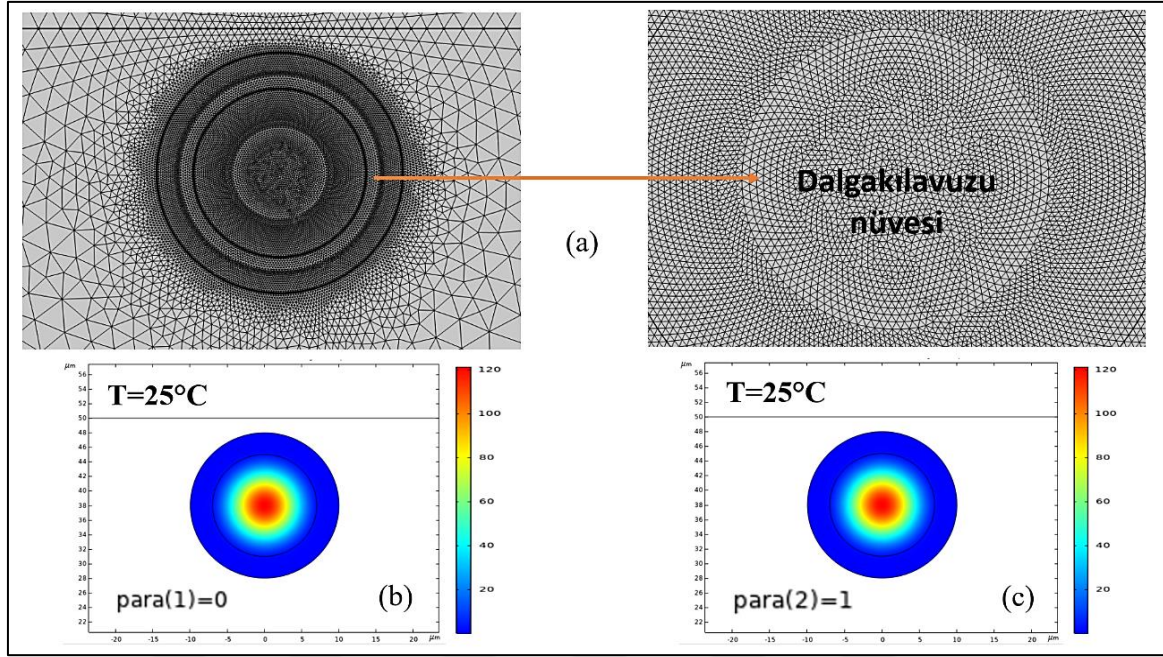
$$n_x = n_0 - B_1S_x - B_2(S_y+S_z) \quad (3.5)$$

$$n_y = n_0 - B_1S_y - B_2(S_z+S_x) \quad (3.6)$$

$$n_z = n_0 - B_1S_z - B_2(S_x+S_y) \quad (3.7)$$

LiNbO₃ malzemesi için gerekli tüm parametreler mevcuttur [37]. Çözümler, kırılma indisi tensör eşitliklerini Comsol yazılımında değişken olarak tanımlayarak elde edilmiştir. Dalgakılavuzu üzerindeki sıcaklığa bağlı gerilim-optik etkileri incelemek için, katı mekanik modülü ve elektromanyetik dalga modülleri bir arada kullanılmıştır. Sıcaklık parametresi katı mekanik modülünde sınır koşulu olarak eklenmiştir. Analiz tipi üç ayrı adımda oluşturulmuştur. Diğer bir ifadeyle; statik adımda elde edilen sıcaklığa bağlı gerilim analizi sonuçları mod analiz adımımda kullanılmıştır. Böylece; dalgakılavuzu içindeki mod tiplerinin belirlenmesi ve güç akışının analiz edilmesi amaçlanmıştır. Son parametrik adım ise gerilim bağımlı/bağımsız durumu hesaba katmak için kullanılmıştır.

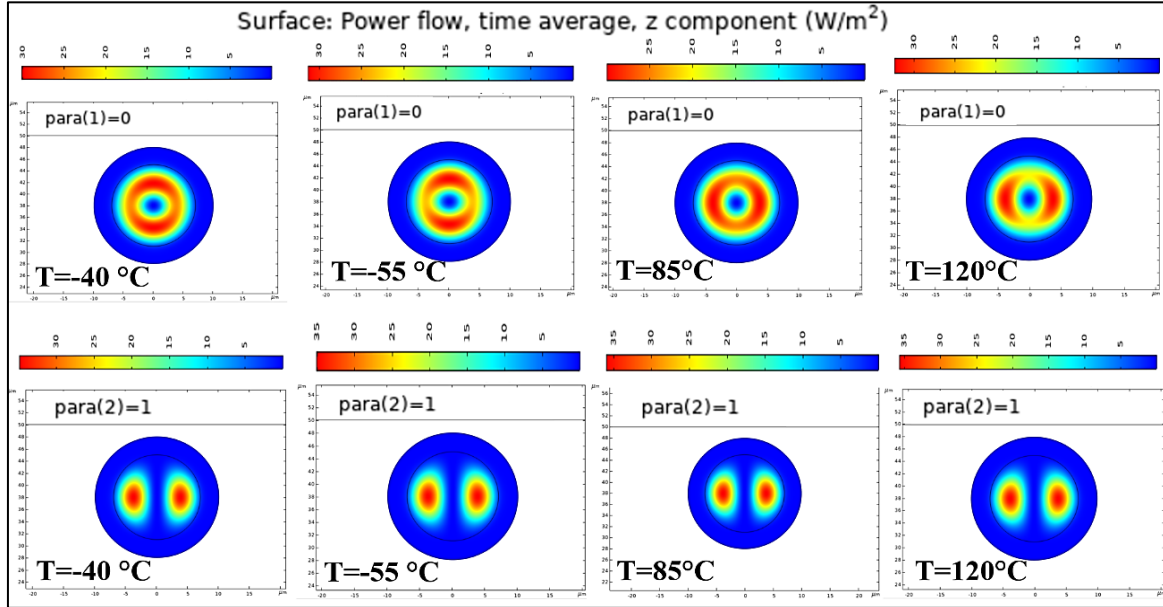
Dalgakılavuzu içindeki optik geçirgenlik, geometrik yapıdan bağımsız olarak incelenmiştir ve sıcaklık bir gerilim faktörü olarak ele alınmıştır. Şekil 3.14'te; dalgakılavuzu örgü dağılımı ve oda sıcaklığında dalgakılavuzu merkezinde oluşan güç akışı gösterilmiştir. Model yapısını basitleştirmek için ve çözümleme süresini nispeten kısaltmak için sadece iki boyutlu dalgakılavuzu bölgesi dikkate alınmıştır. Dalgakılavuzu nüvesi Şekil 3.14a'daki gibi örgülenmiştir. Tutarlı simülasyon analizleri yapabilmek amacıyla; sonuçlar gerilim-bağımsız ve gerilim-bağımlı olmak üzere iki koşul için irdelenmiştir. Gerilim-bağımsız durum; para(1)=0 olarak etiketlenirken, gerilim-bağımlı durum ise para(2)=1 olarak etiketlenmiştir. 0 ve 1 durumlarının her ikisi de ilgili eşitliklere sayısal değer olarak eklenmiştir. Şekil 3.14b ve Şekil 3.14c'den anlaşılabileceği gibi mod şekli oda sıcaklığında değişmemektedir. Ayrıca; gücün büyük bir kısmı merkez bölgede yoğunlaşmaktadır. Bu durum; gerilim etkisi gözetmeksizin oda sıcaklığında dalgakılavuzu merkezinde optik iletimin homojen ve sabit düzeyde kaldığını göstermektedir.



Şekil 3.14. Oda sıcaklığında dalgakılavuzu nüvesi içindeki örgü dağılımı ve güç akışı
a) Örgü dağılımı b) Gerilim-bağımsız durum için güç akışı b) Gerilim-bağımlı durum için güç akışı analizi

Oda sıcaklığı simülasyonlarının yanı sıra; bu tez kapsamında sıcaklık değişimleri altında dalgakılavuzu içerisindeki güç iletimi de mercek altına alınmıştır. Şekil 3.15'te; $T=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T=-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık değerlerinde gerilim etkisi dikkate alınarak bazı bulgular elde edilmiştir. Gerilim etkisi; oda sıcaklığı analizlerinde olduğu gibi parametrik olarak 0/1 şeklinde dikkate alınmıştır. Diğer bir ifadeyle hem gerilim etkisi, hem de sıcaklık etkisi ayrı ayrı değerlendirilerek mod analizleri gerçekleştirilmiştir. para(1)=0 sabit iken negatif ve pozitif sıcaklıklarda, nüvenin merkezinde kırmızı renkli yoğun güç akışının temsil edildiği alan azalmakta ve kenar çeperlere doğru güç akışında kayma meydana gelmektedir. Bunun yanı sıra; $T=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 'den $T=-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye sıcaklık düşürüldüğünde veya $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den $T=120$ 'ye sıcaklık yükseltildiğinde, kenar çeperlerdeki kırmızı renkteki güç yoğunluğu nispeten azalmaktadır ve bu durum zayıf güç akışının meydana geldiğini göstermektedir. Sıcaklık değeri negatif veya pozitif değerde sabit tutulup 0 ve 1 durumuna göre kıyaslama yapıldığında ise; 1 konumunda iken homojen yapının bozulduğu ve güç iletiminin dalgakılavuzunun kenarlarında parçalı şekilde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum; mod yapısında bozulma meydana geldiğini açıklamaktadır. Elde edilen bu sonuçlar; gerilim faktörünün optik iletimi önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. Merkezdeki güç yoğunluğunun azalıp, kenar bölgelere doğru artması kararlılık seviyesinin bozulduğunu ve optik iletimin bu bağlamda merkez bölgede azaldığını göstermektedir. Dalgakılavuzuna

yönelik gerçekleştirilen bu çalışmalar; hem sıcaklık hem de mekanik faktörlerin optik güç iletimi üzerinde etkili olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 3.15. Gerilim-bağımsız (0) ve gerilim-bağımlı (1) durum için $T=-40\text{ °C}$, $T=-55\text{ °C}$, $T=85\text{ °C}$ ve $T=120\text{ °C}$ 'de dalgakılavuzu içindeki güç akışı analizi

3.9. Entegre Optik Aygıtların Oda Sıcaklığındaki Optik Karakterizasyonları

Simülasyon kapsamında yapılan çalışmaları desteklemek amacıyla; oda sıcaklığında bazı istatistiksel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. MIOC; bir çeşit fiber optik modülatördür. Genellikle; bu tip yapılar için paketlenme gereksinimleri önemli bir yere sahiptir. Bir literatür çalışmasında [20]; LiNbO_3 modülatörün FOD sensörleri gibi uzay uygulamalarında bir gereklilik olduğu savunulmuştur. Özellikle; bu tip sensörlerde kullanılacak olan bileşenler şok, titreşim gibi çevresel etmenlere karşı dayanıklı olmak zorundadırlar. Modülatör güvenilirliği değişken ortam koşullarında kritik öneme sahip olduğu kadar [20] oda sıcaklığında da dikkate alınması gereken bir husustur. Bu sebeple; literatür çalışmalarından farklı olarak oda sıcaklığında elde edilen bazı istatistiksel veri analiz sonuçları, simülasyon ortamından elde edilen sonuçlar ile ilişkilendirilmiştir. Analizler; durum A, B, C ve D için toplam geçirgenlik ve ayırma oranı ölçümleri yapılarak yürütülmüştür. Sonuçlar Çizelge 3.4'te yüzdesel olarak tablo halinde listelenmiştir.

Çizelge 3.4. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen toplam geçirgenlik ve ayırma oranı analizleri

Durum	Giriş Kol		Çıkış Kol		Giriş ve Çıkış Geçirgenlik Değerleri Arasındaki Fark (%)
	Toplam Geçirgenlik Ortalaması (%)	Ayırma Oranı Ortalaması (%)	Toplam Geçirgenlik Ortalaması (%)	Ayırma Oranı Ortalaması (%)	
A-B-C	44,4	50,3/49,7	37,1	50,0/50,0	7,3
D	49,4	50,0/50,0	42,3	50,0/50,0	7,1

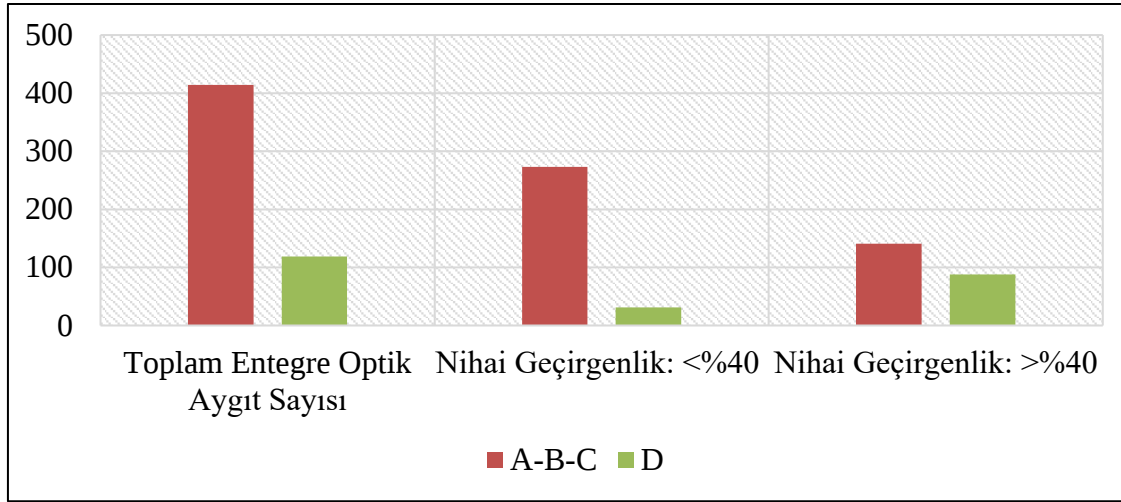
Geometrik yapı farketmeksizin optik gücün elektro optik aygıt içindeki soğurulması ile açığa çıkan durumun bir sonucu olarak; çıkış kolu toplam geçirgenlik ortalaması, giriş kolu toplam geçirgenlik ortalamasından daha düşük seyretmektedir. Dahası; durum D'den elde edilen aygıtlar için giriş ve çıkış kolu toplam geçirgenlik ortalaması, durum A-B-C'den elde edilen aygıtların giriş ve çıkış toplam geçirgenlik ortalamasından %5 kadar daha yüksektir. Çıkış kolu toplam geçirgenlik değerleri; fiber taşıyıcı ve optik aygıtın birbirine yapıştırılması işleminden sonra elde edildiği için aygıt performansı açısından önem arz etmektedir.

Tez kapsamında değerlendirilen aygıtlar seri üretim sürecinden çıkan entegre optik aygıtlardır. Bu aygıtların; yürütülen projeler kapsamında savunma sektöründe kullanılabilmeleri için birtakım kararlılık şartlarını yerine getirmeleri gerekmektedir. Bu kapsamda; aygıtlar %40 geçirgenlik değeri eşik limiti dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Çizelge 3.5'te; durum A, B, C ve D konfigürasyonlarında üretilmiş ve seri üretim sürecine dahil olan entegre optik aygıtların toplam geçirgenlik değerine göre sınıflandırılması gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Durum A, B, C ve D için aygıtların toplam geçirgenlik değerine göre sınıflandırılması

Durum	Toplam Entegre Optik Aygıt Sayısı	Nihai Geçirgenlik: <%40	Nihai Geçirgenlik: >%40
A-B-C	414	273	141
D	119	31	88

A, B ve C kategorisinde toplam 414 aygıt üretimi yapılmışken, bu aygıtların 141'i %40 üstü geçirgenlik değerine sahip olarak kayıtlara geçmiştir. Sadece durum D incelendiğinde ise; toplamda 119 aygıt üretimi laboratuvar koşullarında üretilmiş olup, bu aygıtların 88'i %40 üstü geçirgenlik değerine sahiptir. Bu veriler aynı zamanda Şekil 3.16'da histogram üzerinde istatistiksel dağılım olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Durum A, B, C ve D kategorisinde üretilen entegre optik aygıtların toplam geçirgenlik değerine göre istatistiksel dağılımı

Şekil 3.16 incelendiğinde; A-B-C kategorilerinde üretilen aygıtların toplam sayısı durum D'de üretilenlere göre çok daha fazla olmasına rağmen, durum D'ye ait olan entegre optik aygıtlar içerisinde %40 üstü geçirgenlik değerine sahip olanlar yüzdesel olarak fazladır. Bu sonuç; D yapısında daha kararlı aygıtlar üretildiği gerçeğini desteklemektedir ve kullanım alanına göre sensörlerin sistem performansına olumlu yönde etki etmektedir. Bu analizlerle; durum D'nin seri üretim sürecinde kullanılmaya daha elverişli bir geometri olduğu açıkça anlaşılmıştır.

Özet olarak; simülasyon bölümünde epoksi tabakası ve dalgakılavuzu analizleri dikkate alındığında, en yoğun bozulma mekanizmasının bölge 1 üzerinde indüklenen gerilimden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır ve ayrıca analiz sonuçlarında baskın bir şekilde görülmektedir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen optik ölçümler simülasyondan elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Durum D'den elde edilen entegre optik aygıtların %40'ın üstünde geçirgenlik değerlerine sahip olması; aygıt performansını artırdığını ve seri üretim isterlerinin karşılandığını ispatlamıştır. Ayrıca; durum D'den elde edilen aygıtların geçirgenlik seviyesinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Simülasyon sonuçlarında; bölge 1

üzerinde indüklenen gerilim seviyesinin A, B, C ve D yapıları dikkate alındığında en düşük durum D için elde edildiği analiz edilmiştir. Sonuç olarak; istatistiksel çalışmalarda durum D'deki daha kararlı sonuçlar ile simülasyon çalışmalarıyla elde edilen fiber taşıyıcı/optik aygıt arasındaki arayüz bölgesindeki gerilim yoğunluğu arasında ilişki kurulması uygun görülmüştür. Gerilim seviyesi düştükçe optik geçirgenliğin arttığı ve isterleri sağlayacak seviyede geçirgenlik değerleri elde edilebildiği sonucuna varılmıştır.



4. ENTEGRE OPTİK AYGITLARIN PAKETLEME SÜREÇLERİ VE ISISAL DÖNGÜ ANALİZLERİ

Tez çalışmasının önceki bölümlerinde; üretilen entegre optik aygıtların fiber entegrasyon çalışmalarına yer verilmişti. Aygıtların sıcaklık değişimlerine karşı duyarlılığı göz önünde bulundurularak, yapısal özelliklerinde meydana gelen değişimleri irdelemek amacıyla termo mekanik simülasyon sonuçları analiz edilmişti. Bu bölümde ise; fiber entegrasyonu yapılan aygıtların FOD sensörlerinde kullanılabilmesini sağlamak amacıyla gerçekleştirilen paketleme çalışmaları anlatılmıştır. Özellikle; aygıtların giriş ve çıkış uçlarındaki fiberleri korumak amacıyla gerçekleştirilen ve paketleme aşamasının bir basamağı olarak kabul edilen fiber sabitleme işleminin sıcaklık değişimleri altındaki davranışının önemli olduğu testlerle doğrulanmış olup, bu kapsamda birtakım Ar-Ge çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla; birinci alt bölüm’de paketleme aşamaları anlatılacak olup, ikinci alt bölümde ise farklı tipte fiber sabitleme işleminin sıcaklık testlerine olan etkisi irdelenecektir.

4.1. Entegre Optik Aygıtların Paketleme Süreci Aşamaları

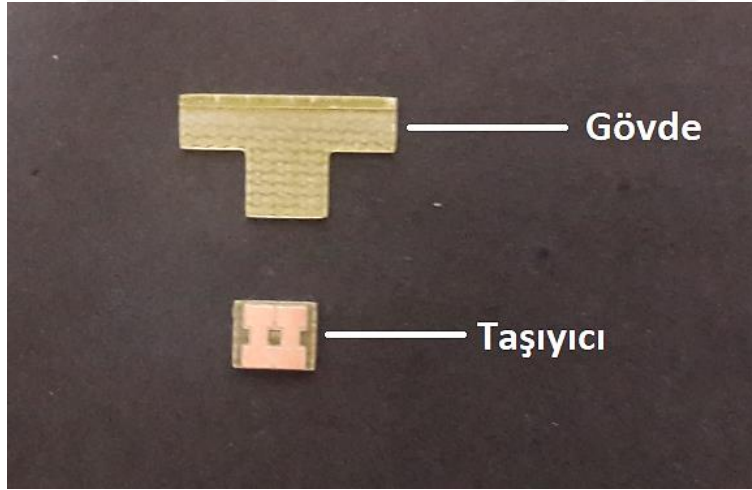
Üretilen entegre optik aygıtların FOD sensörlerinde kullanılabilmeleri için mekanik olarak paketleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Paketleme süreci; temel olarak şu aşamalardan oluşmaktadır:

- PCB (Printed Circuit Board) üzerine aygıt yerleşimi
- PCB-aygıt arasındaki elektriksel bağlantı
- Aygıtı kutu içerisine yerleştirme
- Koruyucu tüp takma ve fiber sabitleme
- Lehimleme yöntemi ile kablaj bağlantıları

Paketleme sürecinin ilk aşaması olarak; fiber entegrasyonu gerçekleştirilen entegre optik aygıtlar teker teker PCB adı verilen baskı devre kartlarının üzerine yerleştirilmiştir. PCB; elektronik devre elemanlarını bir arada tutan ve birden fazla bileşeni elektriksel olarak birbirine bağlayan ayrıca bu bileşenler arasında elektriksel sinyallerin iletilmesine izin veren bir karttır. Lehimleme yöntemi; yüksek sıcaklıklarda eriyen metal parçacıklarının PCB yüzeyi ile diğer bileşenler arasında elektriksel bağlantıların gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. En yaygın kullanılan PCB malzemesi FR4’tür. FR4 malzemesi; elyafı

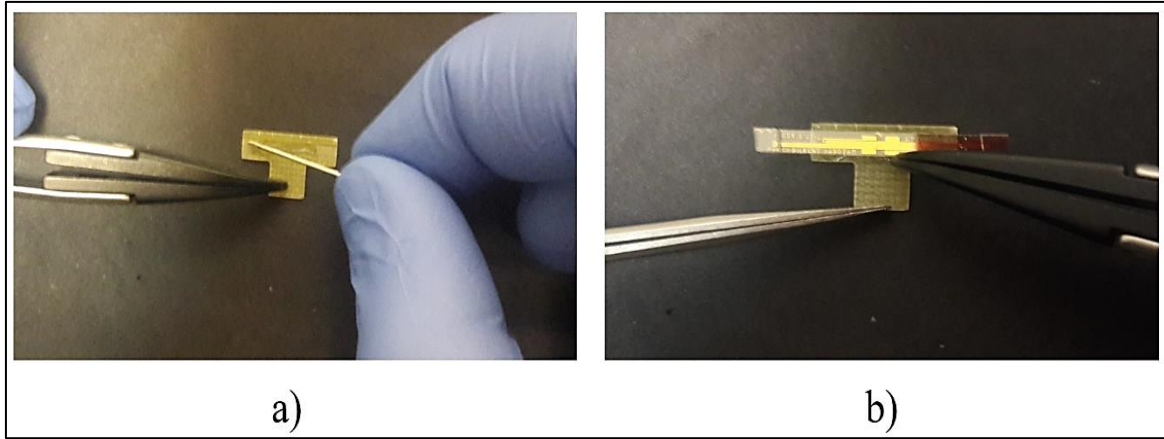
camyünü ve epoksi karışımından oluşmaktadır. FR4 malzemesi yüksek ısıya, neme ve sarsıntıya dayanıklıdır. PCB'nin diğer yüzü ise; elektriksel iletim yolu olarak tanımlanan bakır malzemesi ile kaplıdır. PCB'nin yaygın bir kullanım alanının olması, bazı avantajları beraberinde getirmektedir. Devre elemanları tek bir yapı üzerinde toplanarak sadeleşir ve çok yer kaplamaz. Birleşim aşamaları çok daha kolaydır. İhtiyaca göre farklı tipte tasarlanabilme olanağına sahiptir. Mekanik avantajlarının yanı sıra; elektriksel olarak gürültüyü azalttığı için performansa olumlu yönde etki etmektedir.

Paketleme sürecinde kullanılan PCB'ler Resim 4.1'de gösterildiği gibi gövde ve taşıyıcı olmak üzere iki ayrı bileşenden oluşmaktadır.



Resim 4.1. PCB bileşenleri

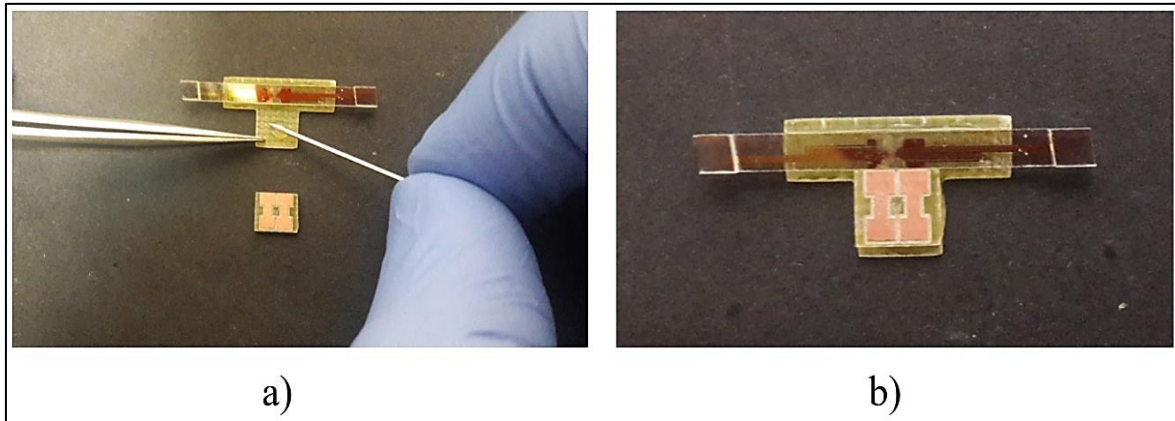
Gövde; PCB'nin ana bileşenini oluşturmaktadır ve aygıtın üzerine sabitlendiği parçadır. Taşıyıcı parçasının üzerinde bakır iletim hatları bulunmaktadır. Bu hatlar; aygıt üzerindeki elektrotlara elektriksel olarak bağlantının yapılabilmesini sağlamaktadır. Gövde parçası üzerine Resim 4.2'de gösterildiği gibi öncelikle ince uçlu bir cisim yardımıyla yapıştırıcı uygulanmış olup, sonrasında aygıt yerleşimi gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.2. PCB gövde çalışmaları a) Gövde üzerine yapıştırıcı uygulanması b) Aygıtın PCB gövde üzerine yapıştırılması

PCB üzerine aygıt yerleşimi yaparken, Resim 4.2’de gösterildiği gibi aygıtın giriş ve çıkış uçlarında fiber taşıyıcı bileşenlerinin olması zorunlu değildir. Diğer bir ifadeyle; fiber entegrasyon çalışması öncesinde de bu işlem uygulanabilmektedir.

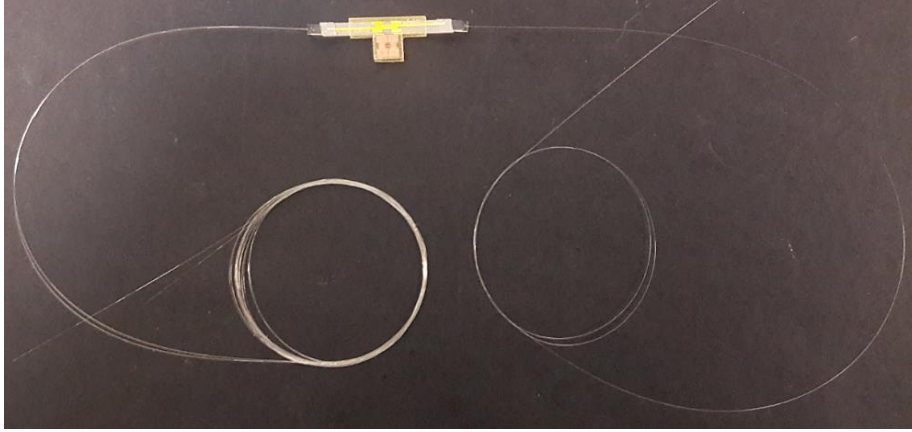
Bir sonraki aşamada; taşıyıcı bileşeni yapıştırıcı kullanılarak gövde üzerine sabitlenmiştir. Resim 4.3’te; taşıyıcı parça ile yapılan çalışmalar gösterilmiştir.



Resim 4.3. PCB taşıyıcı çalışmaları a) PCB gövde üzerine yapıştırıcı uygulaması b) PCB taşıyıcı parçasının gövde üzerine sabitlenmesi

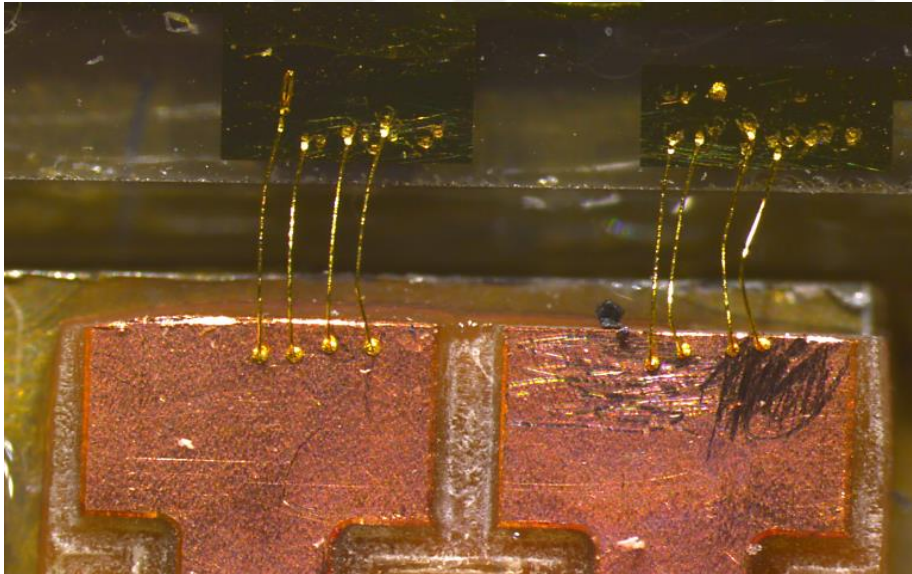
Taşıyıcı PCB gövde üzerine sabitlendikten sonra, aygıtın giriş ve çıkış uçlarına fiber taşıyıcılar hassas hizalama yöntemi³ ile yapıştırılarak Resim 4.4’te gösterildiği gibi fiber çiftlenimli entegre optik aygıt elde edilmiştir.

³ Hassas hizalama yöntemi; 2. Bölüm’de detaylı olarak anlatılmıştır.



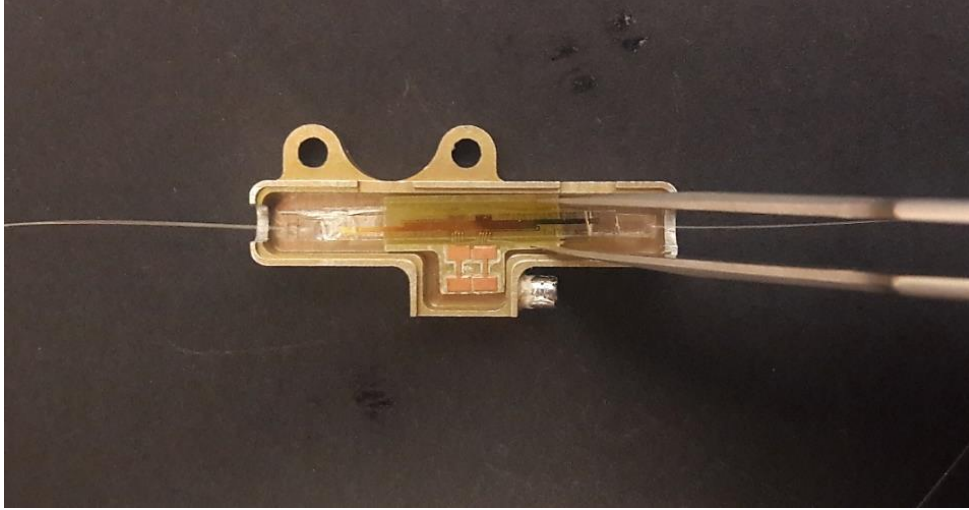
Resim 4.4. Fiber çiftlenimli entegre optik aygıt görüntüsü

Aygıtların elektriksel olarak test edilebilmesi için PCB taşıyıcısı üzerinde yer alan bakır yüzeylerle aygıt elektrotları arasında altın tel vasıtasıyla bağlantı işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu bağlantı işleminin mikroskop altındaki görüntüsü Resim 4.5'te gösterilmiştir.



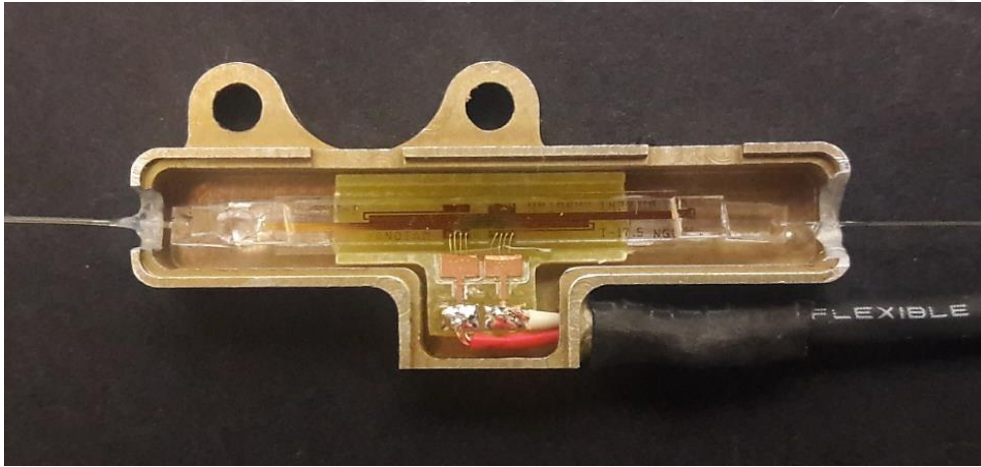
Resim 4.5. Entegre optik aygıt elektrotları ve PCB taşıyıcı üzerindeki bakır yüzeyler arasında elektriksel tel ile bağlantı yapılması

Elektriksel bağlantı işleminden sonra; Resim 4.6'da gösterildiği gibi aygıtların kutulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Aygıt kutu içerisine bir yapıştırıcı kullanılarak sabitlenmiştir.



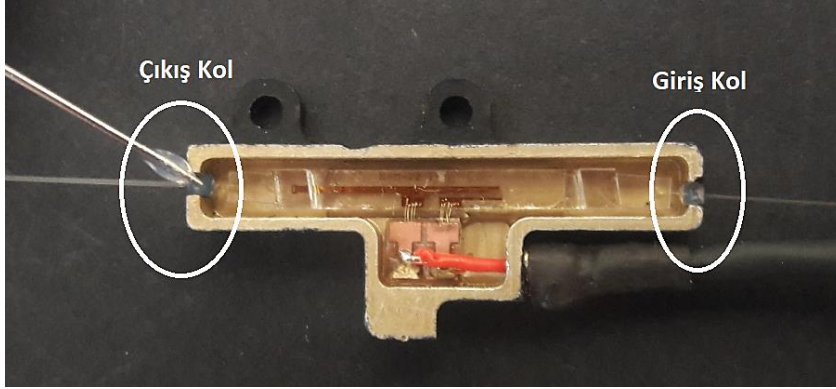
Resim 4.6. Entegre optik aygıt kutulaması

Kutulanan entegre optik aygıtlarının sistem içinde kullanılabilmesi amacıyla kablo bağlantıları da gerçekleştirilmiştir. Resim 4.7’de; lehimleme yöntemi ile kablay bağlantısı yapılmış bir entegre optik aygıt gösterilmiştir.



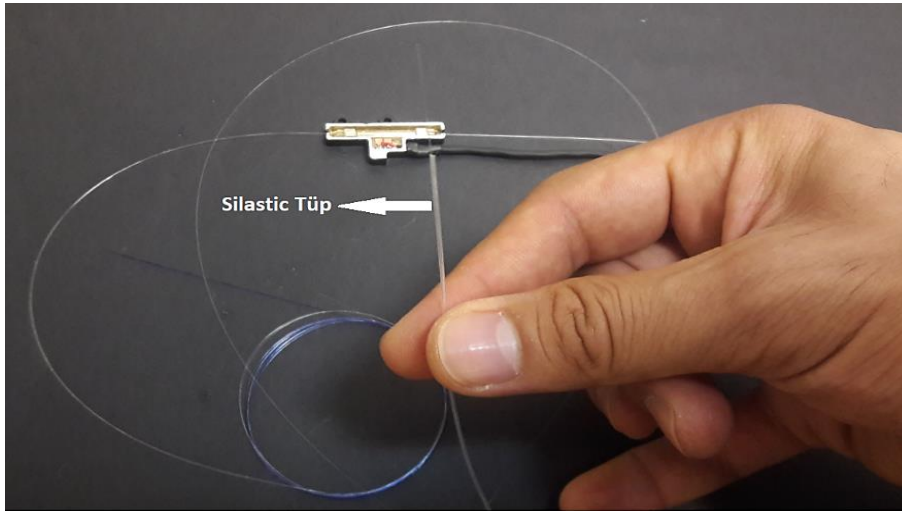
Resim 4.7. Kablo bağlantısı yapılmış bir entegre optik aygıt yapısı

Kutu içerisine yerleştirilen ve kablay bağlantısı yapılan aygıtların giriş ve çıkış uçlarındaki fiberleri dış mekanik etkilere karşı korumak amacıyla; elastik bir yapıştırıcı ile kutu duvarına sabitleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Resim 4.8’de; aygıt kutu içinde iken giriş ve çıkış uçlarındaki fiberlere yapıştırıcı uygulaması gösterilmiştir.



Resim 4.8. Aygıtın giriş ve çıkış kollarındaki fiberlerin sabitlenmesi

Yapıştırıcı uygulaması ince uçlu bir araç yardımıyla az miktarda olacak şekilde uygulanmıştır. Resim 4.8’de görüldüğü gibi; her ne kadar yapıştırıcı uygulaması sadece daire içine alınmış bölgede oyuk içinde kalan fiberlere uygulanmış olsa da, entegre optik aygıt sensör bloğu içerisine yerleştirildiğinde giriş kol tarafındaki fiberin oyuk dışında geri kalan bölümünün mekanik olarak zarar görebileceği, ezilme ve kopma gibi olumsuzluklarla karşı karşıya kalılabileceği saptanmıştır. Bu duruma çözüm olarak; Resim 4.9’da gösterildiği gibi aygıtın giriş fiberine silikon bazlı koruyucu tüp takma işlemi gerçekleştirilmiştir.

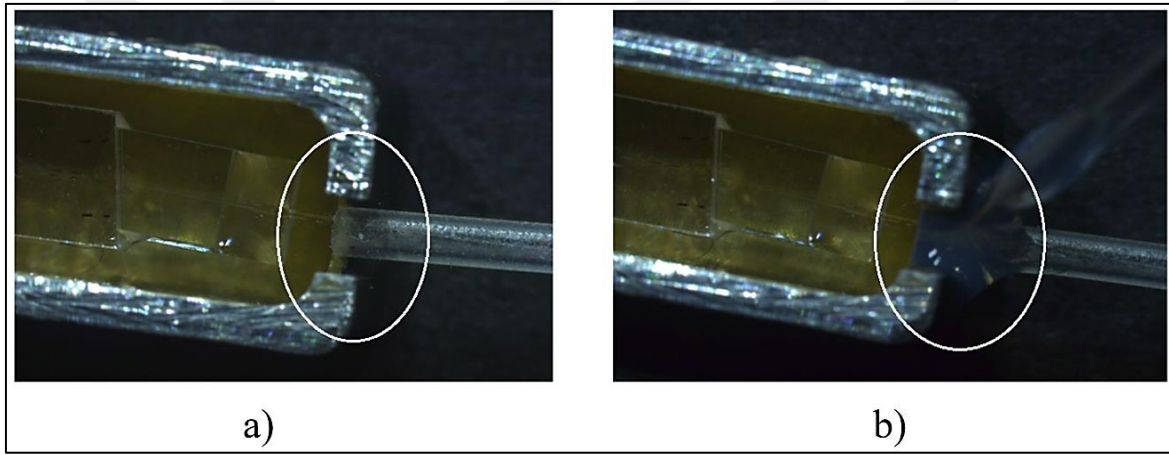


Resim 4.9. Giriş fibere koruyucu tüp takılması

Takılan koruyucu tüp “Silastic tüp” olarak adlandırılmaktadır. “Silastic” kelimesi; silikon ve plastik kelimelerinden türetilmiştir. 1948 senesinde Dow Corning şirketi tarafından marka olarak pazarda satışa sunulmuş olup, esnek ve silikon elastomer yapıdadır. Otomotiv’den savunma sektörüne kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Silastic tüp; geniş sıcaklık aralığında çalışma kapasitesine sahiptir. Çalışmalarda kullanılan optik fiberlerin dış

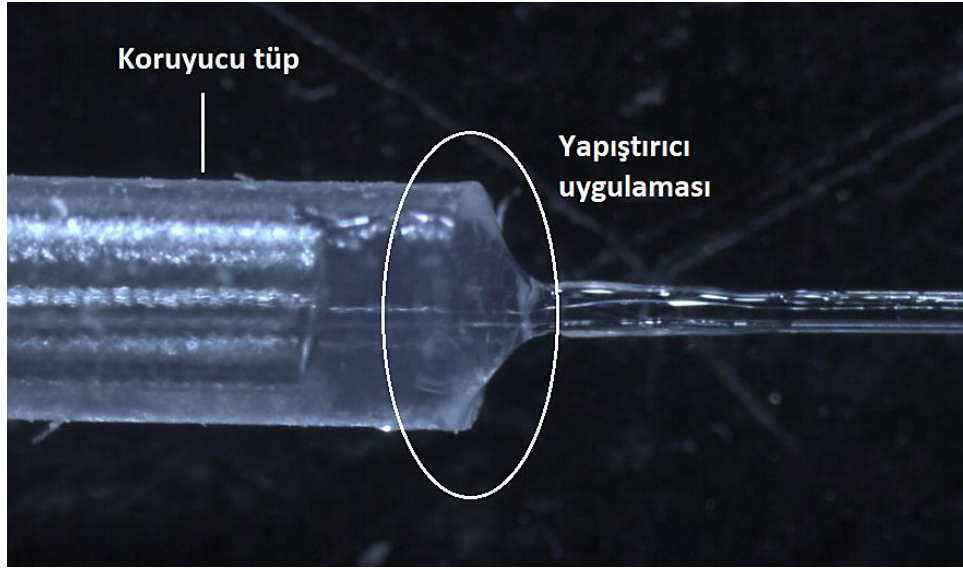
kaplaması her ne kadar plastik ve dış etkilere karşı dayanıklı olsa da, zorlayıcı endüstriyel ortamlarda her türlü çevresel durumlara karşı dayanıklı olmayabilirler. Bu durum; fiberin zarar görmesini veya geçirgenliğinin düşmesini engelleyen ek bazı koruma yöntemlerinin ihtiyaç duyulmasına ortam hazırlamıştır. Koruyucu tüpler; çoğu fiber optik montajlar için kullanılmaktadır ve mekanik olarak fiberi korumaktadırlar.

Tez çalışması kapsamında üretilen entegre optik aygıtların giriş fiberlerine takılan Silastic koruyucu tüp ile bazı deneysel Ar-Ge çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tip 1 ve tip 2 olmak üzere; iki farklı kategoride sabitleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Resim 4.10'da tip 1 uygulaması gösterilmiştir.



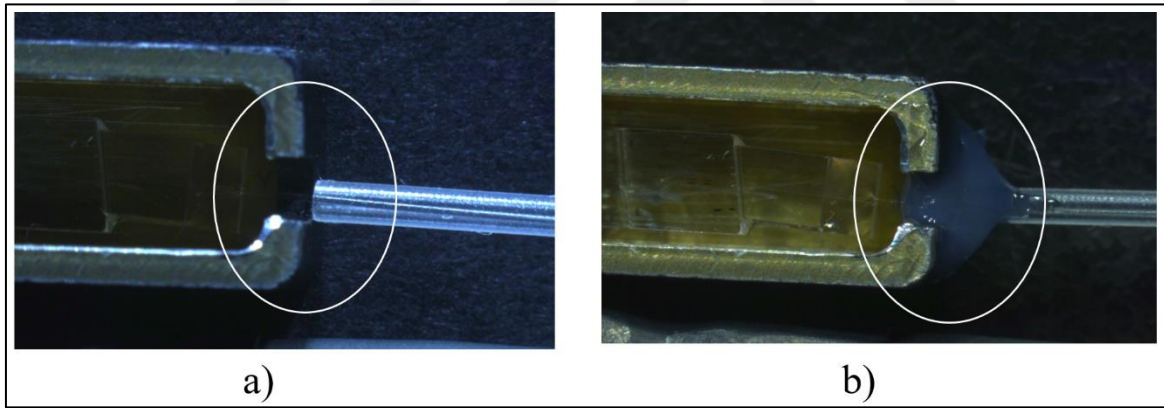
Resim 4.10. Tip 1 uygulaması a) Tüp takma b) Fiber sabitleme

Tip 1 uygulamasında; koruyucu tüp Resim 4.10a'da daire içinde gösterildiği gibi kutu oyuğu içinde kalan fiberin tamamını kapsayacak şekilde takılmıştır. Resim 4.10b'de ise; yapıştırıcının sadece tüpe temas ettiği ve fibere temas etmediği görülmektedir. Entegre optik aygıt FOD sistemi içerisine sabitlendiğinde mekanik olarak çekme ve germe işlemine karşı dayanıklı olabilmesi amacıyla aygıtın taşıyıcı fiberinin bir referans noktasından sabitlenmesi uygun görülmektedir. Bu kapsamda; fiber, tüpün diğer uç noktasından yapıştırıcı uygulanarak tüpe sabitlenmiştir. Bu sabitleme işlemi Resim 4.11'de gösterilmiştir.



Resim 4. 11. Tip 1 uygulaması için tüpün uç noktasından fiber sabitleme işlemi

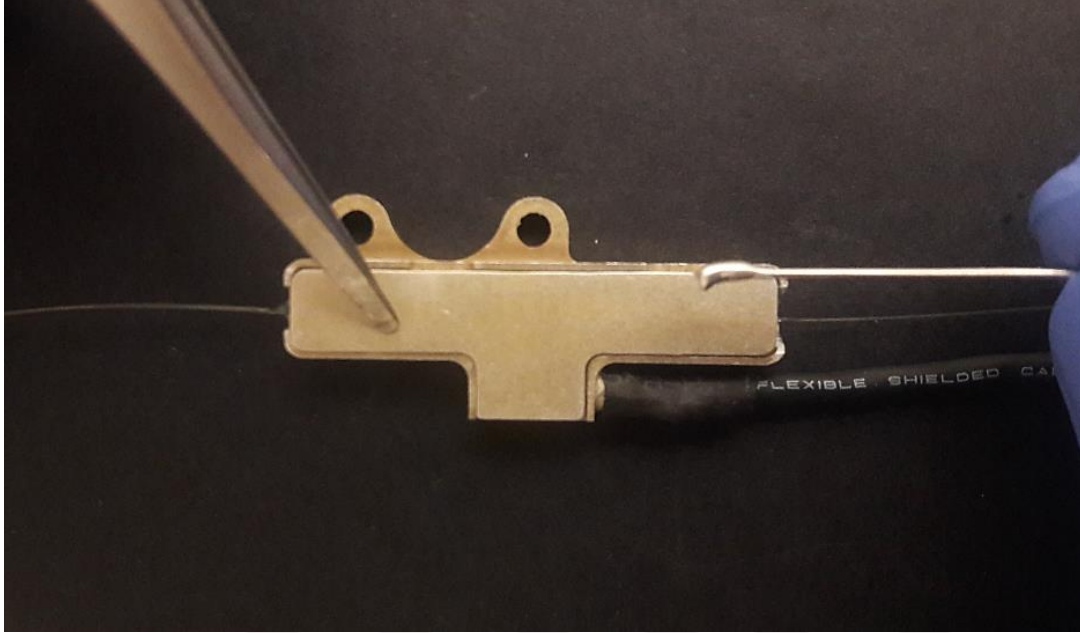
Tip 2 uygulamasında ise; kutu oyuğu içinde kalan fibere yapıştırıcı temas edecek şekilde uygulama yapılmıştır. Resim 4.12’de; tip 2 uygulaması gösterilmiştir.



Resim 4.12. Tip 2 uygulaması a) Tüp takma b) Fiber sabitleme

Resim 4.12a’da gösterildiği gibi; daire içine alınmış bölgede koruyucu tüp oyuk dışında olacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu durumda; uygulanan yapıştırıcı kutu oyuğu içinde kalan fibere temas etmektedir. Resim 4.12b’de ise; yapıştırıcı uygulandıktan sonraki durum gösterilmiştir. Kutu oyuğu içinde kalan fibere yapıştırıcı temas ettiği için tüpün uç noktasından yapıştırıcı uygulanmasına gerek duyulmamıştır.

Koruyucu tüp takma işleminden sonra, paketleme işleminin son aşaması olarak aygıt kutusunun kapağı kapatılmış ve epoksi kullanılarak sabitleme işlemi yapılmıştır. Kapak kapatma işlemi Resim 4.13'te gösterilmiştir.



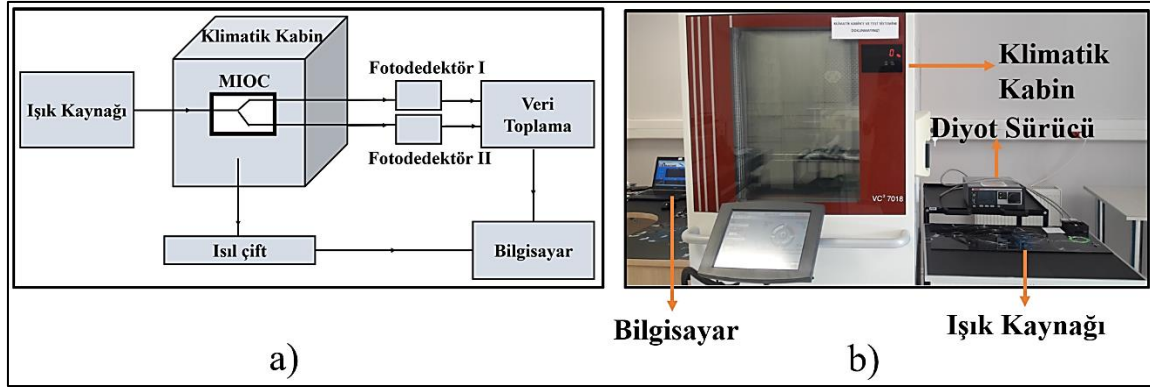
Resim 4.13. Kapak kapatma ve sabitleme işlemi

Aygıtların paketleme aşaması; mekanik olarak dayanım seviyelerini test etmek açısından son derece önem arz etmektedir. Paketleme işlemleri tamamlanan her bir aygıt sıcaklık testlerine maruz bırakılmıştır. Bir sonraki alt bölümde tip 1 ve tip 2 işlemleri uygulanan aygıtların sıcaklık test analizlerine yer verilecektir.

4.2. Tip 1 ve Tip 2 İşlemi Uygulanan Entegre Optik Aygıtların Isısal Döngü Karakterizasyonları

Paketleme aşamasında kullanılan koruyucu tüp bir önceki bölümde anlatıldığı gibi elastik bir yapıya sahiptir. Bu sebeple; bu malzemenin sıcaklık değişimleri altındaki davranışı kritik öneme sahiptir. Bu bölümde; tip 1 ve tip 2'ye göre fiber sabitlemesi yapılan aygıtların, 1 °C/dk sıcaklık artış-azalış hızı ile -40 °C; +85 °C aralığındaki kararlılığı test edilmiştir.

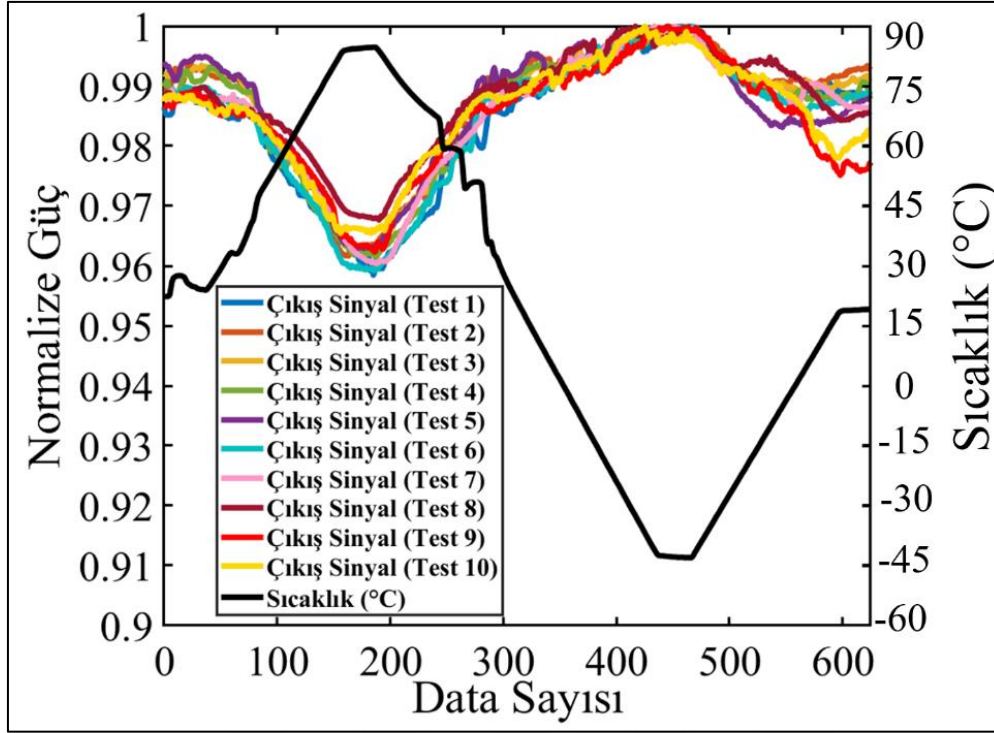
Sıcaklık testlerini gerçekleştirebilmek amacıyla ilk olarak deney düzeneği kurulmuştur. Resim 4.14'te; sıcaklık test düzeneğinin hem şematik hem de deneysel hali gösterilmiştir.



Resim 4.14. Sıcaklık test konfigürasyonu a) Sıcaklık test düzeneğinin şematik gösterimi
b) Deneysel sıcaklık test düzeneği

Kullanılan test ekipmanları; klimatik kabin, ışık kaynağı, ısı çifti, fotodedektör, veri toplama cihazı ve bilgisayardır. ASE ışık kaynağından yayılan 1550 nm dalga boyundaki ışık ışınları entegre optik aygıtı içinden geçirilerek aygıt çıkışından sinyal elde edilmesi sağlanmıştır. Fotodedektör I ve II; aygıtın çıkış kollarına yerleştirilmiştir. Bu fotodedektörler; PIN (p-intrinsic-n) diyotlardır ve optik sinyali elektriksel sinyale dönüştürmek için kullanılmışlardır. PIN dedektörler; optik aygıtın çıkış fiber kollarına fiber ek yöntemi ile bağlanmıştır. Ölçülen veriler bir veri toplama modülü ile toplanmıştır. Veri toplama ekipmanı; voltaj, sıcaklık ya da akım gibi fiziksel veya elektriksel bir niceliğin ölçümü için kullanılan bir ekipmandır. Aygıt klimatik kabin içerisinde iken, maruz bırakıldığı sıcaklık değişimlerinin algılanabilmesi için kabin içerisine bir ısı çifti yerleştirilmiştir. Kabin içerisindeki sıcaklık değişimleri ısı çifti ile, aygıtın sıcaklık değişimleri altındaki çıkış sinyalinin değişimi ise veri toplama modülü vasıtasıyla bilgisayara aktarılmıştır. Aktarılan veriler; bir bilgisayar yazılımında oluşturulan kod ile işlenerek grafiksel olarak analiz edilmiştir.

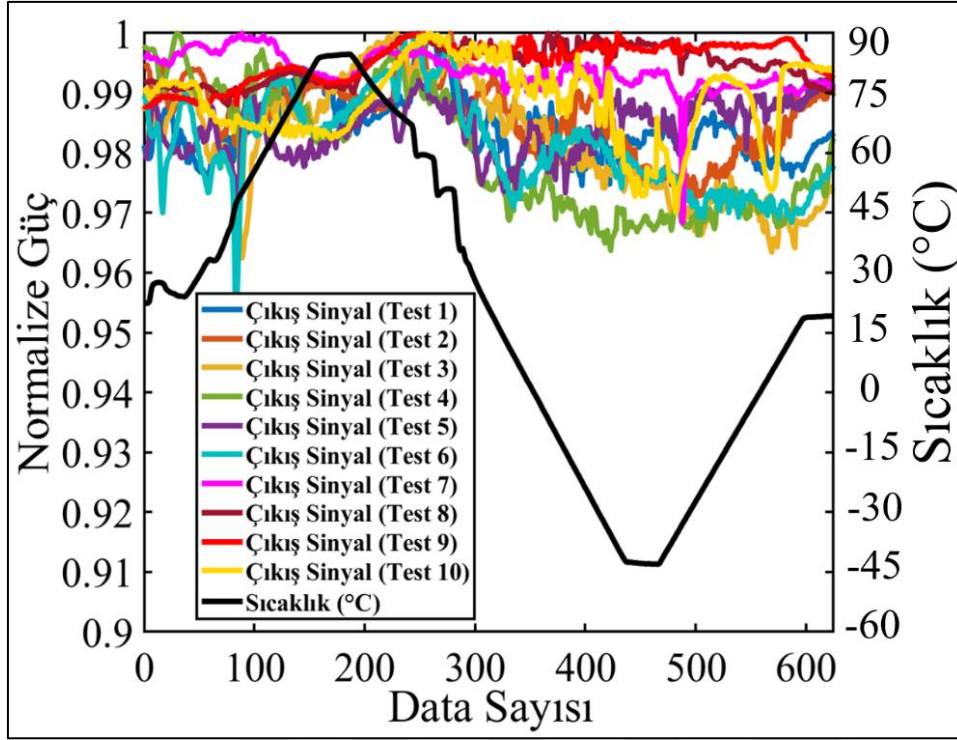
Paketleme aşamasından geçen 2 adet farklı entegre optik aygıt sırasıyla tip 1 ve tip 2 fiber sabitleme işlemine maruz bırakılmıştır. Tip 1 işlemine maruz bırakılan entegre optik aygıtın grafiksel verileri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Tip 1 fiber sabitleme işlemi uygulanan entegre optik aygıtın kararlılık döngü analizi

Şekil 4.1 incelendiğinde; -40°C ; $+85^{\circ}\text{C}$ aralığında 1°C/dk sıcaklık değişim hızı ile uygulanan test profilinin kararlılık seviyesini test etmek amacıyla, aynı test profilinin ardı ardına 10 kez gerçekleştirildiği görülmektedir. 10 farklı testin sonuçları grafiksel olarak analiz edilmiş olup; yüksek ve düşük sıcaklık bölgelerinde sırasıyla negatif ve pozitif yönde geniş genlikli pikler elde edildiği saptanmıştır. Bu piklerin pozisyonları değişmemiştir ve tüm sıcaklık aralığında normalize edilmiş çıkış sinyal gücünün %90 seviyesinin altına inmediği sonucuna varılmıştır. Test döngü sayısı arttıkça çıkış sinyalinin tekrar edilebilir olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.2’de; tip 2 işlemi uygulanmış entegre optik aygıtın test sonuçlarının grafiksel analizine yer verilmiştir.



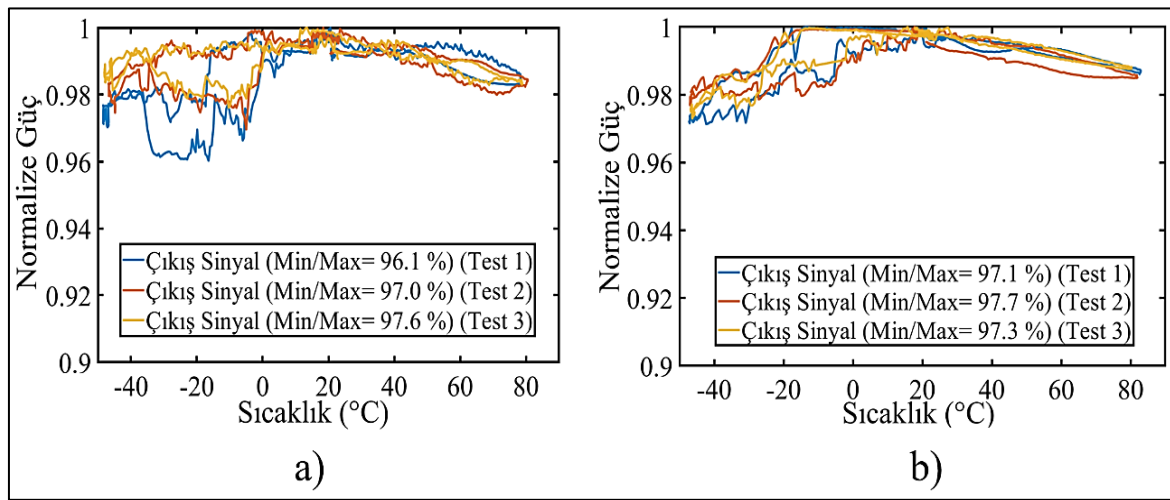
Şekil 4.2. Tip 2 fiber sabitleme işlemi uygulanan entegre optik aygıtın kararlılık döngü analizi

Şekil 4.2 incelendiğinde; tip 2 uygulaması için -40°C ; $+85^{\circ}\text{C}$ aralığında $1^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ sıcaklık değişim hızı ile ardı ardına 10 kez tekrarlanan test profilinin kararlılığının irdelendiği görülmektedir. Sıcaklık $+85^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseltildiğinde ve -40°C 'ye düşürüldüğünde; tekrar eden test profillerine ait çıkış sinyalinde dalgalanmaların varlığı söz konusu olmuştur ve her bir testin birbirini tekrar etmediği sonucuna varılmıştır. Bu uygulama için her ne kadar güç seviyesi %90'ın altına inmemiş olsa da; test döngü sayısı arttıkça kararlılık ve tekrar edilebilirliğin tip 1 uygulamasına göre nispeten azaldığı açıkça görülmektedir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'deki grafiksel analizler sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak ele alınmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmalar doğrultusunda; paketleme işleminin bir aşaması olan tip 1 fiber sabitleme işleminin değişken sıcaklık koşullarında entegre optik aygıtın çıkış sinyalinde tekrar edilebilir sonuçlar doğurduğu anlaşılmıştır. Bu kapsamda; 5 farklı entegre optik aygıt için tip 1 uygulaması öncesi ve sonrasında sıcaklık testleri gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar grafiksel olarak yorumlanmıştır. Sıcaklık testi; $1^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ sıcaklık değişim hızı ile -40°C ; $+85^{\circ}\text{C}$ aralığında uygulanmıştır. Test edilen aygıtlar sırasıyla; M_1 , M_2 , M_3 , M_4 ve M_5 olarak adlandırılmıştır. 5 adet entegre optik aygıtın her birisi; tip 1 işlemi uygulanmadan önce 3 döngü, tip 1 işlemi uygulandıktan sonra 3 döngü olmak üzere toplam 6 adet test

döngüsüne maruz bırakılmıştır. Grafiksels analizlerde; entegre optik aygıtın her iki kolundan elde edilen optik gücün toplamı değerdendirmeye alınmış olup, her bir test datası oda sıcaklığındaki ilk test datasına normalize edilerek en yüksek değeri 1 olacak şekilde sınırlandırma yapılmıştır. 5 farklı aygıt için sinyal çıkışı sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değerdendirilmiştir.

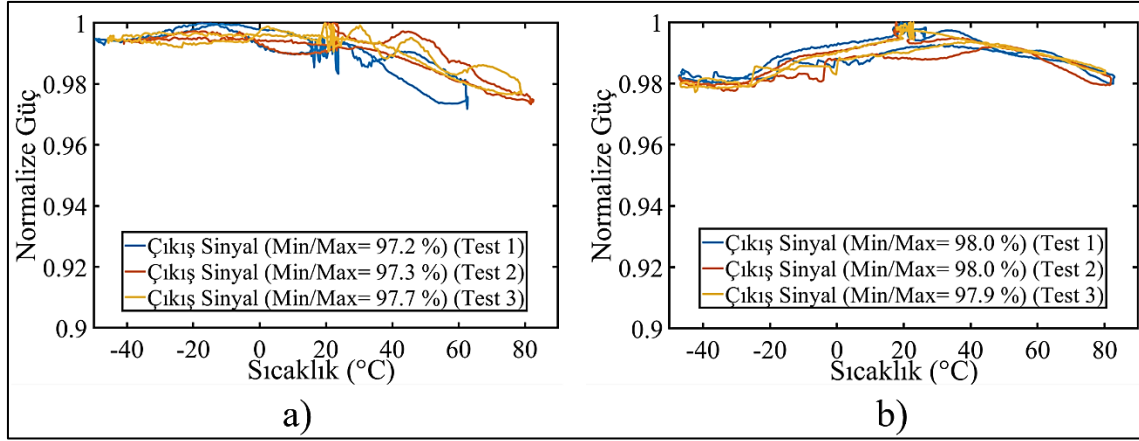
Şekil 4.3'te; tip 1 uygulaması öncesi ve sonrası için, M_1 entegre optik aygıtın çıkış sinyalindeki değışim irdelenmiştir.



Şekil 4.3. M_1 için sıcaklık döngü analizleri a) Tip 1 işlemi öncesi b) Tip 1 işlemi sonrası

M_1 için; tip 1 işlemi öncesinde ve sonrasında aynı test profili 3 kez tekrarlanmıştır. Şekil 4.3a incelendiğinde; aygıtın toplam gücündeki değışimin %90 seviyesinin altına inmediğı saptanmıştır. İlk testte negatif sıcaklıklarda dalgalanmaların daha fazla olduğu, 2. ve 3. döngüde ise bu dalgalanmanın nispeten azaldığı açıkça görölmektedir. Buna ek olarak; pozitif sıcaklıklarda ve negatif sıcaklıklarda pozitif ve negatif genlikli piklerin varlığı tespit edilmiş olup, bu piklerin sık periyotlarda tekrarlandığı sonucuna varılmıştır. Şekil 4.3b'deki tip 1 uygulaması sonrasında ise; gerçekleştirilen 3 test için değerdendirme yapıldığında pozitif sıcaklıklarda tekrarlanan genliklerin azaldığı görölürken, negatif sıcaklıklarda kararlılığın daha tutarlı bir yapı sergilediğı, sinyal çıkışındaki değışimlerin ve dalgalanmaların sıklığının azaldığı gözlenmiştir.

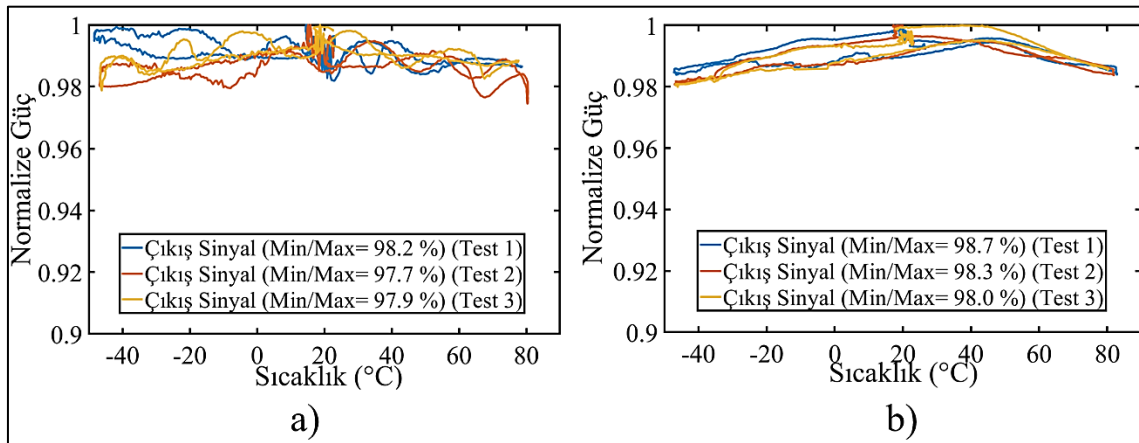
Şekil 4.4'te; tip 1 uygulaması öncesi ve sonrası için, M_2 entegre optik aygıtın çıkış sinyalindeki değışim irdelenmiştir.



Şekil 4.4. M_2 için sıcaklık döngü analizleri a) Tip 1 işlemi öncesi b) Tip 1 işlemi sonrası

Şekil 4.4a'da; tekrar eden döngülerin pozitif sıcaklıklarında sinyal çıktısının birbirini izlemediği anlaşılmıştır. Ayrıca döngüler arasında açılmalar meydana gelmiştir. Şekil 4.4b'de ise; düşük ve yüksek sıcaklık değerlerinde çıkış sinyalinin her üç test döngüsünde birbirini tekrar ettiği ve bunun sonucu olarak çok daha kararlı bir yapı sergilediği tespit edilmiştir. Bu durum; aygıt güvenilirliğini artırmaktadır. Bununla birlikte; tüp sabitleme öncesi ve sonrasında sinyal çıktısı %90'ın üzerinde kalmıştır.

Şekil 4.5'te; tip 1 uygulaması öncesi ve sonrası için, M_3 entegre optik aygıtın çıkış sinyalindeki değişim irdelenmiştir.

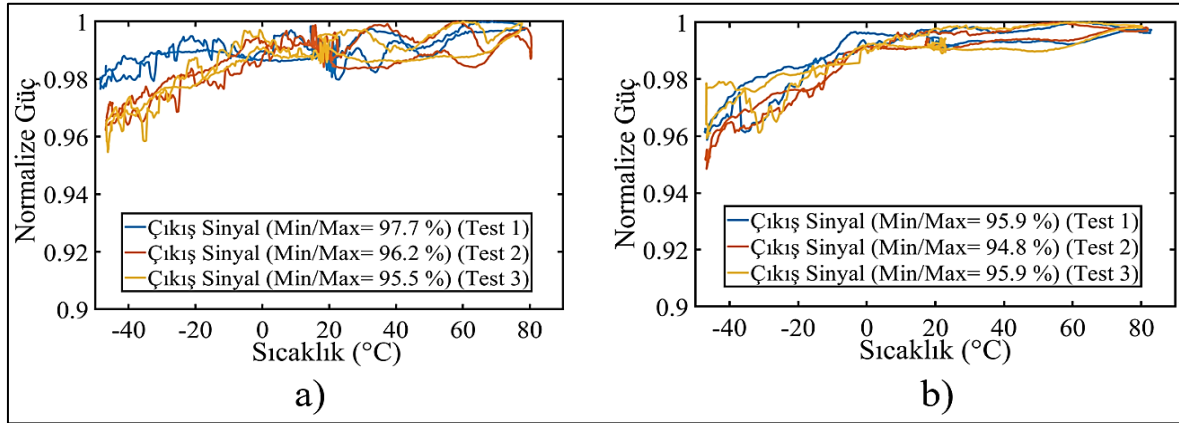


Şekil 4.5. M_3 için sıcaklık döngü analizleri a) Tip 1 işlemi öncesi b) Tip 1 işlemi sonrası

Şekil 4.5a'daki tip 1 uygulaması öncesinde; sıcaklık test döngüleri arasında uyumsuzluk gözlenmiştir. Buna ek olarak; grafik eğrilerinde osilasyon varlığı tespit edilmiştir. Tip 1 uygulaması sonrasında ise; Şekil 4.5b'de görüldüğü gibi negatif ve pozitif sıcaklıklarda

osilasyonların giderildiği ve grafik eğrilerinin birbirini tekrar ettiği aşıkardır. Her iki durumda sinyal çıktısının değişimi %90'ın üzerinde kalmaktadır.

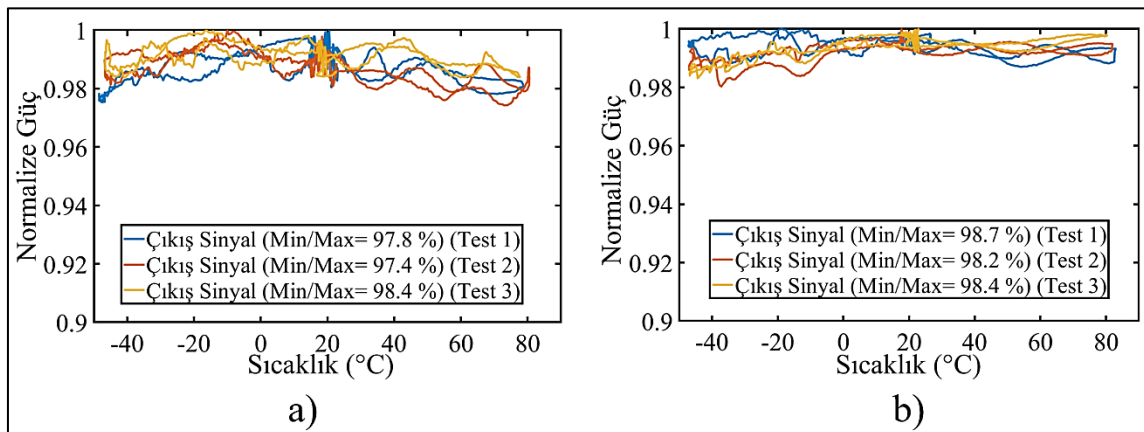
Şekil 4.6'da; tip 1 uygulaması öncesi ve sonrası için, M₄ entegre optik aygıtın çıkış sinyalindeki değişim irdelenmiştir.



Şekil 4.6. M₄ için sıcaklık döngü analizleri a) Tip 1 işlemi öncesi b) Tip 1 işlemi sonrası

Şekil 4.6'daki analizlerde; M₄ aygıtının çıkış sinyalinde tip 1 fiber sabitleme işlemi sonrasında uygulanan sıcaklık test analizlerinde düzelme gözlemlendiği saptanmıştır. Tip 1 öncesinde negatif sıcaklıklarda görülen osilasyonların, tip 1 işlemi sonrasında farkedilir derecede azaldığı sonucuna varılmıştır. Önceki aygıtlarda olduğu gibi; aygıt çıktısındaki nicel veriler %90'ın üzerinde kalmaktadır.

Şekil 4.7'de; tip 1 uygulaması öncesi ve sonrası için, M₅ entegre optik aygıtın çıkış sinyalindeki değişim irdelenmiştir.



Şekil 4.7. M₅ için sıcaklık döngü analizleri a) Tip 1 işlemi öncesi b) Tip 1 işlemi sonrası

Şekil 4.7'ye göre; M₁, M₂, M₃ ve M₄ aygıtlarında olduğu gibi, M₅ aygıtında da tip 1 kapsamındaki koruyucu tüp takma işlemi sonrasında test verilerinde düzelme olduğu ve tekrar edilebilirlik seviyesinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca; normalize güç olarak adlandırılan sinyal çıktısı, tip 1 öncesi ve sonrasında genel olarak %97-%100 arasında seyretmektedir.

Bu bölümde; üretilen entegre optik aygıtların paketleme süreçlerine yer verilmiş olup, paketleme süreçlerinin bir parçası olan koruyucu tüp takma aşamasının aygıt performansına etkisi sıcaklık testleri yürütülerek irdelenmiştir. Koruyucu tüp; aygıt paketinin farklı noktalarından sabitlenerek tip 1 ve tip 2 olarak iki farklı yöntem için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu iki yöntem; bölüm içerisinde detaylandırılarak açıklanmıştır. Yapılan çalışmalar doğrultusunda; tip 1 uygulamasının aygıtı mekanik ve performans açısından daha kararlı, uzun ömürlü bir noktaya taşıyacağı sonucuna varılmıştır. Tip 1 yöntemi denenmiş olan beş farklı aygıt, -40 °C ; +85 °C aralığında 1 °C/dk değişim hızı ile sıcaklık testlerine maruz bırakılmıştır. Grafik analizlerinde; nicel değerlendirmelerin yanı sıra; nitel olarak da değerlendirmeler yapılmıştır. Nitel değerlendirmelerde; grafiklerin görsel analizi üzerinde durulmuştur ve çıkış sinyalinin tüm test süresince nasıl bir karaktere sahip olduğu takip edilmiştir. Her bir aygıt için aynı test, tip 1 öncesi ve sonrasında 3'er kez tekrar edilmiştir. Tip 1 uygulaması öncesi ve sonrasında elde edilen grafiksel bulgular karşılaştırılmıştır ve aygıt performansı değerlendirilmiştir. Tip 1 sonrasında aygıtın çıkış sinyalindeki iyileşmenin tüp sabitleme sırasında kullanılan yapıştırıcının ısısal yaşlandırmaya bağlı olarak daha kararlı bir hale gelmesi ile açıklanmaktadır. Literatür çalışmaları incelendiğinde; fiber optik sensör bileşenlerinde kullanılan yapıştırıcıların uzun dönem kararlılıklarının sıcaklık testleri ile analiz edildiği saptanmıştır [26]. Bu durumda; deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların literatür düzeyinde bir karşılığı olduğu net bir şekilde söylenebilir. Her ne kadar burada anlatılan çalışmalar Ar-Ge düzeyinde mercek altına alınsa da; üretilen entegre optik aygıtlar ticari ve endüstriyel uygulamalara yönelik olarak kullanılacağı için, önümüzdeki süreçte bu aygıtların uzun dönem kararlılıklarının aylar, hatta yıllar mertebesinde incelenmesi planlanmaktadır.

5. AÇIK DÖNGÜ FİBER OPTİK DÖNÜ ÖLÇER SİSTEMİ İÇERİSİNDEKİ ELEKTRİKSEL KARARLILIK ANALİZİ

Bu bölüme kadar; aygıtın sistemden bağımsız olarak gerçekleştirilen test ve karakterizasyonlarına yer verilmişti. Bu bölümde ise; açık döngü FOD sistemin içerisinde gerçekleştirilen elektriksel testlere yönelik olarak yürütülen çalışmalar aktarılacaktır. Bu kapsamda; aygıtın elektriksel olarak kararlılığının sürdürülebilmesi için uygulanan koruyucu kaplama çalışmaları ile ilgili literatür taramasına yer verilmiştir. Koruyucu kaplama uygulama yöntemleri de konu kapsamına dahil edilmiştir. Açık döngü FOD sistemi anlatılmış ve teorik bilgilerden yola çıkılarak kurulan deney düzeneği hakkında bilgi verilmiştir. Açık döngü deney düzeneğinde hazırlanan optik bütün toparlama çalışmaları, ilgili görsellerle detaylı olarak açıklanmıştır. Son olarak; koruyucu kaplama uygulanan entegre optik aygıtların sistem içindeki performansı grafiksel karşılaştırmalarla analiz edilmiştir.

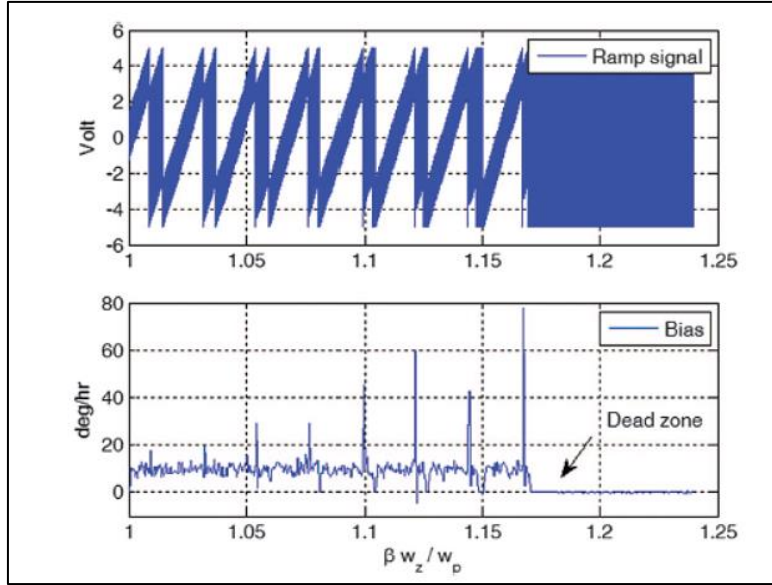
5.1. Literatür Değerlendirmeleri

Koruyucu kaplamalar konusunda; yayınlanan makale ve tez çalışmaları incelenmiş olup, yayınlanmış olan çalışmalar bu teze referans olarak gösterilmiştir.

Koruyucu kaplama malzemeleri; elektronik bileşenlerde ve devre elemanlarında toz, nem gibi çevresel atıklara karşı koruma amaçlı kullanılmaktadır. Toz, nem ve metalik kalıntılar gibi istenmeyen durumlar elektronik aygıtlar ve bileşenlerde kısa devreye sebep olabilmektedir. Buna en olarak; bazı koruyucu kaplamalar ısısal yalıtım, şok-titreşim söndürmesi ve yüksek gerilimli aygıtlarda elektriksel yalıtım amaçlı kullanılmaktadır [38]. Bu tip özellikler; koruyucu kaplamaları havacılık ve uzay uygulamalarında yüksek güvenilirlik sağlaması amacıyla önemli kılmaktadır [38]. Özellikle PCB ve çip paketleri gibi elektriksel ara bağlantı çalışmalarında kullanılan elemanlar bazen zor çevresel şartlar altında kullanılmaktadır. Bu sebeple; bu tip elemanların güvenilirlik gereksinimlerinin sağlanabilmesi için koruyucu kaplama işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [38]. Özellikle elektronik uygulamalardaki lehimleme işlemlerinde, lehimlenen bölgenin korunması için bu tip uygulamalar tercih edilmektedir. Buna ek olarak bazı literatür çalışmalarında; koruyucu kaplamanın kalınlık değişimine göre uygulanan sıcaklık test profilleri baz alınarak örneklerin bozulma karakteristikleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. -55 °C, +125 °C ve -20

$^{\circ}\text{C}$, $+80^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralıklarında test profilleri uygulanarak farklı kaplama kalınlıklarının bozulma mekanizmaları simülasyonlar aracılığı ile incelenmiştir [38]. Epoksi, akrilik, silikon ve RTV (Room Temperature Vulcanizing) gibi farklı tipte koruyucu malzemeler kullanılarak farklı yüzeyler üzerine kaplamalar yapılmış ve bu şekilde elde edilen numunelerin yarısı $60^{\circ}\text{C}/85\% \text{RH}$ (relative humidity) koşullarında sıcaklık-nem testine maruz bırakılırken, diğer yarısı ise $-55^{\circ}\text{C}, +85^{\circ}\text{C}$ aralığında sıcaklık testine maruz bırakılmıştır [39]. Gerçekleştirilen bu testlerle örneklerin güvenilirlik analizlerinin yapılması amaçlanmıştır.

Koruyucu kaplamalar; lehim yapılan yüzeyler, PCB gibi elektronikte sıkça kullanılan malzemelere yalıtkanlık sağlamak amacıyla kaplanması yanı sıra; benzer şekilde entegre optik aygıtların yüzeylerinde pasivasyon amaçlı veya toz, nem, atık gibi istenmeyen maddeleri yüzeyden uzaklaştırmak amacıyla da kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında üretilen aygıtlar entegre optik aygıtlardır. Diğer bir ifadeyle; elektriksel bir etki ile ışığın fazı modüle edilmektedir. Bu sebeple; tez çalışmasına konu olan aygıtların elektriksel olarak çalışabilmesi için Au elektrotlar litografi yöntemi ile aygıtın yüzeyinde oluşturulmuştur. Koruyucu kaplamanın aygıtın üst yüzeyine kaplanması ile bu elektrotlar dış etkenlere karşı korunmaktadır. Böylece aygıtın çalışma performansı artırılmış ve güvenilirlik sağlanmış olur. Entegre optik aygıtlara uygulanan koruyucu kaplama çalışmaları ile ilgili bazı yayın çalışmaları araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar doğrultusunda; bir çalışmada, LiNbO_3 tabanlı MIOD (Multi Functional Integrated Optical Device) aygıtındaki elektrotlar ve dalgakılavuzları arasına SiO_2 (Silikon Dioksit) tampon katmanı yerleştirilmiştir [40]. Bu katmanın yerleştirilmesindeki amaç; metal elektrotlarının soğurma kaybını azaltmak ve Li^+ iyonlarının dışarı difüzyonunu engellemektir. Bu literatür çalışmasında; modülasyon faz kaymasının IFOD'un çalışma performansı üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Analiz sonuçları; bu kaymanın IFOD'un performansında ihmal edilemeyecek düzeyde ölü bölge (dead zone) yaratacağını göstermiştir. Ölü bölge; IFOD sistemlerinin performansını belirleyen önemli bir faktördür ve IFOD'un elektriksel karakterizasyonlarında öne çıkan bir terimdir. Elektriksel olarak modülasyon oluşturmak amacıyla dış bir elektronik kaynaktan rampa sinyali uygulanmaktadır. Rampa sinyalinde osilasyon meydana gelmesi dönü sinyalinin sıfırlamakta, böylece ölü bölge yaratılmaktadır [3]. Ölü bölge Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Rampa sinyali ve faz modülasyon kayması ile meydana gelen beslem sinyali [3]

Ölü bölge yaratılmasının birden fazla nedeni vardır. Bunlardan birisi; IOD içerisinde meydana gelen modülasyon fazının elektrotlardaki kirlenme, elektrot direncindeki artış, LiNbO_3 alttaşın piezoelektrik etkisi veya organik kirlenme gibi sebeplerden dolayı bozulmasıdır [3]. Ölü bölgeyi sönmülendirmeye yönelik olarak faz kaymasını azaltmak için farklı yöntemler önerilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Bu yöntemlerden birisi; LiNbO_3 tabanlı MIOD aygıtındaki elektrotlar ve dalgakılavuzu arasına SiO_2 tampon katmanı yerleştirmek olarak açıklanmıştır. Bu katmanın yerleştirilmesindeki amaç; metal elektrotlarının absorpsiyon kaybını azaltmak ve Li^+ iyonlarının dışarı difüzyonunu engellemektir. LiNbO_3 tabanlı şiddet modülatörleri üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda; SiO_2 tampon tabakanın OH^- grupları ve fotorezist çözücü içerisindeki alkali metal iyonları gibi istenmeyen atıklardan etkilendiği saptanmıştır [40]. Bu OH^- grupları ve alkali metal iyonları SiO_2 içerisinde iletimi etkileyen önemli faktörlerdir ve yapı içerisinde hareket edebilen türler olarak bilinmektedir. Bu türler; modülasyon elektrik alanı tarafından kolaylıkla çekilebilir, elektrotlar altında toplanabilir ve elektrotlar arasındaki modülasyonu sağlayan elektrik alana karşı indüklenmiş bir elektrik alan yaratabilirler ve modülasyon faz kayması meydana gelebilir [40]. Bu makaleye göre; tampon tabaka varlığından dolayı meydana gelen modülasyon faz kaymasını azaltmak için 3 farklı alternatif önerilmiştir: I) SiO_2 tabaka ve üzerinde Si_3N_4 (Silikon Nitrat) tabakası olacak şekilde çift katmanlı tampon tabaka, II) $\text{SiO}_x\text{N}_{1-x}$ bileşenli tampon tabakası, III) tampon tabakasız yapı alternatifleridir. Bu alternatiflerin denendiği 4 farklı yongadan üretilmiş MIOD aygıtları IFOD sistemleri içine entegre edilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Bahsedilen Ar-Ge çalışmaları denenmiş

farklı MIOD'ların entegre edildiği IFOD sistemlerinin modülasyon faz kaymaları ve ölü bölge karakteristikleri Çizelge 5.1'de listelenmiştir.

Çizelge 5.1. Farklı MIOD aygıtları için tampon tabaka analizleri

Aygıt Kodu	Tampon Tabaka	ΔV (mV)	Ölü Bölge Alanı (°/saat)
1	SiO_2	22,8	5,0
2	SiO_2	60,2	12,0
3	$\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$	20,4	4,0
4	$\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$	14,2	3,0
5	$\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$	12,2	2,5
6	$\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$	18,8	3,7
7	$\text{SiO}_x\text{N}_{1-x}$	8,8	1,5
8	$\text{SiO}_x\text{N}_{1-x}$	6,4	1,1
9	$\text{SiO}_x\text{N}_{1-x}$	4,2	0,6
10	$\text{SiO}_x\text{N}_{1-x}$	7,4	1,2
11	Yok	1,0	< 0,01
12	Yok	0,8	< 0,01
13	Yok	0,7	< 0,01
14	Yok	0,6	< 0,01

Çizelge 5.1'e göre; ölü bölge olarak adlandırılan alanın faz kayması ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Tablodaki sonuçlara göre; SiO_2 haricindeki diğer tampon tabaka katmanları daha az faz kaymasına sebep olmaktadır. Hiç tampon tabaka olmadan üretilen bir MIOD'un entegre edildiği IFOD için ölü bölge alanı < 0.01 °/saat olarak saptanmıştır. Literatür çalışmasına göre elde edilen bu sonuçlar; uygun elektrot tasarımı kullanıldığı takdirde tampon tabaka olmaksızın üretilen MIOD'un performansında bozulma olmayacağını göstermiştir. Ancak yine de; tampon tabakayı kaldırmak modülasyon faz kaymasını azaltmak için etkili bir yöntem olsa da, Li^+ iyonları kolaylıkla dışarı difüz edebileceği için ve elektrot metali alttaş içine doğru direkt olarak yayılabileceği için MIOD'un uzun dönem güvenilirliği sağlanamamaktadır [40]. Tüm bu göstergeler doğrultusunda; $\text{SiO}_x\text{N}_{1-x}$ gibi bir

bileşimdeki tampon tabakanın, eğer ölü bölge alanı deneysel uygulamalarda performans kriterlerini sağlayacak durumdaysa ve düşük dönü hızlarında performansın kritik derecede önemli olmadığı yerlerde kullanılabileceği öngörülmüştür.

Yürütülen tez çalışmasında; elektriksel olarak meydana gelen güvenilirlik sorunlarını çözmek için kimyasal değişiklikler yapmak yerine aygıtın elektrotlarını fiziksel olarak dış etkenlere karşı koruma amaçlı yöntemler üzerinde çalışılmıştır. Bunun sebebi; kullanılan bu yöntemin mevcut laboratuvar alt yapısı göz önünde bulundurulduğunda daha uygulanabilir olması ve ayrıca bahsedilen bu fiziksel amaçlı koruma yöntemleriyle elde edilen test sonuçlarının daha iyi analiz edilebilir düzeyde olması olarak açıklanmaktadır. Nitekim; değinilen literatür çalışmaları, bu tezde elektriksel güvenilirlik problemlerini gidermeye yönelik olarak yapılan deneylerde referans niteliğinde olmuştur. Gerçekleştirilen deneylerde aygıt yüzeyi koruyucu bir kaplama ile kaplanarak zor çevre koşullarında çalışma performansı uzun süreli daha kararlı ve güvenilir düzeyde tutulabilmiştir.

Yapılan araştırmalar sonucunda; fiziksel koruyucu kaplama uygulamaları ile ilgili fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulduğu sonucuna varılmıştır. Bu sebeple; gerçekleştirilen çalışmalar bu yönde olacaktır.

5.2. Koruyucu Kaplama Uygulama Yöntemleri

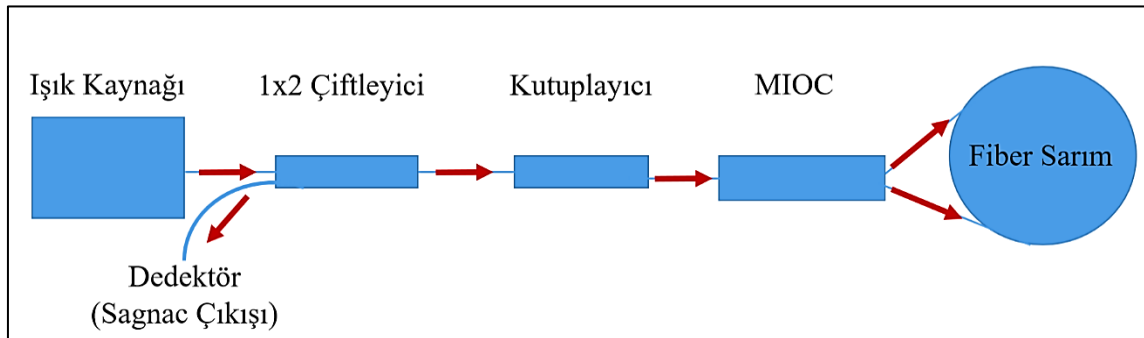
Koruyucu kaplama (conformal coating); aygıtları nem, toz, korozyon, aşındırma ve diğer çevresel etmenlere karşı korumak amacıyla uygulanan bir işlemdir. Genel amaçlı olarak kullanılan koruyucu kaplama malzemeleri; silikon, akrilik, üretilen, epoksi ve perilen'dir. Kullanılan bu tip malzemeler genel olarak dielektrik ve yalıtkanlık özelliği sağlayan malzemelerdir. Dielektrik koruyucu kaplamaları; elektriksel olarak yalıtkanlık sağlaması amacıyla önem arz etmektedir. Örneğin; yüksek voltajlı aygıtlarda iletkenlik meydana getirecek birtakım istenmeyen yabancı cisimler PCB bölgesi içerisinde girmeye başladığında, aygıtın yalıtkanlık özelliği korunmamaya başlar. Koruyucu kaplama dielektrik malzemeler; tüysü cisimlerin oluşumunu önlerler ve bu tip cisimlerin aygıtın yüzeyine yapışmasını engellerler.

5.2.4. Otomatik spreyci koruyucu kaplama

Otomatik spreyci koruyucu kaplama işlemi; en ileri seviye koruyucu kaplama tekniği olarak değerlendirilmektedir. Yüksek hacimli ve yüksek hassasiyetli uygulamalar için tercih edilmektedir. Otomatik bir işlem olmasından dolayı robotlarla kontrol edildiği için, maskelemeye çok fazla ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu yöntemle; kontrol edilebilir ve tekrar edilebilir düzeyde sonuçlar elde edilmektedir. Otomatik spreyci makineleri elektronik sistemler olduğu için; diğer tekniklere nazaran daha maliyetli olarak görülmektedir. Ancak yapılan prosesin sürdürülebilir ve kararlı olması göz önünde bulundurulduğunda, otomatik spreyci kaplama tekniği en uygun teknik olarak değerlendirilmektedir.

5.3. Açık Döngü FOD Sistematiği

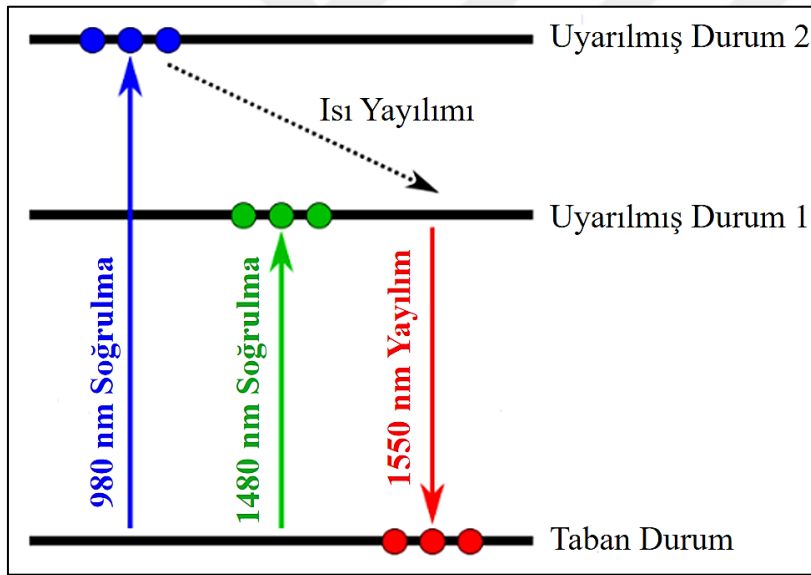
IFOD'un sinyal işleme şeması genel olarak iki kategoride toplanmaktadır: i) açık döngü ii) kapalı döngü. Açık döngü IFOD sisteminde; dünya dönüşü direk ölçüm yöntemi ile elde edilmektedir [8]. IFOD'un çalışma prensibi; dönen bir sistemde zıt yönlü ışık ışınları arasındaki faz farkının ölçümüne dayanmaktadır. Zıt yönlü sistemde dönen ışık dalgaları farklı optik yollar katetmektedir [8]. Zıt yönlerdeki faz farkı dönüş parametresinin ölçümüdür. Şekil 5.2'de; IFOD'un şematik yapısı gösterilmiştir.



Şekil 5.2. FOD şematik yapısı

IFOD'un ana bileşenleri; Şekil 5.2'de görüldüğü gibi ışık kaynağı, kutuplayıcı, çiftleyici, fotodedektör, MIOC ve sarımdan oluşmaktadır. MIOC; hem çiftleyici hem de faz modülatörü görevini üstlenmektedir. FOD mimarisinde ışık kaynağı olarak genellikle 1550 nm'de ışımaya yapan ASE ışık kaynağı kullanılmaktadır [13]. Modülatör üretiminde kullanılan LiNbO₃ malzemesi; 1550 nm'de %80'e yakın bir geçirgenlik değerine sahiptir ve ASE ışık kaynağı için dalga boyu kararlılığında iyileştirme sağlanmaktadır [8]. ASE ışık kaynakları Erbiyum

(Er) katkılanmış fiberler ile birlikte kullanılmaktadırlar. Bu tip bir ışık kaynağında; yükseltilmiş kendiliğinden uyarılmış yayılım elde etmek amacıyla kazanç ortamı yaratmak için güçlü bir lazer diyot kullanılmaktadır. Kazanç ortamı ile elde edilen ışınım FOD sensörlerinde ışık kaynağı olarak görev yapmaktadır. ASE ışık kaynağının çalışma prensibi; kazanç ortamını uyararak için pompa diyot kullanılması dayanmaktadır. Pompa diyotun dalga boyu 980 nm'dir. 980 nm ile pompalama olduğunda Er kazanç fiberi uyarılmaktadır, 1550 nm'de yükseltilerek ışıma yapmaktadır. FOD sisteminde ise 1550 nm dalga boyundaki ışıma kullanılmaktadır. ASE ışık kaynakları; EDFA'nın (Erbium Doped Fiber Amplifier) çalışma prensibini oluşturmaktadır. EDFA'lar çoklu optik sinyalleri eş zamanlı olarak yükseltebilirler, bu sebeple WDM (Wavelength Division Multiplexing) teknolojisi ile kullanılabilirler. EDFA'nın çalışma prensibi; kendiliğinden yayılım ve uyarılmış yayılım olaylarına dayanmaktadır. Şekil 5.3'te Erbiyum'un enerji diyagramı ve 1550 nm'de ışımanın nasıl meydana geldiği gösterilmiştir.

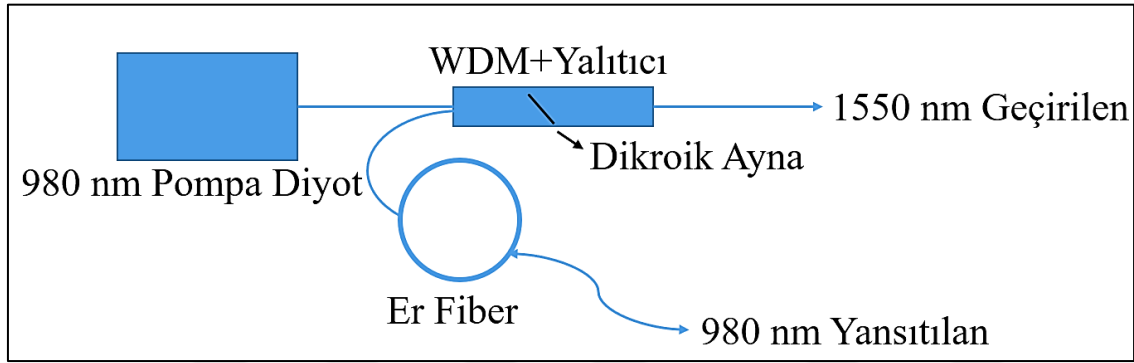


Şekil 5.3. Er enerji diyagramı

EDFA'da pompalama yapabilmek için kullanılan tipik dalgalı boyuları 980 nm veya 1480 nm'dir. EDFA'da 1480 nm'de pompalama yapıldığı zaman, fiber içine katkılanmış Er iyonları pompa ışınlarını soğurmaktadır ve Şekil 5.3'teki uyarılmış durum 1 seviyesine uyarılmaktadır. Yeteri kadar pompa gücü fibere sağlandığı zaman ve taban durum ile uyarılmış durum 1 arasında nüfus değişimi (population inversion) meydana geldiği zaman, 1550 nm civarında uyarılmış yayılım ile ışığın enerjisi yükseltilmektedir. EDFA; 980 nm'de pompalandığı zaman, Er iyonları pompa diyottan gelen ışık ışınlarını soğurmakta ve

uyarılmış durum 2'ye uyarılmaktadır. Uyarılmış durum 2'deki yaşam ömrü oldukça kısadır ve sonuç olarak Er iyonları foton emilimi olmadan ısı yayılımı ile uyarılmış durum 1'e düşmektedir. Bu olay; taban durumu ile uyarılmış durum 1 arasında nüfus değişimine sebep olmaktadır ve yükseltme işlemi 1550 nm'de gerçekleştirilmektedir.

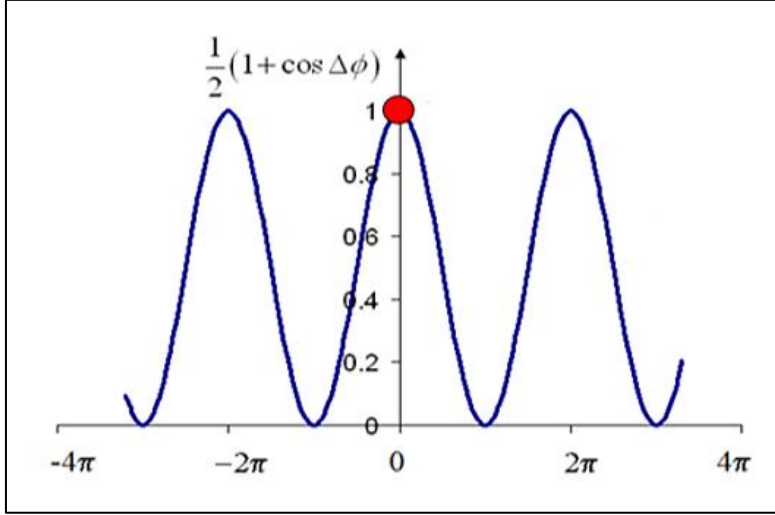
Bu tez çalışmasındaki deneysel çalışmalarda ASE ışık kaynağı kullanılmıştır. Bu ışık kaynağının tercih edilme nedenleri; kolay kurulumunun olması, mekanik olarak sağlam olması, sıcaklık ve nem gibi dış çevresel değişimlere karşı duyarlı olmamasıdır. Kullanılan ASE ışık kaynağı şematik olarak Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. ASE ışık kaynağı blok diyagramı

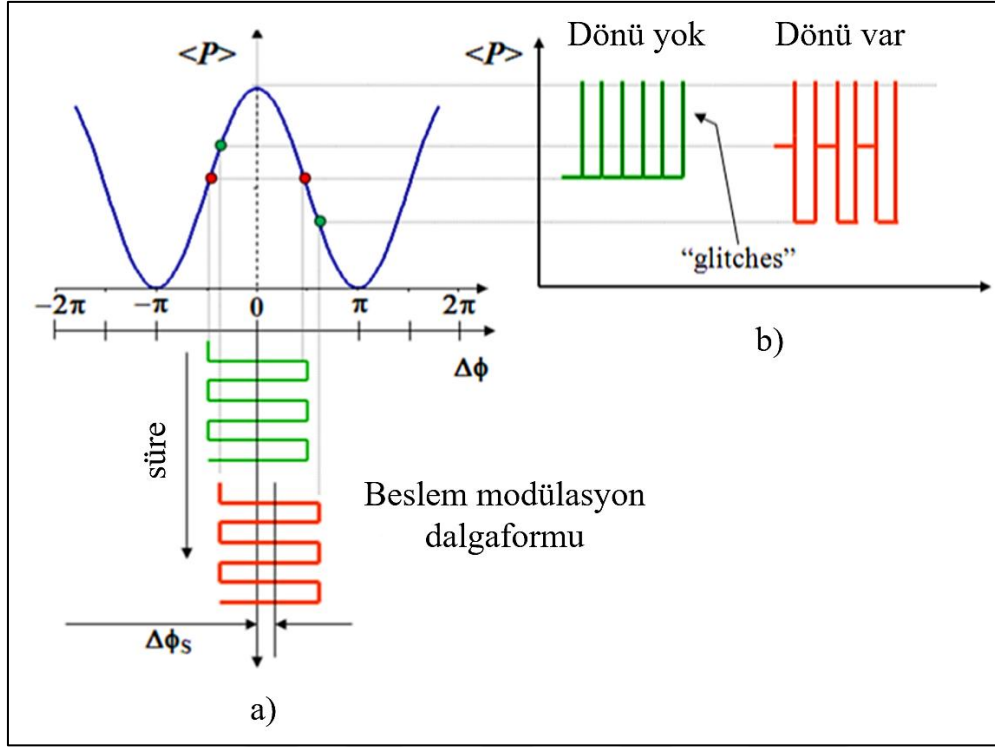
Şekil 5.4'e göre; ASE ışık kaynağında pompa diyottan gelen 980 nm dalga boyundaki ışık ışınları ayna aracılığı ile yansıtılmaktadır ve Er kazanç fiberi içindeki 1550 nm dalgaboylu ışık ışınları ile aynı ortama girmektedir. Uyarılmış yayılım ise; 1550 nm dalga boyundaki ışığın enerjisinin yükseltilmesidir. Sonuç olarak; 980 nm pompa diyot ile yükseltme işlemi yapılmaktadır. Böylece; sisteme 1550 nm dalga boyundaki yükseltilmiş ışık beslenmektedir.

FOD sensörü bir v hızı ile döndürüldüğünde, sensör ile aynı yönde dönen ışın demeti sensör ile zıt yönde dönen ışın demetine göre daha fazla optik yol katetmektedir [8]. Bu durumda iki ışın demeti arasında faz kayması meydana gelmektedir. Bu kayma Sagnac faz kayması olarak adlandırılmaktadır. Dönü hassasiyetinin algılanmasında elektro optik modülatörlerin varlığının önemi şu şekilde açıklanabilir: Sagnac kayması en iyi ışık kaynağı üzerindeki modülasyon kullanılarak ölçülmektedir. Fiziksel olarak faz kaymasını gerçekleştirmek ve dönü duyarlılığını daha iyi anlamak için interferogram grafiği analiz edilmiştir. Şekil 5.5'te; dedektör çıkışındaki interferogram grafiği gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Dedektör çıkışındaki interferogram [41]

Şekil 5.5'te; dedektör çıkışının Sagnac faz kaymasına ($\Delta\phi$) göre değişimi görülmektedir. Dönü yokken $\Delta\phi = 0$ 'dır ve grafiğe göre kırmızı renk ile belirtilen noktayı göstermektedir. Dönü varlığında ise, bu kırmızı nokta $\Delta\phi$ ile orantılı bir şekilde hareket edecektir. $\Delta\phi$ faz kayması çok küçük miktarlarda olabilir. Bu sebeple; bu noktanın çalışma noktası olması için bazı sınırlandırmalar mevcuttur. Dönü ölçümündeki düşük duyarlılık seviyesi ve dönü yönüne ilişkin herhangi bir bilginin elde edilmemesi bu sınırlandırmalara örnek olarak gösterilebilir. FOD sensörlerinin temel görevi; dönme işlevinin hassas bir şekilde ölçümüne dayandığı için, beslem modülasyonu olarak adlandırılan kavramdan bahsedilmesi uygun görülmektedir [13]. Beslem modülasyonu; fiber sarımının ucuna bir elektro optik faz modülatörü yerleştirilerek sağlanmaktadır [42]. Şekil 5.6'da, kare dalga beslem modülasyonu grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Kare dalga beslem modülasyonu [41]

Çalışma noktası Şekil 5.5'teki gibi grafiğin tepe noktasında olması yerine, beslem modülasyonu Şekil 5.6a'daki interferometre grafiğinde bu noktayı⁴ $-\pi/2$ ve $+\pi/2$ arasında değiştirmektedir. Dönü yokken elde edilen dedektör çıkışı; Şekil 5.6b'deki yeşil formundadır. Şekil 5.6a'da doğru akım (d.a) seviyesindeki karşılığına bakıldığında, yeşil renkteki grafik dönü yokken elde edilen karakter ile aynıdır. Dönü varken elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde ise; Şekil 5.6b'de kırmızı renkteki grafik formu elde edilmektedir. Bu grafiğin d.a seviyesindeki karşılığı ise Şekil 5.6a'da gösterildiği gibi, $-\pi/2$ ve $+\pi/2$ civarında değişmektedir. Bu farklılık; dönü sebebiyle meydana gelen Sagnac faz kaymasından kaynaklanmaktadır. Sagnac faz kayması; Eş. 5.1'deki gibi ifade edilmektedir.

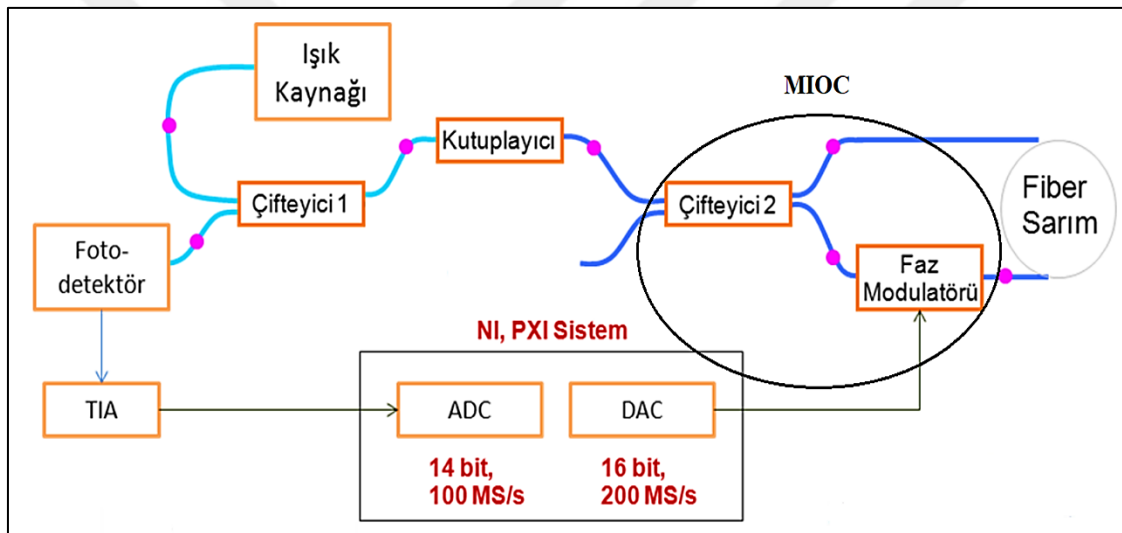
$$\Delta\phi_s = \frac{2\pi}{\lambda c} LD\Omega \quad (5.1)$$

Eş. 5.1'e göre; D sarım çapı, L fiber uzunluğu, λ kullanılan ışığın dalga boyu, Ω dönü hızı ve c ise ışığın boşluktaki hızını temsil etmektedir [4].

⁴ İnterferogram üzerinde iki adet kırmızı nokta ile gösterilmiştir.

Faz modölatörü olmaksızın oluşturulan temel FOD yapısında bazı sınırlandırmalar ile karşılaşmaktadır. Bu sınırlandırmalar: küçük dönü hızları için düşük hassasiyet, yönelim belirsizliği, sınırlandırılmış dinamik menzil ve çıkış sinyalinin dönü hızının doğrusal olmayan bir fonksiyonu olmasıdır [4]. Düşük hassasiyet ve yönelimdeki belirsizlik problemi faz modölatörlerinin kullanılması ile çözülmüştür.

Tez çalışması kapsamında; aygıtların modülasyon karakterizasyonları ve elektriksel kararlılıklarının korunmasına yönelik olarak gerçekleştirilen birtakım Ar-Ge çalışmaları açık döngü FOD sisteminde gerçekleştirilmiştir. Açık döngü FOD yapısı Şekil 5.7’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Açık döngü FOD sistem yapısı şematik gösterim

Şekil 5.7’de sistem yapısı şematik olarak tanımlanmıştır. Optik bütün sistemlerini test etmek için National Instruments (NI) firmasından temin edilen analog-sayısal dönüştürücü (Analog to Digital Converter-ADC), sayısal-analog dönüştürücü (Digital to Analog Converter-DAC) ve FPGA (Field Programmable Gate Array) modülleri ile PXI (PCI Extensions for Instrumentation) sistem oluşturulmuştur. Bir PXI sistemde ana gövde; güç, soğutma ve modül cihazlar ile I/O (input/output) modülleri için haberleşme imkanı sağlamaktadır [43]. Tercihe uygun olarak; bu modüller gömülü bir kontrolcünden veya harici bir bilgisayardan kontrol edilebilmektedir. Test sistemi; optik bütünden fotodedektöre gelen sinyalin gerilime çevrilmesi, yükseltilmesi, filtrelenmesi, sayısal hale getirilip işlenmesi ve dönü sinyali olarak dışarıya verilmesi adımlarından oluşmaktadır. Modülatörü sürmek için kullanılan DAC da bu sistemin bir parçasıdır. Labview ortamında açık döngü FOD’u test edebilecek bir kod

oluşturulmuştur. Bu kod; açık döngü FOD, modülatörü süren DAC, transimpedans amfisi (TIA) ve ADC'den oluşmaktadır. Labview ortamında oluşturulan kod şu işlemleri yapmaktadır:

- FOD'un çıkış sinyalini grafiksel olarak gerçek zamanlı gösterir.
- FOD'un çıkış sinyalinin kullanıcının belirlediği sayıda ortalamasını alıp grafiksel olarak gerçek zamanlı gösterir.
- FOD'un çıkış sinyalindeki modülasyondan kaynaklanan gereksiz yüksek voltaj değişimlerini atarak, sayısal ortalama alıp ekrana yazdırır.
- Modülatörü besleyen kare dalgayı oluşturur.

Resim 5.1'deki görselde ise elektriksel kararlılık ve performans testlerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği gösterilmiştir.



Resim 5.1. Açık döngü deney düzeneği

Deney düzeneğinde kullanılan donanımsal ve yazılımsal bileşenler şu şekilde listelenmiştir:

Ölçüm bilgisayarı: Aygıtın açık döngü testlerini gerçekleştirmek amacıyla kullanılmıştır. Yazılım olarak Labview programı kullanılmıştır.

- FPGA: Bu arayüz; sayısal sinyal işleme fonksiyonlarını sağlamaktadır ve diğer arayüz bileşenleri ile iletişim kurmaktadır. Açık döngü test çalışmalarında; V_{π} gerilimi ölçülmüş, entegre optik aygıtın modülasyon karakteristiği takip edilmiş ve sistem performansı analiz edilmiştir.
- NI-PXIE-1071: Şematik konfigürasyonda belirtildiği gibi; I/O modüller için haberleşme imkanı sağlamaktadır.
- Diyot sürücüsü: Diyot ve sıcaklık kontrol mekanizması olarak kullanılan bir ekipmandır. Elektriksel testlerde kullanılan ASE ışık kaynağı ITC 4005 lazer diyot sürücüsü kullanılarak 0.9 mA akım değerinde çalıştırılmıştır. Diyot sıcaklığı ise 35 °C'ye ayarlanmıştır.
- Fotodedektör: 800 nm – 1700 nm dalga boyu aralığında çalışabilen InGaAs tabanlı fiber çiftlenimli bir fotodedektördür. 1 – 5 GHz aralığında bant genişliğine sahiptir. Optik sinyali elektriksel sinyale çevirmek için kullanılmıştır.
- Yükselteç (Amfi): Düşük gürültü seviyesine sahip gerilim yükseltecidir. 12 MHz'e kadar çalışma kapasitesine sahiptir.
- TIA (Trans impedans amplifier): 200 MHz'e varan bant genişliğine sahiptir. Ayarlanabilir beslem gerilim özelliğine sahiptir. Güç seviyesine göre kazanç ayarlanabilmektedir. Küçük sinyalleri yükseltmek amacıyla kullanılmaktadır. d.a ve a.a (alternatif akım) uygulamalar için tercih edilmektedir.
- Güç kaynağı: Çoklu girişlere sahip masaüstü bir güç kaynağıdır. 20 V'a kadar gerilim sağlamaktadır. Açık döngü sistemde; amfiyi besleyerek aygıtı sürmek amacıyla kullanılmıştır.
- Koruyucu fanus: Test düzeneğinin dış faktörlerden (titreşim, ses vb.) etkilenmemesi için koruyucu amaçlı tercih edilmiştir.

Aygıtın yarı dalga gerilimini ölçmek için sisteme kare dalga beslenerek modülasyon oluşturulmuştur. Kare dalga PXI biriminden tedarik edilmiştir. Oluşturulan modülasyon ile dedektör çıkış sinyali ölçüm arayüzünden takip edilmiştir. Dedektör çıkış sinyali takip edilirken aygıtın yarı dalga gerilimi olarak adlandırılan V_{π} gerilimi ölçülmüştür. V_{π} gerilimi;

Burada; E_1 ve E_2 elektrik alan genliklerini, ω_1 ve ω_2 elektromanyetik dalga frekansını, k_1 ve k_2 dalga vektörünü, x konumu ve ϕ ise iki ışık dalgası arasındaki faz açısını tanımlamaktadır. Girişim yapan iki elektromanyetik dalgaın oluşturduğu elektromanyetik şiddet; Eş. 5.4'te olduğu gibi alanların çarpımının ortalaması olarak ifade edilmektedir.

$$I = \langle E^2 \rangle = \langle (E_1 + E_2)^2 \rangle = \langle E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \rangle = I_1 + I_2 + 2\langle E_1E_2 \rangle$$

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1I_2)^{1/2} \langle \cos(\Delta\phi) \rangle \quad (5.4)$$

Eş. 5.4'teki $\cos(\Delta\phi)$ ifadesinin değişimi girişimin türünü belirlemekle birlikte; yarı dalga geriliminin belirlenmesinde de önemli rol oynamaktadır. Eş. 5.5, 5.6 ve 5.7'de; $\langle \cos(\Delta\phi) \rangle$ ifadesi irdelenmiş ve girişimin tipi belirlenmeye çalışılmıştır.

$$\langle \cos(\Delta\phi) \rangle > 0 \text{ ise yapıcı girişim} \quad (5.5)$$

$$\langle \cos(\Delta\phi) \rangle = 0 \text{ ise } I = I_1 + I_2 \quad (5.6)$$

$$\langle \cos(\Delta\phi) \rangle < 0 \text{ ise yıkıcı girişim} \quad (5.7)$$

Eş. 5.5 ve 5.7'de; şiddet ifadesi kareköklü bir terime bağlıdır. Bu durumda; çizgisel olmayan eşitlikler elde edilmektedir. Diğer bir ifadeyle; dedektör çıkış sinyalinin bozulduğu ve ölçüm alınamadığı bölgeye denk gelmektedir (Bkz. Şekil 5.8). $\langle \cos(\Delta\phi) \rangle = 0$ olması için $\Delta\phi = \pi/2$ olması gerekmektedir. Bu durumda; Eş. 5.6'da gösterildiği gibi doğrusal ve kareköke bağlı olmayan eşitlik elde edilmektedir. Açık döngü FOD sensöründe çalışma geriliminin $V_{\pi/2}$ olarak esas alınmasının temel sebebi budur.

Kolay kurulumunun olması ve dünya dönüşünün direkt olarak ölçülmesi [4] açık döngü sistemin kullanılmasını elverişli kılmaktadır.

Üretilen entegre optik aygıtların açık döngü sistemdeki optik bütünleme çalışmaları bir sonraki bölümde detaylı olarak anlatılmıştır.

5.4. Açık Döngü Sistemde Optik Bütünleme Çalışmaları

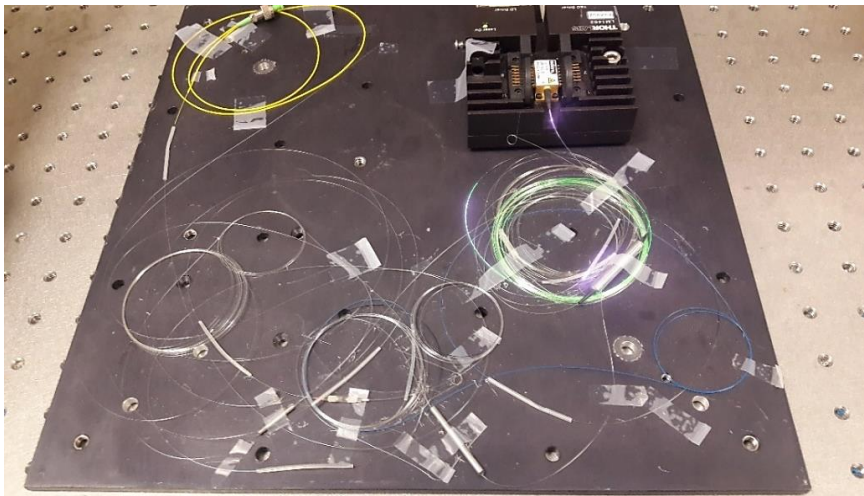
Bu bölümde; entegre optik aygıtların elektriksel olarak uzun süreli çalışma performansını test etmek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmaların nasıl yapıldığına dair bilgilere yer verilecektir. Bu kapsamda; entegre optik aygıtın açık döngü sistemde bütünleme çalışmaları anlatılacaktır.

Açık döngü sistem mekanizmasında, farklı geometrik yapıda üretilen ve paketlenmesi tamamlanan entegre optik aygıtlar test edilmiştir. Bu aygıtlar; Resim 5.2’de gösterilmiştir.



Resim 5.2. Farklı geometrik yapıda üretilen entegre optik aygıtlar

Elektriksel test aşamasında kullanılan açık döngü test düzeneği Resim 5.3’te gösterilmiştir.



Resim 5.3. Açık döngü test düzeneği

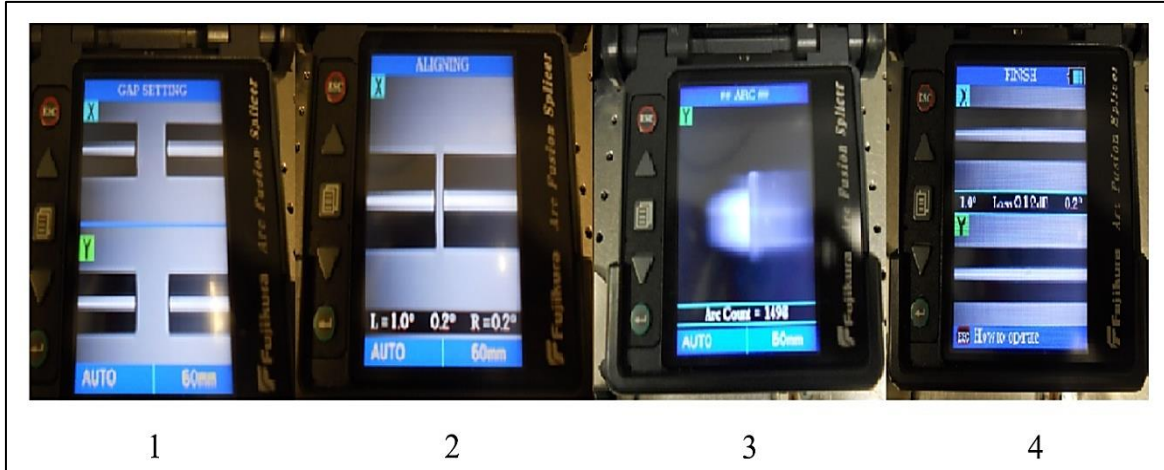
Test sistemini oluşturan temel bileşenler 1x2 çiftleyici, kutuplayıcı, entegre optik aygıt ve fiber sarımdır. Entegre optik aygıt tezin ana hacmini oluşturduğu için, her bölümde farklı karakteristik özellikleri ile detaylandırılırken, diğer bileşenlere tezin Giriş bölümünde kısaca değinilmiştir. Açık döngü sistem; fiber tabanlı bir yapı olduğu için optik bütünleme çalışmaları fiber eki yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda; ilk olarak entegre optik aygıtın giriş fiberi ile kutuplayıcı bileşeni ek yapılmıştır. Ek işleminde kullanılan malzemeler Resim 5.4'te gösterilmiştir.



Resim 5.4. Fiber ek işleminde kullanılan malzemeler

Fiber uçları ek işlemi için soyucu ile açıldıktan sonra alkol ile temizleme işlemi yapılmıştır. Sonrasında; kesici ile soyulan fiber uçları kesilerek fiber ön yüzünün pürüzsüz ve düz hale getirilmesi sağlanmıştır.

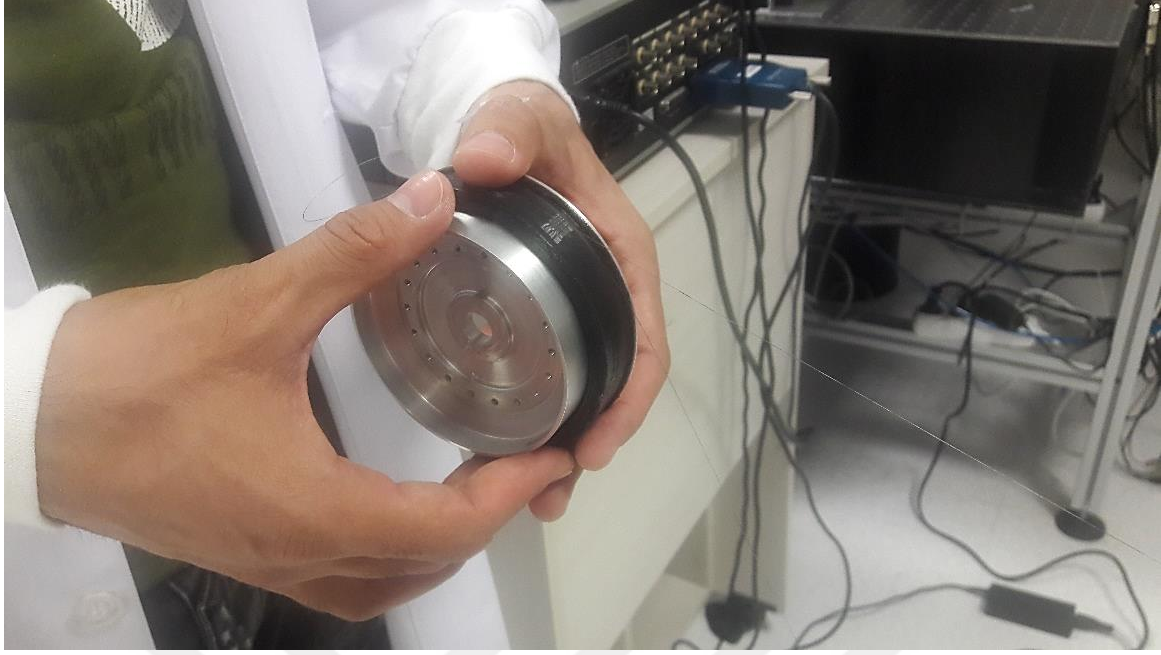
Kesme işleminden sonra fiber ek işlemi gerçekleştirilmiştir. Ek işlemi, Resim 5.5'te 4 aşamalı olarak gösterilmiştir.



Resim 5.5. Fiber ek işlemi aşamaları

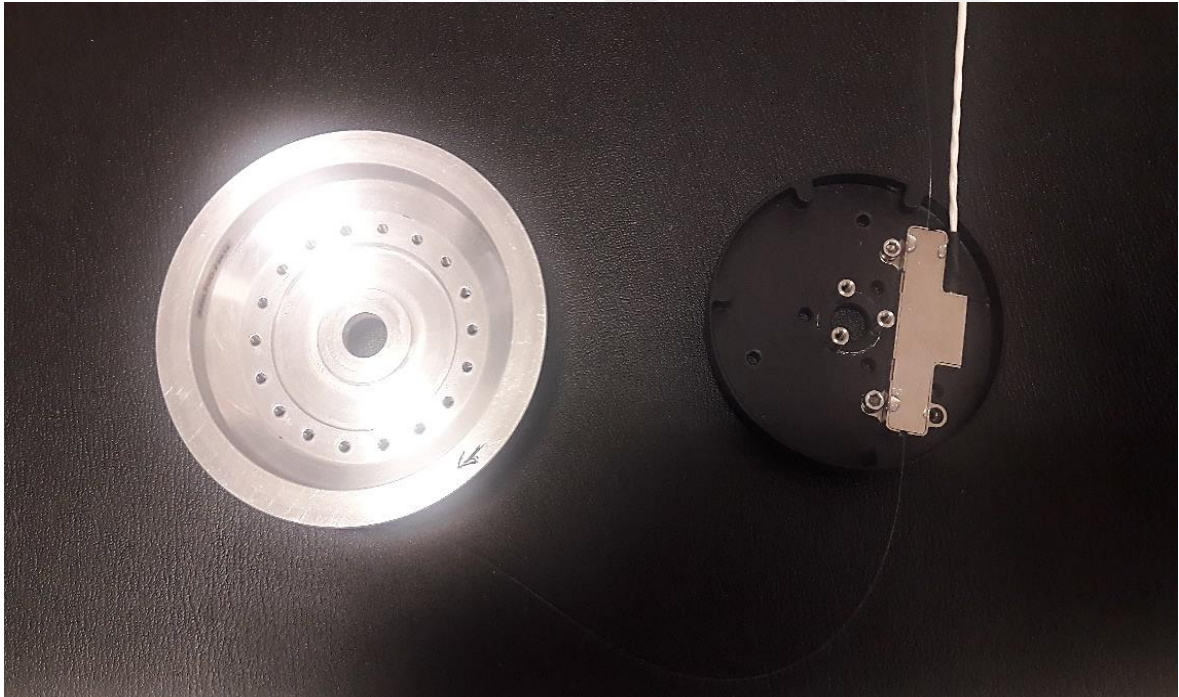
İlk aşamada; bağlantı yapılacak olan iki fiber ucu ek cihazının sağ ve sol yataklarına yerleştirilmiştir ve sağ/sol fiberlerin birbirine göre kaba hizalaması yapılmıştır. İkinci aşamada; farklı açılardan görüntülenen fiber uçları birbirine daha yakın konuma getirilerek hassas hizalama aşamasına geçilmiştir. Üçüncü aşamada; nüveleri karşılıklı olarak denk getirilen fiberlerin uç kısımları ark ile ısıtılıp eritilerek bağlantı sağlanmıştır. Son aşamada ise; bağlantı kaybı ekran üzerinde gösterilmiştir. Bu 4 aşama sonrasında iki fiber birbirine bağlantı yapılmış olur.

Entegre optik aygıt ile kutuplayıcı fiberi bağlantı yapıldıktan sonra, entegre optik aygıtın iki çıkış kolu fiber sarımın iki bacağı ile ek yapılmıştır. Tüm ek çalışmaları tamamlandıktan sonra, FOD'un iki önemli bileşeni olan entegre optik aygıt ile sarım arasında bütünleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Resim 5.6'da; bu bütünleme çalışmasına yer verilmiştir.



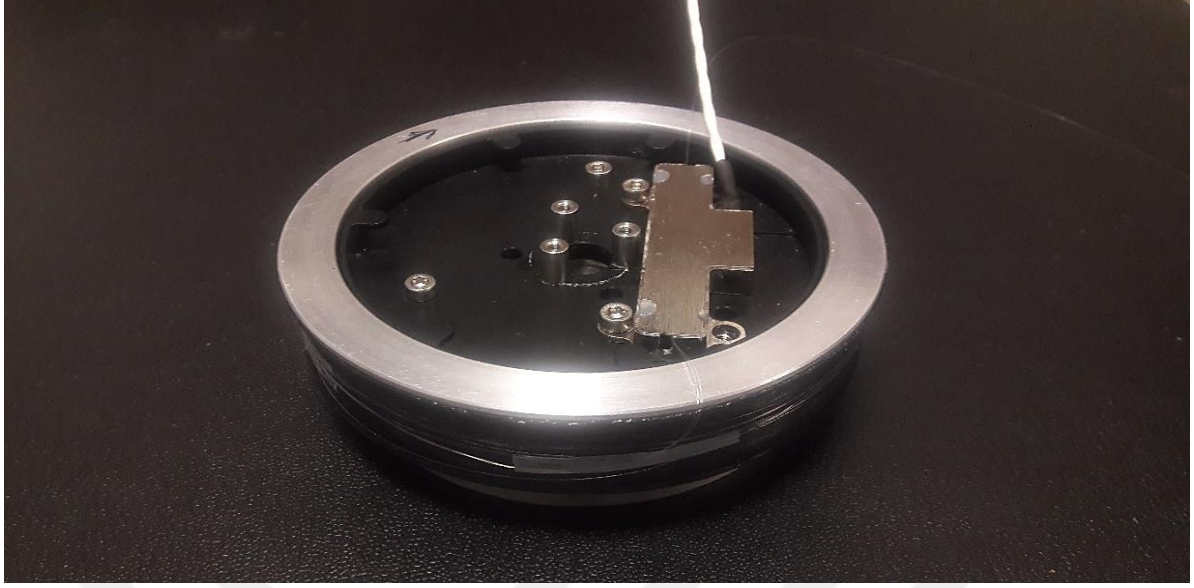
Resim 5.6. Entegre optik aygıt ile fiber sarımının optik bütünleme çalışması

Fiberlerin sarım mekanığının üzerine sarıldıktan sonraki hali Resim 5.7’de gösterilmiştir.



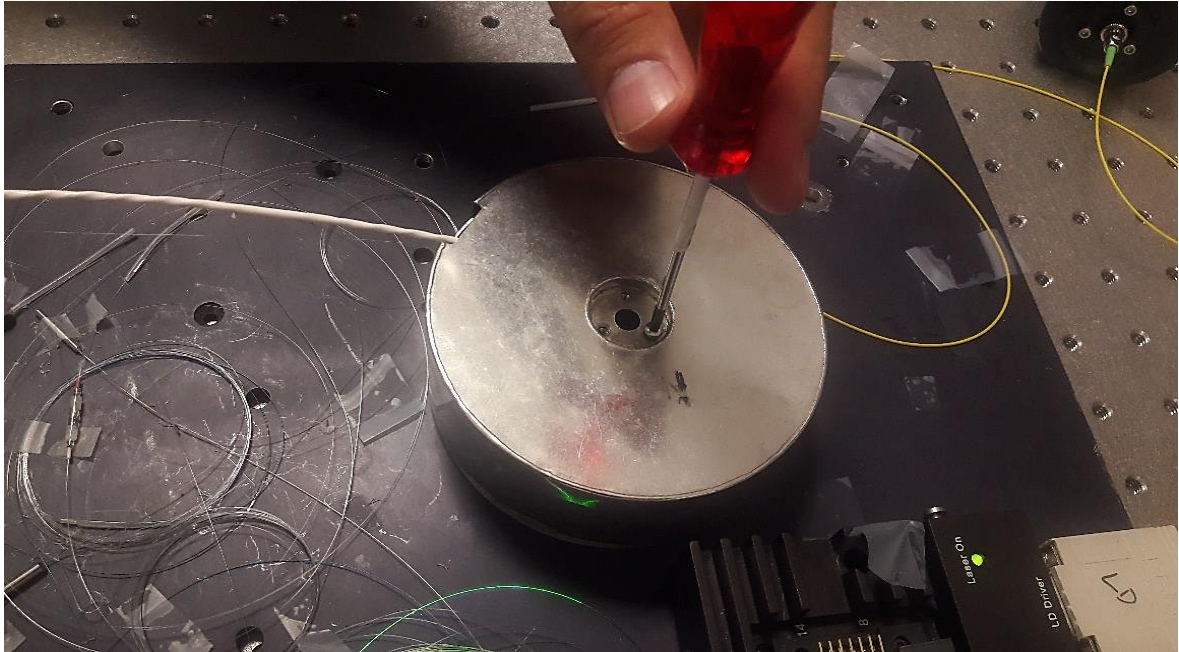
Resim 5.7. Aygıt ve sarımın fiberler toparlandıktan sonraki hali

Fiberler toparlandıktan sonra; aygıtın üzerinde bulunduğu tabla sarım mekanığının üzerine sabitlenmiştir. Sabitleme sonrasında sarım-aygıt ikilisi Resim 5.8’de gösterildiği gibidir. Bu haldeki sarım-aygıt ikilisine “optik bütün” adı verilmektedir.



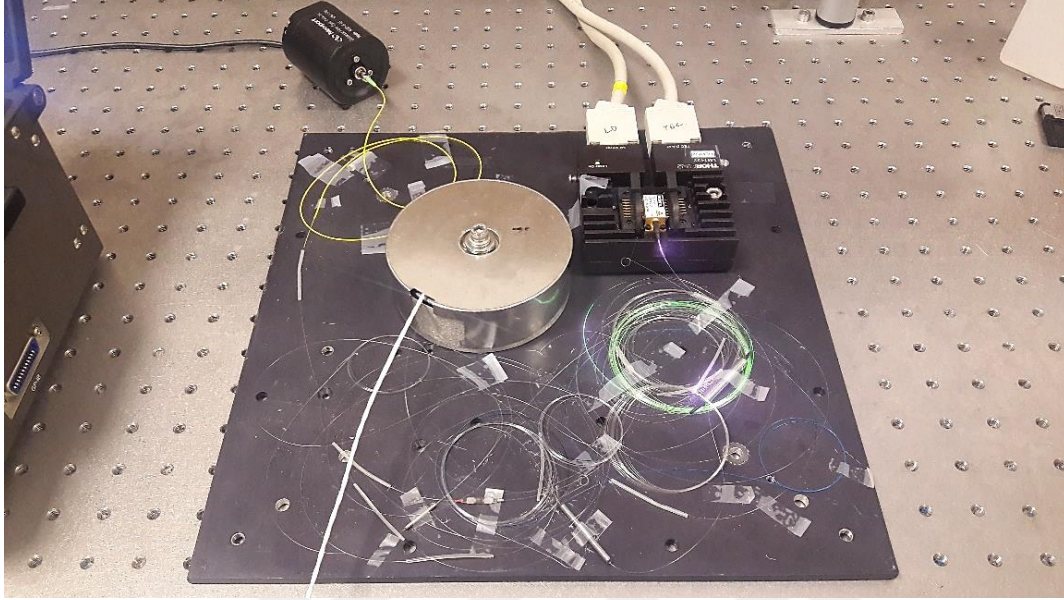
Resim 5.8. Optik bütün

Bir sonraki aşamada; hazırlanmış olan optik bütün manyetik kalkan içerisine yerleştirilmiş ve kapağı kapatılmıştır. Bu işlem; optik bütünün manyetik alandan etkilenmemesi için yapılmıştır. Manyetik kalkan içerisine yerleştirme aşaması Resim 5.9’da gösterilmiştir.



Resim 5.9. Optik bütünün manyetik kalkan içerisine yerleştirilmesi

Resim 5.10’da, açık döngü test düzeneğinde hazırlanmış olan optik bütün sisteminin son hali gösterilmiştir.



Resim 5.10. Açık döngü sistemde hazırlanmış olan optik bütünün son hali

Optik bütün sistemi açık döngü test düzeneğinde hazır hale getirildikten sonra; aygıtların sistem içerisindeki performansı değerlendirilmiştir. Aygıtların elektriksel kararlılığı analiz edilirken; önceki bölümlerde değinildiği gibi koruyucu kaplama faktörü dikkate alınmıştır. Bu sebeple; deneysel Ar-Ge çalışmaları ve analiz sonuçları bir sonraki bölümde bir arada anlatılmıştır.

5.5. Koruyucu Kaplama Malzeme Çeşitleri ve Özellikleri

Bu bölümde; üretilen entegre optik aygıtların elektrotlarına uygulanan 5 farklı koruyucu kaplama malzemesi için, elektriksel kararlılık kapsamında reset sinyal analizleri gerçekleştirilmiştir. Genel uygulama yöntemi fiziksel bir yöntem olup, bu uygulama türünün gerekçeleri de detaylı bir biçimde belirtilmiştir.

Önceki bölümlerde değinildiği gibi; koruyucu kaplama işlemi aygıtın yüzeyini kir, toz, korozyon ve yabancı atıklardan korumak amacıyla uygulanan bir işlemdir. Bu tez çalışmasında; Ar-Ge çalışmaları kapsamında 5 farklı malzeme türü aygıt elektrotları üzerinde denenmiştir ve bunlardan 4 tanesinde fırça ile uygulama yöntemi, kalan 1 tanesinde ise spreycaplama yöntemi tercih edilmiştir. Fırçalama tekniği; nispeten daha az maliyetli ve

kolay bir yöntemdir. Ayrıca; uygulanacak aygıt yüzeyi 50 mm² kadar küçük bir alana sahip olduğu için, fırçalama yöntemi uygun görülmüştür. Bu tezin deneysel çalışmalar kısmında; fırçalama tekniği ile 100'den fazla entegre optik aygıtın elektrotlarına koruyucu kaplama uygulaması yapılmıştır. Bu yöntemle; elektriksel olarak güvenilir seviyede tutulan aygıtlar FOD sistemleri içerisine yerleştirilmiş ve sistem bazında yapılan testlerin sonuçları referans olarak alındığında; bozulmadan çalışma performansını devam ettiren aygıtların yüzdesel oranının %90-%95 aralığında olduğu saptanmıştır.

Yapılan araştırmalara göre koruyucu kaplamalar bir veya iki bileşenlidirler ve mekanik özelliklerine göre farklı davranışlar sergilemektedirler. Literatür çalışmaları incelendiğinde ve farklı sektörlerdeki üretime yönelik bazı dökümanlar referans alındığında; koruyucu kaplamaların genel olarak PCB gibi devre elemanlarında ve büyük hacimli yapılarda kullanıldığı sonucuna varılmıştır. Ancak; koruyucu kaplamanın kullanım amaçları dikkate alındığında, üretilen LiNbO₃ tabanlı entegre optik aygıtlarla birlikte kullanılabileceği öngörülmüştür.

Si₃N₄ ve SiO₂ gibi dielektrik malzemeler üretim basamağında kaplama malzemesi olarak kullanıldığında, aygıtın modülasyon testlerine herhangi bir olumsuz etkinin yansımadağı gözlemlenmiştir [40]. Referans verilen makalenin sonuç ve değerlendirmeler bölümünde bu malzemelerin kullanılması önerilmemiş; ancak aygıtın uzun dönemli kararlılığının sürdürülebilmesi için, bazı sistem performansları kabul edilebilir ölçüde olmak koşuluyla SiO_xN_{1-x} gibi sitokiyometrik orana sahip bir malzemenin kaplama malzemesi olarak kullanılabileceği öne sürülmüştür. Bu yayın çalışması referans alınarak, laboratuvar ortamında PDKBB (Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirmef) cihazı ile bazı aygıtlara ayrı proseslerde pasivasyon amaçlı SiO₂ ve Si₃N₄ kaplanmıştır. SiO₂ ve Si₃N₄ malzemeleri aygıt yüzeyine kaplama yapıldığında, gerçekleştirilen testler sonucunda elektriksel kararlılığı zayıflatığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple; tez çalışmasının fabrikasyon basamağında bu iki malzemenin kullanılması durdurulmuştur. Bu Ar-Ge çalışmasının diğer bir dezavantajı; maliyetli, uzun ve yoğun iş gücü gerektiren bir çalışma olmasıdır. Koruyucu kaplama işlemi fiziksel ve kolay uygulanabilir bir işlem olduğu için aygıtın elektrotlarını dış etkenlere karşı koruma amaçlı tercih edilmiştir. Kullanılan koruyucu kaplamalar; silikon bazlı, UV ışıkla sertleşen epoksi, RTV ve spreyci şeklindedir. Bu malzemelerin temel özellikleri Çizelge 5.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.2. Koruyucu kaplama temel parametreleri

Koruyucu Kaplama Malzeme / Özellikleri	Dow Corning 1-2577	Norland NOA61	Transene RTV 111	TechSpray 2102 Fine-L-Kote SR	OmniVisc 1050
Vizkozite (Pa.s)	1,05	0,3	10	0,04-0,1	50-80
Akrilik veya Silikon?	Silikon	Akrilik	Silikon	Silikon	Silikon
Sertleşme Koşulları	Oda sıcaklığı @25 °C, 2 saat	UV ışık altında, 15 dk	Oda sıcaklığı @25 °C, 2 saat	Oda sıcaklığı @25 °C, 72 saat	Oda sıcaklığı @25 °C, 24 saat
Uygulama Yöntemi	Fırçalama	Fırçalama	Fırçalama	Sprey Tüp	Fırçalama
Seyreltici Malzeme	Xylene	Yok	Yok	Yok	Yok
Katalizör	Yok	Yok	Var	Yok	Yok
Çalışma Sıcaklık Aralığı (°C)	[-45,+200]	[-150, +125]	[-50, +250]	[-65, +200]	[-70, +200]

Çizelge 5.2’de belirtilen malzemeler genel olarak silikon bazlı ve akrilik bazlı olarak gruplandırılmaktadır. Silikon bazlı malzemeler elastik ve kırılğan olmayan bir yapıya sahip iken, akrilik bazlı malzemeler ise kırılğan ve gevrek bir yapıya sahiptir. Listelenen malzemeler iki grupta toplanmasına karşılık; deneysel çalışmalarda farklı markalardaki ticari ürünler denenmiş olup, bu ürünlerin kullanımına yönelik olarak analiz sonuçlarında meydana gelen değişimler irdelenmiştir. Bu sebeple; kullanılan koruyucu kaplama epoksileri ticari markalarına göre sınıflandırılmışlardır.

Dow Corning; tek bileşenli, saydam, sertleştikten sonra aşındırmaya karşı dirençli bir malzemedir. Devre elemanlarında koruyuculuk sağlamaktadır ve MIL-I-46058C askeri standartlarını sağlamaktadır [44]. Yüzeye iyi derecede yapışma özelliği göstermektedir. Silikon reçine solüsyon bazlı bir malzemedir. Sprey, fırça, akıtma, daldırma ve otomatik olarak maskeleme yöntemi ile yüzeye kaplama yapılabilir. Dow Corning; seyreltme yapılar hazırlanmıştır. Seyreltici olarak Xylene kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında 15 ml (mililitre) Dow Corning ve 3 ml Xylene bir beher içerisinde karışım haline getirilmiştir. Hazırlanan karışımın daha hızlı bir şekilde tepkimeye girmesi için bir çubuk yardımıyla karıştırma işlemi yapılmıştır.

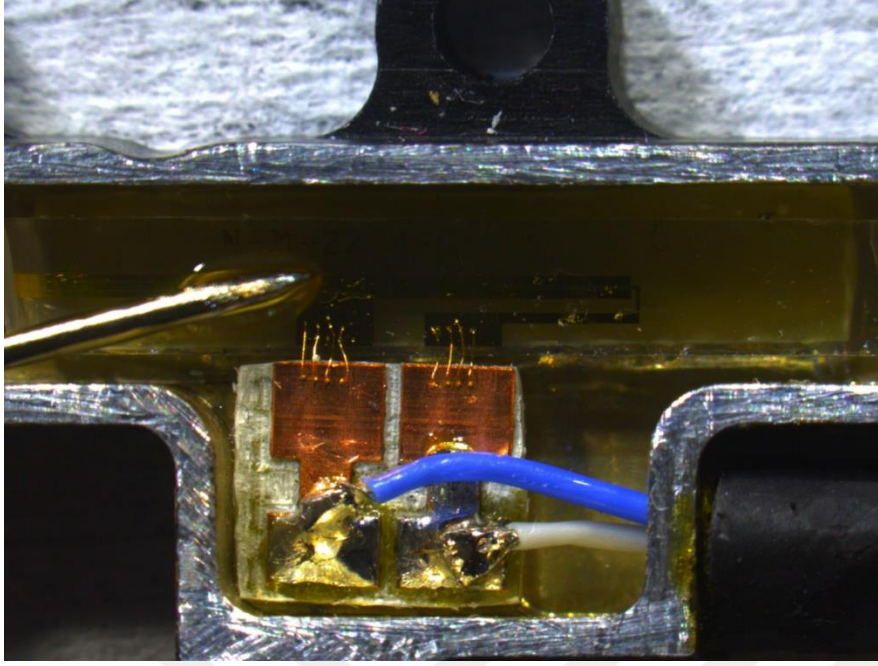
NOA61; saydam bir epoksidir. Tek bileşenlidir ve UV ışık altında sertleşen sıvı fotopolimer bir yapıya sahiptir [45]. Akrilik bazlıdır. UV ışık altında %100 katı hale dönüştüğü için ekstra ısıtma veya kurutma işlemi gerektirmez. Akışkanlığı diğer malzemelere göre nispeten daha yüksek olduğu için seyreltme işlemi yapılmamıştır (Bkz. Çizelge 5.2).

RTV 111; silikon bazlı bir epoksidir. Sertleştiğinde darbe ve titreşimleri emen bir özelliğe sahiptir. Elektriksel olarak yalıtım sağlar, kimyasal aşındırmalara karşı dayanıklıdır. Beyaz renklidir ve hızlı bir şekilde sertleşme özelliğine sahiptir. Polidimetilsiloksan tabanlı bir malzemedir ve uygun katalizörlerin katkısı ile polimerize olur. Katalizör katkısı tepkimeyi hızlandırmaktadır. Katalizörler ana malzemeye kıyasla %10 konsantrasyonda kullanılabilir. Yüzeye uygulandıktan sonra, ısı etkisi ile sertleşme derecesi artmaktadır, bu sebeple 200 °C'ye kadar ısıtılarak katılaşma işlemi hızlandırılabilir.

TechSpray püskürtmeli bileşen; silikon bazlı bir malzeme olup ısısal değişimlere karşı direnci yüksektir. Ayrıca nem ve kimyasal bazlı yapılara karşı da yüksek dirençli bir malzemedir. MIL-I-46058C askeri standartları sağlamaktadır [46]. Püskürtme yöntemi kullanıldığı için özel bir hazırlama tekniğine ihtiyaç duyulmamıştır.

OmniVisc silikon; anlatılan diğer bileşenlerden farklı olarak 50-80 Pa.s değerinde akışkanlığa sahiptir. Akışkan olmadığı için; uygulama işlemi daha kontrollü olarak yapılabilir. Tek bileşenli olduğundan dolayı; özel bir hazırlama tekniğine ihtiyaç duyulmamıştır.

TechSpray haricinde; kullanılan diğer bileşenler fırçalama yöntemi ile aygıt yüzeyine uygulanmıştır. Sprey şeklinde uygulama yöntemi; fırçalama yöntemine göre daha elverişli ve hızlı bir işlem gibi gözükse de; aygıtın istenmeyen bölgeleri de kaplanabileceği için kontrol edilmesi nispeten daha zordur. Fırçalama tekniği ise; yaklaşık 75 mm²'lik bir yüzey alanına uygulama yapıldığı için kontrol edilebilir seviyededir ve kaplanması istenmeyen bölgeler korunabilir. Resim 5.11'de; fırçalama yöntemi ile koruyucu kaplama uygulama işlemi gösterilmiştir. Uygulama; ince uçlu bir iğne yardımıyla yapılmıştır.



Resim 5.11. Fırçalama yöntemi ile aygıt yüzeyine koruyucu kaplama uygulanması

Koruyucu kaplama çalışmalarına ek olarak bu tez çalışması kapsamında; aygıt elektrotlarının altına PDKBB cihazında SiO_2 kaplama [40] Ar-Ge çalışmaları yapılmıştır. Ancak bu işlemin; bir sonraki bölümde anlatılacak olan veri analizleri dikkate alındığında aygıt performansına olumlu etki yapmadığı sonucuna varılmıştır.

5.6. Farklı Koruyucu Kaplama Malzemelerinin Entegre Optik Aygıtların Elektriksel Performansına Etkisi

Bu bölümde; koruyucu kaplama varlığının reset sinyali karakterizasyonuna etkisi irdelenmiştir. Ayrıca; entegre optik aygıtlara uygulanan reset sinyali ile senkronize olarak gözlemlenen hatalı dönü ölçümü problemini tespit etmeye yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Reset sinyali analizinde; aygıta uygulanan $V_{\pi/2}$ ve $V_{2\pi}$ gerilimlerinin durumları etkili olmuştur. Bir çalışmada [4]; IOC (Integrated Optical Chip) aygıtının FOD içerisindeki doğrusallığını test etmek için yapılan çalışmalar ele alınmıştır. Bu makalede; $V_{\pi/2}$; kare dalga beslem gerilimi, $V_{2\pi}$ ise rampa sinyal gerilimi olarak tanımlanmıştır. Açık döngü ve kapalı döngü sistemleri için çıktılar grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Bu çalışmaya göre; $V_{\pi/2}$ ve $V_{2\pi}$ gerilimleri için 3 farklı durum tanımlanmıştır:

Durum 1: $V_{2\pi}$ değişken, $V_{\pi/2}$ sabit.

Durum 2: $V_{\pi/2}$ değişken, $V_{2\pi}$ sabit.

Durum 3: $V_{\pi/2}$ ve $V_{2\pi}$ eş zamanlı olarak değişken.

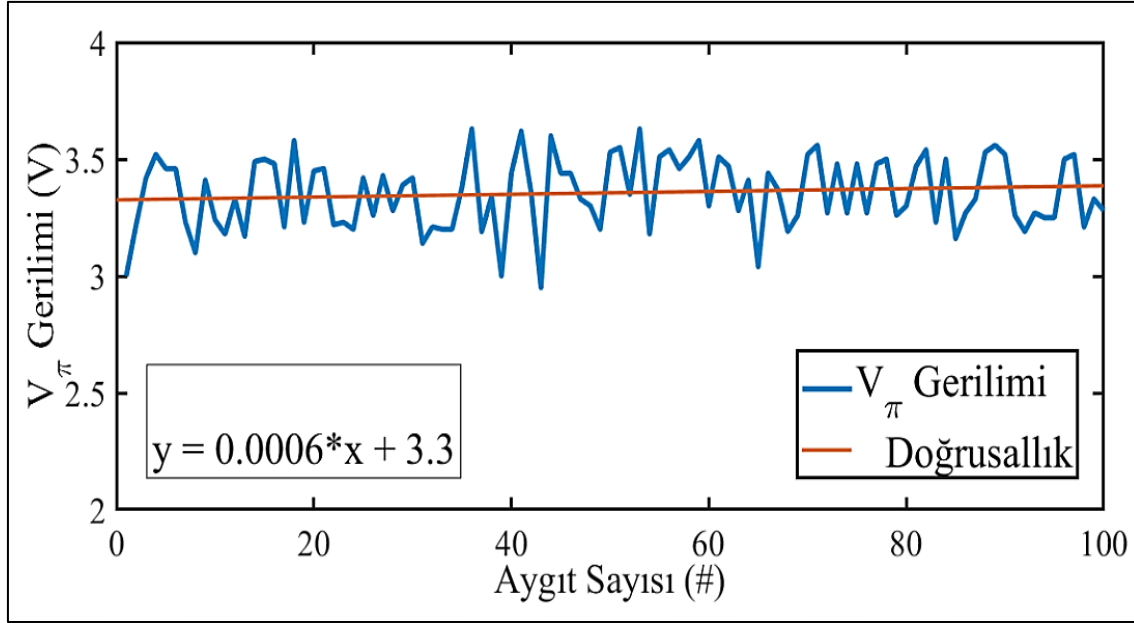
Bu çalışmada; testler kapalı döngü⁵ sistem konfigürasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kapalı döngü sistemin açık döngü sisteme göre avantajları; yüksek dinamik menzil, ölçüm hassasiyetinin yüksek olması, beslem kararlılığının iyi düzeyde olması, orantı katsayısı doğrusallığı olarak sıralanmaktadır. Bu avantajlar göz önüne alındığında; testlerin kapalı döngü sistemde yapılması uygun görülmüştür. Durum 1, durum 2 ve durum 3 için test sonuçları ayrı ayrı değerlendirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. $V_{2\pi}$ gerilimi % 1-% 10 arasında değiştirilerek dönü ölçer çıkış sinyali analiz edilmiştir [4]. Buna göre;

- Durum 1 için doğrusallığın önemli ölçüde bozulduğu ve yüzdesel olarak hata payının yüksek olduğu saptanmıştır.
- Durum 2 için yüzdesel hatanın çok düşük seviyede olduğu saptanmıştır.
- Durum 3 için ise, hata oranı arttığı için sistemin düzgün çalışmadığı ve dönünün düzgün ölçülemediği sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak; dönü ölçer performansının rampa gerilimi olarak tanımlanan $V_{2\pi}$ gerilimindeki değişikliklere önemli ölçüde duyarlı olduğu saptanmıştır. Kararsızlıkları ve doğrusallıktan sapmaları en aza indirmek için rampa geriliminin uygun bir değerde resetlenmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Tez kapsamında üretilen entegre optik aygıtların endüstriyel seviyede kararlılıklarının sağlanabilmesi için; bu aygıtların ilk olarak oda sıcaklığındaki V_{π} değişimi analiz edilmiştir. Seri üretim sürecine dahil olan durum D kategorisindeki toplam 100 adet farklı entegre optik aygıtın ölçülen d.a V_{π} değerleri grafiksel olarak Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

⁵ Kapalı döngü; 6. Bölüm'de detaylı olarak ele alınacaktır.



Şekil 5.9. Durum D kategorisindeki 100 adet entegre optik aygıt için V_{π} değişimi analizi

Şekil 5.9'daki grafik incelendiğinde; ortalama V_{π} geriliminin 3.34 V seviyesinde olduğu saptanmıştır. Gerilim değişimi doğrusal bir eğri ile fit edilmiş ve kararlılık analizi yapılmıştır. Simülasyon sonuçları referans alınarak; oda sıcaklığı ölçümleri ısısal modelleme sonuçları ile kıyaslanmıştır. Durum D; tüm yapısal konfigürasyonlar arasında en az ısısal gerilim dağılımına sahip olduğu için, yapılan bu simülasyon çalışmaları sadece ısısal döngü test kararlılığını yansıtmakla kalmayıp, aynı zamanda oda sıcaklığı kararlılığı ile ilişkilendirilmektedir. 100 adet aygıt üzerinden yapılan oda sıcaklığı analizlerinde fit edilen eğrinin eğiminin 0,0006 gibi çok düşük değerlerde kaldığı gözlemlenmiştir. Bu gözlem; D durumunda üretilen aygıtların kararlılık ve tutarlılık sergilediğini ortaya koymaktadır.

Aygıtlar açık döngü sistemde optik bütün içerisinde toparlandıktan sonra (Bkz. Resim 5.10) reset sinyali testi gerçekleştirilmiştir. Açık döngü sistemde; reset sinyali benzeri bir sürüş sinyali uygulanmıştır ve entegre optik aygıt ile bütünleşmiş fiber sarımdan okunan dönüş verisinin incelenmesinde pik var (PV) ve pik yok (PY) analizi yapılmıştır. Açık döngü sistemde reset sinyali testleri yapılan aygıtlar, kullanılan koruyucu kaplama malzemeleri ile birlikte Çizelge 5.3'te M_6 , M_7 , M_8 , M_9 , M_{10} ve M_{11} olarak listelenmiştir.

Çizelge 5.3. Reset sinyali testleri yapılan aygıtlar ve kullanılan koruyucu kaplama malzemeleri

Entegre Optik Aygıt	Koruyucu Kaplama Malzemesi
M ₆	Dow Corning + Xylene (15 ml + 3 ml)
M ₇	Norland NOA61
M ₈	Transene RTV 111
M ₉	TechSpray 2102 Fine-L-Kote SR
M ₁₀	OmniVisc 1050
M ₁₁	Dow Corning (seyreltik değil)

Çizelge 5.3'te gösterildiği gibi; M₁₁ aygıtına seyreltik olmayan Dow Corning uygulaması yapılmıştır. Bu tez çalışmasında; Dow Corning malzemesi seyreltik ve seyreltik olmadan iki farklı şekilde hazırlanarak Ar-Ge çalışmaları yürütülmüştür. Dow Corning haricindeki diğer malzemeler seyreltme işlemine uygun olmadığı için, sadece Dow Corning için seyreltme işlemi yapılmıştır. Çizelge 5.3'te belirtilen koruyucu kaplama malzemeleri uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra açık döngü koşullarında elde edilen reset sinyali test sonuçları Çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Koruyucu kaplama uygulanan aygıtlar için reset sinyali test sonuçları

Aygıt Kodu	Koruyucu Kaplama Öncesi Pik Durumu	Koruyucu Kaplama Sonrası Pik Durumu
M ₆	Yok	Yok
M ₇	Yok	Yok
M ₈	Yok	Yok
M ₉	Yok	Yok
M ₁₀	Yok	Var
M ₁₁	Yok	Var

Tabloya göre; M₁₀ ve M₁₁ aygıtları hariç, diğer aygıtlarda koruyucu kaplama öncesi ve sonrasında reset piki sorunu gözlenmemiştir ve PY olarak gruplandırılabilirler. M₁₀ ve M₁₁'in ortak özelliği; bu aygıtlara uygulanan kaplama malzemelerinin viskozitelerinin diğer malzemelerin viskozitelerine kıyasla daha yüksek olmasıdır. Viskozitenin yüksek olması; aygıt yüzeyinde kalın ve dolgun bir katman varlığının olumsuz etki meydana getirebileceği olasılığını doğurmaktadır.

Elektriksel performans testlerine yönelik literatür taramaları yapılırken, bir çalışmada farklı tampon tabakaların varlığının sistem elektriksel performansına etkisi üzerinde durulmuştu ve temiz oda koşullarında kaplanan tampon tabaka varlığının sistem performansına olumsuz etki yaptığı belirtilmişti [40]. Çizelge 5.4'teki çalışmalara ek olarak; bir grup aygıtın elektrotlarının altı PDKBB cihazı kullanılarak SiO_2 ile kaplanmıştır. SiO_2 kaplandıktan sonra; aygıt yüzeyine herhangi bir koruyucu kaplama uygulaması yapılmamıştır. SiO_2 kaplanan aygıtlar ve açık döngü sistemden elde edilen test sonuçları Çizelge 5.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.5. SiO_2 kaplaması gerçekleştirilen aygıtlar için reset sinyali test sonuçları

Aygıt Kodu	SiO_2 Kaplama Sonrası Pik Durumu
M ₁₂	Var
M ₁₃	Var
M ₁₄	Var
M ₁₅	Var

Çizelge 5.5'te elde edilen sonuçların referans gösterilen literatür çalışmasındaki [40] sonuçlar ile tutarlı olduğu saptanmıştır.

Sinyal çalışmasını önemli ölçüde etkileyen $V_{2\pi}$ gerilimini doğru bir şekilde girebilmek için, aygıtın V_π geriliminin doğru bir şekilde saptanması gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında; reset sinyalinin grafiksel analizine geçmeden önce ilk olarak aygıtların V_π gerilimleri ölçülmüştür. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi; Sagnac çıkış gücünün sıfırlandığı yerdeki gerilim V_π gerilimi olarak adlandırılmaktadır. M₆, M₇, M₈, M₉, M₁₀ ve M₁₁ için ölçülen V_π gerilimleri Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.6. Koruyucu kaplama malzemesi uygulanan entegre optik aygıtlar için V_π ölçüm sonuçları

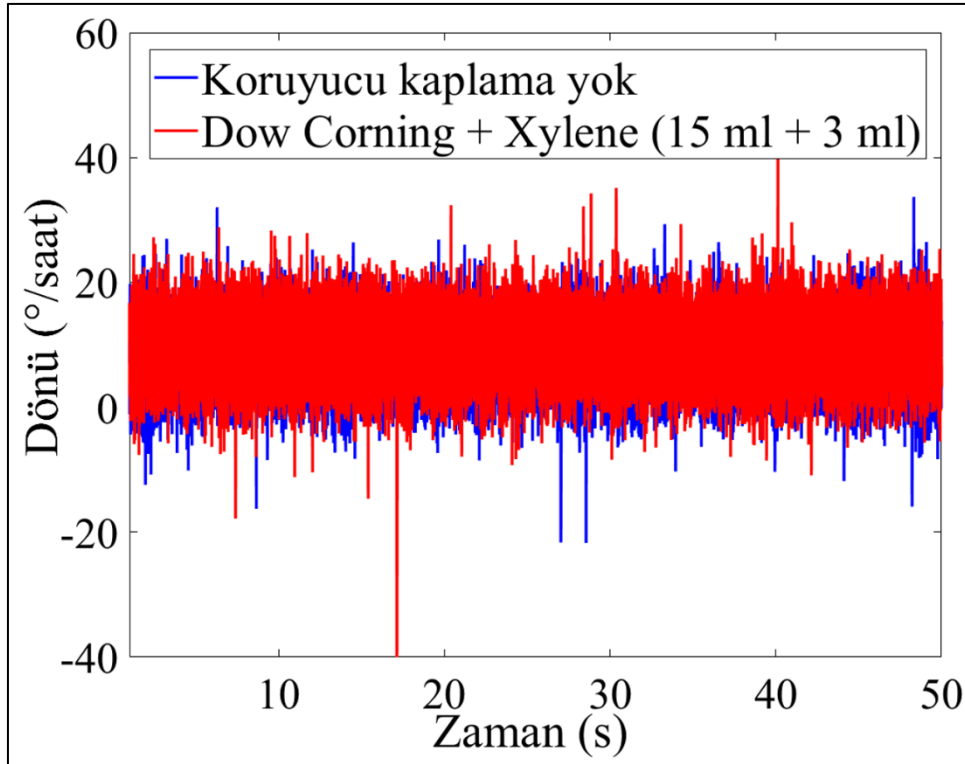
Aygıt Kodu	V_π (V)
M ₆	3,01
M ₇	2,94
M ₈	3,05
M ₉	3,04
M ₁₀	2,90
M ₁₁	3,13

Laboratuvar ortamında çok sayıda entegre optik aygıt üretildiği için, her bir aygıtın üretime yönelik olarak belli endüstriyel isterleri sağlaması amacıyla güvenilir ve kararlı olması gerekmektedir. Kapalı döngü sistem entegrasyonu nispeten pratik düzeyde olmayan, daha uzun ve detaylı bir prosedür gerektirdiği için; üretim-geliştirme kapsamında yapılan elektriksel test çalışmalarında açık döngü sistem konfigürasyonu kullanılmıştır. Açık döngü sistemde 100'den fazla entegre optik aygıt test edilmiştir. Açık döngü sistemde test edilen bazı aygıtlar kapalı döngü sistemde de test edilmiş ve her iki test düzeneğinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında tutarlılık olduğu saptanmıştır.

Reset sinyali analizinde; her bir aygıt için koruyucu kaplama öncesi ve sonrası testler gerçekleştirilmiştir. Her bir aygıt için $V_{2\pi}$ ve $V_{2\pi}$ 'nin %10 bozulmuş gerilim değerlerinde analiz yapılmıştır. Aygıtın V_{π} değerine göre ölçüm aralığı belirlenmiştir. Örnek verilecek olursa eğer; $V_{\pi}=4$ V olsun. Bu durumda; $V_{2\pi} = 8$ V, ölçüm aralığı ise ± 8 V olacaktır. $V_{2\pi}$ 'nin $\pm\%10$ bozulmuş hali için $8 \text{ V} \times 0,1 = 0,8 \text{ V}$ 'tur. $V_{2\pi} - 0,8 = 8 - 0,8 = 7,2 \text{ V}$ ve $V_{2\pi} + 0,8 = 8 + 0,8 = 8,8 \text{ V}$ olacaktır. Bu durumda ölçüm aralığı $\pm 7,2 \text{ V}$ veya $\pm 8,8 \text{ V}$ olacak şekilde ayarlanacaktır.

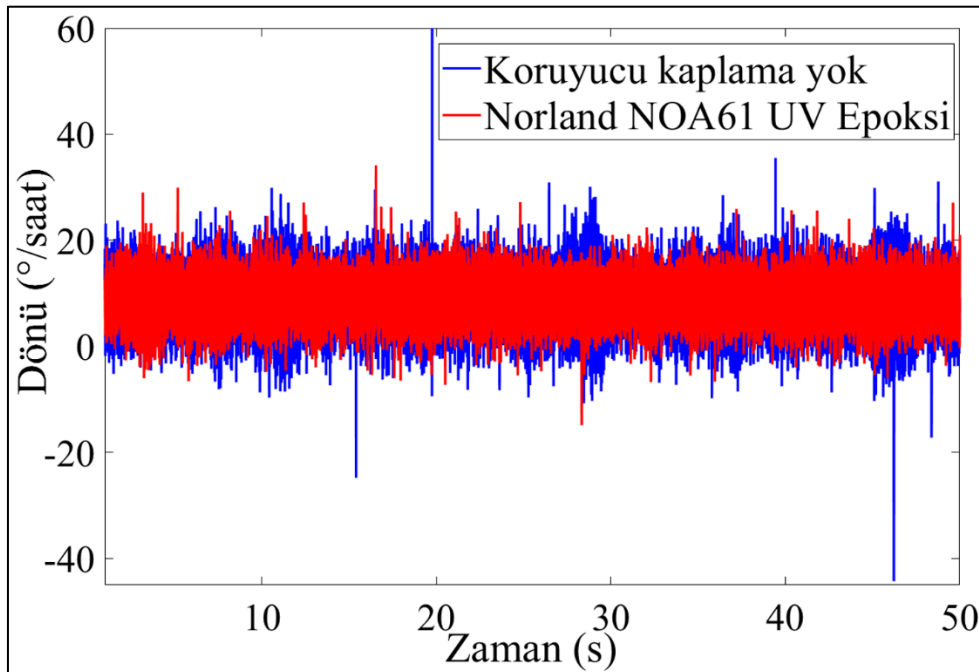
Yürütülen tez çalışmasında; ölçüm aralığı $\pm V_{\pi}$ olacak şekilde ayarlanarak, M_6 , M_7 , M_8 , M_9 , M_{10} ve M_{11} entegre optik aygıtları için elde edilen test sonuçları analiz edilmiştir.

Şekil 5.10'da; M_6 aygıtı için koruyucu kaplama öncesi ve Dow Corning uygulandıktan sonrası için reset sinyali test sonucu gösterilmiştir. Koruyucu kaplama öncesi ve sonrasında reset piki gözlenmemiştir.



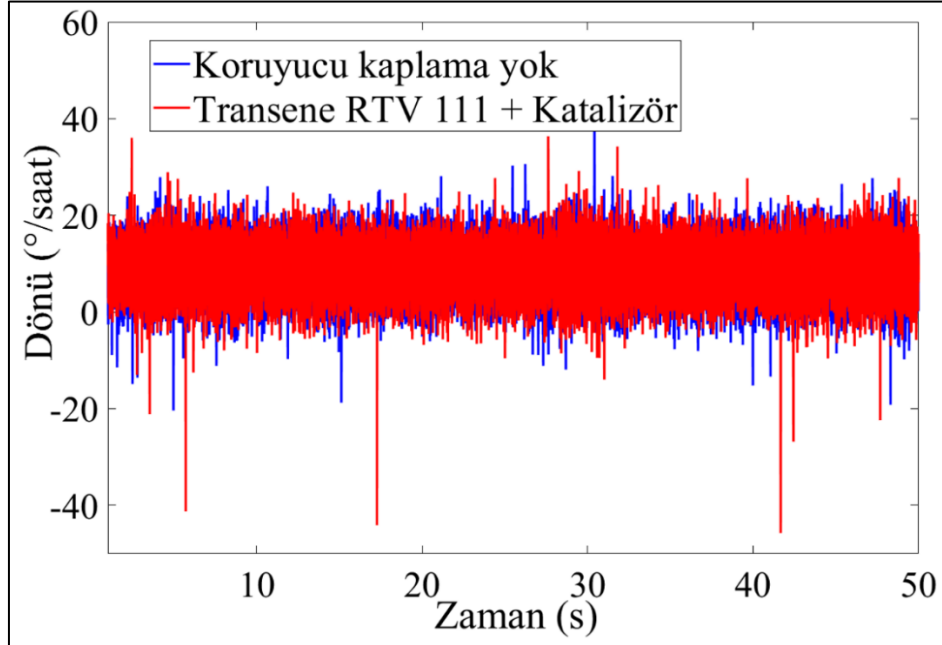
Şekil 5.10. M₆ için reset piki karakterizasyonu

Şekil 5.11’de; M₇ aygıtı için kaplama öncesi ve Norland NOA61 uygulandıktan sonrası için reset sinyali test sonucu gösterilmiştir. Koruyucu kaplama öncesi ve sonrasında reset piki gözlenmemiştir.



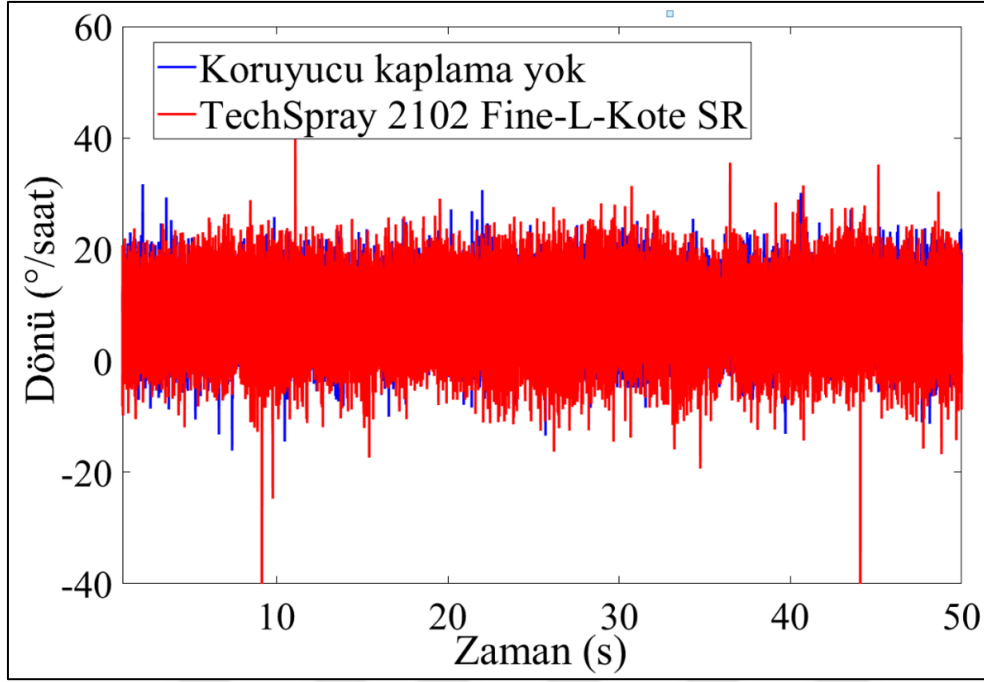
Şekil 5.11. M₇ için reset piki karakterizasyonu

Şekil 5.12’de; M₈ aygıtı için koruyucu kaplama öncesi ve Transene RTV 111 uygulandıktan sonrası için reset sinyali test sonucu gösterilmiştir. Koruyucu kaplama öncesi ve sonrasında reset piki gözlenmemiştir.



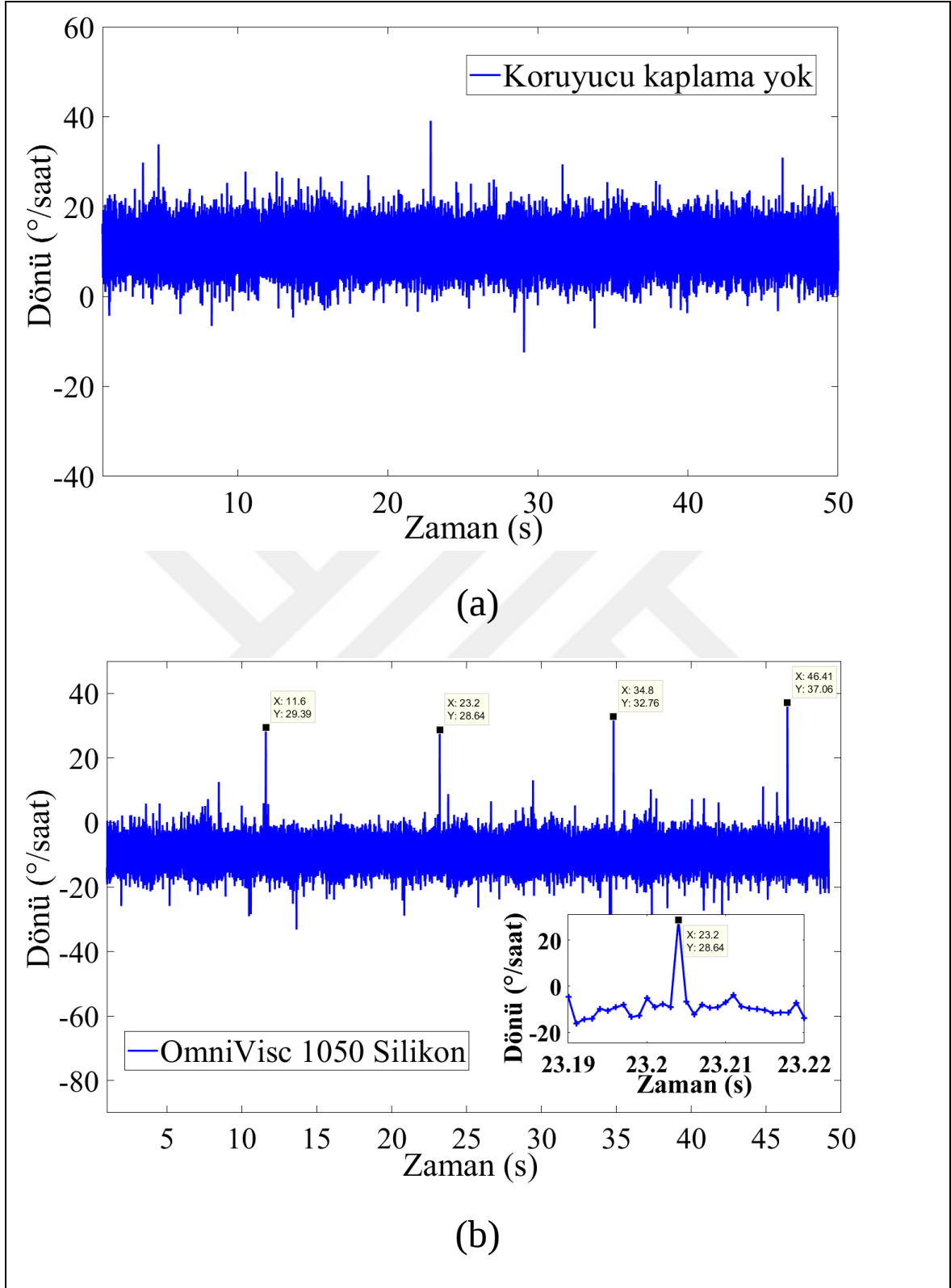
Şekil 5.12. M₈ için reset piki karakterizasyonu

Şekil 5.13’te; M₉ aygıtı için koruyucu kaplama öncesi ve spreycoruyucu kaplama uygulandıktan sonrası için reset sinyali test sonucu gösterilmiştir. Sprey kaplama öncesi ve sonrasında reset piki gözlenmemiştir.



Şekil 5.13. M9 için reset piki karakterizasyonu

Şekil 5.14a ve Şekil 5.14b’de sırasıyla; M_{10} aygıtı için OmniVisc silikon uygulama öncesi ve sonrası için reset sinyali analizi gösterilmiştir. Uygulama öncesinde reset piki gözlenmezken, silikon uygulandıktan sonra reset piki gözlenmiştir.

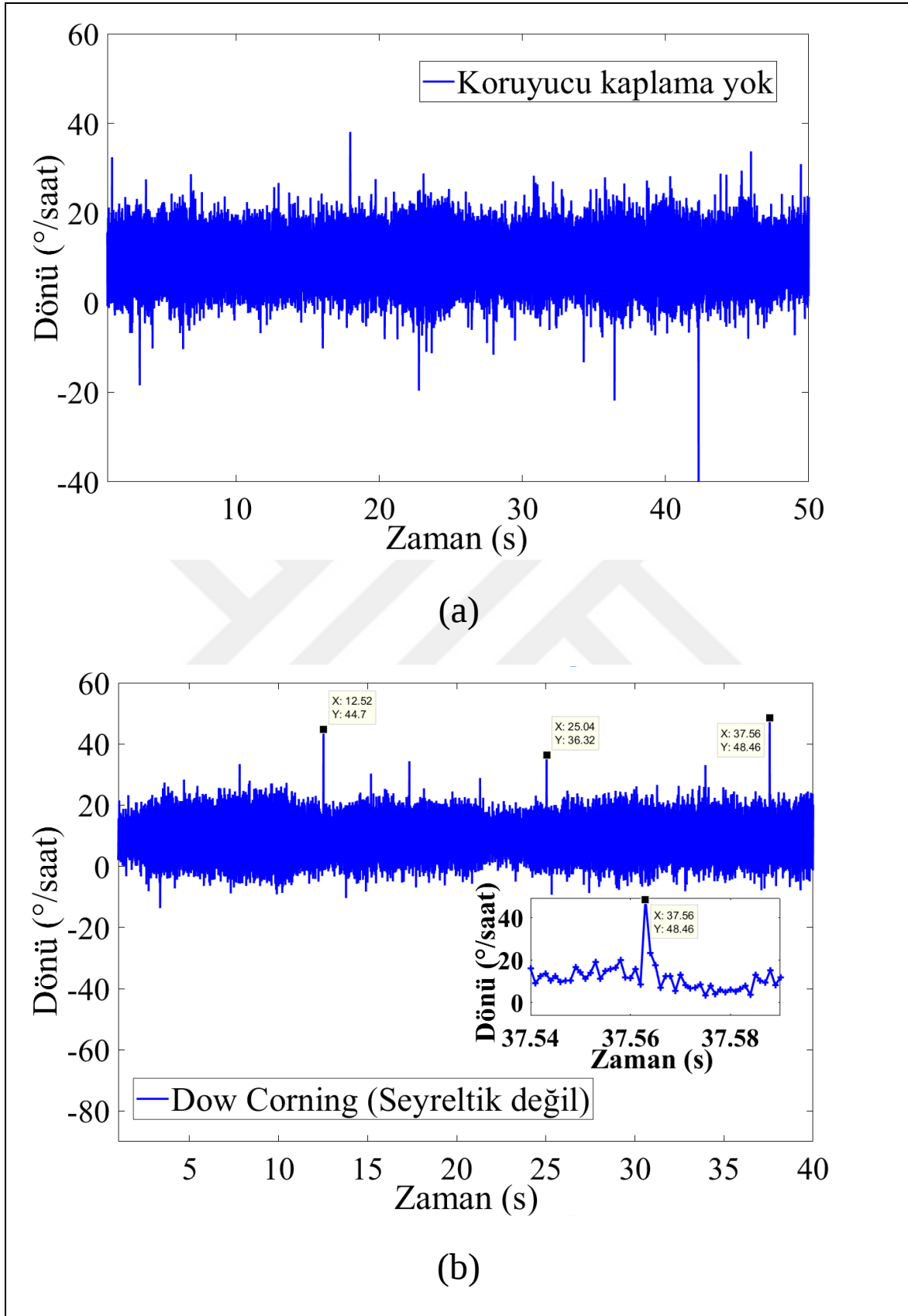


Şekil 5.14. M_{10} için reset piki karakterizasyonu (a) Silikon uygulama öncesi (b) Silikon uygulama sonrası

Şekil 5.14b grafiği incelendiğinde; belirli periyotlarda reset piki olduğu görülmektedir. M_6 , M_7 , M_8 ve M_9 için reset piki grafikleri analiz edildiğinde; eşit zaman aralıklarında bir reset

piki oluşmadığı sonucuna varılabilir. Elektronik kaynaklı rastgele oluşan pikler gözlense dahi, bunlar reset piki olarak adlandırılmamaktadır. Şekil 5.14b’de ise; $t_1=11,6$ s, $t_2=23,2$ s, $t_3=34,8$ s, $t_4=46,41$ s’de 4 adet farklı pikin varlığı tespit edilmiştir. Her bir reset piki arasında $\Delta t=11,6$ s sabit zaman farkı bulunmaktadır. Şekil 5.14b’deki büyütülmüş grafikte $t=23,2$ s’deki pik karakterize edilmiştir. Karakterizasyon sonucunda; tek bir datada pikin tekrar sönümlendiği görülmektedir. Bu nedenle; M_{10} aygıtı “PV” olarak sınıflandırılmıştır.

Şekil 5.15a ve Şekil 5.15b’de ise sırasıyla; M_{11} aygıtı için koruyucu kaplama öncesi ve seyreltiksiz Dow Corning uygulandıktan sonrası için reset sinyali test sonucu gösterilmiştir. Koruyucu kaplama öncesinde reset piki gözlenmezken, seyreltiksiz Dow Corning uygulandıktan sonra reset piki gözlenmiştir.



Şekil 5.15. M_{11} için reset piki karakterizasyonu (a) Seyretiliksiz Dow Corning uygulama öncesi (b) Seyretiliksiz Dow Corning uygulama sonrası

Şekil 5.15b’de, Şekil 5.14b’deki gibi belirli periyotlarda reset piki oluştuğu görülmüştür. Her bir reset piki arasında $\Delta t=12,52$ s sabit zaman farkı bulunmaktadır. İçteki büyütülmüş grafikte ise $t=37,56$ s’de gelen reset piki mercek altına alınmıştır. Pik maksimum seviyeye ulaştıktan sonra sönümlenirken kırılmaların meydana geldiği görülmektedir.

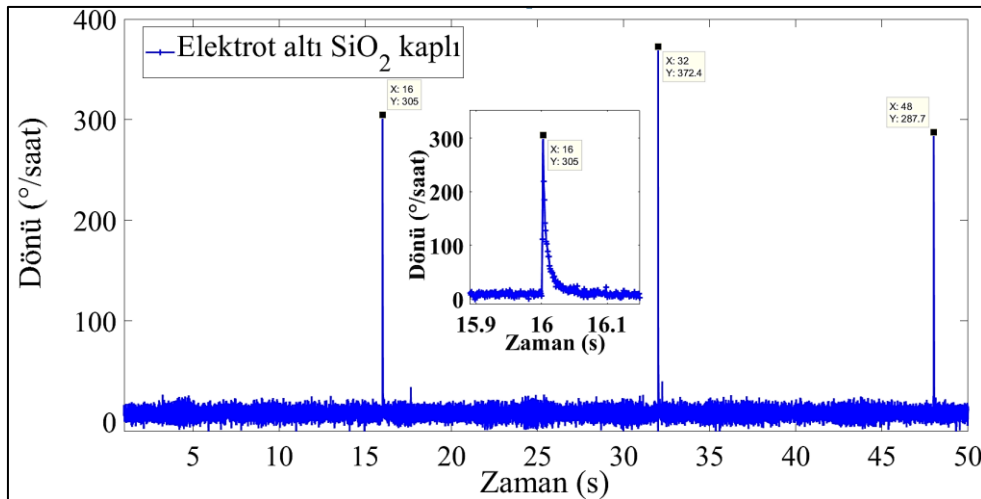
Koruyucu kaplama malzemelerinin fiziksel olarak uygulandığı aygıtların yanısıra; SiO_2 kaplaması yapılan entegre optik aygıtlar da elektriksel performans çalışmaları kapsamında değerlendirmeye alınmıştır. SiO_2 kaplaması yapılan aygıtların V_π ölçüm sonuçları Çizelge 5.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7. SiO_2 kaplaması yapılan entegre optik aygıtlar için V_π ölçüm sonuçları

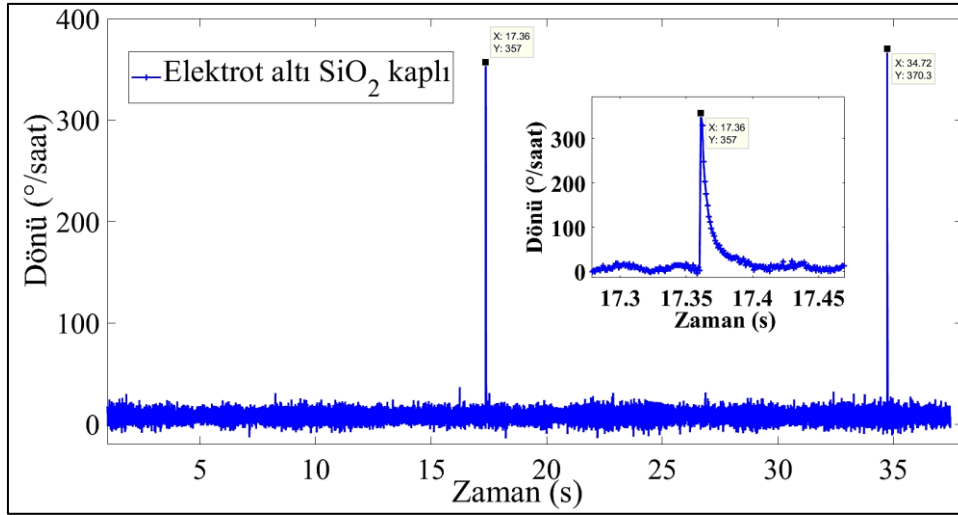
Aygıt Kodu	V_π (V)
M ₁₂	4,0
M ₁₃	3,78
M ₁₄	3,64

Fiziksel olarak koruyucu kaplama yapılan entegre optik aygıtlarda olduğu gibi; SiO_2 kaplaması yapılan aygıtların da reset piki karakterizasyonu yapılmıştır. Bahsedilen 3 adet aygıtın kaplama çalışmaları temiz oda koşullarında kimyasal tepkime işlemi ile gerçekleştirildiği için, aygıtların sadece kaplama sonrası test sonuçları sunulmuştur.

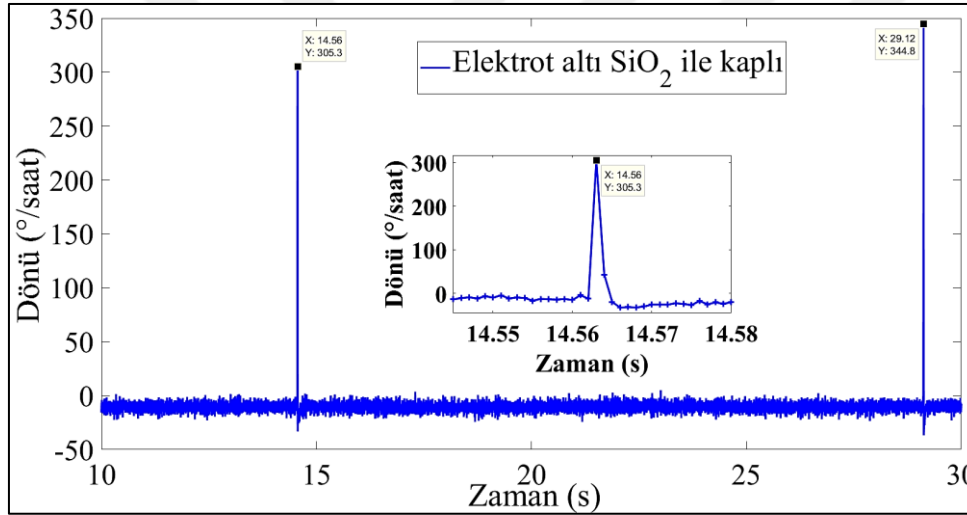
Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de; sırasıyla M₁₂, M₁₃ ve M₁₄ kodlu aygıtlar için SiO_2 kaplama sonrası reset piki test sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 5.16. M₁₂ için reset piki karakterizasyonu



Şekil 5.17 .M₁₃ için reset piki karakterizasyonu



Şekil 5.18. M₁₄ için reset piki karakterizasyonu

SiO₂ kaplaması yapılan aygıtların test sonuçları incelendiğinde; eşit zaman aralıklarında reset piki meydana geldiği görülmektedir. Grafikselsel analiz yapıldığında; büyütölmüş görsellerde reset pikinin tek bir data da değil, birden fazla data noktasında sönümlendiği tespit edilmiştir. Özellikle; Şekil 5.18’de yukarı yönlü pozitif pikin sönümlenirken aşağı doğru negatif bir pike dönüştüğü gözlemlenmektedir. Bu durum; test standartlarına aykırı bir durum oluşturmaktadır.

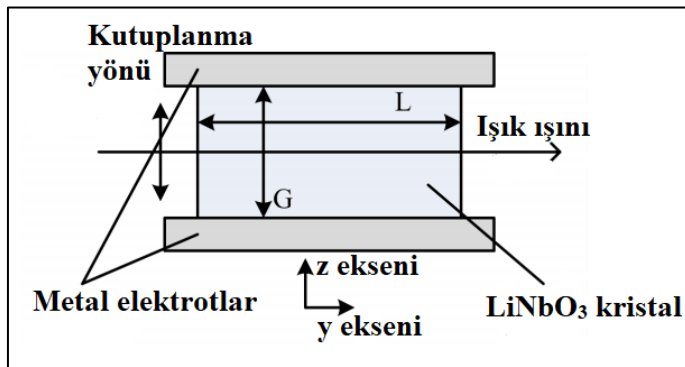
Reset piki karakterizasyonunun yanı sıra; bu tez çalışması kapsamında yarı dalga geriliminin sıcaklığa bağlı değişimi analiz edilmiştir. Bir sonraki alt bölümde; gerçekleştirilen deneysel çalışmalar literatür taraması ile desteklenerek detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

5.7. Entegre Optik Aygıtların Sıcaklığa Bağlı Yarı Dalga Geriliminin İrdelenmesi

İnterferometrik fiber optik dönü ölçerler; bilindiği gibi dönü hızı algılama çalışmalarında kullanılmaktadırlar. Yüksek hassasiyet, geniş dinamik menzil, düşük güç tüketimi ve yüksek güvenilirlik sebebiyle navigasyon kontrolü için sıkça tercih edilmektedirler. Deneysel uygulamalarda; fiber sarım içindeki Shupe etkisinin varlığı sebebiyle [47] sıcaklık değişimleri yüzünden meydana gelen çıkış kaymalarını yok etmek için [48] sıcaklık testleri genellikle uygulanmaktadır. Bunun yanı sıra; FOD içerisindeki çoğu elektriksel ve optik hataları saptamak için sıcaklık testleri gerekli görülmektedir [49]. Bu sayede; kusurlar tarafından indüklenen olası aşırı ısınma etkileri önlenebilmektedir. Bazı FOD yapılarında; beslem kararsızlığını azaltmak amacıyla sıcaklık kontrol üniteleri sistem yapısına eklenmektedir [50]. İnterferometrik fiber optik dönü ölçerler, sıcaklığın büyük ölçüde değiştiği zorlu koşullarda kullanıldığı için [49], bu tip navigasyon sensörlerinin sıcaklık ölçümlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Bununla paralel olarak; tez çalışmasının bu alt bölümünde, üretilen MIOC entegre optik aygıtlarının sıcaklık duyarlılığı esas alınarak FOD sensörü içindeki sıcaklığa bağlı V_π gerilimi değişimi analiz edilmiştir.

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi; MIOC, FOD prototiplerinin önemli bir alt bileşenidir. Aygıtın yarı dalga gerilimi sıcaklık etkisi altında salınım yaptığı için, sensör üzerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır. Bu sebeple; seri üretim sürecine dahil olan entegre optik aygıtların sıcaklığa bağlı yarı dalga geriliminin ölçümü önem arz etmiştir.

LiNbO_3 tabanlı MIOC entegre optik aygıtın faz modülasyonunu gerçekleştiren yapısı Şekil 5.19’da gösterilmiştir.



Şekil 5.19. LiNbO_3 tabanlı aygıtın faz modülasyon kısmının yapısı [49]

Faz modülasyonu; dalgakılavuzu içerisinde geçen ışık ışını ikiye ayrıldıktan sonra gerçekleşmektedir. Çalışmada kullanılan LiNbO₃ alttaşlar x-kesimli olduğu için, metal elektrotlara z yönünde bir elektrik alan uygulanmaktadır ve ışık ışınları ise y yönünde ilerlemektedir. Faz modülasyonu; elektro optik etki prensibine göre çalışmaktadır. Elektro optik etki ya da diğer bir ismiyle Pockels etkisi; kristalin kırılma indisi değişiminin, uygulanan elektrik alan ile doğru orantılı olduğu prensibine dayanmaktadır. Eş. 5.8'de; kırılma indisi değişiminin elektrik alana bağlılığını gösteren denkleme yer verilmiştir.

$$\Delta n(E) = -\frac{1}{2} r n^3 E \quad (5.8)$$

Burada; r Pockel elektro optik katsayısı, n kırılma indisi ve E ise elektrik alanını temsil etmektedir. Işık ışınlarının kutuplanma yönünün z ekseninde olduğu dikkate alınarak; $n=n_e$ ve $r=r_{33}$ kabul edilmekte olup, n_e olağandışı kırılma indisi ve r_{33} ise LiNbO₃'ün belirlenen yönü için doğrusal elektro optik katsayısı olarak bilinmektedir. Kırılma indisi değişimi; MIOC içerisinde geçen ışığın fazını değiştirdiği için iki kol arasında faz farkı meydana getirmektedir. Bu faz farkı; Eş. 5.9'da belirtilmiştir [49].

$$\Delta \phi(E) = \frac{2\pi L \Delta n(E)}{\lambda} = -\frac{\pi r_{33} n_e^3}{\lambda} E L \quad (5.9)$$

L dalgakılavuzu uzunluğu, λ ışığın dalga boyudur. Yarı dalga gerilimi eşitliği; Eş. 5.10'da ifade edilmiştir [49].

$$V_\pi = G \lambda / (L n_e^3 r_{33}) \quad (5.10)$$

Burada; G elektrotlar arasındaki mesafedir. V_π gerilimi; π kadarlık bir faz farkı meydana getirmek için gerekli gerilimdir. Tanımlanan bu parametre sıcaklığa duyarlıdır. Yarı dalga gerilimi denkleminde yola çıkılarak, bu parametrenin sıcaklık duyarlılık katsayısı Eş. 5.11'deki gibi bir denklem ile tanımlanmıştır [49]:

$$\frac{dV_\pi}{V_\pi dT} = \frac{dG}{G dT} - \frac{dL}{L dT} + \frac{d\lambda}{\lambda dT} - \frac{dr_{33}}{r_{33} dT} - \frac{3dn_e}{n_e dT} \quad (5.11)$$

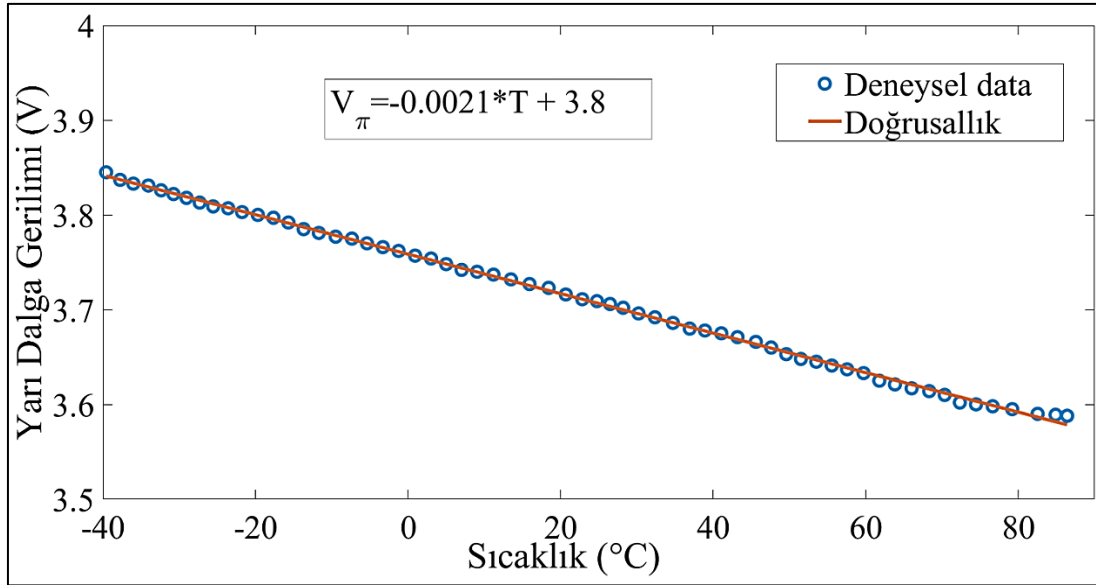
Eş. 5.11’de belirtilen her bir terim, bir sıcaklık duyarlılık katsayısına [51] karşılık gelmektedir. Bu katsayılar; Çizelge 5.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8. Sıcaklık duyarlılık katsayıları

Parametre	Sıcaklık Duyarlılık Katsayısı (K^{-1})
G	$\sim 2 \times 10^{-6}$
L	$\sim 3,2 \times 10^{-6}$
Λ	$\sim 7,0 \times 10^{-7}$
n_e	$\sim 1,7 \times 10^{-5}$
r_{33}	$\sim 4,9 \times 10^{-4}$

G ve L’nin sıcaklık bağımlılığı; genellikle ısısal genleşme tarafından indüklenmektedir. Dalga boyunun sıcaklıkla değişimi ihmal edilebilir, çünkü FOD sisteminde kullanılan ışık kaynağı genellikle kararlı bir yapıdadır ve değişken değildir. Çizelge 5.8 incelendiğinde; r_{33} parametresinin diğerleri arasında en yüksek değere sahip olduğu ve bu sebeple sıcaklık duyarlılığının baskın olduğu görülmektedir. Çizelge 5.8’deki parametreler Eş. 5.11’deki denkleme yerleştirildiğinde; V_π ’nin sıcaklık duyarlılık katsayısı $5,4 \times 10^{-4} K^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Bu durumda; $dV_\pi / V_\pi dT \approx 5,4 \times 10^{-4} K^{-1} \approx 540 \text{ ppm}/^\circ C$ olarak elde edilmektedir [49]. Buna ek olarak; V_π ile T arasında doğrusal bir ilişki olduğu söylenebilir.

Yarı dalga geriliminin sıcaklık bağımlılığına ilişkin yapılan teorik analizlerin deneysel verilerle desteklenebilmesi için test düzeneği kurulmuştur. Testler açık döngü test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Aygıtın yarı dalga geriliminin karakterizasyonu, $1^\circ C/dk$ sıcaklık hızı ile $-40^\circ C$; $+85^\circ C$ sıcaklık aralığında sıcaklık kontrollü bir kabin içerisinde gerçekleştirilmiştir. Kabin içindeki sıcaklık kontrolü National Instrument firmasından temin edilen NI-9213 model hassas ısılıçift kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulanan sıcaklık test profili; FOD sensörünün değişken sıcaklıklar altında güvenli bölgede kalabildiği çalışma ortam koşulları referans alınarak saptanmıştır. Analiz edilen bir adet entegre optik aygıt için sıcaklığa bağlı yarı dalga gerilimi değişimi Şekil 5.20’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.20. Yarı dalga geriliminin sıcaklığa göre değişimi

$dV_{\pi}/(V_{\pi}dT)$ eşitliği kullanılarak sıcaklık duyarlılık katsayısı için hesaplama yapılmıştır. Şekil 5.20'deki grafiksel analizde ifade edilen $V_{\pi} = -0.0021 \cdot T + 3.8$ eşitliğinin T 'ye göre birinci dereceden türevi alınmıştır. Test edilen aygıtın V_{π} değeri ise 3,7 V'dir. Bu değerler kullanıldığında; $dV_{\pi}/(V_{\pi}dT) \approx -567 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. Bu durumda; teorik ve deneysel verilerin %95 seviyesinde yüksek bir kararlılıkla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.20'deki grafiğin; literatür çalışmalarında elde edilen grafiksel veriler [49] ile karşılaştırıldığında tutarlı olduğu saptanmıştır.

Bu bölümde özet olarak; elektriksel test kararlılığına yönelik olarak reset piki analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Koruyucu kaplamalar; epoksi bazında sıvı bir bileşim olarak fiziksel uygulamaya tabi tutulabilmektedir. Literatür taramaları yapıldığında; epoksi tipi koruyucu kaplamaların fiber optik aygıtlara uygulaması konusunda yeterli Ar-Ge çalışması olmadığı kanısına varılmıştır. Öte yandan; metal oksit bileşenler, kimyasal tepkime ile aygıt yüzeyine bağlanma yapılarak kaplanabilmektedir. Bu tür kimyasal bir uygulamanın modülasyon faz kaymasına sebep olabileceği [40] öne sürülmüş ve deneysel çalışmalar ile bu öngörü kanıtlanmıştır. Bu sebeple; kimyasal uygulama yerine, reset piki oluşumuna sebebiyet vermeyecek şekilde fiziksel yöntemlerle uygulanan epoksi tipi malzemelerin kullanılması uygun görülmüştür. Bu yöntem ile; 300'den fazla entegre optik aygıt açık döngü sistemde bütünlenmiş, reset sinyali testlerine tabi tutulmuş olup, test sonuçlarında elektriksel performansı olumsuz olarak etkileyecek herhangi bir soruna rastlanmamıştır. Koruyucu kaplama çalışmaları ve reset piki sinyal analizlerinin yanısıra; sıcaklık değişimi

altında aygıtların yarı dalga gerilimi analiz edilmiştir. Rastgele seçilen bazı aygıtların $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında testleri gerçekleştirilmiş ve sıcaklık duyarlılık katsayısı ortalama $-567\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar; teorik veriler ile deneysel analizlerin uyumluluk sergilediğini göstermiştir.

Bir sonraki ana bölümde; üretilen entegre optik aygıtların kapalı döngü FOD sistemi içerisinde gerçekleştirilen ısısal yaşlandırmaya bağlı performans kararlılık testleri anlatılacaktır.

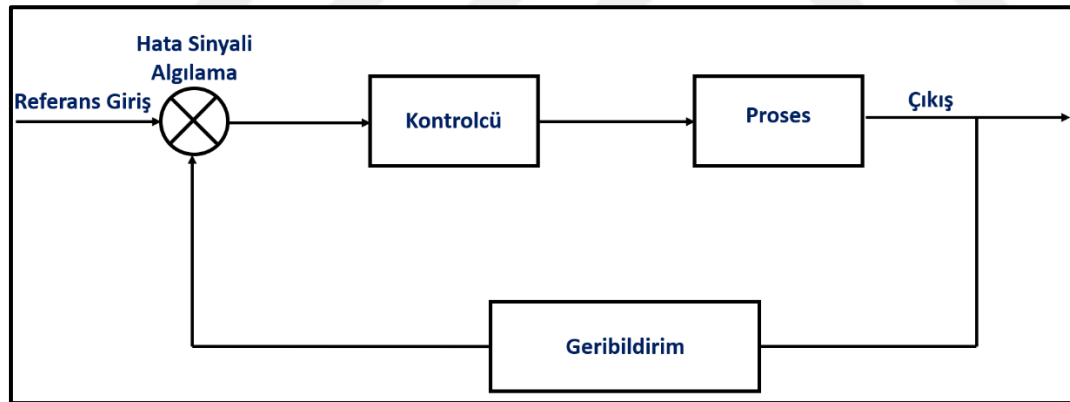


6. ISISAL YAŞLANDIRMA İŞLEMİNE BAĞLI PERFORMANS KARARLILIK ANALİZLERİ

Bu bölümde; entegre optik aygıtların kapalı döngü FOD sistemi içerisindeki testlerine yer verilecektir. Aygıtların performansı; dünya dönüşünün sıcaklığa bağlı değişimine göre irdelenmiştir. Dünya dönüşünde sıcaklık değişimleri altında meydana gelen eğimin; entegre optik aygıtların sistem içerisinde iken ısısal yaşlandırmaya maruz bırakılarak düzeltilebileceği öngörülmüştür. Bu kapsamda; hem kapalı döngü sistem konfigürasyonu ile ilgili teorik düzeyde bilgiler aktarılırken, hem de teorik bilgiler ışığında deneysel çalışmalar anlatılarak, aygıt performansının FOD sensör çıktısı olan dünya dönüşü performansına nasıl etki ettiği üzerinde durulacaktır.

6.1. Kapalı Döngü Sistem Yapısı

Tipik bir kapalı döngü FOD sistematığı Şekil 6.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Bu tür bir yapı; temel olarak kontrolcü, işlemci ve geribildirim mekanizmalarından oluşmaktadır.



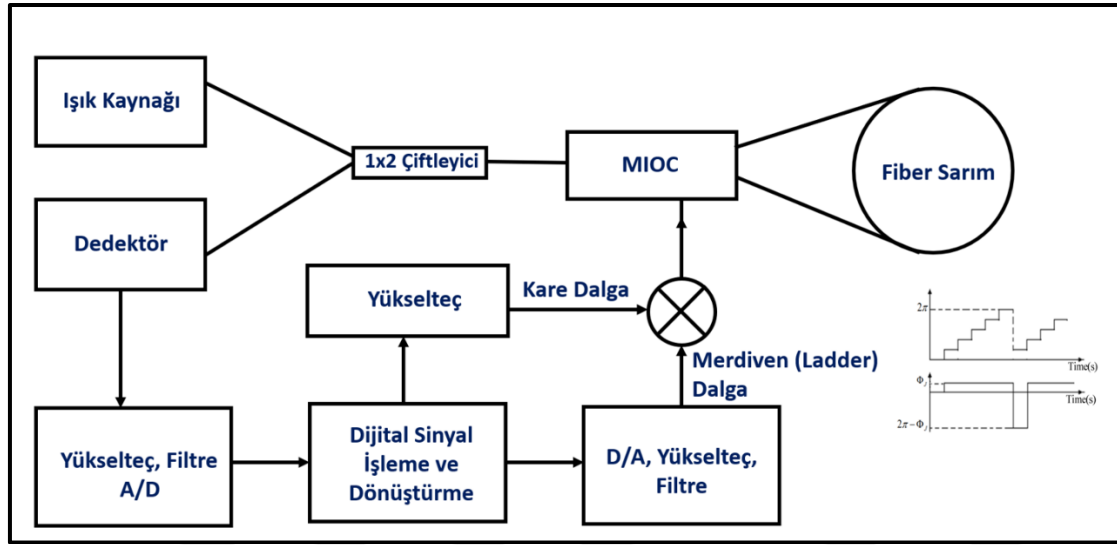
Şekil 6.1. Kapalı döngü sistem yapısı

Kapalı döngü sistemde; çıkış sinyali sürekli olarak ölçülmektedir ve girişe tekrar beslenmektedir. Geri beslemenin varlığı; düzensizlik ve karışıklık meydana getiren durumları en aza indirger ve sistemin güvenilirliğini artırmaktadır.

FOD sistematığı; açık döngü veya kapalı döngü şeklinde iki farklı yapıda oluşturulabilmektedir. Açık döngü sistem yapısı, 5.Bölüm’de reset sinyal analizi çalışmaları sırasında detaylı olarak anlatılmıştı. Açık döngü sistemin genel özellikleri; hassasiyetin düşük olması, güvenilir olmaması, kolay kurulum ve kapalı döngü ile kıyaslandığında daha

az maliyetli olmasıdır. Kapalı döngü sistemin avantajları ise [4]; bileşenlerin sabit olması, yüksek doğrusallık, yüksek hassasiyet, orantı katsayısı doğrusallığı ve kararlılığı olarak sıralanmaktadır. Her ne kadar kapalı döngü sistemler pahalı ve karmaşık kurulum gerektiren yapılar olsa da; güvenilir sonuçlar elde edilmesi onları avantajlı konuma getirmektedir.

Şekil 6.2’de; kapalı döngü FOD konfigürasyonu şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Kapalı döngü FOD sistem yapısı

İnterferometrik FOD sensör yapısı bilindiği gibi temel olarak ışık kaynağı, 1x2 çiftleyici, MIOC ve fiber sarım bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu dönü sensörü; Sagnac etkisi prensibine göre çalışmaktadır. Ataletsel dönü; IFOD içerisinde fiber sarım etrafında zıt yönde hareket eden ışık ışınları arasındaki faz farkı olarak ölçülmektedir [6]. Modüle edilmiş faz; kapalı döngü geribildirim sisteminde Sagnac etkisinden kaynaklı fazı denkleme amacıyla kullanılmaktadır. Kapalı döngü kurulum işlemi; IFOD sistemlerinin en önemli kilit noktalarından birisidir. MIOC ise bu yapılanmanın kritik bileşeni olarak değerlendirilmektedir. MIOC'un IFOD içerisinde kullanılması; orantı katsayısı kararlılığını artırmakta ve IFOD'un performansını iyileştirmektedir. Literatür çalışmalarına göre [6]; aygıt içinde meydana gelen modüle edilmiş fazın hassasiyet, tekrarlama, kararlılık ve gürültü duyarlılığı gibi karakteristikleri, sensörün dönü ve kayma gibi bazı performans özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir.

Şekil 6.2'ye göre; MIOC'u beslemek için iki farklı dalga kullanılmaktadır. Kare dalga gerilimi; $\pi/2$ 'lik faz farkı meydana getirmek için, merdiven (rampa) dalga ise Sagnac faz

kaymasını dengelemek için kullanılmaktadır. FOD içerisindeki toplam faz miktarı; Eş. 6.1'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\Delta\phi = \phi_s + \phi_r + \phi_j \quad (6.1)$$

ϕ_s ; fiber sarım içerisindeki Sagnac faz kaymasını, ϕ_r ; kare dalga tarafından üretilen fazı, ϕ_j ise rampa dalga tarafında üretilen faz miktarını temsil etmektedir. FOD içerisindeki girişim sinyalinin ışık şiddeti; Eş. 6.2'de belirtilmiştir.

$$I = A[1 + \cos(\phi_s + \phi_r + \phi_j)] \quad (6.2)$$

Eş. 6.2'de I; ışık şiddetini, A ise genliği ifade etmektedir. Kare dalganın pozitif kısmı ve negatif kısmı üzerindeki girişimin ışık şiddeti sırasıyla Eş. 6.3 ve Eş. 6.4'te belirtilmiştir.

$$I_1 = A[1 + \cos(\phi_s + \pi/2 + \phi_j)] \quad (6.3)$$

$$I_2 = A[1 + \cos(\phi_s - \pi/2 + \phi_j)] \quad (6.4)$$

Bu iki ifade birleştirilirse eğer; Eş. 6.5'teki denklem elde edilmektedir.

$$\Delta I = -2A \sin(\phi_s + \phi_j) \quad (6.5)$$

$\Delta I = 0$ olması için; $\phi_s + \phi_j = 0$ olması gerekmektedir. Sinyal işleme ünitesi; rampa dalga ϕ_j 'yi; $\phi_s + \phi_j = 0$ olana kadar değiştirmektedir. Diğer bir ifadeyle; rampa dalga tarafından modüle edilen faz değişimi Sagnac fazına eşit büyüklükte ve zıt işaretlidir. Bu konuya yönelik olarak ilgili diğer tüm denklem ve eşitlikler referans [6]'da verilmiştir.

Kapalı döngü bir sistemde; faz modülasyon frekansında çözülen fotodedektör çıkış sinyali hata sinyali olarak kullanılmaktadır. Bu döngü tipi; dönü indüklü sinyal faz kaymasını karşılayabilmek amacıyla, zıt yönde dönen optik dalgalar arasında kontrollü bir faz farkı oluşturmaktadır. Bu sebeple; girişen iki dalga arasındaki net faz farkı dönü hızından bağımsız olarak sıfırlanmaktadır. Elde edilen faz kayması; geri bildirim faz farkı oluşturulacak şekilde sisteme geri beslenmektedir ve bu faz farkı ϕ_j olarak tanımlanmaktadır. Bu değer; ϕ_s Sagnac faz kaymasına zıt ve eşit büyüklüktedir. $\phi_s = -\phi_j$ olarak ifade edilmektedir [6]. Kare dalga modülasyonu; ışığı modüle etmek için ve buna

bağlı olarak dönü hızı değişimini kontrol etmek ve hassasiyet derecesini artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Kare dalga ve merdiven (rampa) dalga sinyal periyodu; fiber sarımın içinden geçen ışığın geçiş süresi ile ilişkilidir ve $\tau=L/(c/n)$ ile ifade edilmektedir. L; fiber sarımın uzunluğu, c; ışık hızı, n; fiberin kırılma indisini temsil etmektedir. Kapalı döngü konfigürasyonunda; FOD çıkışı olan optik güç elektriksel sinyale dönüştürülmektedir. Elde edilen data; modüle edilmiş Sagnac faz hatasını ayıklamak amacıyla çözülmektedir ve geri besleme sinyali olarak kullanılmaktadır. Geri besleme faz sıfırlama sinyali ve beslem sinyali kapalı döngü sistemde kontrol sinyalleri olarak ele alınmaktadır. Diğer bir ifadeyle; modülatör içinde ortaya çıkan faz, kare dalga ve rampa dalga ile modüle edilmektedir.

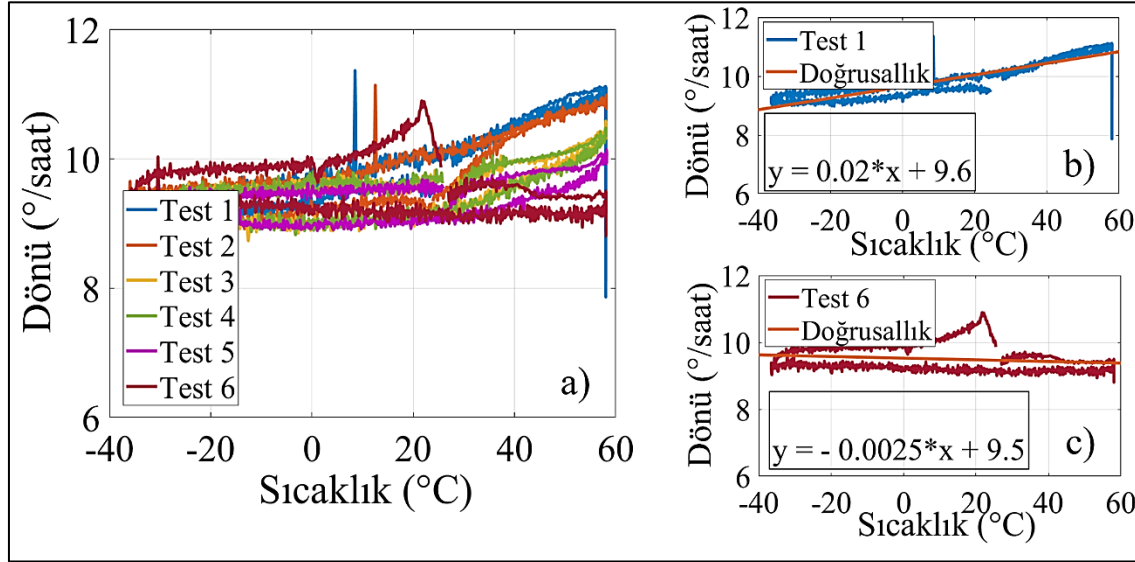
Entegre optik aygıtların faz kayması; kapalı döngü sistem içerisinde kare dalga ve geri besleme rampa dalganın sürüş performansından kaynaklanmaktadır. Araştırmalar sonucunda; modülatör faz kaymasının IFOD'un performans testlerine etki ettiği öngörülmüştür. Bir sonraki alt bölüm'de aygıtın sistem içerisindeki testleri analiz edilerek, kaymaya bağlı olarak gözlenen dönü eğiminin ısısal iyileştirmeler ile nasıl giderildiği deneysel çalışmalarla anlatılacaktır.

6.2. Sıcaklığa Bağlı Dönü Analizi ve Eğim Karakterizasyonu

Sıcaklık değişimlerinin, aygıtların sistem içindeki performansı üzerinde etkisi olduğu bilinmektedir. Bu tez çalışması kapsamında; üretilen entegre optik aygıtlardan bazıları paketlenme çalışmaları sonrasında kapalı döngü sistem içerisinde fiber sarımlar ile bütünlenmiş ve -40 °C ; +60 °C sıcaklık değerleri aralığında 0,2 °C/dk sıcaklık değişim hızı ile iklimatik kabin içerisinde teste maruz bırakılmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde; iklimatik kabin içerisinde gerçekleştirilen kapalı döngü sistem testlerine yer verilmiş olup, sistem performansı dünya dönüşünün sıcaklığa bağlı değişimi ile ilişkilendirilmiştir. Yapılan analizler doğrultusunda; dönü karakteristiğinde meydana gelen eğimin, M₁₆, M₁₇, M₁₈ ve M₁₉ kodlu aygıtların ısısal yaşlandırma işlemine maruz bırakılarak giderildiği saptanmıştır. Test edilen aygıtlar; 70 °C-80 °C gibi yüksek sıcaklıklarda 3-4 saat kadar bekletilmiştir. Isısal yaşlandırma işlemi sonrasında, dönü karakteristiğinde yatay seviyede düzleşme meydana gelmiş ve yapılan son testlerde eğimin ortadan kalktığı fark edilmiştir.

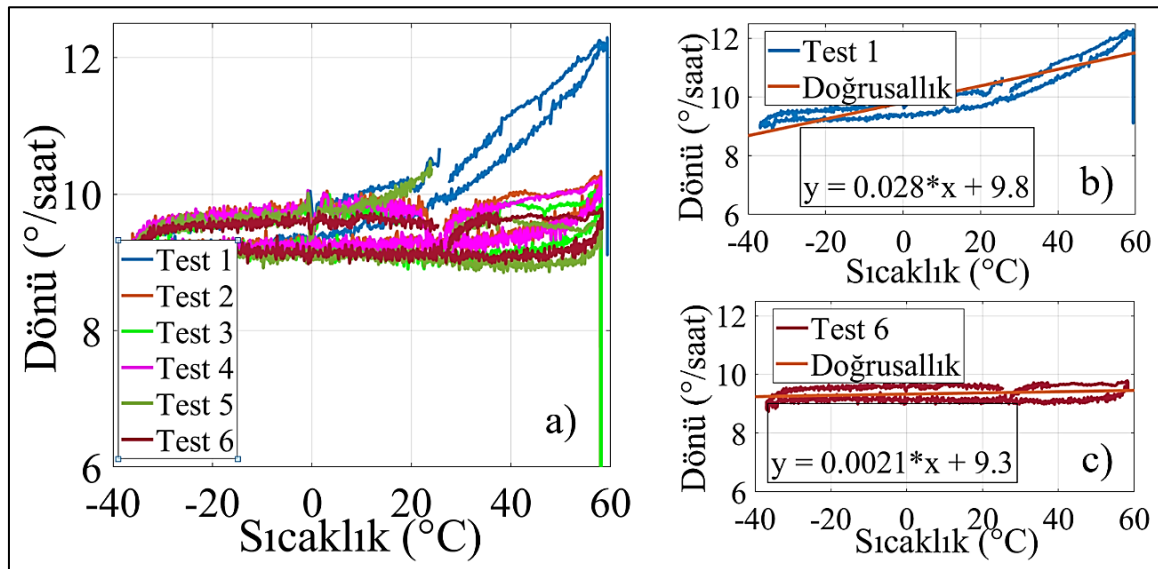
Şekil 6.3'te; M₁₆ için -40 °C ; +60 °C arasındaki sıcaklığa bağlı dönü değişimi gösterilmiştir. Aynı test profili Şekil 6.3a'da gösterildiği gibi 6 kez üst üste tekrar edilmiştir. Şekil 6.3b'de

dönü eğimi ilk testte 0.02 iken, ısısal kararlılık sağlandıktan sonra Şekil 6.3c'deki son testte bu değerin 0.0025'e indiği, yaklaşık 10 kat düzelme meydana geldiği gözlemlenmiştir.



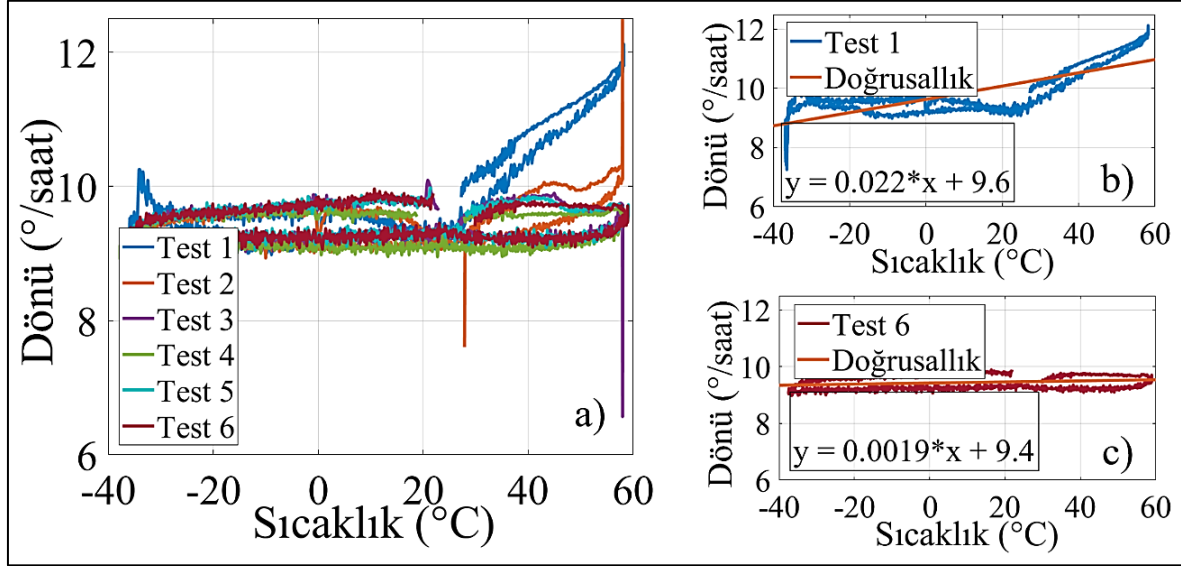
Şekil 6.3. M_{16} için sıcaklığa bağlı dönü değişimi a) Tüm testler b) İlk test c) Son test

Şekil 6.4'te; M_{17} için $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklığa bağlı dönü değişimi gösterilmiştir. Aynı test profili Şekil 6.4a'da gösterildiği gibi 6 kez üst üste tekrar edilmiştir. Şekil 6.4b'de dönü eğimi 0.028 iken, ısısal kararlılık sağlandıktan sonra Şekil 6.4c'deki son testte bu değerin 0.0021'e indiği, yaklaşık 10 kat düzelme meydana geldiği gözlemlenmiştir.



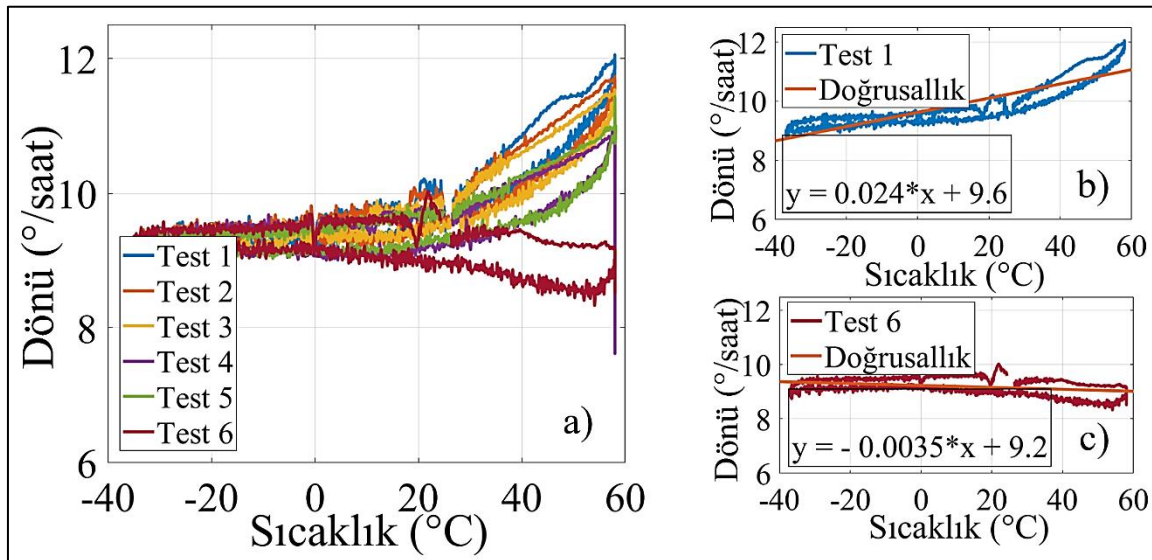
Şekil 6.4. M_{17} için sıcaklığa bağlı dönü değişimi a) Tüm testler b) İlk test c) Son test

Şekil 6.5'te; M_{18} için -40°C ; $+60^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklığa bağlı dönü değişimi gösterilmiştir. Aynı test profili Şekil 6.5a'da gösterildiği gibi 6 kez üst üste tekrar edilmiştir. Şekil 6.5b'de dönü eğimi 0.022 iken, ısısal kararlılık sağlandıktan sonra Şekil 6.5c'deki son testte bu değerin 0.0019'e indiği, yaklaşık 10 kat düzelme meydana geldiği saptanmıştır.



Şekil 6.5. M_{18} için sıcaklığa bağlı dönü değişimi a) Tüm testler b) İlk test c) Son test

Şekil 6.6'da; M_{19} için -40°C ; $+60^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklığa bağlı dönü değişimi gösterilmiştir. Aynı test profili Şekil 6.6a'da gösterildiği gibi 6 kez üst üste tekrar edilmiştir. Şekil 6.6b'de dönü eğimi 0.024 iken, ısısal kararlılık sağlandıktan sonra Şekil 6.6c'deki son testte bu değerin 0.0035'e indiği, yaklaşık 10 kat düzelme meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 6.6. M_{19} için sıcaklığa bağlı dönü değişimi a) Tüm testler b) İlk test c) Son test

Tez çalışmasının bu bölümünde özet olarak; ısısal yaşlandırma işlemi vasıtasıyla dünya dönüşünde gözlenen eğimin azaldığı saptanmıştır. Seri üretim sürecine dahil olan aygıtlar bu şekilde test edilerek; FOD sensörlerinin performans açısından kararlı seviyeye ulaşması sağlanmıştır. Kapalı döngü sistemler; kurulum açısından zorluk getirmesine ve açık döngü sistemlere göre nispeten maliyetli olmasına rağmen, açık döngü sistemlerle kıyaslandığında güvenilir ve hassas sonuçların elde edildiği konfigürasyonlardır. Bununla birlikte; dönüş ölçümündeki hassasiyetin ve çözünürlüğün yüksek olması gerekliliği, bu tip sistemlerin tercih edilmesini zorunlu kılmaktadır.





7. İNTERFEROMETRE YÖNTEMİ İLE KRİSTAL İÇİ KUTUPLANMA ANALİZİ

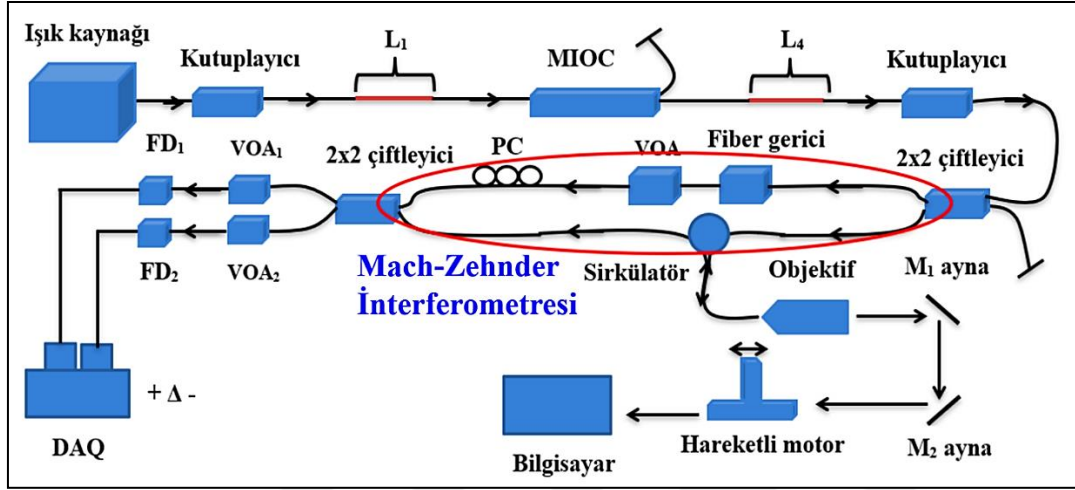
Tezin bu bölümünde; optik yol eşitliği sağlanarak (path-matched) kurulan interferometre düzeneğinde gerçekleştirilen kristal içi PER ölçümlerine yer verilmiştir. Analizler; fiber tabanlı interferometre düzeneği kurularak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde anlatılacak olan çalışmalar halen aktif olarak devam etmektedir. Bu sebeple; okuyuculara yol haritası olması açısından, şu ana kadar yapılanlar çalışmalar olabildiğince anlatılmıştır. İnterferometre deney düzeneği kurulumuna detaylı olarak yer verilerek, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar referans gösterilen literatür çalışmaları ile desteklenmiştir.

7.1. İnterferometre Düzeneği Kurulumu

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi; MIOC bir çeşit elektro optik modülatördür ve 3 temel özelliğe sahiptir: i) gelen ışığı fiziksel olarak iki kola ayırmak ii) ışığı kutuplamak iii) iki kol arasında faz farkı meydana getirmek. Işık ışınları; LiNbO_3 tabanlı bir dalgakılavuzu içinden ilerlemektedir. Işık ışınları dalgakılavuzu içinde ilerlerken iki kola ayrıldığı için; dalgakılavuzu Y-geometrisi şeklindedir. Giriş ve çıkış fiber taşıyıcılar; dalgakılavuzunun giriş ve çıkış kollarına hizalanmaktadır. Fiber bütünleme çalışmalarında anlatıldığı gibi, giriş ve çıkış fiber taşıyıcılar UV geçirgen bir epoksi kullanılarak aygıtın giriş ve çıkış arayüz bölgelerine yapıştırılmaktadır.

LiNbO_3 dalgakılavuzu ve PM fiber taşıyıcıların bağlantı noktalarındaki kutuplanma genliklerinin analizi, ölçüm hassasiyetini saptamak açısından son derece önemlidir. Bir FOD sensörünü yüksek hassasiyetle kurabilmek için, 50 dB'den daha yüksek kristal içi kutuplanma değerine sahip bir MIOC tercih edilmektedir. Kutuplanma ölçümlerine yönelik olarak literatür araştırmaları yapılmıştır. Kullanılan yöntemlerden birisi; serbest uzayda yarı dalga plakası kullanılarak, modülatörün iki ortagonal kutuplanma modu arasındaki şiddet oranının ölçümüne dayanmaktadır. Ancak bu ölçüm yöntemi; yarı dalga plakası veya fotodedektör gibi optik elemanların ölçüm hassasiyeti ile sınırlandırıldığı için, doğru sonuç elde edilememekte ve aygıtın kutuplanma karakteristiği için tercih edilmemektedir [16]. Ölçüm yöntemindeki bu sınırlama; son yıllarda optik yol eşitliğine dayalı interferometre düzeneklerinin geliştirilmesine ortam hazırlamıştır.

Bu çalışmada; LiNbO₃ kristali içerisindeki PER ölçümlerini gerçekleştirebilmek amacıyla serbest uzayda interferometre düzeneği kurulmuştur. Ancak; karşılaşılan hizalama problemlerini çözebilmek amacıyla, düzenek fiber ortamına taşınmıştır ve fiber tabanlı interferometre düzeneği oluşturulmuştur. Kutuplanma karakterizasyonu için kurulan fiber tabanlı interferometre düzeneği Şekil 7.1’de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Kutuplanma karakterizasyonu için kurulan fiber tabanlı interferometre deney düzeneği ve Mach-Zehnder interferometresi

Deneyde; 1550 nm dalga boyuna sahip ASE ışık kaynağı, 50:50 ayırma oranına sahip 2 adet 2x2 SM çiftleyici, 30 dB PER değerine sahip 2 adet kutuplayıcı, gelen sinyalin optik gücünü istenilen seviyede ayarlamayı sağlayan 3 adet optik sönümlendirme komponenti (variable optical attenuator-VOA), ışığın kutuplanma durumunu kontrol eden kutuplanma kontrolcüsü (polarization controller-PC), piezoelektrik etki ile çalışan ve faz modülasyonu uygulanarak belli miktardaki fiberin uzunluğunun değişebildiği fiber gerici, ışığın kutuplanma yönünü değiştiren sirkülör, objektif, sistem çıktısını elektronik olarak veri toplama birimine aktaran iki adet fotodedektör (FD), 2 adet ayna, ışığın serbest uzayda belli pozisyonlarda hareket etmesini sağlayan hareketli ray mekanizması ve elde edilen dataların işlenmesini sağlayan bir adet bilgisayar kullanılmıştır.

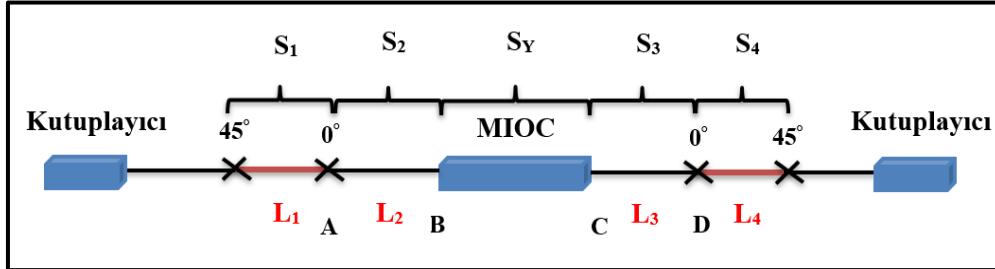
ASE ışık kaynağından gelen kutuplanmamış ışık ilk kutuplayıcıdan geçtikten sonra kutuplanmıştır. Polarize olan ışık; sırasıyla L₁ uzunluğundaki ek fiber içinden geçirilmiş, optik ağıta iletilmiş ve sonrasında L₄ uzunluğundaki ek fiber içerisinde geçirilmiştir. MIOC'un giriş ve çıkış fiberleri 80 µm kılıf çapına sahip PM fiberlerdir. İki adet kutuplayıcı; ek fiberlerin yavaş eksenine 45° açı ile hizalanmıştır. Böylece gelen ışık dalgası, Şekil

7.1'deki L_1 uzunluğundaki fiberin hızlı ve yavaş eksenine eşit olarak ayrıştıktan sonra aygıt içerisinde geçirilmiştir. Bu işlemten sonra; L_4 ek fiberinden geçirilen ortogonal kutuplanmış ışık ışınları ikinci bir kutuplayıcı tarafından birleştirilerek Mach-Zehnder İnterferometresi'ne (MZI) yönlendirilmiştir. MZI'nın çıkışından elde edilen sinyal çıktısı ölçülerek; LiNbO_3 tabanlı Y-geometrilili dalgakılavuzunun PER'i ve PM fiberlerin ek noktalarındaki girişim durumları saptanmıştır. Bu analizler; ilgili piklerin pozisyon ve genlikleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

LiNbO_3 kristalin çiftkırıcı özelliği sebebiyle; MIOC içerisinde geçişi esnasında zaman boyutunda ayrışan iki farklı kutuplanma bileşeni, interferometre kollarındaki zaman gecikmesi sayesinde MZI'nın çıkışında aynı varış süresinde eşitlenmektedir. Düzeneğe göre; ikinci kutuplayıcıyı geçen ışık ışını fiber gericiye yönlendirilmiştir. Düzenekteki fiber gerici piezoelektrik bir malzeme içermektedir ve uygulanan gerilim altında fiber uzunluğu değişmektedir. Fiber uzunluğu değiştirilerek, interferometrenin iki kolu arasındaki optik yolun dengelenmesi sağlanmıştır. İnterferometrenin bir kolunda değişken zaman gecikmesi meydana getirmek için, geciktirme hattı interferometrenin diğer koluna dahil edilmiştir. Sirkülatörün bir ucunda ilerleyen ışık ışını 40X büyütmeli bir objektiften geçirilmiştir ve sonrasında aynalardan yansıtılmıştır. Bu yansıtılan ışık dalgası interferometrenin birinci optik yolunu oluşturmuştur. İnterferometrenin ikinci optik yolunu ise fiber gerici ve PC içerisinde geçirilen ışık ışınları oluşturmuştur. İnterferometre konfigürasyonu oluşturulduktan sonra, atmalı fiber lazer kaynağı ve yüksek hızlı fotodedektör kullanılarak interferometrenin iki kolundaki optik yolların eşitlenmesi sağlanmıştır. İnterferometrenin üst koluna takılan VOA yardımı ile fotodedektörlere düşen optik güç değerleri dengelenmiştir.

Düzenekte kullanılan ekipmanlar; sinyal jeneratörü, osiloskop, lock-in yükselteç, femtosaniye Er-fiber lazer, diyot sürücü olarak sıralanmaktadır. Üst kolda kullanılan fiber gericiyi elektriksel olarak sürmek için sinyal jeneratörü kullanılmıştır. Sistemin iki kolundaki optik yol eşitlemesi sonucunda elde edilen girişim sinyallerini izlemek amacıyla osiloskop kullanılmıştır. Bu sayede; iki girişen sinyal arasındaki zaman gecikmesi saptanmıştır. Optik yol eşitlemesi femtosaniye fiber lazer kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gürültü sinyallerinden bile daha düşük seviyedeki küçük genlikli sinyal piklerini algılayabilmek amacıyla lock-in yükselteçten faydalanılmıştır. Diyot sürücü ile lazerin sürülmesi ve belli bir sıcaklıkta tutulması sağlanmıştır.

İnterferometre kurulum çalışmaları tamamlandıktan sonra; deneysel sonuçlar analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Optik yol farkı (OYF)'na dayanan değerlendirme yöntemi Şekil 7.2'de betimlenmiştir.



Şekil 7.2. OYF yöntemine dayalı değerlendirme analizi

Şekil 7.2'de gösterildiği gibi; L_1 ; 1. ek fiberi, L_2 ; aygıtın giriş taşıyıcı fiberini, L_3 ; aygıtın çıkış taşıyıcı fiberini, L_4 ; 2. ek fiberi temsil etmektedir. L ise genel olarak bahsedilen fiberlerin uzunluklarını tanımlamaktadır. Her iki taraftaki kutuplayıcı fiberleri L_1 ve L_4 ek fiberlerine 45° açı ile ek yapılmıştır. $L_1 - L_2$ ve $L_3 - L_4$ arasındaki açı ise 0° 'dir. Her iki kutuplayıcı; sistemdeki PM fiberlerin yavaş eksenine göre 45° açı ile yönlendirilmiştir. Böylece; girişteki ışık ışınları ilk kutuplayıcıdan geçtikten sonra L_1 uzunluğundaki ek fiberin hızlı ve yavaş eksenine eşit bir şekilde ayrılmıştır. Bu ayrışma ile; tek bir eksen doğrultusunda ışığın ilerlemesine izin verilmiştir. Ortogonal olarak kutuplanmış ışın demeti L_4 ek fiberinden geçtikten sonra ikinci kutuplayıcı tarafından tekrar birleştirilmiştir. Bu sayede; MZI bölümüne girerken hızlı ve yavaş eksenindeki ışın demetleri tekrar bir araya gelmiştir [16]. Şekil 7.2'deki ayrışmanın temel nedeni; ek noktalarındaki girişim durumlarını ve aygıt kristali içindeki kutuplanma analizini doğru bir şekilde gerçekleştirebilmektir. Diğer bir ifadeyle; sadece PM fiberlerin eksen doğrultusunda olan ışık yönelmesi gerçekleşmiş olur.

7.2. Teorik Hesaplamalar ve Kutuplanma Karakteristiği Analizi

Bu bölümde; pik karakterizasyonlarına yer verilmiştir. Literatür araştırmaları sonucunda elde edilen teorik hesaplamalar, deneysel verilerin aydınlatılmasında yol gösterici olmuştur.

Aygıtın kutuplanma karakteristiğini ve PM fiber taşıyıcılar ile ek fiberler arasındaki girişim durumlarını analiz edebilmek için Jones matris yöntemi kullanılmıştır [16]. Kutuplayıcıya giren ışık ışını için matris ifadesi Eş. 7.1'deki gibi yazılabilir [16].

$$E_{in} = \begin{bmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a e^{-i(\omega t + n k z)} \\ b e^{-i(\omega t + n k z)} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Burada; $E_x(t)$ ve $E_y(t)$; girişteki ışın demetinin x ve y eksenlerine düşen kutuplanma bileşenleri, a ve b ; $E_x(t)$ ve $E_y(t)$ 'nin genlik katsayıları, ω ; ışığın frekansı, n ; kırılma indisi, k ; vakumdaki dalgasayısı, z ; iletim mesafesi, t ; ışığın geçiş süresi olarak tanımlanmaktadır. Optikte; kutuplanmış ışık Jones hesaplamaları ile ifade edilebilmektedir. Bu hesaplama yönteminde; kutuplanmış ışık bir Jones vektörü ile betimlenir ve çizgisel optik elemanlar ise Jones matrisleri ile tanımlanır. Kutuplanma karakteristikleri üzerinde analiz yapabilmek için; PM fiberlerin, LiNbO_3 tabanlı dalgakılavuzunun ve optik elemanların bazı iletim matrislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu iletim matris ifadeleri bir yayın çalışmasında [16] açıkça belirtilmiştir. Hesaplamalar sonucunda; L_1 , L_2 , L_3 , L_4 uzunluklu fiberler ve dalgakılavuzu içindeki zaman gecikmesi sırasıyla τ_1 , τ_2 , τ_3 , τ_4 and τ_Y olarak tanımlanmıştır. İlgili zaman gecikmeleri; Eş. 7.2-Eş. 7.6 arasında ifade edilmiştir.

$$\tau_1 = L_1 \cdot \Delta n_f / c = S_1 / c \quad (7.2)$$

$$\tau_2 = L_2 \cdot \Delta n_f / c = S_2 / c \quad (7.3)$$

$$\tau_3 = L_3 \cdot \Delta n_f / c = S_3 / c \quad (7.4)$$

$$\tau_4 = L_4 \cdot \Delta n_f / c = S_4 / c \quad (7.5)$$

$$\tau_C = L_Y \cdot \Delta n_Y / c = S_Y / c \quad (7.6)$$

Eş. 7.2-Eş. 7-6 arasındaki denklemlerde; S_1 , S_2 , S_3 , S_4 ve S_Y sırasıyla; L_1 , L_2 , L_3 , L_4 ve Y -geometrisindeki dalgakılavuzu içindeki iki ortogonal mod arasındaki $L \cdot \Delta n$ olarak betimlenmiştir. Belirtilen S parametreleri arasındaki ilişki; $S_A = S_1$, $S_B = S_1 + S_2$, $S_C = S_3 + S_4$ ve $S_D = S_4$ şeklindedir [16]. $S_{aygıt}$ 'ın girişim pikinin pozisyonu için iki durum mevcuttur: $S_{aygıt} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_Y$ ve $S_{aygıt} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 - S_Y$. Y -dalgakılavuzunun hızlı eksenini PM fiber taşıyıcıların hızlı eksenine hizalandığında ilk durum geçerli olmaktadır. İkinci durum ise; Y -dalgakılavuzunun hızlı eksenini PM fiber taşıyıcıların yavaş eksenine hizalandığında geçerli olmaktadır. $S_{aygıt}$ 'ın pozisyonundan; PM fiber taşıyıcılar ve Y -dalgakılavuzu arasındaki hizalama tipi belirlenebilir [16].

Deney düzeneğinde; L_1 ve L_4 uzunluğundaki ek fiberlerin eklenmesinin temel sebebi; karakterize edilen entegre optik aygıtın girişim pikinin grafiksel olarak ayırt edilebilir olmasını sağlamaktır. Genellikle; kullanılan ışık kaynaklarının tepecik (*ripple*) piki -50 dB'den -70 dB'ye kadar uzanmaktadır ve bu değerdeki genlik miktarı, dalgakılavuzun PER değerinden daha yüksektir. Eğer $S_{aygıt} < S_{tepecik}$ olursa; dalgakılavuzu PER'i, ışık kaynağından gelen piklerin içinde kaybolacaktır [16]. Bu sebeple; deneysel uygulamalarda aygıtın girişim pikinin istenmeyen dış girişimlerden daha yüksek olması gerekmektedir. Ek fiber olmadan test edilen tipik MIOC aygıtları için; $S_{aygıt} = S_2 + S_3 \pm S_Y$ şeklindedir ve aygıtın giriş ve çıkış kollarındaki PM fiberlerin kısa olmasından dolayı bu değer, $S_{tepecik}$ değerinin gerisinde kalmaktadır. Bundan dolayı; Y-dalgakılavuzunun PER değerini açığa çıkarmak, temiz bir sinyal elde edebilmek ve ayrıca ışık kaynağından gelen istenmeyen piklerin uzağında tutabilmek amacıyla bir miktar kaydırmak gerekmektedir. İşte bu amaçla; L_1 ve L_4 uzunluğundaki iki adet ek fiber sisteme eklenmiştir ve eklenen fiber uzunlukları $S_1 + S_2 + S_3 + S_4 > S_{tepecik} + S_Y$ şartını sağlamıştır [16].

Deneyde kullanılan optik aygıt, aygıtın giriş ve çıkış taşıyıcı fiberleri ve iki farklı ek fiber için; ilgili çiftkırınım, uzunluk parametreleri ve hesaplanan S değerleri Çizelge 7.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. İnterferometre düzeneğinde kullanılan bileşenler için bazı parametrik veriler

Bileşen	Çiftkırınım (B)	Uzunluk (m)	S (mm)
L_1	5E-04	13	6,5
L_2	5E-04	1	0,5
Y-dalgakılavuzu	8E-02	0,027	2,16
L_3	5E-04	1	0,5
L_4	5E-04	42	21

Çizelge 7.1'de belirtilen çiftkırınım değerleri teorik bazı hesaplamalar ile elde edilmiştir [16]. Eş. 7.2-Eş. 7.6 arasında belirtilen denklemlere göre; S parametresi genel olarak; $S=L.B$ ile ifade edilmektedir. Burada B ifadesi; Δn 'e karşılık gelmektedir ve çiftkırınım olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda; optik fiberler için çiftkırınım değeri 5E-04 iken, dalgakılavuzu için 8E-02 olarak hesaplamalara dahil edilmiştir.

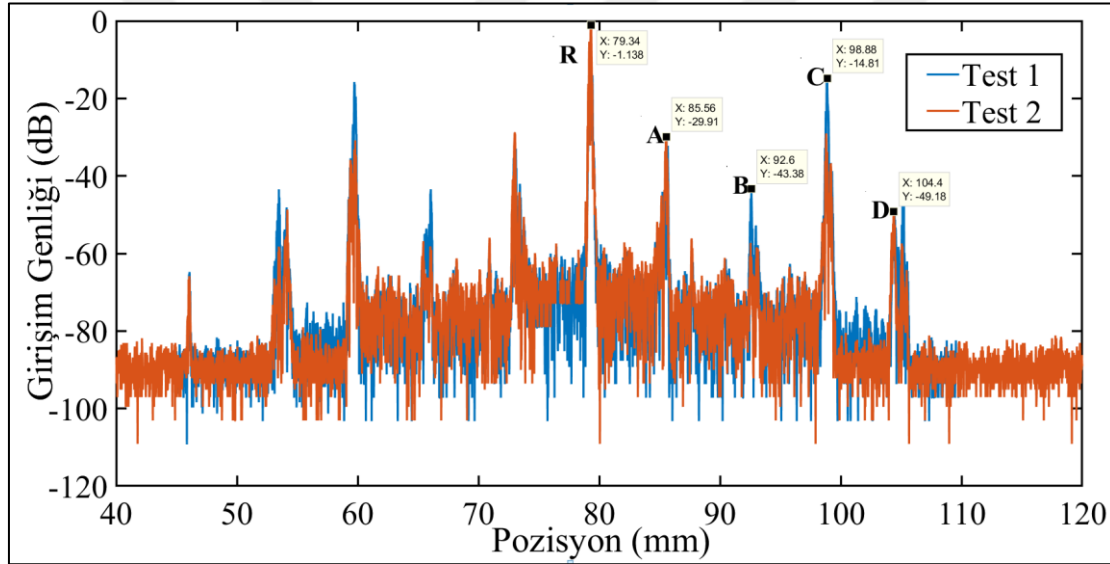
Fiberler için S parametresi mm olarak Eş. 7.7'deki gibi ifade edilmiştir.

$$S=(L_1+L_2+L_3+L_4) \times 5E-04=28,5 \text{ mm} \quad (7.7)$$

Y-dalgakılavuzu için S parametresi mm olarak Eş. 7.8'deki gibi ifade edilmiştir.

$$S=(Y\text{-dalgakılavuzu}) \times 8E-02=2,16 \text{ mm} \quad (7.8)$$

Şekil 7.3'te; interferometre düzeneğinde test edilen entegre optik aygıtın kristal içi PER karakterizasyonu ve ilgili ek noktalarındaki girişim durumları, grafiksel olarak analiz edilmiştir.



Şekil 7.3. Kristal içi PER ve fiber ek noktalarındaki girişim durumları analizi

Şekil 7.3'teki interferogram'da; x eksenini zaman gecikmesinden kaynaklı pozisyonu betimlerken, y eksenini ise entegre optik aygıtın kutuplanma karakteristiğini ve fiber ek noktalarındaki girişim durumlarını göstermektedir. Genel olarak; piklerin genliği ne kadar küçük ise test kararlılığı o kadar yüksek demektir. Şekil 7.3'te aynı testin üst üste iki kez tekrarlandığı görülmektedir. Test 2'deki bazı piklerin boyları, test 1'e göre nispeten daha düşüktür. Bunun sebebi; aygıtın giriş ve çıkış kollarındaki fiberlerin, sistemdeki ek fiberlerden kopartılıp tekrar ek yapılmasıdır. İkinci ek yapma işleminde ek kalitesi nispeten daha iyi olduğu için pik genlikleri daha aşağı seviyede elde edilmiştir. 80 mm'deki pik; referans pikidir ve R ile gösterilmiştir. Teorik hesaplamalar ve deneysel analizler; R piki referans alınarak gerçekleştirilmiştir. R'nin sol ve sağ tarafında simetrik piklerin varlığı söz

konusudur. Bu simetrikliğin bazı sebepleri vardır. Işık kaynağından gelen ışık, ilk 2x2 çiftleyiciden geçtikten sonra ikiye ayrılmaktadır ve MZI bölümüne girmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi; fiberin hızlı ve yavaş ekseninde ilerleyen ışın demetleri 1. kutuplayıcı ile ayrışırken, 2. kutuplayıcı vasıtasıyla birleşerek, MZI'ya her iki ekseninde ilerleyen ışın demetleri girmektedir. Hızlı eksen için “f” ve yavaş eksen için “s” notasyonu tanımlanmıştır. MZI'nın üst ve alt kolunda ilerleyen ışın demetleri hem s, hem de f ekseninde ilerlemektedir. Bununla birlikte; farklı birleşme noktalarında, optik yol izleme yöntemi göz önünde bulundurularak s ve f'nin 6 ayrı durum eşleşmesi söz konusudur, simetrikliği oluşturan olgu ise 6 ayrı durumun eşleşmesinden kaynaklanmaktadır. Diğer bir ifadeyle; PM fiberlerin bağlantı noktalarında ve Y-dalgakılavuzu içerisinde ilerleyen s ve f eksen yönelimleri simetrik yapıdadır. s ve f'nin üst üste çakıştığı nokta; R pikinin oluştuğu noktadır. Bu pikin etrafında; simetrik piklerin varlığı gözlemlenmiştir. Çizelge 7.2; eksenlere göre olası simetrik oluşumları göstermektedir.

Çizelge 7.2. Simetrik optik yol durumları

Durum	S ₁	S ₂	S _Y	S ₃	S ₄
1	f	f	f	f	f
2	f	f	f	s	s
3	f	f	f	f	s
4	s	f	f	f	f
5	s	s	f	f	f
6	s	s	s	s	s

a)

Durum	S ₁	S ₂	S _Y	S ₃	S ₄
1	s	s	s	s	s
2	s	s	s	f	f
3	s	s	s	s	f
4	f	s	s	s	s
5	f	f	s	s	s
6	f	f	f	f	f

b)

Çizelge 7.2'deki simetrik oluşum için gerekli tüm teorik anlatımlar literatür taramalarında mevcuttur [52]. Girişim analizleri yapılırken, belirli pozisyonlarda açığa çıkan piklerin hangi ek noktalarına ait olduğu belirlenmeye çalışılmış ve böylece entegre optik aygıtın kristal içi kutuplanma değeri saptanmıştır.

Şekil 7.3'e ilişkin; A, B, C ve D piklerinin pozisyon ve genlikleri referans alınarak, hangi pikin hangi parametreye ait olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Çizelge 7.3'te; A, B, C ve D pikleri için değerlendirme sonuçları, R piki referans alınarak saptanmıştır.

Çizelge 7.3. A, B, C ve D için girişim piki analizi

Pik	Pozisyon (d) (mm)	Genlik (dB)		Değerlendirme
		Test 1	Test 2	
A	85,56	-32,15	-29,91	S_1+S_2
B	92,6	-43,38	-57,27	$(S_3+S_4)-(S_1+S_2)$
C	98,88	-14,81	-27,78	S_3+S_4
D	104,4	-50,33	-49,18	$S_1+S_2+S_3+S_4-S_Y$

S lokasyonlarının belirlenmesinde; fiber eklerinin tekrarlanması etkili olmakla beraber, literatür çalışmalarındaki teorik açıklamalar da [16] yol gösterici olmuştur. Çizelge 7.3'te; piklere karşılık gelen S parametreleri ve bunların kombinasyonları gösterilmiştir. Fiber ekleri iki kez üst üste tekrarlanarak, analizler test 1 ve test 2 olarak değerlendirilmiştir. Test 1 ve test 2 için pik pozisyonları sabit olmakla beraber, pik genliğinin değeri y ekseninde değişmektedir. S parametrelerinin açıklamasına Çizelge 7.4'te yer verilmiştir.

Çizelge 7.4. S parametre tanımlaması

Değerlendirme	Açıklaması
S_1+S_2	Giriş fiber taşıyıcı ve Y-dalgakılavuzu arasındaki girişim etkisi
S_3+S_4	Çıkış fiber taşıyıcı ve Y-dalgakılavuzu arasındaki girişim etkisi
$S_1 + S_2 + S_3 + S_4 - S_Y$	Y dalgakılavuzu kristal içi PER değeri

Eş. 7.9-Eş. 7.14 arasındaki denklemler sayesinde elde edilen bazı hesaplamalar ile kristal içi PER değeri 49,18 dB olarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda;

$$d(S_1+S_2)-79,34=6,22 \text{ mm} \quad (7.9)$$

$$d(S_3+S_4)-79,34=19,5 \text{ mm} \quad (7.10)$$

$$S_1+S_2+S_3+S_4 \gg 6,22+19,5=25,72 \text{ mm} \quad (7.11)$$

mm olarak elde edilmiştir. Bu değer; sistemdeki toplam fiberler ve ek bağlantılarına yönelik elde edilmiştir. Sistemdeki PM fiberler için S değeri 28,5 mm olarak hesaplanmıştır. Optik aygıt için ise 2,16 mm olarak hesaplanmıştır. Bu durumda S_Y ;

$$S_Y=(2,16 \times 25,72)/28,5=1,95 \text{ mm'dir.} \quad (7.12)$$

Işık ışınları; geleneksel olarak fiberin yavaş ekseninde ilerlemektedir. Kristal içinde ise ışık ışınları hızlı eksene hizalanmaktadır. Yavaş-hızlı eksen geçişi söz konusudur. Bu yüzden; LiNbO_3 kristal için $S_1+S_2+S_3+S_4-S_Y$ durumu geçerlidir. Eş. 7.13'e göre;

$$25,72-1,95=23,77 \text{ mm olarak elde edilmiştir.} \quad (7.13)$$

Hesaplamalar; referans pik (R)'e göre değerlendirildiği için, Eş. 7.14'teki gibi;

$$79,34+23,774=103,11 \text{ mm olarak elde edilmiştir.} \quad (7.14)$$

İnterferometre grafiği incelendiğinde; (Bkz. Şekil 7.3) kristal içi PER değerini gösteren D pikinin 104,4 mm'de belirdiği saptanmıştır. Hesaplamalarda ise 103,11 mm olarak elde edilmiştir. Aradaki bu fark deneysel sapmalardan kaynaklanmaktadır.

7.3. SLD Işık Kaynağı ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Buraya kadar yapılan tüm çalışmalarda ASE⁶ ışık kaynağı kullanılmıştır. ASE ışık kaynağı; yüksek uyumluluk boyu (İngilizce literatürde 'coherence length' olarak yer almaktadır) sebebiyle girişim piklerinin genişliğinin artmasına sebep olmaktadır. Gerçekleştirilen interferometre deneylerinde; süperışımalı diyot (Superluminescent Diode-SLD) kullanılarak bazı Ar-Ge deneyleri gerçekleştirilmiştir. SLD ışık kaynağının kullanılmasının sebebi; bu tip ışık kaynaklarının düşük uyumluluk boyuna sahip olması, böylece girişim piklerinin çözünürlüğünün artarak daha keskin ve belirgin yapıda olmasını sağlamasıdır.

SLD; lazer diyota benzer bir yapı sergilemektedir. İç mekanizmasında; bir p-n yapısı elektriksel olarak ileri yönde sürüldüğünde optik olarak aktif hale gelmektedir ve geniş bir dalga boyu aralığında ASE yayınlanmaktadır. Tepe dalga boyu ve SLD'nin şiddeti; aktif malzeme kompozisyonuna ve pompa akımına bağlıdır. SLD tarafından salınan optik güç, sürücü akımı ile doğru orantılıdır. SLD ışık kaynaklarının en önemli özelliği; lazer diyotlardaki gibi benzer çıkış gücü karakteristiği sergilemesi ve LED (Light Emitting Diode) gibi geniş bir optik spektrumda parlaklık özelliğine sahip olmasıdır [53]. Bu tip bir kombinasyon; yüksek optik kazanç elde edilmesine olanak sağlamaktadır. SLD'nin spektral özelliklerini tanımlayan birçok parametre mevcuttur. Bunlardan en önemlileri; bant genişliği

⁶ ASE ışık kaynağı; 5.Bölüm'de detaylı olarak anlatılmıştır.

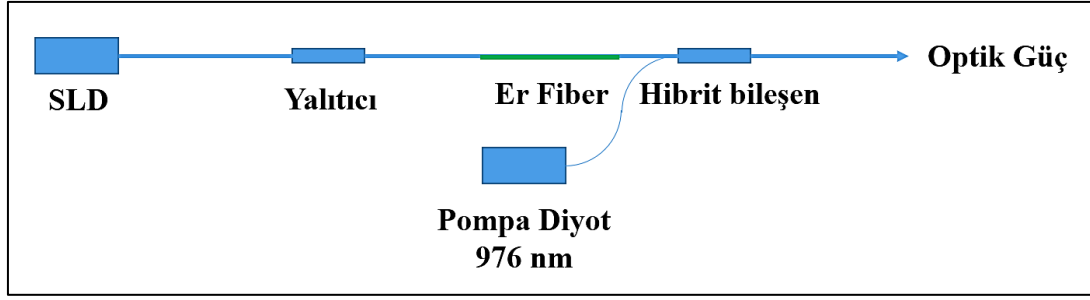
ve uyumluluk boyudur [53]. Bant genişliği; güç yoğunluğunun dalga boyuna karşı oluşturulan eğrinin tepe noktasının 3 dB düştüğü yerdeki FWHM (Full Width Half Maximum) parametresi olarak tanımlanmaktadır. SLD ışık kaynakları için bant genişliği genellikle 5 nm-100 nm arasında değişim göstermektedir.

Bant genişliği yanısıra; SLD'nin diğer bir karakteristik parametresi uyumluluk boyudur. Uyumluluk boyu; bant genişliğine bağlıdır ve Eş. 7.15'teki denklem ile ifade edilmektedir.

$$L_c = 0.664 * \lambda * \lambda / \Delta \lambda \quad (7.15)$$

Eş. 7.15'te; λ dalga boyu, $\Delta \lambda$ bant genişliği, k ise spektrum form faktörüne dayanan bir katsayıdır [53]. L_c ise uyumluluk boyunu temsil etmektedir. k katsayısı “Lorentzian” tipi bir spektrum için 0.32 iken, “Gaussian” spektrumu için 0.66'dır. Yapılan araştırmalarda; uyumluluk boyunun interferometre uygulamalarında önemli bir parametre olduğu vurgulanmıştır [53]. Özellikle optik yol farkına dayalı interferometrik uygulamalarda düşük uyumluluk boyuna sahip SLD ışık kaynakları tercih edilmektedir. SLD'ler; yüksek bant genişliği ve düşük uyumluluk boyuna sahip ışık kaynaklarıdır. Bu tip kaynaklar; yüksek derecede uzaysal uyumluluk (spatial coherence) sergilemektedir [54]. Diğer bir ifadeyle; tek modlu fiberler ile etkin bir şekilde eşleşme sağlanmaktadır. Uyumluluk boyu; genellikle ışık kaynağının eş fazlılık özelliğine ne kadar etki ettiğini tanımlamaktadır. Özellikle interferometrik uygulamalarda; optik interferometrenin iki kolu arasındaki yol farkı ile ilişkilidir. Gaussian bir spektral dağılıma sahip ışık kaynakları için; uyumluluk boyu bant genişliği ile ters orantılıdır ve Eş. 7.15'te açık bir şekilde gösterilmektedir.

SLD tarafından yayılan toplam optik güç, sürücü diyot akımına bağlıdır. Çıkış sinyal gücü; akıma bağlı olarak doğru orantılı olarak artmaktadır. Şekil 7.4'te; bir SLD ışık kaynağı şematik olarak gösterilmiştir.



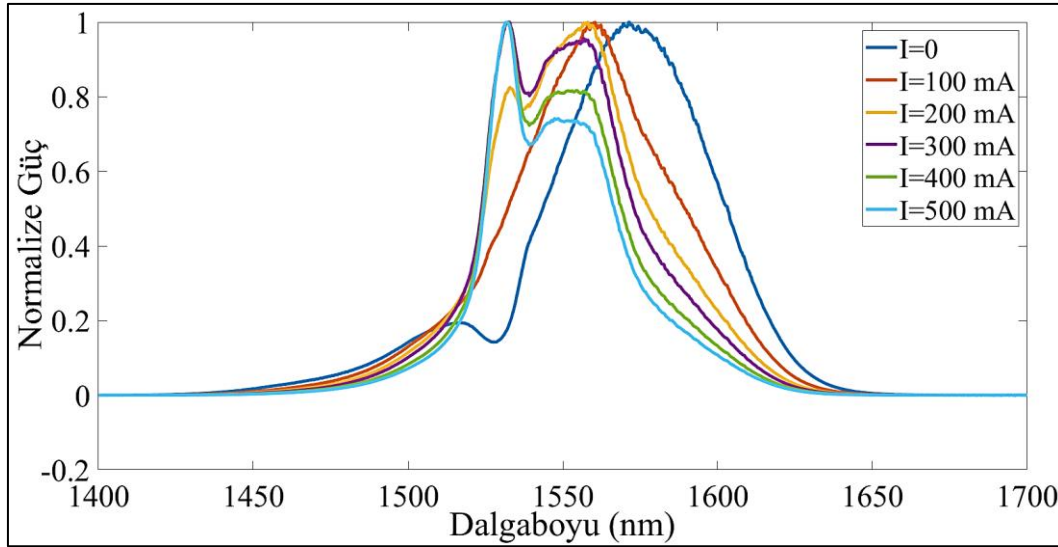
Şekil 7.4. SLD ışık kaynağı mekanizması

Şekil 7.4'te gösterildiği gibi; SLD bazı bileşenlerden oluşmaktadır. Yalıtıcı; istenmeyen gürültü etkilerine karşı ışık kaynağını korumak amacıyla kullanılmaktadır. Er fiber; kazanç fiberi olarak sisteme dahil edilmiştir. Işık kaynağının yükseltme çalışmalarında; pompa diyottan gelen 976 nm dalga boyundaki ışık ışınları ile pompalama yapılarak diyot akımının değişimine göre, Erbiyumun fiber içindeki emilimi ve katkılandırma işlemi arasındaki ilişki irdelenmiştir. Hibrit bileşen; dalga boyu ayırıştırıcı görevini üstlenmektedir.

Alt bölümlerde; SLD ile gerçekleştirilen bazı optik karakterizasyonlar anlatılmıştır.

7.3.1. Pompa akımının değişimine göre dalga boyu kayma analizi

SLD ışık kaynağı kullanılarak bazı deneyler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak; ışık kaynağının ortalama dalga boyu kayması analiz edilmiştir. Dalga boyu kayması deneyleri; optik spektrum analizör (OSA) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SLD ışık kaynağının çıkışı OSA'ya bağlantı yapılmış olup, Er fiberin pompalamasına bağlı olarak ışık kaynağının dalga boyu kayması farklı pompa akım değerlerine göre analiz edilmiştir. Buna göre; dalga boyuna karşılık sinyal çıkışı bir Gauss dağılımı karakteristiği ile irdelenmiştir. Şekil 7.5'te; ilgili Gauss dağılımı gösterilmiştir.

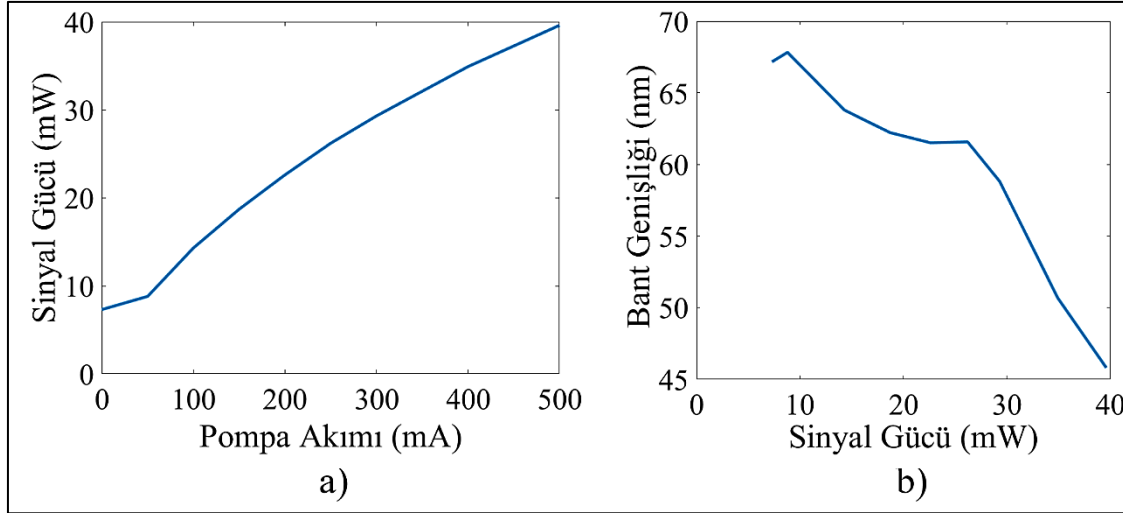


Şekil 7.5. Farklı pompa akım değerlerine göre dalga boyu kayma analizi

Şekil 7.5'teki Gauss dağılımında I pompa akımını betimlemektedir. Pompalamanın varlığından söz edildiği için, sisteme Er kazanç fiberi dahil edilmiştir. Sırasıyla; $I=0$, 100 mA, 200 mA, 300 mA, 400 mA ve 500 mA akım değerlerinde Er fiberi katkılı olarak SLD ışık kaynağının dalga boyu kayması analiz edilmiştir. Sonuçlar doğrultusunda; pompa akımı arttıkça, Er emiliminin artmasından dolayı kısa spektrumlara doğru dalga boyu kayması meydana gelmektedir. Tam tersi düşünüldüğünde ise; pompa akımı azaldıkça uzun spektrumlara doğru kayma oluşmaktadır. Bu sonucun; literatürden elde edilen bulgular incelendiğinde [55] tutarlılık gösterdiği saptanmıştır.

7.3.2. SLD yükseltme işleminin pik çözünürlüğüne etkisinin irdelenmesi

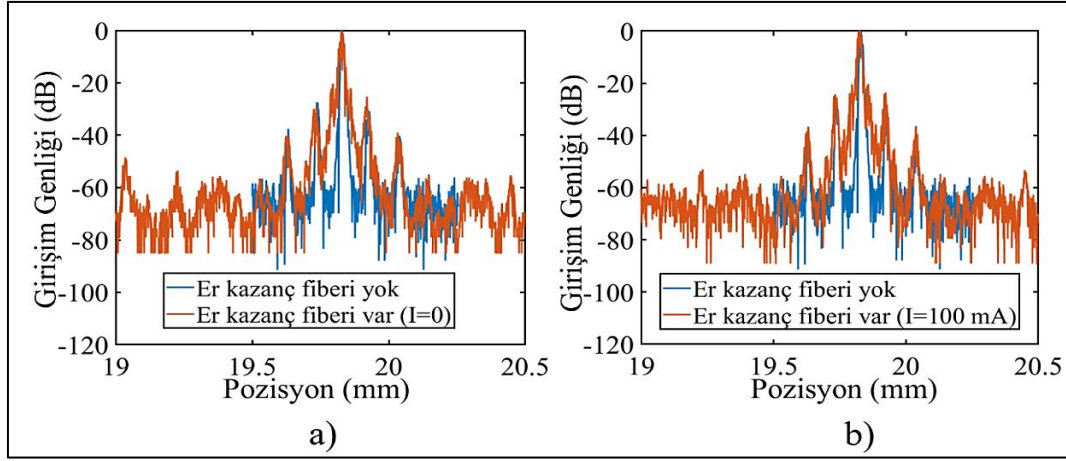
Tez kapsamında; SLD'nin yükseltme (amplifikasyon) çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Işık kaynağının çıkışından elde edilen sinyal gücü pompa akımının değişimine bağlı olarak irdelenmiştir. Bant genişliğinin pompa gücüne göre değişimi OSA kullanılarak analiz edilmiştir. İlgili değerlendirmelere Şekil 7.6'daki grafiklerde yer verilmiştir.



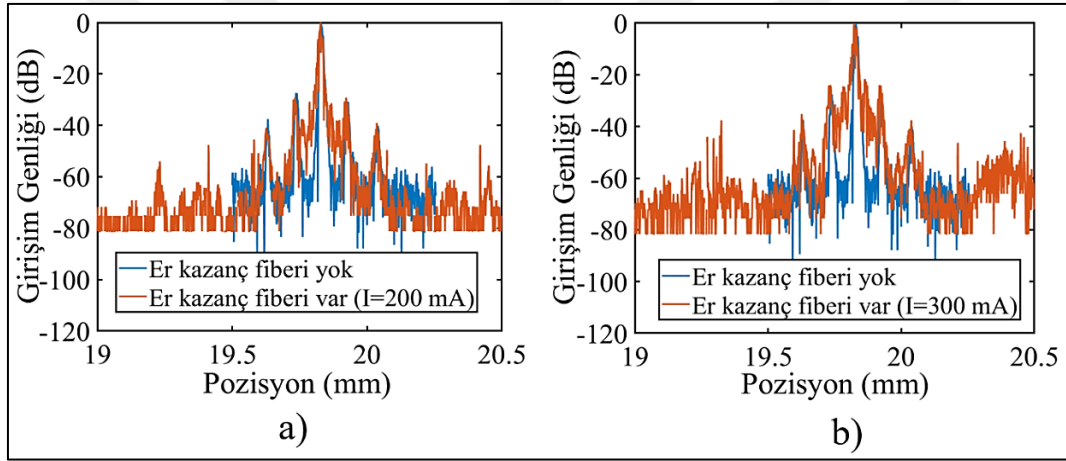
Şekil 7.6. SLD yükseltme çalışmaları a) Pompa akımı ile sinyal gücü arasındaki ilişki b) Bant genişliği analizi

Şekil 7.6a’da; pompa diyot akımı belirli aralıklarla artırılarak ışık kaynağının çıkışındaki güç değişimi irdelenmiştir. Sonuçlar doğrultusunda; akım ile gücün doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 7.6b’deki sonuçlarda ise; bant genişliğinin pompa gücü ve buna paralel olarak pompa akımı ile ters orantılı olduğu saptanmıştır. Bant genişliği analizindeki veriler; OSA girişine ışık kaynağı çıkış fiberi takılarak elde edilmiştir. Bu testler; SLD ışık kaynağının optik karakterizasyonuna yönelik olarak yapılmıştır. Ayrıca; interferometre deneylerindeki pik analizlerinde, hangi akımda bant genişliği ve uyumluluk boyunun hangi mertebeye olacağını saptamak açısından önem arz etmektedir.

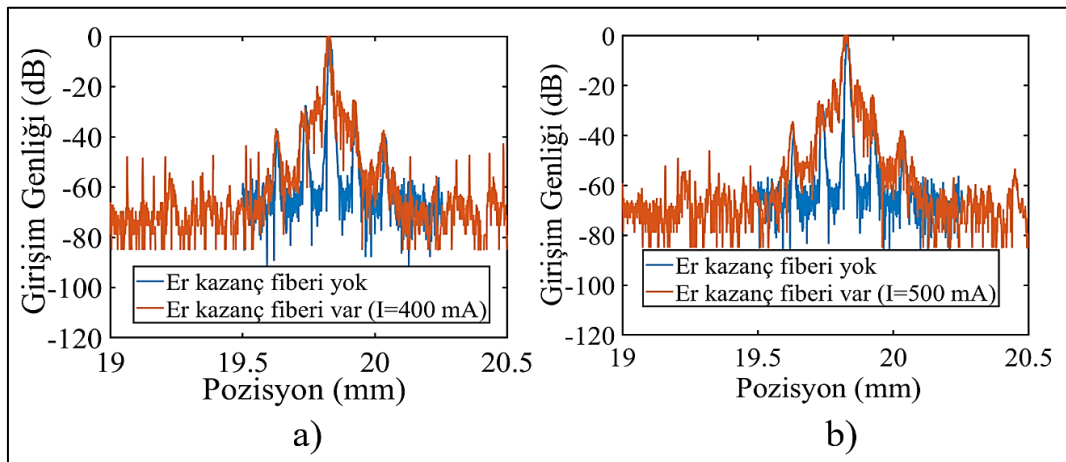
Kurulan interferometre düzeneğinde; Er fiberin katkılandırmasına yönelik olarak pompa akımı belirli kademelerde değiştirilmiştir ve farklı akım değerlerinde 19 mm – 20,5 mm aralığındaki girişim pikleri karakterize edilmiştir. Pik karakterizasyonu; diyot akımı sırasıyla Şekil 7.7a ve Şekil 7.7b’de $I=0$ ve $I=100$ mA’de, Şekil 7.8a ve Şekil 7.8b’de $I=200$ mA ve $I=300$ mA’de, Şekil 7.9a ve Şekil 7.9b’de ise $I=400$ mA ve $I=500$ mA’de ayarlanacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.7. $I=0$ ve $I=100$ mA için pik karakterizasyonu a) $I=0$ iken b) $I=100$ mA iken



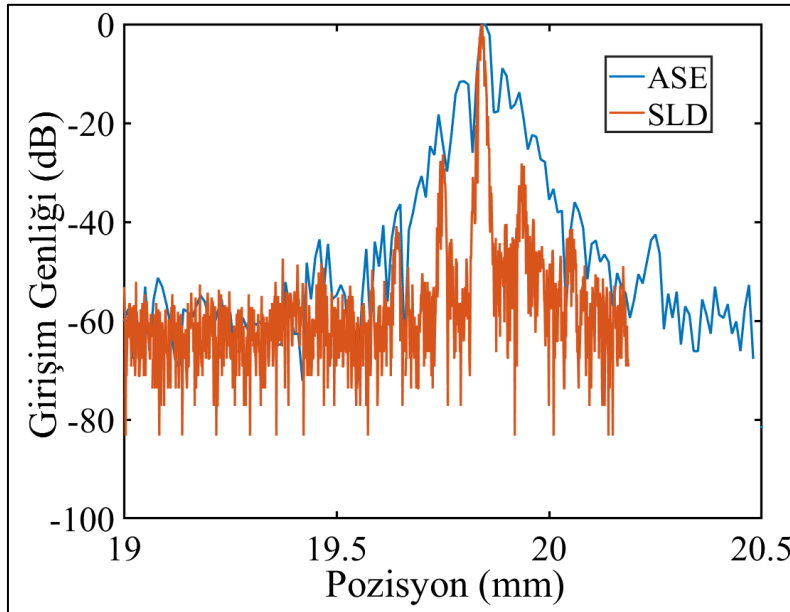
Şekil 7.8. $I=200$ mA ve $I=300$ mA için pik karakterizasyonu a) $I=200$ mA iken b) $I=300$ mA iken



Şekil 7.9. $I=400$ mA ve $I=500$ mA için pik karakterizasyonu a) $I=400$ mA iken b) $I=500$ mA iken

Erbiyum katkı fiberinin test sonuçlarına etkisi irdelenirken, interferometre deneyleri fiber katkılılandırması olmadan da gerçekleştirilmiştir. Böylece; veri analizleri kazanç fiberi varlığında ve yokluğunda referans alınarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Şekil 7.7, Şekil 7.8 ve Şekil 7.9'daki grafiklere görüldüğü gibi, Er fiber varlığında akım arttıkça ana büyük pikin genişliğinde artma meydana geldiği aşıkardır. Bu etki; akım arttıkça ışık kaynağının merkez dalga boyunun kısa spektruma doğru kayması ile ilişkilendirilebilir. Akım arttıkça ve dalga boyu kısa spektruma kaydıkça bant genişliği azalmaktadır, böylece uyumluluk boyu artmaktadır. Diğer bir ifadeyle; diyot akımı yükseldikçe Erbiyumun fiber içindeki emiliminin artması ile spektrum kısılmakta ve bant genişliği azalmaktadır. Akım değeri her ne olursa olsun; kazanç fiberi varlığındaki pik genişliği, kazanç fiberi yokken elde edilen pik genişliğinden daima fazladır. SLD'nin katkılılandırma sonucu emilim işleminin test sonuçlarında istenmeyen etkiler oluşturduğu açıkça görülmektedir. Bu sebeple; pik genişliğinin daha dar olabilmesi için SLD ile yapılan deneylerde katkı fiberi sisteme dahil edilmemiştir. Emilim sonucu genişleyen pikler; girişim çözünürlüğünde azaltıcı etki yapmaktadır.

Karşılaştırma yapabilmek amacıyla kutuplanma analizleri hem ASE hem de SLD ışık kaynakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.10'da, referans pikin durumu her iki ışık kaynağı kullanılarak analiz edilmiştir.



Şekil 7.10. Referans pik için ASE ve SLD ile alınan ölçümlerin karşılaştırması

Deneylerde kullanılan ASE ışık kaynağının uyumluluk boyu 125 nm iken, SLD ışık kaynağının uyumluluk boyu 15 nm'dir. SLD ışık kaynağının uyumluluk boyunun daha kısa olması, bu tip uygulamalar için kullanıma elverişli olduğunu göstermektedir.

Bu bölümde; üretilen entegre optik aygıtların kutuplanma analizi, fiber ek bağlantıları ve fiber taşıyıcıların etkisi sönümlendirilerek gerçekleştirilmiştir. Seri üretim sürecine dahil olan aygıtların tipik PER değeri 30 dB bandında olmasına rağmen, interferometrik yöntemlerle fiber etkisinden bağımsız olarak gerçek kutuplanma değeri saptanabilmektedir. Ölçüm sonuçları referans alındığında; 50 dB bandında kutuplanma değeri elde edilmiştir. Buna ek olarak; SLD ışık kaynağının iç mekanizması ve çalışma prensibine yer verilerek Ar-Ge deneyleri gerçekleştirilmiştir. Işık kaynağının Gauss dağılımı OSA cihazı yardımıyla çıkartılmış, bant genişliği ve katkılandırma arasındaki ilişki grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan kontrollü deneylerde; kazanç fiberi sisteme eklenmediği durumda SLD'nin etkin bir şekilde kullanılabilirdiği saptanmıştır. Pik çözünürlüğünü artırmak ve daha net bir şekilde ayırıştırma yapabilmek için, SLD bu tip çalışmalarda sıkça tercih edilmektedir.



8. SONUÇ

Tez çalışması toplam 7 ayrı ana başlık altında toplanmıştır. Tezin bu bölümünde; 7 ayrı ana başlık altında detaylandırılan teknik çalışmalar özetlenmiştir. Birinci bölümde; FOD sensörleri ve entegre optik aygıt yapılarına ilişkin temel bilgilere yer verilmiştir. Literatür çalışmalarına ağırlık verilerek sensör bileşenleri detaylı olarak açıklanmıştır. Genellikle temel kavramlar ve teknik açıklamaları üzerinde durulmuştur. Buna ek olarak; tez başlığından anlaşılacağı gibi; iki önemli anahtar kelime olan kararlılık ve güvenilirlik kavramları üzerinde durulmuştur ve bu kavramlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca; herbir ana bölümün araştırma kapsamı kısaca anlatılarak, okuyucuya tezin içeriği ile ilgili yol haritası niteliğinde bilgiler aktarılmıştır.

İkinci bölümde; entegre optik aygıtların fiber bütünleme çalışmalarına yer verilmiştir. Yaklaşık 650 adet aygıtın fiber bütünleme çalışmaları yapılmış olup, farklı açılardan karşılaştırılmıştır. Aygıtların karşılaştırılmasında; sıcaklık test sonuçları referans alınmıştır. Sıcaklık test sonuçlarının referans alınmasındaki öngörü; aygıtlar LiNbO_3 tabanlı olduğu için, LiNbO_3 malzemesi fiziksel özelliklerinden dolayı ısısal değişimlere son derece duyarlıdır. Tez içerisinde literatür araştırmalarından kesitlere yer verilerek bu öngörü doğrulanmıştır. Bu sebeple; aygıtların kararlılıklarını etkileyen en önemli etkenin sıcaklık testleri olduğu kanısına varılmıştır. Üretilen yaklaşık 650 adet aygıtın geçen/kalan sınıflandırmasında sıcaklık testlerinin referans alınmasının temel sebebi de budur. Durum A, B, C ve D olarak adlandırılan dört farklı geometrik yapıda aygıt üretiminin gerçekleştirilmesindeki amaç, kalan kategorisindeki aygıt sayısının nasıl azaltılabileceği yönündedir. Nitekim; her ne kadar durum D’de üretilen aygıtların ısısal testlerde başarı oranı daha yüksek olsa da, her dört grupta hem geçen hem kalan aygıt varlığının söz konusu olduğu istatistiksel değerlendirmeler ile net bir şekilde tespit edilmiştir. Bu bölümde genel olarak istatistiksel veriler ile sonuçlar yorumlanmıştır. Bu sebeple; aygıt kararlılığını mekanik ve işlevsel olarak artırmaya yönelik olarak yüzdesel ağırlık değerleri referans alınmıştır. Çok sayıda aygıt üretiminin gerçekleştirilmesi; her ne kadar laboratuvar altyapısının yoğun bir şekilde kullanımına sebep olsa da ve maliyet açısından zorluk getirse de, endüstriyel anlamda kararlı seviyede ürünler elde edilebilmesi için bu Ar-Ge çalışmasının gerekli olduğu düşünülmüştür. Bu hususta literatür bulgularına rastlanmamıştır, ancak elde edilen yeterli sayıda deneysel veriler araştırmacılara oldukça yol gösterici nitelikte olmuştur. Elde edilen nicel veriler değerlendirildiğinde; durum A, B, C ve D için sırasıyla %36,1, %45, %19,5 ve

%84 oranında geçen aygıt üretimi yapıldığı saptanmıştır. Aygıt üretimi basamağında çok sayıda karşılaştırılacak parametre olduğu için; adım adım karşılaştırma yapılması uygun görülmüştür. İlk aşamada daha genel bir Ar-Ge deneyi ile büyük ölçekteki sorunun çözüldüğü aşıkardır. Bir diğer aşamada; D kategorisinde D-22 ve D-25 olmak üzere uzunluk değişimine göre iki farklı tipte aygıt üretimi yapılmıştır ve bu aygıtlar sıcaklık testlerine tabi tutularak sonuçlar irdelenmiştir. Aygıt uzunluğu belli bir değerin altında ya da üstünde tutulamayacağı için, belirtilen iki değer baz alınarak yapılan testler doğrultusunda her iki grupta geçen aygıt oranının sırasıyla %85,3 ve %83 gibi oldukça yüksek bir değerde sabitlendiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar; aygıt uzunluğundaki değişimin ısısal testlerde çok ciddi boyutlarda farklar meydana getirmediğini ortaya koymuştur. Diğer bir taraftan; aygıt uzunluğu mekanik dayanımı çok fazla etkilemese de, elektrot uzunluğu ve buna bağlı olarak aygıt uzunluğu yarı dalga gerilimini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple; üretilen MIOC aygıtlarının uzunluğu y-yönünde ortalama 25 mm olacak şekilde tek bir seçim yapılmıştır. Üretilen aygıtlar bir nevi aktif aygıtlar olduğu için; epoksi sertleştirme çalışmalarında mekanik performansın yanısıra işlevsellik de önem arz etmektedir. Bu sebeple; bir diğer aşamada ön katılaşma işleminin ve UV uygulama sürecinin etkisi irdelenmiştir. Ön katılaşma; kullanılan epoksinin iç kısımdan başlayarak daha kararlı bir şekilde sertleşmesini sağlamaktadır. Yapılan istatistiksel değerlendirmelerde; ön katılaşma yokken gerçekleştirilen fiber bütünleme çalışmaları baz alınarak geçen aygıt oranının %39, kalan aygıt oranının ise %61; ön katılaşma varlığında ise geçen aygıt oranının %74 iken, kalan aygıt oranının %26 seviyesinde olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma; ön katılaşmanın etkisini ortaya koymuştur ve fiber bütünleme sonrasında gerçekleştirilen testlerin güvenilirliği açısından gerekli olduğu kanısına varılmıştır. Pozlama süresi değişimine göre yapılan Ar-Ge çalışmalarında; üretimde tercih edilen geometri olan D için daha hassas ve güvenilir pozlama parametresi oluşturulmaya çalışılmıştır. Kademeli pozlama parametresi altında yapılan analiz çalışmalarında, geçen aygıt oranının %84 seviyelerinde iken, kalan aygıt oranının %16 seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda; kademeli pozlama süresi ile durum D’de aygıt üretimine devam edilmiştir. Tezin deneysel çalışmalar kapsamında referans alınan aygıtlar kademeli pozlama süresi kullanılarak durum D kategorisinde üretilmiştir ve dönü ölçer sensörlerine bu tipteki aygıtlar yerleştirilmiştir. Bu bölümde kullanılan epoksi tipi malzemelerin özel bir sertleştirme ya da pozlama parametresi bulunmamaktadır. Nitekim; çok sayıda ve aynı koşullarda üretilen aygıtların benzer seviyede isterleri sağlaması için belirli kalite kontrol şartlarını sağlaması gerekmektedir. Bu gereksinim, üretilen entegre optik aygıtlar için ikinci bölümde

bahsedildiği gibi birtakım Ar-Ge çalışmaları gerçekleştirilmesini gerekli kılmıştır. Literatür taramalarında da benzer seviyede bir araştırmaya rastlanmadığı için, bu açıktan faydalanılarak olabildiğince detaylı bilgi aktarımı yapılmaya çalışılmış ve tezi inceleyen okuyucuya rehber niteliğinde olması amaçlanmıştır. Bu bölümde anlatılan fiber bütünleme çalışmalarına alternatif olabilecek diğer bir yöntem ise; çıkış koldaki çiftli fiberin tek bir seferde aygıtı yapıştırılması yerine iki ayrı fiber taşıyıcı içinde iki ayrı fiberin aygıtı yapıştırılması olarak önerilebilir. Çıkıştaki birbirinden bağımsız bu yapıştırma işlemi; her ne kadar entegre optik aygıt dünyasında bilinen ve kabul görmüş bir teknoloji olsa da, ayrı yapıştırma işlemlerinden kaynaklı kolların bağımsız olarak kontrol edilmesi daha zor ve zaman alan bir uygulamadır. Çok sayıda aygıt üretimi için tercih edilen bir yöntem olarak değerlendirilmemiştir. Buna ek olarak; fiber taşıyıcılar ticari olarak tedarik edildiği için, üretici firmanın üretim yöntemleri arasında bu tip bir üretim operasyonu bulunmamaktadır. Nitekim; bir sonraki bölümde bahsedileceği üzere; fiber taşıyıcıların mekanik açıdan çoğu analizlerdeki etkisi sabit kabul edilmiş ve Ar-Ge çalışmalarına dahil edilmemiştir. Bu nedenle; çiftli fiber taşıyıcısı ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde anlatılan analiz ve karakterizasyonlar; yıllardır kazanılan bilgi birikimi ve teknik tecrübelerin bir çıktısıdır. Ayrıca; yer aldığımız projelerde prototip düzeyinden endüstriyel seviyede üretime doğru giden yolda çok kapsamlı veri tabanı oluşturulmasına zemin hazırlamıştır.

Üçüncü bölümde; üretilen entegre optik aygıtların ısısal yüklemeler altındaki davranışı modellemeler ile anlatılmıştır. Simülasyon çalışmaları COMSOL yazılımı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Durum A, B, C, D ve E olarak adlandırılan 5 farklı kategori için analiz çalışmaları yürütülmüştür. Literatür düzeyinde yapılan araştırmalarda; bu bölümde anlatıldığı gibi kapsamlı çalışmalara rastlanmamıştır. Bu sebeple; fiber optik aygıtların analiz süreçlerine destek olacak teorik düzeydeki simülasyon çalışmalarının oldukça fayda sağlayacağı öngörülmektedir. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında; özellikle örgü analizine geniş bir yer ayrılmıştır. Modellenen üç boyutlu geometri, farklı boyutlardaki birçok parçanın birleşiminden meydana geldiği için; herbir parçanın örgü tanımlaması farklıdır. Yazılımı öğrenme ve aktif bir şekilde kullanıma alma aşamasında kazanılan deneyim sayesinde, doğru bir örgü algoritması oluşturulabilmiştir. Yazım sürecinde; edinilen bu deneyimler çok detaylı bir şekilde ve akıcı dilde araştırmacıya aktarılmıştır. Örgü çözümlemesinde en kritik etkenin örgü eleman sayısı ve örgü tipi olduğu vurgulanmış olup, işlem sırasının önemli olduğuna değinilmiştir. Simülasyon hatalarını en aza indirmek amacıyla uygun örgü parametrelerinin seçimi çok hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalar zamana bağlı simülasyonlar kullanılarak yürütülmüştür. Doğal olarak; bu tezi literatürdeki diğer standart çalışmalardan ayıran başka bir özellik de zamana bağlı sıcaklık değişimleri altında aygıt üzerinde indüklenen gerilim analizinin yapılabilmesidir. Grafiksel değerlendirmeler sonucunda; durum D ve E'nin yüksek ve düşük sıcaklık bölgelerinde en az gerilime maruz kalan iki geometrik yapı olduğu anlaşılmıştır. Bölüm içerisinde bu konu ile ilgili detaylı açıklamalara yer verilmiştir. Model parçalarını birbirine yapıştırmak için kullanılan epoksi malzemesi üzerinde biriken gerilim dağılımının $T=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki davranışı da incelenmiştir. Aygıt geometrisinde birden fazla parçanın bulunması, serbestlik derecesi sayısını artırmakta ve olası termomekanik gerilim etkilerinin irdelenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu analizde; bölge 1'in en yüksek gerilim seviyesine sahip olması, aygıt ile fiber taşıyıcı arasındaki birleşme bölgesindeki etkileşimin dikkate alınması gerektiği gerçeğini ortaya koymaktadır. Nitekim; literatür araştırmalarında bu arayüz bölgesindeki etkileşimin önem arz ettiği vurgulanmıştır. Üretilen aygıtlar askeri çalışma standartlarında çalıştırılacağı için uç sıcaklık noktalarındaki performans analizi yapılmıştır. Bölge 1; sıcaklık değişimleri altında en yüksek gerilim birikmesine sahip olduğu için, bölge 2 ve bölge 3 dikkate alınmayarak, sadece bölge 1 için uç sıcaklık değerlerinde irdeleme yapılmıştır. Sıcaklık en düşük ve en yüksek seviyeye ulaştığında; gerilim seviyelerinde artış meydana geldiği aşıkardır. Bu durum; sıcaklık artış ve azalışının mekanik dayanıma etki ettiğini göstermiştir. Durum E deneysel olarak üretilmediği için; durum A, B, C ve D için karşılaştırmalı analiz yapılması uygun görülmüştür. Bu durumda; durum D için bölge 1 üzerinde en düşük seviyede gerilim indüklendiği gözlenmiştir. Dalgakılavuzu simülasyonlarında tüm durumlar dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Geometrik duruma bağlı olarak bölge 1'e ilişkin gerçekleştirilen simülasyonlar ile karşılaştırma yapıldığında, durum E haricindeki diğer durumlar için bölge 1 üzerinde indüklenen maksimum ve minimum gerilim seviyeleri arasındaki fark %50 bandında kalmaktadır. Dalgakılavuzu analizinde ise; benzer şekilde maksimum ve minimum gerilim düzeyleri dikkate alındığında %5-%6 civarında fark hesaplanmıştır. Bu sonuçlar; aygıt ile fiber taşıyıcı arayüzündeki epoksi bölgesinin termomekanik gerilim faktörü olarak nispeten çok daha baskın olduğunu ortaya koymaktadır ve ayrıca dalgakılavuzu üzerindeki gerilimin tek başına bir deformasyon faktörü olarak ele alınamayacağını göstermektedir. Bu bölümde; dalgakılavuzu nüvesi merkezindeki ısısal ve mekanik değişimlerin optik geçirgenlik üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Güç akışı adı altında yapılan bu analizlerde, hem sıcaklık hem de gerilim etkisi ayrı ayrı irdelenmiştir. Oda sıcaklığında nüve merkezinde homojen bir dağılım elde edilirken, sıcaklık değişimi altında homojen yapının bozulduğu

tespit edilmiştir. Gerilim etkisi ise ilgili denklemlere ayrıca eklenerek, optik iletim mod şeklinin yapısında meydana gelen değişimle değerlendirilmiştir. Sonuç olarak; ısısal ve mekanik etkilerin dalgakılavuzu merkezinde ayrı mekanizmalar olarak güç akışını değiştirdiği saptanmıştır. Simülasyon çalışmaları ile genel olarak etkin gerilim mekanizmaları belirlenmiştir. COMSOL yerine ANSYS ya da SolidWorks yazılımı da tercih edilebilirdi. Ancak; örgü tanımlama ve arayüz modüllerini kullanma kabiliyeti COMSOL programında daha avantajlı olduğu için tercih sebebi olarak görülmektedir. Teorik modelleme çalışmalarını desteklemek için, bölüm içerisinde oda sıcaklığında gerçekleştirilen bazı deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Durum D kategorisinde üretilen aygıtların giriş ve çıkış kol geçirgenlik değerlerinin ortalama %5 kadar daha yüksek olması, ısısal gerilim analizlerindeki sonuçları destekler niteliktedir. Durum D’de üretilen aygıtlarda daha az gerilim indüklendiği için, optik olarak verimin daha yüksek olması beklenen bir durumdur. Proje isteri kapsamında; %40 geçirgenlik eşik limitini sağlayan aygıt sayısı istatistiksel olarak analiz edildiğinde; nihai geçirgenliği %40’ın üstünde olan aygıt sayısının durum D için daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Uzun yıllardır üretilen aygıt sayısı; A, B ve C için toplam 414 iken, D kategorisi için 119’dur. Oransal olarak; %40 üstü için D’ye ait aygıtların oranı %73,9 iken, A, B ve C toplamı için %34 bandında kalmıştır. Bu bölümdeki temel amaç; her ne kadar ısısal yüklemeler altında aygıtın tepkisini irdelemek olsa da, paralelde yürütülen oda sıcaklığı analizleri sonuçları destekleyici nitelikte olmuştur.

Dördüncü bölümde; üretilen entegre optik aygıtların paketlenme süreçlerine yer verilmiştir. Aygıtlar son ürün haline getirildiği için; uygulanan işlemlerin çok hassas ve ince işçilikle yapılması önem taşımaktadır. Paketleme aşamasında meydana gelebilecek sorunları en aza indirmek son derece önemlidir. Özellikle mekanik açıdan meydana gelebilecek sorunlar, aygıtların sensör içerisindeki performansını etkilemektedir. Bu kapsamda; tip 1 ve tip 2 işlemleri sırasıyla farklı aygıtlara uygulanarak sıcaklığa bağlı Ar-Ge deneyleri gerçekleştirilmiştir. Performans testlerinde; tip 1 uygulamasının daha kararlı olduğu ve buna bağlı olarak güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak sağladığı gözlemlenmiştir. Tip 1 işlemi; etkin sonuçlar ortaya çıkardığı için, 5 farklı aygıt bu işleme tabi tutulmuştur. Sıcaklık döngü analizlerinde; test sayısı arttıkça grafikte dalgalanmaların ve bölgesel piklerin en aza indirgendiği saptanmıştır. Bu çalışmalarda silikon bazlı esnek tüp yerine sert ve akrilik bazlı koruma kalkanı veya yapıştırıcı olarak sert epoksi kullanılabilirdi. Ancak bu tip bir varsayım; titreşim veya sıcaklık testlerinde dayanımı azaltacağı için aygıt performansını olumsuz ölçüde etkileyecek ve proje koşullarını sağlayan ürün adedinin düşmesine yol açacaktı. Bu

bölümde anlatılan teknik çalışmalar son ürüne yönelik çalışmalar olduğu için; kararlılık seviyesini test etmek çok uzun zaman alabilmektedir. Aygıtlar her ne kadar çoğu kez bağımsız testlerde performans kaybı yaşamasa dahi, dönü ölçer sistemi içerisine yerleştirildiklerinde test karakteristikleri ve davranışları çok farklı olabilmektedir. Bu nedenle; bütünsel açıdan bakıldığında çoğu kez sistemin çalışma performansı aygıtın çalışma performansı ile doğru orantılıdır. Bu sebeple; genellikle aylar mertebesinde süren uzun testlerin ardından gerçekçi ve doğru sonuçlara ulaşılmaktadır.

Beşinci bölümde; açık döngü sistemde gerçekleştirilen elektriksel test ve karakterizasyonlara yer verilmiştir. Elektriksel olarak aygıtı çevresel etmenlere karşı korumak, atık ve istenmeyen yabancı maddelerden uzak tutmak gerekmektedir. Koruyucu kaplama malzeme seçiminde farklı bileşimler denenerek bir dizi kontrollü deney gerçekleştirilmiştir. Paketleme çalışmalarında olduğu gibi; sert ve akrilik bazlı bileşimlerin kullanıma uygun olmadığı saptanmıştır. Çünkü; sert malzemeler elektrotlar üzerinde istenmeyen gerilim yoğunluğuna sebep olabilir. Uygulama kolaylığı malzeme seçiminde önemli bir unsurdur. Deneyler sonucunda; silikon bazlı malzemelerin testlerde olumsuz bir etki yaratmadığı ve uzun dönem koruyuculuk sağladığı tespit edilmiştir. SiO_2 , Si_3N_4 gibi bileşimlerin kimyasal yöntemler kullanılarak aygıt yüzeyine kaplanması ile reset sinyalinde pik ve sönümlenme problemi meydana gelmiştir. Buna ek olarak; kimyasal tepkime gerektiği için uygulanan işlem nispeten daha uzun ve maliyetli olmaktadır. Fiziksel olarak kaplama yapılan aygıtlarda %90 seviyesinde olumlu geri dönüş elde edilmiştir. PV ve PY sınıflandırmasına yönelik olarak gerçekleştirilen reset sinyal analizinde, sistem elektroniğini kullanmak haricinde kapasitans ve empedans ölçümüne yönelik çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Ancak yapılan incelemelerde çok etkin, doğru, güvenilir ve tatmin edici sonuçlar elde edilemediği saptanmıştır. Bu sebeple testlerin açık döngü test düzeneğinde gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Bu yöntem ile oransal olarak %90'ın üzerinde güvenilir sonuçlar elde edilmiştir.

Altıncı bölümde; ısısal yaşlandırmanın önemine vurgu yapılmıştır. Kapalı döngü dönü ölçer sistem yapısı anlatılarak teorik bazı bilgilendirmeler yapılmıştır. Bu bölümde; LiNbO_3 tabanlı aygıtların sıcaklık duyarlılığı sebebiyle yaşlandırma işleminin önemi vurgulanmıştır. Sistem çıkışında gözlenen dönüdeki eğimin giderilmesi, sensör bileşeninin düzgün çalışması açısından son derece önemlidir. Aynı aygıt defalarca teste maruz bırakılarak gözlenen

değişimler irdelenmiştir ve yaklaşık 10 kat düzelme meydana geldiği saptanmıştır. Bunun sebebi; aygıt üzerinde indüklenen gerilim birikmesinin salınımı olarak yorumlanabilir.

Yedinci ve son bölümde; optik yol eşitleme yöntemine dayalı interferometre düzeneğinde gerçekleştirilen kutuplanma analizlerine yer verilmiştir. Bu bölümde anlatılan çalışmalara son dönemlerde başlanmıştır ve tezin yazıldığı dönemde halen Ar-Ge aşamasındadır. Ancak; araştırmacının ufkunu genişletmesi açısından, geline nokta kadar gerçekleştirilen çalışmalar aktarılmıştır. Bu tip bir düzeneğin kurulması çok kolay olmamakla beraber, üretilen aygıtların kutuplanma seviyelerinin ölçülmesine duyulan ihtiyaç birtakım deneylerin yapılmasına zemin hazırlamıştır. Düzenek ilk olarak serbest uzayda kurulmuştur. Ancak bu şekilde kurulan düzeneğin çevresel ses ve hareketlerden etkilendiği farkedilmiştir, ayrıca karakterizasyon sonuçlarında istenmeyen gürültü problemleri ile karşı karşıya kalınmıştır. Meydana gelen sorunlardan ötürü serbest uzayda kurulan düzenek fiber ortamına taşınmıştır. Işık ışınları fiber içerisinden daha güvenli ve kayıpsız bir şekilde ilerlediği için bu çalışmada fiber tabanlı interferometre düzeneği tercih edilmiştir. Kutuplanma ve bağlantı noktalarındaki girişim durumlarını analiz ederken birtakım zorluklarla karşılaşmıştır. Hangi pikin hangi bileşene ait olduğu uzun uğraşlar sonucunda belirlenebilmiştir. Deneyler ASE ve SLD ile gerçekleştirilerek sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir. SLD ışık kaynağı kullanıldığında; pik genişliklerinin daraldığı ve gerçek piklerin daha keskin bir şekilde belirdiği söylenebilir. Literatür taramalarında fiber tabanlı MZI düzeneklerine sıkça rastlanmaktadır ve çalışmaların yürütülmesinde oldukça faydalı makaleler referans gösterilmiştir. Bu çalışmanın önemi; fiber taşıyıcı/aygıt arasındaki parazitlenme etkileşimlerini dışarılayarak kristalin kendi kutuplanma değerini belirlemektir.

Sonuç olarak; bu tez kapsamında elde edilen deneysel veriler ve analizlerin, askeri uygulamalarda kullanılan FOD sensörlerinin bir bileşeni olan entegre optik tabanlı aygıtların seri üretim sürecine uygunluğunu test etmek için önemli olduğu kanısına varılmıştır. Önümüzdeki süreçte; sıcaklık testlerinden geçen aygıt sayısının artırılarak ve paketleme sürecinin hızlandırılarak üretim veriminin iyileştirilmesi temel hedefler arasında yer almaktadır.



KAYNAKLAR

1. Bass, M., and Van Stryland, E. W. *Handbook Of Optics Volume II Devices, Measurements and Properties* (Second Edition). Newyork:McGraw-Hill.
2. Yao, J., Li, K., Li, B., Wang, C., Kan, C., She, X., and Shu, X. (2018). Study of wavelength temperature stability of multifunctional integrated optical chips applied on fiber optic gyroscopes. *Journal Of Lightwave Technology*, 36(23), 5528-5535.
3. Chong, K., Choi, W., and Chong, K. (2016). Analysis of dead zone sources in a closed-loop fiber optic gyroscope. *Applied Optics*, 55(1), 165-170.
4. Sireesha, T., and Krishna, M. K. (2016). Comparative assessment on linearity test based $V_{2\pi}$ and $V_{\pi/2}$ voltage variations of closed loop IFOG. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 6(2), 583-595.
5. Bi, R., She, X., Huang, T., and Shu, X. (2019). Temperature modeling of modulation phase error in the integrated optical chip for closed-loop interferometric fiber optic gyroscope. *Optical Engineering*, 58(6), 1-6.
6. Sun, F., Wang, L., and Wang, G. (2010). Study on the drift of modulated phase in interference fiber optic gyroscope. *Journal Of Computers*, 5(3), 394-400.
7. Nasiri-Avanaki, M. R., Soleimani, V., and Mazrae-Khoshki, R. (2012). Comparative assessment on the performance of open-loop and closed-loop IFOGs. *Optics And Photonics Journal*, 2(01), 17-29.
8. Avanaki, and Nasiri, M. R. (2006, October). *Full progress of digital signal processing in open loop-IFOG*. Paper presented at Asian Optical Fiber Communication & Optoelectronic Exposition & Conference, Shanghai, China.
9. Shang, K., Lei, M., Xiang, Q., Na, Y., Zhang, L., and Yu, H. (2020). Near-navigation-grade interferometric fiber optic gyroscope with an integrated optical chip. *Chinese Optics Letters*, 18(12), 1-4.
10. Shang, K., Lei, M., Xiang, Q., Na, Y., and Zhang, L. (2020). Tactical-grade interferometric fiber optic gyroscope based on an integrated optical chip. *Optics Communications*, 485, 1-4.
11. Korkishko, Y. N., Fedorov, V. A., Kostritskii, S. M., Alkaev, A. N., Paderin, E. M., Maslennikov, E. I., and Apraksin, D. V. (2003, April). *Multifunctional integrated optical chip for fiber optical gyroscope fabricated by high-temperature proton exchange*. Paper presented at SPIE Integrated Optical Devices: Fabrication And Testing, Bruges, Belgium.
12. Kuneva, M., Tonchev, S., and Karakoleva, E. (2019, February). *Sensing elements based on PE technology in LiNbO₃-a short overview*. Paper presented at AIP Conference, Sofya, Bulgaristan.

13. Özdemir, M. (2012). *Design And Analysis Of An Open Loop Fiber-Optic Gyroscope*. Master of Science Thesis, Middle East Technical University The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 1-74.
14. Karna, S., and Yeates, A. *Nonlinear Optical Materials: Theory and Modeling*. Washington, DC: American Chemical Society, 2–3.
15. Mohamedelhassan, A. (2012). *Fabrication Of Ridge Waveguides In Lithium Niobate*, Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology KTH, Sweden, 1-58.
16. Yang, J., Yuan, Y., Zhou, A., Cai, J., Li, C., and Yan, D. (2014). Full evaluation of polarization characteristics of multifunctional integrated optic chip with high accuracy. *Journal of Lightwave Technology*, 32(22), 3641-3650.
17. Liu, J., Zhang, C., Zheng, Y., Song, J., Gao, F., and Yang, D. (2019). Suppression of nonlinear residual intensity modulation in multifunction integrated optic circuit for fiber-optic gyroscopes. *Journal of Lightwave Technology*, 38(6), 1572-1579.
18. Tripathi, U. S., Dixit, N., Kaul, A. N., and Gupta, A. K. Multifunction integrated optic Chip for FOG. *Photonics Division, Instruments Research & Development Establishment*, 2(3).
19. Ponomarev, R. S., Shevtsov, D. I., and Karnaushkin, P. V. (2019). ‘Shutdown’ of the proton exchange channel waveguide in the phase modulator under the influence of the pyroelectric effect. *Applied Sciences*, 9(21), 1-10.
20. Mottet, A., Jillard, S., Hauden, J., Grossard, N., Porte, H., Tchahame, J., Veyrié, D., and Gilard, O. (2018, October). *Packaging improvement of LiNbO₃ modulators and space evaluation results*. Paper presented at International Conference on Space Optics, Chania, Greece.
21. Wang, Y., Ren, L., Xu, J., Liang, J., Kang, M., Ren, K., and Shi, N. (2014). The compensation of Y waveguide temperature drifts in FOG with the thermal resistor. *Advanced Materials Research*, 924, 336-342.
22. Yu, Z., Yang, J., Yuan, Y., Zhang, H., Tian, S., Lu, X., Zhang, X., Jiang, F., Liu, Z., Zhang, J., and Yuan, L. (2019). Distributed measurement of polarization characteristics for a multifunctional integrated optical chip: a review. *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 68(5), 1543-1553.
23. Dönertaş, S., Gökkavas, M., Özbay, E., and Öz Orhan, E. (2021). Case study for thermo mechanical performance of an integrated optic device via equation-based modelling. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering And Innovation*, 8(1), 135-145.
24. Wooten, E. L., Kissa, K. M., Yi-Yan, A., Murphy, J. E., Lafaw, D. A., Hallemeier, P. F., Maack, D., Attanasio, D. V., Fritz, D. J., McBrien, G. J., and Bossi, D. E. (2000). A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems. *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics*, 6(1), 69-82.
25. Li, Y., Lan, T., Yang, D., Xiang, M., Dai, J., Li, C., and Wang, Z. (2020). Research of selective etching in LiNbO₃ using proton-exchanged wet etching technique. *Materials Research Express*, 7, 1-10.

26. Lenner, M., Yang, L., Frank, A. and Bohnert, K. (2017). Long-term reliability of fiber-optic sensor components in harsh industrial environments. *Advanced Photonics Congress*.
27. Suchoski, P. G., Jr., and Boivin, G. R. (1992). Reliability and accelerated aging of LiNbO₃ integrated optic fiber gyro circuits. *Fiber Optic and Laser Sensors X*, 1795, 38-47.
28. Dönertaş, S. (2014). *LiNbO₃ Tabanlı Şiddet Kipleycisi Tasarımı, Üretimi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-108.
29. Alvarado, R., Bartlett, M., Beski, R., Isaza, S., and Li, C., (2013). *Analysis Of The Thermo-Mechanical Reliability Of An SMT Attachment*. Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 1-95.
30. Carmelo, B., Luigi, M. G., Giuseppe, P., and Giuliano, C. (2015, May). *Thermo-mechanical analysis of a multi-chip power module*. Paper presented at the Conference on Thermal Energy Systems: Production, Storage, Utilization and the Environment, Napoli, Italy.
31. İnternet: Griesmer, A. (2013). Sweep your meshes with ease. Web: <https://www.comsol.com>, Son Erişim Tarihi: 23.08.2020.
32. İnternet: Frei, W. (2013). Meshing your geometry: when to use the various element types. Web: <https://www.comsol.com/blogs/meshing-your-geometry-various-element-types/>, Son Erişim Tarihi: 23.08.2020.
33. İnternet: Vyshenska, K. (2018). How to provide structural stability. Web: <https://www.comsol.com/blogs/>, Son Erişim Tarihi: 22.07.2021.
34. Zhang, G. (2012, April). *Orientation of piezoelectric crystals and acoustic wave propagation*. Paper presented at COMSOL conference, Boston.
35. Filatov, Y. V., Kukaev, A. S., Shalymov, E. V., and Venediktov, V. Y. (2016, April). *Multiphysical simulations of passive ring cavities*. Paper presented at SPIE Photonics Europe, Brussels, Belgium.
36. Stress-Optical Effects in a Photonic Waveguide. COMSOL Manual User-Guide, pp. 1–20.
37. Huang, M. (2003). Stress effects on the performance of optical waveguides. *International Journal of Solids and Structures*. 40(7), 1615–1632.
38. Serebreni, M., Wilcoxon, R., Hillman, D., Blattau, N., and Hillman, C. (2017, January). *The effect of improper conformal coating on SnPb and Pb-free BGA solder joints during thermal cycling: experiments and modeling*. Paper presented at 33rd SEMI-THERM Symposium, California, USA.
39. Mathew, S., Osterman, M., Shibutani, T., Yu, Q., and Pecht, M. (2007, August). *Tin whiskers: how to mitigate and manage the risks*. Paper presented at International Symposium on High Density Packaging and Microsystem Integration, United States.

40. Wang, W., and Wang, J. (2010). Study of modulation phase drift in an interferometric fiber optic gyroscope. *Optical Engineering*, 49(11), 1-5.
41. İnternet: Advanced Navigation. (2021). Web: <https://www.advancednavigation.com>, Son Erişim Tarihi: 17.07.2021.
42. Ulrich, R. (1980). Fiber-optic rotation sensing with low drift. *Optics Letters*, 5(5), 173-175.
43. İnternet: PXI Systems. (2021). Web: <https://www.ni.com>, Son Erişim Tarihi: 16.01.2021.
44. İnternet: C3 teknoloji. (2020). Web: <http://www.c3teknoloji.com/Eklenti/tds-dc-1-2577-iv-conformal-coating-1pdfc4ca.pdf?1>, Son Erişim Tarihi: 17.01.2021.
45. İnternet: Norland optical adhesive 61. (2020). Web: <https://www.norlandprod.com>, Son Erişim Tarihi: 18.01.2021.
46. İnternet: Techspray. (2020). Web: <https://www.techspray.com/conformal-coating>, Son Erişim Tarihi: 20.02.2021.
47. Lefèvre, H. C. (2004). *Time Transience-Related Nonreciprocal Effects In The Fiber-Optic Gyroscope*. (Second Edition). London, U.K.: Artech House, 95–106.
48. Dranitsyna, E. V., Egorov, D. A., Untilov, A. A., Deineka, G. B., Sharkov, I. A., and Deineka, I. G. (2013). Reducing the effect of temperature variations on FOG output signal. *Gyroscopy and Navigation*. 4(2), 92-98.
49. Jin, J., Liu, J., Huang, Y., Kong, L., and Wang, Z. (2016). A reliable and efficient method for temperature sensing in interferometric fiber-optic gyro. *IEEE Sensors Journal*, 16(11), 4192-4197.
50. Sakai, S., Fukushima, Y., Ohno, A., and Saito, H. (2006, October). *In-orbit performance evaluation of temperature controlled small fiber optical gyro on microsatellite 'REIMEI'*. Paper presented at Optical Fiber Sensors, Cancun, Mexico.
51. Zook, J. D., Chen, D., and Otto, G. N. (1967). Temperature dependence and model of the electro-optic effect in LiNbO₃. *Applied Physics Letters*, 11(159), 159-161.
52. Li, C., Yuan, Y., Yang, J., Yu, Z., Peng, F., Wu, B., Zhang, Y., Yuan, L., Hua, Y., and Shu, P. (2016). Inconsistency measurement between two branches of LiNbO₃ integrated optic Y-junction. *Elsevier, Optics Communications*, 369, 152-158.
53. İnternet: Superlumdiodes. (2021). Web: <https://www.superlumdiodes.com>, Son Erişim Tarihi: 10.08.2021.
54. Absalan, H., Golzan, M. M., and Milani, N. M. (2020). Influence of internal electric field on the spectral characteristics of blue GaN-based superluminescent light-emitting diodes. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 44, 1259-1268.

55. Chen, X., Jiang, L., Yang, M., Yang, J., and Shu, X. (2019, June). *Research on the mean-wavelength drift mechanism of SLD light source in FOG*. Paper presented at 3rd International Conference on Fluid Mechanics and Industrial Applications, Taiyun, China.







GAZİ GELECEKTİR..