

**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**FBG TABANLI SICAKLIK KOMPANZE GERİNİM SENSÖRÜNÜN ÜRETİMİ,  
PAKETLENMESİ VE GERÇEK ZAMANLI ENDÜSTRİYEL UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mehmet Mücahit ARSLAN**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**OCAK 2022**

**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**FBG TABANLI SICAKLIK KOMPANZE GERİNİM SENSÖRÜNÜN ÜRETİMİ,  
PAKETLENMESİ VE GERÇEK ZAMANLI ENDÜSTRİYEL UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mehmet Mücahit ARSLAN  
(181278034009)  
ORCID:**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Gökay BAYRAK**

**ORCID:**

**OCAK 2022**



BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 181278034009 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mehmet Mücahit ARSLAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “FBG Tabanlı Sıcaklık Kompanze Gerinim Sensörünün Üretimi, Paketlenmesi ve Gerçek Zamanlı Endüstriyel Uygulaması” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**     **Doç. Dr. Gökay BAYRAK**     .....

Bursa Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**     **Doç. Dr. Haydar ÖZKAN**     .....

Bursa Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KÜÇÜKER**     .....

Sakarya Üniversitesi

**Teslim Tarihi**     :

**Savunma Tarihi**   : 26.01.2022



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin aboneliği olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

## İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Mehmet Mücahit ARSLAN

İmzası :

X X X X

**Kadınlar insandır, biz insanoğlu.**  
**Neşet ERTAŞ**

*Sevgili anneme,*

## ÖNSÖZ

Öncelikle tez çalışmam boyunca her türlü desteği veren ve yönlendirmeleri yapan tez danışmanım Doç. Dr. Gökay BAYRAK'a ve bu süreçte yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Alper YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım. Tasarım, üretim ve test sürecinde bütün enerjisi ile yanımda olan arkadaşlarım Ümit BAYRAM, Baran AY, Adem TEKME, Dilara UYANIKLAR ve Olcay AYDIN'a da ayrıca teşekkür ederim. Süreç boyunca tüm laboratuvar imkanları ile destek olan EON LASER firmasına ve tez aşamasında tüm motivasyon ve imkanları ile şahsıma desteğini esirgemeyen Türk Havacılık firması sistem test bölümündeki ekip arkadaşlarım İsa SEZGİN, Ramazan GÜL ve Onur BÖKE'ye teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak, her zorlukta bana destek olup başaracağıma inandıran değerli aileme ve eşim Fatma ARSLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Ocak 2022

Mehmet Mücahit ARSLAN  
(Telekomünikasyon Mühendisi)

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
KISALTMALAR .....	ix
SEMBOLLER .....	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY .....	xvi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. METODOLOJİ.....</b>	<b>4</b>
2.1 FBG Sensör Üretim Teknikleri .....	4
2.2 FBG Sensör Çalışma Prensibi .....	7
2.3 FBG Sensör Kaplama Tipleri.....	11
2.4 Sıcaklık Baskılama (Kompanzasyon) Yöntemleri .....	13
<b>3. FBG TABANLI SICAKLIK KOMPANZE GERİNİM SENSÖRÜ ÜRETİMİ.....</b>	<b>15</b>
3.1 Sıcaklık Kompanze FBG Paket Yapısının Tasarımı .....	15
3.2 Paket Yapısının ANSYS Programı İle Çekme Testi İşlemi.....	19
3.3 FBG Paket Yapısının Üretimi .....	22
3.4 FBG Sensör Yapısını Sıcaklık Kompanzasyon Paketine Sabitleme.....	24
<b>4. GERİNİM GEVŞEME TESTLERİ.....</b>	<b>37</b>
4.1 Yüksüz Gerinim Gevşeme Testi (Strain Relief Creep Test).....	37
4.2 Yük Altında Gerinim Gevşeme Testi.....	39
<b>5. SICAKLIK KOMPANZE FBG PAKET YAPISININ ÇEKME TESTİ.....</b>	<b>41</b>
<b>6. HASSASİYET HESAPLAMALARI .....</b>	<b>48</b>
<b>7. VERİ TOPLAMA YAZILIMI .....</b>	<b>51</b>
<b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>57</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>58</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>61</b>

## **KISALTMALAR**

**FBG** : Fiber Bragg Grating

**Hz** : Hertz

**kHz** : Kilo Hertz

**Km** : Kilometre

**mm** : Milimetre

**nm** : Nanometre

**n<sub>eff</sub>** : Etkin kırıcılık indisi

**pm** : Pikometre

**$\Delta T$**  : Toplam sıcaklık değişimi

**T** : Sıcaklık

**$\lambda_B$**  : Bragg dalga boyu

**$\alpha$**  : Silikanın termal genleşme katsayısı

**$\eta$**  : Termo-optik katsayı

**L** : Fiber Bragg ızgaranın toplam uzunluğu

**$\epsilon$**  : Gerinim

**pe** : Fotoelastik etki

**V** : Volt

## **SEMBOLLER**

<b><math>\Theta</math></b> :	Teta
<b>d</b> :	Mesafe
<b><math>\lambda</math></b> :	Lamda
<b><math>\varepsilon</math></b> :	Epsilon
<b><math>\alpha</math></b> :	Alfa
<b><math>\xi</math></b> :	Ksi
<b><math>^{\circ}\text{C}</math></b> :	Santigrat Derece
<b><math>\sigma</math></b> :	Sigma
<b><math>\gamma</math></b> :	Gama
<b><math>\Delta</math></b> :	Delta
<b><math>\zeta</math></b> :	Zeta
<b><math>\mu</math></b> :	Mikro
<b>dB</b> :	Desibel

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Çizelge 1.1:</b> Konvansiyonel sensörler ile FBG sensörün karşılaştırılması.....	2
<b>Çizelge 2.1 :</b> Kütleme materyallerinin kıyaslanması.....	27



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Çekme kulesi ile FBG yazma işlemi gösterimi .....	5
Şekil 2.2: Girişim (interferometrik) yöntem ile FBG yazımı .....	5
Şekil 2.3: Faz maskesi yöntemi ile FBG yazımı.....	6
Şekil 2.4: FBG sensör çalışma prensibi.....	8
Şekil 2.5: Bragg yansıma kuralı.....	8
Şekil 2.6: Kaplama tiplerinin termal genleşme katsayıları.....	11
Şekil 2.7: Poliamid kaplı fiber .....	12
Şekil 3.1: FBG sensörlerde spektral mesafenin baskılanması.....	16
Şekil 3.2: Tasarım paket yapısı (ön yüz) .....	17
Şekil 3.3 Tasarım paket yapısı (arka yüz).....	17
Şekil 3.4: Tasarım paket yapısı teknik çizimi.....	18
Şekil 3.5: Tasarım paketin kemik yapısı üzerine montajı .....	20
Şekil 3.6: Sabitlenmiş destek noktasının konumu .....	20
Şekil 3.7: Çekme testi doğrusallık grafiği .....	21
Şekil 3.8: Tasarım paket yapısı toplam deformasyon sonucu .....	22
Şekil 3.9: Paket yapısının lazer tezgahında kesilmesi .....	23
Şekil 3.10: a) Aparat yan görünüm b) Dik görünüm.....	24
Şekil 3.11: FBG sensör paket yapısı sıcaklık testi düzeneği .....	25
Şekil 3.12: AC L2007 ile sabitlenen sensörlerinin sıcaklık değişimine reaksiyonu .	27
Şekil 3.13: NOA61 ile sabitlenen sensörlerinin sıcaklık değişimine reaksiyonu.....	29
Şekil 3.14: Gen2 ile sabitlenen sensörlerin sıcaklık değişimine reaksiyonu .....	30
Şekil 3.15: 3M 8805 NS ile sabitlenen sensörlerin sıcaklık değişimine reaksiyonu .	31
Şekil 3.16: HBM ile sabitlenen sensörlerin sıcaklık değişimine reaksiyonu.....	32
Şekil 3.17: Sıcaklık değişiminin gerinim ve sıcaklık sensörlerinin farkına etkisi.....	33
Şekil 3.18: Ön gerinim altında sabitlenen FBG sensörlerin sıcaklık reaksiyonu .....	34
Şekil 3.19: Ön gerinim ile sabitlenen FBG sensörlerin fırın sıcaklığı ile ilişkisi .....	35
Şekil 3.20: Veri toplama yazılımı kompanzasyon modlarının gösterimi .....	36

<b>Şekil 4.1:</b> Paket yapısının 2880 dakikalık yüksüz gerinim test sonucu grafiği .....	38
<b>Şekil 4.2:</b> Yüksüz gerinim test grafiği kesiti .....	39
<b>Şekil 4.3:</b> Yük altında gerinim gevşeme test düzeneği.....	39
<b>Şekil 4.4:</b> Yük altında gerinim gevşeme test sonucuna ait grafik.....	40
<b>Şekil 5.1:</b> Shimadzu AGS-X 250kN basma-çekme sistemi .....	41
<b>Şekil 5.2:</b> Numune paket yapısının kopma noktasını gösteren yazılım görüntüsü....	42
<b>Şekil 5.3:</b> Bir numaralı paketinin elastik deformasyon noktasını gösteren grafik.....	43
<b>Şekil 5.4:</b> İki numaralı sensör paketinin dalga boyu kayması .....	44
<b>Şekil 5.5:</b> İki numaralı paketinin elastik deformasyon noktasını gösteren grafik .....	44
<b>Şekil 5.6:</b> Üç numaralı sensör paketinin dalga boyu kayması.....	45
<b>Şekil 5.7:</b> Üç numaralı paketinin elastik deformasyon noktasını gösteren grafik .....	46
<b>Şekil 5.8:</b> Dört numaralı sensör paketinin dalga boyu kayması .....	47
<b>Şekil 5.9:</b> Dört numaralı paketinin elastik deformasyon noktasını gösteren grafik ..	47
<b>Şekil 6.1:</b> Hassasiyet hesaplamasında kullanılan MATLAB kodu.....	48
<b>Şekil 6.2:</b> Tasarlanan sensör paketinin dayanım noktalarını gösteren eğri .....	49
<b>Şekil 7.1:</b> LabVIEW ile hazırlanan veri toplama yazılımı raporlama algoritması ....	51
<b>Şekil 7.2:</b> LabVIEW TCP/IP protokolü ile sorgulama cihazına bağlanma .....	52
<b>Şekil 7.3:</b> Geçici bellek sıfırlama ve yeni kayıt dosyası oluşturma algoritması.....	53
<b>Şekil 7.4:</b> Veri toplama yazılımının dosya kaydetme çıktıları .....	54
<b>Şekil 7.5:</b> Veri kaydı için kullanılan shift register yöntemi.....	54
<b>Şekil 7.6:</b> Toplanan verilerin yazılım üzerinden kaydedilme yöntemi.....	56

# FBG TABANLI SICAKLIK KOMPANZE GERİNİM SENSÖRÜNÜN ÜRETİMİ, PAKETLENMESİ VE GERÇEK ZAMANLI ENDÜSTRİYEL UYGULAMASI

## ÖZET

Fiber Bragg ızgara (Fiber Bragg Grating=FBG) sensörler yeni nesil sensör tiplerinden bir tanesi olarak literatürde yerini almış ve kullanımının son yıllarda ivmeli bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Fiber optik tabanlı olan bu sensörler rakipleri ile mukayese edildiğinde ultra hafif yapısı, radyo frekans ve elektromanyetik sinyal duyarsızlığı, kompozit yapıların içerisine gömülebilme ve çoklu sayılardaki sensör yapılarını tek bir fiber hattı üzerinde barındırabilme gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Günümüzde kendisine birçok farklı uygulama alanı edinebilmiş olan FBG sensörler, savunma sanayinde, rüzgar türbinlerinde, sinyalizasyon sistemlerinde ve yapısal sağlık izleme sistemlerinde alt yapı elemanı olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda, her ne kadar statik ölçüm parametreleri olarak adlandırılan gerinim ve sıcaklık ölçümü için kullanılıyor olsalar da, amaca uygun üretim şekilleri ve paket yapıları kullanıldığında bu sensörler titreşim ve ivme gibi dinamik ölçüm parametrelerin takibinde de kullanılmaktadır. Öte yandan, FBG sensörün yazılı olduğu fiber optik kablonun uç kısmına yerleştirilen adaptörler vasıtası ile gerinim, sıcaklık, titreşim ve ivme gibi parametreler tek bir kanal üzerinden takip edilebildiğinden, literatürde bu sensörlerin hibrit ölçüm kombinasyonları ile de sık sık karşılaşılmaktadır. FBG sensörlerin çıktılarının takip edilmesi ve yorumlanmasını sağlayan sorgulama sistemleri (interrogator) genel olarak tünellenebilir bir mod özelliğine sahip olmadığından, statik ve dinamik ölçüm parametrelerinin ayrı ayrı irdelenmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda, mevcut çalışma çerçevesinde öncelikli olarak 5kHz'lik bir sorgulama ünitesi modülü kullanılmış ve daha sonra statik ölçümlerdeki değişikliklerin yakın gözlemi için 2Hz'lik sorgulama ünitesi çalışmaya dahil edilerek tasarımı yapılan sensör yapısının çıktıları doğrulanmıştır.

Fiber optik kablonun çekirdek kısmında meydana getirilen kırıcılık indis modülasyonu ile üretimi gerçekleştirilen bu sensör yapıları en ufak fiziki değişikliklere dahi cevap verebilecek kapasitededir. Bu bağlamda, çevre şartlarındaki değişimlerden de oldukça etkilenebilen FBG sensör yapılarının uzun süreli ve devamlı kullanımı için bazı fiziki önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu çalışmada, bahsi geçen önlemler arasında en çok kabul gören yaklaşımlardan biri olan FBG sensör yapısının paketlenme süreci göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaç doğrultusunda, FBG sensör yapılarının ortamdaki ani ve süre gelen sıcaklık değişiminden etkilenmemesi için sıcaklık kompanzasyonunun önünü açan bir paket yapısı tasarlanmış, üretilmiş ve test edilerek kullanılabilirliği teyit edilmiştir. Bunun yanısıra, literatürde karşılaşılan FBG sensörlerin maksimum gerinim dayanım noktaları  $3500\mu\epsilon$  değerlerinde iken tasarlanan bu paket yapısı ile FBG sensörlerin dayanımı  $15000\mu\epsilon$  değerinin üzerine çıkartılmıştır. Bu sayede, FBG sensörlerin zorlu çevre şartlarında kullanımının yaygınlaşmasının da önü açılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Fiber Bragg ızgara, FBG sensörler, FBG sensör küme (array) yapısı, Sıcaklık kompanzasyonu, Sıcaklık kompanze gerinim ölçümü

# **DESIGNING, MANUFACTURING AND IMPLEMENTING REAL-TIME INDUSTRIAL APPLICATION OF TEMPERATURE COMPENSATED FBG BASED STRAIN SENSOR**

## **SUMMARY**

Fiber Bragg Gratings (FBG) sensors have been considered as one of the novel sensing structures. At this point, investigations showed that usage of the corresponding sensors have been dramatically increased in the last decades. On the other hand it is worth to mention that, FBG sensors as compared to the conventional sensors seen in the literature have great advantages such as being ultra light sensing structures, immunity to RF and EM signal interferences, allowance to arrayed sensor structures and compatibility with various types of composites. In this manner, FBG sensor structures are mostly used aerospace industry, defence industry, wind turbines, signalization systems and etc. Although, FBG sensors are mostly known as to be used in terms of static measurements, they can also be used for dynamic measurements by simply considering proper manufacturing and sensor packing methods. Fiber Bragg gratings are obtained by inscribing core of the optical fiber and hence resulting refractive index modulation that is following a certain pattern. As an outcome of the manufacturing process, FBG sensors have the capability of meaningful reactions to each and every physical change within the optical fiber. In this context, in order to consider FBG sensors as a sustainable product and operate it in continuous manner, ones need to consider some certain physical coverages within the FBG sensor structure. In this work, one of the mostly reviewed and preferred approaches which is packing FBG sensor structure is considered. In order to achieve mentioned purpose, a sensor package had been designed, manufactured and tested. Moreover, in the literature maximum measurable point of FBG strain sensors are known to be around  $3500\mu\epsilon$  in the main time whilst, obtained results in this work showed that packaged FBG sensors have the capability to measure up to  $15000\mu\epsilon$  while maintaining measurement resolution. By

that, proposed package promises to suitability of packaged FBG sensors in harsh environment applications as well.

Last but not least, designed sensor is suitable for conventional and harsh environment applications, but further investigation and improvement shall be considered to enhance the usage of proposed package in composite based applications such as aerospace, railways and wind turbines.

**Keywords:** Fiber Bragg gratings, FBG sensors, FBG sensor arrays, Temperature compensation, Temperature compensated strain measurement



## 1. GİRİŞ

Endüstride özgün ve yenilikçi sürecin başlaması ile nispeten masif ve hantal olan sistemler, yerini daha hafif, etkin ve verimli olan sistemlere bırakmaya mecbur kalmıştır [1]. Bu bağlamda, günümüz yüksek teknoloji ürünleri arasında kendine ciddi bir pay biçilen sistemlerden biri de Fiber Bragg Izgara (Fiber Bragg Grating=FBG) sensörlerdir. Literatürde FBG sensör olarak nitelendirilen bu sensör tipleri, adından da anlaşılacağı üzere fiber optik kablo tabanlıdır. FBG sensörler, hassas ve esnek yapısı, tek bir fiber optik kablo üzerinde onlarca sensör barındırabilme ve kompozit malzemelerin içerisine gömülebilecek kadar ince olma, elektromanyetik ve radyo frekans dalga girişimlerine karşı duyarsız olma gibi kritik avantajlarından dolayı günümüzde geniş bir uygulama cephesine sahip hale gelmiştir [2,3].

FBG sensörlerin yoğun bir şekilde kullanıldığı uygulama alanlarından bazıları şu şekildedir: Petrol, gaz ve yağ boru hatlarında çatlak ve kaçakçılık tespiti, tarihi yapılarda minimal ve hacimli çatlakların takibi, insansız hava araçlarında kompozit malzemelerin içerisine gömülmek sureti ile malzeme içerisinden gerinim ve sıcaklık verisi toplama [4]. Bunun yanı sıra, tüm dünyada ve ülkemizde kara ve demir yollarında sinyalizasyon ve yol güvenliği amacı ile de kullanılmaktadır.

Sensör yapıları endüstriyel, savunma, yapısal sağlık izleme, medikal ve diğer birçok alanda uzun yıllardan beri kullanılan komponentlerdir. Bu bağlamda, ihtiyaçlar meydana geldikçe ilgililer amaca yönelik özgün sensör yapıları geliştirmeye başlamışlardır. Geçen bu uzun süre neticesinde, birçok sensör çalışma mekanizması ve bu bağlamda sayısız sensör tipi üretilmiştir. Bu sensör tipleri en temelde dinamik ve statik ölçümler yapabilecek şekilde kategorize edilmiştir. Dinamik ölçümler kHz seviyesinde olan yüksek frekans ölçümler olarak değerlendirilirken, statik ölçümler birkaç hertz'ten "100 hertz'e kadar olan düşük frekans ölçümlerdir. Bu bağlamda, statik ölçüm parametrelerinden olan gerinimin ölçümüne olanak sağlayan birkaç temel sensör tipi bulunmaktadır. Bu sensör tiplerinden bazıları şu şekilde sıralanabilir: Doğrusal gerinim ölçer (linear strain gauge), rozet yapılı gerinim ölçerler, piezoelektrik sensörler [5]. Bu sensör tipleri arasında en sık tercih edilenlerin doğrusal

gerinim ölçerler (linear strain gauges) ve piezoelektrik sensörler olduğu şüphesizdir. Bu sensörleri tercih sebebi yapan bazı önemli avantajları bulunmaktadır. Örneğin, vakum altındaki gerinim ölçüm uygulamalarında yüksek hassasiyette çalışabilmektedirler; düşük maliyetlidirler ve nispeten kolay bir şekilde erişilebilir durumdadırlar. Ayrıca, piezoelektrik sensörler korozyona karşı ciddi bir direnç gösterirken, aynı zamanda düşük tepki süresine sahiptirler ve diğer birçok sensör yapısı (kızıl ötesi, pozisyonlama sensörleri vs.) ile gerçek zaman devreleri kullanılarak entegre çalışabilirler [5,6]. Bunun yanı sıra, FBG sensörlere kıyasla dezavantaj olarak görülen birkaç önemli nokta da bulunmaktadır. Örneğin, her ne kadar vakum altındaki uygulamalarda kullanıldığında yüksek hassasiyete sahip olsalar da, sıcaklık değerlerinin değişken olduğu durumlarda gerinim ölçerlerin ve piezoelektrik sensörlerin hassasiyeti ciddi oranda düşer. Bu yüzden, sadece sıcaklık takibi yapmak için harici bir sensöre ihtiyaç duyulur ki bu hem sistem karmaşıklığını hem de maliyeti artıracaktır. Ayrıca, bu sensör tipleri elektriğe ihtiyaç duyarlar ve dolayısı ile yağmur, kar ve nem gibi etkenlerden etkilenmeyecek şekilde muhafaza edilmeleri gerekir. Sonuç olarak, Çizelge 1’de gösterildiği üzere FBG tabanlı gerinim sensörleri ışık ile çalıştıklarından dolayı pasif yapılardır ve sistem üzerinde herhangi bir elektrik akımı bulunmadığından muhafazası için ciddi önlemler almaya gerek yoktur [7,8]. Ayrıca, doğrusal gerinim ölçerler ve piezoelektrik sensörler elektromanyetik alandan etkilenirler. Bu durum da bu sensörlerin özellikle yüksek manyetik alanın bulunduğu diğer alanlarda kullanımlarını kısıtlar [9].

**Çizelge 1.1:** Konvansiyonel sensörler ile FBG sensörün karşılaştırılması.

Sensör Tipi	Hassasiyet	Enerji İhtiyacı	Manyetik Girişimden Etkilenme	Erişilebilirlik
<b>Piezo Sensör</b>	5V/ $\mu\epsilon$ (ortalama)	Var (Aktif)	Etkilenir	<b>Kolay</b>
<b>Gerinim Ölçer (Strain Gauge)</b>	0.5V/ $\mu\epsilon$ (ortalama)	Var (Aktif)	Etkilenir	<b>Kolay</b>
<b>FBG Sensör</b>	<b>1.2pm/ <math>\mu\epsilon</math> (ortalama)</b>	<b>Yok (Pasif)</b>	<b>Etkilenmez</b>	<b>Orta</b>

Öte yandan, FBG sensörlerin üretildiği malzemenin hammaddesinin silika olmasından ve silikanın da elektromanyetik alan ve radyofrekans girişimlerine karşı duyarsız olmasından dolayı böyle bir engeli yoktur [10]. Böylelikle birçok zorlu çevre şartının olduğu uygulamada güvenle kullanılabilirler. Son olarak, doğrusal gerinim ölçerler ve piezoelektrik sensörler her birim sensör için ayrı bir terminal bağlantısı gerektirir. Bu durum da, kablolama işlemlerinde komplikasyon ve ekstra ağırlığa

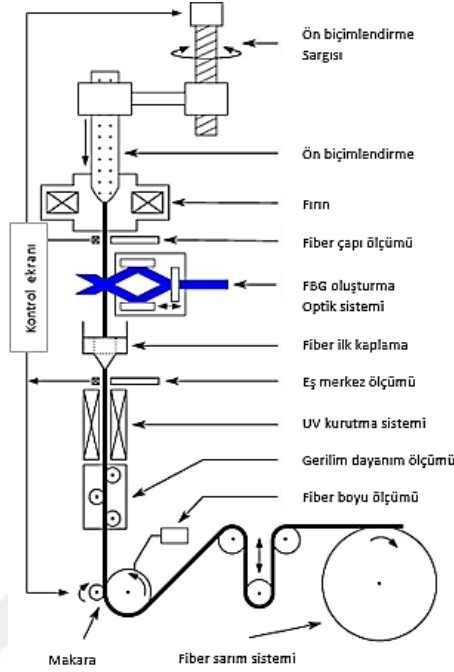
sebebiyet vermektedir. Bu noktada şunu vurgulamak gerekir ki bu sensör yapılarına ait pazar payının en çok olduğu alanlardan biri olan havacılık alanında bu ciddi bir dezavantajdır. Bu bağlamda, FBG sensörler tek bir fiber hattı üzerinde çoklu sayıda olabildiğinden, kablolama karmaşıklığının önüne geçilmiş olur ve toplam birim ağırlık oranı ciddi oranda azalır [11]. Tüm bu avantajlarının yanı sıra, FBG sensörlerin de doğrusal gerinim ölçerler ve piezoelektrik sensörlere kıyasla birkaç dezavantajı bulunmaktadır. Örneğin, FBG sensörler fiyat kıyaslamasında konvansiyonel gerinim ölçerlerden daha maliyetlidir. Bunun yanı sıra, yerli piyasada konvansiyonel gerinim ölçerlerin birçok muadili bulunurken, FBG sensörlere yerli pazarda erişim imkanı kısıtlıdır. Bu durum da, FBG sensörlerin yerli piyasada erişimini ciddi oranda etkilemektedir. Tüm bu dezavantajların yanı sıra, FBG sensörlerde karşılaşılan en büyük problem FBG tabanlı gerinim sensörlerin sıcaklığa karşı ciddi oranda hassasiyeti olmasıdır [12-14]. Çevre sıcaklığının değiştiği uygulamalarda gerinim sensörlerine olan güven nispeten azalmaktadır. Bu bağlamda, tez çalışmasında tek bir paket yapısı içersine birbirine mümkün merteye yakın durumda bulunan iki FBG sensörün yerleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu sensörlerden bir tanesi paket yapısının gerinimsiz olarak tasarlanan bölgesinde bulunacağından, yalnızca sıcaklığa duyarlı olacaktır ve bu sayede sıcaklık baskılanmasının önüne geçilerek FBG sensörlerin en kritik problemlerinden bir tanesi olan sıcaklık baskılanması problemine bir çözüm getirilmesine çalışılmıştır.

## 2. METODOLOJİ

### 2.1 FBG Sensör Üretim Teknikleri

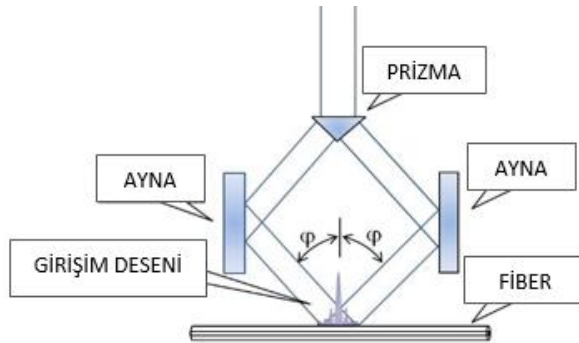
FBG sensörler temel olarak fiber optik kablo içerisinde, belirli bir desene bağlı olarak oluşturulan kırıcılık indis varyasyonundan elde edilmektedir [15]. Elde edilen indis varyasyonu fiberin iç ortamından (medium) daha yoğun olduğu için fiber optik kablo içerisinde mikron boyutlarında dikroik ayna görevi gören yapıların oluşumu sağlamış olur. Bu yapıların belirli bir desen dahilinde olması oldukça önem arz etmektedir. O yüzden, FBG yazım işlemi sırasında kullanılan her bir alt bileşenin ayrı ayrı değerlendirilmesi ve maksimum verim için en uygun olanların sisteme dahil edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, indis varyasyonu için genel olarak ultraviyole tabanlı lazer sistemleri kullanılmaktadır [16,17]. Tünelenebilir tekrarlı frekansı ve ayarlanabilir enerji seviyeleri sayesinde ultraviyole (UV) lazerler FBG üretiminde operatörlere ciddi anlamda kolaylık sağlamaktadır. UV lazer kaynakları kullanılarak FBG sensör üretiminin yapıldığı birkaç temel üretim tekniği vardır. Bunlardan ilki çekme kulesi FBG sensör (draw tower FBG sensors) üretim tekniğidir. Bu üretim tekniğinde yüksek hassasiyette (0,001mm/sn) pozisyonlama yapabilme kabiliyetine sahip bir fikstür bulunur. Henüz ham halde olan ve çekme kulesinde aşağıya doğru uzayan yapıdaki fiber optik kablonun üzerine iki özdeş (uniform) UV ışın kaynağından çıkan ışın hüzmesi girişim deseni oluşturacak şekilde düşürülür. Bu işlemin sonucunda fiber optik kablo üzerinde meydana gelen girişim deseni sabit bir periyoda sahip ızgara yapısı oluşturur ve FBG sensör yapısı elde edilmiş olur. Bu üretim metodunun en önemli özelliği fiber optik kablonun hiçbir fiziksel ve kimyasal müdahaleye/işleme maruz kalmamasıdır [18]. Bu sayede fiber optik kablonun üzerinde herhangi bir zayıf bölge meydana gelmez ve daha yüksek gerinim değerlerine kadar dayanabilen bir FBG sensör yapısı elde edilmiş olur. Bunun yanı sıra, Şekil 2.1'de genel görünümü verilen sisteme sahip bu üretim metodu oldukça maliyetli olduğundan ve hassas bir şekilde işlev gören motor yapıları üzerindeki kontroller kısıtlı olduğundan, çok fazla tercih edilmemektedir. Bunlardan dolayı, çekim kulesi aracılığı ile üretilen ve yüksek

dayanım gösteren FBG sensörlerin erişilebilirliği düşüktür ve ürün fiyatları muadillerinin çok üzerindedir.



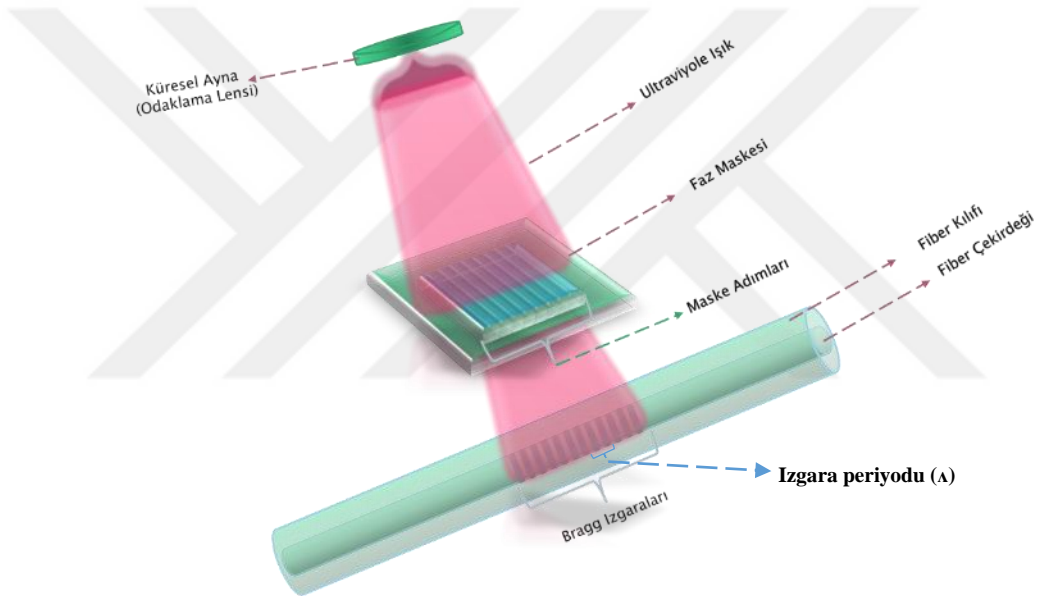
Şekil 2.1: Çekme kulesi ile FBG yazma işlemi gösterimi [18]

Bir diğer FBG sensör üretim yöntemi ise daha çok laboratuvar ortamlarında tercih edilen ve bilinen en eski FBG üretme metodu olan girişim (interferometrik) yöntemidir. Bu yöntemde serbest uzay yaklaşımı ile hazırlanmış bir üretim hattı bulunup, UV ışın kaynağından çıkan ışın hüzmesi ilk olarak ışık hüzmesi bir prizma aracılığı ile eşit iki hüzme haline getirilir. Elde edilen bu iki özdeş ışın parçası karşılıklı olarak duran iki adet yüksek yansıtıcılıklı aynaya odaklanır. Bu iki ayna üzerinden yine optik aynalar aracılığı ile odaklananan özdeş ışın hüzmeleri fiber optik kablo üzerinde Şekil 2.2’de örneklendiği gibi bir girişim alanı oluşturur. Bu sayede fiber optik kablo üzerinde belli periyotlara sahip ızgara deseni elde edilir [19-21].



Şekil 2.2 Girişim (interferometrik) yöntem ile FBG yazımı

Bu yöntemde sabit bir periyot elde etmek çok zor olduğundan üretim alanı çoğu zaman laboratuvar ortamı ile sınırlıdır. Öte yandan, FBG sensörlerin üretiminde en çok tercih edilen yöntemlerin başında faz maskesi ile FBG yazım işlemi gelmektedir. Nispeten daha az karmaşık bir yapıya sahip olan bu sistemde, diğer yöntemlere kıyasla daha kontrol edilebilir ve yönetilebilir bir üretim süreci hakimdir. Dolayısı ile üretim öncesinde hedeflenmiş olan merkezi dalgaboyu ve geri yansıtıcılık (reflectivity) oranını yakalamak daha kolaydır [22,23]. Buna karşılık, faz maskesi ile yapılan üretimlerde fiber optik kablonun bazı fiziksel müdahalelere maruz bırakılmak durumunda olması (fiberi soyma, fiberi kesme, fiberi kaynatma ve fiberi yeniden kaplama) elde edilen sensör yapısının nispeten daha düşük bir dayanımı olmasına sebebiyet vermektedir.



**Şekil 2.3:** Faz maskesi yöntemi ile FBG yazımını

Şekil 2.3'te de gösterildiği üzere, faz maskesi ile FBG üretim sürecinin ilk adımında eş eksenli bir ultraviyole ışın hüzmesi faz maskesi üzerine düşürülür. Işığın üzerine odaklandığı faz maskesi, üretim sonucunda elde edilmesi istenen merkezi (Bragg) dalgaboyuna bağlı olarak tasarlanılmaktadır. Burada fiber optik kablo üzerinde oluşturulan ızgara deseninin periyodu faz maskesi üzerindeki adımların her birinin arasındaki sabit periyodun yarısına eşittir [24-26]. Bu bağlamda, fiber Bragg ızgaralarının arasındaki periyodun mikron seviyelerinde olduğu göz önünde

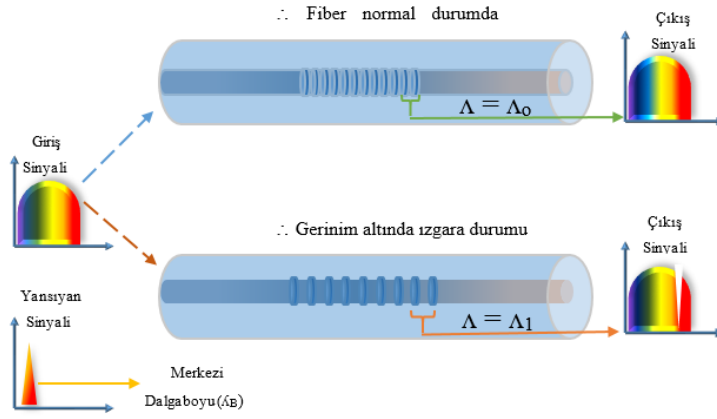
bulduğunda, faz maskelerinin yüzeyindeki desenin çok hassas ve yüksek doğrulukta üretilmesi gerekmektedir. Mevcut teknolojide bu kadar hassasiyette desen oluşturabilmek elektron-ışın litografi teknikleri ile mümkündür [27]. Bunun yanısıra, faz maskesi içerisinden geçen UV ışık, fiber optik kablo üzerinde bir girişim deseni oluşturmaya başlar. Fiber optik kablonun çekirdek (core) kısmında oluşturulan bu desen, teknik olarak belli bir periyotta oluşturulmuş kırıcılık indis modülasyonunu ifade etmektedir. Fiber optik kablonun içerisinde birkaç milimetrelik uzunluğa sahip olan bu alan içerisinde genelde binlerce ızgara çizgisi (fringe) bulunmaktadır. Fiber optik kablonun içerisine geniş bant bir ışın hüzmesi gönderildiğinde, fiber optik kablo içerisindeki ızgara desenindeki her bir ızgara çizgisinden çok küçük bir miktarda ışık geriye yansır. Bragg yansıması olarak bilinen bu kuramda her bir ızgara çizgisinden geriye yansıyan küçük miktardaki ışıklar aynı fazda olduğundan, bir nevi dalgaboyu filtreleme işlemi uygulanır ve sonuç olarak giriş sinyali içerisindeki tek bir dalgaboyu geriye yansıtılmış olur [28]. Yapıcı girişimler sonucunda ortaya çıkan merkezi (Bragg) dalgaboyu ile ızgara periyodu arasındaki ilişki şu şekildedir [29]:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (1.1)$$

Bu denklem bir sonraki kısımda detaylandırılacak olup verilen denklemde ( $\lambda_B$ ) sembolü Bragg dalgaboyunu, ( $n_{\text{eff}}$ ) fiber optik kablonun etkin kırıcılık indisini ve ( $\Lambda$ ) ise fiber optik kablonun içerisindeki ızgara yapısının çizgileri arasındaki periyodu göstermektedir. Sabit sıcaklık altında etkin kırıcılık indisinde herhangi bir değişiklik meydana gelmezken, ızgara periyodu fiber üzerinde meydana gelen en ufak gerinim değişiminden dahi etkilenmektedir. Öte yandan, etkin kırıcılık indisinde de sıcaklık değişimlerine karşı duyarlı olduğundan dolayı, fiber Bragg ızgara yapıları sıcaklık ve gerinim tabanlı tüm fiziksel parametrelerin ölçümünde sensör amaçlı olarak kullanılabilir.

## 2.2 FBG Sensör Çalışma Prensipleri

Bir önceki kısımda anlatıldığı üzere fiber Bragg ızgaralarının arasında sabit bir periyot vardır ve bahsi geçen bu periyot ile merkezi dalgaboyu arasındaki ilişki denklem (1.1)'deki gibidir. Bu bağlamda, ızgara bölgesinde herhangi bir gerinim değişimi meydana geldiğinde veya ortam sıcaklığı değiştiğinde merkezi dalgaboyu da orantılı olarak değişir.



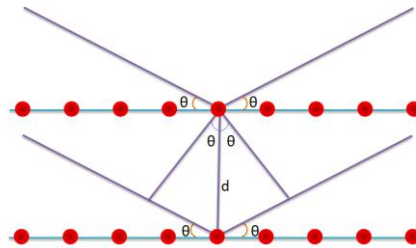
**Şekil 2.4:** FBG sensör çalışma prensibi

Şekil 2.4'te de gösterildiği gibi FBG sensörlerin çalışma prensibi, temelde fiber optik kablo içerisine gönderilen geniş bant ışın hüzmesinin yorumlanmasına dayanmaktadır. Bu bağlamda, fiber optik kablonun içerisine gönderilen ışın hüzmesi her bir ızgaradan geçerken bir miktarı geriye yansır. Izzaraların arasındaki mesafe değişmediği sürece Bragg yansıma kuralına bağlı olarak merkezi dalga boyunda herhangi bir değişiklik meydana gelmez. Bu noktada şunu vurgulamak gerekir ki, Bragg yansıma kuralı FBG sensörlerin genel çalışma prensibini anlayabilme noktasında ciddi önem arz etmektedir.

Fiber Bragg ızgara sensörleri özelinde, Bragg yansıma kuralı temelde her bir ızgaradan geriye yansıyan ışınların birbirleri ile oluşturduğu yapıcı (constructive) girişimi açıklamaktadır. Bu kapsamda, aşağıdaki görselde de aktarıldığı üzere, ızgara periyodu ( $d$ ), ışığın geliş açısı ( $\theta$ ), üzerinde FBG ızgaralarının bulunduğu fiberin kırıcılık indisi ( $n$ ) ve son olarak gelen ışığın dalgaboyu ( $\lambda$ ) olarak değerlendirildiğinde :

$$2 d \sin \theta = n \cdot \lambda \quad (1.2)$$

şeklinde elde edilir. Bu denklem ilişkisi Şekil 2.5'te örneklendiği gibidir.



**Şekil 2.5:** Bragg yansıma kuralı

Burada, FBG ızgara yapılarının yazılmış olduğu fiber optik kabloya ışığın geliş açısı  $90^\circ$  olacağından bu formül;

$$2d = n \cdot \lambda \quad (1.3)$$

şeklinde düzenlenebilir. Denklem 1.3'te ifade edilmiş olan periyod sembolü (d) fiber Bragg ızgara yapısı olarak değerlendirildiğinde ( $\Lambda$ ) ile değiştirilebilir. Öte yandan yine denklem 1.3'teki ifade vakum altında ışığın ilerleyişini göstermektedir. Oysa ki, ışığın ilerleyeceği fiber optik kablonun içerisindeki ızgara medyan direkt olarak kullanılan fiber optik kablonun etkin kırıcılık indisi ( $n_{\text{eff}}$ ) ile ilgili olduğundan, dalgaboyu ile ızgara peridoyu arasındaki ilişki;

$$2\Lambda = \lambda \quad (1.4)$$

şeklinde ifade edilirken eşitiliğin son hali:

$$\lambda = 2 \cdot n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (1.5)$$

şeklinde elde edilir.

FBG ızgaraları arasındaki mesafe herhangi bir fiziksel etkiye maruz kaldığında aralarındaki mesafe değişir. Değişen mesafe sonuç olarak, Şekil 2.4'te ifade edildiği üzere merkezi dalgaboyunu azaltarak, maviye kayma (blue shift) veya artırarak kırmızıya kayma (red shift) durumlarına sokabilir. Bahsi geçen gerinim değişiminin ve sıcaklık türevinin dalgaboyu ile arasındaki teorik ilişkisini, aşağıdaki denklem ile elde etmek mümkündür [30]:

$$\frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{\partial \lambda_B}{\partial \xi} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial \xi} + \frac{1}{L} \cdot \frac{\partial L}{\partial \xi} \quad (1.6)$$

FBG sensör üzerinde meydana gelen herhangi bir etki (gerinim, sıcaklık, basınç vs. ( $\xi$ )) matematiksel olarak denklem (1.2)'de gösterildiği şekliyle ifade edilebilir. Denklem (1.2)'de gösterilen ilişki, fiziksel etkilerin dalga boyu kayması ile arasındaki genel durumu özetlemektedir. Bunun yanısıra, FBG sensörlerin üzerinde meydana gelen gerinim ve sıcaklık değişimleri benzer etki seviyelerine sahip olduğundan ve aynı anda her ikisi birden gerçekleşebileceğinden, her iki etkinin ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, FBG sensörlerde meydana gelen dalgaboyu kayması ile gerinim değişimi arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilir [31,32]:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = \left( \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial L} + \frac{1}{L} \right) \cdot \Delta L = (1 - p_e) \varepsilon_z \quad (1.7)$$

Bu denklemde verilen fotoelastik etki katsayısının ( $p_e$ ) cam fiber için değeri:

$$p_e = \frac{n^2}{2} \cdot \{p_{12} - \nu (p_{11} + p_{12})\} = 0.22 \quad (1.8)$$

Denklem (1.4)'te verilen  $p_{12}$  ve  $p_{11}$  silika camın gerinim-optik (strain optic) sabiti iken, ( $n$ ) fiber çekirdeğinin kırıcılık indisini ve ( $\nu$ ) Poisson katsayısını göstermektedir. FBG sensör üretiminde kullanımını çok yaygın olan ve bu çalışmada da FBG sensör üretimi için kullanılacak olan fiber tipi SMF-28 için denklem (1.4)'te gösterilen değer, denklem (1.3)'te yerine koyulduğunda:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = 0.78 \cdot \varepsilon_z \quad (1.9)$$

Operasyonların 1550 nm dalga boyunda gerçekleştirildiği düşünüldüğünde ise;

$\lambda_b = 1550\text{nm}$  olduğundan dolayı [33,34]:

$$\Delta\lambda_b \approx 1.2 \text{ pm}/\mu\varepsilon \quad (1.10)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Izgaraların aralarındaki mesafeyi etkileyen bir diğer faktörün sıcaklık değişimi olduğu daha önceki bölümde vurgulanmıştır. Bu bağlamda sıcaklık değişimi ile dalga boyu değişimi arasındaki ilişkiyi açıklayabilmek için denklem (1.7)'de gösterilen ilişki şu şekilde geliştirilebilir [35,36]:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = (1 - p_e) \cdot \varepsilon_z + (\alpha + \eta) \cdot \Delta T \quad (1.11)$$

Denklem (1.11)'de gösterilen eşitlikte verilen ( $\alpha$ ) termal genleşme katsayısını ifade eder ve değeri ilgili fiber tipi için:

$$\alpha = 0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (1.12)$$

İken,  $\eta$  ise termo optik katsayıdır ve değeri:

$$\eta = 8.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (1.13)$$

olarak bilinmektedir. Elde edilen bu değerler denklem (1.11)'deki ilgili yerlere yerleştirildiğinde ise FBG sensör yapısının sıcaklığa karşı hassasiyeti [36]:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = 10.2 \text{ pm}/^\circ\text{C} \quad (1.14)$$

olarak elde edilir. Denklem (1.14)'te elde edilen sonuç genel bir çıktı olup, elde edilen hassasiyet değeri üretim tekniği ve sensör yapısına göre değişebilmektedir. Bu noktada şunu belirtmek gerekir ki, bu çalışmada elde edilmeye çalışılan çıktı geliştirilecek olan FBG sensör paket yapısının geometrisine bağlı olan sıcaklık hissedilebilirliğinin gerinim sensörü üzerindeki etkisini baskılamaktır.

### 2.3 FBG Sensör Kaplama Tipleri

FBG sensörler kullanılacağı alanlara göre farklı kaplama tiplerine sahip olabilmektedir. Bu kaplama tipleri doğrudan FBG sensör yapılarının uygulanacağı alanlara özel olduğu için sensör tipi üzerinde direkt bir etkiye sahiptir. Daha önce de üzerinde durulduğu üzere, FBG sensör seçilirken dikkat edilmesi gereken birkaç tane önemli nokta bulunmaktadır. Bunlar sırası ile hassasiyet, ısıl genleşme katsayısı ve maksimum gerinim dayanım noktasıdır. Bu özellikler arasından maksimum gerinim dayanım noktası ve hassasiyet değerleri doğrudan tasarlanan paket yapısı ile alakalı olmak ile birlikte, FBG sensörlerin ısıl genleşme katsayısı direkt olarak tercih edilen kaplama tipi ile alakalıdır. Bu bağlamda, Şekil 2.6'da en çok tercih edilen kaplama tiplerine ait termal genleşme katsayıları verilmiştir.

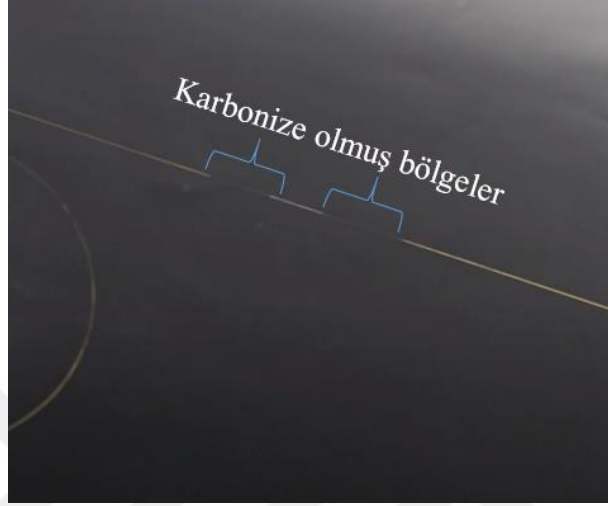
Malzeme	Termal Genleşme Katsayısı
PDMS	$300 \times 10^{-6}$
AL	$23.03 \times 10^{-6}$
Ti	$8.35 \times 10^{-6}$
Au	$14 \times 10^{-6}$
polyimide	$20 \times 10^{-6} - 30 \times 10^{-6}$
SiO <sub>2</sub>	$0.55 \times 10^{-6}$

Şekil 2.6: Kaplama tiplerinin termal genleşme katsayıları

Bahsi geçen kaplama tiplerinden PDMS (polydimethylsiloxane) kaplama materyali, yüksek biyokimyasal ve mekanik dayalırlık, yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Bunun yanısıra, ilgili FBG sensör alanını PDMS ile kaplamak mikro boyutlarda takip gerektireceğinden, kaplama uygulamasını ve dolayısı ile ürün maliyetini ciddi oranda artırabilmektedir. Bu yüzden PDMS ile kaplanmış FBG sensörler literatürde çok az miktarda görülmektedir.

FBG tabanlı gerinim ve sıcaklık sensörlerinde en çok poliamid kaplama ile karşılaşmaktadır. Poliamid, malzeme yapısı gereği birçok polimere kıyasla yüzey gerinimi aktarımı konusunda oldukça yüksek bir performansa sahiptir. Ayrıca, 300 °C

sıcaklığa kadar dayanım gösterebilen bu kaplamanın en büyük dezavantajı, FBG sensörlerin poliamid kaplanmış fiber optik kablo içerisinde oluşturulabilmesi için kaplamanın hidröflorik asit gibi zararlı kimyasallar kullanılarak kaldırılmak zorunda olmasıdır. Bu işlem de, Şekil 2.7’de gösterildiği gibi fiber optik kablo üzerinde karbonize bir yapının oluşmasına neden olur.



**Şekil 2.7:** Poliamid kaplı fiber

Bu tarz malzemeler parlak bir yüzeye sahip oldukları için, çoğu yapıştırıcı özelliğe sahip polimerin yüzeye tutunması güçtür. Bu yüzden özellikle FBG sensörleri pakete sabitleme aşamasında seçilen polimerin titizlik ile ele alınması gerekmektedir. FBG tabanlı gerinim sensörlerinde nadiren de olsa karşılaşılan kaplama tiplerinden birisi de akrilik kaplamadır. Akrilik kaplama kolay bir şekilde müdahale edilebilen, herhangi bir tehlikeli kimyasal kullanımı gerektirmeyen fakat sıcaklık dayanımı yalnızca 80°C olan bir kaplama tipidir. Nispeten yumuşak yapısından dolayı gerinim aktarım katsayısı poliamide kıyasla daha düşük olan bu kaplama tipi, daha düşük maliyetli sensör üretimlerinde ve nispeten az hassasiyet gerektiren uygulamalarda tercih edilebilmektedir. Bunun yanı sıra, akrilik kaplamanın bir türevi olarak adlandırılan süper akrilikler de literatürde karşılaşılan polimer tiplerinden biridir. Süper akrilikler birçok noktada akrilik kaplamalar ile yakın bir karakteristiğe sahipken, aradaki en büyük fark süper akriliklerin 110°C’ye kadar dayanabiliyor olmasıdır. Sonuç olarak, bu çalışma neticesinde elde edilecek olan ürünün literatürdeki sensörlere muadil özellikler taşıması planlandığından, kullanılacak olan fiberin kaplaması polyimide olup HD MicroSystems firmasına ait PI2525 kodlu ürünü kullanılmıştır.

## 2.4 Sıcaklık Baskılama (Kompanzasyon) Yöntemleri

Fiber Bragg ızgara tabanlı sensörler bir önceki bölümlerde de aktarıldığı üzere hem sıcaklığa hem de gerinim değişimlerine karşı yüksek hassasiyete sahiplerdir. Bu bağlamda, hassas gerinim ölçümlerinin yapılması gereken uygulamalarda çevre şartlarından veya ölçüm koşullarından kaynaklı sıcaklık değişimlerinin baskılanması gerekmektedir. Bu noktada, ilgililer birçok farklı yöntem geliştirmişler ve konu ile ilgili testleri tamamlamışlardır. Örneğin, bazı uygulamalarda ilgililer yer altı uygulamalarında kullanmak üzere anti korozif bir paket yapısına ilave edilmiş çıplak fiber ile sıcaklık ölçümü yapmayı amaçlamışlardır [4]. Bu yöntem her ne kadar olumlu neticeler sağlanmasına sebebiyet verse de, kemirgenlerin ve zor çevre şartlarının olduğu uygulama alanlarında fiberin çıplak kullanımı çok uygun değildir. Bazı diğer araştırmacılar da silika tabanlı FBG sensörleri ve nispeten daha yüksek kırıcılık indis değerine sahip olan TOPAS (konjoktürel olefin kopolimer) tabanlı FBG sensörlerin kombinasyonlarını kullanmıştır. Gerinime karşı tepki seviyeleri %95'in üzerinde benzerliğe sahip olan bu sistemde, TOPAS tabanlı FBG sensörün sıcaklığa karşı tepkisi yaklaşık %8 civarında daha yüksektir. Dolayısı ile TOPAS ve silika tabanlı FBG sensörler birlikte kullanıldıklarında aralarındaki sıcaklık tepkisi farkı sıcaklık baskılanması amacı ile kullanılabilir [5]. Bu yaklaşımdaki en büyük problem şudur ki, gerinim tepkileri çok yakın olan bu sensörlerin arasındaki sıcaklık hassasiyeti de çok yakındır. Yalnızca %8 civarında olan tepki farkını ani sıcaklık değişimlerinde yakalayabilmek günümüz teknolojisinde çok mümkün gözükmemektedir. O yüzden, ortam sıcaklığının ani olarak değiştiği uygulamalarda kompanzasyonun stabil olarak elde edilebilmesi çok zordur. Fiziki sıcaklık etkisi baskılama metodlarının yanı sıra, bazı araştırmacılar matematiksel modelleme ve analizler ile baskılama gerçekleştirmeyi başaramışlardır. Birçok malzeme için gerinim ve rahatlama (stress & relaxation) süreleri değişkenlik gösterir. Bu durumu detaylandırmak gerekirse, bir malzemede 0.1mm derecesinde bir toplam deformasyon meydana gelmesi için birkaç milisaniye yeterli olurken, aynı malzeme için rahatlama süresi birkaç saniyeye kadar ulaşabilmektedir. Bu bağlamda, bazı araştırmacılar FBG tabanlı gerinim sensörlerinin yapıştırılacağı yüzey ile yapıştırıcı olarak kullanılan polimerin arasındaki ilişkinin karakterizasyon değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Malzeme yüzeyinde oluşacak gerinim ile rahatlama süresi arasındaki farkı sıcaklık etkisi olarak yorumlayan ilgililer % 98'lik bir başarı elde edildiğini ileri sürmüşlerdir. Malzeme ile

polimer arasındaki karakterizasyon işlemi polimerin birim miktarına, FBG sensörün temas yüzeyine ve montaj alanının pürüzsüzlük seviyesine bağlı olacağından, her test sonrası yapılması gerekmektedir. Bu da kompanzasyon işleminin gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımının önüne geçecektir. Bu problemin önüne geçebilmek için derin öğrenme veya yapay zeka ile veri tamamlama gibi teknolojilerin sisteme dahil edilmesi gerekmektedir [6].

Yukarıda verilen çalışmalar incelenerek, tüm avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiş ve detaylı olarak açıklanmıştır. Tüm bu eksiklikler göz önünde bulundurularak, tez çalışmasında özel bir paket yapısı geliştirilmiştir. Geliştirilen paket yapısına ait detaylar ilerleyen bölümlerde verilmiş olup, kompanzasyon işlemi referans FBG üretimi yöntemine dayanmaktadır.

### **3. FBG TABANLI SICAKLIK KOMPANZE GERİNİM SENSÖRÜ ÜRETİMİ**

Sıcaklık etkisinin baskılanması amacı ile birçok farklı yaklaşım ve metot geliştirilmiştir. Önceki bölümlerde geliştirilmiş olan metotlar ve çözüm olarak sunulan yaklaşımlar detaylı olarak incelenmiş ve gerekli açıklamalar yapılmıştır. Literatürde mevcut yaklaşımlardan bir tanesi de referans FBG sensör üretimi ile sıcaklık kompanzasyon işlemi gerçekleştirmektedir. Bu bağlamda, mevcut çalışmada da referans FBG yöntemi ile sıcaklık kompanzasyon işlemi yapabilmek adına özel bir paket tasarlanmıştır. Sıcaklık etkisi bastırılmış FBG tabanlı gerinim sensörü üretim süreci birkaç adımdan oluşmaktadır. Bunlar sırası ile:

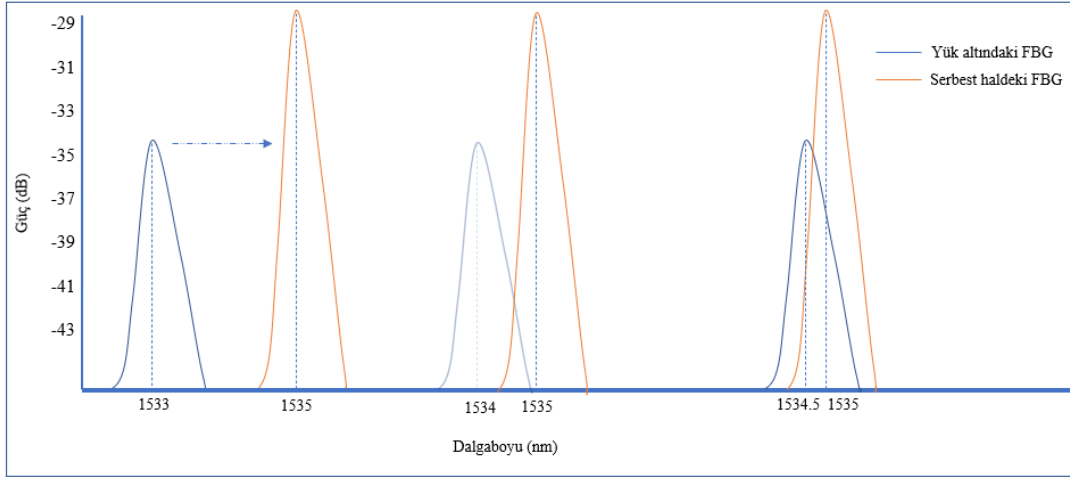
- 1- FBG paket yapısının tasarımı,
- 2- FBG paket yapısının ANSYS ile çekme testi,
- 3- FBG paket yapısının üretimi,
- 4- Aynı fiber hattına iki adet FBG sensörün yazımı,
- 5- FBG sensörün montajı için uygun polimer seçimi,
- 6- Paketlenmiş FBG sensörün sıcaklık testinin gerçekleştirilmesi,
- 7- Paketlenmiş FBG sensörün basma ve çekme testlerinin gerçekleştirilmesi,
- 8- MATLAB yazılımı ile korelasyon eğrisinin çıkarılması,

adımlarıdır.

#### **3.1 Sıcaklık Kompanze FBG Paket Yapısının Tasarımı**

Fiber Bragg ızgara tabanlı sıcaklığı baskılanmış gerinim sensörlerinin verimli çalışabilmesi için paket yapısının üretime uygun olarak hassas bir şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu noktada dikkate alınması gereken birkaç önemli nokta mevcuttur. Örneğin, paket tasarımının boyutunu büyük ölçüde FBG sensörlerin konumlaması belirlemektedir. Yapılan literatür taramasında görülmüştür ki, aynı fiber hattı üzerinde birden fazla FBG sensör yapısı bulunması durumunda sensörler arasında minimum 3nm spektral mesafe ve minimum 30 mm fiziksel mesafe olması gereklidir [7]. Çünkü, eğer sensörlerin arasındaki fiziksel mesafe 3nm'den daha az ise sensörlerden birine

yük binmesi durumunda, üzerine yük binen FBG sensörün merkezi dalgaboyu diğer FBG sensörün merkezi dalgaboyuna yaklaşır ve aralarındaki dalgaboyu farkını baskılayarak sensörlerin takibini yapmayı imkansız kılar. Bu durum Şekil 3.1 ile örneklendirilmiştir.



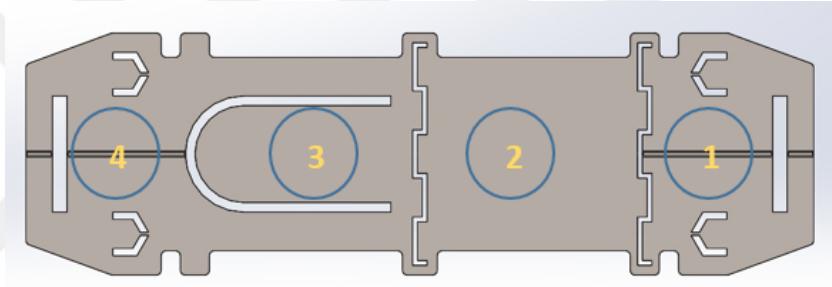
**Şekil 3.1:** FBG sensörlerde spektral mesafenin baskılanması

Bunun yanı sıra, her bir FBG sensörün ilgili noktadan veri alabilme kabiliyetini mümkün mertebe verimli olarak değerlendirebilmek için, sensörlerin arasında minimum 30 mm'lik bir boşluk bırakmak ta dikkate alınması gereken bir diğer noktadır. Çünkü, yapılan literatür araştırmasında görülmüştür ki, FBG sensör yapılarında genel olarak tercih edilen gerinim ölçer uzunluğu (gauge length) 5mm'dir [7]. Her ne kadar bir standarda dayandırılmasa da, birçok tedarikçi tarafından tercih edilen bu değer referans olarak alındığında ise FBG sensörlerin merkez noktasının sağından ve solundan 15 mm olmak üzere toplamda 30mm'lik bir algılama mesafesi bulunmaktadır. Bu bağlamda, aynı hat üzerindeki her bir FBG sensörden birbirinden bağımsız bir şekilde veri elde edebilmek için sensörler arasındaki mesafenin 30 mm'den büyük olması tercih sebebidir.

Sıcaklık etkisi baskılanmış FBG sensör paket yapısının tasarımındaki en kritik noktalardan bir tanesi de, sıcaklık değişimlerinin sensör yapısına mümkün mertebe en az sönümlenme ile aktarılabilmesidir. Bu sayede sensör yapısının da düşük tepki süresinde bu değişimi algılayabilme ve reaksiyon gösterebilme kabiliyeti gelişecektir. Bu bağlamda, yapılan literatür taramasında görülmüştür ki, sıcaklık değişiminin paket yapısı üzerine sönümlenmeden aktarılabilmesini mümkün kılan en kritik detay, seçilecek malzemenin mümkün mertebe ince olmasıdır. Metal paket yüzeyine aşağıda

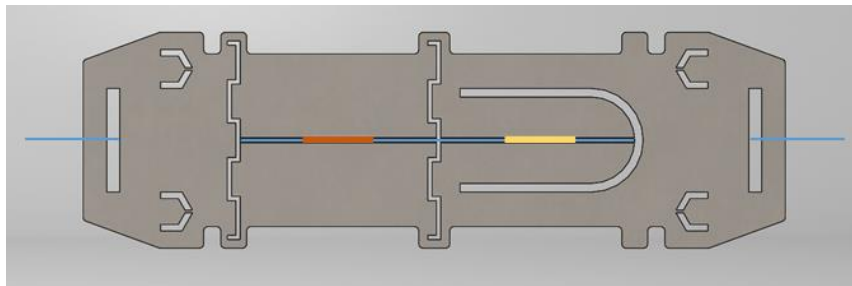
detaylı şekilde gösterilmiş olan kanalların da açılabilmesi ve paketin gerekli diğer tesfiye işlemlerine de uygun olabilmesi açısından, malzeme kalınlığı 1mm olarak belirlenmiştir.

Bunların yanı sıra, yapılan detaylı literatür araştırmasında görülmüştür ki, referans FBG kullanılarak geliştirilmiş olan sıcaklık kompanze paket yapılarındaki en kritik detay, sıcaklık sensörünün yerleştirileceği bölümün gerinimsiz yani gerinimden etkilenmeyen bir geometrik yapıda olması gerekliliğidir. Bu kapsamda, tüm bu kriterler dikkate alınarak SolidWorks adlı program aracılığı ile aynı hat üzerine yazılmış olan iki adet FBG sensörün yerleştirilebileceği geometrik özellikleri taşıyan yeni bir paket yapısı tasarlanmıştır. Daha sonra tasarlanan paket yapısı ANSYS programı ile çekme ve sıcaklık testlerine tabii tutularak paketin teorik uygunluğu araştırılmıştır.



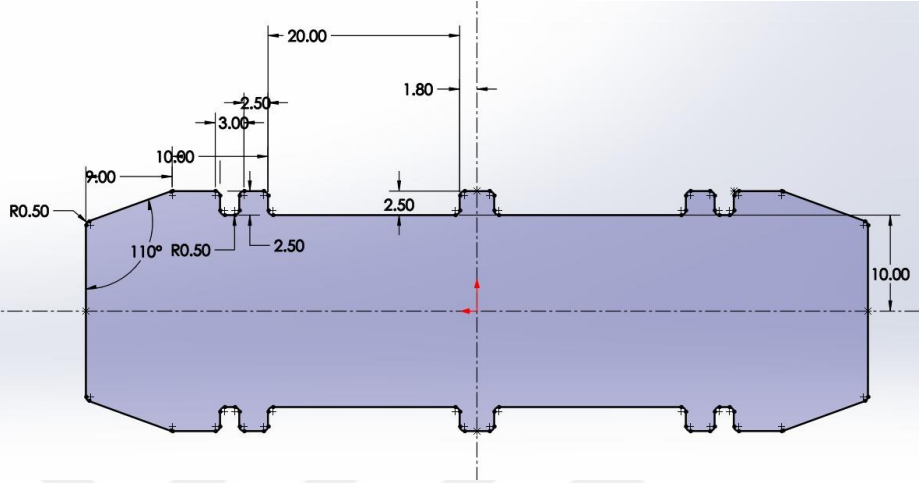
**Şekil 3.2:** Tasarım paket yapısı (ön yüz)

Şekil 3.2'de gösterildiği üzere tasarım paket yapısı dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci ve dördüncü bölümler fiber optik kablonun yerleşeceği kanallar olarak değerlendirilirken, ikinci ve üçüncü bölümler hassas bir şekilde işlenmiş sensör kanallarıdır.



**Şekil 3.3** Tasarım paket yapısı (arka yüz)

Daha önce bahsedildiği ve Şekil 3.3'te de gösterildiği üzere, bu paket yapısı aynı fiber optik kablo üzerine yazımı gerçekleştirilmiş iki adet FBG sensör içerecek şekilde tasarlanmış olup, ilk sensör ikinci kısmının altında yer alırken ikinci sensör üçüncü kısmının altında yer almaktadır. Sensörlerin yerleşim planını detaylandırabilmek için tasarım paket yapısının teknik resmi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



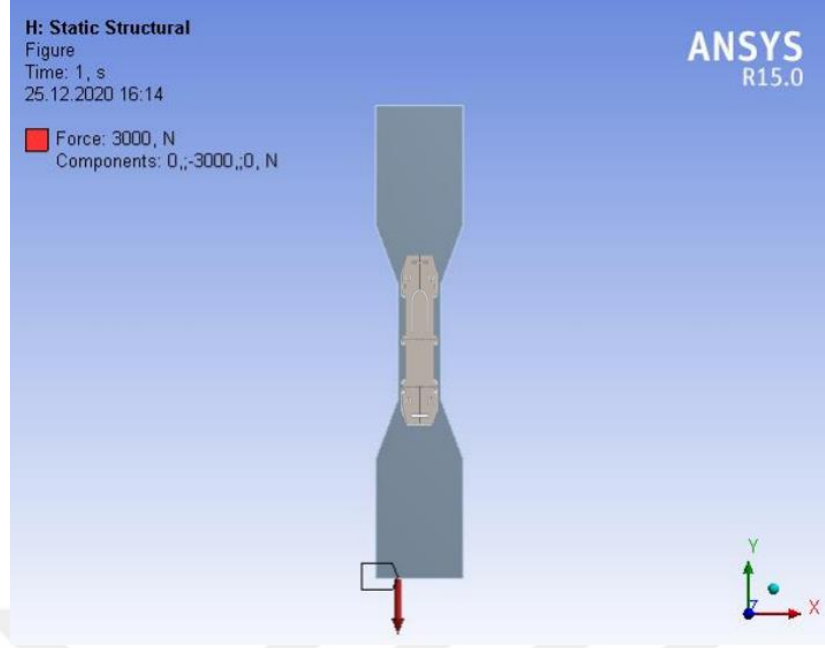
**Şekil 3.4:** Tasarım paket yapısı teknik çizimi

Şekil 3.4'te de gösterildiği üzere, tasarım paket yapısı ikisi ön yüzeyde ikisi de arka yüzeyde olmak üzere toplamda dört tane 2 mm en derinliğinde olan kanal yapılarına sahiptir. Maksimum yüzey gerinimi ve sıcaklık aktarımı gerekliliğinden dolayı, fiber optik kabloların yerleştirileceği yuvaların derinliği 0.4 mm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, yapılan literatür taraması ve ön çalışmalar neticesinde, paket yapısının SS304 kodlu paslanmaz çelikten hazırlanması uygun bulunmuştur. Şekil 3.2'de 3 numara olarak gösterilen ve Şekil 3.4'te de 22 mm uzunluğa sahip olduğu gösterilen kısmın her iki tarafında da 1.2 mm genişliğinde oyuklar bulunmaktadır. Bu oyukların bırakılmasının temel sebebi, paketin yüzeyinde meydana gelecek olan yüzey geriniminin (toplam deformasyonun) mümkün mertebe sönmüden gerinim sensörüne aktarılabilmesidir. Diğer bir deyişle, bu noktalar yük arttırıcı (stress amplifier) noktalar olarak tasarlanmıştır. Bu sayede, paket yapısında meydana gelecek en ufak gerinimler dahi algılanabilecektir. Sıcaklık sensörünün bulunduğu kısımda oluşturulmuş olan oyukun görevi ise sıcaklık sensörünün yerleştirileceği bölgenin mümkün olduğunca paket yapısından ayrıştırılması ve sıcaklık sensörünün bulunduğu bölgeye gerinim aktarımının sağlanmamasıdır. Bu tasarımın doğruluğunu test

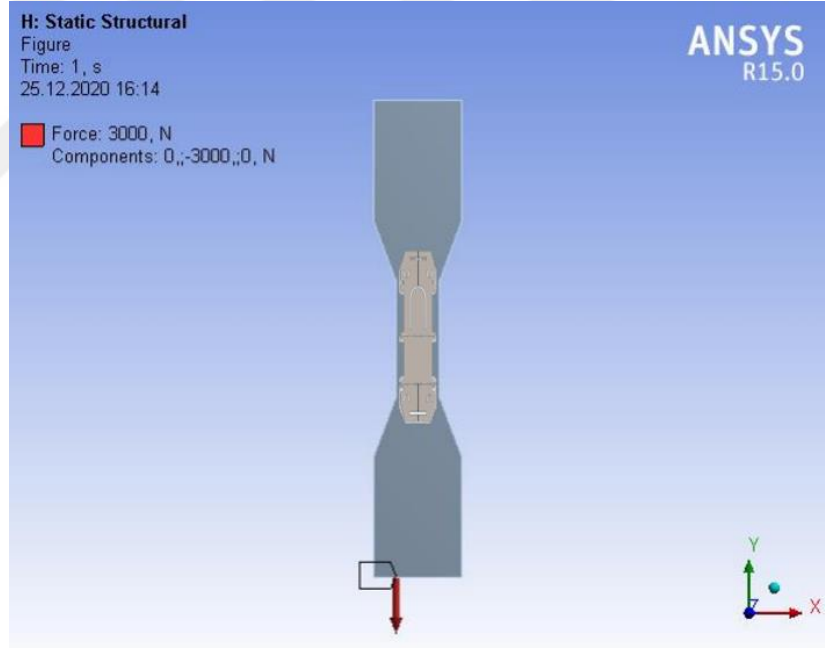
edebilmek adına SolidWorks adlı programda katı çizimleri tamamlanan paket yapısı, daha sonra ANSYS isimli platformda bir çekme testine tabi tutulmuştur.

### **3.2 Paket Yapısının ANSYS Programı İle Çekme Testi İşlemi**

Bir önceki bölümde de anlatıldığı üzere, sıcaklık baskılama işleminin verimli olarak gerçekleştirilebilmesi için yapılan tasarımın tam manası ile teorik uyumluluğunun olması gerekmektedir. Bu bağlamda, ilgili tasarımın doğrulamasını yapabilmek adına ANSYS programı kullanılarak tasarım paketin test işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu noktada vurgulanması gereken birkaç nokta bulunmaktadır. Öncelikli olarak şunu vurgulamak gerekir ki, bu çalışma sonucunda elde edilen ürünün temel özellikleri (hassasiyet, çalışma aralığı, çalışma yönü (basma/çekme), merkezi dalgaboyu aralığı vs.) literatür taraması neticesinde belirlenmiştir. Bu temel özelliklerin başında ise çalışma aralığı gelmektedir. Yapılan literatür ve FBG sensör sağlayıcıları analizinde, sıcaklık kompanze FBG sensör paketleri genel itibari ile 2500 ile 3000  $\mu\text{E}$ 'luk yükleri taşıyabilecek kapasitedelerdir. Bu yüzden, mevcut tasarımda da belirlenmiş olan minimum çalışma aralığı  $\pm 3000 \mu\text{E}$  olup, hem çekmeye hem de basmaya karşı reaksiyon gösterebilmektedir. Sonuç olarak, hedeflenen çekme dayanımını test edebilmek adına ilgili paket gerçek senaryoya uygun olacak şekilde, kemik yapıya (bond structure) monte edilmiş ve çekme işlemi bu kemik yapı üzerinden tek tarafı sabit kalacak şekilde yapılmıştır. Durumun daha iyi aktarılabilmesi için tasarım paketin kemik yapıya sabitlenmiş hali ve tek taraflı çekme işlemi için gerekli olan sabitlenmiş destek noktasının (fixed support) konumunu belirten görseller sırası ile şekil 3.5 ve şekil 3.6'da gösterilmiştir.

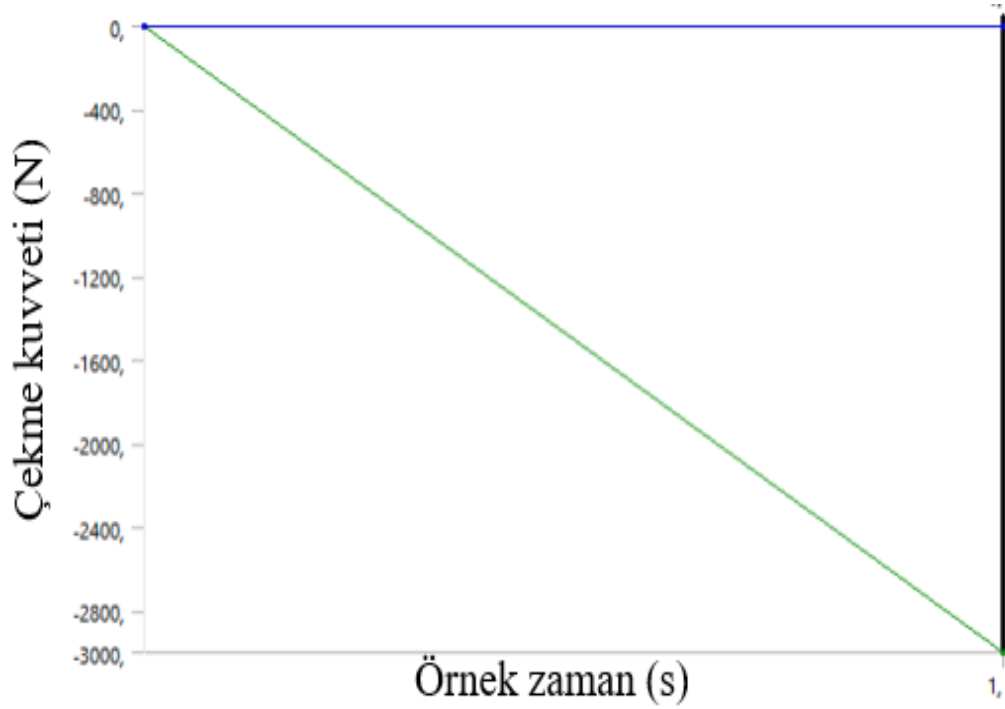


Şekil 3.5: Tasarım paketin kemik yapısı üzerine montajı



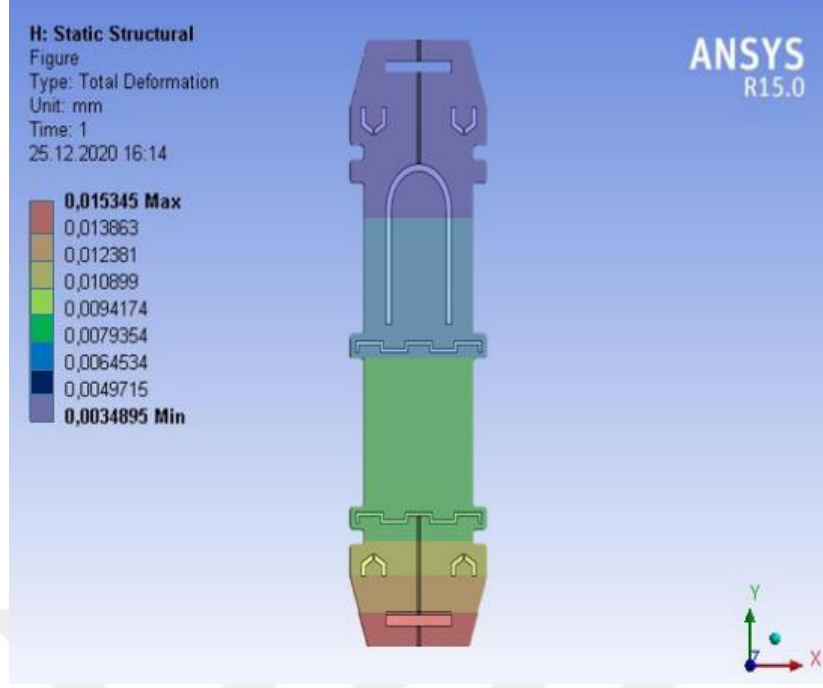
Şekil 3.6: Sabitlenmiş destek noktasının konumu

Toplam deformasyonun ve çekme esnasında paketin doğrusallığının anlaşılabilmesi için çekme işlemi 0 N'den başlayarak 3kN'ye kadar 400 N'lik adımlar ile çekilmiştir. Bu durumu gösteren grafik Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.7:** Çekme testi doğrusallık grafiği

Şekil 3.7’de de gösterildiği üzere, çekme işlemi sırasında paket yapısı doğrusallığını bozmamış ve her birim çekim kuvvetine karşı deformasyon miktarı sabit kalmıştır. Bu durum tercih edilen ham maddenin ve nihai tasarım ürünlerinin güvenilirliğini anlamak açısından oldukça önem arz etmektedir. Yapılan tasarım paketin çekme testinin güvenilirliğini arttıran bir diğer önemli faktörde çekmeye tabi tutulacak olan tasarımın tel örgü (mesh) analizidir. Tel örgü analizi, herhangi bir teste tabi tutulacak olan tasarıma ait sonuçların ne kadar yüksek çözünürlük ve güvenilirliğe sahip olduğunu anlayabilmek açısından çok önemlidir. Bu bağlamda, mevcut tasarımda elde edilen eğriliğe bağlı (skewness) tel örgü (mesh) değeri %95.7 olarak elde edilmiştir ki, bu değer çekme testi sonuçlarının yüksek oranda doğruluğa sahip olduğunu ve elde edilen çıktıların yüksek çözünürlükte olacağını göstermektedir. Doğru bir test işlemi için gerekli kriterler yerine getirildikten sonra ilgili paket yapısı doğrusal çekme işlemine tabi tutulmuştur ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



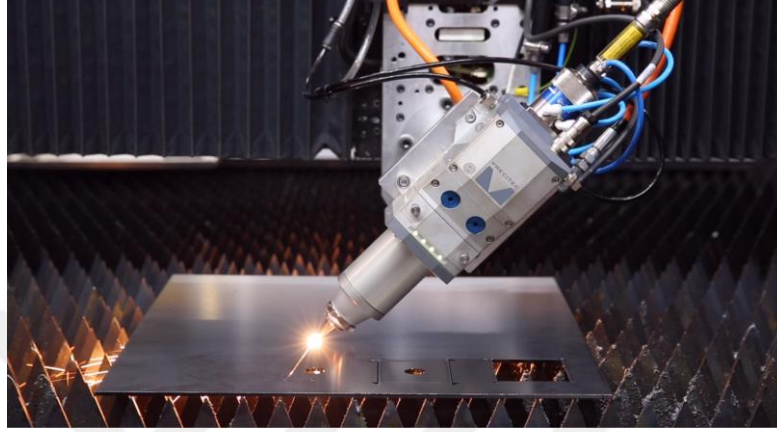
**Şekil 3.8:** Tasarım paket yapısı toplam deformasyon sonucu

Şekil 3.8’de gösterilen tasarım paket yapısı, sıcaklık sensörünün bulunduğu uçtan sabitlenerek pozitif yöne doğru 3 kN’luk bir çekme kuvvetine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlarda ilk öne çıkan paket yapısının 3 kN’luk çekme kuvvetine dayanım göstermesidir. Bunun yanısıra, tasarlandığı şekilde gerinim sensörünün bulunduğu bölge ile sıcaklık sensörünün bulunduğu bölge arasında bir gerinim taşıma farkının olduğu da gözlemlenmektedir. Daha detaylı olarak incelemek gerekirse, gerinim sensörünün yüzeyinde meydana gelen toplam deformasyon, sıcaklık sensörünün bulunduğu yüzeyde meydana gelen toplam deformasyonun yaklaşık olarak üç katıdır. Bu noktada, eğer kompanzasyon işlemi yalnızca paket yapısına bağlı olsaydı ve fiber optik kablonun yerleştirilme metodu ile korelasyon analizi bu süreçte dikkate alınmasaydı, gerinim sensörü ile sıcaklık sensörünün arasındaki bu fark yeterli görülmeyebilirdi. Fakat, mevcut çalışmada kompanzasyon işlemi için fiber optik kablonun yerleştirilmesi ve korelasyon doğrusuna bağlı kalınarak çarpım katsayılarının belirlenmesi ciddi önem arz ettiğinden, aradaki fark yeterli durumdadır.

### 3.3 FBG Paket Yapısının Üretimi

Tasarım aşaması tamamlanan paket yapısının üretim süreci temelde üç adımdan oluşmaktadır. Üretim adımlarından birincisi ilgili kalıbın CNC lazer kesim tezgahı ile kesilmesidir. Bu adımda, daha önceden tasarımı yapılmış olan paket yapısı, 0.1 mm

kesim hassasiyetine sahip olan Ermaksan Makine A.Ş. firmasına ait Fibermak fiber lazer kesim tezgahı kullanılarak kesilmiştir. Kullanılan malzemenin SS304 olması ve yalnızca 1 mm kalınlıkta olması sebebiyle kesim işlemi sırasında malzemenin yamulmaması için kesim yapılacak metal plaka öncelikli olarak ağırlıklar ile sabitlenmiş ve ardından kesim işlemi gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.9:** Paket yapısının lazer tezgahında kesilmesi

Daha sonrasında ise kesilen parça tesfiye edilerek üzerindeki çapaklar ve yanık izleri temizlenmiştir. Henüz üzerinde herhangi harici bir işlem yapılmamış olan parça daha sonra dik işlem tezgahına alınmıştır. Bu aşamada hassas bir işlem yapılacağından dolayı parçanın hareket etmemesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı, parçayı sabitlemek için bir kalıp fikstür üretilmiştir. Üretilmiş olan kalıp fikstür 14 mm paslanmaz çelikten olduğundan dolayı daha masif bir yapıdadır. Buna bağlı olarak, paket kalıp üzerine hareketsiz kalacak şekilde sabitlenebilmiştir. Bu sayede paket yapısının üretimi neticesinde 0.01 mm hassasiyet yakalanabilmiştir.

Bunun yanı sıra, yapılan literatür taramasında görülmüştür ki, FBG tabanlı gerinim sensörü paketlerinde kullanılan her türlü montajlama aparatının (yüzey sabitleme aparatı veya kablo sabitleme aparatı) malzemesinin dikkatli bir biçimde seçilmesi gerekmektedir. Çünkü yüksek neme, sıcaklık değişimine veya diğer çevre şartlarına maruz kalan bu aparatlar zamanla sıklılığını kaybedip gevşemelere sebebiyet vermektedir. Bu durumun meydana gelmesinin temel sebebi ise şudur: Hem FBG tabanlı gerinim sensörü paketi paslanmaz çelik, hem de sabitleme aparatları paslanmaz çelik olduğu halde, eğer bu malzemeler kaliteli bir kaplamaya sahip değil ise zamana bağlı olarak iki parça arasında oksitlenme meydana gelebilmektedir. Bu noktada, mevcut çalışmada bu tarz problemlerin önüne geçebilmek adına fiber optik kablonun

kılıfını pakete sabitlemek amaçlı kullanılacak olan sabitleme aparatının üretiminde paslanmaz çelik yerine, Ti64 kodu ile bilinen titanyum tozundan elde edilmiş 3 boyutlu metal yazıcı çıktısı kullanılmıştır. 3D metal yazıcı çıktısı ile elde edilen aparat Şekil 3.10'da gösterildiği gibi montaj bölgeleri metrik 3 cıvata ile sabitlenebilecek bir şekilde tasarlanmıştır.



a)

b)

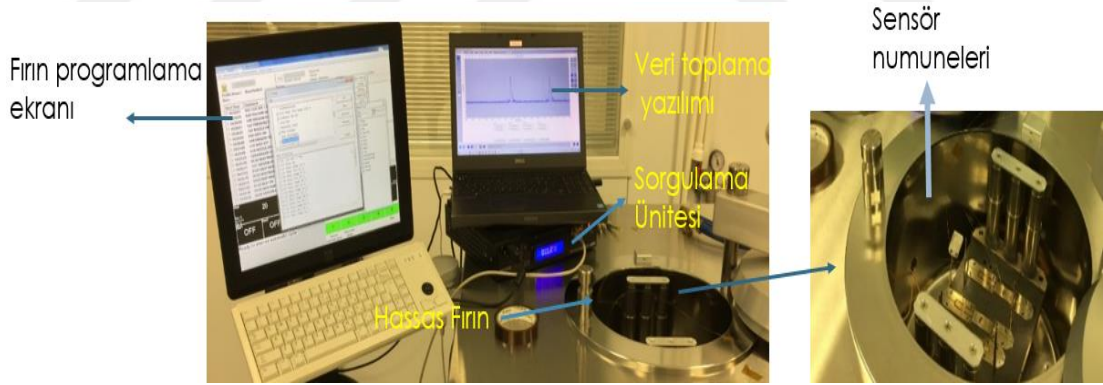
**Şekil 3.10:** a) Aparat yan görünüm, b) Dik görünüm

Üretilen bu aparatın temel görevi, çıplak halde korumasız kalacak olan fiber optik kablonun üzerine geçirilmesi planlanan 3 mm kalınlığındaki poliüretan malzemeden yapılmış kılıfı sıcaklık kompanze gerinim sensörü paketine sabitlemektir. Bu sayede, ürün montajı sırasında fiber optik kablo herhangi bir dikey çekmeye maruz kalmayacak ve fiber optik kablonun kopma riski minimize edilmiş olacaktır. Fiber optik kabloyu paket yapısına sabitleme amaçlı olarak kullanılacak olan yapışkanların tamamen kürlenebilmesi için birkaç günlük bir sürenin geçmesi gerektiği bilinmektedir. Eğer kürlenme tam olarak bitmeden fiber optik kablo yanal bir işleme maruz kalırsa, FBG sensörlerin kendileri için belirlenmiş ve paket tasarım aşamasında gösterilmiş olan yerlerinden kayma ihtimalleri bulunmaktadır. Bu yüzden, mevcut sabitleme aparatı ile fiber optik kablo koruma kılıfı pakete sabitlendikten sonra, iki yüzey arasında kalan boşlukları tamamen doldurabilmek ve nispeten daha masif bir paket yapısı elde edebilmek için Loctite marka süper yapıştırıcı tercih edilmiştir.

#### **3.4 FBG Sensör Yapısını Sıcaklık Kompanzasyon Paketine Sabitleme**

FBG sensörün yerleştirileceği paketin üretimi tamamlandıktan sonraki aşama sensörlü fiberi paket üzerine gerginliğini koruyacak şekilde yapıştırmaktır. Bu aşama stabil bir sıcaklık kompanzasyon işlemi gerçekleştirebilmek için en çok önem verilmesi gereken aşamalardan bir tanesidir. Daha önce bahsedildiği üzere, fiber optik kablo paket yapısının üzerine belli bir gerinim altında sabitlenmiştir. Fiber optik kabloya uygulanacak olan bu gerinim, aslında sensörün ölçüm aralığını da belirleyecek faktördür. Şöyle ki, tasarımı yapılan ürün hem basmayı hem çekmeyi algılayabilecek şekilde çalışmalıdır. Bu yüzden basma algılaması yapılabilmesi için sensörün hali

hazırda gergin bir yapıda olması gerekmektedir. Bu bağlamda, fiber optik kablolama literatüründe pasif sıyrılma etkisi (creep effect) olarak adlandırılan etkiden sensör yapısını kurtarmak için fiber optik kablo ile paslanmaz çelikten olan paket yapısı arasında köprü görevi görecek ve zamana bağlı olarak fiber optik kablonun gerinimini kaybetmesini önleyecek bir yapıştırıcı seçiminin yapılması elzemdir. Bu yüzden, mevcut çalışmada fiber optik komponent sabitleme amaçlı olarak en yaygın kullanılan bazı polimerler ve epoksi yapıştırıcılar denenmiştir. Yapılan bu deney temelde, paket yapısının üzerine aynı şekilde fakat farklı polimerler ile sabitlenmiş FBG sensörlerin hassas fırın içerisinde sıcaklığa maruz bırakılmasına dayanmaktadır. Vakumsuz ve harici basınç olmadan yapılan bu deneyde yüksek hassasiyete sahip ve programlanabilen temiz oda tipi fırın kullanılmıştır. Verilerin analizlerini yapabilmek ve en doğru sonuçları elde edip optimum performans gösterecek yapıştırıcıyı seçebilmek için, piyasada bilinen en yüksek çözünürlük ve doğruluk değerlerine sahip sorgulama ünitelerinden biri olan MicronOptics marka SI255 5kHz (Enhanced Visibility Model) kullanılmıştır. İlgili yüksek hassasiyetli fırın ve yüksek frekanslı ölçüm kabiliyetine sahip sorgulama ünitesini barındıran test düzeneği Şekil 3.11'deki gibidir.



**Şekil 3.11:** FBG sensör paket yapısı sıcaklık testi düzeneği

Şekil 3.11'den de anlaşılacağı üzere, test düzeneğinde iki ayrı program kullanılmaktadır. Bu programlardan ilki fırını istenilen sürede istenilen sıcaklığa çıkması için verilerin girildiği fırın kontrolcüsünün yazılımıdır. Bu noktada, ilgili program aracılığıyla fırın sıcaklığı yaklaşık 18 dakika içerisinde 21 °C'den 70 °C'ye kadar çıkabilecek şekilde ayarlanmıştır. Diğer ekranda ise sıcaklık kompanze paket yapıları fırın içerisine yerleştirilirken FBG sensörlerin genel yapısını kontrol etmek ve mümkün mertebe zarar görmelerini engelleyebilmek adına, genel spektrum

görüntülerinin takip edilebildiği MicronOptics firması tarafından geliştirilmiş olan ENLIGHT programı bulunmaktadır.

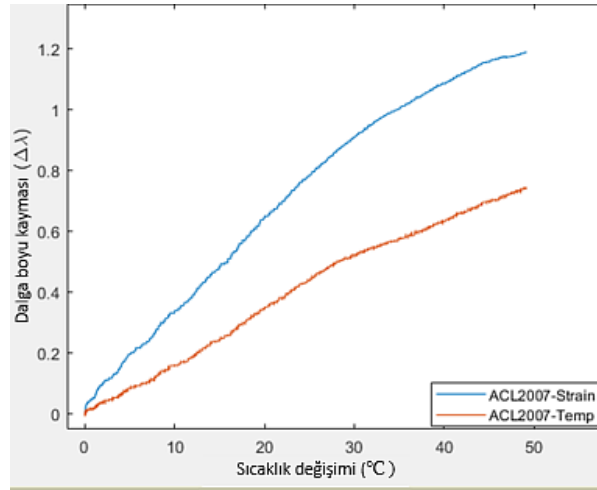
Bunların yanı sıra, FBG sensörlerin genel spektrumlarını ve değişimlerini hassas bir şekilde anlamlandırabilme kabiliyetine sahip olan ENLIGHT yazılımı, veri toplama amacı ile kullanıldığında çok verimli çalışmamaktadır. Şöyle ki, sorgulama cihazına bağlanan sensör yapılarına ait değişimlerin sürekli olarak takip edilebilmeleri için ENLIGHT yazılımı kullanıcılardan, her bir sensörün dalga boyu aralığı, gücü ve band genişliği (maksimum yarısı tam genişlik) gibi bazı veri girdilerini istemektedir. Bu girdileri yazılıma teker teker ve her bir sensör için ayrı ayrı olacak şekilde girmek yazılım kullanımında karmaşaya ve dolayısıyla sensörlerin yanlış bir şekilde anlamlandırılmasına yol açabilmektedir. Bu yüzden, veri toplama işlemi için de çalışmanın ilerleyen safhalarında detaylı bir şekilde anlatılacak olan ve tez çalışması dahilinde geliştirilmiş, LabVIEW tabanlı, sorgulama ünitesinde bulunan her bir kanal üzerindeki tüm FBG sensör yapısını (kanal başı 18 adete kadar) otomatik olarak algılayarak takiplerini yapabilen bir veri toplama yazılımı kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada tercih edilen polimerler ise sırası ile AC L2007, NOA61, Polypro Gen2, 3M8805-NS ve HBM X60 markalı yapıştırıcılardır. Verilen sıralamadaki ilk iki yapıştırıcı UV ile kürlenebilen polimerlerdir. Bu polimerlerin uygun bir şekilde kürlenebilmeleri için iki farklı UV ışık kaynağı kullanılmıştır. Bunlardan bir tanesi yüksek ısı ve UV enerjisine sahip olan UV lamba iken bir diğeri daha kontrollü kürlenme olanağı sunan ve gücü yaklaşık olarak 140 mJ'ye kadar arttırılabilen masaüstü tipi UV tabancadır. İlgili ışık kaynaklarının, yapıştırıcıların kürlenme kalite ve sürelerine etkilerini değerlendirebilmek için tüm yapıştırıcılar her iki ışık kaynağı ile ayrı ayrı sabitlenmişlerdir. Sonuç olarak, UV lambanın paket yapısı üzerinde meydana getirdiği harici ısının kürlenmeyi olumsuz etkilediği ve malzemenin tam kürlenme safhasına geçmeden aşırı kürlenme (over cure) aşamasına geçip yapışkanlık özelliğini kaybettiği görülmüştür. Bu yüzden, paket yapısı üzerinde herhangi harici bir ısı meydana getirmeyen ve kürlenme sürecinin çok daha kontrollü bir şekilde yönetilebildiği masaüstü tipi UV tabanca tercih edilmiştir. Fiber optik kablolama ve optik malzeme sabitleme amaçlı sıkça kullanılan bu yapıştırıcıların karşılaştırma tablosu Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1 : Kürleme materyallerinin kıyaslanması.**

YAPIŞTIRICI	Kürleme Tipi	Sıcaklık Dayanımı	Sıyırılma Payı (Shrinkage)	Esneklik Katsayısı- $\epsilon$ (N/mm <sup>2</sup> )
AC L2007	UltraViyole	0°C -109 °C	< %0.3	2100
NOA 61	UltraViyole	0°C -125 °C	< %1.5	930-1100
Polypro Gen2	Sıcaklık	0°C -120 °C	< %0.3	1400
3M-8805 NS	Sıcaklık	0°C -120°C	< %0.3	1000
HBM X60	Soğuk kürlenme (oda sıcaklığı)	(-)200°C – (+)60°C	-	4000

Birinci numune olarak belirlenen AC L2007 polimeri, masa tipi mor ışık tabancası kullanılarak sabitlenmiştir. Yaklaşık olarak 15 saniye boyunca UV ışığa maruz bırakılan polimer aşırı kürlenmeye (over cure) maruz bırakılmadan yüzeye tam olarak sabitlenmiştir. Bu tip polimerler tercih edildiğinde, işlem süresince polimerin renk takibinin yapılması gerekmektedir. Eğer işlem esnasında polimerlerin yüzeyinde herhangi bir kararına meydana geldi ise bahsi geçen polimer aşırı kürlenmiş (over cured) olarak kabul edilip, yapıştırıldığı yüzeyden çok kolay bir şekilde sıyırılacağı manasına gelmektedir. Bu bağlamda, Çizelge 2.1’de gösterilen polimerlerin sıcaklık dayanım limitleri ve veri dökümanlarında bahsedilen uygulama süreleri (expose time) dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, birinci numune başarılı bir şekilde pakete kürlenmiş ve fırın testine alınmıştır. Elde edilen test çıktısı Şekil 3.12’de verildiği gibidir.



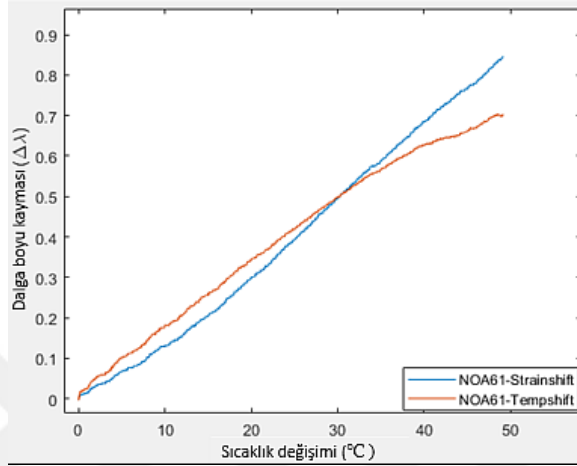
**Şekil 3.12:** AC L2007 ile sabitlenen sensörlerinin sıcaklık değişimine reaksiyonu

Daha önce bahsedildiği gibi çalışma sonucunda elde edilen paket yapısının maksimum sürekli çalışma sıcaklığı 70°C olarak planlanmıştır. Bu yüzden, sıcaklık testinde de başlangıç sıcaklığı 20°C, bitiş sıcaklığı ise 70°C olarak kabul edilmiş ve Şekil 3.12’de

bu sıcaklıklar arasındaki değişime bağlı olarak paket üzerindeki her iki sensörün de dalga boyu kaymaları gösterilmiştir. Şekil 3.12'den de anlaşılacağı üzere, iki sensör de aynı paket yapısının üzerinde olmasına ve özdeş sıcaklıklara maruz kalmasına rağmen, sensörlerden bir tanesi diğerine göre yaklaşık bir buçuk kat fazla tepki vermiştir. Önceki kısımlarda da aktarıldığı üzere sıcaklık ile gerinim arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır ve gerinim sensörü paket üzerine 4N'lik bir çekme kuvveti altında sabitlenmektedir. Dolayısı ile paket üzerinde yük altında duran gerinim sensörünün daha fazla tepki göstermesi sabitleme işleminin doğru yapıldığını göstermektedir. Ayrıca Şekil 3.12'den de anlaşılacağı üzere, sıcaklık farkı arttıkça sensörlerin arasındaki dalgaboyu kayması miktarı farkı artmaktadır. Bu durumun temel sebebi de, yine gerinim sensörünün yük altında sabitlenmiş olmasıdır. Ani sıcaklık değişimleri yük altındaki sensör tarafından çok daha erken hissedilebilirken, yük altında olmayan sıcaklık sensörünün ısıyı biraz daha geç ve daha az yoğunlukla iletmesi olağan bir durumdur. Sıcaklık değişimine bağlı olarak dalga boylarının arasındaki farkın en az oranda olması her zaman tercih sebebidir. Çünkü, aradaki bu farkın matematiksel olarak modellenmesi gerekmektedir. Aksi halde kompozisyon verimi düşük olacak ve ilgili paket yapısı işlevselliğini yitirecektir. Ayrıca, paket yapısının taşınması, montajı veya sökülmesi sırasında fiber optik kablo miktarı bilinmeyen çeki kuvvetine maruz kalacaktır. Bu tarz durumlarda da ilgili polimerin paket yüzeyine kuvvetli bir şekilde tutunması gerekmektedir. Bu durumu özetler nitelikteki parametre çekme pay (shrinkage) olarak Çizelge 2.1'de verilmiştir. Her ne kadar AC L2007 kodlu polimer için bu değer yalnızca % 0.3 olarak verilse de, montaj sonrasında yapılan tesfiye işlemleri sırasında görülmüştür ki, mevcut polimer kalıp halinde paketten sıyrılmakta ve gerinimsiz hale gelmektedir. Bu durum bahsi geçen yapıştırıcıyı bu uygulama için işlevsiz kıldığından sıcaklık kompanze paket yapısı sabitleme yapışkanı olarak tercih edilememektedir. Yapılan deneysel laboratuvar çalışmaları göstermiştir ki, bu polimerin pürüzlü yüzeylere tutunma verimi pürüzsüz yüzeylere göre çok daha yüksektir. Bu bağlamda, bahsi geçen polimer malzeme pürüzlü yüzey montajlarında fiber optik sabitleme yapışkanı olarak tercih edilebilir.

Bir diğer UV ile kürlenebilen polimer tipi de NOA61'dir. Plastik yüzeylere fiber optik kablo sabitleme konusunda mükemmel performansa sahip olan bu polimerin nispeten yüksek çekme payına rağmen metal yüzeylere de çok iyi tutunduğu kütleme esnasında

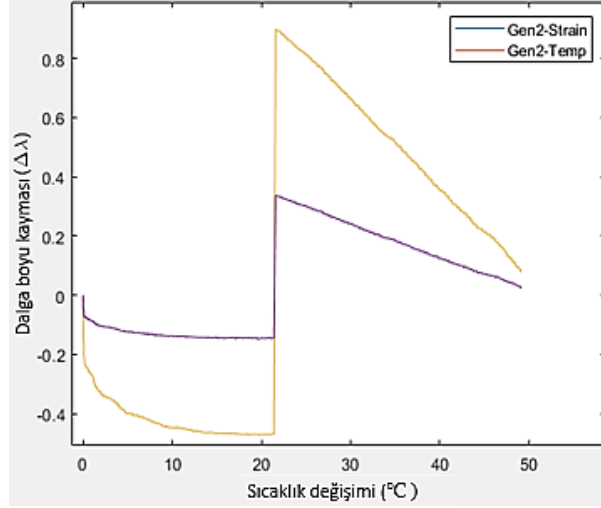
tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra yüksek sıcaklık dayanımı, düşük çekme payına sahip olması, kolay uygulanabilmesi ve kürlenme süresinin kısa olması da bu polimeri tercih sebebi yapabilir. Şekil 3.13'ten de anlaşılacağı üzere, NOA61 kullanılarak sabitlenmiş olan paket yapısı içerisindeki FBG tabanlı gerinim sensörü ile sıcaklık sensörü arasındaki ilişki yaklaşık 32 °C'ye kadar doğrusallığını korurken bu noktadan sonra aralarındaki ilişki doğrusal olmayan bir hal almıştır.



**Şekil 3.13:** NOA61 ile sabitlenen sensörlerinin sıcaklık değişimine reaksiyonu

Bu durum sensörün operasyonel stabilliğini bozacağı için NOA61 kodlu yapıştırıcının tek başına bir sabitleme ara elemanı olarak kullanılması bu çalışma için uygun görülmemiştir.

Uygun polimer seçimi araştırma sürecinde yüksek tutuş gücü, yüksek sıcaklık dayanımı ve düşük sıyrılma payı ile öne çıkan bir polimer olan Polypro Gen2 de teste dahil edilmiştir. Bu polimer düşük viskoziteli olup, optik malzemelerin birbirlerine sabitlenmesinde sıkça kullanılan bir üründür. Nispeten daha az erişilebilir ve yüksek maliyetli olan bu polimer havacılık uygulamalarında tercih edilen bir üründür. Bu bağlamda, diğer polimerler ile birlikte aynı hassas fırında sıcaklık testine tabi tutulan bu polimere ait sonuç Şekil 3.14'te verildiği gibidir.



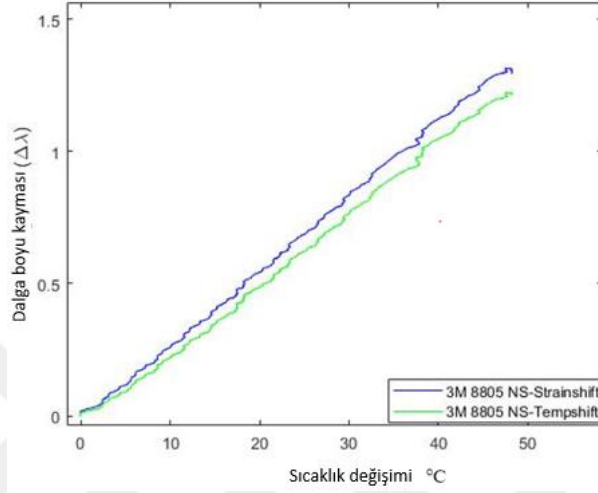
**Şekil 3.14:** Gen2 ile sabitlenen sensörlerin sıcaklık değişimine reaksiyonu

İki optik malzeme arasında tampon bölge görevi gördüğünde yüksek performans gösteren Polypro Gen2 kodlu polimerin paslanmaz çelik ve cam arasında tampon bölge olma kabiliyetini tümüyle yitirdiği görülmüştür. Şekil 3.14'ten de anlaşılacağı üzere, sıcaklık arttırıldığında gerinim sensörünün daha yüksek tepkiler vermesi gerekirken sıcaklık sensörü ön plana çıkmıştır. Bu durum, gerinim sensörü sabitlenirken uygulanan çekme kuvvetinin sabitlemeden sonra muhafaza edilemediğini göstermektedir. Her ne kadar yüksek tutuş gücüne sahip olsa da, fiber optik kablonun üzerindeki poliamid kaplama ile paslanmaz çelik arasında yeterli düzeyde sabitleme yapılamamıştır. Ayrıca, test başlangıç sıcaklığı olan 20°C'den 42°C'ye kadar fibere bir miktar tutunur vaziyette olan yapıştırıcının 42°C'den sonra kimyasal yapısı tamamen bozulmuştur. Mevcut çalışmada hedeflenen maksimum çalışma sıcaklığı 70°C ve sıcaklık ile gerinim sensörü arasında doğrusallıktan çok uzakta bir ilişki olduğundan, bu polimerin mevcut çalışmada tercih edilebilir bir ürün olması mümkün görülmemiştir.

Test aşamasına dahil edilen bir diğer yapıştırıcı ise 3M firmasına ait 8805 NS kodlu akrilik yapıştırıcıdır. Çizelge 2.1'de gösterildiği üzere, polimer bazlı yapıştırıcılar ile benzer özellikleri taşıyan bu yapıştırıcı malzeme hızlı kürlenme ve yüksek tutuculuk özellikleri ile ön plana çıkmaktadır.

Şekil 3.15'te gösterilen grafikte, sıcaklık artışına karşın dalgaboyu grafiği verilen 3M 8805 NS kodlu yapıştırıcı görselden de anlaşılacağı üzere, sıcaklığa karşı doğrusal bir tepki vermiştir. Bu noktada, yukarıda detaylandırılan NOA61 ve Polypro GEN2

yapıştırıcılarından bu yönüyle ayrılan 8805 NS'nin en büyük dezavantajı fiber ile paslanmaz paket yapısı arasındaki bağı koruyamaması olarak tespit edilmiştir. Daha önce açıklandığı üzere, FBG yazılı olan fiber optik sensör yapısı 4N'lik bir ön çekme kuvvetine maruz bırakılarak pakete sabitlenmektedir. Bu süreç boyunca hazırlanmış olan veri toplama yazılımı ile ilgili gerinim sensörünün merkez dalga boyu anlık olarak takip edilmektedir.



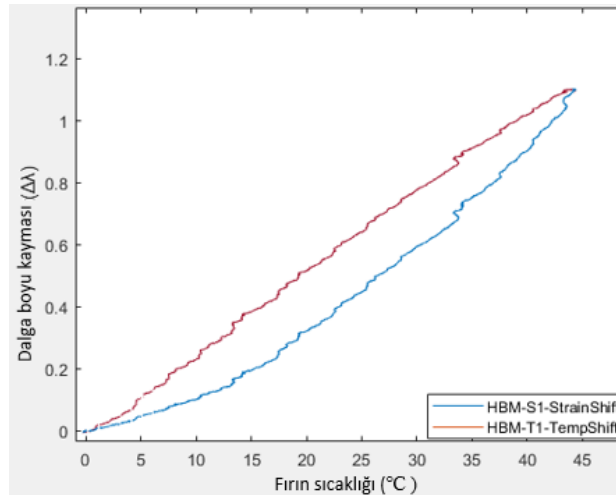
**Şekil 3.15:** 3M 8805 NS ile sabitlenen sensörlerin sıcaklık değişimine reaksiyonu

Bu süreçte görülmüştür ki, fiber optik kabloyu metal pakete sabitlemek için kullanılan 8805 NS yapıştırıcısının tamamen kürlenmesinin ardından çekme kuvveti ortadan kaldırıldığında, merkezi dalga boyu ciddi oranda düşmektedir. Bu yüzden 8805 NS kodlu yapıştırıcı kullanılarak hazırlanan paket yapılarında planlanan gerinim skalası olan  $\pm 2500 \mu\epsilon$  değerini yakalamak çok mümkün olmayacaktır.

Üzerine iki adet FBG sensör yazılmış olan fiber optik kabloyu metal paket yapısına sabitlemek için denemesi yapılan son malzeme HBM firmasına ait X60 yapıştırıcısıdır. Soğuk kürlenme özelliği sayesinde herhangi harici bir müdahaleye ihtiyaç duymayan bu yapıştırıcı, genellikle gerinim ölçerleri metal ve plastik yüzeye sabitlemek amacı ile tercih edilmektedir. Mevcut uygulamada ise poliamid kaplı fiberi metale yapıştırmak için denenmiş olan bu malzeme ilk olarak gerinim sabitleme testine tabi tutulmuştur. Fiber optik kablolar için tasarlanmış hassas çeki kuvveti (0.001N/sn) uygulayabilen doğrusal çekim fikstürüne uygun şekilde pozisyonlanan metal paket yapısının içerisinden geçirilen fiber optik kablo, fikstürün her iki ucundaki fiber tutuculara (holder) yerleştirilmiştir. Ardından fikstür 4N'lik çeki kuvveti yapılacak şekilde programlanmıştır. Bu aşamada, daha önce yapılan deneylerde de görülmüştür

ki, çıplak haldeki fiber Bragg ızgara sensörlerinin merkezi dalga boyu 1N kuvvetinde çekildiğinde 1.2nm'lik bir kayma meydana gelmektedir. Bu bağlamda, fikstür üzerine yerleştirilen fiber optik kablo da 4N'lik çeki kuvvetine maruz bırakıldığında yaklaşık olarak 4.8nm'lik bir kayma meydana gelmiştir. Kullanılan yapıştırıcının fiber optik kabloyu ne kadar sağlam tuttuğu da bu kayma miktarının gözlemlenmesi ile anlaşılmaktadır. Yaklaşık olarak on beş dakikalık bir soğuk kütleme sürecinden sonra, fikstürün çekme kuvvet motoru devre dışı bırakılmıştır. Bu aşamada diğer yapıştırıcıların testinde yukarıda açıklandığı üzere fiber optik kabloyu tutamama durumu gözlemlenirken bu yapıştırıcıda durum öyle değildir. Çeki kuvvetinden kurtulan fiber optik kablo üzerindeki FBG sensörlerin merkezi dalga boylarında neredeyse herhangi bir değişiklik görülmemiştir. Böylece yapılan ilk testin sonucunda, HBM X60 yapıştırıcısı ile hedeflenen  $\pm 2500 \mu\epsilon$ 'luk ölçüm aralığının üzerine çıkılabildiği görülmüştür.

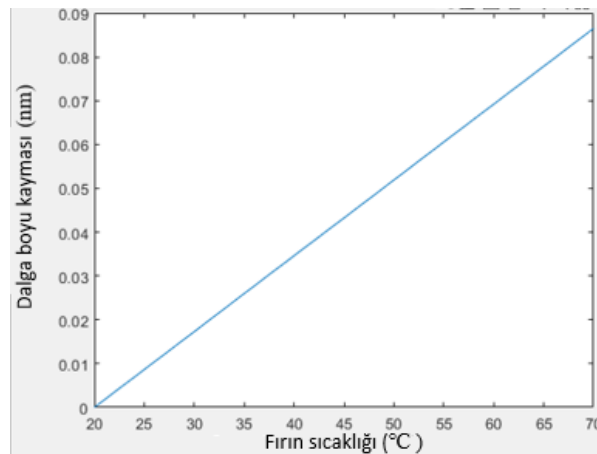
Uygun malzemenin seçimi için dikkate alınması gereken bir diğer kriter de, seçilen yapıştırıcının daha önce belirlenmiş olan sıcaklık limitlerinde doğrusallığını bozmadan çalışabilmesidir. Bu bağlamda, ilk montajı yapılmış olan paket yapısı diğer paketler ile aynı fırın testine tabi tutulmuştur. Çizelge 2.1'de de gösterildiği üzere, bu yapıştırıcının maksimum çalışma sıcaklığı 60 °C olarak verilmiştir. Bu kriterler göz önünde bulundurularak yapılan testten elde edilen sonuçlar Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



**Şekil 3.16:** HBM ile sabitlenen sensörlerin sıcaklık değişimine reaksiyonu

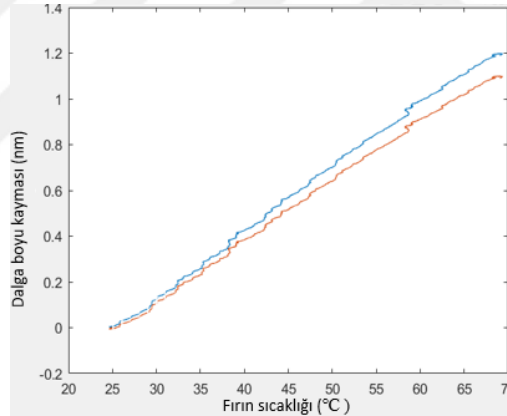
Şekil 3.16'da, 25 °C'den başlayarak 70 °C'ye 8 dakika içerisinde ulaşan fırının içerisine HBM X60 yapıştırıcısı ile sabitlenmiş olan sıcaklık kompanze paket yapısının verileri gösterilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, 4N'lik bir çekme kuvveti ile pakete sabitlenen gerinim sensörü sıcaklığa karşı daha yüksek bir reaksiyon verdiğini ortaya koymuştur. Üzerinde durulması gereken bir diğer kriter ise devamlı artış trendinde olan sıcaklık değerine karşı FBG sensörlerin tepkileridir. Elde edilen sonuçlar göstermiş ki, her iki sensör de farklı hassasiyetlere sahip olmalarına rağmen sürekli bir yükseliş trendi içerisindedirler. Ayrıca, her ne kadar HBM X60 yapıştırıcısının veri dökümanında verilen çalışma sıcaklığı üst limiti 60 °C olarak belirtilse de, test neticesinde paket yapısının 60 °C üzerindeki sıcaklıklarda dahi doğrusallığını bozmadığı görülmüştür. Tüm bunların yanı sıra, ilgili yapıştırıcının fiber optik kabloyu herhangi bir gevşeme emaresi göstermeden tutabilme kabiliyeti de, ilgili paketin değişen sıcaklık değerlerinde hassasiyetini ve gerinim algılama aralığını sabit tutacağını kanıtlar niteliktedir.

Sıcaklık kompanzasyon işleminin tam olarak yapılabilmesi için, mümkün mertebe minimum hesaplama olması ve paket çıktılarının doğrusallığını koruması da oldukça önemlidir. Bu noktada, Şekil 3.16'da gösterildiği üzere, ön gerinim altında sabitlenmiş olan gerinim sensörünün sıcaklığa karşı tepkisi ile herhangi bir gerinime maruz bırakılmadan paket yapısına sabitlenen sıcaklık sensörünün tepkisinin arasındaki fark, yükselen sıcaklık altında artmaktadır. Sensörlerin arasındaki bu farkın değişen sıcaklığa göre grafiği de Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.17:** Sıcaklık değişiminin gerinim ve sıcaklık sensörlerinin farkına etkisi

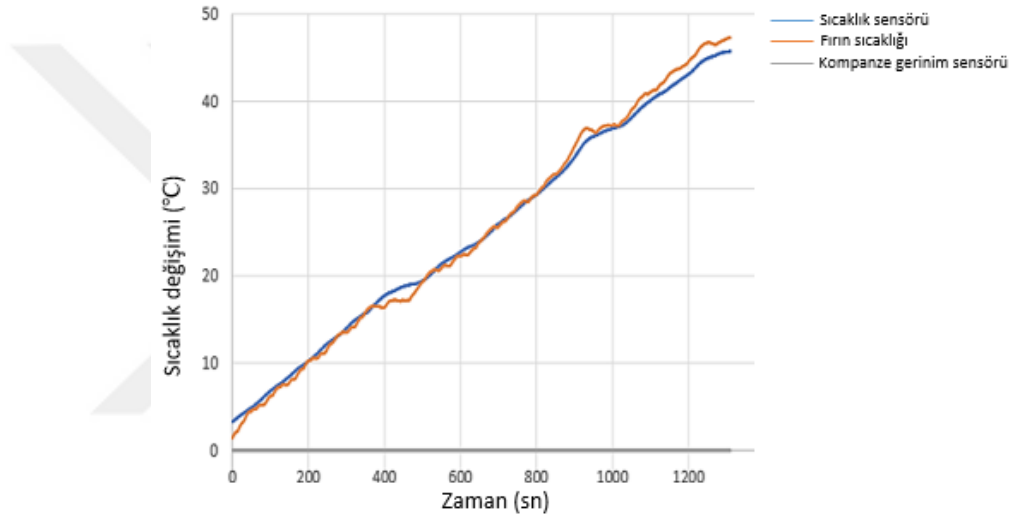
Şekil 3.17'den de anlaşılacağı üzere, her iki sensörün arasındaki fark yükselen sıcaklık değerine bağlı olarak 0.09nm (90pm)'ye ulaşmaktadır. Tekrarlanan test sonuçlarında elde edilen sonuçlar doğrusallığını koruduğundan, HBM X60 markalı yapıştırıcının montaj iyileştirmesi için bazı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu bağlamda öncelikli olarak, ilk başta herhangi bir ön gerinim (pre tension) uygulanmadan pakete sabitlenen sıcaklık sensörü, 1N'lik çekme kuvveti altında sabitlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sıcaklık sensörü gerinim altında sabitlenmiş olsa dahi paket yapısının geometrisinin herhangi bir gerinim aktarımına olanak sağlamadığını göstermiştir. Bu şekilde olumlu bir sonuç alınmasının ardından, sıcaklık sensörü sırası ile 2N, 3N ve 4N'lik çekme kuvvetleri altında sabitlenmiştir. Sıcaklık ve gerinim sensörü arasındaki doğrusallığın doğrudan ön gerinim değeri ile orantılı olduğu görüldüğünden, sıcaklık sensörünün 4N'lik çekme kuvveti altında sabitlenmesine karar verilmiştir. Elde edilen iyileştirilmiş sonuç Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.18:** Ön gerinim altında sabitlenen FBG sensörlerin sıcaklık reaksiyonu

Şekil 3.18'den de görülebileceği üzere, sıcaklık sensörü 4N değerindeki çekme kuvveti altında sabitlendiğinde, iki sensörün sıcaklık hassasiyetleri birbirlerine oldukça yaklaşmakta olup, kompanzasyon oranı %95 civarındadır. Kritisize edilmesi gereken bir diğer durum da, üretilen sıcaklık kompanze FBG paket yapısında elde edilen değerlerin tekrarlanabilirliğidir. Bu bağlamda, yapılan sıcaklık testlerinde ilgili paket yapısı üzerindeki sıcaklık sensörünün bir santrigrat derecelik değişime tepkisi yaklaşık olarak 30 pm olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu verinin tekrarlanabilirliğini tespit edebilmek için sıcaklık testi, özdeş şartlarda üretilmiş üç adet sıcaklık kompanze FBG paket yapısının aynı anda fırına yerleştirilmesi suretiyle tekrarlanmıştır. Aynı

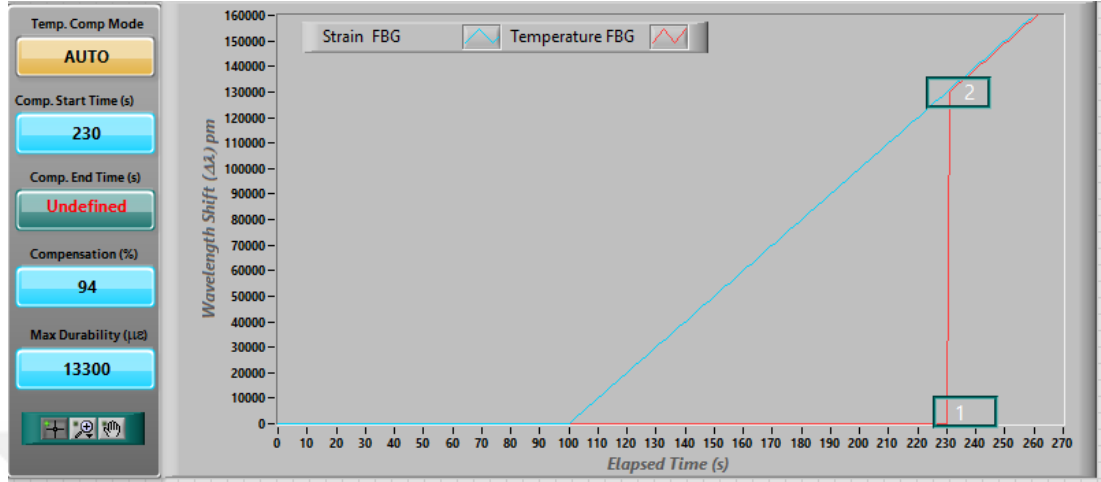
zamanda, fırın sıcaklık sensöründe anlık olarak takip edilen ortam sıcaklık değişimi ile FBG sensör yapısı tarafından tespit edilen sıcaklık değişimini anlık olarak kıyaslayabilmek için veri toplama yazılımına sıcaklık indikatörü yerleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, sıcaklık kompanzasyonunun sağlanıp sağlanmadığını tam olarak tespit edebilmek amacı ile yazılıma sıcaklık kompanzasyon modu eklenmiştir. Bu modun çalışma prensibi, FBG paket yapısı üzerindeki sıcaklık sensörü üzerinde meydana gelen değişimin, gerinim sensörü üzerinde meydana gelen sıcaklığa bağlı gerinim değişiminden çıkartılmasına dayanmaktadır. Bu yaklaşımların da eklenmesi ile birlikte tekrar edilen sıcaklık testine ait sonuçlar Şekil 3.19’da gösterildiği gibi olmuştur.



**Şekil 3.19:** Ön gerinim ile sabitlenen FBG sensörlerin fırın sıcaklığı ile ilişkisi

Şekil 3.19’den da görüldüğü üzere, yapılan iyileştirmeler ile birlikte fırın sıcaklığının etkisi, sıcaklık kompanze paket yapısı üzerindeki sıcaklık ve gerinim sensörleri tarafından aynı oranda hissedilmiştir. Bu sayede, paket yapısı üzerindeki sıcaklık sensöründe hissedilen sıcaklık değişimi, paket yapısı üzerindeki gerinim sensörü tarafından hissedilen sıcaklık değişiminden çıkartıldığında, kompanze gerinim sensörünün tepkisi maksimum 20 pm olacak şekilde gözlemlenebilmiştir. İlgili sensör yapısı üzerinde yapılan testler sonucunda, ölçülen sıcaklık hassasiyetinin 30 pm/1°C olması göz önünde bulundurulduğunda, iki sensör arasındaki maksimum sıcaklık farkı en yüksek sıcaklık değişimlerinde dahi 1 °C’den daha düşük bir seviyededir. Bu durum hassas fırın ile sıcaklık testi esnasında da titizlikle incelenmiştir.

Şekil 3.20’de gösterilen yazılım ekranı kesitinden de anlaşılacağı üzere, ölçüm esnasında yazılım modu aktif olduğunda, sıcaklık kompanze paket üzerindeki gerinim sensörünün toplam dalgaboyu kayması 10pm’den daha aşağıdadır.



Şekil 3.20: Veri toplama yazılımı kompanzasyon modlarının gösterimi

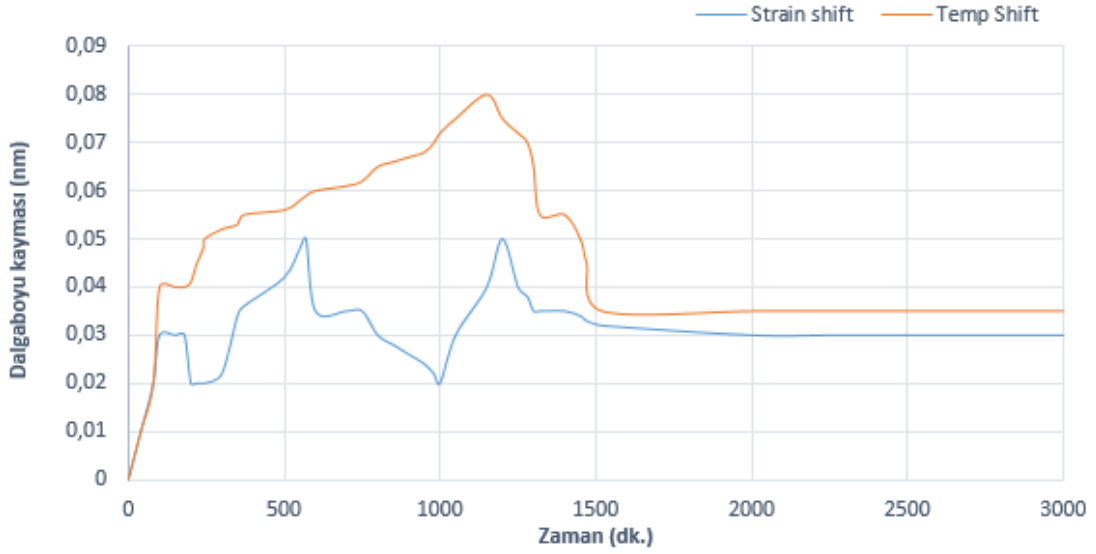
Daha önce de aktarıldığı üzere, bu değer gerinim sensörü üzerinde meydana gelen sıcaklığa bağlı dalgaboyu kaymasından, sıcaklık sensörü üzerinde meydana gelen sıcaklığa bağlı dalgaboyu kayması çıkartılarak elde edilmektedir. Şekil 3.20’de (1) ile gösterilen noktaya kadar baskılama modu açık olan yazılım sayesinde gerinim sensörü dalgaboyu kayması miktarı çok düşük seviyelerde iken sıcaklık baskılama modu deaktif edildiğinde, gerinim sensörü üzerinde meydana gelen sıcaklık etkisinin aslında (2) ile gösterilen noktadaki seviyelerde olduğu gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, detaylı bir tasarım ve hassas bir üretim alt yapısına sahip olan sıcaklık kompanze gerinim sensör paket yapısı sıcaklık testinde istenilen performansı yakalayabilmiştir. Bu çalışma başında bahsedilmiş olan operasyonel sıcaklık limiti olan 70°C’de de devamlı olarak veri ölçümü gerçekleştirilebilmiştir.

#### 4. GERİNİM GEVŞEME TESTLERİ

Literatürde gerinim gevşemesi (stress-relaxation), yük altındaki malzemenin zamana bağlı olarak maruz kaldığı toplam deformasyonun ölçümü olarak tanımlanmaktadır. Belirli sıcaklıklarda sürekli yükün altında kalacağı ön görülen malzemelerde gerinim gevşeme testinin yapılması gerekmektedir. Gerinim gevşemesi testi her ne kadar FBG sensörlerin üretim standartı olan TS EN 61757-1-1 standartında yalnızca bir önerge formatında verilmiş olsa da, ASTM E139, ASTM D2290, ASTM D2291 ve ASTM D2294 gibi standartlar gerinim gevşemesi (creep effect) testini mecbur kılmaktadır. Bu bağlamda, mevcut çalışmada iki farklı yaklaşım ile gerinim gevşeme testi yapılmıştır. İlk yaklaşım, paket yapısı üzerine sabitlenmiş olan FBG sensör yapısının, yük altında olmadan 48 saat boyunca dalgaboyu takibini içermektedir. İkinci yaklaşımda ise bir önceki numunedeki şartlar ile özdeş bir şekilde üretilen FBG sensör paket yapısının yaklaşık olarak  $3650 \mu\epsilon$ 'lik bir yüke maruz bırakılmasıdır. Yaklaşık olarak 91 saat boyunca  $3650 \mu\epsilon$ 'lik bir yük altında olan bu paket yapısından veri toplanmıştır. Elde edilen sonuçlar takip eden bölümlerde detaylandırılmıştır.

##### 4.1 Yüksüz Gerinim Gevşeme Testi (Strain Relief Creep Test)

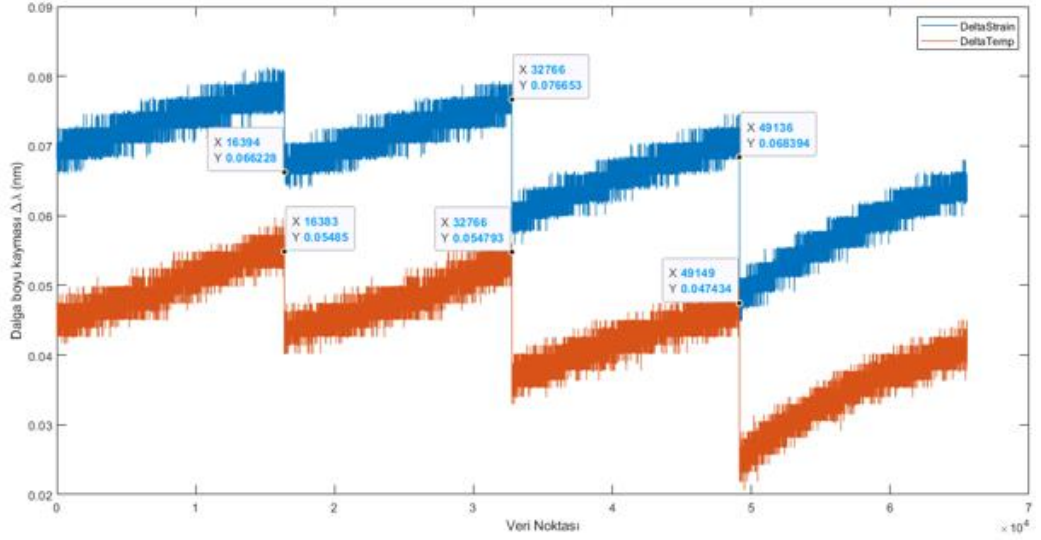
FBG sensör yapısı, sıcaklık kompanze paket yapısının üzerine HBM X60 yapıştırıcısı kullanılarak 4N'lik bir gerinim altında sabitlenmiştir. İlgili yapıştırıcının kullanım kılavuzunda verildiğine göre soğuk kürlenebilen bu malzemenin oda sıcaklığında tam kürlenme süresi 10-30 dakika arasındadır. Dolayısı ile yüksüz gerinim gevşeme testinde elde edilen verilerin ilk 30 dakikalık kısmı analiz noktasında ciddi bir önem arz etmemektedir. Bu bağlamda, yüksüz bir şekilde 2880 dakika boyunca takip edilen sıcaklık kompanze paketin yüksüz gerinim gevşeme testi sonucu Şekil 4.1'de verildiği gibi olup, detaylı incelenmesi ise Şekil 4.2 üzerinden tamamlanmıştır.



**Şekil 4.1:** Paket yapısının 2880 dakikalık yüksüz gerinim test sonucu grafiği

Şekil 4.1'den de görülebileceği üzere, grafiğin ilk 30 dakikalık bölümünde çok ciddi bir yükseliş söz konusudur. İlk 30 dakikalık süre zarfında sıcaklık kompanze FBG tabanlı sıcaklık sensöründe toplam 0.03 nm'lik bir dalga boyu kayması meydana gelirken, aynı paket yapısı üzerindeki gerinim sensöründe 0.04 nm'lik bir dalga boyu kayması meydana gelmiştir. Kurlenme sonrasındaki ilk 150 dakikalık bölümde her iki sensör yapısı da çok küçük değişimlerin dışında kritik seviyede bir değişim göstermemiştir. Fakat, testin 180. dakikasından 1140. dakikasına kadar olan bölümde, dalgaboyu kaymasında ivmeli bir yükseliş meydana gelmiştir. En fazla dalgaboyu kaymasının tespit edildiği 1140. dakikadaki gerinim sensöründe dalgaboyu kayması 0.08 nm iken sıcaklık sensörü için bu değer 0.05 nm'dir. Bundan sonraki süreçte meydana gelen değişimler çok küçük miktarda olup, sıcaklık sensörünün grafiği analiz edildiğinde, bu küçük değişimlerin ortam şartlarındaki çok küçük farklılıklardan meydana geldiği düşünülmüştür.

Yaklaşık olarak 48 saat süren veri toplama sürecinin içerisinde bir kesit alındığında, Şekil 4.2'de gösterilen grafik elde edilmektedir. İlgili görsele bakıldığında, mavi renk ile gösterilen gerinim sensörünün dalgaboyu kaymasının düşüş hızı ile sıcaklık sensörüne ait dalgaboyu kayma hızı birebir örtüşmektedir. Gerinim gevşeme (creep) sürecinin de aynı periyotta tekrarlandığı görülmektedir. Bu da, HBM X60 markalı yapıştırıcının karakteristik özelliğini ciddi oranda muhafaza ettiğini ve FBG sensörlerin paket yapısına montajı için uygunluğunu tekrar göz önüne sermektedir.



**Şekil 4.2:** Yüksüz gerinim test grafiği kesiti

## 4.2 Yük Altında Gerinim Gevşeme Testi

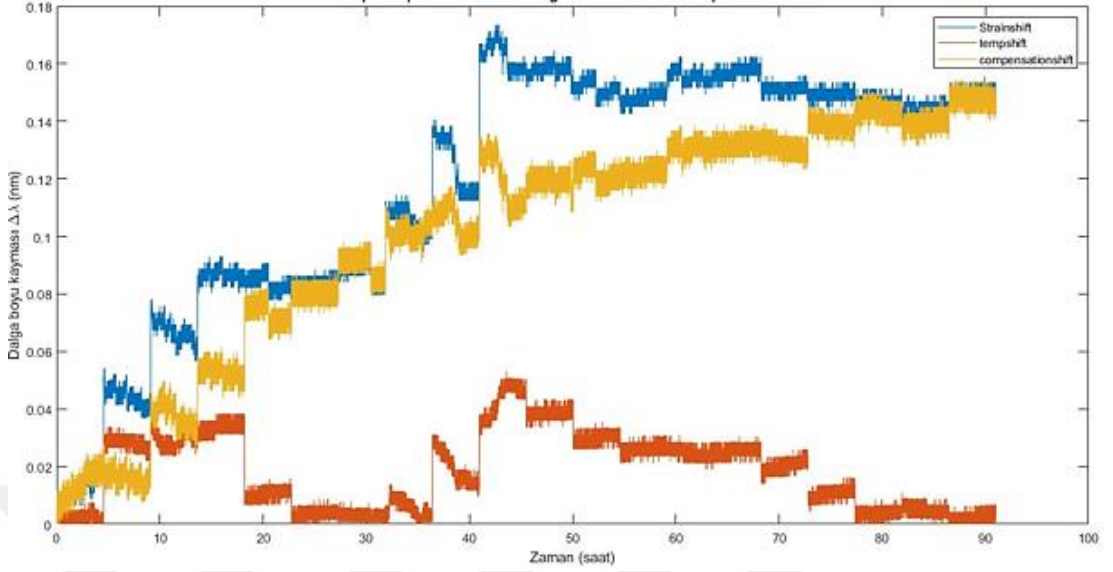
Yüksüz gerinim gevşeme testinin ardından, FBG sensör yapılarının uzun süre üst limit değerlerinde yüke maruz bırakılma durumları göz önünde bulundurularak yük altında gerinim gevşeme testine de tabi tutulmuştur. Bu test için FBG sensör yapısına bir yük aktarma aparatı hazırlanmış ve yaklaşık olarak 143 N'lik bir çekme kuvveti uygulayabilecek şekilde (14.650 kg ağırlığında bir yük vasıtası ile) Şekil 4.3'te gösterildiği gibi yük aktarma aparatı aracılığı ile sıcaklık kompanze FBG sensör paketine bağlanmıştır.

Şekil 4.3'te gösterilen test düzeneğine yerleştirilmiş olan ve üzerinde 14.650 kg'lık bir yük bulunan sıcaklık kompanze FBG sensör paket yapısı, MicronOptics SI255 sorgulama ünitesi ile 90 saat boyunca takip edilmiştir.



**Şekil 4.3:** Yük altında gerinim gevşeme test düzeneği

Beş gün boyunca 2Hz'lik bir ölçüm frekansı ile takip edilen bu teste ait elde edilen sonuçlar Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.4:** Yük altında gerinim gevşeme test sonucuna ait grafik

Şekil 4.4'ten de görülebileceği üzere, yükleme sonrasındaki ilk 24 saat içerisinde merkezi dalga boyu yaklaşık olarak 0.05 nm artmıştır. Bu 24 saati takiben, paket yapısı üzerinde 15 saat boyunca ciddi bir değişiklik meydana gelmezken, daha sonra yaklaşık olarak 32 saat süren bir gevşeme süreci olmuş ve FBG sensörlerin dalga boyları yaklaşık olarak 0.05 nm azalmıştır.

## 5. SICAKLIK KOMPANZE FBG PAKET YAPISININ ÇEKME TESTİ

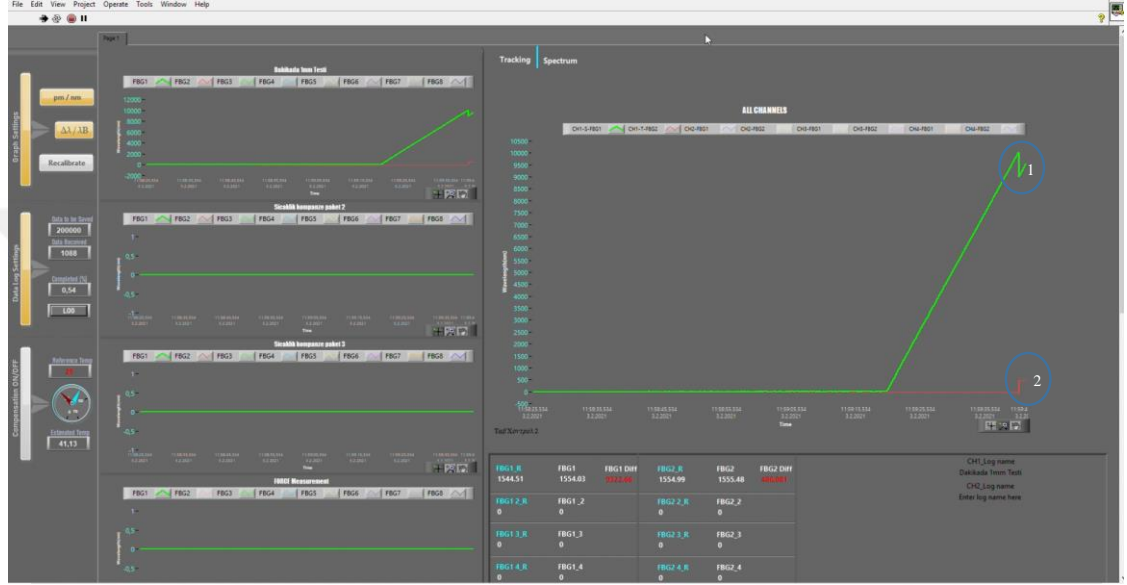
Çekme testi için 4 adet sıcaklık kompanze FBG tabanlı gerinim sensör paketi özdeş koşullarda hazırlanmıştır. İlgili paketlerin çekme testinde sensörlerin doğrusallığı, hassasiyeti, FBG sensör paketlerinin akma ve kopma mukavemet noktalarının tespiti tamamlanmıştır. Bu bağlamda, her bir paket yapısı için dalga boyu kayma miktarı ve çekme test cihazındaki stroke değeri kayıt altına alınmıştır. Bahsi geçen verilerin toplanmasındaki temel amaç, FBG sensör yapıları üzerindeki tek standart olarak bilinen ve TSE standartları arasına da katılan TS EN 61757-1-1 : 2017-04 numaralı standarta uygun bir test gerçekleştirebilmektir. İlgili test için Bursa Teknik Üniversitesi Mekanik Laboratuvarı bünyesindeki Shimadzu AGS-X 250kN çekme test cihazı kullanılmıştır. Yüksek hassasiyet ve doğrulukta çalışan bu sisteme ait çene yapıları yalnızca 1mm kalınlığında ve hassas bir şekilde işlenmiş olan paslanmaz çelik paket yapısı için uygun görülmüştür.

Sıcaklık kompanze paket yapısı Şekil 5.1’de gösterilen çekme test sistemine dikkatli bir şekilde yerleştirilmiştir. Test öncesinde, çekme cihazına bağlanan paket yapısının tam olarak çeneler tarafından kavrandığını anlayabilmek adına sistem sırası ile yükleme ve boşaltma yapmış daha sonra ise offset değeri sıfırlanırken sensör yapısı üzerindeki değişiklikler takip edilmiştir. Yükleme-boşaltma esnasındaki değişikliklerin sistem ile doğrusallığı görüldükten sonra ilk paket için çekme işlemine başlanmıştır.



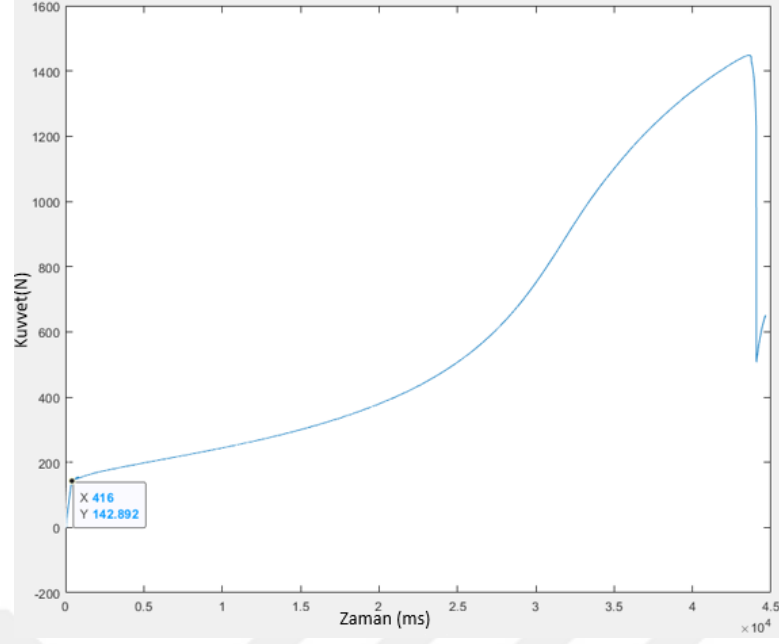
**Şekil 5.1:** Shimadzu AGS-X 250kN basma-çekme sistemi

İlk paket yapısının çekme işlemi için daha önce yapılan literatür taramasına bağlı olarak 1mm/dk'lık bir çekme hızı uygun görülmüştür. Bu şartlar altında yapılan ilk testte her ne kadar veri toplama yazılımından kaynaklı veri toplama işlemi gerçekleştirilemese de, eş zamanlı olarak alınan video ekran kaydı sensör yapısının doğrusallığını kanıtlamış ve ikinci numune ile tamamen özdeş bir tepkiye ait olduğu daha sonradan gözlemlenmiştir. İlgili veri toplama sistemine ait video kayıtdan alınan kopma noktası görseli Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.2:** Numune paket yapısının kopma noktasını gösteren yazılım görüntüsü

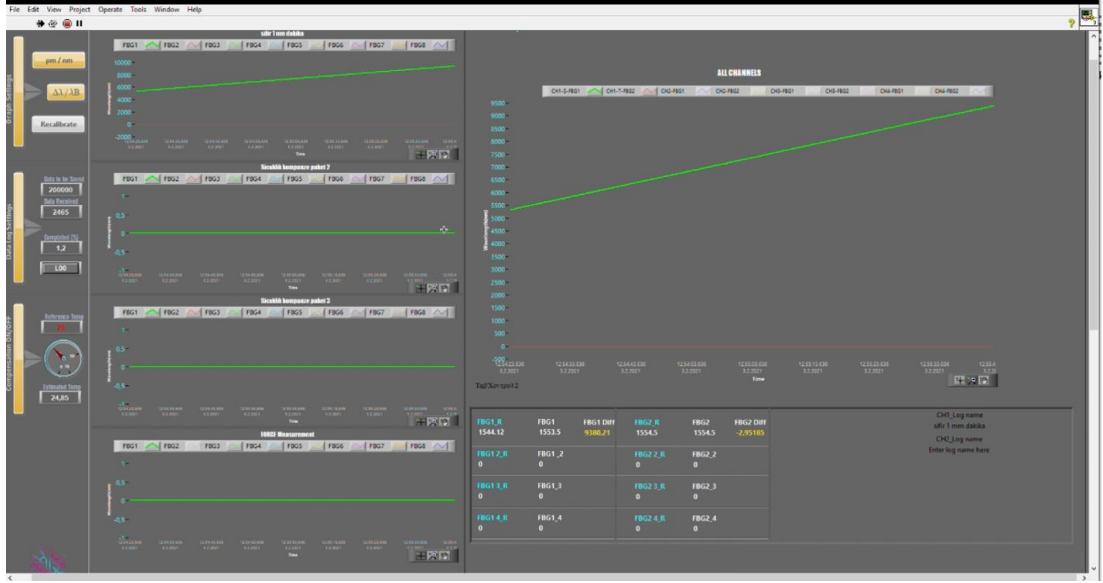
Şekil 5.2'de yeşil renk ile gösterilen gerinim sensörü, test esnasında 9930 pm'lik bir dalga boyu kayması meydana gelebilecek kadar dayanım gösterirken, bu noktadan sonra fiber optik kablunun HBM X60 yapıştırıcısından sıyrıldığı grafikte gösterilen 1 numaralı daireden de anlaşılmaktadır. 2 numaralı dairede de gösterildiği üzere, tüm çekme süreci boyunca sıcaklık sensöründe meydana gelen çekmeye bağlı dalga boyu değişimi 20 pm'nin altında gözlemlenirken, sıcaklık sensörü de aynı noktada yapıştırıcıdan sıyrıldığı için bir miktar çekme kuvvetine maruz kalmıştır. Sonuç olarak ilk numunede yaklaşık 10 saniyelik bir dilim içerisinde ciddi olarak yükselen kuvvet artışı karşısında doğrusallığını bozmamış ve ilgili malzemenin Şekil 5.3'te gösterilen akma noktasına kadar sensör yapısı dayanabilmiştir. İlgili paket yapısına ait akma ve kopma mukavemetini gösteren grafik Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 5.3:** Bir numaralı paketinin elastik deformasyon noktasını gösteren grafik

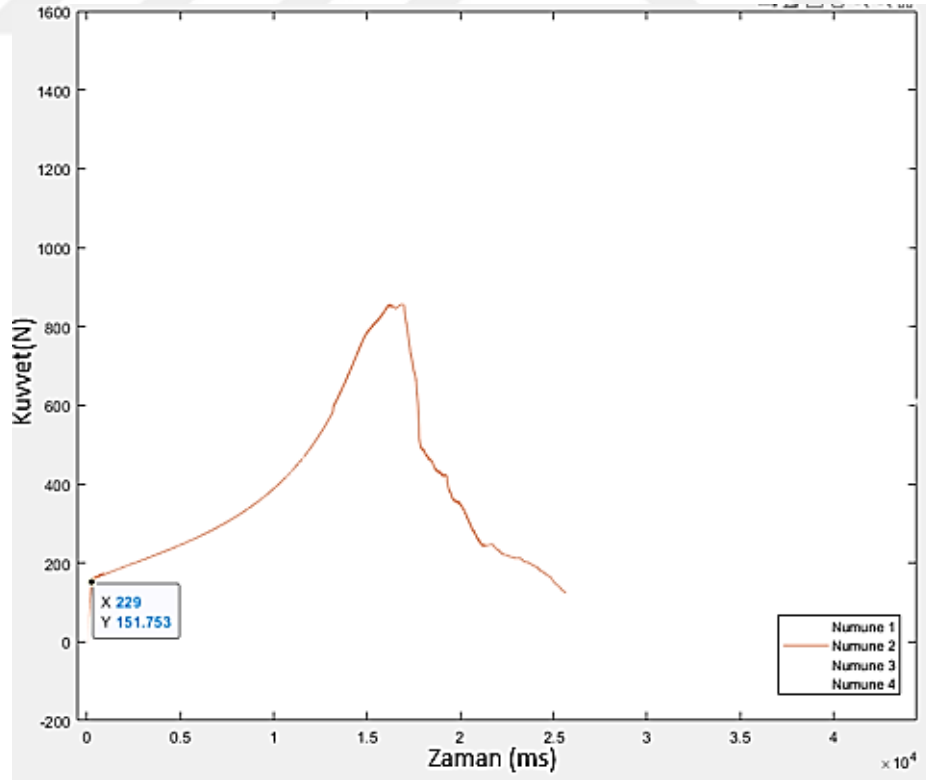
Şekil 5.3'ten de görülebileceği üzere, ilk numune paketinde FBG sensörün koptuğu nokta aynı zamanda paket yapısının elastik deformasyon limitidir. Bu bağlamda, ilk numunede elde edilen elastik deformasyon limiti yaklaşık olarak 143 N olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu değer diğer paketler için geçerli olup olmadığınıın tespiti için paketlerin çekme testleri tekrarlanmıştır.

İlk sensör paket numunesinin testi tamamlandıktan sonra, özdeş şartlar altında üretilmiş olan ikinci paketin testine geçilmiştir. Birinci sensör paketinin testi esnasında 1 mm/dk'lık çekme hızı ile ani çekim kuvvetine karşı FBG sensörün tepkisi gözlemlendiğinden dolayı, ikinci paketin testinde nispeten daha yavaş değişimlerin FBG sensör üzerindeki etkisini analiz edebilmek için çekme hızı 0.1mm/dk olacak şekilde ayarlanmıştır. Yapılan değişikliklere bağlı olarak FBG sensörün testi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.4'te detaylı olarak açıklanmıştır.



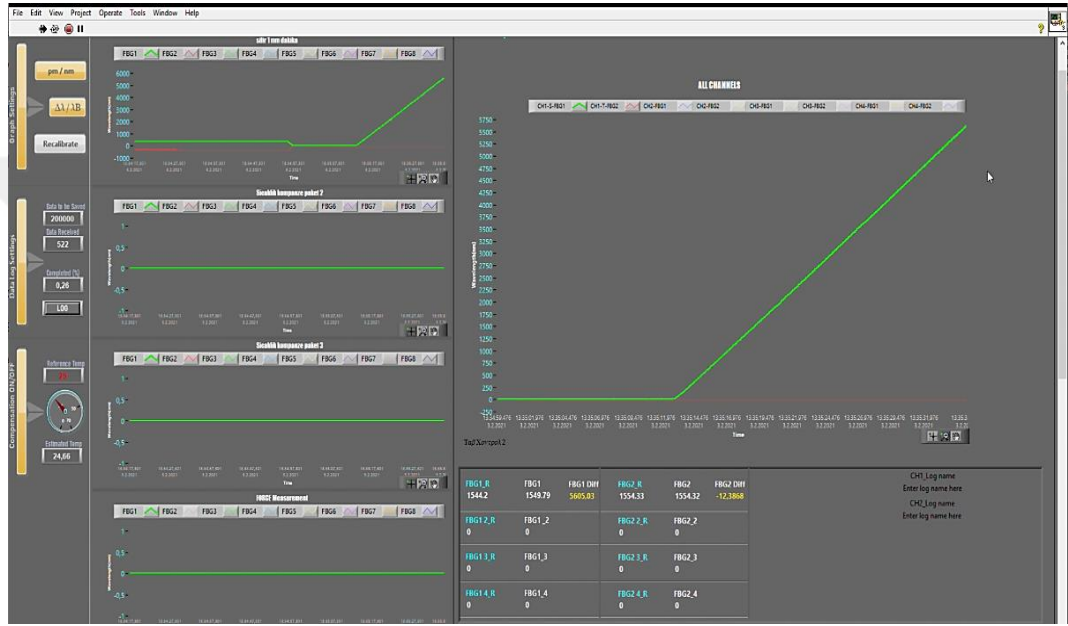
Şekil 5.4: İki numaralı sensör paketinin dalga boyu kayması

Şekil 5.4'ten de görülebileceği üzere, ilgili sensörün dalgaboyu kayması 9380 pm'ye kadar ulaşabilmiştir. Bu noktadan sonra devam eden çekme kuvveti neticesinde ilgili sensörün paketi elastik deformasyon bölgesine girmiştir. Elastik deformasyona geçişi gösteren grafik Şekil 5.5'teki gibidir.



Şekil 5.5: İki numaralı paketinin elastik deformasyon noktasını gösteren grafik

Bilindiği üzere ilk numunenin sabitlendiği paket yapısı 143 N civarında elastik deformasyon başladığından dolayı FBG sensörün pre-tension'ını kaybetmiştir. Bu bağlamda, ikinci test numunesinde de benzer bir durum söz konusudur. İkinci paket yapısında da çekme testi süresince FBG sensör yapısı doğrusallığını bozmamıştır. Her iki grafiğin de karşılaştırılmasıyla anlaşılacağı üzere, ilk iki numuneden elde edilen veriler birbirleriyle büyük oranda örtüşmektedir. Bu durumun sürekliliği için bir sonraki aşamada ilk iki numune ile özdeş şartlarda üretilen paket yapısı test sistemine bağlanmıştır.

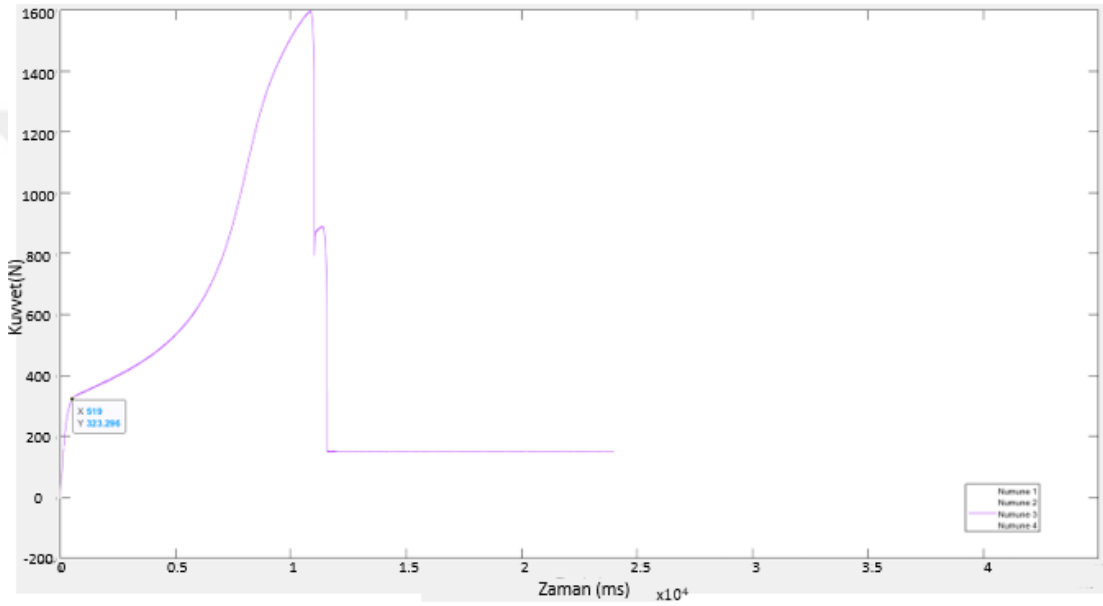


**Şekil 5.6:** Üç numaralı sensör paketinin dalga boyu kayması

Şekil 5.6'da 3 numaralı sıcaklık kompanze paket numunesine ait çekme testi sonucu gösterilmiştir. Şekil 5.6'dan da anlaşılacağı üzere, numune 1 ve numune 2'den farklı olarak, bu numune toplam dalga boyu kayması 5605 pm'ye kadar ulaşabilmiştir. İlgili teste kesinleştirilmesi gereken en önemli noktalardan bir tanesi de fiber optik kablo üzerindeki kaplama sıyrılıp FBG yazım işlemi yapıldıktan sonra tekrar kaplama (recoat) işleminin gerinim dayanımı üzerindeki etkisidir. Bu yüzden, ilgili test sürecinde kullanılan 3 numaralı numune diğerlerinden farklı olarak yeniden kaplama işlemine tabi tutulmadan paket yapısı üzerine sabitlenmiştir. Sonuç olarak, yeniden kaplama işlemine tabi tutulan FBG sensör yapıları yeniden kaplama işlemine tabi tutulmayan FBG yapılarına kıyasla çok daha fazla mukavemet gösterebildiği görülmüştür. Her ne kadar 3 numaralı numune ilk iki numuneye nispeten daha düşük

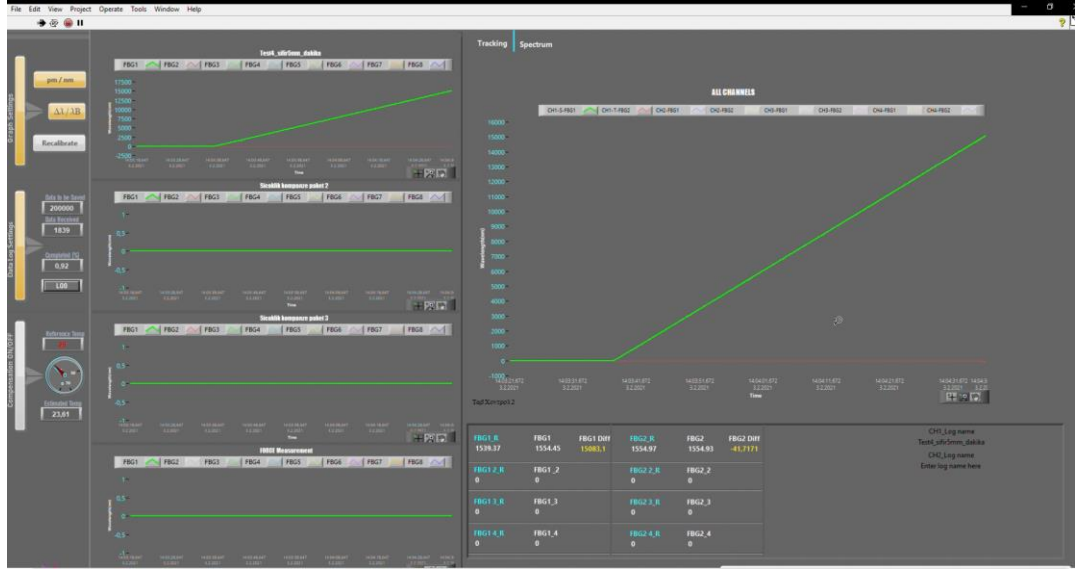
bir çeki kuvveti altında kopsa da, ilgili sensöre ait paket yapısının elastik deformasyon noktasının ilk iki numuneye kıyasla daha yüksek bir noktada olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 5.7'den de anlaşılacağı üzere, 3 numaralı paket yapısının elastik deformasyona geçişi 332.29 N civarında gerçekleşmiştir. Paket yapıları arasındaki bu önemli elastik deformasyon noktası farkının temel sebebi lazer ile kesim ve kanal açmak için tercih edilen dik işlem tezgahının operasyonu esnasında paket yapıları üzerindeki el ile operasyondan kaynaklı olan mukavemet düşüşleridir. En son numune üzerinden elde edilen paket testi sonucu da bu yaklaşımı destekler niteliktedir.



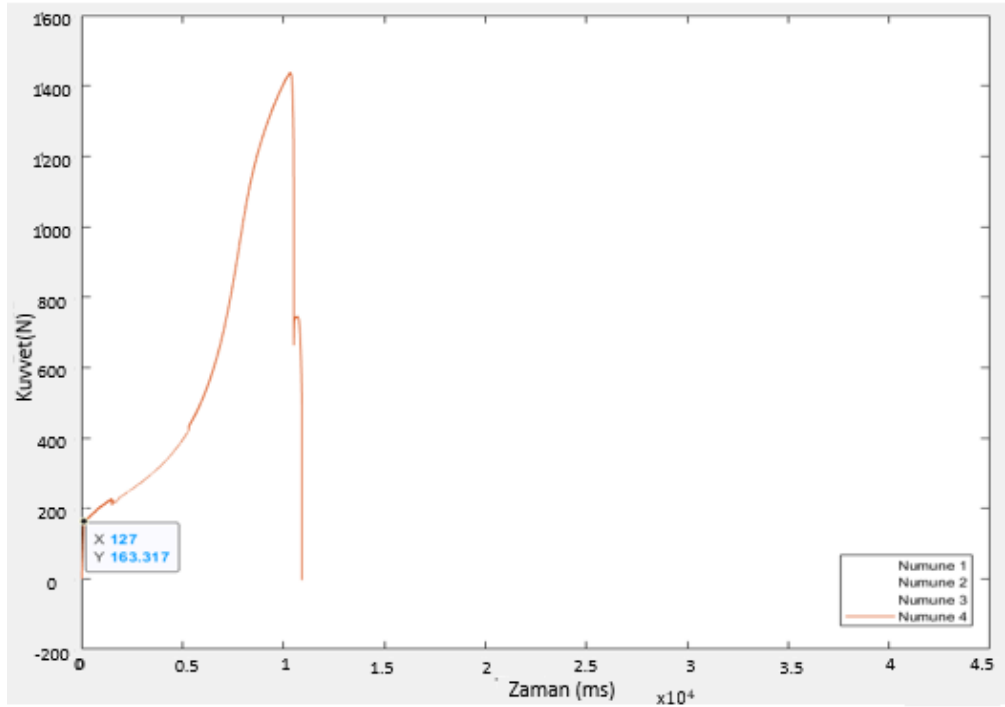
**Şekil 5.7:** Üç numaralı paketinin elastik deformasyon noktasını gösteren grafik

Şekil 5.8'den de görülebileceği üzere, 4 numaralı numunede tespit edilen maksimum dalga boyu kayması takriben 15100µm civarındadır. İlk üç numuneye kıyasla çok daha fazla dayanıma sahip olan bu sıcaklık kompanze paket yapısına ait çekme testi sonucu da Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.8: Dört numaralı sensör paketinin dalga boyu kayması

Şekil 5.9'dan da görülebileceği üzere, 4 numaralı numune testinde elde edilen sonuç da ilk iki numune testinde elde edilen sonuçlar ile örtüşmektedir. Bu numune de, ilk iki numuneye benzer olarak akma mukavemetinin 163 N civarında olduğu tespit edilirken kopma mukavemetinin 1440 N'ye kadar ulaştığı görülmektedir.



Şekil 5.9: Dört numaralı paketinin elastik deformasyon noktasını gösteren grafik

## 6. HASSASİYET HESAPLAMALARI

İlgili paket yapılarının ve FBG sensörlerin akma ve kopma mukavemetleri tespit edildikten sonraki süreçte sıcaklık kompanze FBG sensör paketlerinin hassasiyetinin araştırılması gerekmektedir. Bunun ile alakalı olarak çekme testi süresince tez çalışması dahilinde hazırlanmış olan veri toplama yazılımı ile FBG sensörlerin merkezi dalga boyları ve toplam dalga boyu kayma miktarları kayıt altına alınmış ve her bir numune için hassasiyet hesaplaması teker teker yapılmıştır. Daha önce de bahsedildiği üzere tüm test aşaması FBG sensörler ile alakalı olarak bilinen tek standart olan TS EN 61757-1-1 : 2017-04 numaralı standarda uygun olacak şekilde düzenlenmiştir. Hesaplamalar esnasında Matlab programına ait CFT (Curve Fitting Tool) ve NNT (Neural Network Tool) araçları kullanılmıştır. İlgili çalışmalara yönelik Matlab kodu Şekil 6.1’de verilmiştir.

```
##### Test1 Results are not saved properly#####
%%
##### Test 2 Strain Durability and Sensitivity Calculation #####

%General Formula
pe = 0.22;
Test2_Lambda0 = Test2_Wavelengths_nm (1);
Test2_Wavelengthshift_pm = abs (Test2_Wavelengths_nm (1) - Test2_Wavelengths_nm (1:end))* 1000;
Test2_Strain_Distribution = 1000* Test2_Wavelengthshift_pm / (Test2_Lambda0 * (1 - pe));
figure(1)
plot (Test2_Strain_Distribution,Test2_Wavelengthshift_pm)
title ('Test2 WavelengthShift vs Strain')
xlabel ('Strain (\mu\epsilon)');
ylabel ('\Delta\lambda (pm)');
Test2_Strain_Limit = max (Test2_Strain_Distribution)

%% Test 3 Strain Durability and Sensitivity Calculation
Test3_Lambda0 = Test3_Wavelengths_nm (1);
Test3_Wavelengthshift_pm = abs (Test3_Wavelengths_nm (1) - Test3_Wavelengths_nm (1:end))* 1000;
Test3_Strain_Distribution = 1000* Test3_Wavelengthshift_pm / (Test3_Lambda0 * (1 - pe));
figure(2)
plot (Test3_Strain_Distribution,Test3_Wavelengthshift_pm)
title ('Test3 WavelengthShift vs Strain')
xlabel ('Strain (\mu\epsilon)');
ylabel ('\Delta\lambda (pm)');
Test3_Strain_Limit = max (Test3_Strain_Distribution)

%% Test 4 Strain Durability and Sensitivity Calculation
Test4_Lambda0 = Test4_Wavelengths_nm (1);
Test4_Wavelengthshift_pm = abs (Test4_Wavelengths_nm (1) - Test4_Wavelengths_nm (1:end))* 1000;
Test4_Strain_Distribution = 1000* Test4_Wavelengthshift_pm / (Test4_Lambda0 * (1 - pe));
figure(3)
plot (Test4_Strain_Distribution,Test4_Wavelengthshift_pm)
title ('Test4 WavelengthShift vs Strain')
xlabel ('Strain (\mu\epsilon)');
ylabel ('\Delta\lambda (pm)');
Test4_Strain_Limit = max (Test4_Strain_Distribution)
```

Şekil 6.1: Hassasiyet hesaplamasında kullanılan MATLAB kodu

Yukarıdaki Matlab kod örneğinden de görülebileceği üzere, ilgili sensör yapılarının dayanabildiği maksimum gerinimin ve genel hassasiyet hesaplarının doğru bir şekilde yapılabilmesi için TS EN 61757-1-1 : 2017-04 numaralı standart dahilinde verilen :

$$\Delta\lambda/\lambda_0 = (1 - p_e) * \Delta\varepsilon \quad (5.1)$$

eşitlik kullanılmıştır. Bu formülde gösterilen semboller sırası ile :

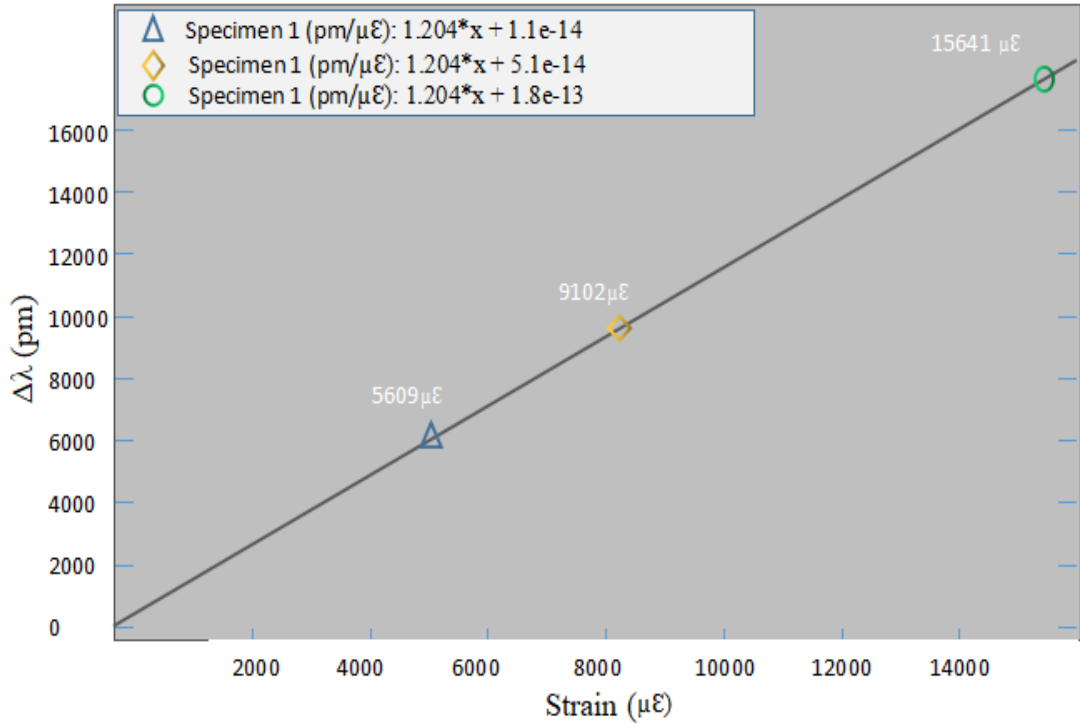
$\Delta\lambda$  = Toplam merkezi dalgaboyu kayması

$\lambda_0$  = Gerinim sensörüne ait ilk merkezi dalgaboyu

$p_e$  = Fibere ait fotoelastik katsayısı (bu değer 0.22'dir)

$\Delta\varepsilon$  = Gerinim değişimi

Her bir paket yapısı için bu değerler teker teker yerlerine yazıldıklarında elde edilen maksimum gerinim dayanımı ve gerinim hassasiyet değerleri sırası ile Şekil 6.2'de gösterildiği gibidir.



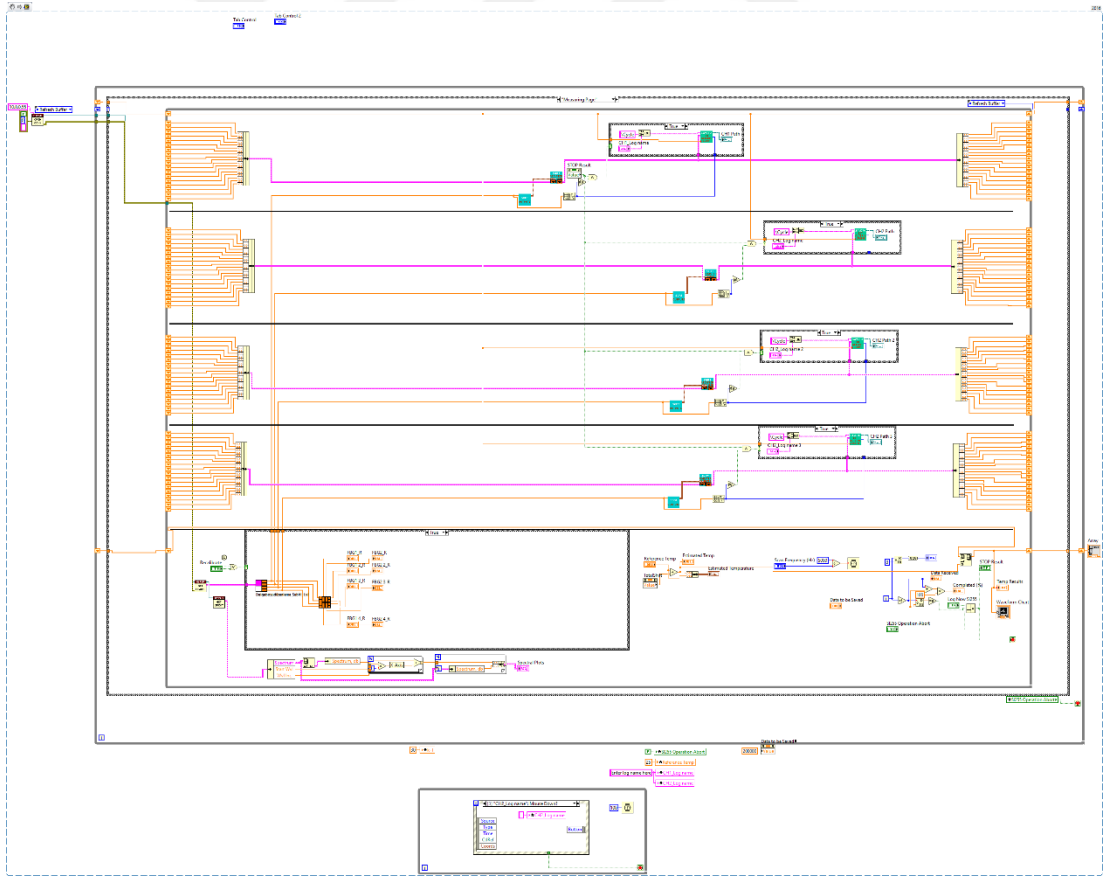
**Şekil 6.2:** Tasarlanan sensör paketinin dayanım noktalarını gösteren eğri

Şekil 6.2'den de görülebileceği üzere, verileri toplanabilen üç numunenin dayanabildiği maksimum gerinim değeri birbirinden farklıdır. Her üç numunenin

literatürde genel olarak rastlanan +2500  $\mu\epsilon$ 'luk gerinim değerinin çok üzerinde olması ile birlikte aralarında önemli farklılıklar bulunmaktadır. İkinci numune olarak gösterilen ve 9102  $\mu\epsilon$ 'luk maksimum gerinime kadar dayanım gösteren paket yapısı ve 15640  $\mu\epsilon$ 'luk maksimum gerinime dayanan paket yapısı tümüyle standart FBG sensör üretim metoduna uygun olarak üretilmiş ve pakete sabitlenmiştir. 5609  $\mu\epsilon$ 'luk gerinime kadar dayanabilen paket yapısında ise FBG sensörlerin yazıldığı bölgeler yeniden kaplama (recoat) sürecine dahil edilmemiştir. Sensörlü bölgelerin FBG yazım işlemi sonrası yeniden kaplanmamasının doğrudan FBG sensörün dayanabileceği maksimum gerinimi ciddi oranda azaltacak bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, tüm sensörlerde elde edilen maksimum gerinim dayanımının birbirinden farklı olmasının temel sebebi, FBG sensör üretim sürecinde birçok noktada el ile işlem yapılmasından kaynaklı fiber mukavemetinin değişim göstermesidir. Her ne kadar elde edilen değerler birbirinden farklı olsa da, test sonucu tüm numunelerin FBG gerinim dayanım noktalarının literatürde sıklıkla karşılaşıldığı için proje isteri olarak belirlenen +2500  $\mu\epsilon$ 'dan daha yüksek bir noktada olduğunu göstermiştir. Tüm numunelerde elde edilen maksimum dayanım farklı olsa da, yapılan matematiksel analiz neticesinde bütün sensörlerin literatürde paketli FBG sensörler için verilen hassasiyet ölçüsü olan 1.2 pm/  $\mu\epsilon$  değeri ile birebir örtüşmektedir. Sonuç olarak, üretim metodu geliştirilip seri üretime daha uygun bir hale getirildiğinde ve el ile müdahale oranı azaltıldığında, ortaya çıkacak ürün çok daha standart bir yapıda ve dünya genelindeki sıcaklık kompanze FBG sensörlerin mukavemetinden daha yüksek fakat aynı hassasiyeti karşılayabilecek bir ürün olarak elde edilebilecektir.

## 7. VERİ TOPLAMA YAZILIMI

İlgili tez çalışması kapsamında üretilmiş olan FBG tabanlı sıcaklık kompanze gerinim sensörlerinin geliştirilebilmesi için sensör yapısında meydana gelen tüm değişimlerin anlık olarak izlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, ilgili değişimlerin gerçek zamanlı olarak izlenebilmesi ve varsa eksiklik tespitinin yapılabilmesi için LabVIEW tabanlı bir veri toplama yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılım ile sorgulama ünitesi dahilindeki tüm kanallara bağlanan FBG sensörlerin ayrı ayrı takip edilebilmesi, kanal dahilindeki sensörlerin anlık grafiklerinin çizilmesi, sensörlerin kalibrasyon sabitlerinin belirlenebilmesi ve son olarak sensörlerden toplanan verilerde hiçbir kayıp olmayacak şekilde raporlama yapılabilmesi hedeflenmiştir. Bahsi geçen yazılımın blok görüntüsü Şekil 7.1’de verilmiştir.

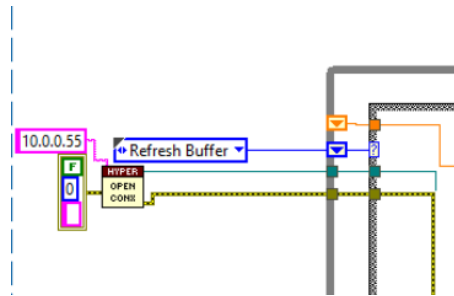


Şekil 7.1: LabVIEW ile hazırlanan veri toplama yazılımı raporlama algoritması

Bilindiği gibi, gerçek zamanlı veri toplama sistemlerinde sıklıkla kullanılan birkaç temel programlama yaklaşımı vardır. Bunlar sırası ile; QMH (Queued Message Handler), QSM (Queued State Machine), OOP (Object Oriented Programming) ve SM (State Machine) yaklaşımlarıdır. Birçok farklı uygulamada amaca uygun olarak tercih edilen bu yöntemlerin hepsi bu tez çalışması için yeterli düzeyde olup, bu yaklaşımların içerisinde en sade algoritma hazırlama imkanı sunan durum makinası (state machine) tercih edilmiştir.

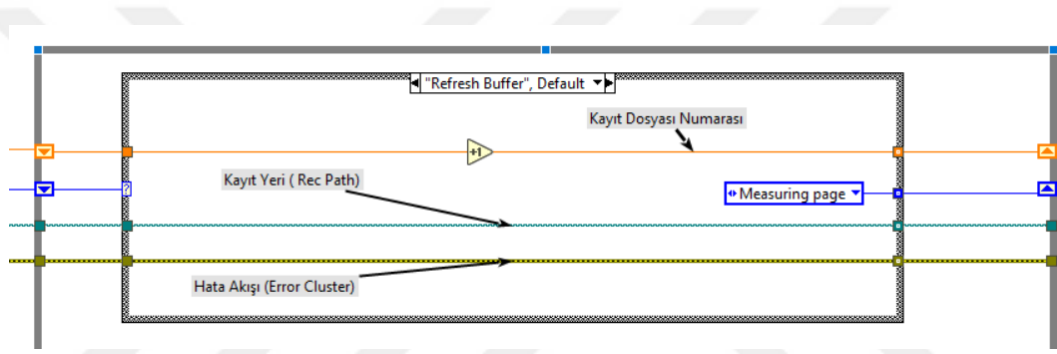
State machine yöntemi temelde, büyük bir while döngüsü içerisine yerleştirilen case structure içerisine karar verme algoritmasının gömüldüğü ve herhangi bir dış müdahaleye gerek kalmadan karar verme mekanizmasının durum değerlendirmesi yapmasına olanak sağlayan bir yöntemdir. Bu çalışmada veri toplama süreci belli bir zamanlama ile sınırlandırılmadan çalışacağı için, karar verme mekanizmasının ve veri toplama yazılımlarında en çok karşılaşılan problemlerin başında gelen hafıza kontrolünün detaylı bir şekilde çalışması ciddi önem arz etmektedir.

Daha önce de bahsedildiği üzere bu çalışmada yüksek frekans ve yüksek çözünürlük ile çalışan MicronOptics SI255 model sorgulama ünitesi kullanılmıştır. Bu ünite uzaktan kontrol (remote control) erişimine TCP/IP protokolü çerçevesinde izin vermektedir. Bu yüzden sistem ara yüz bağlantısında TCP/IP protokolü kullanılmış ve sisteme statik IP adresi olan 10.0.0.55 adresi üzerinden erişilmiştir. Bağlantının ilk aşamasında MicronOptics firması tarafından hazırlanmış olan API kullanılmıştır. Şekil 7.2'de HYPER-OPEN CONX olarak gösterilen bu haberleşme başlatıcı (communication initializer) subVI'nın görevi statik IP adresi üzerinden sorgulama ünitesi ile sağlıklı bir iletişimin olup olmadığını denetlemektir. While döngüsünün dışında tutul bu subVI yalnızca bir kere çalışacak ve eğer herhangi bir haberleşme problemi meydana geldi ise Şekil 7.2'de gösterilen kahverengi kablo üzerinden hata kodunu taşıyarak kullanıcıyı uyaracak ve program akışını sonlandıracaktır.



**Şekil 7.2:** LabVIEW TCP/IP protokolü ile sorgulama cihazına bağlanma

Eğer sorgulama ünitesi ile sağlıklı bir bağlantı kuruldu ise while döngüsü program akışı while döngüsünün içerisine doğru devam edecektir. Durum makineleri (SM)'nin akışını belirleyen girdiler LabVIEW platformunda “enum constant” olarak bilinmektedirler. Durum makinelerinde kullanıcılar, program akışının, while döngüsü içerisine yerleştirdikleri olay yapılarından (case structure) hangisine doğru ilerleyeceğini enum constant aracılığı ile belirlemektedirler. Bu bağlamda, Şekil 7.2'den de anlaşılacağı üzere, sistem ve arayüz arasındaki ilk bağlantıda herhangi bir problem ile karşılaşılması durumunda, ilk enum constant değeri olan “refresh buffer” program akışını yönlendirecek ve while döngüsü içerisinde yer alan olay yapısı içerisindeki refresh buffer isimli olay sayfasını aktif hale getirecektir. Refresh buffer isimli olay sayfasının genel görünümü Şekil 7.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 7.3:** Geçici bellek sıfırlama ve yeni kayıt dosyası oluşturma algoritması

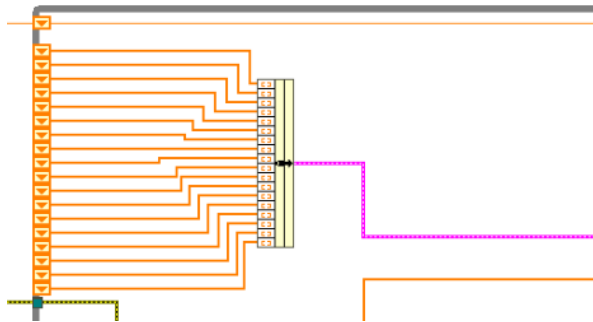
Şekil 7.3'te de gösterildiği üzere, “Refresh Buffer” sayfasının içerisinde 3 adet veri kablosu bulunmaktadır. Bunlardan turuncu renk ile gösterilmiş olan ilgili verilerin toplanacağı dosyanın numarasını belirlemektedir. Dosya karmaşası olmaması açısından her bir kanal için ayrı bir isimlendirme yapılabilmektedir. Bu isimlendirmeler yazılım çalışıyor durumda iken dinamik olarak değiştirilebilmektedir. Kullanıcı tarafından belirlenen isimin sonuna ise kayıt dosya numarası eklenmektedir. Bu sayede dosya isimleri kronolojik bir sıra içerisinde otomatik olarak düzenlenmektedir. Sonuç olarak depolama işlemi Şekil 7.4'te gösterildiği gibi bir hal almaktadır.

Ad	Değiştirme tarihi	Tür	Boyut
Cycle 1	30.11.2020 14:41	Yapılandırma ayarl...	24 KB
Cycle 2	30.11.2020 14:49	Yapılandırma ayarl...	24 KB
Cycle 3	30.11.2020 14:58	Yapılandırma ayarl...	24 KB
Cycle 4	30.11.2020 15:06	Yapılandırma ayarl...	24 KB
Cycle 5	30.11.2020 15:14	Yapılandırma ayarl...	24 KB
Cycle 6	30.11.2020 15:23	Yapılandırma ayarl...	24 KB
Cycle 7	30.11.2020 15:31	Yapılandırma ayarl...	24 KB
Cycle 8	30.11.2020 15:39	Yapılandırma ayarl...	24 KB
Cycle 9	30.11.2020 15:48	Yapılandırma ayarl...	24 KB
Cycle 10	30.11.2020 15:53	Yapılandırma ayarl...	16 KB

**Şekil 7.4:** Veri toplama yazılımının dosya kaydetme çıktıları

Şekil 7.4'ten de anlaşılacağı üzere, tüm veriler default formatta konfigürasyon dosyaları içerisinde muhafaza edilmektedir. Bunun sebebi ise veri toplama işlemi sırasında kaydedilen veri noktası adedinin milyonları bulabilmesi ve bu da farklı formatlarda (.xlsx, .csv veya .doc) hafıza problemlerine yol açabilmektedir. Kullanıcı istenilen formatta kayıt yapma noktasında özgür bırakılmış olup, istenildiği takdirde dosya isminin sonuna herhangi bir formatın uzantısını ekleyerek verileri o uzanti içerisinde kendi riski altında kaydedebilmektedir.

Bunların yanı sıra, eğer ilk haberleşme sağlıklı bir şekilde gerçekleşirse yazılım program akışını “Refresh Buffer” durum sayfasından, veri toplama ve karar verme algoritmasının dahil olduğu “Measuring Page” durum sayfasına doğru devam ettirmektedir. Şekil 7.5'te genel görünümü verilmiş olan bu sayfa içerisinde üzerinde durulması gereken ilk kısım while döngüsünün sol tarafında yer alan 18 adet shift register kümesidir.



**Şekil 7.5:** Veri kaydı için kullanılan shift register yöntemi

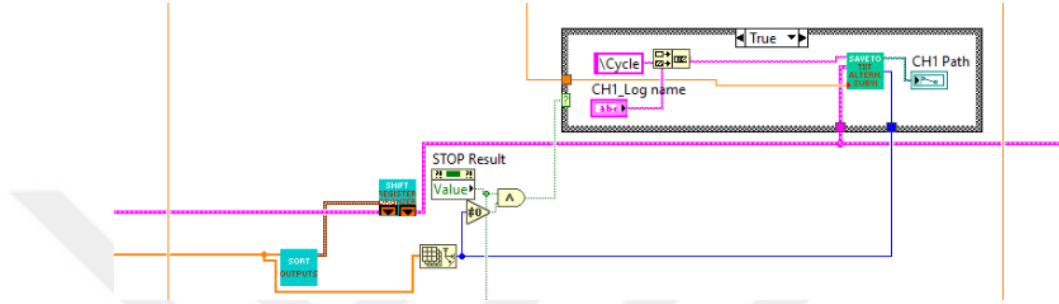
Daha önce de belirtildiği üzere tek bir fiber optik kablo üzerinde bulunabilecek FBG sensör yapısını sorgulama ünitesinin bant genişliği belirlemektedir. Bu çalışmada MicronOptics SI255 sorgulama ünitesinin 1500-1580 nm bandında çalışan tipi kullanıldığı için, toplam bant genişliği 80 nm'dir. Sağlıklı veri toplama işlemi için sensörlerin spektral konumlarının ilgili bant aralığının başından ve sonundan 4 nm mesafede bulunması gerektiği göz önünde bulundurulduğunda, bu bant genişliği 1504-1576 olacak şekilde değerlendirilmelidir. Her bir sensörün birbirlerine olan spektral mesafesinin 4 nm olması gerektiği de hesaba katıldığında, SI255 modellenen sorgulama ünitesi için tek bir fiber optik kablo üzerinde değerlendirilmeye alınabilecek toplam sensör sayısının 18 adedi geçmemesi gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu yüzden, bu çalışmada toplamda 18 adet shift register girişi bulunmaktadır.

Veri toplama işlemi için bir çok farklı metot bulunmasına rağmen, shift register yöntemi ile veri toplama yönteminin tercih edilmesinin en büyük nedeni, ilgili paket yapısının hassas değerleri algılayabilme kapasitesinden dolayı ölçüm esnasında tüm değişimlerin yakalanabilmesi ve hiçbir veri kaybı olmadan bu verilerin muhafaza edilebilmesi gerekliliğidir. Bu noktadan değerlendirildiğinde, ilgili sorgulama ünitesi tünellenebilir frekans yapısına sahiptir ve bu yüzden veri toplama işlemi sırasında kullanıcı ölçüm frekansı değerini anlık olarak değiştirdiğinde diğer yaklaşımlar veri kaybının önüne geçme konusunda yetersiz kalabilmektedir. Shift register yaklaşımında tüm veriler ölçüm sisteminin frekansının kontrol edildiği while döngüsü içerisinde bulunduğundan, değişen frekans değerine bağlı olarak bu döngü içerisindeki bekleme fonksiyonu (wait ms) otomatik olarak düzenlenecek ve shift register üzerindeki veri akışı kayıpsız olarak sağlanmış olacaktır. Bu yüzden, veri işleme ve kaydetme noktasında alt programlar (subVI'lar) kullanılırken, verileri toplama bağlamında hiçbir subVI kullanılmamıştır.

Giriş shift registerları bünyesindeki 18 kablonun tümü sırası ile "bundle" fonksiyonuna bağlanmıştır. Bu sayede karmaşık yapıda bir blok diyagramından ziyade, daha sade yapıdaki bir programlama alanı elde edilmiştir.

Giriş shift register'ları birleştirildikten sonra elde edilen çıkış (O/P) daha sonra Şekil 7.6'da gösterilen "Shift Register Organizer" subVI'na girdi (I/P) olarak verilmiştir. Benzer şekilde ilgili kanaldaki sensör sayısına erişen "Sort Outputs" isimli SubVI'dan elde edilen çıktı da "Shift Register Organizer" subVI'na dahil edilmiştir. Bunun

nedeni, her bir kanaldaki sensör adedinin her zaman 18 olmamasıdır. Bu yüzden, yazılımın çalışma performansını arttırabilmek adına ilgili kanal üzerindeki toplam sensör sayısı belirlenerek yalnızca o kadar adetteki shift register girdisi değerlendirilecektir. Ayrıca, sensörlerin dalgalıboylarına bağlı olarak küçükten büyüğe bir sıralama yapılacak ve veri analizi konusunda da işlemler daha kolay bir hale getirilebilecektir.



Şekil 7.6: Toplanan verilerin yazılım üzerinden kaydedilme yöntemi

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, fiber Bragg ızgara sensörlerin sıcaklık etkisinden kurtulma yöntemleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Literatürde çalışılmış olan bu yöntemler detaylı bir mukayese filtresinden geçirildiğinde, numerik olarak en güvenilir sonuçların referans sensör kullanma yöntemlerine dayandığı görülmüştür. Bu bağlamda, tez çalışması içerisinde paslanmaz çelik malzemenen, hassas bir şekilde üretim limitlerini göz önünde bulundurarak bir paket yapısı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu paket yapısı sayesinde, sıcaklık ölçümü için oluşturulan sensör kanalına herhangi bir gerinim aktarımı gerçekleşmemekte ve bu sayede sıcaklık sensörü gerinimsiz bir ortamda tutulabilmektedir. Bunun yanısıra, seri şeklinde yapılan sıcaklık testleri ile birlikte sıcaklık hassasiyet değeri de belirlenen sensör yapısının hem sıcaklık ölçümü için hem de sıcaklık etkisi bastırılmış gerinim ölçümü için uygunluğu sağlanmıştır.

FBG sensör üretiminde yönlendirici dökümanlar ve standartlar dikkate alınarak tamamlanan testlerin neticesinde ilgili paket yapısı kullanıldığında sıcaklık baskılama işlemi %95 üzerinde başarılı olmuştur. Ani değişen çevre şartlarında da operasyonel devamlılığı teyit edilen paket yapısı için birkaç geliştirme de söz konusu olabilir. Örneğin, tasarımı yapılan paket yapısı 1 mm paslanmaz çelikten yapıldığı için hava araçlarının üretiminde kullanılan kompozit katmanların arasına gömülmesi mümkün değildir. Bu bağlamda, ilerleyen süreçlerde benzer ölçü ve geometrilere sahip bir paket yapısı karbon fiber veyacam elyaf kullanılarak üretilerek, hava araçlarının üretim ekipmanları arasına katılabilir.

Bunların yanısıra, FBG sensörlerin ön algılama (pre-feeling) yöntemlerinde, yapay sinir ağları ve makine öğrenmesi gibi akıllı yöntemler kullanılarak, hava araçlarında ve diğer savunma sanayi araçlarında yapay zeka sistemlerine girdi yapabilecek şekilde geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Honnungar, R. V., Ibrar Jahan, M. A. & Versha, R.** (2017). Analysis and Sensitivity Improvement of FBG Sensor, *International Conference on Recent Advances in Electronics and Communication Technology (ICRAECT)*, (pp. 302-305). India: Bangalore , March 16-17.
- [2] **Khasanah, F., Kurniawan, E. & Setiono, A.** (2016). Analysis of FBG weight sensor based on laser diode transitive response, *International Seminar on Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology (ISSIMM)*, (pp. 53-56). Indonesia: Malang, August 10-11.
- [3] **Aparna, A., Anania, S., Baby Sreeja, S. D., Mohan, A., Parvathi, G.R. & Unnikrishnan, A.** (2018). Analytical Study of FBG Spectrum for Temperature Sensing Applications, *2<sup>nd</sup> International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*, (pp. 1109-1113)
- [4] **Sai, Y., Song, J., Wang, H. & Wang, L.** (2019). Crack Width Analysis of Reinforced Concrete Using FBG Sensor, *IEEE Photonics Journal* 11(1), 1-8.
- [5] **Harun, S. W., Maier, R. R. J. & Riza, M. A.** (2020). FBG Sensors for Environmental and Biochemical Applications, *IEEE Sensors Journal*, 20(14), 7614-7627).
- [6] **Xingwei, Xue. & Yunzhu, Chen** (2018). Advances in the structural health monitoring of bridges using piezoelectric transducers. *Optical Fiber Sensors*, 18 (12), 4312.
- [7] **Mihailov & Stephen, J.** (2012). Fiber Bragg grating sensors for harsh environments. *Optical Fiber Sensors*, 12(2), 1898-1918.
- [8] **Ams, M., Bustamante, H., Clark S., Ha, P., Gonzalez, J., Taheri, S., Vorreiter, L. & Withford, M.J.** (2017). Fibre optic temperature and humidity sensors for harsh wastewater environments, *11<sup>th</sup> International Conference on Sensing Technology* , (pp. 1-3). Australia: Sydney, December 4-6.
- [9] **Ahmed, K., Ahmed, R., Asaduzzaman, S., Paul, B.K & Rifat, A.A.,** (2019) Development of Photonic Crystal Fiber-Based Gas/Chemical Sensors, *Computational Photonic Sensors*, 12(1), 1-31.
- [10] **Abhishek, B., & Asokan S. & Prasad, G.** (2009). Fiber Bragg Grating sensor packages for sensing water pressures inside ocean, *International Conference on Emerging Trends in Electronic and Photonic Devices & Systems*, (pp. 540-543). India: Varanasi, December 22-24.
- [11] **Bobrovs, V., Senkans, U., & Spolitis, S.** (2017). Evaluation and research of FBG optical temperature sensors network. *Advances In Wireless And Optical Communications (RTUWO)*, (pp. 79-89). Riga: Latvia, November 2-3.

- [12] **Chaluvadi, V., & Pattnaik, P.** (2020). Effect of Strain and Temperature on FBG. *IEEE International Conference On Electronics, Computing And Communication Technologies (CONECCT)*, (pp. 1-4). India: Bangalore, July 2-4.
- [13] **Asundi, A., Maheshwari, M., Tjin, S. & Yang, Y.** (2017). Wavelength-shifted chirped FBGs for temperature compensated strain measurement, *Sensors And Actuators A: Physical*, 265 (231-235).
- [14] **Bosiljevac, M., Drazic-Segrt, I., Krnjak, A., Sipus, Z. & Sprem, M.** (2015). Portable FBG based optical sensor array. *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, (pp.1-5).Croatia: Zeder, April 13-15.
- [15] **Bhavsar, K., Fung, W., Johny, J., Joseph, G., Prabhu, R. & Summers, J.** (2017). Theoretical investigation of positional influence of FBG sensors for structural health monitoring of offshore structures, *OCEANS*, (pp.2406-2410). *United Kingdom: Aberdeen, Jun 19-22.*
- [16] **Goldhar, J., Leng, Y. & Yun, V.** (2017). UV laser fabrication and modification of fiber Bragg gratings by stitching sub-gratings with in situ fluorescence monitoring. *Applied Optics*, 56(24), 6977-6981.
- [17] **Grobnic, D., Hnatovsky, C. & Mihailov, S.** (2017). Through-the-coating femtosecond laser inscription of very short fiber Bragg gratings for acoustic and high temperature sensing applications. *Optics Express*, 25(21), 25435-25446.
- [18] **Bartelt, H., Becker, M., Chojetzki, C., Lindner, E. & Rothhardt, M.** (2016). Fabrication and applications of Draw Tower Gratings, *Photonics And Fiber Technology*). Australia: Sydney, September 5-8.
- [19] **Bao, W., He, J., Hou, M., Xu, B., Wang, Y. & Zhang, Z.** (2020). High-Efficiency Inscription of Fiber Bragg Grating Array with High-Energy Nanosecond-Pulsed Laser Talbot Interferometer. *Sensors*, 20(15), 4307-4317.
- [20] **Liu, D., Tian, K., Wang, R., Wang, X., Zhang, M. & Zhao, Z.,** (2021). Ultra-compact in-core-parallel-written FBG and Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of strain and temperature. *Optics Letters*, 46(22), 5595-5598.
- [21] **Alberto, N., André, P. & Domingues, M.** (2021). Special Issue "Optical Fiber Interferometric Sensors: New Production Methodologies and Novel Applications". *Photonics*, 8(9), 389.
- [22] **Li, B., Liu, Y., Song, X., Wang, Y. & Yang, D.** (2019). Research on phase mask method-based phase-shifted fiber grating fabrication and sensing properties, *11<sup>th</sup> International Conference On Information Optics And Photonics*, (pp.1-6). *China: Xian, August 6-9.*
- [23] **He, J., Hou, M., Guo, K., Liao, C., Zhang, Z. & Zhou, J.** (2018). Novel fabrication technique for phase-shifted fiber Bragg gratings using a variable-velocity scanning beam and a shielded phase mask. *Optics Express*, 26(10), 13311-13321.
- [24] **Raghuwanshi, S., Sadhu, A., & Singh, Y.** (2020). Development and Experimental Analysis of Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) Coated Etched Fiber Bragg Grating Sensor for Chemical Sensing, *IEEE Sensors Journal*, 20(15), 8528-8534.

- [25] **Guo, J., Li, T., Tan, Y. & Zhou, Z.** (2020). Recent Advances and Tendency in Fiber Bragg Grating-Based Vibration Sensor: A Review, *IEEE Sensors Journal*, 20(20), 12074-12087.
- [26] **Marques, C., Min, R. & Ortega, B.** (2018). Fabrication of tunable chirped mPOF Bragg gratings using a uniform phase mask, *Optics Express*, 26(4), 4411-4420.
- [27] **Dhawan, D., Gupta, N. & Sahota, J.** (2020). Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a comprehensive review, *Optical Engineering*, 59(06), 60901.
- [28] **Choi, S., Kim, C., Kim, J. & Lee, B.** (2017). Enhanced Strain Measurement Range of an FBG Sensor Embedded in Seven-Wire Steel Strands, *Sensors*, 17(7), 1654.
- [29] **Chang, L., Jie, Qi-tao, H., X. & Zhi-bin, L.** (2017). A new packaged FBG sensor for underground cable temperature monitoring, *2<sup>nd</sup> Advanced Information Technology, Electronic And Automation Control Conference*, (pp. 1789-1793). China: Chongqing, March 25-26
- [30] **Gautam, A., Kinjalk, K. & Kumar, A.** (2020). High-Resolution FBG-Based Inclination Sensor Using Eigen Decomposition of Reflection Spectrum, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 69, 9124-9131.
- [31] **Ali, T., Mohamed, N. & Shehata, M.** (2015). Design and performance investigation of a highly accurate apodized fiber Bragg grating-based strain sensor in single and quasi-distributed systems, *Applied Optics*, 54(16), 5243-5251.
- [32] **Barnes, M., Hu, B., Hu, Z., Djurovic, S., Mawby, P., Mohammed, A. & Ran, L.** (2020). Distributed Thermal Monitoring of Wind Turbine Power Electronic Modules Using FBG Sensing Technology, *IEEE Sensors Journal*, 20(17), 9886-9894.
- [33] **Weimin, C., Wei, Z., Xiaohua, L. & Yuejie, S.** (2014). Influences of Bonding Materials on the Accuracy of Fibre Bragg Grating Strain Measurements, *7<sup>th</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring*, (pp. 1449-1456). France: Nantes, July 8-11.
- [34] **Duan, S., Han, Z., Liu, W., Sun, C., Yan, Q. & Zhang, S.** (2018). A cascade structure made by two types of gratings for simultaneous measurement of temperature and strain, *Optical Fiber Technology*, (Vol. 42, pp. 105-108).
- [35] **Fu, Y., Hong, C., Lu, Z., Su, D. & Zhang, Y.** (2019). Development of an FBG Sensor for Measuring Large Range and Multi-Directional Settlement, *IEEE Access*, (Vol.7, pp.1).
- [36] **Farrell, G., Jinachandran, S., Li, H., Prusty, B., Rajan, G., Semenova, Y., & Xi, J. &** (2018). Fabrication and Characterization of a Magnetized Metal-Encapsulated FBG Sensor for Structural Health Monitoring, *IEEE Sensors Journal*, 18(21), 8739-8746.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Mehmet Mücahit ARSLAN

**Doğum Tarihi ve Yeri** :

**E-posta** :

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Asia Pacific University (Malaysia), Telekomünikasyon Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Aralık 2015- Mart 2021 Ermaksan Yüksek Teknoloji Ar-Ge Merkezi, Ar-Ge Mühendisi
- Nisan 2021- Türk Havacılık ve Uzay Sanayi (TUSAŞ), Sistem Test Mühendisi ve Yazılım Geliştiricisi

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Design and Validation of an Effective Temperature Compensated-Based FBG Sensor Package for Air Vehicle Applications- Eleco Conference, *13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, (pp. 340-344).
- Temperature Compensation of FBG Sensors via Sensor Packaging Approach for Harsh Environment Applications- Gazi University Journal of Science