



T.C.
KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI

ÜÇ EKSENLİ YER DEĞİŞTİRME ÖLÇÜMÜ İÇİN FİBER OPTİK ALGILAYICI GELİŞTİRİLMESİ

YUNUS GÖRKEM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KIRŞEHİR / 2022



T.C.
KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI

ÜÇ EKSENLİ YER DEĞİŞTİRME ÖLÇÜMÜ İÇİN FİBER OPTİK ALGILAYICI GELİŞTİRİLMESİ

YUNUS GÖRKEM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Şekip Esat HAYBER

KIRŞEHİR / 2022

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Bu çalışma Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri biriminin MMF.A4.22.009 numaralı projesiyle desteklenmiştir.

YUNUS GÖRKEM

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu lisansüstü teze, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.



ÖNSÖZ

Yüksek lisansa başlamamda ve yüksek lisans ders sürecinde kendisini tanıdığım günden bu yana gösterdiği sakin ve sabırlı haliyle her zaman bana örnek olmasının yanı sıra bir bilim adamının nasıl çalışması gerektiğini kendisinden öğrendiğim değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Şekip Esat HAYBER'e büyük bir içtenlikle teşekkür ederim.

Tezimi, annem, babam, eşim ve kardeşlerim başta olmak üzere özellikle maddi ve manevi desteklerini üzerimden hiç eksik etmeyen değerli dostlarıma ithaf ederim.

Temmuz, 2022

YUNUS GÖRKEM

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	3
2.1.Yer Değiştirme.....	3
2.1.1. Yer Değiştirmenin Tanımı.....	3
2.1.2. Yer Değiştirme Ölçümünün Gerekli Olduğu Alanlar.....	4
2.2.Literatür Taraması.....	4
2.2.1. Geleneksel Yer Değiştirme Ölçüm Yöntemleri.....	4
2.2.2. Literatürdeki Fiber Optik Algılayıcılar.....	7
2.2.3. Tek Boyutlu Yer Değiştirmede Fiber Optik Yöntemler.....	11
3. FİBER OPTİKTE TEMEL KAVRAMLAR.....	15
3.1.Optik Fiberler.....	15
3.1.1. Optik Fiberlerin Avantajları.....	15
3.1.2. Optik Fiberlerin Dezavantajları.....	16
3.1.3. Optik Fiber Çeşitleri.....	17
3.2.Fiber Optik Algılayıcılar.....	27
3.2.1. Fiber Optik Algılayıcıların Sınıflandırılması.....	29
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
4.1.Materyal	32
4.1.1. 3 Boyutlu Hareket Düzenegi.....	32
4.1.2. Fiber Optik Devre Tasarımı.....	41
4.1.3. Denetleyici Devre Tasarımı.....	50
4.2.Yöntem.....	53
4.2.1. Snell Yansıma Kanunları.....	53
4.2.2. Yer Değiştirmenin Işığın Genliğini Değiştirmesi.....	55

5. BULGULAR	57
5.1.Ön çalışma	57
5.2.3D-YDA.....	61
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	75
KAYNAKLAR	77
EKLER	88
Ek 1. Denetleyici Devre İçin IDE Kodları.....	88
ÖZGEÇMİŞ	97



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Yer değiştirme vektörü.....	3
Şekil 2.2. Bir LVDT algılayıcıda üç bobin ve hareketli endüvi yapısı.	6
Şekil 2.3. Bir LVDT algılayıcının iç yapısı.	6
Şekil 3.1. 9/125 Tek modlu optik fiberin yapısı.....	17
Şekil 3.2. 50/125 Çok modlu fiber optik kablonun yapısı.	19
Şekil 3.3. PCS optik fiberin yapısı.	20
Şekil 3.4. SCS optik fiberin yapısı.	21
Şekil 3.5. POF yapısı.....	21
Şekil 3.6. Standart POF kablonun optik değerler eğrisi.	22
Şekil 3.7: Kırılma indis profili ve ışın iletimi. (a) çok modlu basamak indisli fiberlerde, (b) tek modlu basamak indisli fiberlerde.	25
Şekil 3.8. Çok modlu gradyan (değişken) indisli fiberde kırılma indis profili ve ışın iletimi (meridyenel ışınlar).	27
Şekil 3.9. Optik fiberin yapısı.	28
Şekil 3.10. FOA'ların temel bileşenleri.	29
Şekil 3.11. Pasif/Dışta etkileşimli (Extrinsic) algılayıcının şematik gösterimi.....	30
Şekil 3.12. Aktif/İçte etkileşimli (Intrinsic) algılayıcının şematik gösterimi.....	30
Şekil 3.13. Sönen alanlı (Evanescent) algılayıcının şematik gösterimi.	31
Şekil 4.1. (a) Algılayıcı düzeneğin zemini, (b) hareketli parça tabanı, (c) hareketli parça.	32
Şekil 4.2. (a) Sabit parça tabanı, (b) sabit parça-taban bağlantı desteği, (c) sabit parça. ...	33
Şekil 4.3. (a) Düşey eksen hareketini sağlayan parça, (b) ayaklar, (c) bağlantı civatası, (d) somun.	33
Şekil 4.4. 3 boyutlu hareket mekanizmasının SolidWorks çizimlerinin tamamlanması....	34
Şekil 4.5. (a) 3D yazıcının görüntüsü, (b) genel yapısı.	34
Şekil 4.6. 1,75 mm parlak beyaz PLA filament.	36
Şekil 4.7. Parçaların üretim aşaması (a) bağlantı civatası, (b) sabit parça.....	37
Şekil 4.8. Üretilen hareketli ve sabit parça.....	38
Şekil 4.9. Sabit parçaya POF kuplörün yerleştirilmesi.	38
Şekil 4.10. 3D-YDA.	39
Şekil 4.11. Hedef yüzey tipi ile karakteristik tepki eğrisinin değişimi [147].....	39
Şekil 4.12. IF-E97 ışık kaynağı.	42
Şekil 4.13. IF-E97 ışık kaynağının enine kesiti.	43
Şekil 4.14. IF-E97 ışık kaynağının uygulama devresi $I_F=20$ mA.	43
Şekil 4.15. IF-E97 Uygulama devresinin kurulumu.	44
Şekil 4.16. Işık kaynaklarının çalıştırılması.	44
Şekil 4.17. IF-D91.	46
Şekil 4.18. IF-D91'in enine kesiti.	47
Şekil 4.19. IF-D91 uygulama devresi.....	48
Şekil 4.20. IF-D91 Uygulama devresinin kurulumu.	48
Şekil 4.21. 1×2 POF kuplör (IF 562).	49
Şekil 4.22. Arduino Uno.	52
Şekil 4.23. Işığın kırınımı.....	53
Şekil 4.24. Kritik açı durumu.	53
Şekil 4.25. Tam iç yansıma.	54
Şekil 4.26. Yer değiştirme ile kaynak ışığının genliğinin modüle edilmesi.....	55
Şekil 4.27. Transempedans yükseltici devresi.	55
Şekil 5.1. Çift POF'lu prototip.	57

Şekil 5.2. Algılama mesafesi testi (a) kaplama öncesi, (b) Al kaplanmış hali.	57
Şekil 5.3. Çift POF'lu prototiple yer değiştirme deneyleri.	58
Şekil 5.4. Çift POF'lu prototipin yer değiştirme-çıkış gerilimi ilişkisi.....	59
Şekil 5.5. Kabul açısı [128]......	60
Şekil 5.6. Düzeneğe sabitlenen POF kabloların 5000 mcd InGaN beyaz ışık kaynağıyla test edilmesi.	61
Şekil 5.7. 3D-YDA'nın optik ve elektronik bağlantılarının gerçekleştirilmesi.	62
Şekil 5.8. Yer değiştirme mesafesi.	63
Şekil 5.9. x, y ve z eksenlerinde 0-30 mm aralığındaki her bir değer için okunan 5 ölçümün ortalaması alınarak elde edilmiş olan sırasıyla, (a) x-ekseni, (b) y-ekseni, (c) z-eksenindeki 3D-YDA çıkışı eğrileri.....	67
Şekil 5.10. Her bir veri seti için elde edilen en düşük ve en yüksek voltaj değerlerinin ortalamasına göre oluşturulmuş tek eksenli mesafe değişimine göre sensör çıkışı.	69
Şekil 5.11. Eksenel değerler.	70
Şekil 5.12. IDE arayüzü kullanılarak komut satırlarının yazılması.	71
Şekil 5.13. 3D-YDA'nın tüm bileşenleri.	72
Şekil 5.14. Seri port ekranında anlık yer değiştirme veri takibi.....	73
Şekil 5.15. Deneysel çalışmalar.	74

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1. SMF'lerin geometrik ve mekanik özellikleri.....	18
Tablo 3.2. E tipi 9/125 SMF kablunun optik değerleri.....	18
Tablo 3.3. 50/125 MMF'lerin geometrik ve mekanik özellikleri.....	19
Tablo 3.4. OM2 tipi 50/125 MMF kablunun optik değerleri.....	20
Tablo 3.5. Standart POF kablunun karakteristik değerler tablosu.....	22
Tablo 4.1. 3D yazıcının teknik özellikleri.....	35
Tablo 4.2. $T_A=25^\circ\text{C}$ altında IF-E97 ışık kaynağının karakteristik bilgileri.....	42
Tablo 4.3. $T_A=25^\circ\text{C}$ altında IF-D91 fotodedektörün karakteristik bilgileri.....	46
Tablo 4.4. IF 562 POF kuplörün özellikleri.....	50
Tablo 4.5. Mümkün hareket ve çıkış durumlarının tespit edilmesi.....	51
Tablo 4.6. Arduino Uno teknik detayları.....	52
Tablo 5.1. x-eksenindeki tek boyutlu tekrarlı ölçümler.....	64
Tablo 5.2. y-eksenindeki tek boyutlu tekrarlı ölçümler.....	65
Tablo 5.3. z-eksenindeki tek boyutlu tekrarlı ölçümler.....	66
Tablo 5.4. Tüm ölçümlerdeki alt ve üst limit değerler.....	68

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
λ	: Dalga boyu
Δ_x	: Yer değiştirme
x_1	: Başlangıç konumu
x_2	: Son konum
n_0	: Optik fiberi çevreleyen ortamın kırılma indisi
n_1	: Öz kırılma indisi
n_2	: Yelek kırılma indisi
n_b	: Boşluğun kırılma indisi
n_y	: Yüzey kırılma indisi
n_{Al}	: Alüminyum kırılma indisi
$n(r)$: Kırılma indisi profili
r	: Fiber öz ekseninin uzaklığı
a	: Fiber özünün yarıçapı
M_S	: Mod sayısı (Mod hacmi)
V	: Normalize frekans
α	: Karakteristik kırılma indisi için profil parametresi
I_A	: R_A direnci üzerinden akan sürücü akımı
I_B	: R_B direnci üzerinden akan sürücü akımı
I_T	: Toplam sürücü akımı
V_{U1}	: Sürücü devrelerinin yük altındaki çıkış gerilimi
V_f	: IF-E97 ileri yön gerilimi
V_{CC}	: Besleme gerilimi
V_R	: Çıkış gerilimi
R_L	: Yük direnci
Φ_1	: Geliş açısı
Φ_2	: Kırılma açısı
Φ_C	: Kritik açı
θ	: Kabul açısı
κ	: Sönüm katsayısı
κ_y	: Yüzey sönüm katsayısı
κ_{Al}	: Alüminyum yüzey sönüm katsayısı

Kısaltmalar	Açıklama
3D-YDA	: 3 Boyutlu Yer Değiştirme Algılayıcı
EMG	: Elektromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)
EMC	: Elektromagnetic Compatibility (Elektromanyetik Uyumluluk)
FOA	: Fiber Optik Algılayıcı
LD	: Laser Diode (Lazer Diyot)
LED	: Light Emitting Diode (Işık yayan diyot)
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer (Lineer değişken diferansiyel transformatör)
MMF	: Multimode Fiber (Çok Modlu Fiber)
NA	: Nümerik Açıklık
OTDR	: Optical Time Domain Reflectometer (Optik zaman alan reflektometresi)
PCS	: Plastic Clad Silica (Plastik kaplanmış cam)
PLA	: Polilaktik Asit
PMMA	: Polimetil Metakrilat
POF	: Plastic Optical Fiber (Plastik Optik Fiber)
POF-YDA	: POF-Yer Değiştirme Algılayıcı
SCS	: Silica Clad Silica (Cam kaplanmış cam)
SMF	: Single Mode Fiber (Tek modlu Fiber)
YDA	: Yer Değiştirme Algılayıcı

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÜÇ EKSENLİ YER DEĞİŞTİRME ÖLÇÜMÜ İÇİN FİBER OPTİK ALGILAYICI GELİŞTİRİLMESİ

YUNUS GÖRKEM

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şekip Esat HAYBER

Hareket algılayıcı sistemlerin tasarımında araştırmacılar, genellikle mekanik prensiplere veya elektromanyetik indüksiyon prensibine dayanan ölçümler üzerine çalışmalar yapmışlardır. Ancak mikrometre boyutunda yer değiştirme ölçmek gerektiğinde hassasiyet son derece düşük olabilmektedir. Ayrıca tespit edilen hareketlerin okunması için ölçüm yapılan bölgeye gidilerek metre, kumpas, mikrometre gibi mesafe ölçerlerle hareket tespitini manuel olarak yapmak gerekir. Oysa pek çok önemli alanda anlık ölçümlerle yer değiştirmeyi algılamak ve elde edilen verileri hızlı bir şekilde dijital ortama aktararak anlamlandırmak avantaj sağlar. Bu sebeple araştırmacılar yer değiştirme ölçümü için elektriksiz çözümler üzerine de çalışmışlardır. Ancak bu yapılar elektromanyetik girişime karşı duyarlı yapılardır.

Literatürde ve uygulamada sıklıkla haberleşme amacıyla kullanılan fiber optik teknolojisi, son yıllarda algılayıcı yapıların tasarımında da kendine etkin bir faaliyet alanı bulmuştur. Fiber optik algılayıcılar, geleneksel yöntemlere göre daha fazla hassasiyet sağlarlar. Aynı zamanda yapısal özellikleri bakımından mevcut sistemlere uyarlanabilme kabiliyetleri

oldukça yüksektir. Fiber optik algılayıcılar, elektriksel ve manyetik olarak yalıtkan cihazlar oldukları için yüksek voltaj, yüksek sıcaklık veya aşındırıcı ortamlarda kullanılabilirler. Bu özelliklerinin yanında; fiber optik algılayıcılar, iletişim sistemleriyle uyumludur ve uzaktan algılama gerçekleştirebilirler.

Bu çalışmada, basit tasarımlı, düşük maliyetli, yüksek hassasiyetli, x-y-z eksenlerindeki hareketleri algılayarak online olarak bildirebilen fiber optik üç boyutlu hareket algılayıcı tasarlanmış, geliştirilmiş ve gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan ve imal edilen üç boyutlu hareket mekanizmasının her üç eksenine üzerine yerleştirilen POF kuplörler yardımıyla ışık kaynağı ve dedektör arasındaki iletişim sağlanmıştır. Önerilen algılayıcı sistemi, yansıma ilkesine bağlı olarak ışığın genliğinde meydana gelen değişikliklerin analizine dayanmaktadır. Böylelikle geliştirilen algılayıcıyla yer değiştirmenin büyüklüğü ve yönü tayin edilebilmiştir. Bu veriler, mikroişlemciyle tasarlanan devre ve uygun yazılımlarla anlamlı bilgilere dönüştürülmüş ve bilgisayar ekranına anlık olarak aktararak online izlemeye imkan tanınmıştır. Yapılan tekrarlı ölçümler neticesinde algılayıcı düzeneği, hareketin oluşmasını ve hareketin yönünü üç boyutlu olarak doğru bir şekilde tespit edebilmiştir.

Temmuz 2022, 112 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Fiber optik algılayıcı, Yer değiştirme, Üç boyutlu hareket algılayıcı

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

DEVELOPMENT OF A FIBER OPTIC SENSOR FOR TRIAXIAL DISPLACEMENT MEASUREMENT

YUNUS GÖRKEM

**Kırsehir Ahi Evran University
Graduate School of Sciences and Engineering
Advanced Technologies Department**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Şekip Esat HAYBER

In designing motion-sensing systems, researchers have generally worked on measurements based on mechanical principles or the electromagnetic induction principle. However, the sensitivity can be extremely low when it is necessary to measure displacement at the micrometer scale. In addition, to read the detected movements, it is necessary to go to the measurement area and manually detect the movement with distance meters such as meters, caliper, and micrometer. However, it is advantageous to detect the movement of displacement with instant measurements in many vital areas and make sense of the obtained data by quickly transferring it to the digital environment. For this reason, researchers have also studied electrical solutions for displacement measurement. However, these structures are sensitive to electromagnetic interference.

Fiber optic technology, frequently used for communication in literature and practice, has also found an effective field of activity in designing sensor structures in recent years. Fiber optic sensors provide greater sensitivity than conventional methods. At the same time, their adaptability to existing systems is relatively high in terms of their structural features. Because fiber optic sensors are electrically and magnetically insulating devices, they can be used in high voltage, high temperature, or corrosive environments. Besides these features, fiber optic sensors are compatible with communication systems and can perform remote sensing.

In this study, a simple-designed, low-cost, high-precision fiber optic three-dimensional motion detector, which can detect and report the movements in the x-y-z axes online, was designed, developed, and realized. The communication between the light source and the detector is provided with the help of plastic optical fiber couplers placed on all three axes of the designed and manufactured three-dimensional movement mechanism. The proposed sensor system is based on the analysis of changes in light amplitude due to the reflection principle. Thus, the magnitude and direction of the displacement could be determined with the developed sensor. This data has been transformed into meaningful information with the circuit designed with a microprocessor and appropriate software, and it has been transferred to the computer screen instantly, allowing online monitoring. As a result of repeated measurements, the sensor assembly could accurately detect the occurrence of motion and the direction of motion in three dimensions.

July 2022, 112 Pages

Keywords: Fiber optic sensor, Displacement, 3D motion detector

1. GİRİŞ

Yer değiştirme, hareket eden bir nesnenin konumundaki değişmedir [1]. Yer altı sismik hareketlerin izlenmesinde, heyelanlarla ilişkili büyük yer değiştirmelerin ölçülmesinde, barajlar ve setlerdeki boylamasına deformasyonun ölçülmesinde, toprak dolgu veya kaya dolgu barajlardaki yatay gerilimin ölçülmesinde, yer altı kazıları ve tünel gibi çalışma sahalarında toprak çöküntüsüyle oluşabilecek kapanışların izlenmesinde, yüzey çatlakları ve derzlerdeki yer değiştirmelerin ölçülmesinde, kirişlerde ve çelik halatlarda gerilmelerin ölçülmesinde, hareketli sanayi ve iş makinalarının arıza tespiti amacıyla kestirimci bakım uygulamalarında, vb. pek çok alanda yer değiştirme faktörü hayati derecede öneme sahiptir. Bu nedenle yer değiştirmenin ölçülmesi, ölçülen değerlerin izlenmesi, elde edilen verilerin aktarılması ve bulguların analizi aşamalarının uygun ölçüm cihazları geliştirilerek takip edilmesi gerekmektedir.

Yapılar yıkılmadan önce deformasyonu tespit etmek, iş makinalarının büyük arızalar çıkarmadan önce kestirimci bakımlarını yapmak ve pek çok alanda hayati derecede önemli sorunları önceden fark ederek önlem alabilmek için yer değiştirme parametresi yüksek hassasiyetle ölçülmelidir.

Yer değiştirme ölçümü amacıyla günümüze kadar kullanılan yapılar genellikle mekanik sistemleriyle çalışan ve manuel okuma cihazlarıyla ölçümün takip edildiği yapılardır. Bunun yanında lineer değişken diferansiyel transformatörler ile yer değiştirme ölçümleri yapılarak, yer değiştirme ölçümü için elektriksel çözümler üzerinde de çalışılmıştır [2].

Algılayıcılar, yerleştirildikleri ortamlarda meydana gelen fiziksel değişiklikleri tespit etmek amacıyla geliştirilmiş cihazlardır. Elektriksel, manyetik, mekanik, termal, optik, kimyasal vb. değişimleri denetleyerek pek çok büyüklüğün değişimini algılayıcı cihazlarla takip etmek mümkündür. Algılayıcı yapıları, temelde analog ve dijital olarak sınıflandırmak mümkündür. Analog algılayıcılar, denetledikleri fiziksel büyüklüklerde meydana gelen değişimleri tespit eder ve tespit edilen değişimlere bağlı olarak değişen akım ve gerilim bilgisi sağlarlar. Analog algılayıcılar, giriş büyüklüğünün değişimine göre çıkışta sonsuz sayıda değer gösterebilirler. Dijital algılayıcılar ise yakınlık, konum gibi verileri tespit etmek

amacıyla doğrusal ya da açısal ölçümler yaparlar. Dijital algılayıcılar, giriş büyüklüğünün değişimine göre çıkışında sadece 0 veya 1 değerlerini gösterebilirler.

Algılayıcılar, aktif ve pasif olarak da sınıflandırılabilirler. Aktif algılayıcılar, dışarıdan harici bir besleme kullanarak kendi sinyalini üreten, ürettiği sinyali algılama bölgesine yönlendiren ve bu sinyalin değişimini denetleyen algılayıcılardır. Kızılötesi ve ultrasonik algılayıcılar aktif algılayıcılar grubuna örnek olarak verilebilirler. Pasif algılayıcılar ise ortamdaki değişimleri algılamak için sinyal üretmeleri gerekmediğinden dışarıdan harici bir beslemeye ihtiyaç duymazlar. Fotodiyotlar, sınır anahtarları ve termistörler pasif algılayıcılar grubuna örnek olarak verilebilirler.

Son yıllarda, fiber optik algılayıcıların araştırılması ve geliştirilmesi faaliyetleri çok geniş bir alana yayılmıştır. Tıp, kimya, telekomünikasyon ve otomotiv endüstrilerini de kapsayan pek çok teknolojik alanda fiber optik algılayıcı uygulamaları üzerinde her geçen gün yeni çalışmalar literatüre kazandırılmaktadır.

Optik algılayıcılar genel olarak ışık kaynağı olan bir verici, algılama bölgesi tarafından modüle edilen ışığın toplandığı bir alıcı ve gönderilen sinyalle alınan sinyal arasındaki farkları değerlendirerek işleyen elektronik denetleyici sistemden meydana gelir. Bu haliyle optik algılayıcılar, aktif algılayıcılar sınıfına girerler. Sistem gereksinimlerine göre de analog veya dijital çıkış sağlayabilirler.

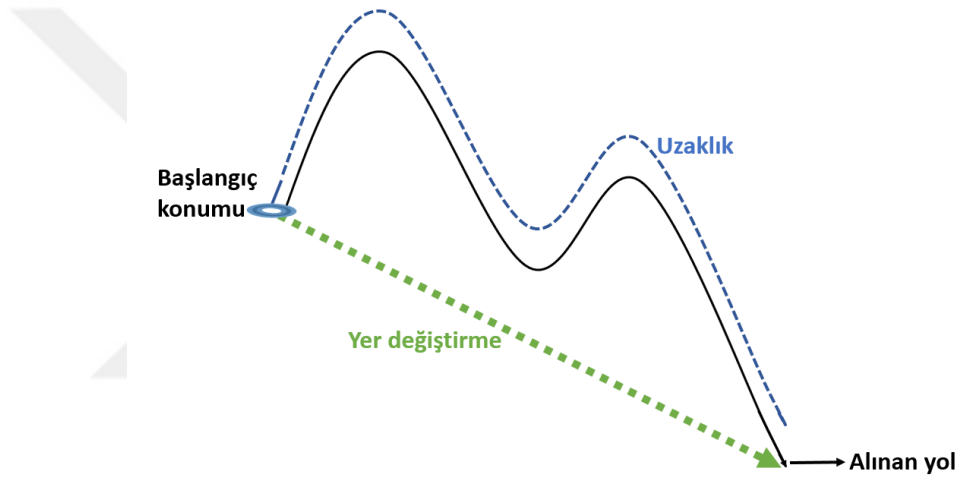
Bu çalışmayla tasarlanan, ışığın yansıma prensibine göre yer değiştirmenin ışığın genliğinde meydana getirdiği değişimlerin analiz edilmesi yöntemiyle yerleştirildiği düzlemin her üç ekseninde meydana gelen herhangi bir hareketin yönünü ve büyüklüğünü temassız olarak tespit edebilen fiber optik algılayıcı yapısı ele alınacaktır.

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Yer Değiştirme

2.1.1. Yer Değiştirmenin Tanımı

Hareket eden bir nesnenin konumundaki değişme olarak tanımlanan yer değiştirme parametresi hem yönü hem de büyüklüğü olduğu için bir vektördür. Nesnenin harekete başladığı konumuyla (referans noktası) belirli bir zaman sonra bulunduğu konum arasında, son konum yönünde, doğrusal bir vektör olarak ifade edilir. Şekil 2.1’de yer değiştirme vektörü görülmektedir.



Şekil 2.1. Yer değiştirme vektörü.

Yer değiştirme matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Delta_x = x_2 - x_1 \quad (2.1)$$

Burada, Δ_x yer değiştirme, x_1 başlangıç konumu, x_2 son konum değerlerini ifade eder.

Yeryüzünün sismik hareketleri, yapıların deformasyonu, iş makinalarının titreşimleri gibi pek çok durum yer değiştirme kavramıyla ilişkilidir. Yapılar yıkılmadan önce deformasyonu tespit etmek, iş makinalarının büyük arızalar çıkarmadan önce kestirimci bakımlarını yapmak ve pek çok alanda hayati derecede önemli sorunları önceden fark ederek önlem alabilmek için yer değiştirme ölçümü yüksek hassasiyetle ölçülmelidir.

Geleneksel yer değiştirme ölçüm yöntemleri pek çok sınırlılığa sahiptir. Bu nedenle geleneksel yöntemler yerine; elektriksel ve manyetik bağışıklılığa sahip, veriyi mikrometre altı değerlere kadar algılayabilme kabiliyeti olan, veriyi algılama, iletme ve işleme konularında yüksek hız ve performans gösteren, kolay kalibre edilebilen ve daha pek çok avantajı bulunan fiber optik algılayıcı (FOA) yapısıyla yer değiştirme parametresinin ölçülmesi önemli avantajlar sağlayacaktır.

2.1.2. Yer Değiştirme Ölçümünün Gerekli Olduğu Alanlar

Yer değiştirme parametresi; depremlerin ve yer altı sismik hareketlerin izlenmesinde [3], volkanik alanlardaki yer değişimlerinin izlenmesinde [4], heyelanlarla ilişkili büyük yer değiştirmelerin ölçülmesinde [5], barajlar ve setlerdeki boylamasına deformasyonun ölçülmesinde [6], toprak dolgu veya kaya dolgu barajlardaki yatay gerilimin ölçülmesinde [7], yer altı kazılarında, tünellerde vb. çalışma sahalalarında toprak çöküntüsüyle oluşabilecek kapanışların izlenmesinde [8], yüzey çatlakları ve derzlerdeki yer değiştirmelerin ölçülmesinde [9], çelik halatlarda gerilmelerin ölçülmesinde [10], hareketli sanayi ve iş makinalarının arıza tespiti amacıyla kestirimci bakım uygulamalarında [11], vb. pek çok alanda hayati derecede öneme sahiptir.

Bu nedenle yer değiştirmenin ölçülmesi, ölçülen değerlerin izlenmesi, elde edilen verilerin aktarılması ve bulguların analizi aşamalarının uygun ölçüm cihazları geliştirilerek takip edilmesi gerekmektedir.

2.2. Literatür Taraması

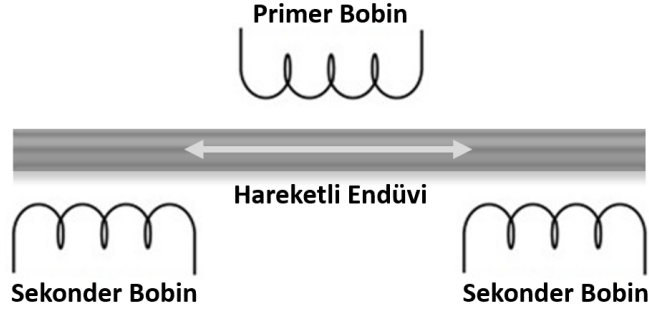
2.2.1. Geleneksel Yer Değiştirme Ölçüm Yöntemleri

Katı mekaniğinde önemli bir fiziksel ölçüt olan yer değiştirme parametresinin; hassas hizalama, konum izleme, titreşim analizi ve robotik gibi çeşitli uygulamalarda ölçümleri gereklidir [12-14]. Son yıllarda endüktans, kapasitans, ultrasonik ve fiber optik yöntemlere dayanan bir dizi yer değiştirme algılayıcı (YDA) sistemleri geliştirilmiştir [15]. Endüktans tipi transdüserlerde, elektriksel temas olmadan, endüktans ile yer değiştirmenin değişimine dayalı olarak yapılan ölçümler iyi bir lineer tepki gösterir. Ancak boyutlarının büyüklüğü, düşük frekans tepkisi, bobin ısınması ve elektromanyetik çekim gibi dezavantajları kaydedilmiştir [16]. Kapasitans tipi YDA'larda ise yüksek hassasiyetlerde ölçüm yapabilme kabiliyetine karşın parazitik kapasitansın ölçüm sonucunu bozucu etki göstermesi önemli bir

dezavantajdır [17]. Endüktans ve kapasitansın, YDA üretim maliyetini artırması da göz önünde bulundurulması gereken bir unsurdur.

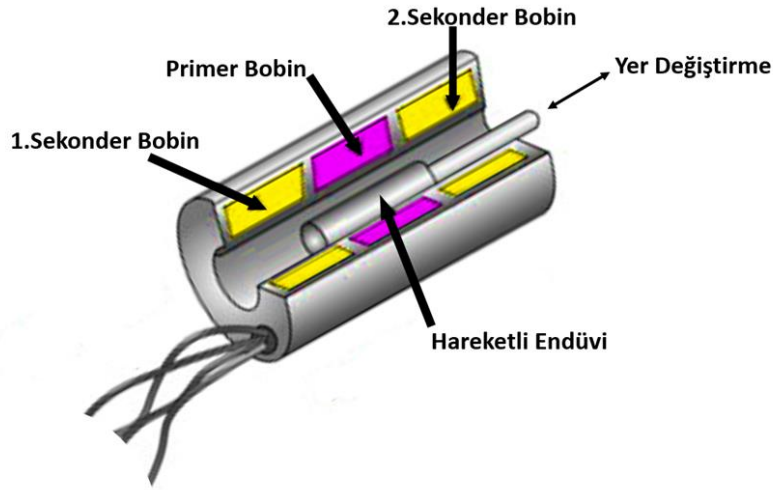
Yer değiştirme ölçümü amacıyla günümüze kadar kullanılan yapılar genellikle mekanik sistemleriyle çalışan ve manuel okuma cihazlarıyla ölçümün takip edildiği yapılardır. Uygulamada sıklıkla karşılaşılan yer değiştirmeyi ölçen aygıtların çalışması, YDA'nın ölçüm alanına sabitlenmesi ve ölçüm alanına belirli aralıklarla giden bir kişinin mikrometre, kumpas gibi manuel ölçüm cihazlarıyla ölçüm anına kadar olan herhangi bir zaman diliminde meydana gelmiş olan yer değiştirme miktarını tespit etmesine dayanır [18]. Ölçümlerin manuel yöntemler ve okuma cihazlarıyla yapılması hatalı ölçümlere ve ölçüm hassasiyetinin düşmesine yol açar. Aynı zamanda yer değiştirmenin meydana geldiği zaman bilinmemektedir. Ölçüm yapılana kadar sistemsel zararların meydana gelme ihtimali göz önüne alındığında, ölçüm yapmak için çok geç kalınmış olabileceği ortadadır. Benzer tipte imal edilen algılayıcıların, mekanizma üzerine yerleştirilmiş olan tellerin titreşim frekansını tespit etmeye dayalı olarak yer değiştirme ölçümü yapan tipleri de vardır [19]. Bunun yanında lineer değişken diferansiyel transformatörler (LVDT) ile yer değiştirme ölçümleri yapılarak, yer değiştirme ölçümü için elektriksel çözümler üzerinde de çalışılmıştır [2].

LVDT, bir primer ve iki sekonder bobinden oluşan bir dış transformatör içinde bir ferromanyetik endüvinin hareket ettiği endüktif bir algılayıcı türüdür [20]. Transformatör ve endüvi olmak üzere iki parçadan meydana gelmiştir. Elektromanyetik indüksiyon prensibine bağlı olarak yer değiştirme, bobinler arasındaki elektromanyetik akıyı değiştirir. Bu nedenle çıkış geriliminde de değişim meydana gelir. Çıkış gerilimindeki değişimlerin analiz edilmesiyle, yer değiştirmenin yönü ve miktarıyla ilgili veriler elde edilir. Birbirine zıt yönlerde sarılmış olan sekonder bobinler, primer bobinin her iki tarafında bulunur. Primer bobin, bir alternatif akım uyarımıyla uyarıldığında oluşan manyetik akı, ferromanyetik endüvi aracılığıyla sekonder sargılara aktarılır. Endüvi transformatörün manyetik merkezine yerleştirildiğinde, iki sekonder bobinin sargılarının zıt yönlerde olması nedeniyle, sekonder bobinler birbirinin etkisini yok eder ve çıkışta voltaj ölçülmez. Bununla birlikte, endüvi merkezden uzaklaştığında, iki sekonder sargıya aktarılan "indüklenen akı miktarı" birbirinden farklı olacağı için devrede bir voltaj farkı oluşur. Endüvi, LVDT'nin çalışma aralığında kaldığı sürece çıkış voltajı, endüvinin yer değiştirmesiyle doğrusal olarak değişir [21]. Şekil 2.2'de bir LVDT algılayıcının yapısı görülmektedir.



Şekil 2.2. Bir LVDT algılayıcıda üç bobin ve hareketli endüvi yapısı.

Şekil 2.3'te bir LVDT algılayıcıda dış transformatör içinde ferromanyetik endüvinin merkezi konumu görülmektedir [22].



Şekil 2.3. Bir LVDT algılayıcının iç yapısı.

LVDT'lerde algılama elemanları arasında mekanik bir temas olmadığı için, okumaları bozacak hiçbir sürtünme kuvveti yoktur. LVDT kullanarak yapılan yer değiştirme ölçümlerinde endüvi LVDT'nin çalışma aralığında kaldığı sürece çıkış voltajı, endüvinin yer değiştirmesiyle doğrusal olarak değişir. Ancak sistemin doğru çalışması için endüvinin bobinler içinde kalması gerektiğinden, çalışma aralığı algılayıcının boyutuyla sınırlıdır [20]. Çalışma aralığının küçük olması bir dezavantaj olduğu gibi, çalışma aralığını artırmak amacıyla algılayıcının boyutlarını büyütme de ayrı bir dezavantaj getirecektir. Ayrıca algılayıcının elektriksel ve manyetik prensiplere dayalı olması, elektromanyetik etkilerin yoğun olduğu ortamlarda hatalı ölçümler yapılmasına neden olur. Çeşitli amaçlarla tasarlanmış olan ve pratikte yaygın bir şekilde kullanılan, temelde LVDT prensibine göre çalışan bazı yer değiştirme ölçerler, uygulama alanlarıyla birlikte aşağıda anlatılmıştır:

- Beton barajlardaki bitişik bloklar arasındaki inşaat derzlerinde kullanılmak üzere tasarlanmış olan ve eklem genişlemesini veya daralmasını takip etmek için eklem boyunca yerleştirilen gömme eklem ölçerler.
- Çelik halatlarda gerilmeleri ölçmek için tasarlanmış olan halat gerinimi ölçerler.
- Yüzeylerdeki çatlaklar ve derzlerdeki hareketi ölçmek için tasarlanmış olan çatlak ölçerler.
- Erişimin sınırlı olduğu veya izleme araçlarının mümkün olduğunca göze batmaması gereken yapılarda daha küçük yüzey çatlakları ve derz hareketlerini takip etmek amacıyla tasarlanmış olan mikro çatlak ölçerler.
- Yer altı kazılarında, tünellerde, vb. çalışma ortamlarında boşaltılan bölgede meydana gelebilecek toprak kapanışlarını izlemek için tasarlanmış olan yakınsama ölçerler.
- Dengesiz yamaçlarda; kaya, kar, vb. materyallerin hareketini izlemek ve heyelanlarla ilişkili büyük yer değiştirmelerin ölçümü için tasarlanmış olan uzun menzilli yer değiştirme ölçerler.
- Barajlar ve setlerdeki boylamasına deformasyonu ölçmek için tasarlanmış olan deformasyon ölçerler.
- Toprak dolgu veya kaya dolgu barajlardaki yatay gerilimi ölçmek ve baskı altındaki bir malzemenin deformasyonunu tespit etmek için kullanılan ekstansometreler.

2.2.2. Literatürdeki Fiber Optik Algılayıcılar

Bu bölümde, literatürde FOA'lar ve algılayıcı yapıları oluşturan sistemlerle ilgili yapılan çalışmalardan bazıları incelenmiştir. FOA'lar, geleneksel algılayıcılarla karşılaştırıldığında, yüksek hız, elektriksel pasiflik ve elektromanyetik parazitlere karşı bağımsızlık gibi birçok avantaja sahiptir ve yer değiştirme ölçümüne olanak sağlar.

Son yıllarda, literatürde mesafe ölçümleri için çeşitli optik algılayıcılar rapor edilmiştir [23]. Temassız YDA'lar; mikromekanik, süreç kontrolü, kalite değerlendirmesi ve prototipleme gibi çok sayıda endüstriyel uygulamada önemli bir unsurdur. Bu nedenle, minimum maliyetle yüksek çözünürlüklü ve geniş dinamik aralığa sahip yüksek kaliteli optik algılayıcılara ihtiyaç duyulmaktadır.

Genel olarak, interferometrik optik ve genlik modülasyonu tabanlı algılayıcılar olmak üzere iki tür optik algılayıcı kullanılmaktadır. İnterferometrik optik algılayıcılar, saçak sayımına dayanırlar. Yüksek çözünürlük ve kararlılık sunarlar. Ancak tepkileri ışığın dalga boyuna

bağlıdır [24]. Genlik modülasyonu tabanlı algılayıcılar ise ışığın genliğinde meydana gelen değişimlerin takibini yaparlar.

FOA'lar elektromanyetik girişim (EMG) etkilerine karşı duyarsızlık, yüksek hassasiyet, hafiflik, küçük boyut, hızlı tepki, yüksek hassasiyette temassız ölçüm, yüksek ısılara dayanıklılık ve uzaktan çalıştırma yetenekleri gibi avantajlı özellikleri sayesinde pek çok alanda klasik algılayıcılara değerli bir alternatif sunarlar [25].

FOA sistemlerinde algılayıcı uçları olarak kullanılan Fiber Bragg Izgaraları yapılarında, ölçülecek parametreyle ilişkili olarak değişen dalga boyu, iletim, yansıma ve kırılma indisi gibi optik parametrelerin genlik değişiklikleri analiz edilerek çeşitli algılayıcı yapılar tasarlanmıştır [26].

Günümüzde FOA'lar, ölçüm sistemlerinde süreç takibi ve kontrolünü etkin bir şekilde gerçekleştirebilmek için kullanılması gerekli cihazlar haline gelmiştir. Fabrika otomasyonu, otomotiv endüstrisi, telekomünikasyon, bilgisayarlar, robotik uygulamalar, çevresel izleme, tarım, tıbbi uygulamalar ve pek çok alanda FOA'lar geliştirilmektedir. FOA'larla ilgili pek çok uygulama literatürde mevcuttur [27-33].

Süreçlerin izlenmesini, kontrolünü ve güvenliğini gerektiren çeşitli teknolojik alanlarda sürekli olarak yeni zorluklar ortaya çıkmaktadır. Örneğin, elektrokimyasal algılama sistemlerine alternatif olarak korozyon süreçlerinin izlenmesi için yeni optik algılayıcı sistemler geliştirilmiştir. Metal yapılarda korozyon, güvenlik, bakım ve onarım maliyetlerinin yanında, bakımlar nedeniyle makinenin çalışmasının durdurulması ve üretim süreçlerinin kesintilere uğraması gibi sorunlar sektörel bazda pek çok farklı süreci de olumsuz olarak etkilemektedir. Metalik bir numunede korozyon hızı, ağırlık kaybının takibi veya elektrokimyasal yöntemlerle değerlendirilir. Bununla birlikte, korozyon izleme için kullanılan ve holografik interferometriye dayanan optik teknikler de mevcuttur [34, 35]. Bu yöntemlerdeki en önemli kısıtlılık, yerinde ölçüm yapılması gereken durumlarda meydana gelir. Oysa normal şartlarda laboratuvar koşullarında yapılması gereken ölçümlerdir. Bu nedenle, ölçümler için yeni alternatiflerin araştırılması önemlidir. Son zamanlarda, korozyon ölçümü için yoğunluktaki değişime dayalı optik algılayıcı sistemleri önerilmiştir [36-38]. Bu optik tekniğin başlıca avantajları; optik kaynak sinyalinin yoğunluk değişimlerine karşı duyarsız olması nedeniyle ölçümün hatalardan korunmuş olması, korozyon bilgisiyle değişen bilgi sinyalini algılama sisteminin basitliği ve FOA yapısıyla yerinde korozyon ölçümleri yapılabilmesidir.

Fotonikteki önemli uygulamaları nedeniyle doğrusal olmayan optik özelliklere sahip yeni malzemelerin geliştirilmesi için son zamanlarda pek çok çalışma yapılmıştır [39]. Optoelektronik cihazlarda ve optik bilgi işlemedeki büyük potansiyel uygulamaları nedeniyle kapsamlı araştırmalar yapılmış ve bu özellikte birçok yeni malzeme elde edilmiştir [40, 41]. Son 40 yıldır polipirol, polianilin, politiyofen ve bunların türevleri gibi iletken polimerler kimyasal, elektriksel ve optik özellikleri yönünden incelenmektedir [42]. İletken polimerlerin kimyasal veya elektrokimyasal işlemler yapılarak sentezlenmesi kolaydır. Ayrıca moleküler zincir yapıları, kopolimerizasyon analizi veya yapısal türevler kullanılarak değişime uğratılabilir. İletken polimerlerin en önemli özelliklerinden biri, pozitif veya negatif iyonlarla temas ettiklerinde oksitlenme veya indirgenme kapasiteleridir. İletken polimerlerden oluşan algılayıcılar, yüksek hassasiyet ve kısa tepki süreleri gibi önemli özelliklere sahiptir. İletken polimerlerin kimyasal veya elektrokimyasal işlemlerle sentezlenmesi kolaydır ve moleküler zincir yapıları, kopolimerizasyon yöntemleri veya yapısal türevler kullanılarak değişikliğe uğratılabilir. Aynı zamanda iletken polimerler, algılayıcı yapıların kolayca üretilmesine izin veren mekanik özelliklere de sahiptirler. Belirli kimyasal ajanlar tarafından protonlandıklarında elektriksel ve optik özellikleri değiştirilerek konjuge makromoleküllere dönüştürülebilirler. Son yıllarda, polipirol ve polianilin gibi iletken polimerler, amonyağa maruz kaldıklarında elektriksel iletkenliklerindeki değişiklik tespit edilmiş ve elektriksel iletkenliğin değişimine dayalı olarak kimyasal algılayıcılar olarak önerilmiştir [43-45]. Konjuge polimerler ise ışık yayan diyot (LED) uygulamalarını da kapsayan çeşitli uygulamalarda kullanılan önemli bir malzeme sınıfı haline gelmiştir [46-50]. Aynı zamanda ışık yayan elektrokimyasal hücreler [51], plastik lazerler [52], güneş pilleri [53], alan etkili transistörler [54], kimyasal ve biyolojik algılayıcılar [55-60] gibi uygulamalarda da kullanılmıştır.

Son yıllarda FOA yapılarını oluşturmada, plastik optik fiberler (POF), zorlanmaya karşı yüksek dirençleri, düşük maliyetleri ve kullanım kolaylığı nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekmektedir. POF, herhangi bir özel alet olmadan kullanılabilme kabiliyetine sahip olan avantajlı bir optik fiber türüdür. Bu nedenle POF algılayıcı yapılarının kullanım alanları oldukça geniştir. Buffa ve diğerleri [61] titreşim ölçümü yapmak amacıyla yoğunluğa dayalı bir POF algılayıcı geliştirmişlerdir Kumar ve diğerleri [62] şeker endüstrisinde kullanılmak üzere şeker kamışı suyundaki şeker içeriği konsantrasyonunun tespiti için bir POF algılayıcı yapısı geliştirmiştir. Rajamani ve diğerleri [63] optik yoğunluk değişimlerini tespit ederek sıvı seviye takibi yapan bir POF algılayıcı geliştirmişlerdir. Vargas ve diğerleri [64] petrol

sahası gibi yanıcı ortamlarda tanklardaki yakıt seviyesini ölçmek için POF sıvı seviye algılayıcı geliştirmişlerdir. Batumalay ve diğerleri [65] bağıl nem tespiti için POF algılayıcı geliştirmişlerdir. POF algılayıcılar kimya ve tıp alanlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Lee ve diğerleri [66] pH algılama için kullanılabilir bir mikro bükülmüş fiber optik sensörü geliştirmişlerdir. Zhou ve diğerleri [67] Amonyak ölçümü için gözenekli POF algılayıcı geliştirerek POF algılayıcı yapısı ile kimyasal gaz algılamada başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Yhuwana ve diğerleri [68] kalp atış hızını tespit etmek için bir fiber optik algılayıcı tasarlamışlardır. Deney sonuçlarına göre yüksek hassasiyet ve % 99 doğrusal sonuç elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Yoo ve diğerleri [69] manyetik rezonans (MR) görüntü alımı sırasında solunum sinyallerini ölçebilen iki farklı tipte fiber optik solunum algılayıcı üretmişlerdir.

FOA teknolojisinin gelişimi hızla devam ederken, ülkemizde de pek çok kritik alanda geleneksel ölçüm yöntemlerine alternatif sunan fiber optik yapılar üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Günaydın ve diğerleri [70] geçmişten günümüze, FOA'ların havacılık sektöründe kullanılması üzerine yapılan araştırmalar ve uygulamalar hakkında kapsamlı bilgiler vermişlerdir. FOA'ların üstün özellikleri üzerinde durarak, havacılık alanında gerinim ve sıcaklık ölçümü, darbe ve çatlak tespiti, kompozit malzemelerde delaminasyon, iniş takımlarında hasar tespiti, tork ölçümü, yakıt ya da sıvı seviyesi tespiti, basınç ölçümü ve titreşim ölçümü gibi uygulamalarına değinmişlerdir. Saraçoğlu ve Hayber [71], sütte koruyucu madde tespiti için bükülmüş fiber algılayıcı geliştirmiştir. Kelam ve diğerleri [72] fiber optik yöntemlerle heyelan izleme sistemi oluşturmuşlar ve uygulama sahasındaki heyelan hareketlerini başarıyla takip etmişlerdir. Ayrıca bu çalışma ile yağış değişiminin heyelan hareketine etkisi de ortaya koyularak heyelanların sebep olduğu deformasyon hareketleri incelenmiş ve bu sistemin erken uyarı sistemi olarak da kullanılabileceği ifade edilmiştir. Tabaru ve diğerleri [73], fotoakustik basınç algılayıcı tasarımları için spektral analizler yapmış, teorik model yaklaşımından elde ettikleri sonuçlarla, daha seçici ve daha dar bantlı FA basınç algılayıcıların daha hassas algılama için tasarlanabileceğini ifade etmişlerdir. Güçyetmez ve diğerleri [74], POF kullanarak Fresnel yansımasına dayalı basit ve düşük maliyetli bir anemometre tasarlamışlar ve fresnel yansımasına dayalı düşük maliyetli polimer fiber optik anemometre ile farklı çapta pervaneler kullanarak rüzgar hızı ölçümü yapmışlardır. Hayber ve diğerleri [75], güç trafolarında yağın bozulmasını tespit etmek için yağ kalitesini sürekli olarak izleyen sönen alan soğurmasına dayalı bir FOA

geliştirmişler ve bu alandaki standart yöntemlerle uyumlu ancak çok daha uygun maliyetle online izlemeye imkan tanıyan FOA sistemini önermişlerdir.

2.2.3. Tek Boyutlu Yer Değiştirmede Fiber Optik Yöntemler

POF'lar, kullanım olanakları, geniş çap, nümerik açıklık (NA) ve esneklik [76] nedeniyle hareket algılayıcıları için özel olarak uygundur. Bu değerli nitelikler, POF'ları tasarım ve üretim için uygun hale getirmenin yanı sıra performans açısından da istikrarlı ve güvenilir kılar. POF yer değiştirme algılayıcıları (POF-YDA), bir genlik modülasyon tekniği kullanılarak gösterilmiştir [77-81]. Yansıyarak geri dönen ışık yoğunluğunun gönderilen ışıkla karşılaştırılması, ölçüm ucuyla hedef nokta arasındaki yer değiştirme hakkında bilgi sağlar. Yer değiştirme parametresi, çok düşük maliyetli bileşenler kullanılarak kolayca ölçülebilen optik güçle ilişkilidir. POF-YDA, LED kaynaklarıyla çalışır. Bağlantıları oldukça basittir. Ayrıca ucuz fotodedektörlerle görünür dalga boylarında çalışır. Uygun çözünürlük, uzun çalışma aralığı, geniş frekans kapasitesi ve son derece küçük yer değiştirmeleri algılama imkanı sağlarlar [82].

POF-YDA'ların ikincil dönüştürücüler olarak, yer değiştirme miktarını farklı parametrelerle ilişkilendirerek tespit etmesine dair literatürde pek çok çalışma mevcuttur. Sıcaklık [83], titreşim [84], basınç veya ses [85], ivme [86], yüzey profili [87], bina duvarlarındaki çatlakların takibi [88-90], rüzgar hızı [91], ray sapmaları [92], benzin seviyesi tespiti [93] ve freze makinalarında aşınma tespiti [94] gibi uygulamalar bunlardan bazılarıdır. Bunların yanında yer değiştirmeye ilişkilendirilebilecek pek çok parametrenin izlenmesi de mümkündür. POF-YDA, omurga bükülmesinin izlenmesi [95] veya dişlerde leke oluşumu [96, 97] gibi tıbbi uygulamalar için de kullanılabilir.

POF-YDA'nın temel yapısı, genellikle görünür dalga boyu aralığında ışık yayan bir ışık kaynağı, bir verici fiber, bir alıcı fiber ve yüksek kazanç ve geniş bant genişliği elde etmek için bir transempedans yükselticisine sahip bir fotodedektörden oluşur. Işık, TF'den çıktıktan sonra, mesafenin ölçülmesi gereken hedef yüzeye yansır. Yansıyan ışığı toplayan RF, TF'nin kendisi veya yakınına monte edilmiş farklı bir fiber olabilir. RF'de ışık yoğunluğu, ışık gücünü elektrik voltajına dönüştürmekten sorumlu olan uygun bir optik alıcıyla ölçülür. Alıcı ışık yoğunluğunun miktarı, yansıtıcı yüzeyle TF uçları arasındaki mesafenin bir fonksiyonudur. Dolayısıyla yer değiştirme, alıcı ışık yoğunluğunun ölçülmesiyle elde edilebilir [98].

İnşaat mühendisliği alanında, yapıların deformasyonlarını tespit edebilmek amacıyla yer değiştirme hareketlerinin tespiti ve izlenmesi konusu oldukça dikkat çekmiş ve çeşitli araştırmalar rapor edilmiştir. Beton yapıların deformasyonu her zaman çatlak oluşumuyla birlikte gerçekleşir. Çatlakların, beton yapısında önemli bir deformasyon meydana gelmeden önce erken bir aşamada tespit edilmesi mümkün olursa, kestirimci ve önleyici bakımlar yapılarak yapıların ömrünün uzatılması söz konusu olabilir. Daha düşük maliyetlerle yapıların kurtarılmasının yanı sıra, yapının kontrolsüz yıkımlara maruz kalması sonucunda gerçekleşebilecek vahim sonuçlarla karşılaşmamak en önemli avantaj olarak değerlendirilmelidir. İnşaat mühendisliği alanında yer değiştirme veya çatlak izleme için bir dizi FOA geliştirilmiştir. Rossi ve Le Maou [99], çatlaklar nedeniyle fiberlerdeki sinyalin tamamen kaybolmasını inceleyerek, çatlakları tespit amacıyla için betona gömülü optik fiberleri geliştirmişlerdir. Ansari ve Navalurkar [100], fiberlerin makro bükülme etkisine dayalı olarak çatlakların meydana getirdiği yer değiştirmeleri ölçmek için çimentolu kompozitlere gömülü dairesel fiber halkalar yerleştirmiştir. Ohno ve diğerleri [101], Brillouin saçılmasına dayalı dağıtılmış optik fiber gerinim algılayıcı geliştirmişlerdir. Brillouin optik zaman alan reflektometresi (OTDR), 10 km’lik bir optik fiber hattı boyunca gerinim sürekli olarak ölçebilmiş ve bu özelliği sayesinde bina, tünel ve set gibi büyük ölçekli yapılardaki deformasyonların tespitini yapmak amacıyla önerilmiştir. Leung ve diğerleri [102, 103] küçük çatlak izleme için iyi performans gösteren ve önceden çatlak konumu bilgisi gerektirmeyen, OTDR’ye dayalı bir “zizak” çatlak fiber algılayıcı geliştirmişlerdir. Çalışmalarında beton üzerindeki çatlağı belirledikten sonra bir optik fiberi çatlağa 30° açıyla zizak şeklinde uzunlamasına hizalayarak yapıya bağlayarak fiberin bir ucundan ışık göndermişler, aynı uçta geri saçılan sinyali OTDR kullanarak zamanın bir fonksiyonu olarak izlemişlerdir. Herhangi bir çatlak oluşmadan önce, ışık sinyalinin düzgün olduğunu ancak çatlak oluştuğunda zayıflama nedeniyle ışık şiddetinin yavaş yavaş düştüğünü tespit etmişlerdir. Yuan ve diğerleri [104] beton yapıların içindeki mikro çatlakların varlığını tespit etmek ve ilerlemesini takip etmek için Fizeau interferometresine dayalı bir fiber optik ultrasonik algılayıcı geliştirmişlerdir. Zhang ve Ansari [105], mikro çatlakları izlemek için fiber optik lazer benek yoğunluklu çatlak algılayıcı tasarlamışlardır. Kuang ve diğerleri. [106] çatlak başlangıcını tespit etmek ve çatlak sonrası dikey sapmayı izlemek için beton kirişlere POF bağlamışlardır. Bununla birlikte Kuang ve diğerleri yapısal sağlığın izlenmesi için harici polimer bazlı bir FOA geliştirmişlerdir [107, 108]. Liehr ve diğerleri [109-111], makalelerinde OTDR tekniğini kullanarak yapısal sağlık izlemesi için kullandıkları POF’ların, dağıtılmış gerinimi %40’a kadar ölçebildiğini belirtmişlerdir.

FOA'lar ile çok sayıda çatlağı takip etmek mümkündür. Dağıtılmış algılama özelliği sayesinde FOA'lar, algılayıcılar arasında önemli bir yer tutarlar. Bununla birlikte geleneksel cam fiberlerin kırılma olmaları ve buna bağlı olarak pek çok cam fiberin çatlak algılama için ölçüm aralığının küçük olması önemli dezavantajlardır. Büyük yer değiştirme veya çatlaklar meydana geldiğinde cam fiberlerin kırılması hem algılayıcı özelliğinin hem de dağıtılmış algılama özelliğinin yok olmasına yol açar. Buna karşın POF'lar geleneksel cam fiberlere iyi bir alternatif gibi sunmaktadır. Ancak POF'larda optik zayıflamanın yüksek olması nedeniyle algılama mesafesi sınırlıdır. Silika bazlı cam fiberin sadece %5'lik bir gerilme altında kırılmasına karşın POF, %50'nin üzerindeki gerilmelerde kırılmayarak optik özellikler değişse de ışığı iletmeye devam eder [112]. Bu özellik, binaların ve inşaat mühendisliği yapılarının sağlık durumunun izlenmesi için avantaj sağlar. POF'ların iletim mesafeleri ve bant genişliği sınırlı olsa da silika bazlı cam fiberlere göre dayanıklı yapıları, pratikte kullanım avantajları sağlar [113-115]. POF'ların algılama uygulamaları üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır [115]. Husdi ve diğerleri [116] makalelerinde cam fiberlerin yüksek hız ve düşük kayıplı bir ortam olduğu ve OTDR tekniğiyle 10 km'nin üzerindeki mesafelerde ölçüm yapabilme kabiliyetine sahip olduğunu, buna karşın deneylerindeki kurulumda POF kullanılarak OTDR tekniğiyle yaklaşık 120 m'lik bir algılama aralığı elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Zhao ve diğerleri [117] yer değiştirmeye dayalı olarak çatlak izlemek amacıyla 88 mm ölçüm aralığına sahip bir FOA geliştirmişlerdir. Bu algılayıcı sistemde tek bir fiberden çok sayıda fiber halkalar oluşturularak her fiber halka, çatlak veya yer değiştirme algılamak için kullanılmıştır. Bu nedenle çatlak konumu hakkında ön bilgiye ihtiyaçları yoktur. Li ve diğerleri [118] yansıyan ışık yoğunluğunu modüle etmek için kırılma indisinin periyodik değişimine dayalı bir ızgara paneli kullanmışlardır. Deneylerinde zorlu çalışma ortamlarında yanal yer değiştirmenin ölçümü için başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. 30 cm'nin üzerinde yer değiştirme ölçüm aralığı elde etmelerinin yanı sıra hız algılamayı yapmayı ve hız değerini tespit edebilmeyi başarmışlardır. Liu ve diğerleri [119] tarafından önerilen algılayıcı tasarımı, birbirine sarılarak dairesel şekilde bükülmüş iki adet POF arasında güç bağlantısına neden olan makro-bükme bağlantı etkisi üzerine kurulmuştur. Bağlantı gücü, fiberlerin bükülme yarıçapıyla değişir. POF-YDA'nın karakteristik eğrisi 0,12 mm çözünürlükte 0-150 mm aralığında oldukça doğrusal olmasına ve harici ışık kaynaklarından etkilenmemesine rağmen, sıcaklığa bağımlı olması nedeniyle algılayıcının okumaları bozulur. 25°C ile 75°C arasındaki sıcaklıklarda meydana gelen sapma %100'ün üzerinde ölçüm sapması tespit edilmiştir.

Yer değiştirmeyi farklı parametrelerle ilişkilendirerek yapılan çalışmalar da literatürde mevcuttur. Sastikumar ve diğerleri [120] şeffaf bir plakanın kalınlığını ölçmek için fiber optik YDA tasarlamışlardır. Algılayıcının ıkış karakteristiğinin tepe değerinin kalınlığa bağlı olduğunu ve lineer bir değişim elde edildiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca, verici ve alıcı fiberlerin çapları sabit tutulduğunda NA'nın artırılmasının ölçümün hassasiyetini artırdığını belirtmişlerdir. Daha yüksek NA değerleri için çıkış karakteristiğinin tepe değeri daha yüksek doğrulukla elde edilmiştir.

Hayber ve Tabaru [121] telekomünikasyonda istenmeyen fiber optik kayıplarının, FOA oluşturmak amacıyla kontrollü bir şekilde kullanılarak algılayıcı mekanizmalara dönüştürülebileceğini belirtmişlerdir. Fiber kayıp mekanizmalarından olan yansıma ve boyuna yanlış hizalama kayıplarından faydalanarak milimetre altı ölçümler için fiber optik YDA tasarlamışlar ve algılayıcının matematiksel modelini ortaya koymuşlardır.

3. FİBER OPTİKTE TEMEL KAVRAMLAR

3.1. Optik Fiberler

Günümüzde optik fiberler işlevlerine göre çeşitli modellerde ve farklı ölçülerde üretilmektedirler. Optik fiber, bilgiyi uzak mesafelere taşıyabildiği için tekrarlayıcılar azdır. Fiberler çok hafif ve saç teli kadar ince olabildiğinden aynı kablo içinden çok sayıda fiber geçebilir. Yalıtkan malzemedan yapıldığı için bir kablo içinden geçen çok sayıdaki fiberin birbirleriyle etkileşim yapması söz konusu değildir. Fiber optik kabloların avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi yazılabilir.

3.1.1. Optik Fiberlerin Avantajları

Optik fiberlerin klasik elektriksel iletim hatlarına nazaran birtakım avantajları vardır. Dolayısıyla bu yapılarla oluşturulmuş sistemler de benzer şekilde bu avantajları bünyelerinde barındırırlar. Bu avantajları kısaca maddeler halinde özetleyebiliriz.

- Geniş bant aralığına sahip olan optik fiberlerdeki kayıplar az, bant genişliği elektriksel iletim hatlarıyla kıyaslanamayacak kadar büyüktür. Fiber optik iletişim sistemleri, bakır kablolardan daha fazla bilgi iletmek için kullanılabilir ve sayısal iletişim için kullanımı çok uygundur. Başka hiçbir kablo tabanlı veri aktarım ortamı, fiberin optik kabloların mümkün kıldığı bant genişliğini sunmaz. Fiber optik kablolar, büyük bant genişliği kapasitesi nedeniyle büyük miktarda veri taşıyabilir. Fiber optik kabloların birim zamanda ilettiği veri hacmi, bakır kablolardan çok daha büyüktür. Veri iletimi, genellikle 1.6 TB/sn gibi çok yüksek bir hızda gerçekleşir.
- EMG, elektromanyetizmanın temel özelliklerinden kaynaklanan yaygın bir gürültü türüdür. Fiber, dielektrik bir malzeme (ana maddesi kum) olduğu için yeraltı şehir aydınlatma hatlarının yapacağı EMG'lerden veya radar ve benzeri cihazların neden olduğu elektromanyetik darbelerden etkilenmezler. Manyetik alan hatları iletkenleri keserken elektrik akımı üretirler. Bir iletkendeki elektron akışı, akımla değişen bir manyetik alan oluşturur. Akım iletkeni kestiği için koaksiyel kablolarda elektromanyetik parazit meydana gelir. Fiber optik kabloların ise sinyaller akım yerine ışık olarak iletiildiği için EMG'ye karşı bağışıklığı vardır. Bu özelliği sayesinde, EMG'nin iletişimi engelleyebileceği veya bozucu etki yapabileceği ortamlarda fiber optik kablolar iletişimi sağlamada ideal bir çözümdür.

- Kıvılcım tehlikelerini önlerler. Sinyallerin elektriksel olarak iletilmesi bazen son derece tehlikeli olabilir. Elektriksel iletim, çoğunlukla küçük potansiyelli kıvılcımlara neden olur. Bu kıvılcımlar normal şartlarda tehlikeli olmasalar da havanın patlayıcı gazlar taşıdığı kimyasal fabrika, rafineri gibi ortamlarda büyük sorunlara neden olabilirler. Küçük bir kıvılcımın büyük bir patlamaya sebep olma riski vardır. Potansiyel kıvılcım tehlikeleri bu tür tesislerde veri iletişiminde ciddi engellemelere neden olur. Fiber optik kablolar, akım taşımadıkları için kıvılcım üretmezler. Bu özelliği sayesinde, kıvılcım nedeniyle patlama riski taşıyan ortamlarda veri iletişimini sağlamada fiber optik kablolar ideal bir çözümdür.
- Tesis kurulumları kolaydır. Tel kabloların iletim kapasitelerinin artırılması, genellikle onları daha kalın ve daha katı hale getirir. Kalın kabloların, duvar içindeki kablo kanallarından geçmeleri gereken binalarda kurulması oldukça zordur. Fiber kablolar büyük verileri küçük kablo çaplarında rahatlıkla iletebilirler. Ayrıca esnek yapılarından dolayı kurulumu kolaydır. Bunların yanında elektrik hatlarıyla aynı güzergahlarda bulduklarında gürültü nedeniyle taşıdıkları sinyalde bozulmalar meydana gelmez.
- Güvenilirliğe sahiptirler. Bir iletkenin dışında oluşan manyetik alan dalgalanmaları, iletkenen geçen akımla aynı bilgileri taşır. İletken kabloyu, koaksiyel kablolarda olduğu gibi korumak sorunu azaltsa da ekranlama yapmak bazen istenmeyen sinyal sızıntılarına sebep olabilir. Fiber optik kablolarda ise kılıf, ışığın dış ortama geçmesini engeller. Bu durum güvenliğin önemli olduğu alanlarda fiber optik kabloların tercih edilme nedenlerindedir. Optik fiberde veri emniyeti çok fazladır ve optik işaret, dalga kılavuzu içinde çok iyi ekranlanmıştır. Bu nedenle, hassas verileri taşımak için fiber optik kablolar en güvenilir ortamdır.
- Bakır kablolar nazaran uygun maliyetlidirler. Bu nedenle yeni kablo hatlarının kurulumu veya eskiyen hatların bakım maliyetleri daha azdır.

3.1.2. Optik Fiberlerin Dezavantajları

- Ekleme işlemleri zordur. Küçük yarıçaplı kıvrımlar şeklinde sarıldıklarında kırılma veya veri iletim kayıpları meydana gelebilir. Aynı zamanda plastik bir kılıf içerisine fiberi yerleştirerek bükme yarıçapını uygun seviyelere getirmek de zordur.
- Oldukça hassas yapıdadırlar. Bakır kablolardan daha fazla koruma gerektirirler. Optik fiberler küçük ve kompakt bir yapıda olduklarından, kurulum veya inşaat

faaliyetleri esnasında zarar görme riski yüksektir. Bu nedenle kurulumu titizlikle ve özel ekipmanlar kullanılarak yapılmalıdır.

- Kurulum işlemlerinin zorluğu ve uzmanlar tarafından özel ekipmanlarla gerçekleştirilmesinin bir sonucu olarak kurulum maliyetleri yüksektir.

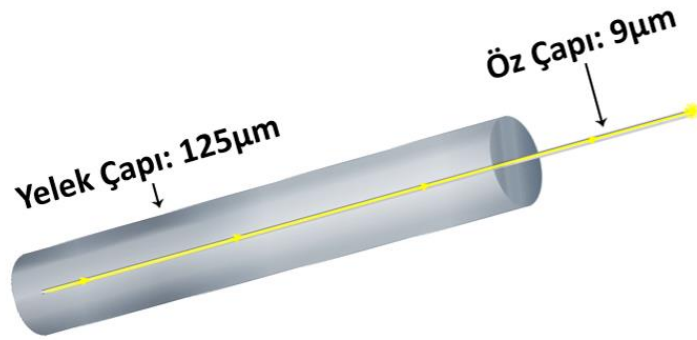
3.1.3. Optik Fiber Çeşitleri

Optik fiberler; yayılım modlarına, yapıldıkları malzemenin cinsine ve indis profillerine göre sınıflandırılırlar.

3.1.3.1. Yayılım Modlarına Göre Fiber Optik Kablolar

Optik fiberler için en önemli parametrelerden biri hangi modda çalıştırılacağıdır. Yayılım modlarına göre optik fiberler, tek modlu fiberler (SMF) ve çok modlu fiberler (MMF) olmak üzere iki çeşittir.

SMF'nin çekirdeği $9\ \mu\text{m}$ 'dir. Bu değer bir insanın saç telinin yaklaşık olarak 10 katına karşılık gelir. SMF'ler, basamak indisli olarak tasarlanırlar. Çekirdeğin ışık sinyalini taşımak için yalnızca bir kırılma indisli vardır. SMF'ler genellikle 1300-1550 nm dalga boyları arasında kullanılırlar. Şekil 3.1'de 9/125 SMF'nin yapısı görülmektedir.



Şekil 3.1. 9/125 Tek modlu optik fiberin yapısı.

SMF'lerin MMF'lere göre bazı avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi yazılabilir.

Avantajları

- Uzun mesafeli sistemlere (100 km'ye kadar) erişimde sorunsuz olarak kullanılabilirler. Performansı çok iyi olduğundan uzun mesafe bağlantılarında kullanılan tek fiber optik kablo türüdür.
- Yüksek bant genişlikleri ve yüksek hızları (10 Gbps'e kadar) desteklerler.
- MMF'lere nazaran çok daha uygun maliyetlidirler.

Dezavantajları

- Çekirdek çapının küçük olması nedeniyle fiber sonlandırma uygulaması zahmetli ve uzun süreli olur. Özel bağlayıcılara ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle konnektör ve diğer bağlantı ekipmanlarının maliyeti yüksektir.
- SMF modülleri, dönüştürücü cihazları ve aktif ürünleri çok pahalıdır.
- SMF'ler ışık kaynağı olarak LED'lere nazaran çok daha pahalı olan lazer diyot (LD) ile birlikte kullanılırlar [122, 123].

SMF'lerin geometrik ve mekanik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir [124].

Tablo 3.1. SMF'lerin geometrik ve mekanik özellikleri.

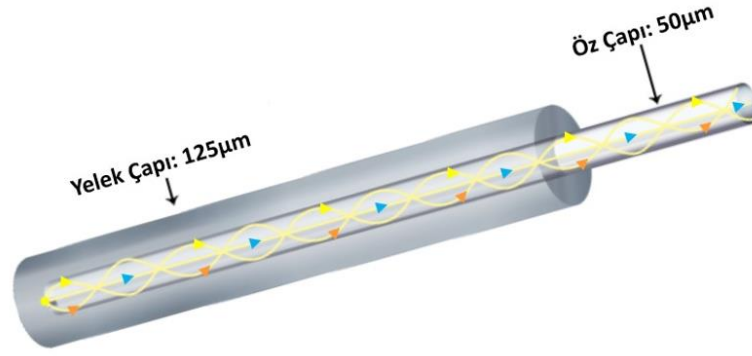
Öz Çapı (μm)	9
Yelek Çapı (μm)	$125 \pm 0,7$
Kılıf Çapı (μm)	245 ± 10
Dairesel Olmayan Yelek	$< 1\%$
Mod Alanı/Kaplama Eşmerkezlilik Hatası (μm)	$< 0,5$
Kaplamanın Dış Merkezliliği	< 12
Ekran Testi	1 sn için %1 genişleme ($\cong 100$ kpsi)

Standart E tipi 9/125 SMF kablonun optik özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir [124].

Tablo 3.2. E tipi 9/125 SMF kablonun optik değerleri.

Dalga Boyu (nm)	1310 – 1550
Maksimum Zayıflama (dB/km)	0,36 – 0,22
Maksimum Dağılım Katsayısı (ps/nm \times km)	3,5 – 18
Sıfır Dağılım Dalga Boyu (nm)	1302 – 1322
Sıfır Dağılım Eğimi (ps/nm $^2 \times$ km)	$\leq 0,092$
Kesme Dalga Boyu (kablolu) (nm)	≤ 1260
Polarizasyon Modu Dağılımı (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)	$\leq 0,2$
Efektif grup kırılma indisi	1,4695 – 1,4701
1310 μm 'de mod alan çapı (μm)	$8,9 \pm 0,4$

MMF'ler, SMF'lere göre daha geniş çapa sahiptirler. 50 μm ve 62,5 μm öz çaplarında MMF'ler mevcuttur. Öz çaplarının genişliği sayesinde 850-1300 nm dalga boyları arasındaki kızıl ötesi ışınları iletebilirler. MMF'lerde kayıp miktarı SMF'lere göre daha fazladır. MMF'ler özlerinin indis profillerine göre; basamak indisli ve dereceli indisli olmak üzere iki tipte imal edilirler. Şekil 3.2'de 50/125 MMF'nin yapısı görülmektedir.



Şekil 3.2. 50/125 Çok modlu fiber optik kablunun yapısı.

MMF'lerin SMF'lere göre bazı avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibidir.

Avantajları

- Fiber sonlandırma uygulaması sırasında daha geniş çekirdek çapı sayesinde fiber uçları daha kolay hizalanır. Bundan dolayı splice (ekleme) işlemleri için harcanan süre daha azdır.
- Kullanılan konnektörler, modüller ve aktif elemanlar SMF'lere göre daha ekonomiktir.
- MMF'ler ışık transferi ve algılamada LD'ler gibi pahalı ışık kaynakları yerine daha uygun maliyetli olan LED'ler ile birlikte kullanılırlar.

Dezavantajları

- MMF'lerin hızlarının sınırlı olması, özellikle Gigabit uygulamalarda kullanımını kısıtlamaktadır.
- SMF kablolarına nazaran çok daha pahalıdır.
- Sistemlere erişim mesafeleri SMF'lere göre çok kısadır [122, 123].

MMF'lerin geometrik ve mekanik özellikleri Tablo 3.3'de verilmiştir [124].

Tablo 3.3. 50/125 MMF'lerin geometrik ve mekanik özellikleri.

Öz Çapı (μm)	50 ± 2.5
Yelek Çapı (μm)	125 ± 1
Kılıf Çapı (μm)	245 ± 10
Dairesel Olmayan Öz	$< 5\%$
Dairesel Olmayan Yelek	$< 1\%$
Öz/Yelek Eşmerkezlilik Hatası (μm)	< 1.5
Kaplamanın dış merkezliliği (μm)	< 10
Ekran testi	1 s için %1 genleşme ($\cong 100$ kpsi)

Standart OM2 tipi 50/125 MMF kablonun optik özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir [124].

Tablo 3.4. OM2 tipi 50/125 MMF kablonun optik değerleri.

Dalga Boyu (nm)	850 – 1300
Maksimum Zayıflama (dB/km)	3,0 – 1,0
Minimum OFL Band Genişliği (MHz×km)	500
Efektif grup kırılma indisi	1,483 – 1,478
Nümerik Açıklık	0,200 ± 0,020

3.1.3.2. Yapıldığı Malzemenin Cinsine Göre Optik Fiberler

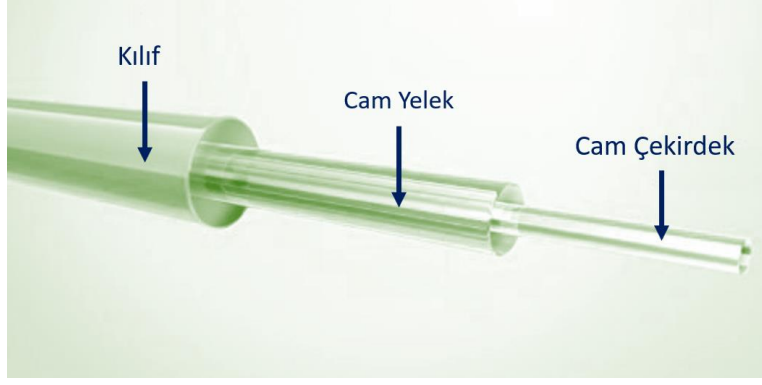
Yapıldığı malzemenin cinsine göre optik fiberler; plastik yelekli-cam çekirdekli (PCS), cam yelekli-cam çekirdekli optik fiberler (SCS) ve plastik yelekli-plastik çekirdekli (POF) olmak üzere üç çeşittir. PCS (plastic clad silica) optik fiberlerde cam çekirdek, plastik yelek ile kaplanmıştır. Plastik yelek fiber özü için koruyucu bir katman görevi görür ve genellikle plastik yekeği çevreleyen bir termo plastik tampon kaplama kullanılır. Genellikle 50 µm çekirdek-200 µm yelek-300 µm kaplama ölçülerinde imal edilirler. Şekil 3.3'te PCS optik fiberin yapısı görülmektedir.



Şekil 3.3. PCS optik fiberin yapısı.

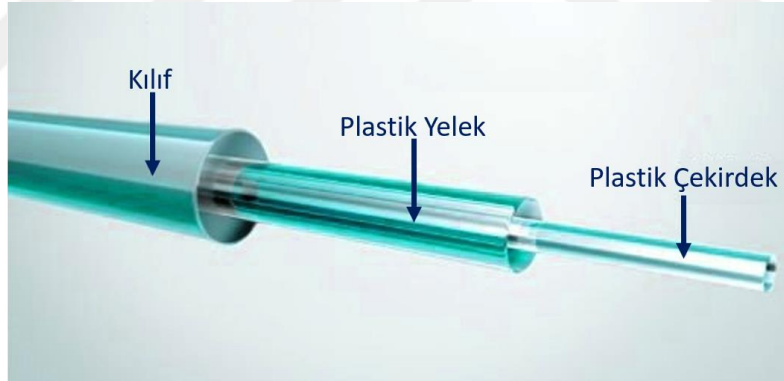
PCS'lerin en önemli avantajlarından birisi de NA değerinin 0,49 değerine kadar yapılandırılabilmesidir. PCS'ler genellikle endüstriyel algılama, spektroskopi ve tıbbi lazer uygulamalarında kullanılırlar [124].

SCS (silica clad silica) optik fiberlerde cam çekirdek, cam yelek ile kaplanmıştır. SCS'ler PCS'lere benzemekle birlikte, genellikle sert polimer gibi malzemelerden yapılmış bir yekeğe ve PCS'lere nazaran daha güçlü bir cam çekirdeğe sahiptirler. Genellikle 200 µm yelek ile 300 µm kaplama kullanılır [125]. SCS'ler, dayanıklılığın çok önemli olduğu yerlerde yaygın olarak kullanılırlar. Şekil 3.4'te SCS optik fiberin yapısı görülmektedir.



Şekil 3.4. SCS optik fiberin yapısı.

POF'larda plastik çekirdek, plastik yelekle kaplanmıştır. Düşük maliyet, sağlamlık ve kullanım kolaylığı nedeniyle tercih edilirler. Yüksek bant genişliği gerektirmeyen kısa mesafeli (<100m) 650 nm görünür dalga boylarını iletmek için kullanılırlar. Genellikle 980 µm yelek ile 1000 µm kaplama kullanılır. Ev ağlarında, tıbbi ekipmanlarla kontrol birimlerinin haberleşmesinde, üretim kontrol ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılırlar. Bununla birlikte son yıllarda algılayıcı tasarımlarında kullanımı yaygınlaşmaktadır. Şekil 3.5'te POF yapısı görülmektedir.

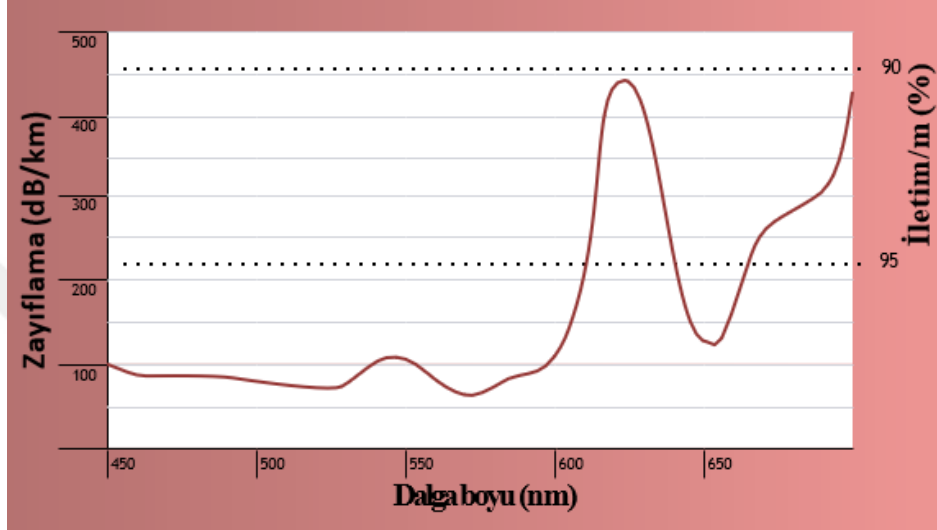


Şekil 3.5. POF yapısı.

POF'ların temel avantajları, esneklik kabiliyetinin daha fazla olması ve bağlantılarının daha kolay ve ekonomik olmasıdır. Düşük ağırlığa ve elektromanyetik uyumluluğa (EMC) sahiptir. Ayrıca EMG bağımsızlığına sahiptirler. Standart POF, bir floropolimer kılıfla kaplanmış süper saf polimetil metakrilat (PMMA) fiber çekirdekten yapılmıştır. Bağlantı ekipmanlarının maliyeti PCS ve SCS'lere göre daha düşüktür ve bağlantıları daha kolay yapılabilir.

Verici eleman olarak 650 ila 670 nm dalga boyu aralığındaki LED'ler kullanılır. POF, bu aralıkta minimum 160 dB/km bağıl zayıflamaya sahiptir. Bu zayıflama, kablo tasarımına

bağlı olarak biraz artabilir. PIN diyotları, iletim yolunun diğer ucunda alıcı olarak kullanılır. Zayıflama nedeniyle, bağlantı uzunluğu 100 m’den daha kısa tutulur. POF’un zayıflama minimumları yeşil, sarı ve kırmızı dalga boyu aralığındadır. Bu nedenle zayıflamayı 100 dB/km seviyelerine düşürebilmek amacıyla son yıllarda yeşil LED’ler kullanılmaktadır. Standart POF için karakteristik değerler ele alındığında dalga boyu, iletim ve zayıflama arasındaki ilişki Şekil 3.6’daki gibidir.



Şekil 3.6. Standart POF kablonun optik değerler eğrisi.

Standart POF kablonun optik değerleri Tablo 3.5’te verilmiştir [124].

Tablo 3.5. Standart POF kablonun karakteristik değerler tablosu.

Gösterim	P735/750	P980/1000	P1470/1500	P1960/2000
IEC 60793-2 Gösterimi	A4b	A4a	-	-
Öz Çapı (μm)	$735 \pm 45 \mu\text{m}$	$980 \pm 60 \mu\text{m}$	$1470 \pm 90 \mu\text{m}$	$1960 \pm 120 \mu\text{m}$
Ceket Çapı (μm)	$750 \pm 45 \mu\text{m}$	$1000 \pm 60 \mu\text{m}$	$1500 \pm 90 \mu\text{m}$	$2000 \pm 120 \mu\text{m}$
Çalışma Sıcaklığı	$-55/+70^\circ\text{C}$	$-55/+85^\circ\text{C}$	$-55/+70^\circ\text{C}$	$-55/+70^\circ\text{C}$
Dalga Boyu	650 nm	650 nm	650 nm	650 nm
Maksimum Zayıflama	180 dB/km	160 dB/km	180 dB/km	180 dB/km
Minimum Bant Genişliği (MHz \times 100 m)	-	10	-	-
Nümerik Açıklık	0.5	0.5	0.5	0.5

POF haberleşmede bakır teller, koaksiyel kablolar, PCS, SCS ve kablosuz haberleşmeye değerli bir alternatif sunarlar. Cam optik fiber bağlantılarında kullanılanlara benzer yapıda verici, alıcı ve konnektörlere gereksinim duyarlar. POF’ların imal edildiği polistiren, polikarbonat ve PMMA gibi plastik malzemeler, görünür aralıkta 520–780 nm dalga

boylarında iletme uygundur ancak bu dalga boylarında iletilen ışık kaybı yüksektir. Işık kaybı PMMA için 150 dB/km seviyelerindeyken, polistiren ve polikarbonat için 1.000 dB/km'ye kadar değişir. Bu kayıplar nedeniyle POF'lar, SMF için 0,2 dB/km ve MMF için 3 dB/km'den daha az kayıplara sahip olan yüksek kaliteli cam fiberlerle uzun mesafeli haberleşme sistemlerinde rekabet edemezler. Ancak 100 m ve daha kısa mesafeli uygulamalarda performans göstererek otomobiller, uçaklar, tüketici elektroniği, endüstriyel kontroller, kısa veri bağlantıları, algılayıcılar, işaretler ve aydınlatmalar gibi birçok alanda uygulama imkanı bulmuştur.

Temel olarak POF uygulamaları ikiye ayrılır. Veri iletişimi uygulama alanlarından birisiyken, işaretler ve algılayıcılar gibi veri dışı uygulamalar da diğer uygulama alanlarını oluştururlar [126]. POF'lar veri iletişimine nazaran algılayıcı uygulamalarında çok daha başarılıdır. POF'ların, cam fiberlere ve bakır tellere karşı avantajlarından bazıları şunlardır:

- Daha hafiftir, daha basit ve ucuz bileşenler içerirler.
- Test ekipmanları daha basit ve ucuzdur. Bağlantıları daha kolay gerçekleştirilir.
- Görünür ışık dalga boylarında çalışırlar,
- Daha esneklik yapıya sahiptirler. Bükülme, şok ve titreşime karşı dayanıklıdırlar,
- EMG'ye karşı bağımsızlığa sahiptirler,
- POF alıcı-vericiler, bakır alıcı-vericilerden daha az güç gerektirirken, verici olarak lazer ışık kaynağına ihtiyaç duyan cam optik fiberlerden daha güvenli ve daha uygun maliyetlidirler [127].

3.1.3.3. İndis Profillerine Göre Optik Fiberler

İndis profillerine göre optik fiberler; basamak indisli ve gradyan indisli olmak üzere iki çeşittir. Öz kırılma indisi n_1 =sabit ve yelek kırılma indisi $n_2 < n_1$ (biraz küçük) olmak üzere, kırılma indisi profili;

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & r < a \quad (\text{öz}) \\ n_2, & r \geq a \quad (\text{yelek}) \end{cases} \quad (3.1)$$

şeklinde verilen fiberlere basamak indisli fiberler denir [128]. Basamak indisli fiberler tek bir kırılma indisine sahip olup, öz ve yelek kırılma indisleri arasında keskin bir fark vardır. Farklı açılarda gönderilen ışığın, öz içerisindeki iletim süreleri arasındaki yüksek farktan dolayı, sinyal dağılması ve dolayısıyla veri kaybı çok yüksektir. Bu nedenle basamak indisli

fiberler kısa mesafeli veri iletişimi ve haberleşme sektöründen ziyade otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Yayınım modlarına göre basamak indisli optik fiberler, çok modlu ve tek modlu olmak üzere iki çeşittir.

Çok modlu basamak indisli fiberler, fiber içinde pek çok modun yayılmasına izin verecek kadar büyük öz çapına ($\cong 50 \mu\text{m}$) sahiplerdir. İletim kanalı boyunca sonlu sayıda kılavuzlanmış modun yayılmasına izin verirler. Kılavuzlanan mod sayısı, fiberin bağıl kırılma indis farkı ve öz yarıçapı gibi fiziksel parametreleriyle taşınan ışığın dalga boyuna bağlıdır. Bu nicelikler V normalize frekansının içinde tutulurlar. Basamak indisli bir fiber için kılavuzlanan toplam mod sayısı veya mod hacmi:

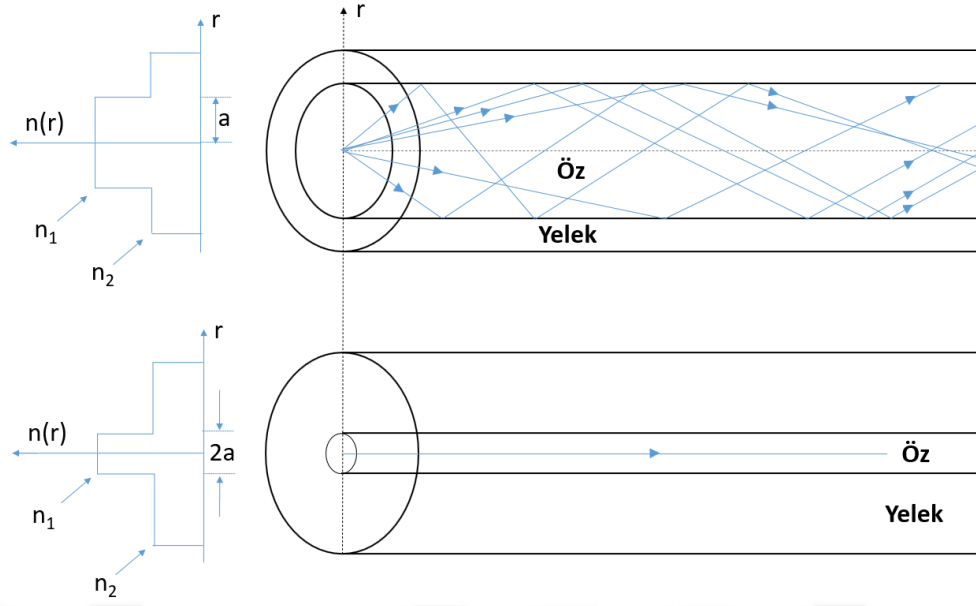
$$M_S \cong \frac{V^2}{2} \quad (3.2)$$

formülüyle verilir. Optik güç, her biri farklı uzaysal alan dağılımına ve yayılma sabitine sahip olan çok sayıda kılavuzlanmış moda aktarılır. Bağıl indis farkı ve öz çapı gibi uzaklığın fonksiyonu olmayan özelliklere sahip olan ideal çok modlu basamak indisli bir fiberde, hiçbir mod çiflenimi yoktur. Belirli bir moda aktarılan optik güç, o modda kalarak diğer kılavuzlanmış modlara aktarılan optik güçten bağımsız bir şekilde taşınır. Kılavuzlanan bu modlar fiber özünün içerisine iyi hapsedilmişlerdir. Çok modlu basamak indisli fiberlerde, optik gücün çoğu yelekte değil öz bölgesinde taşınır. Bu nedenle modların yayılması yeleğin özelliklerinden önemli ölçüde etkilenmez [128].

Düşük bant genişlikli uygulamalar için MMF'ler SMF'lere göre aşağıdaki üstünlüklere sahiptirler:

- SMF'lere bağlanmada uyumlu olmayan optik kaynaklar (LED'lerin çoğu) ile kullanılırlar.
- Büyük öz yarıçaplarına sahip olmalarının yanında, büyük NA değerlerine sahip olmaları optik kaynaklara bağlaşımı kolaylaştırır.
- Fiber bağlama elemanları üzerinde daha düşük tolerans değerleri gerektirirler.

Şekil 3.7 (a)'da çok modlu basamak indisli fiberlerde kırılma indisi profili ve ışın iletimi görülmektedir.



Şekil 3.7: Kırılma indisi profili ve ışın iletimi. (a) çok modlu basamak indisli fiberlerde, (b) tek modlu basamak indisli fiberlerde.

Şekil 3.7 (b)'de tek modlu basamak indisli fiberlerde kırılma indisi profili ve ışın iletimi görülmektedir. Tek modlu basamak indisli fiberlerde öz çapı $\cong 2-10 \mu\text{m}$ 'dir. Tek modlu basamak indisli fiberler karakteristik olarak HE_{11} modunun yayılmasına izin verirler. Yayılacak mod sayısı 1'dir. Bunun bir sonucu olarak modlar arası dispersiyon (taşıyan ışık palslerinin genişlemesi), çok modlu basamak indisli fiberlere göre düşüktür. Bu durum tek modlu basamak indisli fiberlerin üstünlüklerindedir. Yayılan modların farklı grup hızlarından dolayı, çok modlu basamak indisli fiberde önemli derecede dispersiyon oluşabilir. Dispersiyonun büyüklüğü, MMF'ler ile ulaşılabilen maksimum bant genişliğini sınırlar.

Bir optik fiberde bir tek modun yayılmasının üstünlüğü, MMF'lerde farklı modlar arasındaki gecikme farklılıklarının sebep olduğu işaret dispersiyonundan korunabilmesidir. Çok modlu basamak indisli fiberler hem giriş uyumsuzlukları hem de fiber düzensizliklerinde, diğer kılavuzlanmış modlara mod dönüşümü meydana geldiği zaman, tek modlu çalışmanın korunmasının güçlüğü nedeniyle, tek modlu yayılıma uygun değildirler. Bir tek modun taşınması için fiber, sadece bir modun yayılmasına izin verecek şekilde tasarlanmalıdır ve taşınması istenen modun dışında kalan diğer bütün modlar kaçak veya soğurumla zayıflatılmalıdır. Bu durum, V normalize frekansının uygun seçimiyle elde edilebilir. Tek modlu çalışma için, sadece temel LP_{01} modu varolabilir. LP_{01} modunun tek modlu yayılması;

$$0 \leq V \leq 2,405 \quad (3.3)$$

bölgesinde mümkündür. Gerçekte bu bölgede ortogonal kutuplu iki mod vardır. Tek mod terimi, özel bir kutuplanmaya sahip ışık yayılmasını belirtir.

Tek modlu çalışmanın elde edilebilmesi için diğer bir yol, yarıçapı biraz büyük tutarak fiberin bağıl kırılma indis farkını azaltmaktır. Küçük yarıçap ve düşük bağıl kırılma indis farkının bir arada bulunması SMF'lerde zorluklar meydana getirebilir. Küçük öz çapları, ışığın fibere sokulmasında ve eklemelerde zorluklar meydana getirir. Düşük kırılma indis farkı ise fiberin fabrikasyon işlemlerini zorlaştırır. Düşük bağıl kırılma indis farklarına ve düşük V değerlerine sahip olan SMF'lerde meydana gelen bir diğer problem, LP₀₁ moduna eşlik eden elektromanyetik alanın önemli ölçüde yeleğe sızmasıdır. Örneğin 1,4'ten daha küçük V değerleri için, mod gücünün yarısından çoğu yelekte yayılır. Bu durumda, üstel olarak zayıflayan alan, yelek içinde önemli mesafelere uzanabilir. Sonuç olarak, tek modlu basamak indisli fiberlerde mod zayıflamasını azaltmak için yelek uygun bir kalınlığa ve düşük soğurum ve saçılma kayıplarına sahip olmalıdır.

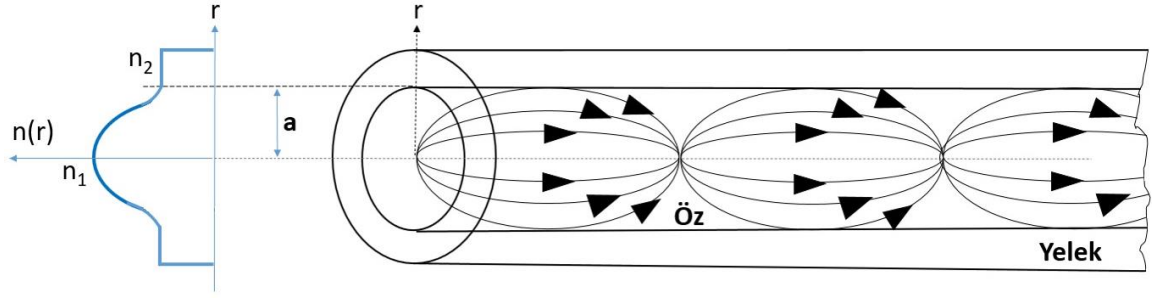
SMF'lerde, özellikle mikro-bükülmeden doğan ilave kayıplar hesaba katıldığı zaman, 1 dB/km'den büyük olan önemli kayıplardan kaçınmak için 50 µm mertebesinde bir yelek kalınlığı gerekmektedir. Bu nedenle SMF'ler için toplam fiber kesiti, hemen hemen MMF'lerin kesitleri kadar olur [128].

Gradyan indisli optik fiberler ise öz içerisinde sabit bir kırılma indisine sahip değildirler ($n_2 \leq n(r) \leq n_1$). Bu indis değişimi aşağıdaki formülüyle ifade edilebilir.

$$n(r) = \begin{cases} n_1[1 - 2\Delta(r/a)^\alpha]^{1/2}, & r < a & (\text{öz}) \\ n_1(1 - 2\Delta)^{1/2} = n_2, & r \geq a & (\text{yelek}) \end{cases} \quad (3.4)$$

Burada α , fiber özünün karakteristik kırılma indisini veren profil parametresidir. α için:

$\alpha = \infty$ basamak indisli profil, $\alpha = 2$ parabolik profil, $\alpha = 1$ üçgen profil değerleri örnek olarak verilebilir. $\alpha \approx 2$ değerine karşılık gelen yaklaşık-parabolik kırılma indis profiline sahip gradyan indisli profiller, çok modlu optik yayılma için en iyi sonuçları vermektedir. Gradyan indis terimi, genellikle parabolik profilli fiberi belirtmek için kullanılır. Parabolik indis profilli öze sahip çok modlu değişken indisli bir fiber Şekil 3.8'te görülmektedir [128].



Şekil 3.8. Çok modlu gradyan (değişken) indisli fiberde kırılma indis profili ve ışın iletimi (meridyenel ışınlar).

3.2. Fiber Optik Algılayıcılar

FOA, fiber boyunca hareket eden optik sinyalde meydana gelen değişimlerin izlenmesine dayanırlar [129, 130]. FOA'lar; kimyasal değişiklikler, gerinim, elektrik ve manyetik alanlar, sıcaklık, basınç, dönüş, yer değiştirme, radyasyon, akış, sıvı seviyesi, titreşimler, ışık yoğunluğu ve renk gibi çok çeşitli fiziksel özellikleri ölçme kabiliyetine sahiptir. Geleneksel mekanik, elektrikli ve elektronik algılayıcıların zorluk yaşadığı ortamlarda performans gösterebilen cihazlardır. FOA'ların diğer algılayıcılara göre avantajlarından bazıları şunlardır:

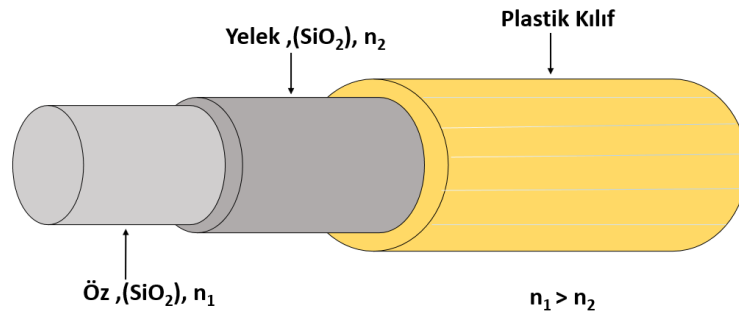
- Elektriksel olarak iletken değildirler.
- Radyo frekansı parazitine ve EMG'ye karşı bağımsızlık sağlarlar.
- Veri iletişim sistemleriyle arayüzlenebilirler.
- Uzaktan algılamaya izin verirler.
- Erişilmesi zor alanlara erişebilme imkanı sağlarlar.
- Yüksek hassasiyet, çözünürlük ve dinamik aralık sağlarlar.
- Genellikle temas gerektirmezler.
- Kablo boyutları ve ağırlıkları küçüktür.
- Küçük algılayıcı boyutlarına olanak sağlarlar.
- Çevrelerini kirletmezler ve korozyona maruz kalmazlar.
- Birden fazla çevresel parametreye duyarlılık imkanı sunarlar [131].

FOA'ların elektronik algılayıcılara göre de önemli avantajları vardır. Optik fiberin hammaddesi bir dielektrik olan camsı silikadır (SiO_2). Bu nedenle fiber, harici elektromanyetik parazitlere karşı bağımsızlığa sahiptir. Elektronik algılayıcılar ise elektrik

sinyalleriyle ilgilenirler. Bu nedenle meydana gelen gürültülere ve elektromanyetik parazitlere maruz kalırlar. Yüksek gerilimli ve elektromanyetik etkilerin yoğun olduğu ortamlarda FOA'lar, elektronik cihazlara iyi bir alternatif olabilirler. FOA'lar, elektriksel olarak pasif cihazlar oldukları için elektriksel bir beslemeye ihtiyaçları yoktur. Temel gereksinimleri ışık kaynağıdır. Bu sayede yanıcı ve patlayıcı gazların, buharların yoğun bir şekilde bulunduğu veya elektrik sinyallerinin tehlikeli olabileceği ortamlarda kullanım için de uygundur.

FOA teknolojisi, son 40 yıldır geliştirilme aşamasındadır. Bu gelişim sonucunda sıcaklık, basınç ve titreşim algılayıcılar, fiber optik jiroskoplar, kimyasal sondalar gibi çeşitli cihazlar üretilmiştir. FOA'lar, geleneksel yöntemlere göre daha fazla hassasiyet sağlarlar. Aynı zamanda geometrik olarak isteğe bağlı şekillerde yapılandırılabilme imkanı sunarlar. FOA'lar, kimyasal olarak etkinlik göstermeyen dielektrik cihazlardır. Elektriksel olarak yalıtkan cihazlar oldukları için yüksek gerilimli ortamlarda kullanılabilirler. Yüksek sıcaklık içeren veya bozucu ve aşındırıcı özelliklere sahip ortamlarda kullanıma uygundur. İletişim sistemleriyle uyumludur ve uzaktan algılama kabiliyetlerine sahiptirler.

Son zamanlarda, FOA'lar üzerine yapılan araştırmalar, fotonik alanındaki önemli potansiyel uygulamalar için doğrusal olmayan optik özelliklere sahip yeni malzemelerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Optik özellikleri yarı iletkenlerin elektronik özellikleriyle birleştiren yarı iletken polimerler de bu malzemelerdendir. Yarı iletken polimerler, fotolüminesan ve elektrolüminesan özelliklere sahiptir. Bu nedenle optoelektronik uygulamalar için ilgi çekici malzemelerdir [132]. Işığı depolayarak karanlıkta geri veren malzemeler fotolüminesan; elektrik alanının veya elektrik akımının etkisiyle ışık yayan malzemeler ise elektrolüminesan olarak tanımlanırlar.



Şekil 3.9. Optik fiberin yapısı.

Optik fiber, lif şeklindeki bir optik dalga kılavuzudur. Cam veya plastik malzemelerden yapılır. Bir optik fiberin yapısı Şekil 3.9’de gösterildiği gibi; öz (core), yelek (cladding) ve kılıf (coating) olmak üzere üç bölümden oluşur. Bir FOA’nın temel bileşenleri, Şekil 3.10’da görüldüğü gibi, bir optik kaynak, bir dönüştürücü ve bir alıcıdır.



Şekil 3.10. FOA'ların temel bileşenleri.

LD'ler ve LED'ler, fiber optik algılama cihazlarında genellikle optik kaynak olarak kullanılır. Dönüştürücü olarak bir optik fiber (tek veya çok modlu), katkılı fiberler veya yığın malzemeler kullanılır. Alıcı bloğunda ise sistemin fiziksel bozulmasından kaynaklanan optik sinyaldeki değişimi tespit etmek için bir fotodedektör kullanılır. FOA sistemlerinde algılama işlemi, fiber boyunca hareket eden optik sinyalde meydana gelen değişimlerin izlenmesi yoluyla yapılır. Algılanmak istenen parametre ile ilişkilendirilebilen, optik sinyalin genlik (ışık şiddeti), faz, frekans (dalga boyu), ve polarizasyon (kutuplaşma) gibi önemli parametrelerinde dışsal etkiden kaynaklanan değişimlerin tespit edilmesi ve ölçülmek istenen parametreye ait bilgilerin elde edilmesi amaçlanır.

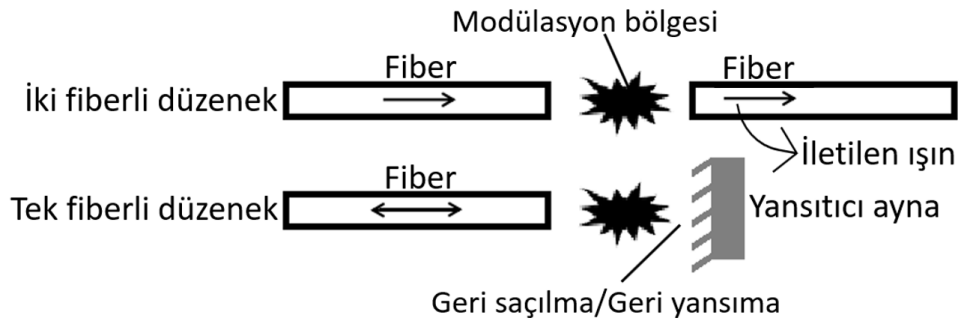
3.2.1. Fiber Optik Algılayıcıların Sınıflandırılması

FOA'lar, temel olarak modülasyonun yapıldığı bölgeye göre dışta etkileşimli (extrinsic) ve içte etkileşimli (intrinsic) olmak üzere iki grupta incelenirler [133]. Algılama işlemi fiberin dışında gerçekleşiyorsa bu tip algılayıcılar pasif algılayıcılar veya dışta etkileşimli algılayıcılar olarak tanımlanırlar. Pasif algılayıcılarda ışığın modülasyonu fiberin dışında gerçekleşir. Bu durumda fiberin tek görevi ışığı taşımaktan ibarettir. Algılama işlemi fiberin iç bölgesinde gerçekleşiyorsa bu tip algılayıcılar aktif algılayıcılar veya içte etkileşimli algılayıcılar olarak tanımlanırlar. Aktif algılayıcılarda ışığın modülasyonu fiberin içinde gerçekleşir. İçte ve dışta etkileşimli FOA'lara ek olarak sönen alanlı (evanescent) algılayıcılardan bahsedilebilir. Sönen alanlı FOA'lar prensipte modülasyon işlemi fiberin içinde gerçekleştiği için içte etkileşimli FOA'lar sınıfına dahil edilebilirler. Burada farklı

olarak SMF’lerde yayılan ışığın bir kısmının yelek bölgesine geçmesi nedeniyle fiber özündeki ışığın sönümlenmesi söz konusudur [128].

3.2.1.1. Dışta Etkileşimli (Extrinsic) Fiber Optik Algılayıcılar

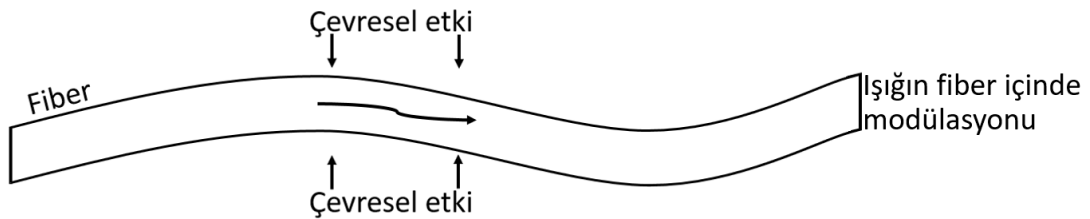
Dışta etkileşimli algılayıcılar pasif algılayıcılar olarak da adlandırılırlar. Pasif FOA’lar, fiberin dışındaki bir bölgede algılanmak istenen parametrenin ışık üzerinde yapacağı modülasyonu ölçerek algılama işlemlerini yaparlar. Şekil 3.11’de dışta etkileşimli FOA’nın şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 3.11. Pasif/Dışta etkileşimli (Extrinsic) algılayıcının şematik gösterimi.

3.2.1.2. İçte Etkileşimli (Intrinsic) Fiber Optik Algılayıcılar

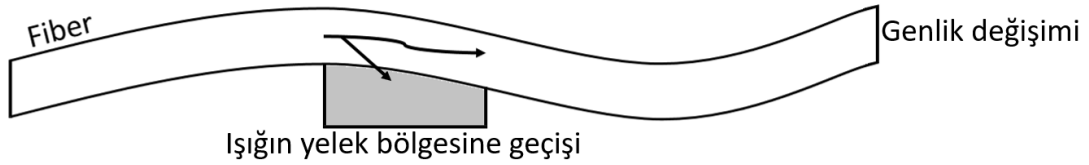
İçte etkileşimli algılayıcılar aktif algılayıcılar olarak da adlandırılırlar. Işığın modülasyonu tamamen fiberin içinde gerçekleşir. Bu nedenle algılayıcı tamamen fiberdir. Aktif algılayıcılarda, algılanmak istenen parametre fiber üzerine uygulanır ve uygulanan parametrenin ışık üzerinde yapacağı modülasyon ölçülür. Fiberin çapı, boyu gibi fiziksel özellikler, bükülme kaybı gibi geometrik etkiler ve kırılma indisi gibi optik özellikler değiştirilerek fiber içinde yayılan ışık modüle edilebilir. Şekil 3.12’de içte etkileşimli FOA’nın şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 3.12. Aktif/İçte etkileşimli (Intrinsic) algılayıcının şematik gösterimi.

3.2.1.3. Sönen Alanlı (Evanescent) Fiber Optik Algılayıcılar

SMF'lerde yayılan ışığın tamamı öz bölgesine hapsedilemez ve bir miktarı özü saran yelek bölgesine geçer. Bu durum kullanılarak tek modlu fiber optik yönlü bağlaştırmacılar algılayıcı olarak kullanılabilirler [128]. Şekil 3.13'te sönen alanlı FOA'nın şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 3.13. Sönen alanlı (Evanescent) algılayıcının şematik gösterimi.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

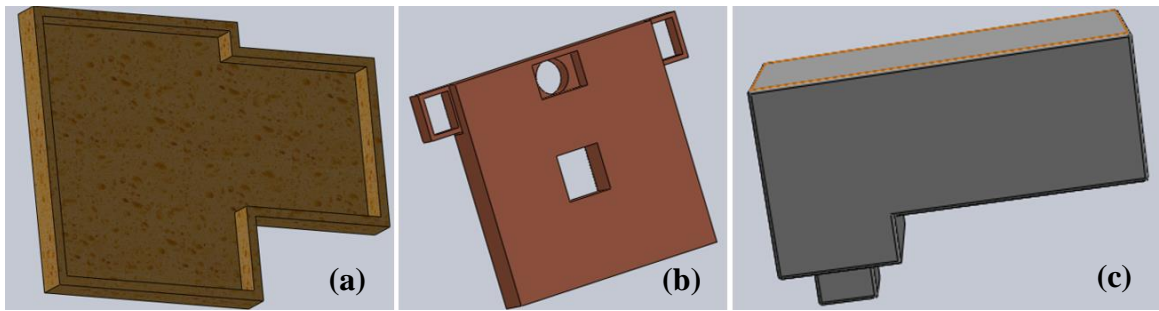
4.1. Materyal

4.1.1. 3 Boyutlu Hareket Düzeneği

x, y ve z eksenlerinde meydana gelebilecek herhangi bir hareketi algılamak amacıyla öncelikli olarak her 3 eksen üzerinde hareket kabiliyetine sahip olan bir düzeneğin tasarlanması gerekmektedir. Tasarlanan düzeneğin üzerinde, yer değiştirmelerin tespit edilmesi amacıyla 3 adet POF kablonun sabitleneceği uygun bölgeler belirlenmeli ve uygun ebatlarda delikler açılmalıdır. Bu aşamada her 3 eksen üzerindeki dinamik ölçüm aralığının maksimum değerine ulaşmak için en uygun noktaların seçimi önemlidir.

4.1.1.1. Tasarım Aşamaları

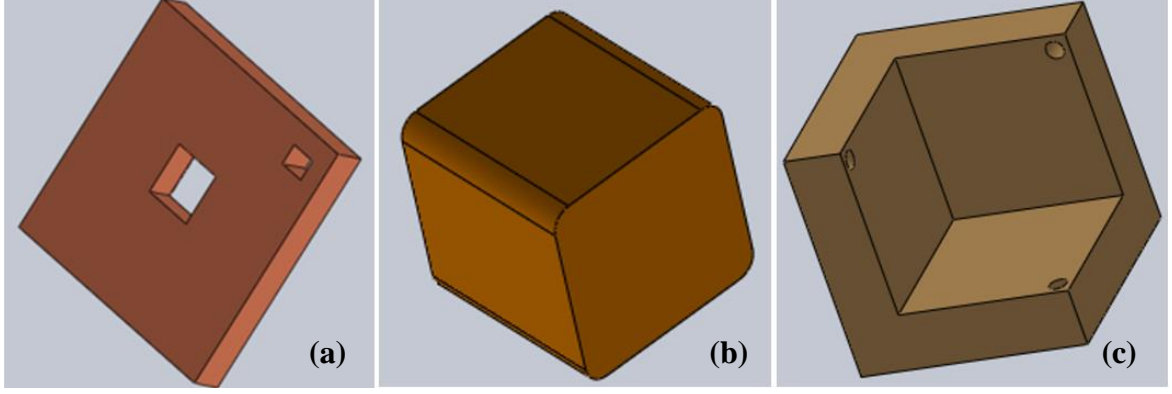
3 Boyutta hareket kabiliyetine sahip bir düzeneğin oluşturulması amacıyla SolidWorks çizim programında düzeneğe ait tüm parçalar tasarlanmıştır. SolidWorks, ürün geliştirme süreçlerinde sıklıkla kullanılan bilgisayar destekli 3 boyutlu katı modelleme ve tasarım yazılımıdır. 3 boyutlu katı modellerini sanal olarak test ederek bir ürünün gerçek dünyadaki fiziksel davranışını tahmin etmek için sonlu eleman analizini kullanan, kolay kullanım imkanı sunan bir yapısal analiz aracıdır. Doğrusal veya doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz yetenekleri sağlar [134]. Şekil 4.1’de sırasıyla, düzeneğin zemini, hareketli parça tabanı ve hareketli parçanın SolidWorks çizimleri görülmektedir.



Şekil 4.1. (a) Algilayıcı düzeneğin zemini, (b) hareketli parça tabanı, (c) hareketli parça.

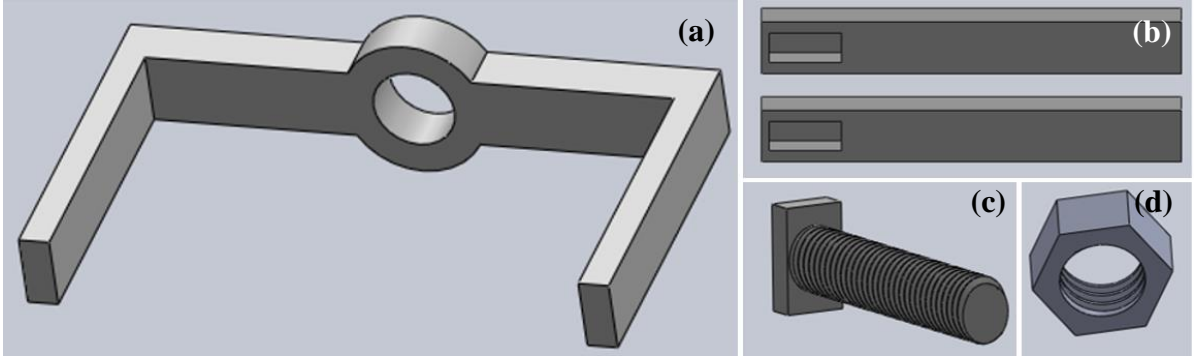
3 boyutta yer değiştirme ölçümlerinin yapılması amacıyla sabit parça üzerinde x, y ve z eksenleri üzerine yerleştirilecek POF kabloların sabitleneceği bölgeler, dinamik ölçüm aralığını maksimum seviyede tutacak şekilde ayarlanmış ve uygun bölgelere, uygun çapta delikler işaretlenmiştir. Tasarlanan ölçülere göre dinamik ölçüm aralığı 30 mm, uygun delik

çapı ise kullanılacak POF ceket çapı olan 2,2 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 4.2’de sırasıyla, sabit parçanın zeminini oluşturan sabit parça tabanı, sabit parça-taban bağlantı desteği ve sabit parçanın SolidWorks çizimleri görülmektedir.



Şekil 4.2. (a) Sabit parça tabanı, (b) sabit parça-taban bağlantı desteği, (c) sabit parça.

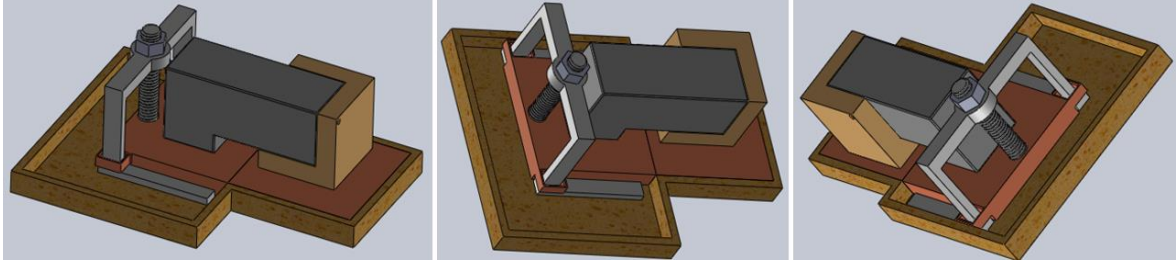
Son olarak düşey eksen üzerinde hareketli parçanın hareket kabiliyetini sağlamak amacıyla hareketli parçanın tabanını kavrayacak ve istenildiğinde cıvata-somun tertibatı kullanılarak hareketli parçayı düşey ekseninde hareket ettirecek yapılar tasarlanmıştır. Şekil 4.3’de sırasıyla, düşey eksen hareketini sağlayan parça, bu parçanın tabanına sabitlenecek 2 adet ayak, mekanizmanın düşey eksen hareketini yönlendirmek üzere tasarlanan bağlantı cıvatası ve somununun SolidWorks çizimleri görülmektedir.



Şekil 4.3. (a) Düşey eksen hareketini sağlayan parça, (b) ayaklar, (c) bağlantı cıvatası, (d) somun.

Düzeneği oluşturan tüm parçaların ayrı ayrı tasarlanmasının ardından tüm parçaların planlanan yerlerine yerleştirilmesi işlemleri yapılmıştır. Düzeneğin bir bütün olarak çalışması gözlenmiş, imal edilen parçaların birbirine uyumu ve parçanın bütününe çalışması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Düzeneğin x, y ve z eksenlerindeki hareketlerinin simülasyonları yapılmıştır. Sonuç olarak planlandığı şekilde 3 boyutta hareket kabiliyetine sahip bir düzenek tasarımı elde edilmiş, tasarım çizimleri ve simülasyonlar başarıyla

tamamlanmıştır. Şekil 4.4'te parçaların birleştirilmesiyle tamamlanmış 3 boyutlu hareket mekanizmasının SolidWorks çizimleri farklı açılardan görülmektedir.

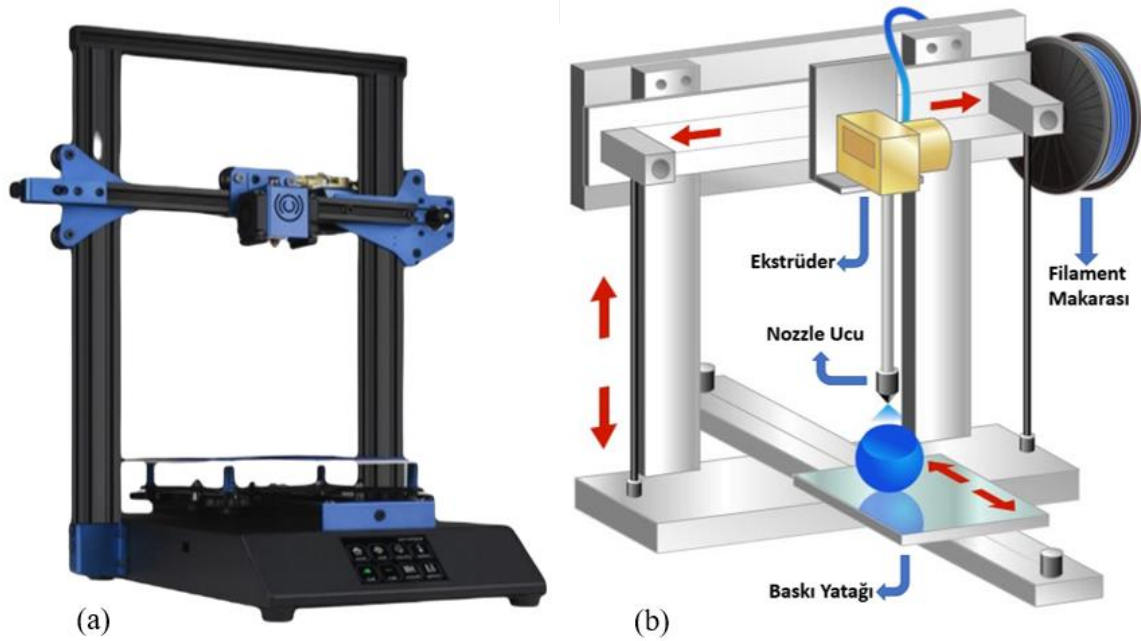


Şekil 4.4. 3 boyutlu hareket mekanizmasının SolidWorks çizimlerinin tamamlanması.

Tasarım ve simülasyon işlemlerinin tamamlanmasının ardından düzeneği oluşturan parçaların üretilmesi işlemlerine geçilmiştir.

4.1.1.2. Üretim Aşamaları

Tasarımın tamamlanmasının ardından 3 boyutlu parça üretimine uyumlu bir 3 boyutlu yazıcı kullanılarak düzeneğin üretilmesi aşamasına geçilir. 3 boyutlu yazıcılar, sanal ortamda tasarımı yapılan 3 boyutlu nesnelere katı formda nesnelere dönüştürmek için kullanılan makinalardır. Şekil 4.5'te 3D yazıcının görüntüsü ve genel yapısı görülmektedir.



Şekil 4.5. (a) 3D yazıcının görüntüsü, (b) genel yapısı.

Düzeneği oluşturan parçaların üretiminde kullanılan 3D yazıcının teknik özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir [135].

Tablo 4.1. 3D yazıcının teknik özellikleri.

Nozzle sayısı	1 adet
Nozzle boyutu	0.4 mm
Kalıplama platformu boyutu	235*235*280 mm
Baskı doğruluğu	$\pm 0.1-0.2$ mm
XY eksen konumlandırma doğruluğu	0.01 mm
Z eksen konumlandırma doğruluğu	0.004 mm
Katman kalınlığı	0.1-0.4 mm
Baskı yöntemi	TF kartı / çevrimiçi baskı
Ekran	3.5" renkli dokunmatik ekran
Makine hızı	10~300 mm/sn
Baskı hızı	20-200 mm/sn
Maksimum ekstrüzyon kafa sıcaklığı	260°C
Maksimum sıcak yatak ısı	100°C
Destek filament	PLA/ABS/PETG/Ahşap vb.
Filament Çapı	1.75 mm
Yazılım Formatı	STL,OBJ,JPG
Yazdırma Dosya Formatı	Gcode
Güç kaynağı	220 V/110 V 360 W
İşletim Sistemi	Windows, MAC
Destek Yazılımı	Repetier-Host, Cura
Makine Boyutu	410*400*520 mm
Makine Ağırlığı	7.5 kg

3 boyutlu yazıcının nozzle ucu filamentin erimesini sağlayacak belirli sıcaklıklara kadar ısıtılır. Baskı için kullanılan ve filament olarak adlandırılan termo plastik materyal nozzle ucuna sürülür. Nozzle ucunda eriyen filament, çizim programındaki tasarıma uygun bir şekilde nozzle ucu hareket ettirilerek yazıcı yatağına yerleştirilir ve çizimi tamamlanan 3 boyutlu parçalar elde edilir.

Filament seçiminde düşük sıcaklıklarda baskıya uygun, diğer filamentlere göre basımı kolay, darbelere dayanıklı, parlak yapısıyla görsel olarak göze hitap eden ürünlerde tercih edilen, biyolojik olarak doğada parçalanabildiği için çevreci olarak nitelendirilen polilaktik asit (PLA) filament kullanımı tercih edilmiştir.

PLA filamentler, 3 boyutlu yazıcı uygulamalarının başlamasıyla birlikte ilk kullanılan filamentlerden birisidir ve mevcut filamentler arasında kullanımı en yaygın olan filament olarak ön plana çıkmaktadır. Kullanımı kolay olduğundan, evde baskı uygulamalarında da

yaygın olarak kullanılmaktadır. PLA filamentlerde ABS filamentlere nazaran daha düşük sıcaklıklarda baskı alınmaktadır. Biyolojik olarak parçalanabilen yapısından dolayı geri dönüşüme uygun çevreci bir hammadde olarak öne çıkar. PLA sert bir yapıya sahiptir ve darbelere karşı dayanıklıdır. Ancak hafif esnekliğe sahip ve kırılındır. Basım sıcaklığı 190°C ile 220°C değerleri arasındadır. PLA için uygun yatak sıcaklığı ise 50°C – 70°C olmalıdır.

Sağlığa zararlı bir madde olmadığından insan vücuduyla temas edebilecek giyilebilir ürünlerde kullanıma uygundur. Görünüm itibariyle parlak bir yapıya sahip oldukları için oyuncaklar, mutfak eşyaları, saklama kapları, dekoratif ürünler gibi göze hitap eden ürünlerde kullanım için de tercih edilirler. Şekil 4.6'da makaraya sarılı halde 1,75 mm çapında parlak beyaz renkte imal edilmiş PLA filament görülmektedir.

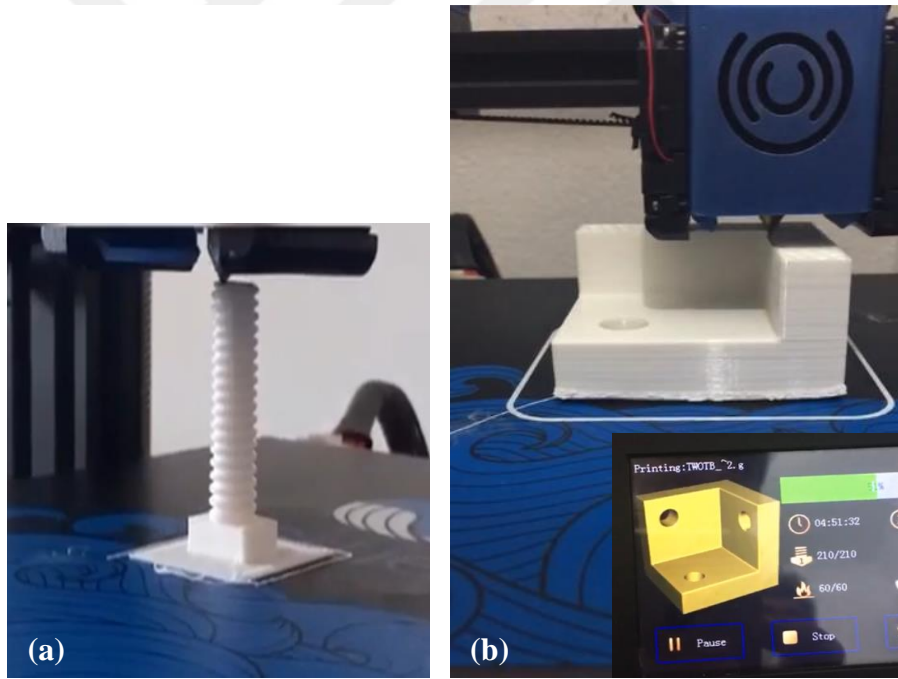


Şekil 4.6. 1,75 mm parlak beyaz PLA filament.

PLA, özellikle 3D baskı uygulamalarında ve antimikrobiyal özelliklere sahip olması nedeniyle tıbbi uygulamalarda son yıllarda sıklıkla kullanımı tercih edilen plastiklerdendir. Üretimi aşamasında kimyasal, termal, mekanik ve antimikrobiyal deneylerle ve test edilmiş ve 3D baskıya uygun termal faz davranışları ve termal stabilite sergilediğini göstermiştir [136]. Toplumlarda petrokimyasallardan elde edilen geleneksel plastiklerin çevrede birikebileceğine ve uzun süreli zararlı etkilere yol açabileceğine dair farkındalığın artışı, PLA kullanımının yaygınlaşmasının bir diğer nedenidir. Çünkü PLA, yenilenebilir kaynaklardan üretilebilir ve uygun şartlar sağlandığında biyolojik olarak parçalanabilir [137-139]. Bunların yanında kolay işlenebilirlik ve yüksek mukavemet gibi pek çok avantajları vardır. [140-144]. Bu nedenle tıp, ambalaj, gıda ve tarım alanlarında endüstrilerde kullanımı yaygınlaşmıştır. Ayrıca, 3D baskı teknolojisi olan füzyonlu filament üretimi alanında, eklemeli imalatta kullanılan en popüler polimerlerden biridir [142, 145]. Bununla birlikte biyobozunmaya karşı diğer doğal polimerlerden daha dirençlidir [144, 146].

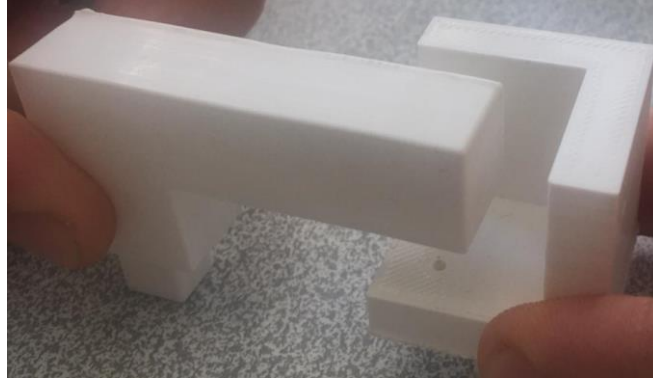
Filamentler değerlendirilirken üzerinde durulması gereken bir diğer önemli konu, malzemenin termal koşullara verdiği tepkilerdir. Termal karakterizasyon, bir malzemenin faz geçişleri ve stabilitesi hakkında bilgi sağlar. Filamentlerin uygun bir akışa sahip olmak için bir nozzle ucunda malzemenin camsı yapıya geçiş sıcaklığını veya erime noktasını geçen ısıtmaya ve bu aşamadan sonra bir ısıtma yatağında yeterince soğumaya ihtiyaçları vardır. Böylece uygun sertlikte ve esneklikte nihai bir ürün elde edilebilir. Termal karakterizasyon bilgileri bu işlemin başarısı için çok önemlidir. PLA'nın camsı yapıya geçiş sıcaklığı 55-65°C, maksimum erime noktası 175-180°C'dir [136].

Düzeneği oluşturan parçaların ayrı ayrı tasarlanarak çizilmesi, parçaların birleştirilmesiyle düzeneğin çizimlerinin tamamlanması ve simülasyon işlemlerinin sonrasında 3D yazıcıyla ham madde olarak PLA filamentleri kullanarak parçaların imalatı aşamasına geçilmiştir. SolidWorks ile tasarlanarak çizilen parçaların 3D yazıcıyla PLA filament kullanılarak materyale dönüşmesi işlemleri Şekil.4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7. Parçaların üretim aşaması **(a)** bağlantı civatası, **(b)** sabit parça.

İşlem sonucunda SolidWorks programında çizilen tüm parçalar, katı malzeme olarak elde edilmiştir. Şekil 4.8'de düzeneğe ait hareketli parça ve sabit parça görülmektedir.



Şekil 4.8. Üretilen hareketli ve sabit parça.

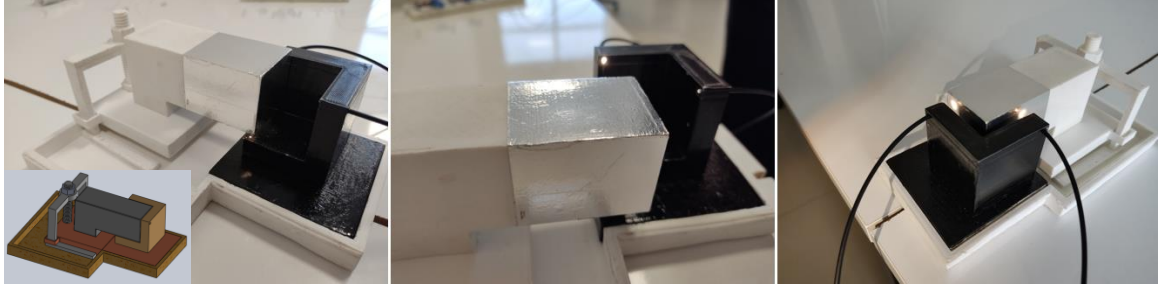
Üretilen sabit parça üzerinde x, y ve z eksenlerinde yer değıştirme okuması yapacak olan optik fiber uçlarının sabitlenmesi amacıyla 2,2 mm çapında 3 adet delik delinmiş ve POF kuplör sıkıştırılarak sabitlenmiştir. Üretim aşamalarına ait görseller Şekil 4.9'da verilmektedir.



Şekil 4.9. Sabit parçaya POF kuplörün yerleştirilmesi.

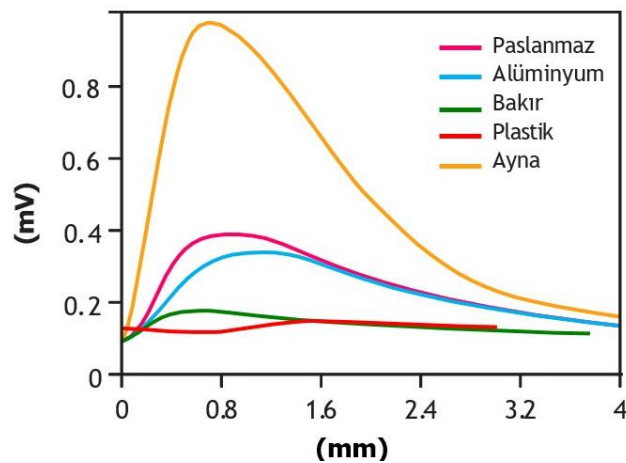
Üretilen parçalar tasarıma uygun şekilde birleştirilerek prototip haline dönüştürülmüş ve 3 boyutta hareket kabiliyetine sahip bir düzenek elde edilmiştir. Fiberlerin her 3 boyutta yer değıştirmeyi algılamasını sağlamak ve kaynak ışığını yer değıştirme parametresine ait verilerle modüle etmek amacıyla hareketli parçanın yüzeyi alüminyum yansıtıcı aynayla kaplanmıştır. 3 eksende yer değıştirme parametresindeki değışimleri algılamak amacıyla kaynak ışığını kaynaktan algılama bölgesine taşıyan, aynı zamanda ölçüm sonuçlarına ait veriler tarafından modüle edilen sinyali fotodedektöre taşıyan 3 adet PMMA tabanlı POF

kablo, daha önceden kendileri için tespit edilerek sabit parça üzerine açılan deliklere irtibatlandırılmıştır. Düzeneğin tüm parçaları birleştirilmiş, hareketli parçası yansıtıcı aynayla kaplanmış ve fiberlerin sabit parça üzerine yerleştirilmesiyle algılayıcı düzenek oluşturma işlemi tamamlanmıştır. Şekil 4.10'da 3 boyutlu yer değiştirme algılayıcı (3D-YDA) tasarımının tamamlanmış hali görülmektedir.



Şekil 4.10. 3D-YDA.

Kaynak ışığının yer değiştirme miktarına bağlı olarak modüle edilmesini ve modüleli ışığın yönlendirilmesini sağlamak için hareketli parçanın yansıtıcılığının artırılması gerekir. Bu amaçla öncelikle hareketli parça yüzeyinin pürüzsüzlüğü sağlanmalıdır. Yansıtıcılık, yüzey pürüzlülüğünün yanında yüzey malzemesinin bileşimine de bağlıdır. Yasin ve diğerleri [147, 148] farklı yüzey malzemelerini test etmişler, test edilen materyaller içerisinde en yüksek hassasiyet gösteren ayna, en düşük hassasiyet gösteren ise plastik olarak tespit edilmiştir. Hassasiyetin yüksekliği, yansıtıcılığın da yüksek olduğu anlamına gelir. Hedef yüzey tipi ile karakteristik tepki eğrisinin değişimi Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Hedef yüzey tipi ile karakteristik tepki eğrisinin değişimi [147].

Yansıtıcı yüzey aynasının seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli parametreler, kırılma indisi ve yansıtıcılık değerleridir. Görünür bölgede metallerin çok iyi yansıtıcı

olduğu bilinmektedir. Metaller içerisinde alüminyum, ölçümlerimizde avantaj sağlayacak pek çok özelliğiyle ön plana çıkmaktadır. Alüminyum, sıcaklık farklılıklarına karşı altın, gümüş, demir gibi diğer metallere göre daha dirençlidir. Anormal sıcaklık değişimlerinde, yüksek tepki vermez. Diğer metallere göre daha az kısalır, daha az uzar. Bunun yanında neme, toza, aleve, kimyasallara ve zorlu hava koşullarına dayanıklıdır. Aynı zamanda kızılötesi ve ultraviyole bozunmalara karşı mukavemet gösterir. Mükemmel derecede ısı ve ışık yansıtma özelliğine sahiptir. Bu nedenle ışık yansıtma uygulamalarında yaygın bir şekilde ayna olarak kullanılan alüminyum, yüzey yansıtıcılığını artırmak amacıyla hareketli parça üzerine kaplanacak yansıtıcı olarak tercih edilmiştir. Alüminyum görünür bölgedeki tüm ışıkları yansıtabilme özelliğine sahip olduğu için rengi beyazımsıdır. Yaptığımız deneylerde yüksek yansıtıcılık özelliğinin bir avantajı olarak beyaz plastik malzemeye kıyasla dinamik ölçüm aralığını 3,5 kat artırdığı görülmüştür. Metallerdeki yansıtma değerleri;

$$R = \frac{[(n_b - n_y)^2 + \kappa_y^2]}{[(n_b + n_y)^2 + \kappa_y^2]} \quad (4.1)$$

formülüyle hesaplanır [149]. Burada, R yansıtma katsayısı, n_b boşluğun kırılma indisi, n_y yüzey kırılma indisi, κ_y sönüm katsayısı olarak verilir. Seçilen alüminyum yansıtıcı yüzey, kaynak dalga boyu olan 650 nm altında iken $n_{Al} = 1,5580$, $\kappa_{Al} = 7,7124$ karakteristik değerlerini gösterir. Buna göre alüminyum yüzeyin 650 nm dalga boyuna sahip ışık altında yansıtıcılığı;

$$R = \frac{[(n_b - n_{Al})^2 + \kappa_{Al}^2]}{[(n_b + n_{Al})^2 + \kappa_{Al}^2]} = \frac{[(1 - 1,5580)^2 + (7,7124)^2]}{[(1 + 1,5580)^2 + (7,7124)^2]} = 0,9056 \quad (4.2)$$

olarak bulunur. Bulunan sonuç, hareketli parçanın alüminyum yüzeyine çarpan ışık ışınlarının %90,56 oranında geri yansıtılacağı anlamını taşımaktadır. Alüminyum kaplamanın hareketli parça yüzeyine sabitlenmesinde 120 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda ve rutubetli ortamlarda özelliğini koruyan, kızılötesi bozunumlar ve kimyasallara karşı dayanıklı akrilik tercih edilmiştir.

4.1.2. Fiber Optik Devre Tasarımı

Sistemin temel vericisi olan ışık kaynaklarının ve düzeneğin konumuna bağlı olarak genliği değişime uğrayan ışığı algılayan optik alıcıların bulunduğu, fiber optik bileşenlere sahip 3 elektronik devre, 3D-YDA'nın en temel yapı taşıdır. Burada ışığın üretilmesi, modüle edilen ışığın algılanması ve üretilen ışık ışınlarıyla modüle edilerek üzerine yer değiştirmeye ait bilgilerin bindirildiği ışık ışınları arasındaki değişikliklerin tespit edilmesi yer değiştirme ölçümünün başarılı bir şekilde yapılabilmesi için çok önemlidir.

Devreler tarafından üretilen ışık ışınlarının 3D-YDA'ya yönlendirilmesi ve düzenekte tespit edilen hareketlere ait bilgileri taşıyan modüleli ışık ışınlarının tekrar devrelere iletilmesi işlemlerinin mümkün olan en az kayıpla yapılması, doğru ölçüm sonuçları almak için oldukça önemli bir konudur. Bu amaçla 1×2 POF kuplörler kullanılacaktır. Işık kaynakları, fotodetektörler ve 1×2 POF kuplörler ile ilgili bilgiler ve özellikler ayrıntılı bir şekilde anlatılacaktır.

4.1.2.1. Işık Kaynağı (IF-E97)

Günümüzün fiber optik sistemlerinde ışık kaynağı olarak kullanılan LED ve LD'ler, elektrik sinyallerini ışığa etkili bir şekilde dönüştüren minyatür yarıiletken cihazlardır. Güç kaynağı bağlantılarına ve modülasyon devresine ihtiyaç duyarlar. Genelde ihtiyaç duyulan bileşenleriyle birlikte bütünleşmiş tek bir paket olarak imal edilirler.

Işık kaynağı olarak kullandığımız IF-E97, konnektörsüz bir plastik fiber optik paket içine yerleştirilmiş, yüksek optik çıkışlı, görünür dalga boylarında kırmızı bir LED'dir. Çıkış spektrumu, PMMA tabanlı POF'un optimal iletim pencerelerinden biri olan 650 nm'de tepe değerine ulaşan bir GaAlAs kalıbı tarafından üretilir. 2,2 mm ceketli POF'larla verimli optik bağlantı sağlamak için uygun ölçülerde tasarlanmış bir polibütilen tereftalat muhafaza kullanılarak alıcının mikro lens yapısı korunmuştur. Ayrıca aynı yapıyla kolay bağlantı ve POF sabitleme imkanı da sağlanmıştır. Bu sayede optik bağlantı kayıplarının en alt seviyelere düşürülmesi amaçlanmıştır. IF-E97, doğrusal yüksek çıkışı sayesinde analog ve dijital veri bağlantıları için uygun bir ışık kaynağıdır. 1 Mbps veri hızlarına ulaşabilir ve parazitsiz iletim sağlar. PMMA tabanlı POF'larda düşük zayıflamaya sahip olan görünür kırmızı ışık yayar. Sürücü devresinin tasarımı, LD'ler için gereken devrelerden çok daha basittir. Bu özellikleri sayesinde maksimum çalışma mesafesi gerektiren çeşitli analog ve dijital uygulamalar için düşük maliyetli ideal bir ışık kaynağıdır.

IF-E97 ışık kaynağının karakteristik bilgileri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. $T_A=25^\circ\text{C}$ altında IF-E97 ışık kaynağının karakteristik bilgileri.

Parametre	Sembol	Min.	Tipik	Maks.	Birim
Tepe dalga boyu	λ_{PEAK}	640	650	660	nm
Tam Spektral Bant Genişliği (FWHM)	$\Delta\lambda$	-	20	-	nm
Plastik fibere bağlı çıkış gücü (öz çapı 1 mm) Lens-fiber arası mesafe ≤ 0.1 mm, 1 m parlatılmış fiber, $I_f = 20$ mA	P_o	200	300	425	μW
		-7.0	-5.2	-3.7	dBm
Cam fibere bağlı çıkış gücü (200/230 μm öz) Lens-fiber arası mesafe ≤ 0.1 mm, 1 m BC04265-10 fiber, $I_f = 20$ mA	P_o	-	16.93	-	μW
			17.71		dBm
Fiber İletim Kaybı SH4001 10 metredeki kesinti	L	-	0.19	-	dB/m
Anahtarlama Süreleri (%10-%90 ve %90- %10) (Şekil 4.23)	t_r	-	100	-	ns
	t_f	-	160	-	ns
Kapasitans ($F = 1$ MHz) ($V_F = 0$)	C_0	-	20	-	pF
İleri Yönde Gerilim $I_f = 20$ mA	V_f	1.7	1.9	2.1	V

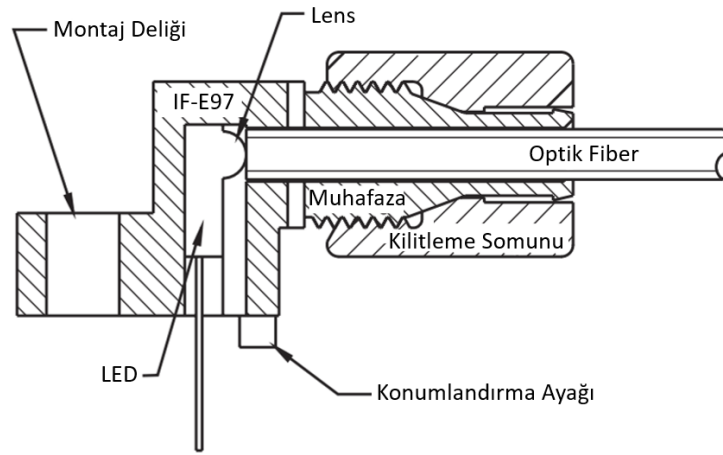
Fiber Sonlandırma işlemlerinin konnektörsüz bir şekilde yapılabilmesine imkan tanıyan yapısı sayesinde bağlantı işlemlerini kolaylaştırarak bağlantı hatalarından kaynaklanabilecek kayıpların da önüne geçer. Şekil 4.12’te IF-E97 ışık kaynağı görülmektedir.



Şekil 4.12. IF-E97 ışık kaynağı.

IF-E97 ışık kaynağı, düşük maliyetli analog ve dijital veri bağlantıları, otomotiv elektroniği, sayısallaştırılmış ses uygulamaları, tıbbi cihazlar, PC’den çevre birimlere veri bağlantıları, robotik iletişim, motor kontrol cihazı tetikleme uygulamaları, EMC ve EMG

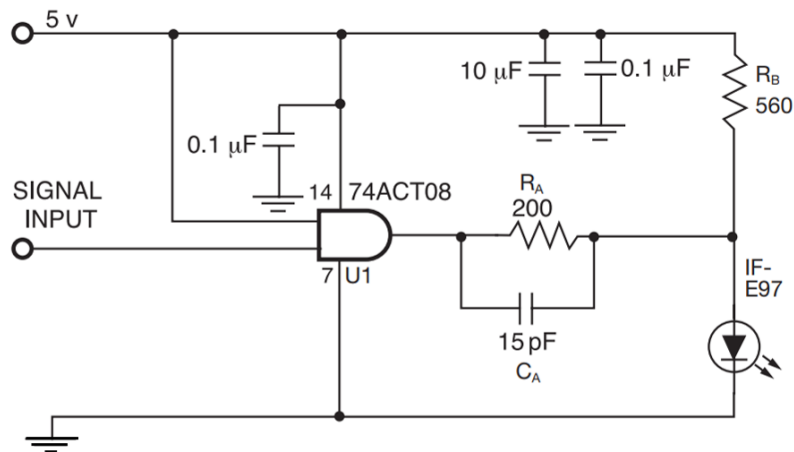
uygulamalarının sinyal yalıtımı, yerel alan ağları, panolar arası sistem içi bağlantılar gibi kullanım alanlarına sahiptir. Şekil 4.13'te IF-E97 ışık kaynağının enine kesiti görülmektedir.



Şekil 4.13. IF-E97 ışık kaynağının enine kesiti.

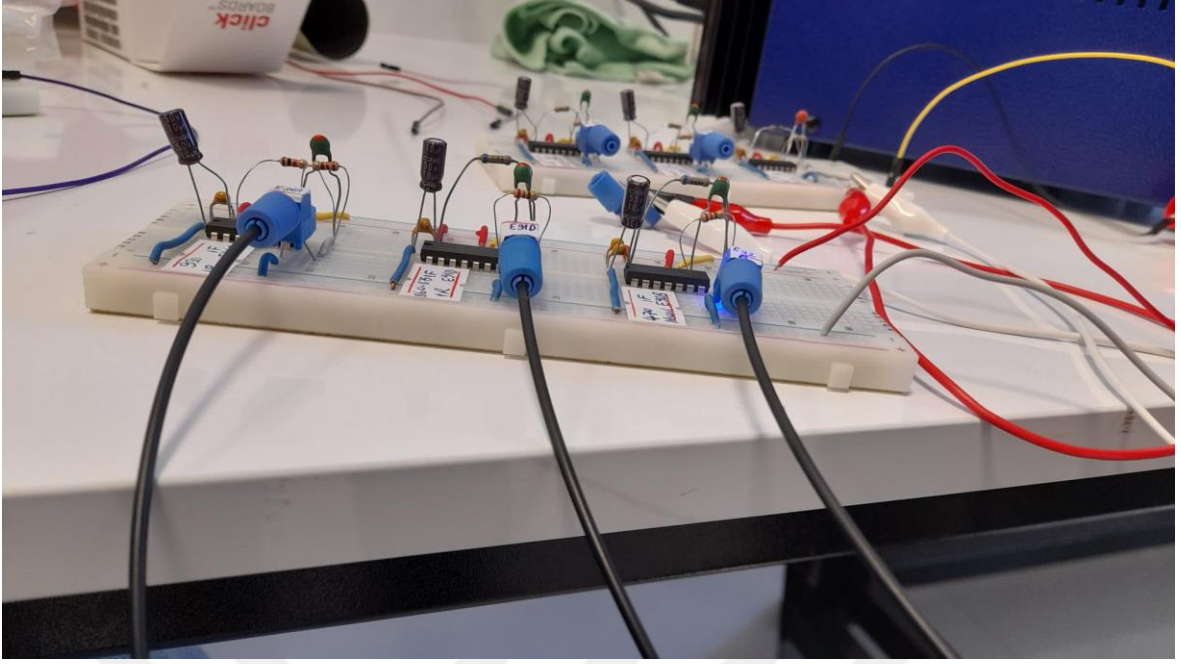
POF kuplörün ışık kaynağına bağlanacak olan ucu, IF-E97 ışık kaynağının kilitleme somunundan içeriye doğru sürülerek fiberin öz ucu dahili bir mikro lens olan merceğe oturana kadar konnektöre yerleştirilir ve konnektör kilitleme somunu fiber ucunu sıkı bir şekilde tutana kadar döndürülerek sıkılır.

Her 3 eksene gönderilmesi gereken 3 adet bilgi sinyalini üretmek için IF-E97 ışık kaynaklarının çalıştırılması gerekir. Şekil 4.14'te IF-E97 ışık kaynağının çalıştırılması için kurulması gereken devre şeması görülmektedir.



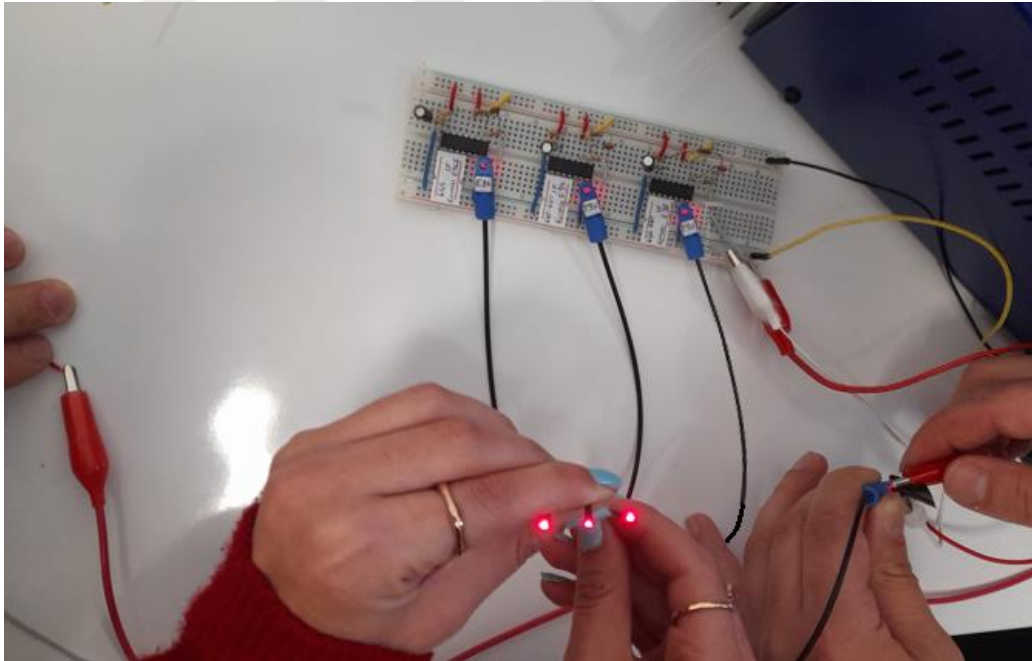
Şekil 4.14. IF-E97 ışık kaynağının uygulama devresi $I_f=20$ mA.

Her bir ışık kaynağı için 1 adet olmak üzere toplam 3 adet IF-E97 uygulama devresi kurulmuştur (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. IF-E97 Uygulama devresinin kurulumu.

Devrenin besleme geriliminin verilmesiyle verici bloğunun aktif hale getirilmesi sağlanmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Işık kaynaklarının çalıştırılması.

IF-E97 ışık kaynaklarını sürmek için Şekil 4.14'te verilen uygulama devresinde, U1 kapısı, çıkış voltajında istenen sürücü akımını sağlayabilmek amacıyla kullanılmıştır. IF-E97'nin çalışması için gerekli olan akımın çoğu R_A direnci üzerinden sağlanır. R_A direnci tarafından sağlanan akımın miktarı;

$$I_A = \frac{(V_{U1} - V_f)}{R_A} \quad (4.3)$$

formülüyle hesaplanır. Burada, V_f IF-E97 ileri gerilimidir ve V_{U1} ise sürücü devrelerinin yük altındaki çıkış gerilimidir.

R_B direnci, kapatma sırasında IF-E97 üzerindeki voltajın sıfıra gitmesini önleyerek anahtarlama süresini hızlandırmak için kullanılır. Ayrıca IF-E97'nin çalışması için gerekli olan akımın bir kısmı R_B direnci tarafından sağlanır. R_B direnci tarafından sağlanan akımın miktarı;

$$I_B = \frac{(V_{CC} - V_f)}{R_B} \quad (4.4)$$

formülüyle hesaplanır. Burada, V_{CC} , besleme gerilimidir. IF-E97'ye giden toplam sürücü akımı;

$$I_T = I_A + I_B \quad (4.5)$$

değerine eşittir. IF-E97 kapalıyken R_B direnci üzerinde bir miktar güç boşa harcanır. C_A kondansatörü, anahtarlama sırasında sürücü akımını artırmak ve açma kapama işlemlerini hızlandırmak için kullanılır. C_A kondansatörü açma sırasında IF-E97'yi aşırı çalıştıracak veya kapatma sırasında negatif yönde gerilim akıtacak kadar büyük seçilir. Bununla birlikte daha düşük hızlı uygulamalar için yalnızca R_A direnci gereklidir ve C_A kondansatörü ile R_B direnci devreden çıkarılabilir [150].

4.1.2.2. Fotodedektör (IF-D91)

Optik güç algılayıcı olarak kullandığımız IF-D91, konnektörsüz bir plastik fiber optik paket içine yerleştirilmiş yüksek hızlı bir fotodiyot dedektördür. Şekil 4.17'de IF-D91 görülmektedir. IF-D91'in optik tepkisi 400-1100 nm aralığındadır. Spektral bant genişliğinin böyle geniş bir aralığı kapsamasından dolayı çok çeşitli görünür ve yakın kızılötesi LED ve LD kaynaklarıyla uyumludur.



Şekil 4.17. IF-D91.

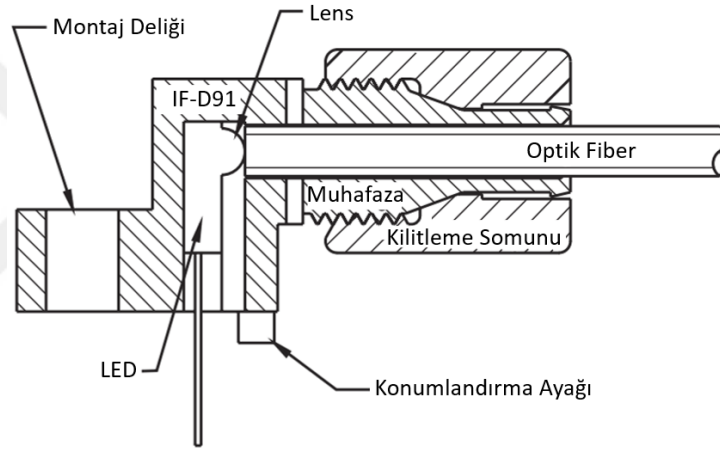
PMMA tabanlı POF'larda optimum iletim için kullanılan 650 nm görünür kırmızı LED'ler de bu geniş algılama aralığına dahildir. Bu değerler göz önüne alındığında ışık kaynağı olarak kullandığımız IF-E97 ile fotodedektör olarak kullandığımız IF-D91 arasında tam bir verici-alıcı uyumunun olduğu görülecektir. IF-E97 yapısında da olduğu gibi 2,2 mm ceketli POF'larla verimli optik bağlantı sağlamak için uygun ölçülerde tasarlanmış bir polibütilen tereftalat muhafaza ile alıcının mikro lens yapısı korunarak bağlantı kolaylığı ve POF sabitleme imkanı sağlanmıştır. Bu sayede optik bağlantı kayıplarının en alt seviyelere düşürülmesi amaçlanmıştır. IF-D91 fotodedektörünün karakteristik bilgileri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. $T_A=25^\circ\text{C}$ altında IF-D91 fotodedektörün karakteristik bilgileri.

Parametre	Sembol	Min.	Tipik	Maks.	Birim
Maksimum Işığa Duyarlılık için Dalga Boyu	λ_{PEAK}	-	880	-	nm
Spektral Bant Genişliği ($S = S_{max}$ 'ın %10'u)	$\Delta\lambda$	400	-	1100	nm
Yükselme ve Düşme Zamanları (%10-% 90 ve %90-%10) ($R_L = 50\Omega, V_R = 20V, \lambda = 850\text{ nm}$)	t_r, t_f	-	5	-	ns
Toplam Kapasitans ($V_R = 20V, E_E = 0, f = 1.0\text{ MHz}$)	C_T	-	4	-	pF
Minimum Duyarlılık @ 880 nm	R	-	.4	-	$\mu\text{A}/\mu\text{W}$
Minimum Duyarlılık @ 632 nm	R	-	.2	-	$\mu\text{A}/\mu\text{W}$
Ters Yönde İstenmeyen Akım ($V_R = 30V, E_E = 0$)	I_D	-	-	60	nA
Ters Yönde Arıza Gerilimi	$V_{(BR)}R$	60	-	-	V
İleri Yönde Gerilim	V_f	-	1.2	-	V

IF-D91'in hızlı tepki süreleri, onu yüksek hızlı analog ve dijital veri bağlantıları için uygun hale getirir. Uygun bir LED veya LD ile kullanıldığında 100 Mbps veri hızlarına ulaşabilir. 70 MHz'e kadar bant genişliğine sahip analog video bağlantılarında da kullanılabilir. Yapısal tasarımı sayesinde çeşitli analog ve dijital uygulamalar için basit ve düşük maliyetli ideal bir fotodedektör durumundadır. Bunların yanında konnektörsüz fiber sonlandırma işlemlerine imkan tanır. Bu sayede kurulum işlemlerinin çok daha kolay olmasının yanı sıra veri iletişiminin verimi de artar.

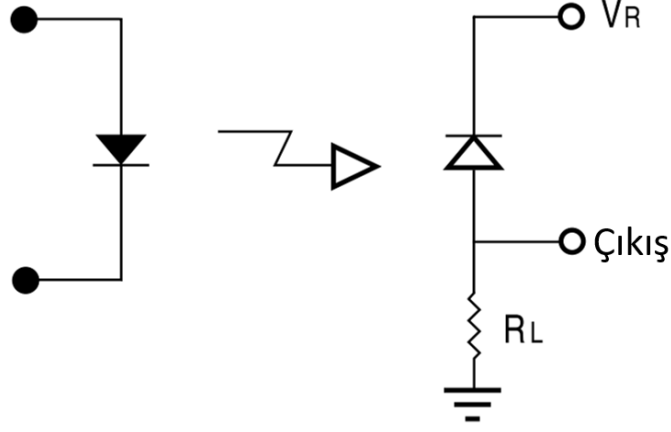
IF-D91 fotodedektörü, yüksek hızlı dijital veri bağlantıları, otomotiv elektroniği, video bağlantıları, tıbbi cihazlar, robotik iletişim, motor kontrol cihazı tetikleme uygulamaları, EMC ve EMG uygulamalarının sinyal yalıtımı, yerel alan ağları, fiber optik modemler gibi pek çok kullanım alanına sahiptir. Şekil 4.18'de IF-D91'in enine kesiti görülmektedir.



Şekil 4.18. IF-D91'in enine kesiti.

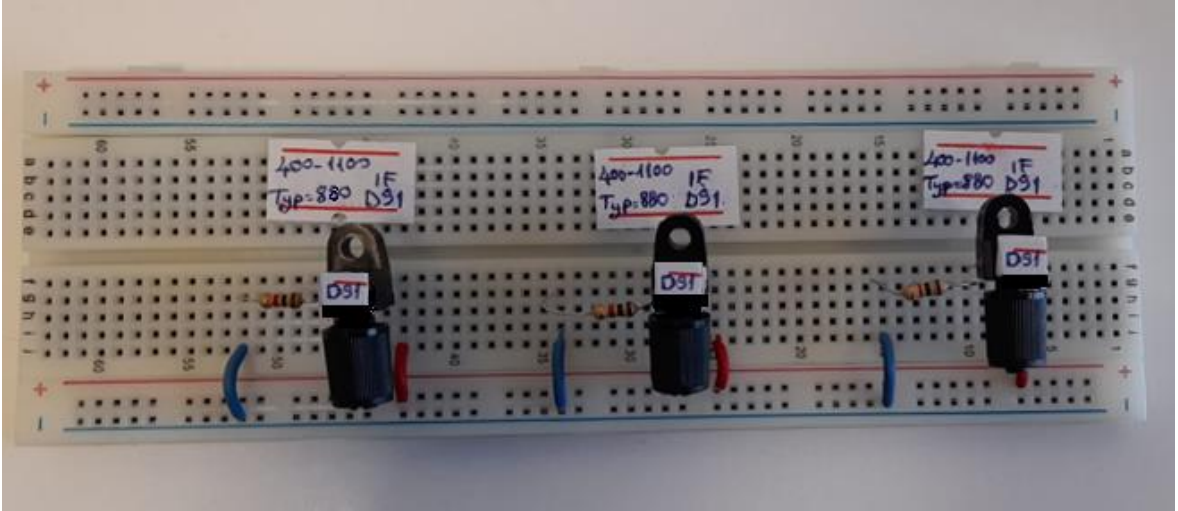
POF kuplörün fotodedektöre bağlanacak olan ucu, IF-D91'in kilitleme somunundan içeriye doğru sürülerek fiberin öz ucu dahili mikro lens merceğe oturana kadar konnektöre yerleştirilir. Ardından konnektör kilitleme somunu fiber ucunu sıkı bir şekilde tutana kadar döndürülerek sıkılır.

Her 3 eksenenden alınması gereken ve yer değiştirmeye ait verilerin bilgi sinyalinin üzerine bindirilmesiyle genliği değişen 3 adet modüleli sinyal IF-D91 tarafından tespit edilir. Tespit edilen modüleli sinyallerin taşıdığı bilgileri anlayabilmek amacıyla fotodedektörün çıkışlarının ölçülmesini sağlayacak bir devre kurulmalıdır. Şekil 4.19'da IF-D91 çıkışlarının ölçülmesi için kurulması gereken devre şeması görülmektedir.



Şekil 4.19. IF-D91 uygulama devresi.

Her bir fotodedektör için 1 adet olmak üzere, 3 eksende yer değiştirmeye ait değişimlerin okunmasını sağlayacak toplam 3 adet IF-D91 uygulama devresi kurulmuştur (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. IF-D91 Uygulama devresinin kurulumu.

Şekil 4.19’da verilen uygulama devresiyle yer değiştirme hareketlerinin modüle ettiği bilgi sinyalini algılayan fotodedektörün tepkileri incelenecektir. Ölçüm sonuçlarına ait veriler ise R_L direnci üzerindeki değişimlerin takip edilmesiyle elde edilir. $25\text{ }^\circ\text{C}$ ’de $R_L=50\ \Omega$, $V_R=20\ \text{V}$, $\lambda=850\ \text{nm}$ iken %10’dan %90’a yükselme ve %90’dan %10’a düşme süreleri 5 ns olarak tespit edilmiştir. Bu verilere dayanarak tepki hızının oldukça yüksek olduğunu söylemek mümkündür [150].

4.1.2.3. 1×2 POF Kuplör (IF 562)

POF kuplörler, optik sinyalleri iki veya daha fazla çıkış fiberine dağıtmak için bir veya daha fazla giriş fiberine sahip özel fiber optik yapılarıdır. Bu yapı ile optik ışık, her biri azaltılan

genlik dışında orijinaliyle aynı özelliklere sahip ışık içeren çoklu çıkış sinyallerine pasif olarak bölünür. POF kuplörler çift yönlü olarak pasif bir cihaz olduğu için EMG'ye karşı tamamen bağıştır ve sistem tasarımına gürültüler eklemeyiz. Dalga boyundan bağımsız olarak çalışırlar. PMMA tabanlı POF yapısındadırlar.

POF kuplörlerin $M \times N$ olarak tanımlanan giriş ve çıkış konfigürasyonları vardır. M , giriş portlarının sayısıdır ve bir veya daha fazladır. N , çıkış portlarının sayısıdır ve her zaman M 'ye eşit veya ondan büyüktür. Birden fazla giriş olduğunda, çıkış sinyalleri giriş sinyallerinin birleşimi şeklinde olur. POF kuplörler, ışığı minimum kayıpla bölmek veya birleştirmek amacıyla çok çeşitli tiplerde ve boyutlarda imal edilirler. POF kuplörlerin üretim süreçleri, güvenilir ve düşük maliyetli cihazların kullanıldığı çok basit işlemleri kapsar. Bununla birlikte fiziksel olarak sağlamdırlar ve çalışma sıcaklıklarına karşı duyarsızdırlar. Ayrıca isteğe bağı olarak özel fiber uzunluklarında veya herhangi bir tipte sonlandırmalı olarak üretilebilirler. Şekil 4.32'de 1×2 POF-IF 562 kuplör görülmektedir.



Şekil 4.21. 1×2 POF kuplör (IF 562).

3D-YDA ile ışık kaynağı ve fotodedektör arasındaki optik bağlantıyı sağlamak amacıyla kullandığımız 1×2 IF 562 POF kuplör, 50:50 bölme oranıyla 1×2 giriş-çıkış portlarına sahiptir. Görünür ve kızılötesi ışık taşıyabilir. Çevresel etkilere karşı yüksek izolasyon ve sızdırmazlık sağlar. Fiber zayıflaması $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ve 650 nm dalga boyunda 0.14-0.16 dB/m olarak tespit edilmiştir. Fiberin öz kırılma indisi 1.492, yelek kırılma indisi 1.402 olarak imal edilmiştir. $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de fiber bükme yarıçapı 25 mm, fiber çekme dayanımı 5 kg olarak belirlenmiştir. Standart 1000 μm özlü POF kablo, 2,2 mm çapa sahip ceket ile kaplanmıştır [150]. Buradaki ceket çapının değeri, POF kablonun tasarlanan düzenek üzerine sabitleneceği noktalara açılacak deliklerin ebatlarını belirlerken göz önüne alınmıştır. IF 562 POF kuplörün diğer özellikleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. IF 562 POF kuplörün özellikleri.

Öz maddesi	Polimetil metakrilat reçinesi
Yelek maddesi	Florlanmış polimer
Ceket maddesi	Poli etilen
Kırılma indisi profili	Basamak indisli
Nümerik açıklık	0,5
Öz çapı	980 µm
Yelek çapı	1000 µm
Ceket çapı	2,20 mm
Ceket rengi	Siyah
Ağırlık	4 g/m
Çalışma sıcaklığı	-55 °C / +85 °C
İletim kaybı (650 nm ışık altında)	190 dB/km
Minimum bükülme yarıçapı	25 mm
Maksimum ekleme kaybı: Port A - Port C için	5.6 dB
Maksimum ekleme kaybı: Port A - Port D için	3.7 dB
Maksimum ilave kayıp: Port A için	1.6 dB

IF 562 POF kuplörün kullanım alanları oldukça geniştir. Geri besleme kontrol devrelerinde, ethernet ve otomotiv yerel ağ bağlantılarında, tıbbi cihazlarda, otomotiv elektroniğinde, dalga boyu çoğullama uygulamalarında, ses sistemlerinde, elektronik oyunlarda, optik algılayıcılarda kullanıma uygundur.

4.1.3. Denetleyici Devre Tasarımı

4.1.3.1. *Mümkün Durumlar Analizi*

Denetleyici devre tasarımının yazılımsal işlemlerine geçilmeden önce algılayıcının çalışmasına dair meydana gelme olasılığı olan tüm hareketler ve bu hareketler meydana geldiğinde çıkış bilgisi olarak verilecek durum bilgileri belirlenmelidir. x, y ve z olmak üzere 3 eksen üzerinde; sabit, artı yönde hareket ve – yönde hareket olmak üzere 3 farklı hareket davranışı sergilenme olasılığı söz konusudur. Bu durumda matematiksel olarak $3^3 = 27$ durumun meydana gelme olasılığı tespit edilmiştir. Tablo 4.5'te meydana gelme olasılığı olan 27 hareket, hareketlerin ifade ettiği anlamları kapsayacak şekilde detaylı olarak incelenmiştir. Burada, S sabit (hareketsizlik), A artı (+) yönde hareket, E eksi (-) yönde hareket durumlarını ifade eder.

Tablo 4.5. Mümkin hareket ve çıkış durumlarının tespit edilmesi.

x	y	z	Açıklama	Sonuç
S	S	S	Hareket yok	<u>HAREKET YOK</u>
A	S	S	+x yönünde hareket	<u>TEK EKSENLİ HA REKET</u>
E	S	S	-x yönünde hareket	
S	A	S	+y yönünde hareket	
S	E	S	-y yönünde hareket	
S	S	A	+z yönünde hareket	
S	S	E	-z yönünde hareket	
A	A	S	+x ve +y yönünde hareket	
A	E	S	+x ve -y yönünde hareket	
E	A	S	-x ve +y yönünde hareket	
E	E	S	-x ve -y yönünde hareket	
A	S	A	+x ve +z yönünde hareket	
A	S	E	+x ve -z yönünde hareket	
E	S	A	-x ve +z yönünde hareket	
E	S	E	-x ve -z yönünde hareket	
S	A	A	+y ve +z yönünde hareket	
S	A	E	+y ve -z yönünde hareket	
S	E	A	-y ve +z yönünde hareket	<u>3 EKSENLİ HAREKET</u>
S	E	E	-y ve -z yönünde hareket	
A	A	A	+x / +y / +z yönünde hareket	
A	A	E	+x / +y / -z yönünde hareket	
A	E	A	+x / -y / +z yönünde hareket	
A	E	E	+x / -y / -z yönünde hareket	
E	A	A	-x / +y / +z yönünde hareket	
E	A	E	-x / +y / -z yönünde hareket	
E	E	A	-x / -y / +z yönünde hareket	
E	E	E	-x / -y / -z yönünde hareket	

4.1.3.2. *Arduino Uno ve IDE Yazılımları*

Denetleyici devre uygulaması donanım ve yazılım aşamalarından oluşur. Şekil 4.22’de denetleyici devre olarak kullanılacak olan Arduino Uno kartı görülmektedir. Arduino Uno, ATmega328 işlemcisine dayanan bir mikrodenetleyici kartıdır. Donanımsal olarak 14 giriş/çıkış pini, 6 analog giriş pini, 16 MHz seramik kristali, USB bağlantı girişi, güç girişi, devre içi seri programlama (ICSP) başlığı, resetleme tuşu ve mikrodenetleyicinin çalışması için gerekli olan elektronik ekipmanı içerir. Arduino Uno teknik detayları Tablo 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.22. Arduino Uno.

Tablo 4.6. Arduino Uno teknik detayları.

Mikrodenetleyici	ATmega328
Çalışma Gerilimi	5V
Önerilen Giriş Voltajı	7-12V
Giriş Voltajı Alt ve Üst Limitler	6-20V
Dijital Giriş/Çıkış Pinleri	14 (6 pin PWM çıkışlı)
Analog Giriş Pinleri	6
I/O Pin başına DC Akımı	40 mA
3.3V Pin için DC Akımı	50 mA
Flash Bellek	32 KB
SRAM	2KB
EEPROM	1 KB
İşlem Hızı	16 MHz

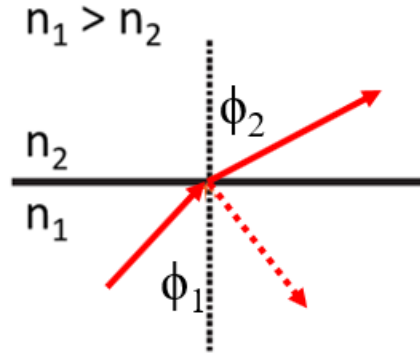
Denetleyici devre kartı Arduino Uno'nun programlanması için öncelikle bilgisayar bağlantısı yapılmalıdır. Bu sayede komut bildiriyle algılama mekanizması kontrol edilirken, çıkış verileri seri port ekranından anlık olarak izlenecektir.

Arduino Uno ile bilgisayar arasında donanımsal bağlantının kurulmasının ardından programlama işlemlerine geçilir. Denetleyici devrenin programlanması işlemlerini yapmak için, kullanıcıların gerçek zamanlı bir çalışma ortamında kod yazmasını ve yüklemesini sağlayan açık kaynaklı bir yazılım programı olan IDE programı kullanılmıştır [151].

4.2. Yöntem

4.2.1. Snell Yansıma Kanunları

Işığın optik fiberler boyunca iletilmesi ilkesi, Şekil 4.23'te gösterildiği gibi, farklı kırılma indislerine sahip iki malzeme arasındaki sınırdaki bir ışık demetiyle ilgili toplam iç yansıma dayanır. Işık kırılma indisi yüksek (n_1) bir ortamdan daha düşük kırılma indisine (n_2) sahip olan bir ortama geldiğinde, iletilen ışın her zaman geliş açısından (ϕ_1) daha büyük bir açıyla (ϕ_2) ortaya çıkar.

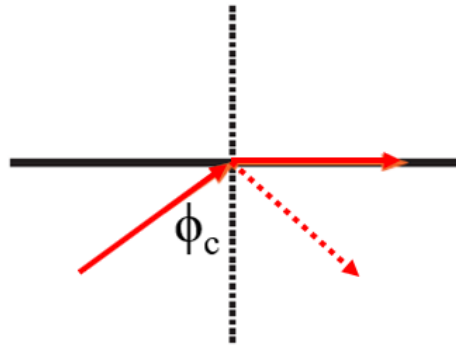


Şekil 4.23. Işığın kırınımı.

ϕ_1 açısı artırıldıkça, ϕ_2 açısı da artar. $\phi_2 = 90^\circ$ değerine karşılık gelen ϕ_1 değeri kritik açı olarak adlandırılır ve ϕ_c ile gösterilir. Kritik açının değeri;

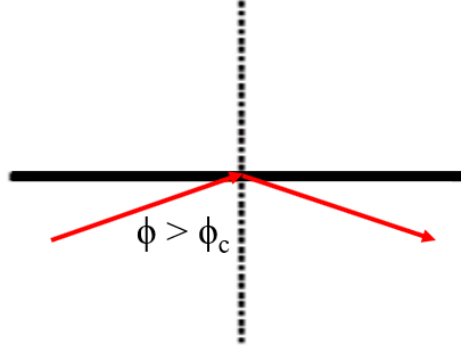
$$\sin \phi_c = \frac{n_1}{n_2} \quad (4.6)$$

formülüyle verilir. Şekil 4.24'te kritik açı durumu görülmektedir.



Şekil 4.24. Kritik açı durumu.

ϕ_c değerinden daha büyük bir geliş açısı olması durumunda gelen ışıkta kırılma olmaz ve tüm ışınlar n_1 kırılma indisiyle geldiği ortama geri yansıtılır. Bu durum tam iç yansıma olarak adlandırılır. Şekil 4.25'te tam iç yansıma olayı görülmektedir.



Şekil 4.25. Tam iç yansıma.

Bir ışının fiber çekirdeği içinde etkin bir şekilde hapsedilebilmesi için bu ışının, öz-yelek ara-yüzüne kritik açıdan daha büyük bir açıyla ($\phi > \phi_c$) çarpması gerekir. Gelme açısı, kırılma açısı ve kırılma indisleri arasındaki ilişki Snell yasasına göre:

$$n_1 \cdot \sin \phi_1 = n_2 \cdot \sin \phi_2 \quad (4.7)$$

olarak verilmektedir. Buradan kırılma indisleri arasındaki oran,

$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{n_1}{n_2} < 1 \quad (4.8)$$

şeklinde verilir. Öz kırılma indisi n_1 ve yelek kırılma indisi n_2 olmak üzere kritik açı;

$$\phi_c = \sin^{-1}(n_2/n_1) \quad (4.9)$$

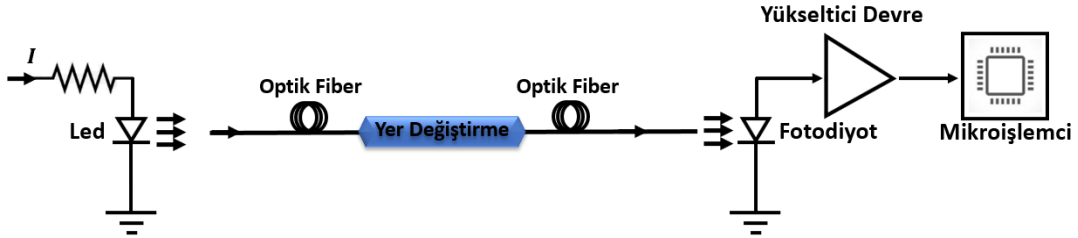
formülüyle hesaplanır. Bu durum, 0 ile $\pm\theta$ arasında bir geliş açısı olan ϕ_0 değerinin, fibere giren herhangi bir ışının fiber çekirdeği boyunca dahili olarak yansıtılacağı anlamına gelir. Bu açı θ kabul açısı olarak bilinir ve bir optik fiberin NA değeriyle aşağıdaki şekilde verilir:

$$NA = n_0 \cdot \sin \theta = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (4.10)$$

Burada n_0 , optik fiberi çevreleyen ortamın kırılma indisidir.

4.2.2. Yer Değiştirmenin Işığın Genliğini Değiştirmesi

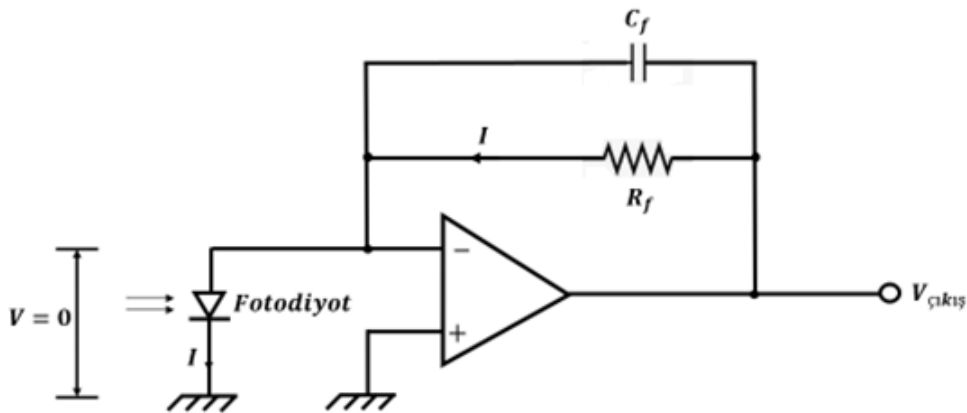
LED, POF ve Fotodiyot kullanıldığında yer değiştirmenin etkileri fotodiyot çıkış gerilimi takip edilerek incelenebilir. Şekil 4.26'da ıřđın genliğini modüle eden yer değiştirmenin ölçümü için LED, POF ve Fotodiyot kullanılan yapının blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.26. Yer değiştirme ile kaynak ıřđının genliğinin modüle edilmesi.

Sürücü devre kullanılarak ışık yayması sağlanan LED, optik fiber üzerinden bir kaynak ıřđı gönderir. Yer değiştirmenin miktarına göre ıřđın genliği değiştirilerek modüleli ışık meydana getirilir. Optik fiberin çıkışındaki fotodiyot, modüleli ıřđı algılayarak bir çıkış akımı üretir. Bu akım, transimpedans yükseltici devreye gönderilerek gerilime vrilir. Yükseltici devre çıkışında farklı yer değiştirme değerleri için farklı çıkış gerilimleri elde edilir. Elde edilen veriler mikroişlemciye yönlendirilerek isteğe göre işlenir. Genlik modülasyonlu bir algılayıcı sisteminde LED-POF-Fotodiyot tertibatı kullanılırken kararlı alışan LED ve fotodiyot seçilmesi çok önemlidir.

Şekil 4.27'de bir genlik modülasyonlu FOA'da, fotodiyot çıkışının yükseltilmesini ve gürültülerin filtrelenmesini sağlayan transimpedans yükseltici devresi görülmektedir [152].



Şekil 4.27. Transimpedans yükseltici devresi.

Transempedans yükseltici devrede fotodiyot tarafından üretilen akım kararlı bir çıkış gerilimine dönüştürülerek R_f direnciyle ayarlanabilir bir yükseltme işlemi sağlanır. R_f direnciyle çıkış gerilimi arasındaki ilişki:

$$V_{\text{çıkış}} = R_f \cdot I \quad (4.11)$$

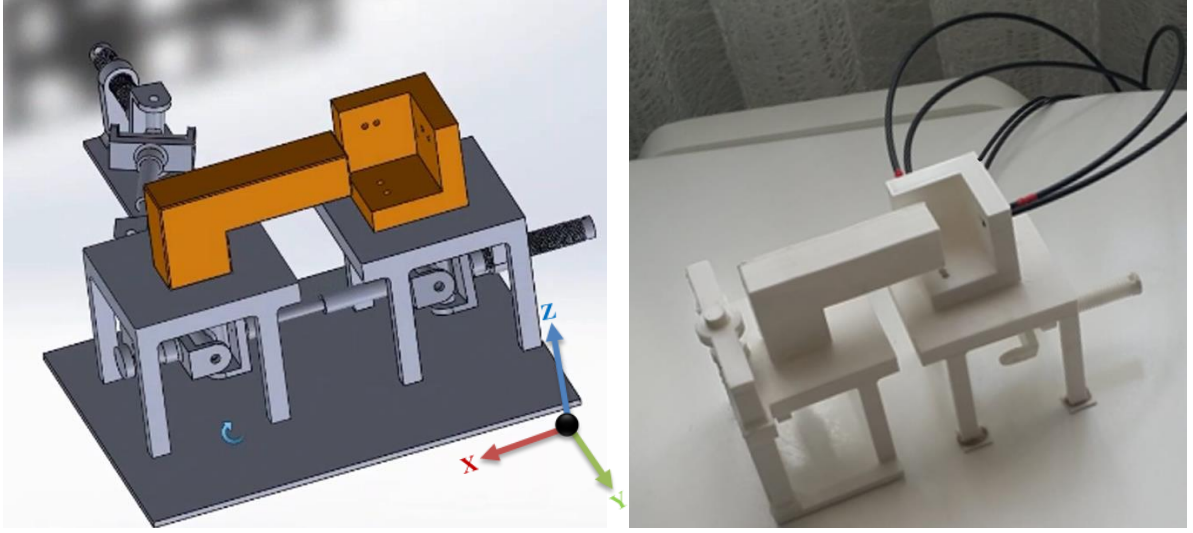
formülüyle verilir.



5. BULGULAR

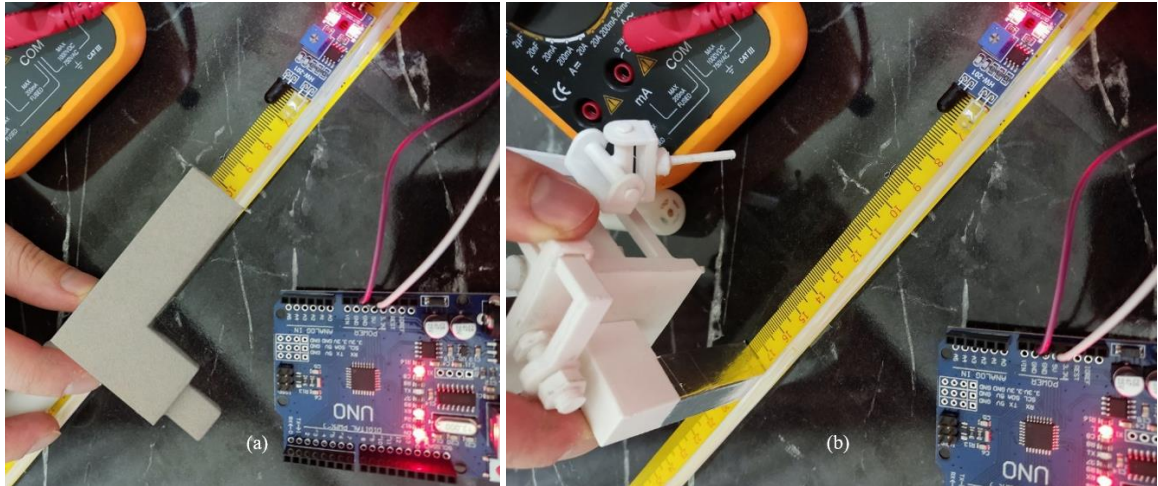
5.1. Ön çalışma

3 boyutta yer değiştirme ölçümü için tasarlanan, her ekseninde çift POF'un kullanıldığı prototipin SolidWorks çizimi ve üretilmiş hali Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Çift POF'lu prototip.

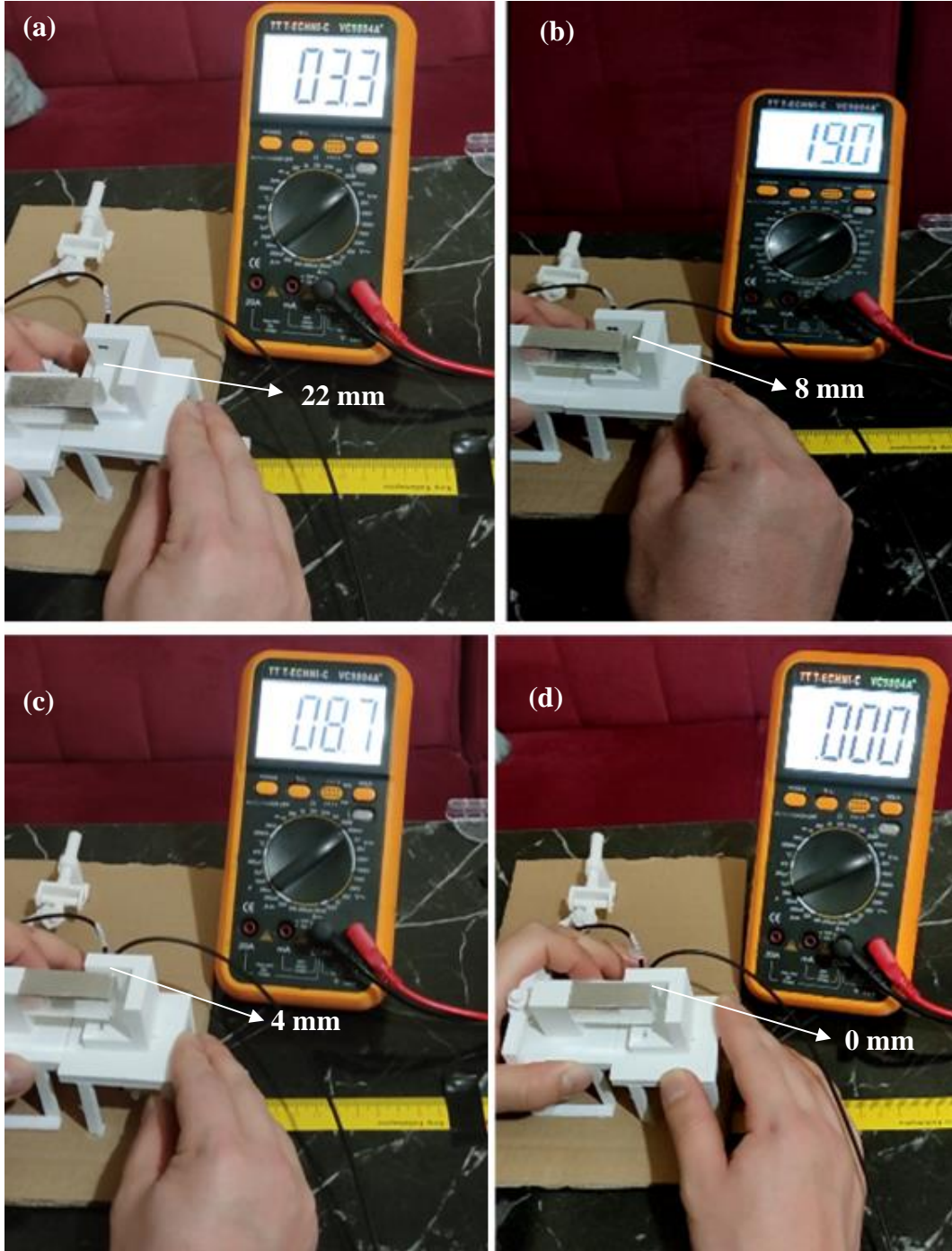
Tasarlanan çift POF'lu prototipin 3 eksen üzerinde hareket kabiliyetinin test edilmesinin ardından kızılötesi sensör ile algılama mesafesi testi yapılmıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Algılama mesafesi testi (a) kaplama öncesi, (b) Al kaplanmış hali.

Algılama testinde PLA yüzey (kaplama öncesi) kızılötesi sensör tarafından 30 mm mesafeden algılanmıştır (Şekil 5.2 (a)). Ardından hareketli parça yüzeyi alüminyum ile

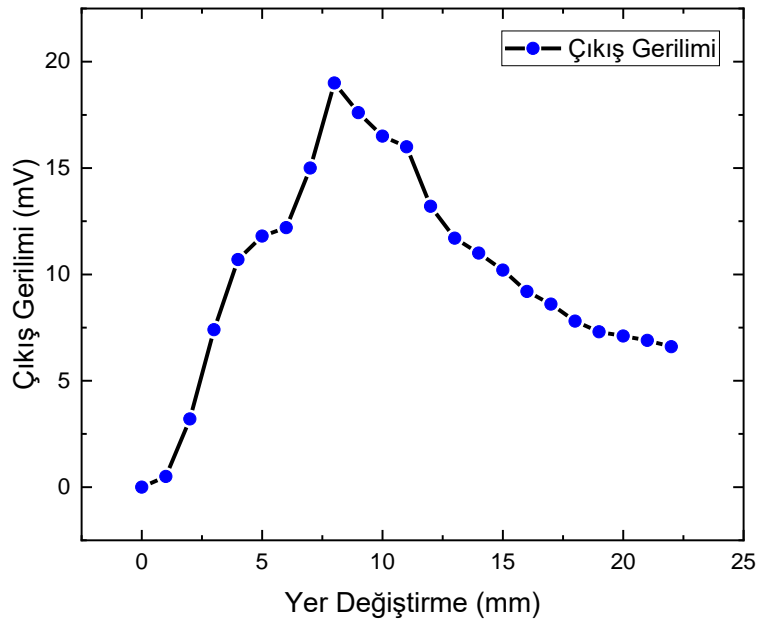
kaplanarak aynı test tekrarlanmıştır. Test sonucunda Bölüm 4.1.1’ de yansıtıcılık özellikleri detaylı bir şekilde ele alınan alüminyum yüzey kızılötesi sensör tarafından 105 mm mesafeden algılanmıştır (Şekil 5.2 (b)). Test sonucunda matematiksel olarak analizi yapılan alüminyumun yüksek yansıtıcılığı deneysel olarak da gözlemlenmiştir.



Şekil 5.3. Çift POF’lu prototiple yer değiştirme deneyleri.

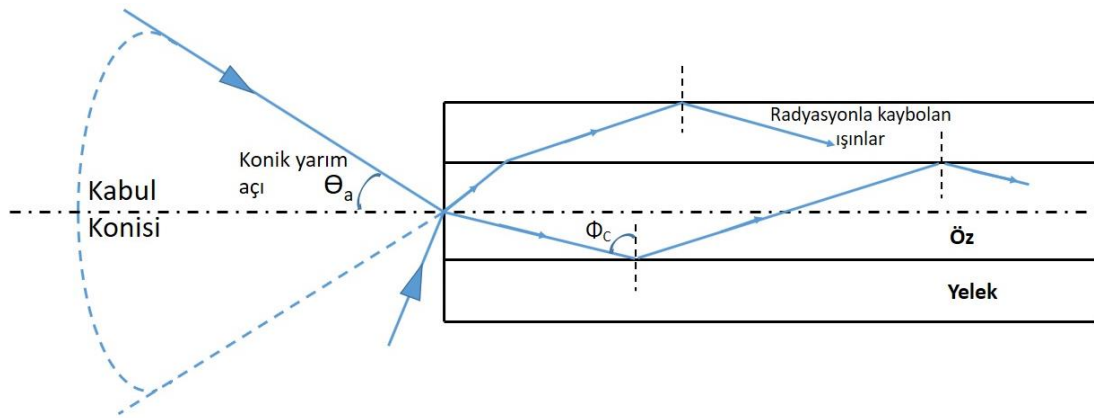
Elde edilen bilgiler doğrultusunda hareketli parça yüzey kaplaması olarak alüminyum tercih edilmiştir. Yüzey seçiminin ardından verici ve alıcı olmak üzere her biri ayrı 2 adet POF sabitlenerek tek boyutlu yer değiştirme deneyleri yapılmıştır.

Verici fiberden yansıtıcı yüzeye çarpan ışığın, yansıtıcı yüzeye çarparak geri dönmesi ve alıcı fiber tarafından toplanarak fotodetektör vasıtasıyla elektrik sinyaline dönüştürülmesi izlenmiştir. Böylece yansıtıcı yüzey ile fiber uçları arasındaki mesafenin bir fonksiyonu olarak ışığın genliğinde meydana gelen değişimler analiz edilerek yer değiştirme miktarı takip edilmiştir. Şekil 5.3 (a)'da fiber-yüzey mesafesi 22 mm iken çıkış geriliminin 3,3 mV olduğu görülmektedir. Yüzey fibere yaklaştırıldıkça çıkış geriliminin artışı gözlemlenmiştir. Şekil 5.3 (b)'de fiber-yüzey mesafesi 8 mm iken çıkış geriliminin 19 mV olduğu görülmektedir. Bu durum, mesafenin azalması nedeniyle geri yansıtılan ışık miktarının artışı olarak ifade edilebilir. Ancak deneyin bundan sonraki aşamasında çıkış geriliminin değişimi bu şekilde gerçekleşmemiş ve 8 mm fiber-yüzey mesafesi en yüksek çıkış gerilimi alınan nokta olarak kaydedilmiştir. Yüzey fibere daha da yaklaştırıldığında ışığın yansıtıcı yüzeyin normali ile yaptığı açının artışına bağlı olarak geri yansıtılan ışık miktarı ve çıkış gerilimi azalmıştır. Şekil 5.3 (c)'de fiber-yüzey mesafesi 4 mm iken çıkış geriliminin 8,7 mV olduğu görülmektedir. Yüzey fibere daha da yaklaştırıldıkça çıkış gerilimi azalmaya devam etmiş ve fiber-yüzey mesafesi 0 mm olduğunda çıkış gerilimi 0 V olarak okunmuştur (Şekil 5.3 (d)). Şekil 5.4'te çıkış geriliminin değişimi görülmektedir.



Şekil 5.4. Çift POF'lu prototipin yer değiştirme-çıkış gerilimi ilişkisi.

0-8 mm aralığındaki değişim Eşitlik 4.10'da verilen nümerik açıklık, kabul açısı, öz ve yelek kırılma indisleri arasındaki bağıntı kullanılarak açıklanabilir. Deneylerde kullanılan POF $n_1=1,492$ öz kırılma indisine, $n_2=1,40$ yelek kırılma indisine ve 0,5 nümerik açıklık değerine sahiptir. Dolayısıyla kabul açısı $\theta=30^\circ$ 'dir ve ışığın fiber içerisinde ilerleyebilmesi için, fibere girerken fiber eksenine ile yapacağı en büyük açı 30° dir. $\theta \leq 30^\circ$ olacak şekilde fiberin öz-yelek ara-yüzüne gelen ışınlar tam yansıma şartını ($\phi > \phi_c$) sağlayacaklarından fiber boyunca kılavuzlanırlar. 30° 'den daha büyük açılarla gelen ışınlar ise öz-yelek ara-yüzünde tam yansıma şartını sağlamayacaklarından yeleğe girerek kaybolurlar. 0-8 mm aralığında kabul açısı 30° 'den daha büyük değerler aldığı için alıcı fibere kılavuzlanabilen yansıyan ışık miktarı azalmış ve buna bağlı olarak çıkışta azalan gerilim değerleri okunmuştur.



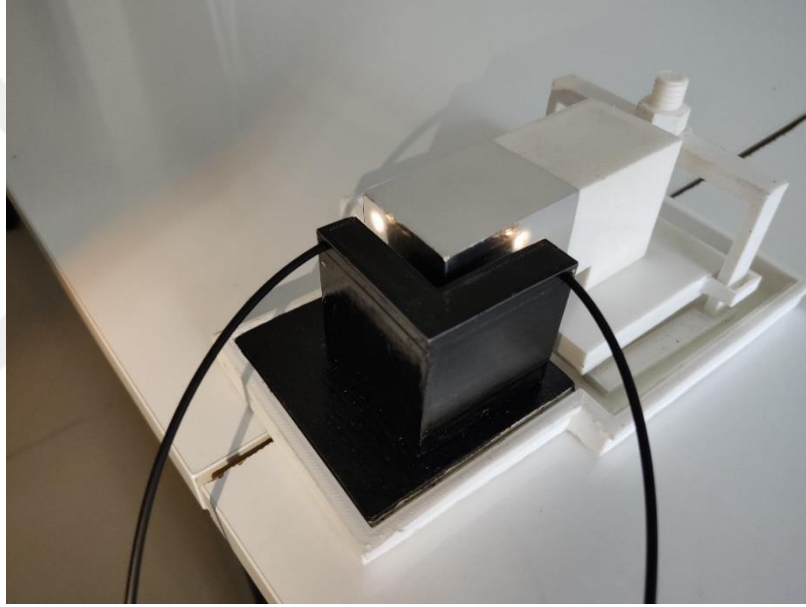
Şekil 5.5. Kabul açısı [128].

Şekil 5.5'te fiberin kabul açısı gösterilmiştir. Elde edilen veriler ışığında tasarlanan ilk prototip üzerinde verici-alıcı fiberlerle iki bölge bir değişim elde edilmiştir. 0-8 mm aralığında fiber-yüzey mesafesi ile çıkış gerilimi doğru orantılı değişirken, 8-30 mm aralığında fiber-yüzey mesafesi ile çıkış geriliminin ters orantılı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Çift POF yapısı kullanılarak yapılacak yer değiştirme ölçümünün iki bölge değişimi göz önünde bulundurularak yapılması gereken yazılımların daha karmaşık olması, bu yapı ile yer değiştirme ölçümünün bir dezavantajı olarak değerlendirilmiştir.

Bu aşamadan sonra verici ve alıcı ışıklarını tek POF üzerinden taşıyan POF kuplör yapısının kullanımı üzerinde yapılan çalışmalara geçilmiştir. POF kuplör kullanılarak yapılan deneylerde tek bölge ve yüksek oranda lineer gerilim değerleri okunmuştur. Bu nedenle yer değiştirme ölçümü için çift POF kullanımı yerine POF kuplör kullanımının daha uygun bir yöntem olduğu değerlendirilerek POF kuplör yapısına uyumlu bir nihai prototip geliştirilmesi aşamasına geçilmiştir.

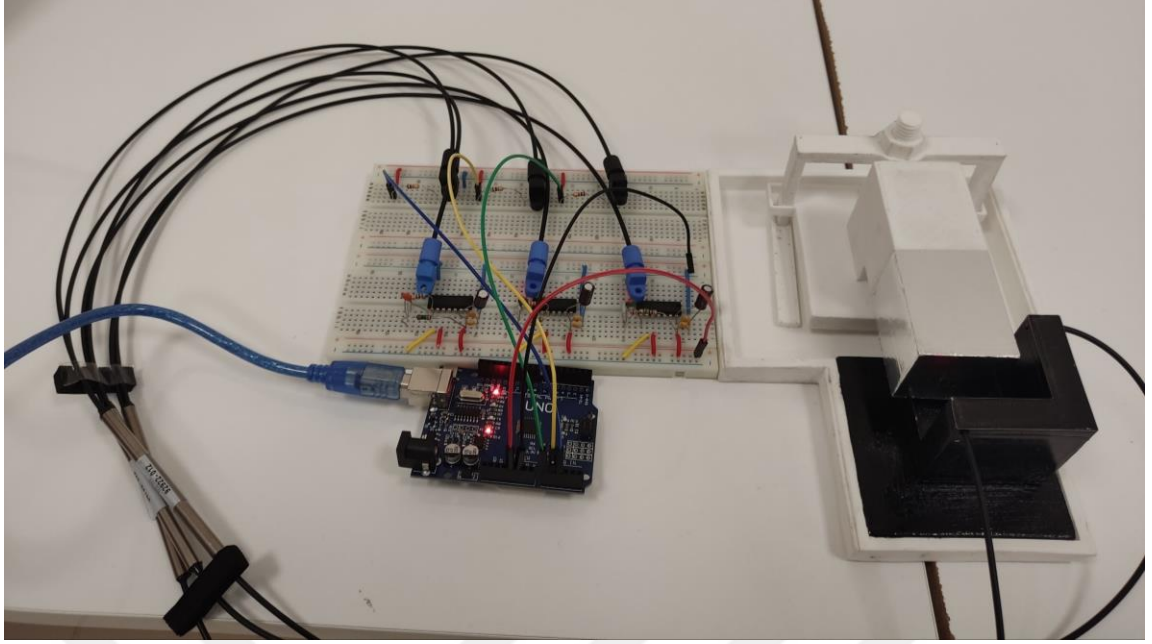
5.2. 3D-YDA

Bölüm 4.1.1’ de ayrıntılı olarak tasarım ve üretim aşamaları anlatılan 3D-YDA’nın elde edilmesinin ardından ölçümlerin yapılması amacıyla kaynak sinyalini ve ölçüm sinyalini taşımakla görevli fiberlerin test edilmesi işlemlerine geçilmiştir. Sabit parça üzerinde her 3 eksene birer uçları akuple edilmiş olan fiberlerin boştaki uçları 5000 mcd (milikandela) ışık şiddetinde InGaN beyaz ışık yayan ışık kaynaklarına bağlanmıştır. İşlem sonucunda kaynak sinyalinin yüksek bir başarıyla düzenek üzerine taşındığı görülmüştür. Bununla birlikte hareketli parçanın alüminyum yansıtıcı aynayla kaplanan yüzeyinin kaynak sinyaline verdiği cevap incelenmiş, yer değiştirmeye kaynak sinyalinin rahatlıkla modüle edebildiği gözlemlenmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Düzeneğe sabitlenen POF kabloların 5000 mcd InGaN beyaz ışık kaynağıyla test edilmesi.

Düzenek ve fiberlerin planlanan tüm testlerinin başarıyla tamamlanmasının ardından, birer uçları sabit parça üzerinde x, y ve z eksenlerine sabitlenmiş olan 3 adet 1×2 POF kuplör kablonun boşta kalan diğer uçlarının bağlantılarının yapılması işlemlerine geçilmiştir. Her bir kuplörün birer uçları sabit parçada eksenler üzerine sabitlenmiş durumdayken, diğer iki uçlarının birisi ışık kaynağına, diğeri fotodedektöre bağlanır. Işık kaynağının ve fotodedektörün çalışması için gerekli olan elektronik devreler kurulmuş ve verileri anlamlandırmak amacıyla tasarlanarak uygun yazılımlarla programlanan denetleyici devre düzeneğe eklenmiştir (Şekil.5.7).



Şekil 5.7. 3D-YDA'nın optik ve elektronik bağlantılarının gerçekleştirilmesi.

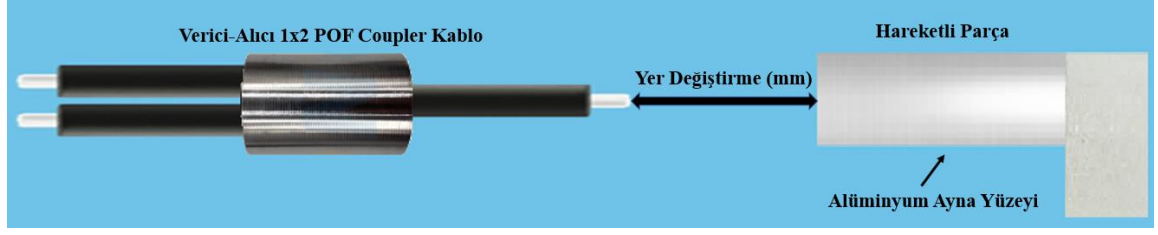
Işık kaynaklarıyla ışığı üretmek, üretilen ışık ışınlarını 3D-YDA'ya iletmek, düzenekte meydana gelen yer değiştirme ile ışınları modüle etmek ve modüle edilen ışınları fotodetektöre yönlendirmek, 3 boyutlu fiber optik yer değiştirme algılama işleminin esas safhalarıdır. Bundan sonraki işlemler, algılanan hareketlerin yorumlanması, anlamlı verilere dönüştürülmesi ve bir ekran üzerinde anlamlandırılmış bilgiler halinde anlık olarak kullanıcıya sunulması amacıyla gerçekleştirilir.

Yapılan deneylerden elde edilen veriler göz önüne alındığında yer değiştirme hareketleri tarafından modüle edilen bilgi sinyalinin, modüleli bir sinyal olarak IF-D91 üzerindeki etkileri deneysel verilerin analizinde dikkat edilmesi gereken en önemli konudur. Bu nedenle meydana getirilen yer değiştirme hareketlerinin özelliğine bağlı olarak IF-D91'in ürettiği çıkış gerilimlerinin izlenmesi gerekmektedir.

Sabit parça üzerine yerleştirilmiş durumda olan ve 1×2 POF kuplörün tek girişli ucunu temsil eden fiber ile yüzeyine alüminyum ayna kaplanmış olan hareketli parça arasındaki mesafenin değişimi, yer değiştirme bilgisini sağlar ve mm cinsinden verilir. Şekil 5.8'de bu ilişki gösterilmektedir.

Her üç ekseninde özdeş olarak kurulan devrelerin test edilmesi için çoklu ölçümler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle x-eksenindeki algılayıcı uca yansıtıcı yüzey tamamen temas ettirilip devre çıkışındaki voltaj değeri okunmuştur. Ardından yansıtıcı yüzey 1 mm

aralıklarla geri çekilerek mesafe 30 mm'ye kadar artırılmış ve her adımda devre çıkışı okunarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.8. Yer değiştirme mesafesi.

Daha sonra bu süreç 5 kez tekrarlanmıştır. Benzer şekilde y ve z-eksenleri için de aynı ölçüm prosedürü tekrar edilmiştir. Ölçümler sonucu elde edilen veriler her bir eksen için sırasıyla Tablo 5.1, 5.2 ve 5.3'te verilmektedir.

x, y ve z eksenlerinde 0-30 mm aralığındaki her bir değer için okunan 5 ölçümün ortalaması alınarak elde edilmiş olan yer değiştirme-algılayıcı çıkışı eğrileri Şekil 5.9 (a), (b) ve (c)'de sırasıyla x, y ve z eksenleri için gösterilmektedir. Şekil 5.9'daki grafiklerin R^2 değerleri genel olarak 0,997 civarında yüksek bir doğrusallık göstermektedir. Ancak R^2 değerleri yüksek olsa da deneysel sonuçların uydurulan eğrinin altında ve üstünde salındığı görülmektedir. Bunun nedeni, fiber-hava ve hava-yansıtıcı yüzey olmak üzere bir interferometrik yapının var olmasıdır. Yani fiber-hava ara-yüzeyinin yansıtıcılık değeri yaklaşık %4 ve hava-yansıtıcı yüzey ara-yüzeyinin yansıtıcılık değeri %95'ler mertebesinde. Bu değerler arasındaki fark kapandığında uydurulan eğrinin altında ve üstünde kalan sinüzoidal görünüm daha belirgin hale gelecektir. Bu belirgin hale gelmenin başka bir yolu da boşluk uzunluğunu (interferometre mesafesi) kısaltmaktır. Yapılan çoklu ölçümlerde elde edilen en düşük ve en yüksek voltaj değerleri alt ve üst limitlerimizi belirlemiştir. 5 ölçümün dışına çıkılarak yinelenen ölçümlerde bu alt ve üst limit değerlerin aşılmadığı görülmüştür. Bu durum algılayıcı parametrelerinden olan tekrarlanabilirlik şartının büyük bir ölçüde sağlandığını göstermiştir.

Tablo 5.1, 5.2 ve 5.3'teki her eksen için elde edilen en düşük ve en yüksek voltaj değerleri ile oluşturulmuş veriler Tablo 5.4 de gösterilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi toplam 465 adet ölçüm sonucuna göre eksenler arasındaki voltaj farklılıkları maksimum 20 mV olmaktadır. Ortalama olarak 16,86 mV ölçümler arasında bir fark oluşmaktadır. Bunun sebebi devreler her ne kadar özdeş olarak kurulmuş olsa da elektriksel ve mekaniksel farklılıkların bulunmasıdır.

Tablo 5.1. x-eksenindeki tek boyutlu tekrarlı ölçümler.

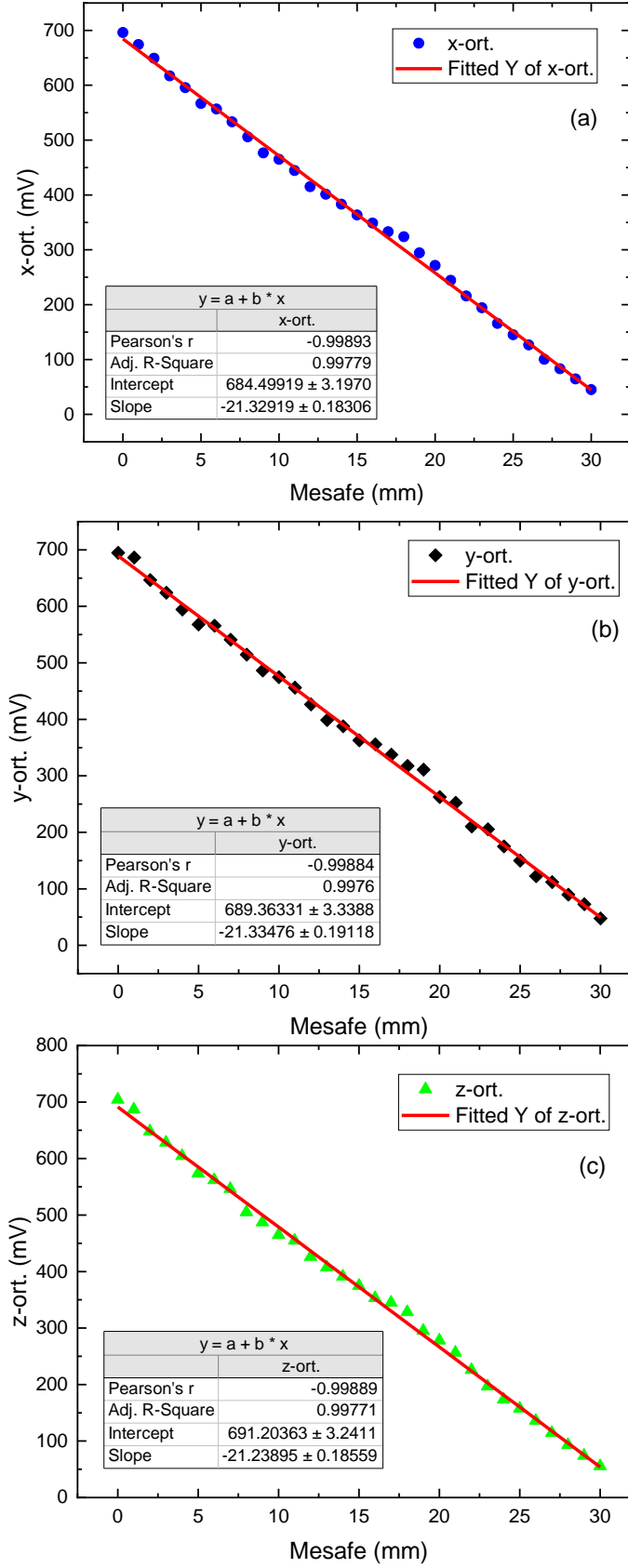
Mesafe (mm)	x-eksenindeki düzenek çıkışı (mV)					Ortalama (mV)
	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	4. Ölçüm	5. Ölçüm	
0	695	697	695	698	695	696
1	673	675	674	671	678	674,2
2	656	643	657	648	642	649,2
3	622	619	615	613	616	617
4	599	594	592	598	595	595,6
5	573	574	577	587	585	579,2
6	559	558	556	557	553	556,6
7	531	534	537	530	535	533,4
8	506	505	503	507	509	506
9	480	485	493	497	485	488
10	478	468	464	461	463	466,8
11	445	443	442	447	446	444,6
12	415	417	417	413	414	415,2
13	400	399	402	404	401	401,2
14	382	380	385	386	383	383,2
15	365	367	363	360	362	363,4
16	348	350	349	347	350	348,8
17	333	335	332	331	334	333
18	321	323	323	327	325	323,8
19	297	294	295	293	293	294,4
20	273	273	270	272	270	271,6
21	245	246	242	243	246	244,4
22	215	217	218	216	213	215,8
23	193	197	194	193	195	194,4
24	162	165	166	167	169	165,8
25	148	143	144	146	145	145,2
26	128	125	126	129	125	126,6
27	99	102	100	103	98	100,4
28	85	82	82	83	84	83,2
29	63	67	65	63	65	64,6
30	45	44	46	43	48	45,2

Tablo 5.2. y-eksenindeki tek boyutlu tekrarlı ölçümler.

Mesafe (mm)	y-eksenindeki düzenek çıkışı (mV)					Ortalama (mV)
	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	4. Ölçüm	5. Ölçüm	
0	696	693	695	696	694	694,8
1	687	686	683	689	687	686,4
2	640	644	655	645	649	646,6
3	625	622	623	626	624	624
4	599	595	593	590	595	594,4
5	578	579	571	582	573	576,6
6	563	565	563	568	569	565,6
7	542	543	540	542	538	541
8	510	518	512	515	517	514,4
9	483	485	490	485	489	486,4
10	472	476	477	473	475	474,6
11	456	455	453	457	459	456
12	429	426	427	427	423	426,4
13	401	396	398	399	400	398,8
14	388	386	390	388	387	387,8
15	360	365	361	362	366	362,8
16	355	354	357	359	354	355,8
17	338	339	338	337	335	337,4
18	317	315	316	319	320	317,4
19	310	312	309	311	313	311
20	265	263	261	262	261	262,4
21	251	257	252	250	252	252,4
22	209	211	209	213	210	210,4
23	203	206	207	207	204	205,4
24	175	177	178	173	172	175
25	152	150	151	148	149	150
26	120	122	121	126	123	122,4
27	108	112	113	110	116	111,8
28	88	92	91	88	90	89,8
29	75	69	73	77	70	72,8
30	52	49	43	46	48	47,6

Tablo 5.3. z-eksenindeki tek boyutlu tekrarlı ölçümler.


Mesafe (mm)	z-eksenindeki düzenek çıkışı (mV)					Ortalama (mV)
	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	4. Ölçüm	5. Ölçüm	
0	704	707	701	705	705	704,4
1	689	686	688	687	685	687
2	647	650	646	658	641	648,4
3	630	628	628	629	627	628,4
4	606	601	604	605	607	604,6
5	571	572	577	575	576	574,2
6	560	562	563	561	564	562
7	550	547	543	548	544	546,4
8	505	506	504	503	508	505,2
9	489	487	489	486	485	487,2
10	468	465	465	466	465	465,8
11	450	455	454	458	458	455
12	428	422	426	427	428	426,2
13	408	407	405	409	408	407,4
14	394	392	391	389	390	391,2
15	369	374	379	375	378	375
16	349	352	356	355	354	353,2
17	344	346	345	346	344	345
18	327	326	329	330	330	328,4
19	295	297	295	293	296	295,2
20	280	278	276	277	279	278
21	255	257	256	258	257	256,6
22	226	223	229	225	227	226
23	198	196	198	195	197	196,8
24	172	171	175	174	176	173,6
25	156	160	158	159	155	157,6
26	135	134	136	138	137	136
27	116	115	113	115	114	114,6
28	92	95	93	90	96	93,2
29	76	74	71	72	77	74
30	55	56	57	57	54	55,8



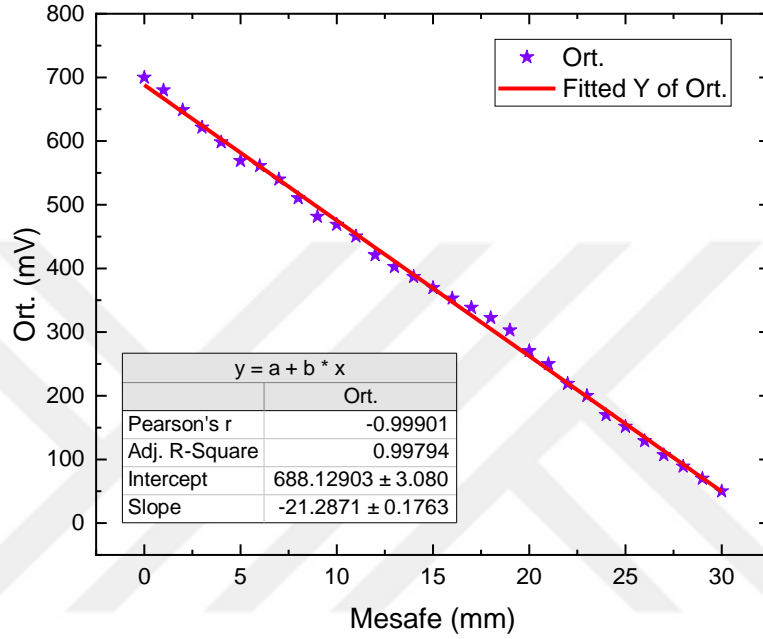
Şekil 5.9. x, y ve z eksenlerinde 0-30 mm aralığındaki her bir değer için okunan 5 ölçümün ortalaması alınarak elde edilmiş olan sırasıyla, (a) x-ekseni, (b) y-ekseni, (c) z-eksenindeki 3D-YDA çıkışı eğrileri.

Tablo 5.4. Tüm ölçümlerdeki alt ve üst limit değerler.

Mesafe (mm)	Alt değer (mV)	Üst değer (mV)	Ortalama (mV)	Fark (mV)
0	693	707	700	14
1	671	689	680	18
2	640	658	649	18
3	613	630	621,5	17
4	590	607	598,5	17
5	571	587	579	16
6	553	569	561	16
7	530	550	540	20
8	503	518	510,5	15
9	480	497	488,5	17
10	461	478	469,5	17
11	442	459	450,5	17
12	413	429	421	16
13	396	409	402,5	13
14	380	394	387	14
→ 15	360	379	369,5	19
16	347	359	353	12
17	331	346	338,5	15
18	315	330	322,5	15
19	293	313	303	20
20	261	280	270,5	19
21	242	258	250	16
22	209	229	219	20
23	193	207	200	14
24	162	178	170	16
25	143	160	151,5	17
26	120	138	129	18
27	98	116	107	18
28	82	96	89	14
29	63	77	70	14
30	43	57	50	14



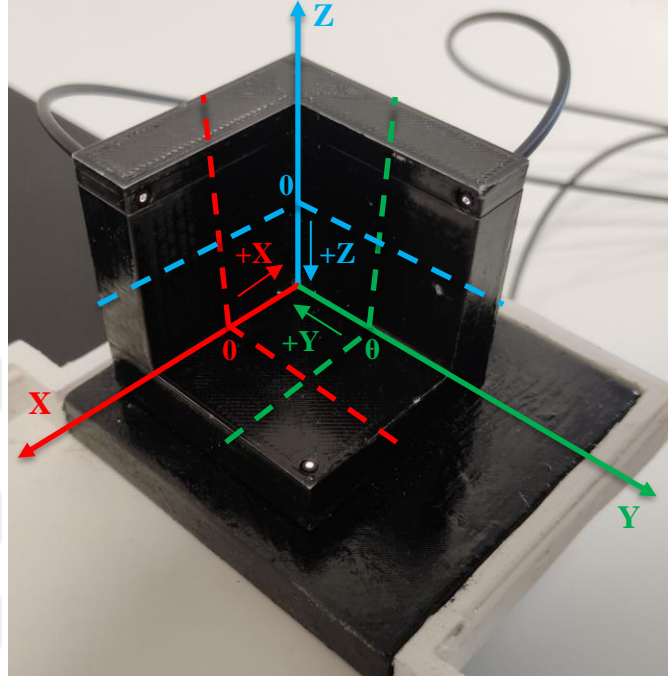
Her bir veri seti için elde edilen en düşük ve en yüksek voltaj değerlerinin ortalamasına göre oluşturulmuş tek eksenli mesafe değişimine göre sensör çıkışı arasındaki ilişki Şekil 5.10'daki grafikte gösterilmiştir. En yüksek ve en düşük voltaj değerlerinin referans alınmasındaki sebep denetleyici devre yazılımında bu değerlerin limit değerler olarak kullanılacak olmasıdır. Böylelikle bu limit değerlerin ortalaması ile oluşturulmuş grafikten elde edilen R^2 değerinin 0,9979 gibi yüksek bir değerde olduğu görülmüştür.



Şekil 5.10. Her bir veri seti için elde edilen en düşük ve en yüksek voltaj değerlerinin ortalamasına göre oluşturulmuş tek eksenli mesafe değişimine göre sensör çıkışı.

Her üç eksendeki tek boyutlu yer değiştirmenin stabil olarak algılanabilmesinin ardından her iki ve üç eksende konum değişikliği yapılarak iki ve üç boyutlu yer değiştirmenin bilgisini online olarak verebilecek denetleyici yazılımını geliştirmek için deneysel yöntemlerle elde edilen Tablo 5.4'teki veriler kullanılmıştır. Böylelikle denetleyici devrenin okunan analog voltaj değerlerine göre nasıl davranması gerektiğini belirleyen yazılım geliştirilmiştir. x, y ve z eksenlerinde orta nokta orjin (başlangıç) noktası olarak kabul edilmiş ve 0 mm olarak belirlenmiştir. Hareketler eksene yaklaştıkça +, eksenlerden uzaklaştıkça - yönde kabul edilmiştir. Bu durum Şekil 5.11'de gösterilmektedir. Hareketli parça her üç ekseninde sabit parçanın eksenlerine dayandığında +15 mm; eksenlerden en uzak noktalarda algılayıcının sınırlarına dayandığında -15 mm değer gösterilmiştir. Örneğin Tablo 5.4'ün üçüncü satırı incelenecek olursa, başlangıç noktasından herhangi bir eksenlerdeki +14 mm'lik hareket sonucunda algılayıcı çıkışındaki voltaj 671-689 mV değerlerinde olmaktadır. Tablo 5.4'ün ok işareti ile gösterilen 15. satırına bakıldığında 360-379 mV arası çıkış voltajı değerleri her

üç eksenin “0” noktasını göstermektedir. Böylece 3D-YDA'nın başlangıç noktası x, y ve z eksenleri için 360-379 mV çıkış voltajı değerlerinin alındığı bölge olarak yorumlanır. Bu veriler göz önüne alındığında geliştirilen 3D-YDA x, y ve z eksenlerinde 1 mm hassasiyetlik ve 30 mm dinamik ölçüm aralığına sahiptir.



Şekil 5.11. Eksenel değerler.

3D-YDA'nın çalışmasına ait IDE kodu EK-1'de yer almaktadır. Şekil 5.12'de IDE arayüzü kullanılarak komut satırlarının yazılması işlemi görülmektedir. IDE arayüzü kullanılarak yapılan yazılımlar denetleyici devre olarak kullanılan Arduino Uno'ya yüklenir. Böylece donanımsal ve yazılımsal olarak 3D-YDA tasarımı tamamlanmıştır. Şekil 5.13'de tüm ekipmanlarını içerecek şekilde 3D-YDA sisteminin tamamlanmış hali görülmektedir.

DeneySEL ölçümler mikrometre çözünürlüğünde bir kumpas yardımıyla 1 mm aralıklarla yapılmıştır. Bu değerden daha düşük veya yüksek kaydırmalarda belirlenen aralık değeri geniş tutulduğu için bir nevi filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca değer sapmalarını minimize etmek amacıyla yazılımsal olarak medyan filtre uygulanmıştır. Düzenegin 1 mm'nin altındaki çözünürlükte çalışması kaydırmaların çok daha kontrollü ve sinyal işleme devreleriyle yapılacak donanımsal iyileştirmelerle mümkün hale gelmesi beklenmektedir. İlerleyen çalışmalarda mevcut sisteme bu yönde iyileştirmeler yapılması planlanmaktadır.

```
3D_Yer_Degistirme_Algilayici_Yazilimi | Arduino 1.8.19
Dosya Düzenle Taslak Araçlar Yardım

3D_Yer_Degistirme_Algilayici_Yazilimi

int a2=A2;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
}

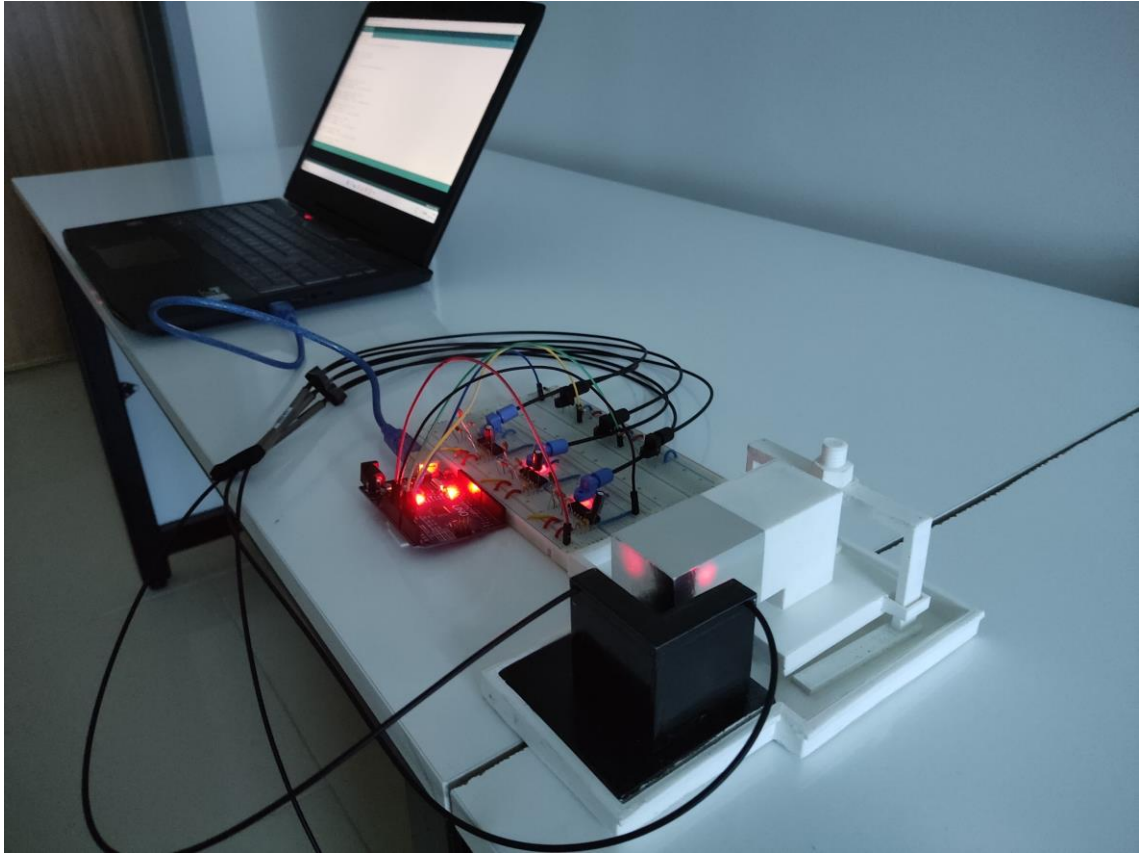
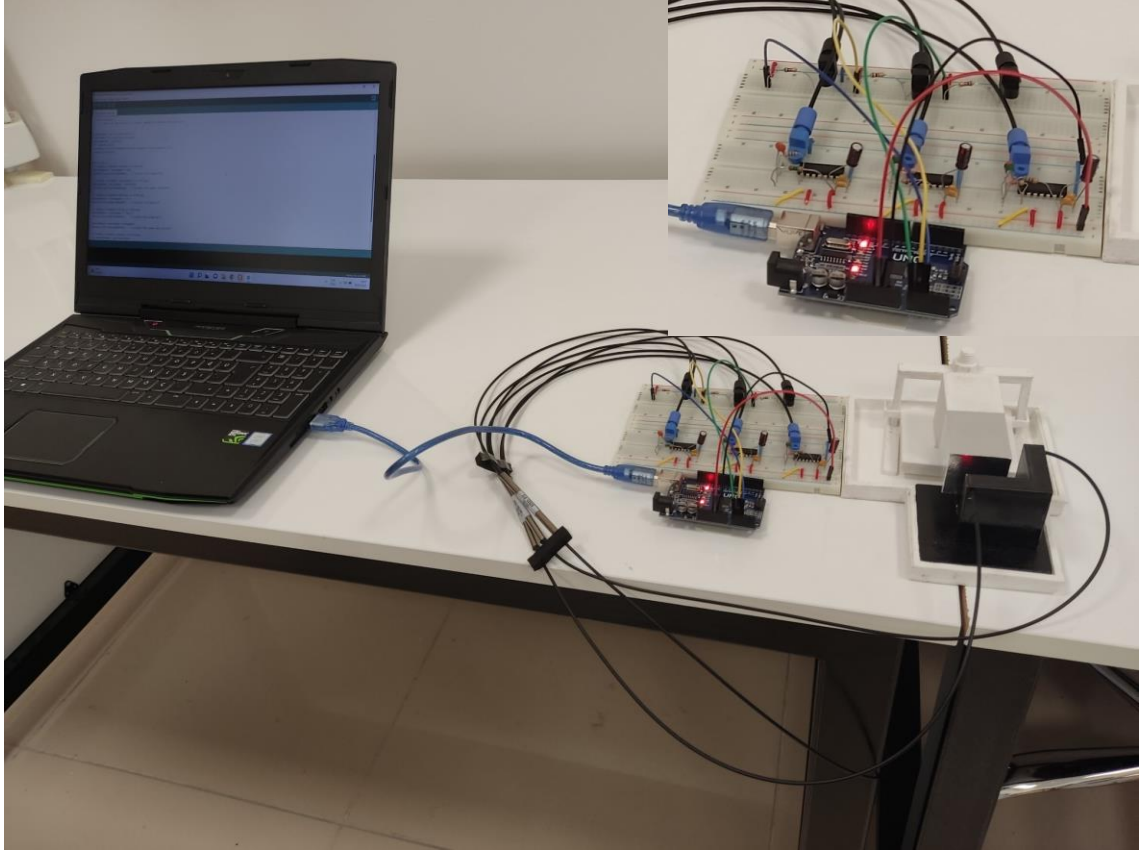
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  long x= analogRead(a0);
  long y= analogRead(a1);
  long z= analogRead(a2);

  samples1.add(x);
  samples2.add(y);
  samples3.add(z);

  x = samples1.getMedian();
  y = samples2.getMedian();
  z = samples3.getMedian();

  Serial.println("3D YDA Konum Bilgisi:");
  if(693<x && x<1024)
  {
    Serial.print("-x=15");
  }
  if(671<x && x<689)
  {
    Serial.print("-x=14");
  }
  if(640<x && x<658)
  {
    Serial.print("-x=13");
  }
  if(613<x && x<630)
  {
    Serial.print("-x=12");
  }
  if(590<x && x<607)
  {
    Serial.print("-x=11");
  }
  if(571<x && x<587)
  {
    Serial.print("-x=10");
  }
  if(553<x && x<569)
  {
    Serial.print("-x=9");
  }
  if(530<x && x<550)
```

Şekil 5.12. IDE arayüzü kullanılarak komut satırlarının yazılması.



Şekil 5.13. 3D-YDA'nın tüm bileşenleri.

3D-YDA'nın hareketli parçası x, y ve z eksenlerinde hareket ettirilirken seri port ekran bağlantısı kullanılarak bilgisayar ekranına anlık veri akışı sağlanır. Şekil.5.14'te hareketli parça yer değiştirirken seri port ekranında izlenen anlık veri takibi görülmektedir.

```
COM3
10:34:30.266 ->
10:34:30.266 ->
10:34:30.594 -> 3D YDA Konum Bilgisi:
10:34:30.594 -> -x=15
10:34:30.594 -> -y=7
10:34:30.594 -> +z=5
10:34:30.594 ->
10:34:30.875 -> 3D YDA Konum Bilgisi:
10:34:30.875 -> -x=15
10:34:30.875 -> -y=13
10:34:30.875 -> +z=5
10:34:30.875 ->
10:34:31.203 -> 3D YDA Konum Bilgisi:
10:34:31.203 -> -x=15
10:34:31.203 -> -y=13
10:34:31.203 -> +z=3
10:34:31.203 ->
10:34:31.484 -> 3D YDA Konum Bilgisi:
10:34:31.484 -> -x=15
10:34:31.484 -> -y=13
10:34:31.484 -> +z=9
10:34:31.484 ->
10:34:31.765 -> 3D YDA Konum Bilgisi:
10:34:31.765 -> -x=12
10:34:31.765 -> -y=13
10:34:31.812 -> +z=2
10:34:31.812 ->
10:34:32.094 -> 3D YDA Konum Bilgisi:
10:34:32.094 -> -x=12
10:34:32.094 -> -y=13
10:34:32.094 -> +z=2
10:34:32.094 ->
10:34:32.375 -> 3D YDA Konum Bilgisi:
10:34:32.375 -> -x=15
10:34:32.375 -> -y=13
10:34:32.422 -> +z=2
10:34:32.422 ->
```

Şekil 5.14. Seri port ekranında anlık yer değiştirme veri takibi.

x, y ve z eksenlerinde meydana getirilen yer değiştirme hareketlerinin tespit edilmesi ve verilerin seri port ekranından izlenmesinin ardından, elde edilen deneysel verilerin kaydedilerek yorumlanması işlemlerine geçilmiştir. Şekil 5.15'te deney anlarına ait bir görüntü paylaşılmıştır.



Şekil 5.15. Deneysel çalışmalar.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada klasik yer değiştirme ölçüm yöntemlerine değinilmiş ve bunların yerine pek çok avantajı bulunan FOA yapısıyla yer değiştirme parametresinin ölçümü üzerinde durulmuştur. 3 boyutta yer değiştirmenin takip edilmesi için PMMA tabanlı POF kuplörlerle oluşturulacak bir algılayıcı modeli tasarlanmış, geliştirilmiş ve gerçekleştirilmiştir. 3D-YDA, basit tasarımı, düşük maliyetli, yüksek hassasiyetli bir algılayıcıdır. Fiber optik teknolojisi kullanılarak x-y-z eksenlerindeki hareketleri algılayan ve online olarak bildirebilen 3D-YDA ile, yer değiştirme algılama sistemlerine çok değerli bir alternatif sunulmuştur.

Nihai ürüne ulaşana kadar prototip oluşumuna, optik ve elektronik tasarıma ait çok sayıda deney yapılmıştır. Ölçümler için 3 boyutta hareket kabiliyeti sağlayan düzenekler tasarlanmış, farklı optik özelliklerde verici-alıcılar ve optik fiberler kullanılmıştır. Işık kaynakları, yaydıkları ışığın dalga boylarına ve ışık şiddetlerine; fotodedektörler algılama bölgelerine, optik fiberler ise optik bilgiyi taşıyabilme kabiliyetlerine göre incelenmiştir. İncelemeler sonucunda birbirine uyumlu verici, alıcı ve optik fiberler seçilmiştir.

Daha uygun maliyeti sağlamak amacıyla başlangıçta yaygın olarak kullanılan LED ve fotodedektörler ile çalışmalar yapılmış ancak bunların optik fiberlere bağlantılarının zorluğu ve uygun olmayan bağlantılar nedeniyle optik güç kayıplarının oluşması gibi dezavantajlarla karşılaşmıştır.

Verici ve alıcı devreler için çift POF kullanıldığında 0-8 mm aralığında yansıyan ışınların fiber kabul açısından daha büyük açılarla fibere gelerek kılavuzlanan ışın miktarını azalmasına sebep olduğu ve bu nedenle iki bölgeli bir çıkış eğrisi elde edildiği görülmüştür. Elde edilen veriler ışığında çift POF yapısı kullanılarak yapılacak yer değiştirme ölçümünün, iki bölgeli değişim göz önünde bulundurularak nispeten daha karmaşık yazılımlar gerektirdiği değerlendirilmiş ve daha uygun çözümler üzerinde çalışılmıştır. Alternatif olarak 1×2 POF kuplör yapısı kullanılarak başarılı deneysel sonuçlar alınmıştır. Ayrıca POF kuplör ile uyumlu fiber verici-alıcı komponentler seçilerek kolay ve uygun bağlantı imkanı sağlanmış, optik güç kayıplarının önüne geçilmiştir.

Her 3 ekseninde yer değiştirme ölçümleri yapılarak çıkış gerilimleri kaydedilmiş ve bu veriler göz önüne alınarak uygun yazılımlar geliştirilmiştir. Bu sayede veriler anlamlı bilgilere

dönüştürülerek kullanıcıya sunulmuştur. x, y ve z eksenlerinde orta nokta orjin (başlangıç) noktası olarak kabul edilmiş ve 0 mm olarak belirlenmiştir. Hareketler eksene yaklaştıkça +, eksenden uzaklaştıkça – yönde kabul edilmiştir. Hareketli parça her üç ekseninde sabit parçanın eksenlerine dayandığında +15 mm; eksenlerden en uzak noktalarda algılayıcının sınırlarına dayandığında -15 mm değer gösterilmiştir. Bu veriler göz önüne alındığında geliştirilen 3D-YDA x, y ve z eksenlerinde 1 mm hassasiyetlik ve 30 mm dinamik ölçüm aralığına sahip bir YDA'dır. Doğrusal bir çıkışa sahip olan 3D-YDA sisteminin R^2 doğrusallık değeri 0,99 civarındadır. Yapılan tekrarlı ölçümler neticesinde 3D-YDA, hareketin oluşmasını ve hareketin yönünü üç boyutlu olarak doğru bir şekilde tespit edebilmiştir.



KAYNAKLAR

- [1]. Serway, R. A., & Beichner, R. J., 1999, *Physics for Scientists and Engineers*, Vol. 1 Chapters 1-22, Harcourt.
- [2]. Fraden, J., 2010, Position, displacement, and level. *In Handbook of Modern Sensors*, pp. 279-326, Springer, New York, NY.
- [3]. Tün M., Pekkan E., ve Tunç S., 2015, Yer Sarsıntı Haritalarının Üretilmesinde Sismik Ağ Yapısı: Eskişehir Örneği, *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(3), 1-14.
- [4]. Hooper A., Zebker H., Segall P., and Kampes B., 2004, A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using InSAR Persistent Scatterers, *Geophysical Research Letters*, 31, L23611.
- [5]. Türk T., 2013, Hava Fotoğrafı Ve Optik Uydu Görüntüleri Yardımıyla Yatay Yer Değiştirmelerin Belirlenmesi, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 6(1), 71-79.
- [6]. Bayram Y., 2008, Değişerek Yayılan Yer Hareketi Etkisindeki Baraj-Rezervuar-Zemin Sistemlerinin Stokastik Dinamik Analizi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [7]. Haciefendioğlu K., 2004, Değişerek Yayılan Yer Hareketi Etkisindeki Toprak Dolgu Barajların Lineer Olmayan Stokastik Analizi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [8]. Özbek A., 2005, Yeraltı kazılarında (tünellerde) yerdeğiştirme vektörünün izlenmesi ve ayna ilerisindeki ortamların tahmini, *İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, 18(2), 171-181.
- [9]. Özcan, Z., ve Yöntem, K., 2005, Betonarme kirişlerin kompozit malzemeler ile güçlendirilmesi, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli.
- [10]. Tosunoğlu, Z., 2002, Trollerde Geometri-Performans Ölçümü, *Su Ürünleri Dergisi*, 19(3-4), 565-575.
- [11]. Kalyoncu, M., 2006, Titreşim analizi ile makina elemanları arızalarının belirlenmesi, *Mühendis ve Makina*, 47(552), 28-35.
- [12]. Zhu, Z. W., Liu, D. Y., Yuan, Q. Y., Liu, B., and Liu, J. C., 2011, A novel distributed optic fiber transducer for landslides monitoring, *Optics and Lasers in Engineering*, 49(7), 1019-1024.
- [13]. Park, H. S., Kim, J. M., Choi, S. W., and Kim, Y., 2013, A wireless laser displacement sensor node for structural health monitoring. *Sensors*, 13(10), 13204-13216.
- [14]. Chuang, K. C., Ma, C. C., and Wang, H. C., 2016, Simultaneous measurement of dynamic displacement and strain in a single fiber using coarse wavelength-division

multiplexing and fiber Bragg-grating filter-based sensing system, *Applied Optics*, 55(9), 2426-2434.

[15]. Yang, H. Z., Qiao, X. G., Luo, D., Lim, K. S., Chong, W., and Harun, S. W., 2014, A review of recent developed and applications of plastic fiber optic displacement sensors, *Measurement*, 48, 333-345.

[16]. Podhraški, M., and Trontelj, J., 2016, A differential monolithically integrated inductive linear displacement measurement microsystem, *Sensors*, 16(3), 384.

[17]. Wang, B., Long, J., and Teo, K. H., 2016, Multi-channel capacitive sensor arrays. *Sensors*, 16(2), 150.

[18]. <https://www.geokon.com/>, [Ziyaret Tarihi: 5 Temmuz 2022].

[19]. <https://artigeoteknik.com.tr/>, [Ziyaret Tarihi: 5 Temmuz 2022].

[20]. Yoder, N. C., and Adams, D. E., 2014, Commonly used sensors for civil infrastructures and their associated algorithms, In: *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*, pp. 57-85, Woodhead Publishing.

[21]. Fraden, J., 2010, Position, displacement, and level, In: *Handbook of Modern Sensors*, pp. 279-326, Springer, New York, NY.

[22]. Zhang, P., 2008, Industrial control technology: a handbook for engineers and researchers, William Andrew.

[23]. Zheng, Y., Yu, J., Zhu, Z. W., Zeng, B., and Yang, C., 2021, Design, sensing principle and testing of a novel fiber optic displacement sensor based on linear macro-bending loss, *Optik*, 242, 167194.

[24]. Koch, A., and Ulrich, R., 1990, Fiber-optic displacement sensor with 0.02 μm resolution by white-light interferometry, *Sensors and Actuators A: Physical*, 25(1-3), 201-207.

[25]. López-Higuera, J. M., (Ed.), 2002, Handbook of optical fibre sensing technology, Wiley, ISBN: 978-0-471-82053-6.

[26]. Castellon-Urbe, J., 2012, Optical fiber sensors: an overview, IntechOpen.

[27]. Othonos, A., Kalli, K., and Kohnke, G. E., 2000, Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing, *Physics Today*, 53(5), 61.

[28]. López-Higuera, J. M., (Ed.), 2002, Handbook of optical fibre sensing technology. Wiley.

[29]. Culshaw, B., 2004, Optical fiber sensor technologies: opportunities and-perhaps-pitfalls, *Journal of lightwave technology*, 22(1), 39.

- [30]. Rai, V. K., 2007, Temperature sensors and optical sensors, *Applied Physics B*, 88(2), 297-303.
- [31]. Yin, S., Ruffin, P. B., and Yu, F. T. S., 2008, *Fiber Optic Sensors*, CRC, ISBN: 9780367387563.
- [32]. Udd, E., and Spillman Jr, W. B., (Eds.), 2011, *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*, John Wiley & Sons.
- [33]. Krohn, D. A., MacDougall, T., and Mendez, A., 2014, *Fiber optic sensors: fundamentals and applications*, pp. 233-310, Bellingham, WA: Spie Press.
- [34]. Habib, K., 1993, Model of holographic interferometry of anodic dissolution of metals in aqueous solution, *Optics and Lasers in Engineering*, 18(2), 115-120.
- [35]. Habib, K., 1995. Non-destructive evaluation of metallic electrodes under corrosion fatigue conditions by holographic interferometry, *Optics and Lasers in Engineering*, 23(1), 65-70.
- [36]. Dong, S., Liao, Y., and Tian, Q., 2005, Intensity-based optical fiber sensor for monitoring corrosion of aluminum alloys, *Applied optics*, 44(27), 5773-5777.
- [37]. Dong, S., Liao, Y., and Tian, Q., 2005, Sensing of corrosion on aluminum surfaces by use of metallic optical fiber, *Applied optics*, 44(30), 6334-6337.
- [38]. Castellon-Urbe, J., Cuevas-Arteaga, C., and Trujillo-Estrada, A., 2008, Corrosion monitoring of stainless steel 304L in lithium bromide aqueous solution using transmittance optical detection technique, *Optics and Lasers in Engineering*, 46(6), 469-476.
- [39]. Nalwa, H. S., (Ed.), 2000, *Handbook of advanced electronic and photonic materials and devices*, 10(1), Academic Press.
- [40]. Dalton, L. R., Harper, A. W., Ghosn, R., Steier, W. H., Ziari, M., Fetterman, H., and Shea, K. J., 1995, Synthesis and processing of improved organic second-order nonlinear optical materials for applications in photonics, *Chemistry of materials*, 7(6), 1060-1081.
- [41]. Yesodha, S. K., Pillai, C. K. S., and Tsutsumi, N., 2004, Stable polymeric materials for nonlinear optics: a review based on azobenzene systems, *Progress in Polymer Science*, 29(1), 45-74.
- [42]. Reynolds, J. R., and Skotheim, T. A., (Eds.), 2007, *Handbook of Conducting Polymers: Theory, Synthesis, Properties, and Characterization*, *Conjugated Polymers*, CRC Press.
- [43]. Agbor, N. E., Petty, M. C., and Monkman, A. P., 1995, Polyaniline thin films for gas sensing, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 28(3), 173-179.

- [44]. Brie, M., Turcu, R., Neamtu, C., and Pruneanu, S., 1996, The effect of initial conductivity and doping anions on gas sensitivity of conducting polypyrrole films to NH₃, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 37(3), 119-122.
- [45]. Koul, S., and Chandra, R., 2005, Mixed dopant conducting polyaniline reusable blend for the detection of aqueous ammonia, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 104(1), 57-67.
- [46]. Tang, C. W., and VanSlyke, S. A., 1987. Organic electroluminescent diodes, *Applied physics letters*, 51(12), 913-915.
- [47]. Adachi, C., Tokito, S., Tsutsui, T., and Saito, S., 1988, Electroluminescence in organic films with three-layer structure, *Japanese Journal of Applied Physics*, 27(2A), L269.
- [48]. Kraft, A., Grimsdale, A. C., and Holmes, A. B., 1998, Electroluminescent conjugated polymers—seeing polymers in a new light, *Angewandte Chemie International Edition*, 37(4), 402-428.
- [49]. Friend, R. H., Gymer, R. W., Holmes, A. B., Burroughes, J. H., Marks, R. N., Taliani, C. D. D. C., and Salaneck, W. R., 1999, Electroluminescence in conjugated polymers. *Nature*, 397(6715), 121-128.
- [50]. Akcelrud, L., 2003, Electroluminescent polymers, *Progress in Polymer Science*, 28(6), 875-962.
- [51]. Pei, Q., Yu, G., Zhang, C., Yang, Y., and Heeger, A. J., 1995, Polymer light-emitting electrochemical cells, *Science*, 269(5227), 1086-1088.
- [52]. Hide, F., Díaz-García, M. A., Schwartz, B. J., and Heeger, A. J., 1997, New developments in the photonic applications of conjugated polymers, *Accounts of Chemical Research*, 30(10), 430-436.
- [53]. Günes, S., Neugebauer, H., and Sariciftci, N. S., 2007, Conjugated polymer-based organic solar cells, *Chemical reviews*, 107(4), 1324-1338.
- [54]. Sirringhaus, H., 2005, Device physics of solution-processed organic field-effect transistors, *Advanced Materials*, 17(20), 2411-2425.
- [55]. McQuade, D. T., Pullen, A. E., and Swager, T. M., 2000, Conjugated polymer-based chemical sensors, *Chemical Reviews*, 100(7), 2537-2574.
- [56]. Pinto, M. R., and Schanze, K. S., 2002, Conjugated polyelectrolytes: Synthesis and applications, *Synthesis*, 2002(09), 1293-1309.
- [57]. Liu, B., and Bazan, G. C., 2004, Homogeneous fluorescence-based DNA detection with water-soluble conjugated polymers, *Chemistry of materials*, 16(23), 4467-4476.
- [58]. Achyuthan, K. E., Bergstedt, T. S., Chen, L., Jones, R. M., Kumaraswamy, S., Kushon, S. A., and Whitten, D. G., 2005, Fluorescence superquenching of conjugated

polyelectrolytes: applications for biosensing and drug discovery, *Journal of Materials Chemistry*, 15(27-28), 2648-2656.

[59]. Thomas, S. W., Joly, G. D., and Swager, T. M., 2007, Chemical sensors based on amplifying fluorescent conjugated polymers, *Chemical reviews*, 107(4), 1339-1386.

[60]. Castrellon-Urbe, J., Nicho, M. E., and Reyes-Merino, G., 2009, Remote optical detection of low concentrations of aqueous ammonia employing conductive polymers of polyaniline, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 141(1), 40-44.

[61]. Buffa, A., Perrone, G., and Vallan, A., 2008, A plastic optical fiber sensor for vibration measurements, In: 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1387-1391, IEEE.

[62]. Kumar, A. J., Gowri, N. M., Raju, R. V., Nirmala, G., Bellubbi, B. S., and Krishna, T. R., 2006, Study of fiber optic sugar sensor, *Pramana*, 67(2), 383-387.

[63]. Rajamani, A. S., Divagar, M., and Sai, V. V. R., 2019, Plastic fiber optic sensor for continuous liquid level monitoring, *Sensors and Actuators A: Physical*, 296, 192-199.

[64]. Vargas, S., Vazquez, C., Gonzalo, A. B., and Pena, J. M., 2004, A plastic fiber optic liquid level sensor, *In Second European Workshop on Optical Fibre Sensors 5502*, pp. 148-151), SPIE.

[65]. Batumalay, M., Harun, S. W., Irawati, N., Ahmad, H., and Arof, H., 2014, A study of relative humidity fiber-optic sensors, *IEEE Sensors Journal*, 15(3), 1945-1950.

[66]. Lee, S. T., Aneeshkumar, B., Radhakrishnan, P., Vallabhan, C. P. G., and Nampoore, V. P. N., 2002, A microbent fiber optic pH sensor, *Optics Communications*, 205(4-6), 253-256.

[67]. Zhou, Q., Kritz, D., Bonnell, L., and Sigel, G. H., 1989, Porous plastic optical fiber sensor for ammonia measurement, *Applied optics*, 28(11), 2022-2025.

[68]. Yhuwana, Y. Y., Apsari, R., and Yasin, M., 2017, Fiber optic sensor for heart rate detection, *Optik*, 134, 28-32.

[69]. Yoo, W. J., Jang, K. W., Seo, J. K., Heo, J. Y., Moon, J. S., Park, J. Y., and Lee, B. S., 2010, Development of respiration sensors using plastic optical fiber for respiratory monitoring inside MRI system, *Journal of the Optical Society of Korea*, 14(3), 235-239.

[70]. Günaydın, A. C., Hatipoğlu, A., ve Fidanboylu, K., 2019, Havacılık Sektöründe Fiber Optik Sensör Uygulamaları, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası X. Ulusal Uçak, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı*, 11-12 Ekim 2019 Eskişehir, 57-65

[71]. Saracoglu, O. G., and Hayber, S. E., 2016, Bent fiber sensor for preservative detection in milk, *Sensors*, 16(12), 2094.

- [72]. Arslan, A., Koçkar, M. K., ve Akgün, H., 2017, Heyelan Hareketlerinin Fiber Optik Sistemlerle İzlenmesi ve Değerlendirilmesi, *7. Uluslararası Katılımlı Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye.
- [73]. Tabaru, T. E., Hayber, S. E., Keser, S., and Saracoglu, O. G., 2019, Spectral analysis for photoacoustic pressure sensor designs: Theoretical model improvement and experimental validation, *Sensors and Actuators A: Physical*, 287, 76-83.
- [74]. Güçyetmez, M., Keser, S., and Hayber, Ş. E., 2022, Wind speed measurement with a low-cost polymer optical fiber anemometer based on Fresnel reflection, *Sensors and Actuators A: Physical*, 339, 113509.
- [75]. Hayber, Ş. E., Tabaru, T. E., and Güçyetmez, M., 2021, Evanescent Field Absorption-Based Fiber Optic Sensor for Detecting Power Transformer Oil Degradation, *Fiber and Integrated Optics*, 1-20.
- [76]. Zubia, J., and Arrue, J., 2001, Plastic optical fibers: An introduction to their technological processes and applications, *Optical fiber technology*, 7(2), 101-140.
- [77]. Qu, H., Brastaviceanu, T., Bergeron, F., Olesik, J., and Skorobogatiy, M., 2013, Micro-displacement sensors based on plastic photonic bandgap bragg fibers, In: *Optical Sensors*, pp. SM2D-5, Optical Society of America.
- [78]. Bilro, L., Alberto, N., Pinto, J. L., and Nogueira, R., 2012, Optical sensors based on plastic fibers. *Sensors*, 12(9), 12184-12207.
- [79]. Binu, S., and George, J., 2013, Displacement sensing with polymer fibre optic probe, *Frontiers in Sensors (FS)*, (1).
- [80]. Yang, H. Z., Qiao, X. G., Luo, D., Lim, K. S., Chong, W., and Harun, S. W., 2014, A review of recent developed and applications of plastic fiber optic displacement sensors, *Measurement*, 48, 333-345.
- [81]. Munap, D. H. A., Bidin, N., Islam, S., Abdullah, M., Marsin, F. M., and Yasin, M., 2015, Fiber optic displacement sensor for industrial applications, *IEEE Sensors Journal*, 15(9), 4882-4887.
- [82]. Shimamoto, A., and Tanaka, K., 1995, Optical fiber bundle displacement sensor using an ac-modulated light source with subnanometer resolution and low thermal drift, *Applied optics*, 34(25), 5854-5860.
- [83]. Abdullah, M., Bidin, N., Krishnan, G., Ahmad, M. F. S., and Yasin, M., 2015, Fiber optic radial displacement sensor-based a beam-through technique, *IEEE Sensors Journal*, 16(2), 306-311.
- [84]. Lin, C. S., and Chang, R. S., 1994, Fiber optic displacement sensors for the measurement of a vibrating object, *Precision engineering*, 16(4), 302-306.

- [85]. Lawson, C. M., and Tekippe, V. J., 1983, Fiber-optic diaphragm-curvature pressure transducer, *Optics letters*, 8(5), 286-288.
- [86]. Bailly-Salins, R., 1975, Plastic optical fiber displacement sensor for study of the dynamic response of a solid exposed to an intense pulsed electron beam, *Review of Scientific Instruments*, 46(7), 879-882.
- [87]. Cockshott, C. P., and Pacaud, S. J., 1989, Compensation of an optical fibre reflective sensor, *Sensors and Actuators*, 17(1-2), 167-171.
- [88]. Rahlves, M., Kelb, C., Reithmeier, E., and Roth, B., 2016, Methodology for the design, production, and test of plastic optical displacement sensors, *Advanced Optical Technologies*, 5(4), 325-334.
- [89]. Zhao, J., Bao, T., and Kundu, T., 2016, Wide range fiber displacement sensor based on bending loss, *Journal of Sensors*, 2016 (1), 4201870.
- [90]. Vallan, A., Casalicchio, M. L., Olivero, M., and Perrone, G., 2013, Two-dimensional displacement sensor based on plastic optical fibers, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(5), 1233-1240.
- [91]. Zubia, J., Aresti, O., Arrúe, J., and Lopez-Amo, M., 2000, Barrier sensor based on plastic optical fiber to determine the wind speed at a wind generator, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(5), 773-779.
- [92]. Kleiza, V., and Verkelis, J., 2011, Modified fiber optic system for monitoring the railgun rail deflections, *Acta Physica Polonica A*, 119(2), 271-273.
- [93]. Yhosep, G. Y. Y., Zaidan, A. H., and Wibowo, H., 2014, Gasoline level sensor based on displacement sensor using fiber coupler, *Measurement*, 58, 342-348.
- [94]. Castillo-Castaneda, E., 2003, On-line wear detection of milling tools using a displacement fiber optic sensor, *Journal of applied research and technology*, 1(2), 164-
- [95]. Zawawi, M. A., O'Keeffe, S., and Lewis, E., 2013, Plastic optical fibre sensor for spine bending monitoring with power fluctuation compensation, *Sensors*, 13(11), 14466-14483.
- [96]. Rahman, H. A., Rahim, H. R. A., Harun, S. W., Yasin, M., Apsari, R., Ahmad, H., and Abas, W. W., 2013, Detection of stain formation on teeth by oral antiseptic solution using fiber optic displacement sensor, *Optics & Laser Technology*, 45, 336-341.
- [97]. Rahman, H. A., Harun, S. W., Batumalay, M., Muttalib, F. A., and Ahmad, H., 2012, Fiber optic displacement sensor using multimode plastic fiber probe and tooth surface, *IEEE Sensors Journal*, 13(1), 294-298.
- [98]. Cook, R. O., and Hamm, C. W., 1979, Fiber optic lever displacement transducer, *Applied Optics*, 18(19), 3230-3241.

- [99]. Rossi, P., and Le Maou, F., 1989, New method for detecting cracks in concrete using fibre optics, *Materials and structures*, 22(6), 437-442.
- [100]. Ansari, F., and Navalurkar, R. K., 1993, Kinematics of crack formation in cementitious composites by fiber optics, *Journal of engineering mechanics*, 119(5), 1048-1061.
- [101]. Ohno, H., Naruse, H., Kihara, M., and Shimada, A., 2001, Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor, *Optical fiber technology*, 7(1), 45-64.
- [102]. Leung, C. K., Olson, N., Wan, K. T., and Meng, A., 2005, Theoretical modeling of signal loss versus crack opening for a novel crack sensor, *Journal of engineering mechanics*, 131(8), 777-790.
- [103]. Wan, K. T., and Leung, C. K., 2007, Applications of a distributed fiber optic crack sensor for concrete structures, *Sensors and Actuators A: Physical*, 135(2), 458-464.
- [104]. Yuan, L., Zhou, L., and Jin, W., 2004, Long-gauge length embedded fiber optic ultrasonic sensor for large-scale concrete structures, *Optics & Laser Technology*, 36(1), 11-17.
- [105]. Zhang, Z., and Ansari, F., 2006, Fiber-optic laser speckle-intensity crack sensor for embedment in concrete, *Sensors and Actuators A: Physical*, 126(1), 107-111.
- [106]. Kuang, K. S. C., Cantwell, W. J., and Thomas, C., 2003, Crack detection and vertical deflection monitoring in concrete beams using plastic optical fibre sensors, *Measurement Science and Technology*, 14(2), 205.
- [107]. Kuang, K. S. C., Quek, S. T., and Maalej, M., 2004, Assessment of an extrinsic polymer-based optical fibre sensor for structural health monitoring, *Measurement Science and Technology*, 15(10), 2133.
- [108]. Kuang, K. S. C., Tan, C. Y., Chew, S. H., and Quek, S. T., 2011, Monitoring of large strains in submerged geotextile tubes using plastic optical fibre sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 167(2), 338-346.
- [109]. Liehr, S., Lenke, P., Wendt, M., Krebber, K., Seeger, M., Thiele, E., and Munich, J. C., 2009, Polymer optical fiber sensors for distributed strain measurement and application in structural health monitoring, *IEEE Sensors Journal*, 9(11), 1330-1338.
- [110]. Liehr, S., Wendt, M., and Krebber, K., 2010, Distributed strain measurement in perfluorinated polymer optical fibres using optical frequency domain reflectometry, *Measurement Science and Technology*, 21(9), 094023.
- [111]. Liehr, S., Nöther, N., and Krebber, K., 2009, Incoherent optical frequency domain reflectometry and distributed strain detection in polymer optical fibers, *Measurement Science and Technology*, 21(1), 017001.

- [112]. James, S. W., 1999, An investigation of the tensile strength of fibre Bragg gratings. In *13th International Conference on Optical Fiber Sensors*, (3746), 374631, International Society for Optics and Photonics.
- [113]. Marcou, J., (Ed.), 1997, Plastic optical fibres: practical applications, J. Wiley.
- [114]. Weinert, A., 1999, Plastic optical fibers: principles, components, installation, *Publicis*.
- [115]. Zubia, J., and Arrue, J., 2001, Plastic optical fibers: An introduction to their technological processes and applications, *Optical fiber technology*, 7(2), 101-140.
- [116]. Husdi, I. R., Nakamura, K., and Ueha, S., 2004, Sensing characteristics of plastic optical fibres measured by optical time-domain reflectometry, *Measurement Science and Technology*, 15(8), 1553.
- [117]. Zhao, J., Bao, T., and Kundu, T., 2016, Wide range fiber displacement sensor based on bending loss, *Journal of Sensors*, 2016.
- [118]. Li, Y., Guan, K., Hu, Z., and Chen, Y., 2016, An optical fiber lateral displacement measurement method and experiments based on reflective grating panel, *Sensors*, 16(6), 808.
- [119]. Liu, J., Hou, Y., Zhang, H., Jia, P., Su, S., Fang, G., and Xiong, J., 2017, A wide-range displacement sensor based on plastic fiber macro-bend coupling, *Sensors*, 17(1), 196.
- [120]. Sastikumar, D., Gobi, G., and Renganathan, B., 2010, Determination of the thickness of a transparent plate using a reflective fiber optic displacement sensor, *Optics & Laser Technology*, 42(6), 911-917.
- [121]. Hayber, Ş. E., ve Tabaru, T. E., 2021, Milimetre Altı Ölçümler İçin Fiber Optik Yer Değiştirme Sensörü, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (24), 1-4.
- [122]. <https://www.multicominc.com/>, [Ziyaret Tarihi: 5 Temmuz 2022].
- [123]. <https://bidb.itu.edu.tr/>, [Ziyaret Tarihi: 5 Temmuz 2022].
- [124]. <https://www.leoni-fiber-optics.com/>, [Ziyaret Tarihi: 5 Temmuz 2022].
- [125]. Ükte, A., 2002, *Fiber optik kablo üretim tekniklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi.
- [126]. Pan, H., 2019, Introduction: Why Plastic Optical Fibers?, *Plastic Optical Fiber Sensors*, 1-20.
- [127]. Koike, Y., 2015, Fundamentals of plastic optical fibers, John Wiley & Sons.
- [128]. Özsoy, S., 2009, Fiber optik, Birsen Yayınevi.

- [129]. Türkmen, Ö., 2005, *Optik dalga kılavuzlarında propagasyon özelliklerinin incelenmesi ve optik kuplör ile optik sensör analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [130]. Yu, F. T. S., and Shizhuo, Y., 2002, *Fiber Optic Sensors*, Marcel Decker, Inc., Newyork.
- [131]. Santos, J. C., Almeida, J. C., and Silva, L. P., 2012, White light sensing systems for high voltage measuring using electro-optical modulators as sensor and recover interferometers, *INTECH Open Access Publisher*.
- [132]. Castrellon-Uribe, J., 2012, Optical fiber sensors: an overview, *IntechOpen*.
- [133]. Udd, E., (Ed.), 1995, *Fiber optic smart structures*, (12), Wiley-Interscience.
- [134]. <https://www.solidworks.com/>, [Ziyaret Tarihi: 5 Temmuz 2022].
- [135]. <https://twotrees3d.com/>, [Ziyaret Tarihi: 5 Temmuz 2022].
- [136]. Brounstein, Z., Yeager, C. M., and Labouriau, A., 2021, Development of Antimicrobial PLA Composites for Fused Filament Fabrication. *Polymers*, 13(4), 580.
- [137]. Royte, E., 2006, Corn Plastic to the Rescue? Wal-Mart and others are turning to packaging made from corn, touted as cheaper and greener than conventional plastics. But there is more to the story, *Smithsonian*, 37(5), 84.
- [138]. Avinc, O., and Khoddami, A., 2009, Overview of Poly (lactic acid)(PLA) Fibre, *Fibre Chemistry*, 41(6), 391-401.
- [139]. Sawyer, D. J., 2003, Bioprocessing—no longer a field of dreams. In *Macromolecular symposia*, 201(1), pp: 271-282, Weinheim: WILEY-VCH Verlag.
- [140]. Nofar, M., Sacligil, D., Carreau, P. J., Kamal, M. R., and Heuzey, M. C., 2019, Poly (lactic acid) blends: Processing, properties and applications, *International journal of biological macromolecules*, 125, 307-360.
- [141]. Scaffaro, R., Lopresti, F., Marino, A., and Nostro, A., 2018, Antimicrobial additives for poly (lactic acid) materials and their applications: Current state and perspectives, *Applied microbiology and biotechnology*, 102(18), 7739-7756.
- [142]. Wang, L., Gramlich, W. M., and Gardner, D. J., 2017, Improving the impact strength of Poly (lactic acid)(PLA) in fused layer modeling (FLM), *Polymer*, 114, 242-248.
- [143]. Thanki Paragkumar, N., Edith, D., and Jean-Luc, S., 2006, Surface characteristics of PLA and PLGA films, *Appl. Surf. Sci*, 253, 2758-2764.
- [144]. Karamanlioglu, M., Preziosi, R., and Robson, G. D., 2017, Abiotic and biotic environmental degradation of the bioplastic polymer poly (lactic acid): A review, *Polymer Degradation and stability*, 137, 122-130.

- [145]. Liu, J., Sun, L., Xu, W., Wang, Q., Yu, S., and Sun, J., 2019, Current advances and future perspectives of 3D printing natural-derived biopolymers, *Carbohydrate polymers*, 207, 297-316.
- [146]. Sedlarik, V., Saha, N., Sedlarikova, J., and Saha, P., 2008, Biodegradation of blown films based on poly (lactic acid) under natural conditions, In *Macromolecular symposia*, 272(1), pp. 100-103, Weinheim: WILEY-VCH Verlag.
- [147]. Harun, S. W., Yasin, M., Yang, H. Z., and Ahmad, H., 2010, Estimation of metal surface roughness using fiber optic displacement sensor, *Laser physics*, 20(4), 904-909.
- [148]. Gobi, G., Sastikumar, D., Ganesh, A. B., and Radhakrishnan, T., 2009, Fiber-optic sensor to estimate surface roughness of corroded metals, *Optica Applicata*, 39(1).
- [149]. Givens, M. P., 1958, Optical properties of metals, In *Solid State Physics*, (6), pp. 313-352, Academic Press.
- [150]. <https://i-fiberoptics.com/>, [Ziyaret Tarihi: 5 Temmuz 2022].
- [151]. <https://www.arduino.cc/>, [Ziyaret Tarihi: 5 Temmuz 2022].
- [152]. Lecler, S., and Meyrueis, P., 2012, Intrinsic optical fiber sensor, In *Fiber Optic Sensors*, IntechOpen.

EKLER

Ek 1. Denetleyici Devre İçin IDE Kodları

```
#include<RunningMedian.h>

RunningMedian samples1 = RunningMedian(10);
RunningMedian samples2 = RunningMedian(10);
RunningMedian samples3 = RunningMedian(10);

long count=0;

int a0=A0;
int a1=A1;
int a2=A2;

void setup() {
// put your setup code here, to run once:
Serial.begin(9600);
}

void loop() {
// put your main code here, to run repeatedly:
long x= analogRead(a0);
long y= analogRead(a1);
long z= analogRead(a2);

samples1.add(x);
samples2.add(y);
samples3.add(z);

x = samples1.getMedian();
y = samples2.getMedian();
z = samples3.getMedian();

Serial.println("3D YDA Konum Bilgisi:");
if(693<x && x<1024)
{
Serial.print("-x=15");
}
if(671<x && x<689)
{
Serial.print("-x=14");
}
if(640<x && x<658)
{
Serial.print("-x=13");
}
}
```



```
if(613<x && x<630)
{
Serial.print("-x=12");
}
if(590<x && x<607)
{
Serial.print("-x=11");
}
if(571<x && x<587)
{
Serial.print("-x=10");
}
if(553<x && x<569)
{
Serial.print("-x=9");
}
if(530<x && x<550)
{
Serial.print("-x=8");
}
if(503<x && x<518)
{
Serial.print("-x=7");
}
if(480<x && x<497)
{
Serial.print("-x=6");
}
if(461<x && x<478)
{
Serial.print("-x=5");
}
if(442<x && x<459)
{
Serial.print("-x=4");
}
if(413<x && x<429)
{
Serial.print("-x=3");
}
if(391<x && x<409)
{
Serial.print("-x=2");
}
if(384<x && x<400)
{
Serial.print("-x=1");
}
if(360<x && x<379)
{
```

```
Serial.print("x=0");
}
if(352<x && x<368)
{
Serial.print("+x=1");
}
if(331<x && x<349)
{
Serial.print("+x=2");
}
if(323<x && x<340)
{
Serial.print("+x=3");
}
if(293<x && x<307)
{
Serial.print("+x=4");
}
if(261<x && x<280)
{
Serial.print("+x=5");
}
if(242<x && x<258)
{
Serial.print("+x=6");
}
if(209<x && x<229)
{
Serial.print("+x=7");
}
if(193<x && x<207)
{
Serial.print("+x=8");
}
if(162<x && x<178)
{
Serial.print("+x=9");
}
if(153<x && x<169)
{
Serial.print("+x=10");
}
if(120<x && x<138)
{
Serial.print("+x=11");
}
if(92<x && x<110)
{
Serial.print("+x=12");
}
```

```
if(82<x && x<99)
{
Serial.print("+x=13");
}
if(63<x && x<77)
{
Serial.print("+x=14");
}
if(0<x && x<57)
{
Serial.print("+x=15");
}
```

```
Serial.println("");
```

```
if(693<y && y<1024)
{
Serial.print("-y=15");
}
if(671<y && y<689)
{
Serial.print("-y=14");
}
if(640<y && y<658)
{
Serial.print("-y=13");
}
if(613<y && y<630)
{
Serial.print("-y=12");
}
if(590<y && y<607)
{
Serial.print("-y=11");
}
if(571<y && y<587)
{
Serial.print("-y=10");
}
if(553<y && y<569)
{
Serial.print("-y=9");
}
if(530<y && y<550)
{
Serial.print("-y=8");
}
if(503<y && y<518)
{
Serial.print("-y=7");
```

```
}
if(480<y && y<497)
{
Serial.print("-y=6");
}
if(461<y && y<478)
{
Serial.print("-y=5");
}
if(442<y && y<459)
{
Serial.print("-y=4");
}
if(413<y && y<429)
{
Serial.print("-y=3");
}
if(391<y && y<409)
{
Serial.print("-y=2");
}
if(384<y && y<400)
{
Serial.print("-y=1");
}
if(360<y && y<379)
{
Serial.print("y=0");
}
if(352<y && y<368)
{
Serial.print("+y=1");
}
if(331<y && y<349)
{
Serial.print("+y=2");
}
if(323<y && y<340)
{
Serial.print("+y=3");
}
if(293<y && y<307)
{
Serial.print("+y=4");
}
if(261<y && y<280)
{
Serial.print("+y=5");
}
if(242<y && y<258)
```

```

{
Serial.print("+y=6");
}
if(209<y && y<229)
{
Serial.print("+y=7");
}
if(193<y && y<207)
{
Serial.print("+y=8");
}
if(162<y && y<178)
{
Serial.print("+y=9");
}
if(153<y && y<169)
{
Serial.print("+y=10");
}
if(120<y && y<138)
{
Serial.print("+y=11");
}
if(92<y && y<110)
{
Serial.print("+y=12");
}
if(82<y && y<99)
{
Serial.print("+y=13");
}
if(63<y && y<77)
{
Serial.print("+y=14");
}
if(0<y && y<57)
{
Serial.print("+y=15");
}

Serial.println("");

if(693<z && z<1024)
{
Serial.print("-z=15");
}
if(671<z && z<689)
{
Serial.print("-z=14");
}

```

```
}
if(640<z && z<658)
{
Serial.print("-z=13");
}
if(613<z && z<630)
{
Serial.print("-z=12");
}
if(590<z && z<607)
{
Serial.print("-z=11");
}
if(571<z && z<587)
{
Serial.print("-z=10");
}
if(553<z && z<569)
{
Serial.print("-z=9");
}
if(530<z && z<550)
{
Serial.print("-z=8");
}
if(503<z && z<518)
{
Serial.print("-z=7");
}
if(480<z && z<497)
{
Serial.print("-z=6");
}
if(461<z && z<478)
{
Serial.print("-z=5");
}
if(442<z && z<459)
{
Serial.print("-z=4");
}
if(413<z && z<429)
{
Serial.print("-z=3");
}
if(391<z && z<409)
{
Serial.print("-z=2");
}
if(384<z && z<400)
```

```
{
Serial.print("-z=1");
}
if(360<z && z<379)
{
Serial.print("z=0");
}
if(352<z && z<368)
{
Serial.print("+z=1");
}
if(331<z && z<349)
{
Serial.print("+z=2");
}
if(323<z && z<340)
{
Serial.print("+z=3");
}
if(293<z && z<307)
{
Serial.print("+z=4");
}
if(261<z && z<280)
{
Serial.print("+z=5");
}
if(242<z && z<258)
{
Serial.print("+z=6");
}
if(209<z && z<229)
{
Serial.print("+z=7");
}
if(193<z && z<207)
{
Serial.print("+z=8");
}
if(162<z && z<178)
{
Serial.print("+z=9");
}
if(153<z && z<169)
{
Serial.print("+z=10");
}
if(120<z && z<138)
{
Serial.print("+z=11");
}
```

```
}
if(92<z && z<110)
{
Serial.print("+z=12");
}
if(82<z && z<99)
{
Serial.print("+z=13");
}
if(63<z && z<77)
{
Serial.print("+z=14");
}
if(0<z && z<57)
{
Serial.print("+z=15");
}

Serial.println("");
Serial.println("");

delay(300);
}
```


ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Yunus GÖRKEM
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Gazi Üniversitesi
Fakülte	Teknik Eğitim Fakültesi
Bölümü	Elektrik Öğretmenliği
Mezuniyet Yılı	2012

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Fırat Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2020

Yüksek Lisans	
Üniversite	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	İleri Teknolojiler
Programı	Tezli Yüksek Lisans
Mezuniyet Tarihi	

Makale ve Bildiriler	
Görkem Y., Hayber Ş. E., “Fiber Optic Three-Dimensional Displacement Sensor,” 4. International Sciences and Innovation Congress, Ankara, Turkey, February 19-20, 2022.	
Görkem Y., Hayber Ş. E., “Fiber Optic Surface Recognition Sensor,” 13th International Scientific Research Congress Science and Engineering, Ankara, Turkey, March 11-12, 2022.	

Projeler ve Bilimsel Faaliyetler	
“Fiber Optik Üç Boyutlu Hareket Algılayıcı Sensör Geliştirilmesi.” Bilimsel Araştırma Projesi, Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir, Proje No: MMF.A4.22.009, 21.04.2022- devam ediyor, Araştırmacı.	
Verimlilik ve Teknoloji Fuarı, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesinin Teknoloji Transfer Ofisi adına katılım sağlanması. 18 – 21 Mayıs 2022, Ankara, ATO Congressium Fuar ve Kongre Merkezi.	