



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KISMİ BOŞALMA İŞARETLERİNİN OPTİK FİBERLİ
SENSÖRLERLE ALGILANMA YÖNTEMLERİNİN
ANALİZİ VE BİR SENSÖR TASARIMI**

İREM ÖZEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

BURSA 2010



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KISMİ BOŞALMA İŞARETLERİNİN OPTİK FİBERLİ
SENSÖRLERLE ALGILANMA YÖNTEMLERİNİN
ANALİZİ VE BİR SENSÖR TASARIMI**

İREM ÖZEN

**Prof. Dr. Güneş YILMAZ
(Danışman)**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

BURSA 2010

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

**KISMİ BOŞALMA İŞARETLERİNİN OPTİK FİBERLİ
SENSÖRLERLE ALGILANMA YÖNTEMLERİNİN
ANALİZİ VE BİR SENSÖR TASARIMI**

İREM ÖZEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu Tez 28/10/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Güneş YILMAZ Yrd.Doç.Dr.Sait Eser Karlık Yrd.Doç.Dr.Erhan Pulat
(Danışman)

ÖZET

Kısmi boşalma, elektriksel yalıtım problemlerinin başlangıcının önemli bir belirtisidir. Yoğun elektrik alan etkisinde kalan yalıtkan malzemelerde oluşan kısmi boşalmaların algılanması, ölçülebilir elektriksel ve akustik karakteristikleri temel alır. Akustik algılama yöntemlerinde, kısmi boşalmanın algılanmasının yanı sıra, yerinin de belirlenmesi mümkündür. Bu nedenle akustik algılama sistemleri, elektriksel izleme sistemlerine göre daha çok tercih edilmektedir. Bu çalışmada yüksek gerilim ekipmanlarında meydana gelen kısmi boşalmaların algılanma yöntemleri üzerinde durulmuştur. Akustik algılama yöntemine göre çalışan, optik fiberli sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, kısmi boşalma algılamasının teknik detayları ve sensör kafasının genel yapısı üzerinde durulmuştur. Akustik algılamada kullanılan sensör membranının yüzey uzunluğu, kalınlığı ve malzemesinin sensör duyarlılığı üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Kısmi boşalma nedeniyle yalıtım yağında meydana gelen akustik basıncın membranda oluşturduğu çökme miktarı kısmi boşalmanın değeri hakkında bilgi vermektedir. ANSYS benzetim ortamında belirlenen parametreler ile membran analizi yapılarak membranın çökme değerleri elde edilmiş ve doğrusalılığı incelenmiştir. Çalışma kapsamında kısmi boşalmanın algılanması ve yerinin belirlenmesinde kullanılan optik fiberli algılayıcıların gereksinimleri incelenmiştir. Tasarımı yapılan Fabry-Perot interferometrik sensöründe bu gereksinimler göz önünde bulundurulmuştur.

Sensördeki Fabry-Perot boşluğunun görünürlük ve optik yoğunluk ile ilişkisi incelenmiştir. Tasarımı yapılan sensör transformatör yağına daldırılarak kullanılacağı için, sensörün 0.1 m, 1 m ve 2 m derinliklerde konumlandırılacağı düşünülerek yağ basıncı hesaplanmış; analizler bu basınç değerleri de ilave edilerek tekrarlanmıştır. 0.1 m derinlikte konumlandırılan sensör membranında meydana gelen çökmenin dahi sensörün doğrusal bölgenin dışında çalışmasına neden olduğu görülmüştür. Bu nedenle sensörde hava deliği açılarak yağ basıncına eşit bir basınç uygulanması sağlanmıştır. Böylelikle yağ basıncının etkisi ortadan kaldırılmıştır.

Sensörü doğrusal bölge içerisinde tutarak duyarlılığını arttıracak şekilde yeniden tasarım yapılmış, gerçekleştirilen analiz sonuçları ile teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Optik Fiber, Kısmi Boşalma, Akustik Algılama, Fabry-Perot

ABSTRACT

Partial discharge is an important indication of electrical insulation problems. Detection of partial discharges that take place in dielectric materials influenced heavily by dense electrical fields uses measurable electrical and acoustic characteristics as a base. In acoustic detection methods, detection of partial discharge can be achieved and its location can be found. Therefore, acoustic detection is preferred over electrical detection. In this study, detection methods of partial discharges occurring in high voltage devices are analyzed. Optical fiber sensor design according to acoustic detection method has been realized because of its advantages compared to other detection methods.

In this thesis, technical details of partial discharge detection and sensor head are emphasized and effects of surface length, thickness and material of the sensor membrane used in acoustic detection on sensor sensitivity are discussed. Deflection of the membrane by the acoustic pressure caused by the partial discharge in the transformer oil is used in obtaining the partial discharge. Using ANSYS simulation for analyzing membrane with predefined parameters, deflection values of membrane acquired and their linearities are analyzed. Requirements for optical fiber sensors used in detection of partial discharge and determining its location are also discussed. These requirements are taken into account in the design of the Fabry-Perot interferometric sensor.

Correlation of the Fabry-Perot cavity in the sensor with visibility and optical intensity are examined. Since the sensor to be designed is going to be used by being immersed into transformer oil, considering the fact that the sensor will be located 0.1 m, 1 m and 2 m. deep, oil pressure is calculated and analyses are iterated by using these values. It is observed that even the membrane deflection of the sensor immersed 0.1 m deep in the transformer oil causes the sensor to run outside the linear region. Therefore, by opening an air hole in the sensor, application of a pressure equal to the oil pressure is achieved so that effect of the oil pressure is suppressed.

By keeping the sensor within the linear region, a re-design has been carried out so as to increase the sensitivity. Analysis results that are obtained are compared with theoretical results.

Key Words: Optical Fiber, Partial Discharge, Acoustic Detection, Fabry-Perot

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. KISMİ BOŞALMA	16
3.1. Kısmi Boşalma Mekanizması	16
3.2. Kısmi Boşalma Oluşumu	17
3.2.1. Alternatif Gerilimde Kısmi Boşalmaların Oluşumu	17
3.2.2. Doğru Gerilimde Kısmi Boşalmaların Oluşumu	18
3.3. Sıvı Yalıtkanlarda Kısmi Boşalmanın Oluşum Nedenleri	19
3.3.1. Nem	19
3.3.2. Yabancı Maddeler	19
3.3.3. Gaz Kabarcıkları ve Hava Boşlukları	20
3.4. Kısmi Boşalma Ölçüm Yöntemleri	20
3.4.1. Kimyasal Algılama	21
3.4.2. Elektriksel Algılama	22
3.4.3. Akustik Algılama	23

3.5. Akustik Algılamaların Sınıflandırılması	23
3.5.1. Harici Algılama	24
3.5.2. Dahili Algılama	25
4. OPTİK FİBERLİ ALGILAYICILAR	27
4.1. Optik Fiberli Algılayıcıların Sınıflandırılması	27
4.1.1. Dıştan Etkileşimli Algılayıcılar	27
4.1.1. İçten Etkileşimli Algılayıcılar	28
4.2. Optik Fiberli İnterferometrik Algılayıcıların Sınıflandırılması	29
4.2.1. Sagnac İnterferometresi	29
4.2.2. Mach-Zehnder İnterferometresi	30
4.2.3. Michelson İnterferometresi	31
4.2.4. Fabry-Perot İnterferometresi	32
5. SENSÖR TASARIMI	34
5.1. Elektriksel Boşalma İşaretinin Akustik Spektrumu	34
5.2. Akustik Dalga Yayılımının Özellikleri	36
5.2.1. Karakteristik Empedans	36
5.2.2. Yansıma Katsayısı	37
5.2.3. Zayıflama	37
5.2.4. Kırınım	38
5.2.5. Kırılma	39
5.3. Optik Fiberli İnterferometrik Akustik Sensörün Çalışma Presibi	39
5.3.1. Fabry Perot İnterferometresi	41
5.3.2. Fiber Fabry-Perot Sensör Konfigürasyonları	42
5.3.2.1. Dahili Fiber Fabry-Perot İnterferometrik Sensörleri	42
5.3.2.2. Harici Fiber Fabry-Perot İnterferometrik Sensörleri	44
5.3.3. Fabry-Perot İnterferometresi Tabanlı Basınç Ölçüm Sistemleri	45
5.4. Kısmi Boşalmanın Algılanması ve Yerinin Belirlenmesinde Kullanılan Optik Fiberli Algılayıcıların Gereksinimleri	47
5.4.1. Yalıtkan Yapı ve Yüksek Yalıtım Dayanımı	47
5.4.2. Frekans Aralığı	48
5.4.3. Duyarlılık	48
5.4.4. Yönlülük	49
5.5. Optik Fiberli Sistem Tasarımı	50

5.6. Optik Fiberli Sensör Tasarımı	51
5.7. Optik Fiberli Sensör Membran Tasarım Parametreleri	52
5.7.1. Frekans Cevabının Membran Tasarımına Etkisi	54
5.7.2. Malzeme Seçiminin Membran Tasarımına Etkisi	57
5.7.3. Duyarlılığın Membran Tasarımına Etkisi	58
5.8. Optik Fiberli Sensör Membran Tasarımı ve Benzetim Sonuçları	63
5.9. Optik Fiberli Sensör Fabry-Perot Boşluğunun Tasarımı	67
5.9.1. Fabry Perot İnterferometresi ve Sensör Yansıma Ortamları	67
5.9.2. Fabry-Perot Boşluğu ile Görünürlük İlişkisi	72
5.9.3. Fabry-Perot Boşluğu ile Optik Yoğunluk İlişkisi	75
5.10. Optik Fiberli Kısmi Boşalma Sensörünün Tasarımı	77
5.11. Optik Fiberli Kısmi Boşalma Sensörüne Etki Eden Sıvı Basıncı	80
5.12. Optik Fiberli Kısmi Boşalma Sensöründe Sıvı Basıncı ve Kısmi Boşalmanın Membrana Ortak Etkisi	82
5.13. Optik Fiberli Kısmi Boşalma Sensöründe Sıvı Basıncı Etkisinin Ortadan Kaldırılması	88
5.14. Yeni Tasarlanan Optik Fiberli Sensör İçin Fabry-Perot Boşluğunun Değişimi	89
5.15. Sensör Duyarlılığının Arttırılması	93
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	95
KAYNAKLAR	100
EKLER	106
TEŞEKKÜR	108
ÖZGEÇMİŞ	109

KISALTMALAR DİZİNİ

AE	Akustik-Elektrik
AO	Akusto-Optik
EFP	Harici Fabry-Perot
EFPI	Harici Fabry-Perot İnterferometresi
FBG	Fiber Bragg Izgarası
FP	Fabry-Perot
FFPI	Fiber Fabry-Perot İnterferometresi
LED	Işık Yayan Diyot
MEMS	Mikro-Elektro Mekanik Sistem
PET	Polietilen Tereftalat
PZT	Kurşun Zirkonyum Titanat

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yayılım Zamanı Sıcaklık Eğrisi	3
Şekil 2.2. Baryum Titanat Silindirik Dönüştürücünün Frekans Cevabı	4
Şekil 2.3. Manyetik Çekirdek Gürültüsü Frekans Spektrumu	7
Şekil 2.4. Kısmi Boşalma Frekans Spektrumu	7
Şekil 2.5. Transformator Tankı ve Köşelerine Yerleştirilmiş Dört Algılayıcı	10
Şekil 2.6. Hava Boşluk Mesafesine Göre Çıkış Yoğunluğunun Değişimi	13
Şekil 2.7. Enerji-Frekans Değişimi	14
Şekil 2.8. 25°C ve 40°C Sıcaklıklarındaki Enerji-Frekans Değişimi	14
Şekil 3.1. Boşluk İçeren Bir Yalıtkanın Elektriksel Eşdeğer Devresi	17
Şekil 3.2. Kısmi Boşalma Gerilim Diyagramı	17
Şekil 3.3. Kısmi Boşalma Ölçüm Yöntemleri	21
Şekil 3.4. FP İnterferometresi Tabanlı Akusto Optik Sistemin Genel Yapısı	26
Şekil 4.1. Dıştan Etkileşimli Algılayıcı Genel Şeması	28
Şekil 4.2. İçten Etkileşimli Algılayıcı Genel Şeması	28
Şekil 4.3. Sagnac İnterferometresinin Şematik Gösterimi	30
Şekil 4.4. Serbest Boşluk Yapılı Mach-Zehnder İnterferometresinin Şematik Gösterimi	30
Şekil 4.5. Optik Fiber Tabanlı Mach-Zehnder İnterferometresinin Şematik Gösterimi	31
Şekil 4.6. Serbest Boşluk Yapılı Michelson İnterferometresinin Şematik Gösterimi	31
Şekil 4.7. Optik Fiber Tabanlı Michelson İnterferometresinin Şematik Gösterimi	32
Şekil 4.8. Fabry-Perot İnterferometresinin Şematik Gösterimi	33
Şekil 5.1. Optik Fiberli Sensör Tarafından Algılanan Tipik Kısmi Boşalma Akustik Sinyali	35
Şekil 5.2. P_i , P_r ve P_t Sırasıyla Gelen, Yansıyan ve İletilen Güç Olmak Üzere Fabry-Perot İnterferometresi	41
Şekil 5.3. Dahili Fabry-Perot İnterferometreleri	43
Şekil 5.4. Harici Fabry Perot Sensör Konfigürasyonları	45

Şekil 5.5. Basınç Algılama için Geliştirilmiş Fabry-Perot İnterferometresi Tabanlı Sensör Kafası	46
Şekil 5.6. Dört Köşesine Algılayıcı Yerleştirilmiş Transformatör Tankı	49
Şekil 5.7. Kısmi Boşalma Algılama Sistemlerinin Genel Yapısı	50
Şekil 5.8. FP İnterferometresi Tabanlı Akusto Optik Sistemin Genel Yapısı	51
Şekil 5.9. Optik Fiberli Sensör Kafasının Genel Yapısı	52
Şekil 5.10. Membran Parametreleri	53
Şekil 5.11. Doğruluk Faktörü Olmadan Rezonans Frekansı - Diyafram Kalınlığı Değişimi	56
Şekil 5.12. Doğruluk Faktörü Olduğunda Rezonans Frekansı - Diyafram Kalınlığı Değişimi	56
Şekil 5.13. Silikon Membranın Kalınlık - Duyarlılık Değişimi	59
Şekil 5.14. Silikon Membranın Yarım Yüzey Uzunluğu - Duyarlılık Değişimi	60
Şekil 5.15. Silika Membranın Kalınlık - Duyarlılık Değişimi	61
Şekil 5.16. Silika Membranın Yarım Yüzey Uzunluğu - Duyarlılık Değişimi	62
Şekil 5.17. 1 Pa Basınçta Silikadan Yapılmış Membranın Çökme Analizi	64
Şekil 5.18. 1 Pa Basınçta Silikondan Yapılmış Membranın Çökme Analizi	64
Şekil 5.19. 100 Pa Basınçta Silikadan Yapılmış Membranın Çökme Analizi.	65
Şekil 5.20. 100 Pa Basınçta Silikondan Yapılmış Membranın Çökme Analizi	66
Şekil 5.21. İki Paralel Ayna Arasındaki Işığın Çoklu Yansıma Yolları	67
Şekil 5.22. İki Ardışık Işın Arasındaki Geometrik Yolun Gösterimi	68
Şekil 5.23. Kayıpsız FPI'nın R_{FP} Yansımasının Gidiş Geliş Faz Kaymasına Bağlılığı	70
Şekil 5.24. Kısmi Boşalma Optik Fiberli Akustik Sensöründeki Yansımaları	71
Şekil 5.25. Optik Fiberli Sensördeki Yansıma Ortamları	71
Şekil 5.26. Fabry-Perot Boşluğu ile Görünürlüğün Değişimi (0-7000 μm)	73
Şekil 5.27. Fabry-Perot Boşluğu ile Görünürlüğün Değişimi (0-500 μm)	73
Şekil 5.28. Fabry-Perot Boşluğu ile Görünürlüğün Değişimi (0-150 μm)	74
Şekil 5.29. Dalgaboyuna Göre Normalize Optik Güç ile F-P Boşluğu Değişimi	75
Şekil 5.30. Normalize Optik Güç ile F-P Boşluğu Değişimi	77
Şekil 5.31. Optik Fiberli Akustik Sensörün Yan Görünüşü	78
Şekil 5.32. Optik Fiberli Akustik Sensörün İzometrik Görünüşü	78

Şekil 5.33. Optik Fiberli Akustik Sensörün Transformatör Tankında Konumlandırılması	79
Şekil 5.34. Optik Fiberli Akustik Sensörün Transformatör Tankının Üstünde Konumlandırılması	81
Şekil 5.35. Optik Fiberli Akustik Sensörün Transformatör Tankının Ortasında Konumlandırılması	81
Şekil 5.36. Optik Fiberli Akustik Sensörün Transformatör Tankının Altında Konumlandırılması	82
Şekil 5.37. 1 Pa Basınçta Silikadan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri	83
Şekil 5.38. 100 Pa Basınçta Silikadan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri	83
Şekil 5.39. 933 Pa Basınçta Silikadan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri	84
Şekil 5.40. 8.84 kPa Basınçta Silikadan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri	84
Şekil 5.41. 16.78 kPa Basınçta Silikadan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri	85
Şekil 5.42. 1 Pa Basınçta Silikondan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri	86
Şekil 5.43. 100 Pa Basınçta Silikondan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri	86
Şekil 5.44. 933 Pa Basınçta Silikondan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri	86
Şekil 5.45. 8.44 kPa Basınçta Silikondan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri	87
Şekil 5.46. 16.78 kPa Basınçta Silikondan Yapılmış Membrandaki Çökme	87
Şekil 5.47. Kanal Açılmış Optik Fiberli Akustik Sensörün Ön Görünüşü	88
Şekil 5.48. Yeni Tasarlanan Optik Fiberli Sensördeki Yansıma Ortamları	90
Şekil 5.49. Fabry-Perot Boşluğu ile Görünürlüğün Değişimi (0-7000 μm)	92
Şekil 5.50. Fabry-Perot Boşluğu ile Görünürlüğün Değişimi (0-1000 μm)	92
Şekil 5.51. 0.2 – 5 Pa Aralığında Çalışan Sensör İçin Membran Kalınlığının Azaltılması	94
Şekil 5.52. 0.2 – 5 Pa Aralığında Çalışan Sensör İçin Membran Yarıçapının Arttırılması	94

SİMGELER DİZİNİ

g	Yerçekimi ivmesi
ρ	Özgül ağırlık
α	Titreşim modu
β	Doğruluk faktörü
f_n	Rezonans frekansı
f_c	Merkez frekansı
S	Duyarlılık
ϕ	Faz farkı
c	Işık Hızı
R	Yansıma katsayısı
θ	Geliş açısı
L	Yansıma yüzeyleri arasındaki mesafe
n	Kırılma indisi
λ	Dalgaboyu
R_{FP}	Fabry-Perot yansıma ifadesi
T_{FP}	Fabry-Perot iletim ifadesi
I	Optik yoğunluk
I_0	Lazer kaynağının gücü
V	Görünürlük
y_0	Maksimum çökme
μ	Poisson oranı
P	Basınç
a	Fiber çekirdeğinin çapı
E	Elastisite modülü
h	Kalınlık

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Kısmi Boşalma Ölçüm Metotlarının Karşılaştırılması	25
Çizelge 5.1. Silikon ve Silikanın Mekanik Özellikleri	58
Çizelge 5.2. Silikon Membranın Kalınlık - Duyarlılık Değerleri	59
Çizelge 5.3. Silikon Membranın Yarım Yüzey Uzunluğu - Duyarlılık Değerleri	60
Çizelge 5.4. Silika Membranın Kalınlık - Duyarlılık Değerleri	61
Çizelge 5.5. Silika Membranın Yarım Yüzey Uzunluğu - Duyarlılık Değerleri	62

1. GİRİŞ

19. yüzyılın sonlarında elektrik enerjisinin taşınmasına başlanmış ancak gerilimin yüksek olmamasından kaynaklanan gerilim düşümü ve güç kaybı nedeniyle iletim kısa mesafelere yapılmıştır. Günümüzde elektrik enerjisinin iletiminin ve dağıtımının ekonomik kısıtlar nedeniyle yüksek gerilim kullanılarak gerçekleştirilmesi bu alanda yapılan çalışmalara hız vermiştir.

Enerji iletimi ve dağıtımının gelişmesinde en önemli adım, transformatörün bulunuşu olmuş, bu sayede transformatörler yüksek gerilim sistemlerinin en önemli elemanı haline gelmiştir. Ancak transformatörler zamanla mekanik ve elektriksel gerilmelere maruz kalmakta ve bunun bir sonucu olarak transformatör içerisindeki malzemeler zarar görmektedir. Eğer hasar araştırılmaz, algılanmaz ve doğrulanmazsa, hatalar transformatörün normal parametrelerinin dışında çalışmasına neden olabilmektedir. Bu da çok büyük hataların oluşmasıyla sonuçlanır. İşte bu nedenle yüksek gerilim elemanlarında karşılaşılan en önemli problemlerden birinin yalıtım zorluğu ve yalıtım malzemelerindeki bozulmalar olduğu söylenebilir. Yalıtım hataları en çok yalıtım sistemi içerisindeki boşluklardaki elektriksel boşalmalar olarak tanımlanan kısmi boşalmalar nedeniyle oluşmaktadır.

Yalıtım malzemelerinin üretimi esnasında içerisinde nem, hava kabarcıkları, yabancı maddeler gibi nedenlerle farklı büyüklüklerde boşlukların kalması kaçınılmazdır. Elektriksel alan yoğunluğunun yalıtım malzemeleri içerisinde bulunan bu boşlukların sınırlarında artması nedeniyle akımın kısa süreli serbest kalması kısmi boşalma olarak tanımlanır.

Kısmi boşalmanın algılanmasının ana yöntemleri ölçülebilir elektriksel ve akustik karakteristikleri temel almaktır. Akustik algılama yöntemlerinde, kısmi boşalmanın algılanmasının yanı sıra kısmi boşalmanın yerinin de belirlenmesi mümkündür ki bu da bakım süresini kısaltma açısından önemlidir. Bu nedenle akustik algılama sistemleri, elektriksel izleme sistemlerine göre daha çok tercih edilmektedir.

Yaygın akustik kısmi boşalma ölçüm sistemlerindeki problem akustik sensörün transformatör tankının dışarısında konumlandırılmasından kaynaklanmaktadır. Kısmi boşalma kaynağı ile akustik algılayıcı arasındaki yolun transformatör tankını da içermesi, sistemin doğru çalışmasını sınırlandırmaktadır. Çünkü transformatör tankında ve mineral yağ içerisinde ilerleyen akustik dalgaların hızları birbirinden farklıdır. Bunun için, transformatör fonksiyonlarını değiştirmeden veya kısıtlamadan transformatör tankı içerisinde çalışan bir algılayıcı tasarlamak çok büyük bir avantaj sağlayacaktır. Bu konu ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. (Wang 2005, Lazarevich 2003, Abeysinghe ve ark. 2001)

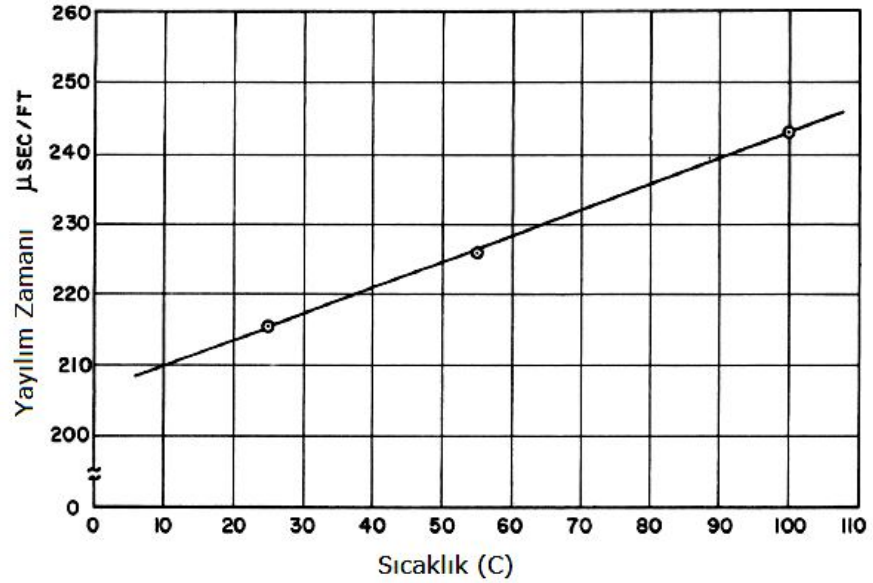
Çalışmanın amacı, başta yüksek gerilim transformatörleri olmak üzere yüksek gerilim elemanlarında meydana gelen kısmi boşalma sinyallerinin algılanma yöntemlerini karşılaştırmak, bu bilgiler ışığında yağ yalıtımlı yüksek gerilim transformatörlerinde kısmi boşalmanın algılanmasında kullanılacak optik fiberli akustik sensör tasarımını gerçekleştirmektir.

2. bölüm bu güne kadar yapılan kısmi boşalma algılama çalışmaları hakkında genel bilgi vermektedir. 3. bölümde kısmi boşalma temelleri ve farklı algılama teknikleri tanımlanmış ve avantajları nedeniyle kısmi boşalmanın akustik algılanması üzerinde durulmuştur. Optik fiberli algılayıcılar, çeşitleri ve çalışma prensipleri 4. bölümde açıklanmıştır. 5. bölüm; kısmi boşalmanın algılanması ve yerinin belirlenmesi için tasarlanan optik fiberli algılayıcıların gereksinimlerini, çalışma prensibini ve tasarımını içermektedir. Konu ile ilgili yapılmış benzetim sonuçlarına da bu bölümde yer verilmiştir. Bölüm 6'da, çalışmada elde edilen sonuçlar ile ilgili değerlendirmelerde bulunmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu güne kadar, kısmi boşalma algılama yöntemlerinin teorik ve deneysel temellerini geliştiren çok sayıda makale yayınlanmış, tez çalışması yapılmıştır.

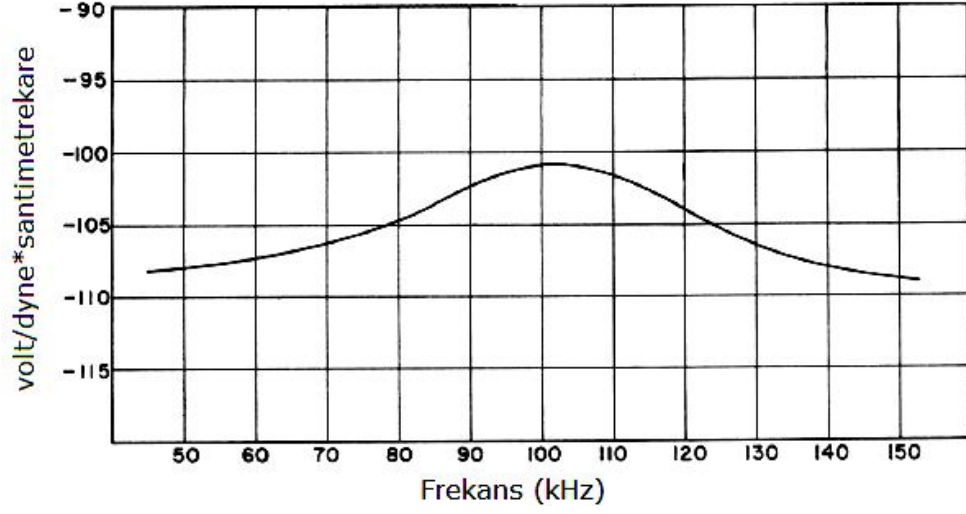
Kısmi boşalmanın yerinin ve şiddetinin belirlenmesi ile ilgili olarak yapılan ilk çalışmalar 1950'lerde Anderson tarafından gerçekleştirilmiş, öncelikle transformatör yağında farklı sıcaklıklardaki yayılım zamanı gecikmesi hesaplanmıştır(Şekil 2.1). Yayılma ortamı boyunca sesin hızı biliniyorsa, bu gecikmenin ölçülmesi boşalma mesafesinin hesaplanmasının kolaylıkla yapılmasını sağlamaktadır. (Anderson 1956)



Şekil 2.1. Yayılım Zamanı Sıcaklık Eğrisi (Anderson 1956)

Anderson'un kullandığı algılama elemanı (dönüştürücü) baryum titanattan yapılmış olup, yalıtım yağı kaynaklı kısmi boşalmanın yerini ve şiddetini belirlemek amacıyla yağa daldırılmıştır. Bu çalışma kapsamında bazı dönüştürücüler, radyal yönlü karakteristiklerden kaçınmak için silindirik olarak tasarlanmış, bunun dışındakiler ise test yapılarının yüzeylerine kolay monte edilebilmeyi sağlamak amacıyla düzlemsel yapılmıştır. Silindirik dönüştürücünün frekans cevabı 50-150 kHz aralığındadır ve

duyarlılığı $100\mu v/Pa$ 'dır. Şekil 2.2 dönüştürücünün frekans cevabını vermektedir. Deneysel 60 Hz frekansında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.2. Baryum Titanat Silindirik Dönüştürücünün Frekans Cevabı (Anderson 1956)

Kısmi boşalmanın yerinin hesaplanmasında, boşalmanın darbe başlangıcı ile aynı zamanda olduğu varsayımı temel alınır. Çünkü boşalma yerinin bulunması, boşalmanın oluşma anının tam olarak bilinebilmesindeki zorluk nedeniyle daha da karmaşık bir hal almaktadır. Anderson, deneyler sırasında oluşan çevresel gürültünün transformatörün metal çekirdeğindeki manyetik gürültü olduğunun farkındadır. Fakat deneylerinde bunu göz ardı ederek metal çekirdeği olmayan 69 kV transformatör kullanmıştır (Anderson 1956).

Ogihara, yağ dolu transformatörlerdeki kısmi boşalmanın yerinin ve şiddetinin bulunmasına yönelik 1960'larda daha yoğun araştırmalar yapmıştır (Ogihara 1964). Deneyleri esnasında karakteristik frekansı 1 MHz ve duyarlılığı yaklaşık olarak 100 mv/g olan baryum titanat dönüştürücü kullanmıştır. Kısmi boşalma nokta-yüzey elektrotlar arasına uygulanan AC gerilim ile üretilmiştir. Bu sayede yalıtım yağı içerisindeki nokta-yüzey elektrotları için boşalma eşik gerilim değeri ölçülmüştür. Deneylerde kısmi boşalma akustik basıncının ölçülen en büyük değeri, kısmi boşalma boşluğundan 100 mm uzağa konumlandırılmış ultrasonik dönüştürücü tarafından ölçülmüştür. Harici algılamada, transformatörün çelik duvarları boyunca sesin algılanmasının temeli transformatör duvarlarına kolaylıkla monte edilebilen özel bir algılayıcıya dayandırılmaktadır.

Kısmi boşalmanın yerinin belirlenmesi konusunda Ogihara, günümüzde de hala kullanılan “üç nokta metodu” ve “en yakın nokta metodu” olarak adlandırdığı iki farklı metot geliştirmiştir.

Üç nokta metodunda transformatör tankının farklı noktalarına konumlandırılmış üç algılayıcı kullanılmaktadır. Transformatördeki ultrasonik dalga farklı ortamlar boyunca yayılmaktadır. Kısmi boşalmanın yerinin tam olarak belirlenebilmesi, her bir ortam için hareket (yayılm) zamanının hesaplanması ile mümkündür. Ancak kesin hesaplamaların pratikte mümkün olmaması nedeniyle aşağıdaki prosedür izlenmektedir. Çelikteki ses hızı kullanılarak hesaplanan üst limit ve yağıdaki ses hızı kullanılarak hesaplanan alt limit ile mesafenin üst ve alt limitleri hesaplanır. Bu alt ve üst limitler küresel hücreler oluşturur. Kısmi boşalmanın yeri bu üç küresel hücrenin kesişim hacminde bulunur.

En yakın nokta metodunda ise mevcut algılayıcıların kullanımına gerek duyulmaz. Bu yöntemde, transformatör tankı her bir bölümde bir algılayıcının olduğu birkaç bölüme ayrılır. Eğer boşalma bir bölümde oluşuyorsa, o bölümdeki algılayıcı kısmi boşalma sinyalini ilk kaydeden algılayıcıdır. Tankın bölmesini bir kere daha değiştirmek, örneğin dikey bölmelerin içine yatay bölmeler oluşturmak, boşalmanın daha küçük hacimdeki yerinin bulunmasını sağlar (Ogihara 1964).

Carpenter ve arkadaşları, 1965'te transformatörlerdeki ultrasonik kısmi boşalmalarla ilgili çalışmalarda bulunmuştur(Carpenter ve ark. 1965). Ultrasonik dönüştürücü transformatör tankı içerisinde konumlandırılmıştır. Yapılan çalışmalar ve testler neticesinde, kısmi boşalma kaynaklarının çeşitleri tanımlanmış, böylece üretilen transformatörlerde bu olumsuzluklar ortadan kaldırılmıştır. Yalıtımın istenmeyen iletken yabancı maddeleri içermesi, sistem içerisindeki gaz ve hava boşlukları, ayrık metal parçalar, eksik bölümler nedeniyle oluşan yüksek basınç bölgeleri, uygun olmayan yalıtım kısmi boşalma oluşumunun temel nedenlerindedir.

Kısmi boşalmanın olduğu yer ile ilgili en büyük problemlerden biri, akustik sinyali daha önceki boşalma sinyallerinin yansımalarından ayırmak ve bu akustik sinyali herhangi bir yarım devir içerisinde oluşan kısmi boşalma sinyali ile ilişkilendirebilmektir. Bu problemi çözmek için, Allan ve arkadaşları transformatörü

enerjilendirmek için sinüzoidal dalga formunun bir yarım devri yaklaşımını kullanmıştır. Bu yöntemle akustik sinyal ile yansıma arasındaki tüm girişimler önlenmiştir (Allan ve ark. 1973).

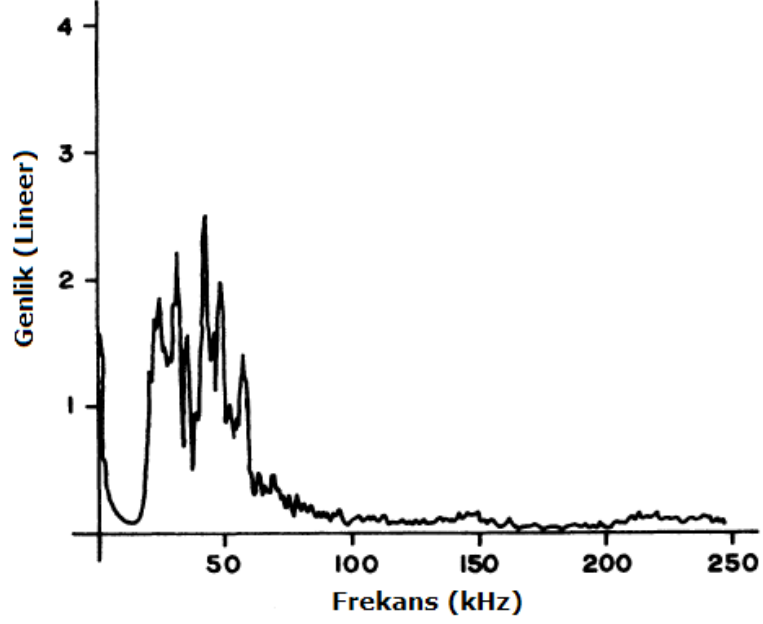
Train ve arkadaşları, ultrasonik algılama tekniklerini ve geliştirdikleri sistematik programı kullanarak, çalışma gerilimindeki transformatörlerde kısmi boşalmanın varlığını incelemiştir (Train ve ark. 1974). Çalışmanın bundan önceki çalışmalardan en büyük farkı algılayıcının piezoelektrik kristalden yapılmış olmasıdır. Kristal, kuvvetlendirici ve besleme üniteleri ekranlanmış silindir içerisine yerleştirilmiştir. Tamamlanan bu yapı tasarlanan mıknatıslar yardımıyla transformatör tankının dışına monte edilmiştir.

Duyarlılığı 70 pC/mV olan dönüştürücünün 1 m çaplı yağ tankının dışına monte edilmesi sağlanmıştır ve kısmi boşalma kaynağı da tankın merkezinde konumlandırılmıştır. Bu teknik kullanılarak New Brunswick Elektrik Güç Komisyonunda bulunan 260'tan fazla transformatör çalışır durumdayken test edilmiştir. Bunlardan 4 tanesinde önemli ölçüde boşalma tespit edilmiş ve bu nedenle servisten kaldırılmıştır.

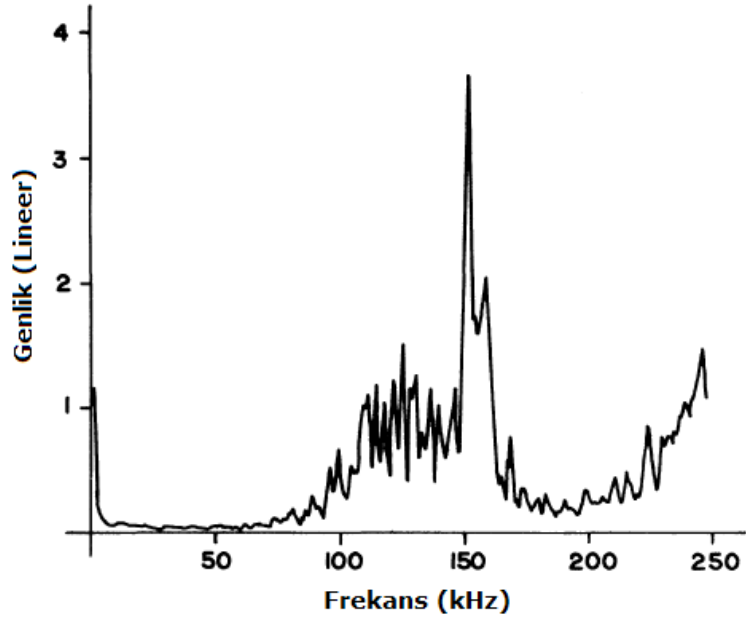
Howells ve Norton; yağ yalıtımlı transformatörlerde kısmi boşalma ve manyetik çekirdek gürültüsünden kaynaklanan ultrasonik sinyaller üzerine araştırma yapmıştır (Howells 1985, Howells ve ark. 1981). İlk kez manyetik gürültü ile ilgili araştırmalar da bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Deneyler piezoelektrik algılayıcı ile 333 kVA'lık bir transformatör üzerinde yapılmıştır. Sinyalleri kaydetmek ve frekans spektrumunu hesaplamak için sayısal osiloskop ve frekans analizatörü kullanılmıştır. Sayısal teknikler kullanılarak çekirdek gürültüsünün ve kısmi boşalma kaynağının frekans spektrumu ölçülmüştür. Ölçümler neticesinde elde edilen frekans spektrumları göz önüne alınarak çekirdek gürültüsünün düşük frekanslarda (100 kHz'e kadar), kısmi boşalmanın ise daha yüksek frekanslarda (100 kHz üzeri) gerçekleştiği görülmüştür.

Şekil 2.3 ve 2.4 manyetik çekirdek gürültüsü ve kısmi boşalmanın frekans spektrumlarını vermektedir. Çalışmada manyetik gürültüyü süzen yüksek geçiren filtre kullanımı önerilmiş ve kullanılmış, bu sayede daha doğru bir kısmi boşalma tespiti

sağlanmıştır. Bunun yanında kısmi boşalmanın yerinin tespiti için de sayısal çapraz korelasyon yöntemi önerilmiştir (Howells ve ark. 1978).



Şekil 2.3. Manyetik Çekirdek Gürültüsü Frekans Spektrumu (Howells ve ark. 1978)



Şekil 2.4. Kısmi Boşalma Frekans Spektrumu (Howells ve ark. 1978)

Kawada ve arkadaşları, yağ yalıtımlı güç transformatörlerinde ultrasonik algılama yöntemlerini kullanarak kısmi boşalma için otomatik izleme ve görüntüleme sistemi geliştirmişlerdir (Kawada ve ark. 1984). Bu çalışmada kısmi boşalma nedeniyle oluşan ultrasonik darbeler transformatör tankına yerleştirilen 5 mikrofon tarafından algılanmıştır. Merkez frekansı 200 KHz olan ultrasonik mikrofon piezoelektrik malzemeden üretilmiştir. Her bir mikrofonu frekans aralığı 180-230 kHz olan 60 dB kuvvetlendirici yerleştirilmiştir. İzleme sistemi tarafından algılanan minimum kısmi boşalma sinyali 300 pC'dur.

Liang ve Weilin 1989 yılında 5 tane algılayıcı kullanarak yaptıkları laboratuvar çalışmaları sonucunda $(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)^{1/2}$ ile tanımlanan konum sapmasını belirlemişlerdir (Liang ve ark. 1985). Kısmi boşalma kaynağının yerini "hiperbolik konum yöntemi" yardımıyla hiperbolik eşitlikleri çözerek bulmuşlardır. 12 adet sensör kullanarak içerisinde iki farklı kısmi boşalma kaynağı bulunan model transformatörle yaptıkları deneyler sonucunda iki boşalma kaynağının da yeri tespit edilmiştir. Ancak kullanılan yöntem sonucu elde edilen sonuçlarla gerçek değerler karşılaştırıldığında arada maksimum ± 4 cm'lik bir fark görülmüştür.

Jones, akustik algılayıcıları monte ettiği 150 transformatörü inceleyerek algıladığı kısmi boşalmayı anlattığı çalışmasında 150 kHz'lik akustik dönüştürücüler kullanmıştır. Kısmi boşalma kaynağının yerinin tespiti ile ilgili olarak o zamana kadar kullanılan istatistiksel ve grafiksel yaklaşımları birleştirerek farklı bir metot geliştirmiştir. Hata payını 50 mm'den az olarak bulmuştur (Jones 1990).

Zhu ve arkadaşları 1991 yılında, farklı bir kısmi boşalma algılama sistemi üzerinde durmuşlardır. Test için transformatör tankı üzerinde konumlandırılan 3 akustik dönüştürücü ve toprak hat üzerinde konumlandırılan bir akım dönüştürücü kullanılmıştır. Frekans bantgenişliği 70-180 kHz olan bir akustik dönüştürücü, ön kuvvetlendirici ve filtre kullanılarak piezoelektrik akustik yayılım algılayıcısı oluşturulmuştur. Transformatörlerdeki dönüştürücüler tarafından algılanan sinyaller, yüzlerce metre uzaklıktaki kontrol odalarında bulunan bilgisayar destekli ölçüm ve kontrol sistemlerine iletilmiştir. Bu sayede sinyal iletimi için, frekans bölmeli

çoğullama tekniğini kullanarak optik fiberli iletim sistemi geliştirmişlerdir (Zhu ve ark, 1991).

Blackburn ve arkadaşları, güç transformatörlerindeki kısmi boşalma kaynağının yerinin tespiti için elektriksel/akustik yöntemleri geliştirme konusunda çalışmalar yapmışlardır. Düşünceleri, elektriksel metotlar kullanarak kısmi boşalma akustik sinyali ile girişimde bulunan sinyalleri birbirinden ayırmaktır. Böylece o zamana kadar henüz dahili ölçüm yöntemleri geliştirilemediği için mevcut harici yöntemlerdeki en büyük problemlerden olan girişimi elimine etmiş olacaklardır. Bu doğrultuda sayısal filtre tasarlamış ve çeşitli deneyler yapmışlardır.

Blackburn ve arkadaşlarının asıl önemli çalışma alanı ise güç transformatörlerindeki kısmi boşalmanın yerini ve şiddetini ölçebilmek için ilk kez optik fiberli algılayıcı sistemlerini uygulamaya koymuş olmalarıdır. Bu çalışmalar için düşük frekanslar için (<10 kHz) tasarlanmış ve üretilmiş tamamı fiberden yapılan interferometrik akustik algılayıcılar edinilmiştir. Fiber algılayıcı kafası 633 nm dalga boyunda çalışan 150 m uzunluğunda tek modlu fiberden oluşmuştur. Kullanılan ışık kaynağı He-Ne lazerdir. Fiberin çekirdek/kaplama/kılıf kalınlıkları sırasıyla $5 \mu m / 125 \mu m / 250 \mu m$ olup kırılma indisi farkı $\Delta n = 0.0035$ 'tir. Fiber 10 cm çapındaki bir boru etrafına sarılmıştır. Çalışma prensibi olarak Michelson interferometresi kullanılmıştır. Farklı frekanslardaki referans ışık dalgası ile sinyali göndermek için akusto-optik modülasyon tekniği ve zaman bölmeli çoğullama tekniği kullanılmıştır.

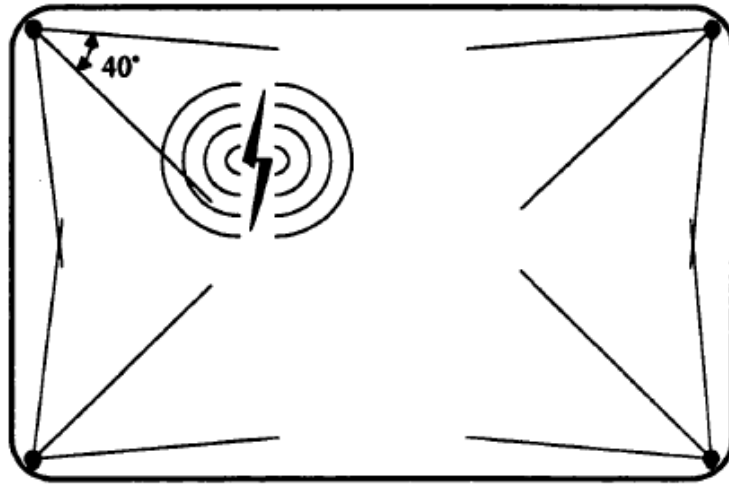
Bu çalışmada diğer çalışmalara göre elde edilen en büyük gelişme algılayıcının transformatör tankı içerisindeki yağa daldırılmış olarak kullanılmasıdır. Geliştirilen ilk sistemden sonra daha düşük fiber sarımına (45 mm'lik boru üzerine) ve yüksek frekans bantgenişliğine (100-200 kHz) sahip olan ikinci bir sistem daha geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni fiber sistemi de bir öncekiyle aynı çalışma prensibine sahiptir.

Algılayıcının transformatör tankı içerisinde konumlandırılmasındaki en büyük avantaj sinyalin doğrudan olmayan yollardan geçmeden direk olarak algılayıcıya ulaşması ve çelik tank duvarları nedeniyle daha fazla zayıflamaya uğramamasıdır. Ultrasonik sinyalin spektrumunun tankı geçerken bozulmaması sayesinde spektrumu

analiz edilerek algılanan kısmi boşalma sinyali karakteristiklerinin de hesaplanması mümkün olmaktadır (Blackburn ve ark. 1991).

Unsworth ve arkadaşları, geniş transformatörlerin içerisine kurulan ekonomik dahili kısmi boşalma görüntüleme sistemi geliştirmişlerdir(Unsworth ve ark. 1994). Görüntüleme sistemi dört bölümden oluşmaktadır. Bunlar; kısmi boşalma sinyalini algılayan dönüştürücü, sinyal iyileştirme devreleri, sayısal sinyal işleme donanımı ile uyarı ve görüntüleme ekranıdır. Algılayıcı olarak RF dönüştürücü ve ultrasonik dönüştürücü kullanılmıştır.

Zhiqiang 1999 yılında kısmi boşalma algılanması ve algılayıcı sistem tasarımı üzerine çalışmalar yürütmüştür. Çalışmada optik fiber algılayıcı uygulamasındaki problemler deneysel ve teorik olarak araştırılmış ve bu gerekliliklere uygun şekilde tasarlanmış optik fiberli akustik algılayıcı geliştirilmiş, deneysel olarak doğrulanmıştır.



Şekil 2.5. Transformatör Tankı ve Köşelerine Yerleştirilmiş Dört Algılayıcı (Zhiqiang 1999)

Kısmi boşalmanın yerini tayin etmek amacıyla transformatör tankının içine konulmuş algılayıcılarla üçgenleme metodu kullanılmıştır. Bobine sarılan akustik algılayıcının yönünün hesaplanması düzlem dalga yaklaşım metodu kullanılarak yapılmıştır. Hesaplama göstermiştir ki, fiberin sarıldığı bobininin çapı 20 mm'den küçük ise algılayıcının yönü 150 kHz'ten küçük frekanslar için 40° civarında olmalıdır. Bunun için tankın köşelerine algılayıcılar yönü en az 40° olacak şekilde olabildiğince

yerleştirilmiştir. Şekil 2.5 transformatör tankı içerisine yerleştirilen algılayıcının konumlarını vermektedir.

Çalışma kapsamında küçük bir bobindeki fiber bükülme kaybı hesaplanmıştır. Kırılma indisinin 0.15'ten büyük olduğu durumlarda bükülme kaybı kabul edilebilir ölçüde azdır. Eğilmeye duyarlı olmayan, piyasada bulunabilen bir fiber; iç çapı 11 mm dış çapı 14 mm olan oldukça küçük bir bobine sarılıp fiber bükülme kaybı testleri yapılmıştır. Bu deney sonucunda, 10.5 m'lik fiber için bükülme kaybı 1.34 dB olarak ölçülmüştür.

Küçük çaplı bir bobin kullanmak suretiyle, 3x3 kuplörlü bir Mach-Zehnder interferometrik fiber algılayıcı sistemi kurulmuştur. Çalışmanın bu zamana kadar yapılan çalışmalardan en büyük farkı, Mach-Zehnder interferometresi kullanılarak geliştirilen ilk sistemlerden biri olmasıdır. Daha önce kısmi boşalma frekans spektrumu ile ilgili yapılan çalışmalar neticesinde akustik algılayıcı için gerekli frekans aralığı 50 kHz – 300 kHz ve hassasiyeti 0.2 Pa olarak belirlenmiştir. Bu algılayıcı için 50 kHz – 300 kHz arasında çalışan bir demodülasyon devresi geliştirilmiş. Algılayıcının akustik hassasiyeti 100 kHz için 0.98 Pa'a kalibre edilmiştir.

Mineral yağdaki kısmi boşalmalar sayesinde üretilen akustik dalgaları algılamakta kullanılan optik fiberli algılayıcının deneysel doğrulanması kısmi boşalma kaynağını içeren sistem kullanılarak yapılmıştır. Aynı zamanda kısmi boşalmanın elektriksel algılaması yapılmıştır. Elektriksel algılayıcıdaki sinyal ve optik fiberli algılayıcıdaki sinyal gösterilmiş ve kaydedilmiştir. Aynı kısmi boşalma olayındaki bu iki sinyal, aralarındaki zaman farklılığı sayesinde tanınmıştır(Zhiqiang 1999).

90'lı yılların sonuna kadar yapılan çalışmalar göstermektedir ki; optik fiberli tabanlı algılayıcılar küçük boyut, yüksek duyarlılık, elektriksel iletkenlik, elektromanyetik girişime olan bağımsızlık (bağımsızlık) gibi avantajları nedeniyle, kısmi boşalmanın tespiti için uygun bir donanım halini almıştır(Culshaw 1988, Chan ve ark. 1994).

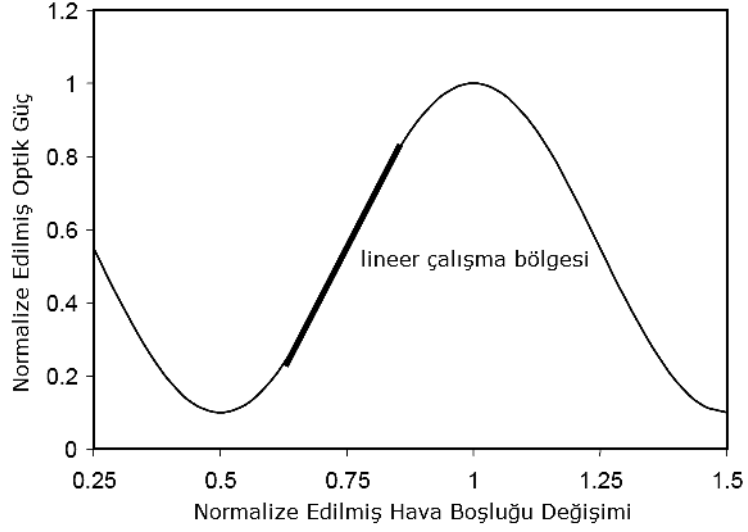
Daha önceleri Michelson ve Mach-Zehnder interferometreleri ile tasarlanan sistemler, optik fiberli sistemlerdeki gelişmeler sayesinde 2000'lerden sonra yerini

Fabry-Perot interferometresine bırakmıştır. Böylece daha kullanışlı sistemlerin önü açılmıştır. Bunun yanı sıra yapılan çalışmalarda kısmi boşalma algılama yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları sıklıkla tartışılmıştır.

Lazarevich, Fabry-Perot interferometresini kullanarak tasarlanan algılayıcı sistemleri ile ilgili ilk çalışmayı yapanlardandır(Lazarevich, 2003). Çalışmasında kısmi boşalma sinyallerinin algılanma yöntemlerini tartışmıştır. Mevcut akustik algılama sistemlerinde kullanılan 'ivme ölçer' ve 'akustik yayılım algılayıcısı' olarak adlandırılan iki farklı algılayıcıyı incelemiştir. İvme ölçer 50 kHz üzeri frekans değerlerinde kullanılırken akustik yayılım algılayıcıları 30 kHz-1 MHz aralığında kullanım için idealdir. Her iki tip algılayıcı da mekanik titreşimleri elektriksel sinyallere çevirdiği için akusto-optik algılayıcılar olarak adlandırılmaktadır.

Deneylerde kullanılan ışık kaynağı 1550 nm dalgaboyundadır ve ışık kaynağından çıkan ışınlar 2x2'lik kuplörü geçerek fiber boyunca ilerlerler. Fiberin kesik ucundan ilk yansıma gerçekleşir, ikinci yansıma ise algılayıcı kafasının bitişindeki diyaframda gerçekleşir. Optik sinyal fotodedektöre doğru ilerler ve burada yoğunluğu ölçülür.

Şekil 2.6, hava boşluk mesafesine göre çıkış yoğunluğunun değişimini vermektedir. Çalışmadaki algılayıcı öyle bir şekilde tasarlanmıştır ki, akustik sinyal olmadığında fotodedektörde görünen yoğunluk değeri doğrusal çalışma bölgesinin merkezine düşmektedir. Hava boşluğunun uzunluğu değiştikçe algılanan sinyalin yoğunluğu doğrusal bölgenin merkezine göre yukarı ya da aşağıya doğru hareket edecektir. Algılanan yoğunluk değeri yarım periyodun %60'ının dışına çıkarsa değişim doğrusal olmayacaktır. Bu da akustik dalga ile ilgili yanlış bilgi verilmesine neden olur. Bu çalışmanın dezavantajı sınırlı bir bölgede çalışılmasına olanak sağlamasından kaynaklanmaktadır.



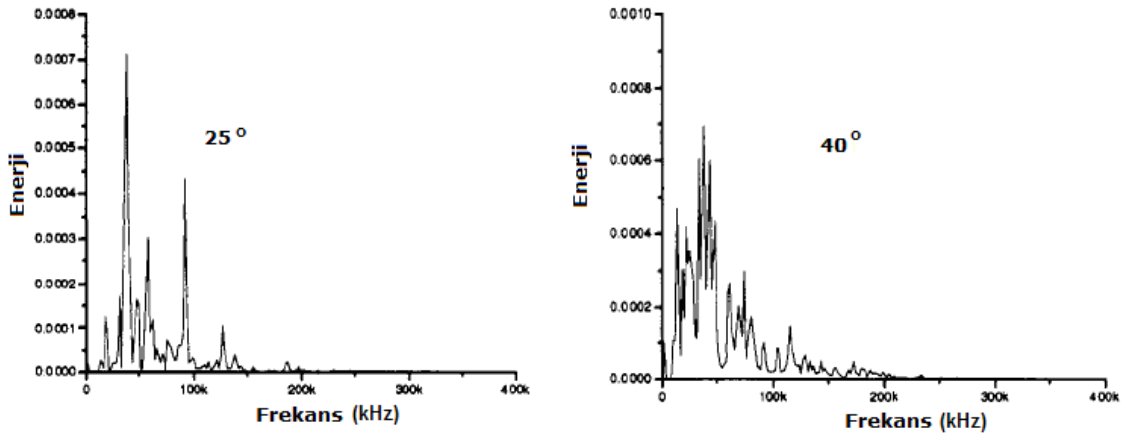
Şekil 2.6. Hava Boşluk Mesafesine Göre Çıkış Yoğunluğunun Değişimi

Algılayıcı kafasının bitiş noktasında bulunan diyaframın kalınlığı ve çapına göre frekans cevabındaki değişimi bulmak için çeşitli deneyler yapılmıştır. Diyafram kalınlığına bağlı olarak bir doğruluk katsayısı hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışma neticesinde diyafram kalınlığının artması neticesinde doğruluk katsayısının da arttığı yani diyaframın ince olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Diyafram kalınlığındaki artış neticesinde kısmi boşalma sinyalindeki küçük değişiklikleri algılama yetisi ortadan kalkmıştır.

Algılayıcıyı test etmek için frekans cevabı testi yapılmıştır. Bu test kapsamında öncelikle iki piezoelektrik algılayıcı kullanılarak transformatör tankının çevresinin karakteristikleri belirlenmiş ardından da tasarlanan optik fiberli algılayıcının cevabı bulunmuştur.

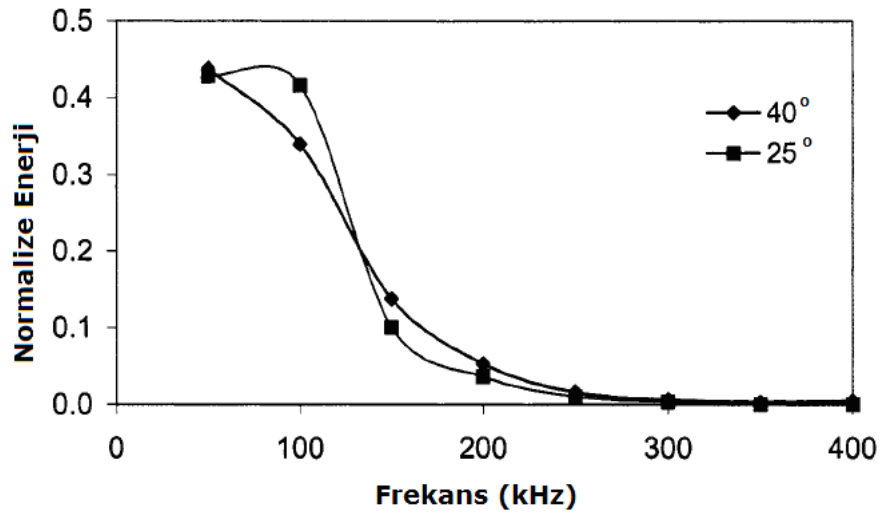
Lazarevich, yaptığı deneylerde elde edilen frekans cevabının algılayıcı ile kısmi boşalma kaynağı arasındaki mesafeye göre değiştiğini görmüştür. Aynı zamanda kısmi boşalmanın yerinin tespiti için geliştirilmiş bir algoritmayı kullanarak bilgisayar analizleri gerçekleştirmiştir.

Bundan sonra yapılan çalışmalar daha çok kısmi boşalma dahili sistemleri için algılayıcı kafası tasarımı ve kısmi boşalma sinyallerinin bozucu etkilerini gidermek için geliştirilen filtreler ve diğer elimine yöntemleridir(Lazarevich 2003).



Şekil 2.7. Enerji-Frekans Değişimi (Wang, 2005)

Wang, kısmi boşalmanın algılanması için Fabry-Perot interferometresini kullanan dahili bir sistem geliştirmiştir (Wang, 2005). Kısmi boşalmanın akustik spektrumunun belirlenmesinde transformatör yağının sıcaklığının da önemli olduğunun üzerinde durmuş ve bu konuda farklı sıcaklıklardaki transformatör yağında ilerleyen akustik sinyallerle ilgili deneyler yapmıştır. 25°C – 40°C arasındaki sıcaklıklarda akustik dalgaların ölçümünü yapmış ve sonuçları teorik temellere dayandırmıştır. Şekil 2.7 iki farklı sıcaklıkta frekans ve enerji ilişkisini vermektedir. Yaptığı bu çalışmayı genişleterek 50-400 kHz aralığındaki frekans değerlerinde belirlenen iki sıcaklıkta deneyler yaparak bu iki farklı sıcaklıkta enerjinin frekansa göre değişimini belirlemiştir. Şekil 2.8 enerji değişiminin deneysel sonuçlarla elde edilen grafiğini vermektedir.



Şekil 2.8. 25°C ve 40°C Sıcaklıklarındaki Enerji-Frekans Değişimi (Wang, 2005)

Wang'in tasarladığı optik fiberli algılayıcı daha önceki çalışmalardaki eksik noktaları tamamlamıştır. Doğru bir ölçüm yapılabilmesi için yansıma diyaframının kritik önem taşıdığı üzerinde durmuş ve bu konuda analizler gerçekleştirmiştir. Silikon zar kalınlığı ve rezonans frekansı arasındaki ilişki incelenmiş ve benzetimleri yapılmıştır. Bu analizler neticesinde silikon zar kalınlığı $25\mu m$, genişliği 2 mm ve rezonans frekansı 90 kHz olarak belirlenmiştir. Kullandığı yansıma diyaframı silikon malzemedan yapılmış olup, mikro-elektro mekanik yöntemler kullanarak algılayıcı üretimi gerçekleştirilmiştir(Wang 2005).

Yapılan kaynak araştırmasında, kısmi boşalma sinyallerinin algılanması ile ilgili araştırmaların aşağıda gösterildiği gibi gruplanabileceği saptanmıştır.

- Kısmi boşalmanın frekans spektrumunun elde edilmesi
- Kısmi boşalma sinyallerinin gürültüden ayrılması
- İnterferometrik algılayıcıların tasarlanması
- Kısmi boşalma kaynağının yerinin bulunması

Ancak literatürdeki çalışmaların genellikle tek bir yöntem üzerinde odaklandığı, algılama yöntemleri ve algılayıcıların karşılaştırılmasıyla ilgili yeterli düzeyde çalışmanın bulunmadığı görülmüştür. Yüksek lisans tezinin amacı, kısmi boşalma işaretlerinin optik fiberli algılama yöntemlerini karşılaştırmak ve kısmi boşalmayı algılayan optik fiberli sensör tasarımını gerçekleştirmektir.

3. KISMİ BOŞALMA

3.1. Kısmi Boşalma Mekanizması

Yalıtım sisteminin yalıtkan direnci, elektriksel elemanların servis ömrü boyunca ısı, elektriksel ve mekanik gerilimler nedeniyle azalmaktadır. Yalıtım hataları en çok yalıtım sistemi içerisindeki boşluklarda elektriksel boşalmalar olarak adlandırılan kısmi boşalmalar nedeniyle oluşmaktadır (Zargari ve ark. 1996).

Yüksek gerilim transformatörlerinde kısmi boşalma, dar bir bölgedeki elektrik alan yoğunluğunun değişmesi nedeniyle oluşmaktadır. Elektrik alan yoğunluğundaki bu değişim kendisini ölçülebilen kısa süreli akım darbesi şeklinde gösterir.

Yalıtım malzemesi içerisinde üretim esnasında oluşan farklı büyüklüklerdeki boşluklar veya transformatör tankını dolduran yalıtım yağı içerisindeki gaz kabarcıkları olarak tanımlanan boşluk kaynakları, kısmi boşalmaların oluşmasının temel nedeni olarak gösterilir. Yalıtım malzemelerinin içerisindeki bu boşluklar yalıtkanın cinsine bağlı olarak sıvı veya gaz ile dolar. Boşluk içine dolan sıvı veya gazların delinme dayanımları, yalıtkanın delinme dayanımından genel olarak küçüktür. Boşlukların kendisini çevreleyen malzemedan daha düşük dielektrik sabitine sahip olması, boşluk içinde oluşan elektrik alanın aşırı artmasına, böylece normal çalışma geriliminde dahi boşalmaların meydana gelmesine neden olur.

Kısmi boşalmanın oluşabilmesi için sırasıyla iki kriterin gerçekleşmesi gerekir. Birinci kriter, boşluk sınırlarındaki elektrik alan şiddetinin sınır değerinden daha büyük olması ikincisi ise boşluk karşısında serbest elektronların bulunmasıdır. Bu şartlar sağlandığı zaman bir elektron yolu oluşarak elektron hareketi üssel olarak artar, böylece meydana gelen bu akım boşluk karşısından akarak karşıdaki gerilimi sıfıra düşürür(Boggs 1990). Elektriksel kısmi boşalmalar başlangıçta bölgesel olup yalıtım malzemesini kısa devre etmezler. Ancak kısmi boşalmaların neden olduğu akım darbeleri zamanla yalıtım malzemesinde aşınmalara yol açarak, malzemenin tam

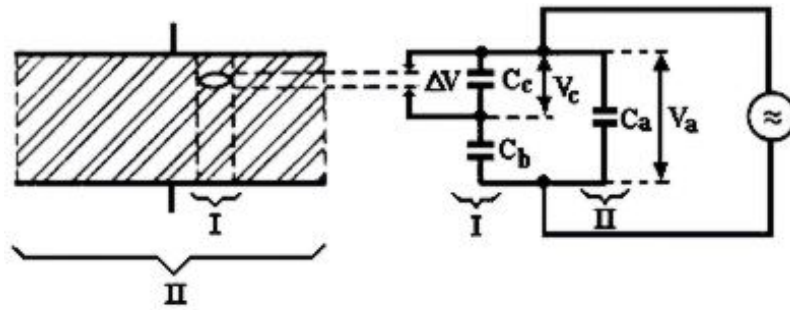
delinmesine neden olabilirler. Bu nedenle yalıtım malzemelerinde meydana gelen kısmi boşalmaların ölçülmesi ve belirli bir değerin üzerinde kısmi boşalmaya neden olan yalıtım malzemelerinin kullanılmaması gerekir. Yalıtkanın tam olarak delinmesi ve kullanılamaz hale gelmesi birkaç gün ile birkaç yıl arasında değişen bir süreyi kapsar (Wang 2005, Fidan 2003).

3.2. Kısmi Boşalma Oluşumu

Elektriksel kısmi boşalmalar sadece alternatif gerilimde değil doğru gerilimde de meydana gelmektedirler. Bu bölümde kısmi boşalma darbelerinin oluşumları ele alınacak ve kısmi boşalma gerilim modeli üzerinde durulacaktır.

3.2.1. Alternatif Gerilimde Kısmi Boşalmaların Oluşumu

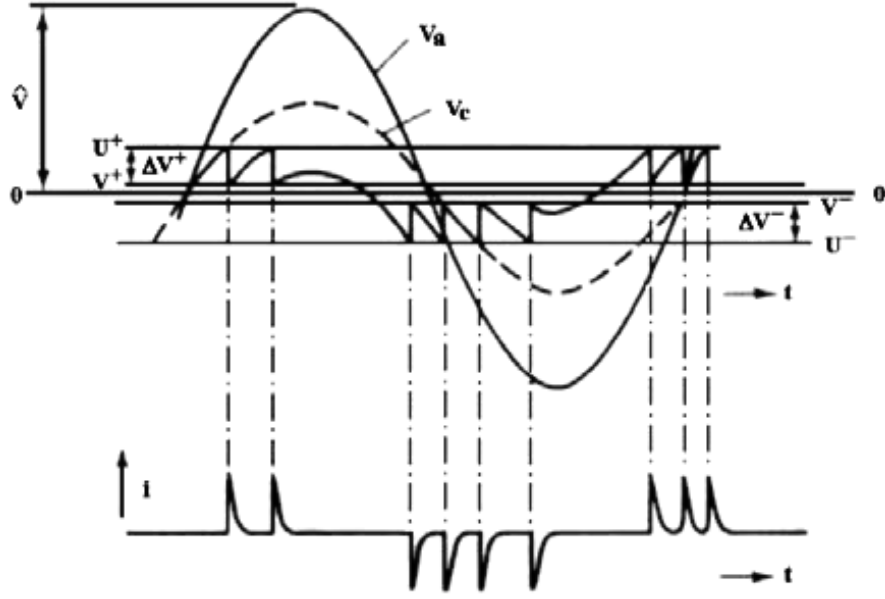
Kısmi boşalmalar alternatif gerilimlerde daha sık görülürler. Alternatif gerilimde kısmi boşalmaların oluşmasını açıklamak için kullanılan eşdeğer devre Şekil 3.1’de verilmiştir. Eşdeğer devrede; boşluk kapasitesi C_c , boşluğa seri yalıtkan malzemenin kapasitesi C_b , geri kalan yalıtkan malzemenin kapasitesi ise C_a ile temsil edilmiştir.



Şekil 3.1. Boşluk İçeren Bir Yalıtkanın Elektriksel Eşdeğer Devresi

Bu eşdeğer devreden yararlanılarak boşalmaların oluşumu ile ilgili gerilim diyagramı Şekil 3.2’de verilmiştir. Şekilde görülen V_a gerilimi yalıtkana uygulanan gerilimi temsil ederken; V_c boşluk üzerine düşen gerilimdir. Boşluk üzerine düşen V_c gerilimi, U^+ delinme gerilimine ulaştığında boşlukta bir boşalma meydana gelir. Boşalma, V_c gerilimi V^+ değerine düşene kadar sürer. Boşalmanın sönmesinin ardından gerilim tekrar artmaya başlar ve yine V_c gerilimi, U^+ delinme gerilimine ulaştığında bir boşalma meydana gelir. Böylece pozitif alternansta bir boşalma grubu oluşur. Benzer

şekilde negatif alternansta V_c gerilimi, bu sefer U^- delinme gerilimine ulaştığında bir boşalma meydana gelecek ve gerilimin artması ve boşalmaların devam etmesi ile birlikte negatif alternansta bir boşalma grubu oluşacaktır. Boşluk yapısının simetrik olmaması, U^+ ve U^- delinme gerilimlerinin birbirinden farklı olmasına, boşalmaların kesik ve düzensiz meydana gelmesine neden olur (Wadhwa 2007, Fidan 2003).



Şekil 3.2. Kısmi Boşalma Gerilim Diyagramı

3.2.2. Doğru Gerilimde Kısmi Boşalmaların Oluşumu

Doğru gerilim uygulanan sistemlerde meydana gelen elektriksel kısmi boşalmalar, sıklıkla gerilimin arttırılması esnasında görülürler. Gerilim sabit bir değer aldıktan sonra boşalmalar daha seyrek olarak meydana gelir. Doğru gerilimde meydana gelen elektriksel kısmi boşalmaların tekrarlama frekansı, alternatif gerilimde meydana gelen boşalmaların tekrarlama frekansına oranla yaklaşık olarak $10^4 - 10^5$ kat daha düşüktür. Buna bağlı olarak doğru gerilimde meydana gelen boşalmaların alternatif gerilimdekilere oranla daha az zararlı olduğu kabul edilebilir (Fidan 2003).

3.3. Sıvı Yalıtkanlarda Kısmi Boşalmanın Oluşum Nedenleri

Çalışmada, transformatör yağında meydana gelen kısmi boşalmaların optik fiberli sensörlerle algılanması üzerinde durulmuştur. Bu nedenle bu bölümde transformatör yalıtımında kullanılan sıvı yalıtkanlarda kısmi boşalmanın oluşma nedenlerine değinilmiştir.

Transformatör yalıtımında da kullanılan sıvı yalıtkanlar, yüksek gerilim tekniğinde çok önemli bir yer tutarlar. Bunların elektriksel dayanımları gazlara göre daha yüksektir ve katı yalıtkan maddenin yüzeyini hava ve neme karşı korurlar. Sıvı yalıtkanlar, akışkan özelliğe olduklarından, katı yalıtkanlara göre daha kalın tabakalar halinde kullanılabilirler. Sıvı yalıtkanların en önemli elektriksel özellikleri delinme dayanımı, iletkenlik ve dielektrik kayıplarıdır. Bu özelliklere, sıvı yalıtkan içinde bulunan nem, yabancı maddeler, gaz kabarcıkları ve hava boşlukları büyük ölçüde etkir. Sıvı yalıtkanlarda delinme gerilimine etki eden etkenler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

3.3.1. Nem

Su damlacıkları içeren bir sıvı yalıtkanın delinme dayanımı, su damlacığı içermeyen aynı sıvı yalıtkanın delinme dayanımına aşağı yukarı eşittir. Fakat sıvı yalıtkan içinde çok az miktarda da olsa su buharı varsa, sıvı yalıtkanın delinme dayanımı küçülür. Örneğin yalıtkan içerisinde % 0.01 mertebesindeki su buharı, delinme dayanımını 300 kV/cm'den 30 kV/cm'ye düşürebilir. Ayrıca sıvı yalıtkan içinde yabancı maddeler varsa, sıvının delinme dayanımı daha da düşer.

3.3.2. Yabancı Maddeler

Bir sıvı yalıtkanın yabancı maddelerden tamamen arınması hemen hemen olanaksızdır. Havanın toz ve nemi sıvı içerisine kolayca girebildiği gibi, sıvının filtre edilmesi sırasında da sıvıya yabancı maddeler girebilir. Bu parçacıklar, özellikle de nemli oldukları zaman dielektrik katsayıları büyük birer dipol oluşturur ve elektrik alanın maksimum olduğu bölgeye doğru hareket ederek orada iletken bir köprü meydana getirirler. Dielektrik katsayısı ve çapı küçük olan yabancı maddeler genellikle sıvı içerisinde dağınık halde bulunurlar. Dielektrik katsayısı ve yarıçapı büyük olan parçacıklar ise kolaylıkla yalıtkan malzeme içerisinde köprü oluşturabildiklerinden

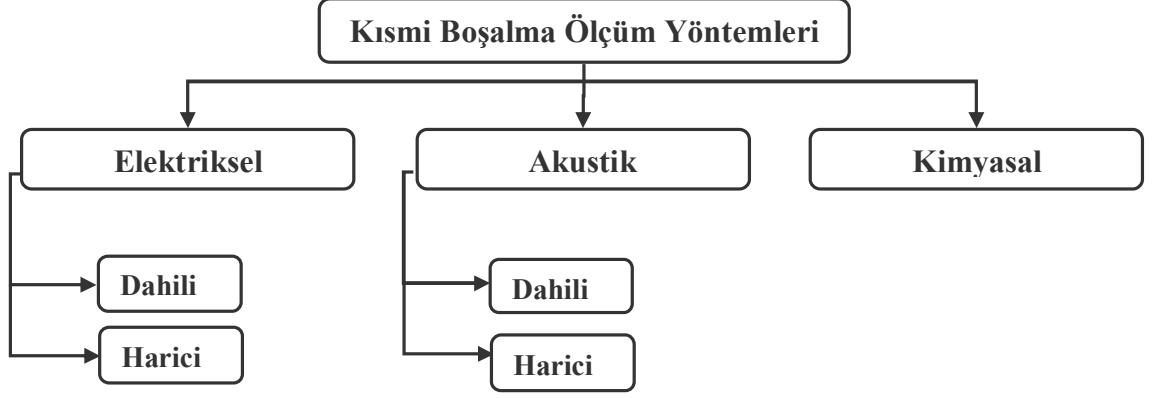
yağın delinme dayanımını etkilerler. Pratikte kullanılan sıvı yalıtkanların delinme dayanımları 90-200 kV/cm arasında değişmektedir.

3.3.3. Gaz Kabarcıkları ve Hava Boşlukları

Yağ içerisinde bulunan elektrotlara yüksek bir gerilim uygulanırsa, yabancı maddeler daha önce açıklandığı gibi elektrik alanının en büyük olduğu bölgede iletken bir köprü oluştururlar ve Joule yasasına göre ısınırlar. Eğer devrenin direnci çok büyük değilse, iletken köprüden oldukça büyük akımlar geçebilir. Bu akım, yağın iletken köprü bölgesinde hızla ısınmasına ve iletken köprünün parçalanmasına neden olur. Bu sırada yağ içerisinde gaz kabarcıkları meydana gelir ve buralarda korona boşalmaları başlar. Eğer sıvının başlangıç sıcaklığı 300 °K mertebesinde ise gaz kabarcıklarındaki boşalma ısıltılı boşalma, 300 °K'den sıcak ise ark boşalması şeklinde gerçekleşir (Özkaya 1996).

3.4. Kısmi Boşalma Ölçüm Yöntemleri

Yapılan çalışmalar kısmi boşalmanın elektriksel yalıtım problemlerinin başlangıcının önemli bir belirtisi olduğunu göstermektedir. Bu nedenle kısmi boşalmanın ölçülmesi önem taşır. Kısmi boşalmanın ölçülmesinde boşalmalar sırasında ortaya çıkan etkilerden yararlanılır. Bu etkiler, akım darbeleri gibi elektriksel etkiler ve ses, kimyasal bozulmalar gibi elektriksel olmayan etkiler olarak sınıflandırılabilir. Şekil 3.3 kısmi boşalma ölçüm yöntemlerini göstermektedir. Kısmi boşalma ölçüm yöntemleri temel olarak elektriksel, akustik ve kimyasal olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Her grupta kendi arasında dahili ve harici olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Güç transformatörlerinde kısmi boşalmanın ölçümü için kullanılan algılayıcıların frekans cevabı için tipik frekans aralığı 20 kHz-300 kHz olarak tavsiye edilmektedir (Zargari ve ark. 1996).



Şekil 3.3. Kısmi Boşalma Ölçüm Yöntemleri

3.4.1. Kimyasal Algılama

Kısmi boşalmanın önemli sonuçlarından biri malzemedeki kimyasal değişimdir. Günümüzde enerji şirketleri tarafından iki temel kimyasal test yöntemi kullanılmaktadır: Çözünmüş gaz analizi ve bileşenlere ayırma metodu (kromatografi).

Çözünmüş gaz analizi, transformatör yağına karışan gaz seviyesinin ölçümüne yarar. Test, tanktan numunenin alınması ve çözünen gazların (asetilen, metan, hidrojen, karbondioksit, etilen vs) seviyesinin ölçülmesi şeklindedir.

Bir diğer test olan bileşenlere ayırma metodunda ise transformatör duvarının izolasyon malzemesindeki bozunma sonucu oluşanlar ölçülür. Eğer izolasyon malzemesi kağıt ise bozunma sonucu oluşacak maddeler glikoz ve benzeri maddeler olacaktır. Bu testte numune alınarak laboratuarda değerlendirmeye alınır.

Kısmi boşalma algılaması için uygulanan kimyasal testlerin bazı kısıtlamaları mevcuttur. Birincisi kimyasal test işlemi bize yalıtım malzemesindeki hasar miktarı ve kısmi boşalmanın yeri hakkında bilgi vermemektedir. İkinci sorun, kimyasal test işlemi transformatör çalışırken yapılamamaktadır. Çoğu durumda transformatörler yağ numunesi almak için işlem alanından çıkarılırlar. Bu sorunlar, kimyasal algılamanın faydalarını kısıtlamaktadır (Wang 2005).

3.4.2. Elektriksel Algılama

Elektriksel algılama, boşluk boyunca oluşan elektrik darbelerinin yakalanmasına odaklanmaktadır. Yüksek gerilim transformatörlerinin yalıtım sistemlerindeki kısmi boşalma etkinliğini belirlemek ve ölçmek için temel bir anlam ifade eden bu darbeler, 1 MHz'den büyük ölçülebilir frekans bileşenlerine sahiptir ve birkaç nanosaniye sürmektedir. Elektriksel algılama yöntemlerinden çevrimiçi bilgisayar bağlantılı algılama metodu çok yaygındır. Böylelikle yüksek gerilim sistemlerinin gerçek zamanlı izlenmesi yapılabilir ve sistemin çalışması etkilenmez (Boggs 1990, Wang 2005).

Elektriksel metotlarda kısmi boşalma akım darbeleri doğrudan ölçülebilir. Şiddet, faz ve kısmi boşalma akım darbelerinin sayısı bilgisayar tabanlı sistemler tarafından kaydedilebilir ve analiz edilebilir (Zargari ve ark. 1996).

Tıpkı kimyasal algılamada olduğu gibi elektriksel algılamanın da bazı kısıtlamaları mevcuttur. Elektriksel algılamanın birinci kısıtı, gürültüye karşı hassas olmasıdır. Yüksek gerilim transformatörü, hem geniş bantta hem dar bantta elektriksel gürültünün yoğun olduğu çevrede bulunur. Bazı durumlarda kısmi boşalmanın kısa darbe genişliği yüzünden kısmi boşalma darbesi ile gürültüyü ayırt etmek oldukça zorlaşır. Bu da çevrim içi elektriksel kısmi boşalma sistemlerinde yanlış algılamaya neden olur. Transformatör çevrim dışı vaziyete getirilip harici güç kaynağına bağlanarak ortamdaki gürültü elimine edilmeye çalışılır. Ancak yüksek gerilim transformatörlerini çevrimdışı duruma getirmek önemli kayıplara neden olabilir.

Elektriksel algılamadaki bir diğer sorun da, alınan titreşimlerin karakteristiklerinin büyük ölçüde yüksek gerilim transformatörlerinin geometrisine bağlı olmasıdır. Dönüştürücüdeki farklı bileşenler darbe şeklini bozabilir. Bu nedenle bu darbelerin karakterize edilmesi gereklidir. Aksi takdirde kısmi boşalmadaki hata, yanlış algılamaya sebebiyet verebilir. Bunların yanısıra elektriksel algılama ile kısmi boşalmanın yerinin belirlenememesi de önemli bir eksikliklerdir (Wang 2005, Stone 1991).

3.4.3. Akustik Algılama

Akustik algılama, kısmi boşalma nedeniyle oluşan ve yayılan mekanik dalgaların belirlenmesini temel alan ve transformatörlerdeki boşalmaların algılanmasında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Akustik belirleme yöntemi ile karmaşık yapıları makinelerde çalışma esnasında kolayca boşalma ölçümleri yapılabilmesi büyük avantajdır, böylece problemler daha rahat tespit edilebilir. Bu yöntemi temel alan, akustik enerjiyi elektriksel sinyale çeviren algılayıcılara ise akustik-elektrik (AE) algılayıcılar denir (Fidan 2003).

Akustik algılamanın kimyasal ve elektriksel algılamadan üstün olduğu önemli nokta, çoklu yerlere yerleştirilen algılayıcıları kullanmakta olan akustik sistemlerin konum bilgisi sağlayabilmesidir. Bu konum bilgisi kısmi boşalmanın türü, yeri, şiddeti hakkında bilgi vermektedir. Akustik algılamanın bir diğer avantajı da ortamdaki yüksek elektromanyetik girişimlerde dahi gözlem yapılabilmesidir.

Buna karşın akustik kısmi boşalma sistemlerinin bazı dezavantajları da mevcuttur. Özellikle harici algılama sistemlerinde kısmi boşalma kaynağı ile algılayıcı arasındaki yol boyunca akustik dalganın transformatör duvarı, yalıtım yağı gibi farklı yoğunluktaki ortamlardan geçişi sınırlayıcı faktörlerden biridir. Kaynaktan çıktıktan sonra ilerleyen akustik dalga, farklı zamanlarda transformatör duvarlarından geçerek harici algılayıcı tarafından alınır. Bu da çok yönlü girişime neden olabilir. Akustik dalganın katılarda, sıvılara göre daha hızlı ilerlemesi dalganın farklı zamanlarda algılayıcıya ulaşmasına neden olur. Ulaşma zamanındaki bu farklılık darbe bozulmalarına neden olmaktadır. Bu nedenle transformatörün çalışmasına herhangi bir kısıtlama ya da değişiklik getirmeden transformatör içerisinde çalışan algılayıcıların kullanılması büyük avantaj sağlar (Wang 2005, Markalous ve ark. 2008). Bir sonraki bölüm akustik algılayıcıların sınıflandırılmasını içermektedir.

3.5. Akustik Algılamaların Sınıflandırılması

Akustik algılamanın en büyük avantajlarından biri kısmi boşalmanın yerinin üçgen oluşturacak şekilde konumlandırılmış algılayıcılar yardımıyla bulunabilmesidir. Bu avantajına karşın akustik dalganın, algılayıcı yayılım yolu boyunca farklı hızlarda

farklı ortamlardan ilerlemesi kısmi boşalma kaynağının yerinin kesin olarak bulunması konusunda karşılaşılan en büyük zorluklardan biridir. Güç transformatörlerinde, mekanik dış bariyerler, yağ-tank ve tank-algılayıcı ara yüzleri ve diğer kayıplar akustik sinyalin zayıflamasına ve algılamanın daha da zorlaşmasına neden olur (Zargari ve ark. 1996). Kısmi boşalma akustik algılayıcıları, dahili ve harici olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Harici kısmi boşalma görüntüleme, transformatörün dışına yerleştirilmiş olan akustik algılayıcı kullanılır. Dahili kısmi boşalma algılama ise transformatörün içerisine yerleştirilen algılayıcılar yardımıyla olur (Wang 2005, Kemp 1995). Bu bölüm, mevcut akustik algılayıcıların sınıflandırılmasını içermektedir. Bu sınıflandırma kapsamında akustik algılamanın avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır.

3.5.1. Harici Algılama

Transformatör tankının dış duvarlarına yerleştirilen sistemler genel olarak harici algılayıcılar olarak adlandırılır. Piezoelektrik algılayıcılar akustik basınç dalgalarını algılayabilmek için, güç elemanlarının dış duvarlarına kolaylıkla monte edilebilen harici algılayıcılarıdır. Bu tip algılayıcıların üretilmesi için çok çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır. Ancak bugün yaygın kullanılan piezoelektrik güç çeviricilerinde, kurşun zirkonyum titanat (PZT) gibi ferroelektrik seramikler tercih edilmektedir.

Harici akustik algılama sistemlerinde kullanılan algılayıcılar, transformatör tankının dışında konumlandırılırlar. Bu nedenle akustik darbeler, tankın içerisinden ve dışarısından birçok farklı yoldan algılayıcıya ulaşır. Bu şekilde sinyallerin farklı yollardan alıcıya ulaşması, aynı darbenin algılayıcı tarafından farklı zamanlarda defalarca algılanmasına neden olmaktadır. Bu etki, akustik dalganın çelik duvarlardan akışkan ortama göre daha hızlı geçmesi nedeniyle de artmaktadır. Ayrıca yüksek gerilim transformatörünün çevresindeki elektriksel gürültünün şiddetli olması, akustik-elektrik algılayıcıların çıkışındaki sinyal gürültü oranını belirgin şekilde düşürmektedir. Bunlar harici ölçüm yöntemlerinin ana sakıncalarındandır (Frimpong 1994, Wang 2005).

Algılayıcının transformatör tankının içerisinde konumlandırılması çok yolluluk problemini mümkün olduğunca ortadan kaldırır. Sinyali bozabilen yansıma ve çok yolluğa karşı, akustik dalgaların akışkan ortamdan doğrudan ölçülmesi, dahili sistemlerin avantajıdır. Dahili sistemler ile ilgili problem ise, algılayıcıların

transformatör tankının içerisine yerleştirilmesinde yaşanan güçlükler ve mevcut teknolojilerin bu sistemlerin geliştirilmesindeki yetersizliğidir (Wang 2005).

3.5.2. Dahili Algılama

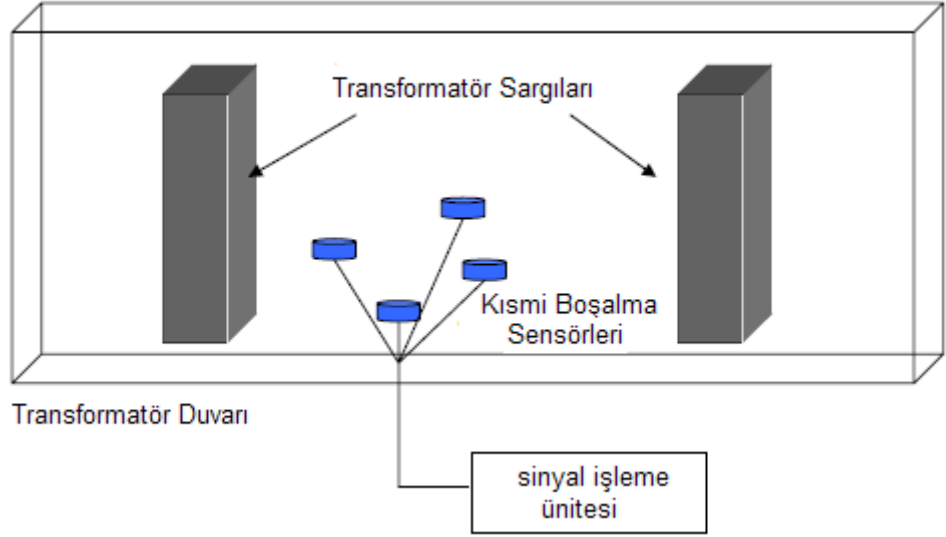
Harici algılamadaki mevcut dezavantajlar, kısmi boşalma sinyallerinin, diğer sinyaller tarafından bozulmaya uğramadan uygun dahili algılayıcılar tarafından algılanabilmeleri konusundaki çalışmaları hızlandırmıştır. Optik fiber teknolojili cihazların elektriksel ve kimyasal durağanlığı nedeni ile dahili algılayıcı olarak kullanımları idealdir (Zargari ve ark. 1996).

Çizelge 3.1. Kısmi boşalma Ölçüm Metotlarının Karşılaştırılması

	Avantajlar	Dezavantajlar
PZT Akustik Sensör	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Yüksek gerilim sınırı, buna karşılık düşük sertlik ▪ Geniş çalışma alanı ▪ Yüksek duyarlılık ▪ Düşük maliyet ▪ Basit ara yüz devresi 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Düşük sıcaklık sınırı ▪ Yüksek frekans gürültü alanlarında etkisizlik ▪ Piezo malzemesi kırılabilirliği nedeniyle kurulum zorluğu
Optik Fiberli Akustik Sensör	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Küçük boyut ▪ Yüksek sıcaklık dayanımı ▪ Yüksek duyarlılık ▪ Elektromanyetik girişimden bağımsızlık ▪ İçteki kimyasal ortamdan bağımsızlık ▪ Elektriksel pasiflik 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geliştirme safhası için hala oldukça erken olması ▪ Karmaşık ara yüz devreleri ▪ Üretimi zor

Yağ içerisindeki kısmi boşalma, yağ ortamından iletilen bir basınç dalgası oluşturmaktadır. Bu mekanik dalgayı algılama prensibine dayanan ve transformatörün içinde konumlandırılan algılayıcılar, genellikle 100 kHz ile 300 kHz aralığında çalışmaktadır. Optik fiberli algılayıcıların akustik dalgaları ölçmek için optik sinyalleri kullanması nedeniyle, algılayıcılar elektromanyetik girişime (EMI) tamamen duyarsızdır. İlerleyen bölümlerde, kısmi boşalmanın akustik algılanması için geliştirilen optik fiberli algılayıcılar detaylarıyla anlatılacaktır. Çizelge 3.1 kısmi boşalmanın algılanmasında dahili (optik fiberli algılayıcı kullanan sistemler için) ve harici (PZT

akustik algılayıcı kullanan sistemler için) algılama yöntemlerini karşılaştırmaktadır (Zhao ve ark. 1996, Blackburn ve ark. 1994, Wang 2005).



Şekil 3.4. FP İnterferometresi Tabanlı Akusto Optik Sistemin Genel Yapısı

Şekil 3.4 dahili optik fiberli akustik algılayıcıların transformatör tankına nasıl konumlandırıldığını göstermektedir. Dahili sensörler, optik fiberli bağlantı sayesinde dışarıda konumlandırılan sinyal işleme ünitesine bağlanırlar. Sensör tarafından algılanan optik işaretler, sinyal işleme ünitesi tarafından elektriksel sinyale dönüştürülerek değerlendirilir.

4. OPTİK FİBERLİ ALGILAYICILAR

Özellikle sıvı seviyesi, akış hızı, konum, sıcaklık ve basınç parametrelerinin hassas ölçümüne imkan sağlayan optik fiberli algılayıcılar; zaman içinde elektriksel olarak izlemenin zor, pahalı ya da tehlikeli olduğu ortamlarda kullanım için uygun bir donanım haline gelmiştir.

Optik fiberli algılayıcıların elektronik algılayıcılara göre avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Elektriksel olarak pasiflik
- Düşük ağırlık ve küçük algılayıcı boyutu
- Elektromanyetik girişim bağıışıklığı
- Yüksek sıcaklıkta çalışabilme
- Büyük bantgenişliğı
- Darbeye karşı mukavemet
- Yüksek hassasiyet

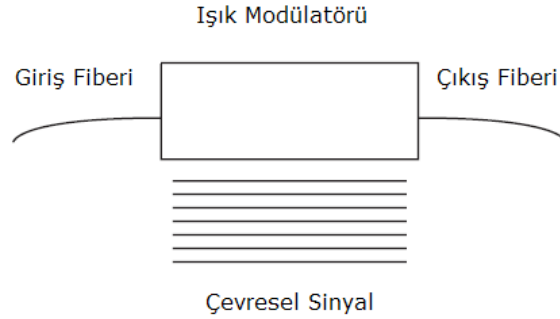
4.1. Optik Fiberli Algılayıcıların Sınıflandırılması

Optik fiberli algılayıcıları çeşitli şekillerde sınıflandırmak mümkündür. En genel olarak; ışığın fiber içerisindeki durumu göz önüne alınarak optik fiberli algılayıcılar dıştan etkileşimli (pasif) ve içten etkileşimli (aktif) olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar.

4.1.1. Dıştan Etkileşimli Algılayıcılar

Dıştan etkileşimli algılayıcılarda ışığın modülasyonu fiberin dışındaki bir bölgede gerçekleşir. Bu tip algılayıcılarda kullanılan fiberler, ışığın bir noktadan başka bir noktaya iletilmesi için kullanılırlar. Işık; yansıtma, basınç gibi çeşitli çevresel değişimler tarafından harici olarak modüle edilir. Bu nedenle bu tip algılayıcıların diğer adı da pasif (extrinsic) optik fiberli algılayıcılardır.

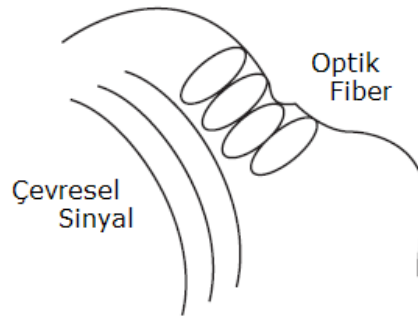
Şekil 4.1 bu tip algılayıcıların genel şemasını vermektedir. Bu tip algılayıcılarda ışık fiberden ayrıldığıında istenmeyen çevresel gürültülerden etkilenebilir.



Şekil 4.1. Dıştan Etkileşimli Algılayıcı Genel Şeması

4.1.1. İçten Etkileşimli Algılayıcılar

İçten etkileşimli algılayıcılarda ölçülecek etki doğrudan fibere uygulanır ve ışığın modülasyonu fiberin içinde gerçekleşir. Bu nedenle bu tip algılayıcıların diğer adı da aktif (intrinsic) optik fiberli algılayıcılardır. Şekil 4.2 bu tip algılayıcıların genel şemasını vermektedir.



Şekil 4.2. İçten Etkileşimli Algılayıcı Genel Şeması

İçten etkileşimli algılayıcılar, ışığın fiber içerisindeki modülasyonuna göre beş ayrı gruba ayrılabilir: İlk grup faz modülasyonunu kullanarak algılama esasına dayanır. İkincisi polarimetriktir ve kutuplanmayı ölçer. Üçüncü grup, fiber içerisinde ilerleyen ışığın sahip olduğu mod ve yönlerden yararlanarak spektral dağılımdaki değişimin ölçülmesini temel alır. Dördüncü tip algılayıcılar dalgaboyu ya da renk modülasyonunu kullanır. Son tip algılayıcılar ise optik yoğunluğun ölçülmesi prensibine dayanır. Işığın daha fazla zayıflamasını sağlamak için fiber mikro bükülmeler oluşturacak pürüzlü

yüzeyleler arasına konur ve ölçülecek çevresel etki bu yüzeylelere uygulanır. Bunlar içerisinden özellikle faz modülasyonu fiber temelli interferometrik algılayıcıların geliştirilmesinde büyük katkı sağlamıştır.

Aktif algılayıcıların büyük ve önemli bir alt sınıfı interferometrik algılayıcılardır. Yüksek performansa sahip algılayıcıların çoğu bu grup içerisinde yer alır. Çalışma kapsamında tasarımı yapılan ve incelenen algılayıcı da içten etkileşimli interferometrik bir algılayıcıdır.

4.2. Optik Fiberli İnterferometrik Algılayıcıların Sınıflandırılması

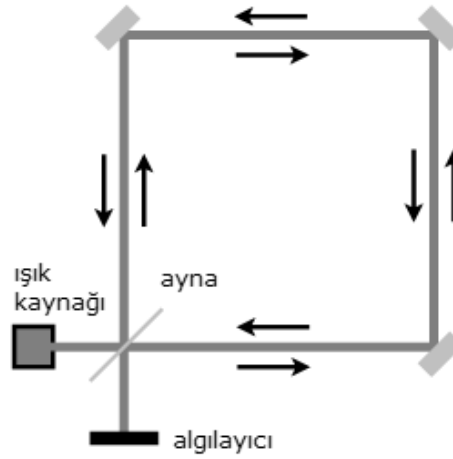
İnterferometrik algılayıcılar olarak adlandırılan bu tip aktif algılayıcılarda algılama, referans ve ölçme kolu diye ayrılan iki ayrı koldan iletilen ışığın karşılaştırılması prensibine dayanmaktadır. Fiberde oluşan faz, polarizasyon gibi parametrelerdeki değişimin ölçülmesi, algılayıcı fiber kolu içinden ilerleyen ışığın, referans kolundaki ışık ile karşılaştırıldığı bir interferometre sistemine dayanmaktadır.

İnterferometrik algılama yöntemleri Sagnac, Michelson, Mach-Zehnder ve Fabry-Perot olarak dört gruba ayrılmaktadır.

4.2.1. Sagnac İnterferometresi

Işık ile dönüş hareketinin saptanabilmesi konusundaki çalışmalar neticesinde geliştirilen bir algılama yöntemidir. Açısal bir döngü etrafında birbirine zıt yönlerde ilerleyen ışık dalgalarının oluşturduğu faz farkının ölçülmesi prensibine dayanır. Şekil 4.3, bu girişim ölçerin şematik gösterimini vermektedir.

Sistemde oluşan faz farkları dönüş hızının bir ölçüsü olan frekans farklılıklarına dönüşür.



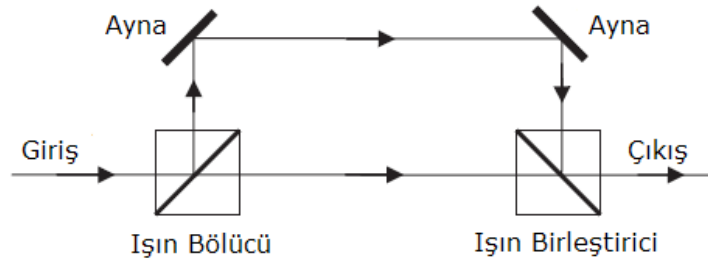
Şekil 4.3 Sagnac İnterferometresinin Şematik Gösterimi

Frekansı ω , hızı c olan sürekli dalga için ölçülen faz farkının matematiksel ifadesi eşitlik (4.1)'de verilmiştir.

$$\Delta\phi = \omega\Delta\tau = \frac{4\pi R^2\omega}{c^2}\Omega = \frac{8\pi R^2}{c\lambda}\Omega \quad (4.1)$$

4.2.2. Mach-Zehnder İnterferometresi

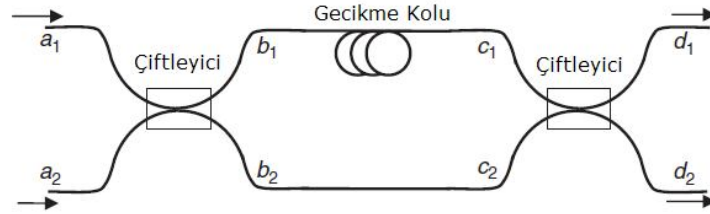
Mach-Zehnder interferometresi bir yüzyıldan fazla zamandır kullanılmaktadır.



Şekil 4.4. Serbest Boşluk Yapılı Mach-Zehnder İnterferometresinin Şematik Gösterimi

Serbest boşluk yapılı Mach-Zehnder girişimölçeri basit olarak Şekil 4.4'te verilmiştir. Yapı iki optik ışın bölücü/birleştirici ve ışının yönünü değiştiren iki aynadan oluşmaktadır. Işın bölücü gelen optik sinyali iki eşit parçaya ayırır. İki koldan ilerleyen ışık ışın birleştirici tarafından yeniden birleştirilir. Optik fiberli sistemde ise ışın bölücü/birleştirici ile fiber çiftleyici yer değiştirmektedir. Optik fiberli interferometre

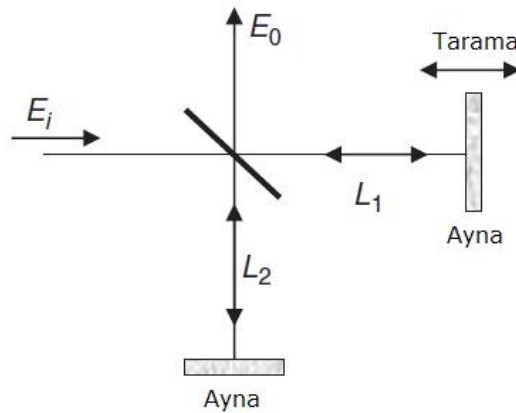
Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Fiber tabanlı interferometre, serbest boşluklu optiği kullanan Mach-Zehnder interferometresine göre çok daha kompakttır.



Şekil 4.5. Optik Fiber Tabanlı Mach-Zehnder İnterferometresinin Şematik Gösterimi

4.2.3. Michelson İnterferometresi

Michelson İnterferometrelerinin gelen yapısı Mach-Zehnder interferometresi ile benzer özelliklere sahiptir. Farkı, sistemde sadece bir adet ışın bölücü kullanılması ve optik sinyalin girişimölçer kolundan iki yönlü geçişinin olmasıdır. Michelson interferometresinin serbest boşluklu temel yapısı Şekil 4.6'da verilmiştir.

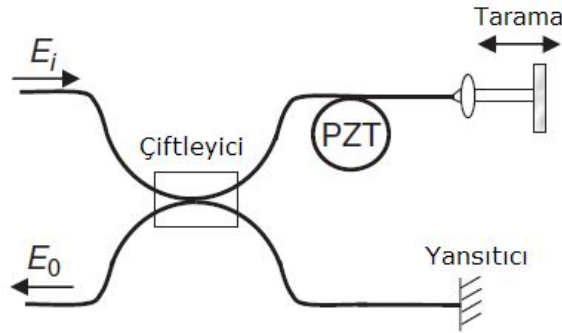


Şekil 4. 6. Serbest Boşluk Yapılı Michelson İnterferometresinin Şematik Gösterimi

Serbest boşluk yapılı Michelson interferometresinde % 50'lik yansıma özelliğine sahip kısmi yansıma aynası gelen optik ışığın ikiye ayrılması için kullanılmaktadır. Işık demeti, gelen ışına göre 45°'lik açı yapan kısmi yansıma aynası tarafından ikiye ayrılır. Ayna gelen ışının yarısını geçirirken diğer yarısını yansıtır, böylece ikiye ayrılan ışın demetlerinden biri yatay diğeri ise dikey yollar kat ederek sistem sonundaki aynalara ulaşırlar. Sistem sonundaki aynalar tam yansımalıdır. İlerleyen ışınlar son noktadan yansıdıktan sonra kısmi yansıma aynası tarafından tekrar birleştirilir. İki ışının

tekrar birleştirilmesi ile meydana gelen girişim fotodetektör tarafından algılanır. Son kısımlara konulan aynalardan birisi girişimdeki değişimi görüntüleyebilecek bir yere konumlandırılır.

Şekil 4.7’de verilen optik fiber tabanlı Michelson interferometrik yapısını, serbest boşluk yapısı ile karşılaştırdığımızda kısmi yansıma aynalarının yerini 3-dB fiber çiftleyicilerin aldığını ve ışığa optik fiberlerin yol gösterdiğini görürüz. Bunun yanı sıra iki optik fiberli koldan birinde piezo elektrik dönüştürücü kullanılarak kol uzunluğunun arttırılır. Çünkü fiber kolaylıkla eğrilebilen ve sarılabilen bir yapıya sahiptir. Bu dezavantaj PZT sayesinde aşılarak, optik fiberli interferometrenin boyutu daha küçük hale getirilmiştir.

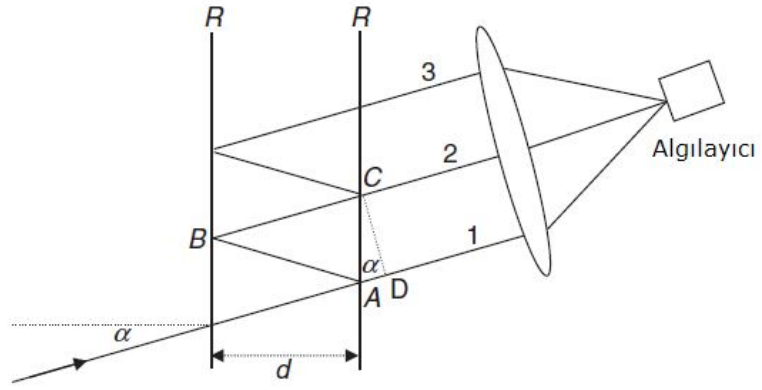


Şekil 4.7. Optik Fiber Tabanlı Michelson İnterferometresinin Şematik Gösterimi

Michelson interferometresi dalga, boylarının doğru olarak ölçümlerinde veya hassas uzunluk ölçümlerinde kullanılabilir.

4.2.4. Fabry-Perot İnterferometresi

Fabry-Perot (FP) interferometresinin genel yapısı Şekil 4.8’de verilmiştir. Sistem, yansıması R olan ve d uzaklığı ile birbirinden ayrılan iki paralel kısmi geçirgen aynadan oluşmaktadır. α geliş açısı ile aynaya ulaşan ışık demetinin bir kısmı sol aynadan geçerek A noktasında sağ aynaya ulaşır. Bu noktada ışığın bir kısmı aynayı geçerken diğer kısmı yansyarak sol aynaya geri döner ve B noktasına ulaşır. Bu süreç, ışığın çoklu yansıma kayıpları ile ciddi ölçüde zayıflamasına kadar defalarca sürer. Her bir yansımadaki ışık yoğunluğu bir öncekinin karesi oranında azalmaktadır. Burada iki ayna arasındaki her gidiş-dönüşün yayılım faz gecikmesi bulunabilir (Hui ve ark. 2009).



Şekil 4.8. Fabry-Perot İnterferometresinin Şematik Gösterimi

Michelson interferometresi kadar yaygın kullanım alanına sahip değildir ancak küçük yerdeğişirmelerin ölçümleri Michelson interferometresi yerine Fabry-Perot interferometresi kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

5. SENSÖR TASARIMI

Bu bölümde kısmi boşalmanın akustik olarak algılanması için kullanılacak optik fiberli sensörün tasarımı üzerinde durulacaktır. Öncelikle elektriksel boşalma işaretinin akustik spektrumu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalardan bahsedilecek akustik dalga yayılımının karakteristikleri açıklanacaktır. Ardından kullanılacak interferometre ve sensörün çalışma prensipleri anlatılacak, kısmi boşalmanın algılanabilmesi için kullanılan algılayıcıların gereksinimlerinden bahsedilecektir. Son olarak da bu bilgiler ışığında optik fiberli sensör tasarımı yapılacaktır.

5.1. Elektriksel Boşalma İşaretinin Akustik Spektrumu

Akustik tekniklerin, elektriksel boşalmaların algılanması ve yerinin tespit edilmesinde kullanılmasından beri akustik yayılım spektrumunun bilinmesi büyük önem kazanmaya başlamıştır.

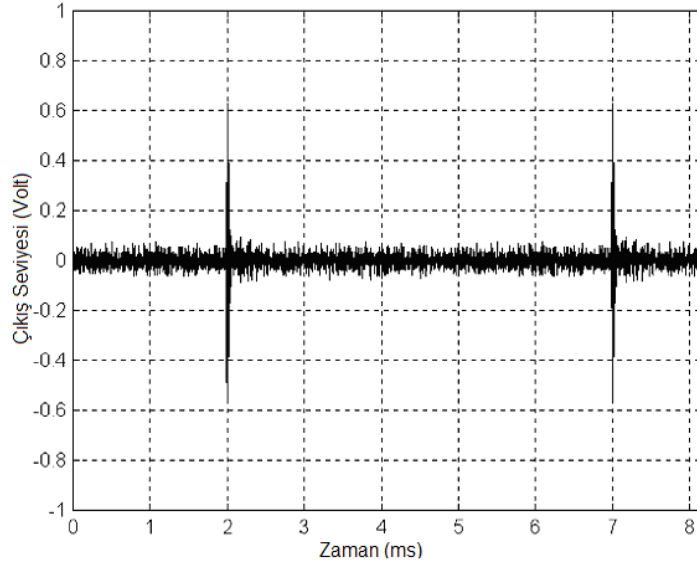
Yapılan çalışmalar kısmi boşalma akustik ölçümlerinin 20-300 kHz bazen de daha yüksek frekans değerlerinde çalışan algılayıcılar kullanılarak gerçekleştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Konu ile ilgili ilk çalışmaları 1973 yılında Harrold gerçekleştirmiştir. Harrold, frekans analizörü olarak kullandığı radyo gürültü sayacı ve 150 kHz - 2 MHz geniş bantlı dönüştürücü kullanarak yağ yalıtım sistemlerindeki boşalmaların akustik spektrumunun ölçülmesi ile ilgili çalışmalarını yayınlamıştır. Çalışmalarında yağ ortamında oluşan farklı kısmi boşalma çeşitlerinin ultrasonik spektrumlarını ölçmüştür.

Çalışmada küresel boşluk, nokta yüzey, bakır elektrot gibi farklı kısmi boşalma kaynakları araştırılmıştır. Nokta-yüzey elektrot ile oluşturulan boşalmalar için elde edilen sonuçlar gösteriyor ki, ultrasonik yayılım spektrumu 200-300 kHz arasında hızla düşmektedir. 300 kHz üzerindeki frekanslarda ise herhangi bir sinyal bileşeni

bulunmamaktadır. Küresel boşluk ve bakır elektrot kaynakları ise 2 MHz gibi daha yüksek frekanslara kadar ulaşabilen oldukça geniş bir spektruma sahiptir.

Howells ve Norton, araştırmalarında 100-500 kHz frekans aralığında çalışan piezoelektrik akustik yayılım dönüştürücüsü kullanarak ultrasonik sinyal spektrumunu ölçmüştür (Howells ve ark. 1981). Deneylerinde çekirdek içerisinde konumlandırılan mini-kapasitörü kısmi boşalma kaynağı olarak kullanmışlar ve elde edilen verileri sayısala dönüştürmek ve kaydetmek için de 10 MHz frekansında çalışan osilatör kullanmışlardır.

Elde edilen sonuçlar gösteriyor ki, kısmi boşalma ultrasonik sinyallerinin önemli frekans bileşenleri 100-160 kHz aralığındadır ve en büyük bileşeni 146 kHz frekans değerindedir. Çalışmalarında aynı zamanda çekirdek gürültüsü de denilen manyetik devre gürültüsünün spektrumunu ölçmüşlerdir. Çekirdek gürültüsünün spektrumu en büyük frekans bileşeni 48 kHz'de olmak üzere 30-60 kHz arasındadır.



Şekil 5.1. Optik Fiberli Sensör Tarafından Algılanan Tipik Kısmi Boşalma Akustik Sinyali

Liang ve Weilin, farklı boşluklar neticesinde oluşan kısmi boşalmaların frekans spektrumunu ölçmüşlerdir (Liang ve ark. 1985). Genel olarak kısmi boşalmanın akustik yayılım frekansını 20-500 kHz aralığında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Spektrum analizinin sonuçlarına göre kısmi boşalmanın akustik emisyon frekansı, güç transformatörlerindeki yağ çevrim gürültüsünün frekansından daha yüksektir. Yağ

boşlukları içerisindeki kısmi boşalmanın akustik yayılım frekansının 200 kHz'ten büyük olmasına karşın katı dielektrik malzemeler içerisindeki kısmi boşalma boşluklarındaki akustik yayılım frekansı 200 kHz'ten düşüktür ve baskın frekans değerleri 20-80 kHz aralığındadır. Sonuçlar göstermektedir ki, kısmi boşalmanın baskın frekansları kısmi boşalma yoğunluğuna göre değişmektedir. Yağ dolaşım gürültüsünün ana frekans bileşenleri ise 100 kHz'ten düşüktür.

Farklı kısmi boşalma kaynaklarının akustik yayılım sinyalleri temel alındığında, Liang ve Weilin 20 kHz-300 kHz aralığında çalışan algılayıcı kullanılması güç transformatörlerinde kısmi boşalmanın tanısında yeterli olacağı kanaatine varmıştır (Liang ve ark. 1985).

Yağ yalıtımlı güç transformatörlerinde kısmi boşalmanın akustik algılanmasının pratik uygulamalarında, yüksek sinyal gürültü oranı ve düşük sinyal kayıpları göz önüne alındığında geniş bant ile dar bant arasında kalan orta bantlı algılayıcıların kullanılması daha uygun görülmüştür. Örneğin; Kawada 180-230 kHz frekans aralığında çalışan piezoelektrik dönüştürücü kullanmıştır. Zhao ve Yuan 50-110 kHz ve 80-130 kHz olmak üzere iki bant geçiren frekans aralığını, Zhu ise 70-180 kHz aralığını seçmişlerdir. (Kawada ve ark. 1984, Zhao ve ark. 1996, Deheng ve ark. 1991)

5.2. Akustik Dalga Yayılımının Özellikleri

Akustik dalga yayılımını karakteristik empedans, yansıma katsayısı, zayıflama, kırınım ve kırılma olmak üzere beş madde ile tanımlayabiliriz.

5.2.1. Karakteristik Empedans

Birimi $kg/m^2/s$ olan malzemenin karakteristik empedansı da denilen akustik empedans, malzemenin ρ ile ifade edilen yoğunluğuna (kg/m^3) ve c ile ifade edilen sesin malzeme içerisindeki hızına (m/s) bağlıdır ve ρc ile gösterilir. Katı, sıvı ve gazların karakteristik empedansları arasında önemli ölçüde fark vardır. Örneğin çelik, su ve hava için ilgili değerler sırasıyla 39.4×10^6 , 1.43×10^6 ve 0.0004×10^6 $kg/m^2/s$ 'dir. Ultrasonik ses sinyallerinin kayıpsız olarak bir ortamdan diğerine geçebilmesi için, komşu ortamın karakteristik empedansı ile önceki ortamın karakteristik empedansının

aynı olması gerekir. Bu iki ortamın birbirine olan akustik uyumsuzluğu arttıkça ultrasonik dalgaların ortam arayüzlerindeki yansımaları büyür.

5.2.2. Yansımaya Katsayısı

Ultrasonik ses için, alt indisler ile temsil edilen iki ortam arayüzündeki yansımaya katsayısı R_0 , (5.1) eşitliği ile ifade edilir.

$$R_0 = \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (5.1)$$

Eşitlik dik geliş açısı ve boyuna dalga için geçerlidir. Yansımaya katsayısı için, çelik-mineral yağ arasında % 89, mineral yağ-hava arasında % 100, mineral yağ-polistiren arasında % 4 örnek olarak verilebilir. Mineral yağ ve çelik verileri çeliğe doğru küçük yayılım olduğunu gösterdiği halde, bu durum, tabaka kalınlığı yayılım frekansının dalgaboyunun yarısına yakın ise doğru değildir. Bu durumda oldukça yüksek yayılım olasılığıdır.

5.2.3. Zayıflama

Zayıflama, dalga difüzyon kayıplarından, kayıplar da moleküler çarpışma, viskozite, ve ısı iletiminden dolayı oluşmaktadır. Genellikle katılarda ısı üretimi nedeniyle ultrasonik ses yayılım kayıpları baskınken sıvı ve gazlarda difüzyon kayıpları daha baskındır.

Sıvı ve gazlarda akustik yayılım, nokta kaynağından çıkan küresel dalgalar olarak kabul edilir. Buradan yola çıkarak kaynaktan olan uzaklık d iken, ses yoğunluğu d^2 ile, ses basınç seviyesi ise d ile ters orantılı olarak azalır.

Mineral yağ ile transformatör yağı su ile benzer özelliklere sahiptir. Deneysel çalışmalar gösteriyor ki; farklı elektriksel boşalma çeşitleri için 150 kHz – 2 MHz frekans aralığındaki akustik yayılımlar, d uzaklığına bağlı olarak $d^{1/4}$ ve d^2 arasında bir ters orantı katsayısı ile zayıflamaktadır.

Akustik dalga yayılımının gerçekleştiği mineral yağ – preslenmiş levha yapısında, akustik dalga dik açı ile yüzeye geldiğinde preslenmiş levhanın çoğunlukla akustik

olarak saydam olduğu görülür. Westinghouse Araştırma ve Geliştirme merkezinde H.J. Thompson'ın mineral yağının içine konmuş toplam 1 cm kalınlığında 6 tabaka preslenmiş levha kullanarak yaptığı deneyler gösteriyor ki 20 kHz'lik ultrasonik ses dalgası 0.5 dB'lik bir zayıflamaya maruz kalmaktadır. 6 dB'de maksimum zayıflama ise 45°'lik geliş açısında gerçekleşmektedir.

Benzer deneyler 0.3 ve 0.9 cm'lik elik saclar kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. Dik geliş açısı için ince sacdaki zayıflama 4 dB iken, kalın sacdaki zayıflama 11 dB'dir. 50°'lik geliş açısı için ise ilgili zayıflama değerleri 3 dB ve 6 dB olarak ölçülmüştür.

Büyük miktardaki sıvıların içine daldırılmış, ince tabakalardan oluşan malzemelerin bir özelliği belirli frekanslardaki akustik dalgalar için yüksek yayılım oranlarıdır. Bu etki sac kalınlığının ultrasonik ses dalgaboyunun yarısı ya da katları olduğu zamanda gerçekleşmektedir. Mineral yağına daldırılan elik kalınlığının 1 cm'den büyük olduğu durumlar için Ogihara farklı frekanslardaki ultrasonik yayılımlar ile ilgili hesaplar yapmış ve bunları grafiklere dökmüştür (Ogihara 1964).

5.2.4. Kırınım

Sıvı içerisindeki bariyerler nedeniyle oluşan ultrasonik dalganın zayıflama derecesinin belirlenmesinde kırınımın göz önüne alınması gerekmektedir. Kırınım, ses dalgasında ortam değiştirirken meydana gelen bozulma olarak tanımlanmaktadır. Kırınımın gelen ve yansıyan dalgaların etkileşimi ile karakterize edilmektedir. Bu durum, ultrasonik algılayıcı mesafesi ile ultrasonik dalgaboyunun karşılaştırılabilir olduğu zamanlarda gerçekleşmektedir. Buna mineral yağında dönüştürücüden 2.5 cm uzaklıktaki 80 kHz ($\lambda = 1.75$ cm) ses dalgası örnek olarak verilebilir. Ayrıca ses dalgası cismin hemen hemen tamamını geçtiğinde dalganın eğilmesi ve yönünü değiştirmesi nedeniyle de kırınım meydana gelmektedir. Bu da ses kaynağının yerinin bulunması için kullanılan yöntemler için yanılıcı sonuçlar verebilir.

5.2.5. Kırılma

Ultrasonik dalga bir ortamdan diğerine geçerken dalganın hızına bağlı olarak kırılma ya da yönünde sapma meydana gelir. Oluşan kırılma eşitlik (5.2)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (5.2)$$

Burada θ_1 ve θ_2 sırasıyla geliş ve yansıma açılarını, c_1 ve c_2 ise akustik dalganın gelen ve yansıyan ortamlardaki hızlarını ifade etmektedir. Ses dalgasının 10° 'lik geliş açısı ile çarptığı, mineral yağ ($c \cong 1400$ m/s) içerisine daldırılmış çelik plaka ($c \cong 6000$ m/s) ele alalım. Dalga çelikten normal ile 48° 'lik açı yaparak yansır ve plakanın diğer yüzünde yağ içerisinde görünen dalga ise tekrar normal ile 10° 'lik açı yapar. Ses hızlarının oranı $1400/6000=0.233$ ve geliş açılarının $\theta_1=13.5^\circ$ ve $\theta_2=90^\circ$ olduğu durumlarda tam yansıma meydana gelir ve yağ – çelik arayüzünde herhangi bir enerji transferi gerçekleşmez (Zhiqiang 1999).

5.3. Optik Fiberli İnterferometrik Akustik Sensörün Çalışma Presibi

1970'lerden itibaren geliştirilmeye başlanılan optik fiberli sensörler genellikle üç temel parametre olan genlik, polarizasyon ve faz modülasyonuna göre yoğunluk sensörleri, polarimetrik sensörler ve interferometrik sensörler olarak gruplandırılırlar.

Yoğunluk sensörlerinin avantajları yapısının basitliği ve çok modlu fiber teknolojilerine uyumluluğu olarak sıralanabilir. Bazı durumlarda bu avantajlara duyarlılıkda eklenir.

Polarimetrik fiber sensörler, tek modlu fiber içerisindeki iki dik polarizasyon durumu arasındaki faz farkının algılanması ilkesine dayanır. Uygun polarizasyon girişi için, HE_{11} modları arasındaki indüklenmiş akustik faz farkı, fiber boyunca yayılan ışın demetinin polarizasyon dönmesi olarak da düşünülebilir. Polarizasyon analizörü, uyarılmış çift kırınım ile orantılı yoğunluk modüleli çıkış sağlar. Akustik algılama için, polarimetrik fiber sensörler fiber çapı ile dalga boyunun karşılaştırılabileceği yüksek

frekanslı ultrasonik bölgede kullanılırlar. Bu durumda, fiberdeki elastik zorlanma anizotropiktir.

Akustik, manyetik ya da dönme gibi nicelikleri algılamada kullanılan interferometrik sensörlerde ise teorik olarak mevcut teknolojilerin üzerinde bir duyarlılık artışı olduğu söylenebilir. Optik fiber interferometrelerinden faydalanılarak yapılan akustik sensörlerde de bu teorik kestirim doğrulanmaktadır.

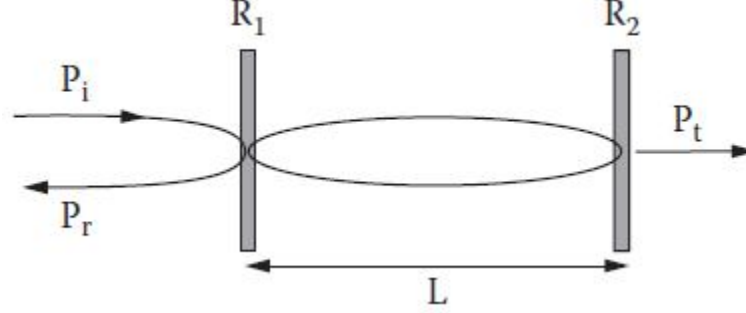
Optik fiberli interferometrik akustik sensörlerle ilgili yapılan ilk çalışmalar Bucaro ve Cole tarafından 1977 yılında gerçekleştirilmiş (Bucaro ve ark. 1977, Cole ve ark. 1977) ve bundan sonra, bu alanda hızlı bir ilerleme kaydedilmiştir. İyi geliştirilmiş akustik fiber sensörler, hidrofona gibi su altındaki düşük frekanslı (2 kHz altı) ses dalgalarını algılamak için kullanılırlar. Kısmi boşalmanın ultrasonik yayılımını algılayan yüksek gerilim mühendisliğinde kullanılan optik fiberli akustik sensör uygulamaları ciddi avantajlara sahiptir.

Ortamdaki akustik dalga yayılımı sayesinde ilerleyen optik ışının faz modülasyonu sesin varlığını algılayabilmek için kullanılır. Bu etki, basınç değişiminden kaynaklanmaktadır ve optik interferometreler yardımı ile algılanabilmektedir. Ölçülebilir faz kayması üretmek, akusto-optik (AO) çiftlenme katsayısının zayıf olması nedeniyle genellikle yüksek basınç gerektirir. Bununla birlikte, ışın demetinin faz kayması akustik basınca ve etkileşim uzunluğuna bağlıdır. Bu nedenle, uzun, düşük kayıplı optik fiberin temin edilebilirliği etkileşim uzunluğunun arttırılmasına olanak sağlar.

İlk optik fiberli akustik sensörler Mach-Zehnder interferometresine göre çalışmaktadırlar. Bu interferometrede lazer ışını, algılama ve referans fiberinde ilerleyecek şekilde bölünmekte ve ışın kaynağı olarak da He-Ne gaz lazerleri kullanılmaktadır. Birbirinden ayrılan ışın, fiberi geçtikten sonra tekrar birleştirilerek fotodetektör yüzeyinde girişime izin verilmektedir. Ardından uygun bir demodülatör yardımı ile asıl faz modüleli sinyal algılanmaktadır. Halen birçok uygulama alanı olan bu interferometre zamanla yerini çalışma prensibi aynı ancak daha gelişmiş bir yöntem olan Fabry-Perot'a bırakmıştır (Zhiqiang 1999).

5.3.1. Fabry Perot İnterferometresi

Fabry Perot interferometresi Şekil 5.2’de de görüldüğü gibi aralarında L kadarlık mesafe bulunan R_1 ve R_2 yansımalarına sahip iki aynadan oluşmaktadır.



Şekil 5.2. P_i , P_r ve P_t Sırasıyla Gelen, Yansıyan ve İletilen Güç Olmak Üzere Fabry-Perot İnterferometresi

Bu yöntemin 19. yüzyılın sonlarına doğru bulunmasından önce Fabry-Perot interferometresinin boşluk-optik versiyonu, yüksek çözünürlüklü dalgaboyu ölçerlerde sıklıkla kullanılmaktaydı. Fabry-Perot interferometresinin optik fiberli modeli ilk kez 1980’lerin başında kullanılmıştır. 1980’lerin sonlarına doğru ise fiber tabanlı Fabry-Perot interferometresi sıcaklık, basınç gibi fiziksel büyüklüklerin algılanmasında kullanılmaya başlanmıştır. Algılamada kullanılan diğer interferometrelerin (Mach-Zehnder, Michelson, Sagnac) aksine, Fabry-Perot sensörün yapısını ve verinin yorumlanmasını karmaşık hale getiren etkenleri içermez. Bu nedenle Fabry-Perot interferometresi gelişmiş interferometrik sensör uygulamalarında en çok tercih edilen yöntemdir. Bu yöntemin birçok akıllı sensör uygulamaları için ideal dönüştürücü olduğu görülmektedir. Bu nedenle proje kapsamında bahsedilecek sensör Fabry-Perot interferometresi temel alınarak tasarlanmıştır.

Yağ dolu transformatörlerdeki kısmi boşalmaların yerinin ve şiddetinin akustik yayılım ile belirlenebilmesi için, fiber sensör yüksek duyarlılığa sahip olmalı, 50 kHz – 300 kHz frekans aralığında çalışmalı ve yalnızca dielektrik malzemeden yapılmalıdır (Yin ve ark. 2008). Tez kapsamında tasarlanan Fabry-Perot interferometrik sensörü tüm bu gereksinimleri karşılamaktadır.

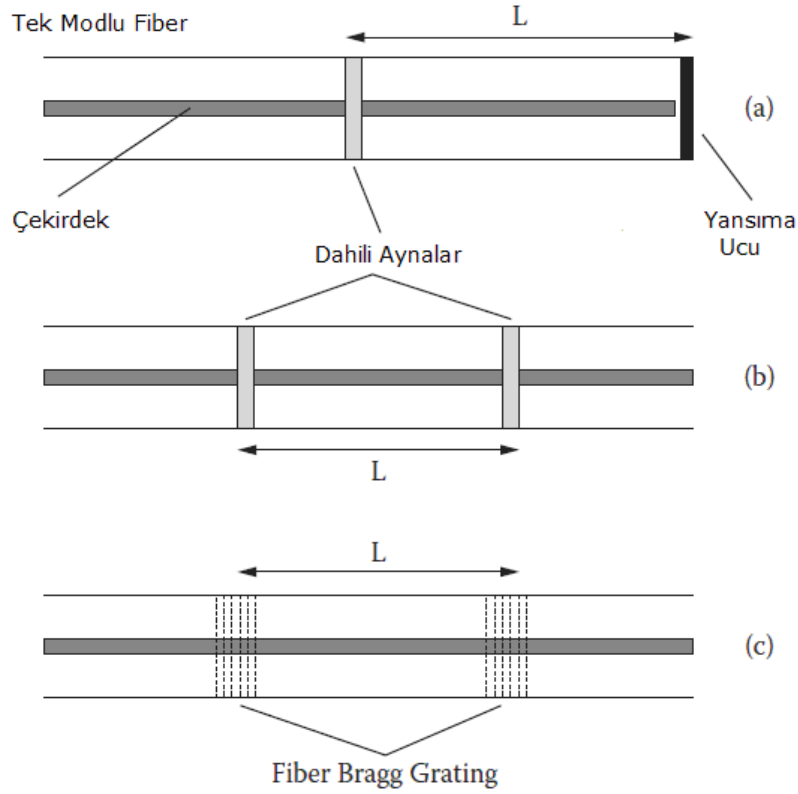
5.3.2. Fiber Fabry-Perot Sensör Konfigürasyonları

Fabry-Perot interferometreleri hakkındaki ilk çalışmalar 1980'lerin başlarında görülmeye başlanmıştır. Bu ilk deneylerde, interferometre çukurları ayna görevi görecektir şekilde tek modlu dielektrik fiberlerden ya da yarıklı fiber sonlardan oluşmuştur. He-Ne lazerinden çıkan ışık fiber interferometresine odaklandıkça, yansıma ya da iletim karakteristikleri takip edilmiştir. Bu interferometrelerin uzama ve sıcaklığa karşı beklenen yüksek duyarlılığı gözlemlenmiştir.

Fiber Fabry-Perot sensörler genel olarak dahili ve harici olarak iki gruba ayrılırlar. Her iki gruptaki sensörlerde de, fiber taşıyıcıdan interferometreye, interferometreden de fotoalıcıya ışık iletir. Dahili fiber Fabry-Perot sensörlerde (FFPI), iki aynayı tek modlu fiber ayırır ve ölçülen değer fiberin içinde ilerleyen ışığın gidebileceği optik uzaklığı etkiler. Bir harici fiber Fabry-Perot sensöründe (EFPI) iki ayna genellikle hava boşluğu ya da fiber dışındaki bir katı madde ile ayrılmıştır. Bu nedenle bir EFPI sensöründe ölçülen değer, interferometreye gelen ve dışarı giden ışığı yayan fiber haricindeki bir ortamda ışığın gidebileceği optik uzaklığı etkiler. FFPI ve EFPI'larda boşluğun optik uzaklığı ölçülen değer tarafından etkilenir. Dahili ve harici Fabry-Perot interferometreleri, yansıyan ya da iletilen ışık bir fotodedektör tarafından ölçülen değeri işleyerek elektrik sinyaline dönüştürülecek şekilde tasarlanmıştır.

5.3.2.1. Dahili Fiber Fabry-Perot Interferometrik Sensörleri

FFPI sensörleri için kullanılan üç farklı yapı Şekil 5.3.'te gösterilmiştir. En basit durumda, Şekil 5.3 a, aynalardan birini fiberin parlatılmış ya da yarılmış ucu oluştururken diğer ayna fiberin içindedir. Şekil 5.3b'de en fazla kullanılan ve üstünde en fazla çalışılan dahili sensör tipi vardır. Bu yapı iki dahili ayna ve yansıtmayan fiber ucundan oluşmaktadır. Kesilmiş ya da kırılmış fiber ucu genellikle çok düşük yansıtıcılık göstermektedir ve alternatif olarak bu uç herhangi bir açıda parlatılabilir. Son olarak interferometre boşluğu Bragg ızgaralarıyla oluşturulabilir. (Şekil 5.3.c).



Şekil 5.3. Dahili Fabry-Perot İnterferometreleri, (a) dahili ayna ve fiber sonu (b) iki dahili ayna (c) İki fiber Bragg ızgarası. Her biri için optik boşluk uzunluğu L 'dir.

FFPI'larda dahili aynaların kullanımı ilk olarak 1987'de rapor edilmiştir. Dahili aynalar, devamlı uzunluktaki fiberlerin yansıtıcıları olarak oluşturulmuşlardır. Dahili aynalar, kılıfsız fiberler arasındaki kötü füzyon bağlantılarıyla ya da kılıfsız bir fiberin ince bir dielektrik ya da metalik kaplı fiberle füzyon bağlanmasıyla üretilmektedir.

Dielektrik kaplamalarla oluşturulmuş dahili aynalar en iyi mekanik özellikleri, en düşük optik kaybı ve en geniş aralıktaki yansıtma değerlerini göstermektedir. En çok kullanılan ayna malzemesi, 2.4 (kaynaşmış silika için 1.46) kırılma indisine sahip olan TiO_2 'dir. TiO_2 filmleri, düzlemsel kısa radyo frekansı yayan lamba sistemi kullanarak film kaplamasıyla ya da elektron ışını buharlaşmasıyla üretilir. Tipik film kalınlıkları 100 nm civarındadır. Füzyon bağlantısı normal bağlantılara göre düşük ark akımlarında çalışır ve ayna oluşturmak için çok sayıda bağlantı kullanılır. Ayna yansıtıcılığı genel olarak bağlantı sayısı arttıkça tekdüze bir şekilde azalır, bu sayede yansıtıcılık oranı % 1'in çok daha altından % 10'a kadar olan bir aralıkta seçilebilir. Dikkatli üretim sayesinde bu aynalardaki kayıplar % 1'in altında (0.05 db) tutulabilir. % 10'dan büyük

dahili ayna yansıtıcılığı oranı elde etmek için, magnetron film kaplama yöntemiyle elde edilmiş çok katmanlı TiO_2/SiO_2 filmleri kullanılır. FFPI'da çok katmanlı aynalar kullanılarak 1.3 μm dalgaboyunda % 86 oranında yansıtıcılık oranı elde edilebilmiştir.

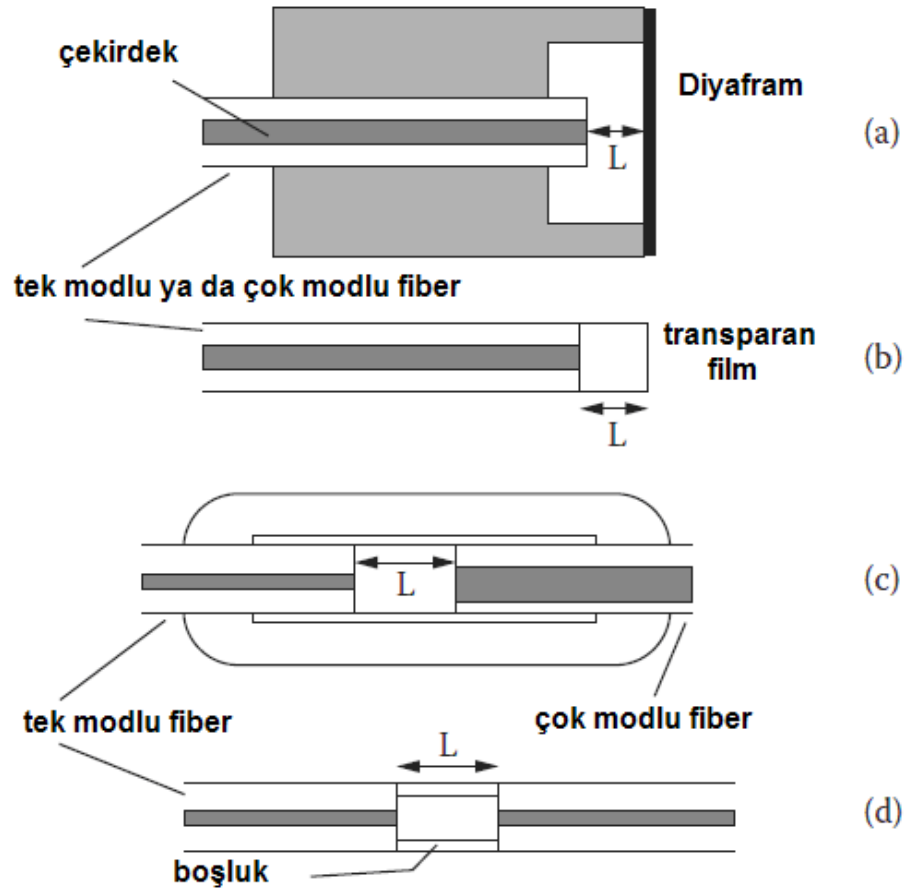
Bir FFPI sensöründe boşluk, FBG (fiber Bragg ızgarası) aynaları kullanılarak da elde edilebilir. Bu aynalar alçak ve yüksek kırılma indisli bölgelerden oluşmuştur. FBG aynaları milimetrelerle tabir edilebilecek uzunluklarda yayılmıştır. Bu uzunluklar dahili dielektrik aynaların uzunluklarından kat kat fazladır. Fiber çekirdeği, algılama alanındaki ışığı sınırladığından dolayı, kırınım bir FFPI sensörü için boşluk uzunluğunu sınırlamaz. 100 μm ile 1 m arasındaki boşluk uzunlukları mevcut olmasına rağmen ve 1 cm civarındaki uzunluklar yaygın şekilde kullanılmaktadır.

5.3.2.2. Harici Fiber Fabry-Perot Interferometre Sensörleri

Şekil 5.4 (a)'da verilen en eski ama en fazla kullanılan EFPI konfigürasyonunda, fiberin yarılmış ya da parlatılmış ucuna yakın konumlandırılmış bir diyafram kullanır. Hava boşluğu diyafram ve fiber ucunun yansıtıcı yüzeyleri ile sınırlandırılmıştır. Fiber istenen boşluk uzunluğu elde edilecek şekilde konulduktan sonra, destekleyici yapıya kalıcı olarak bağlanır. Bu tip kısa boşluk uzunlukları bu sensörlerin çok modlu fiber ile LED ışık kaynaklarının beraber çalışabilmesini sağlar.

Şekil 5.4 (b)'de verilen konfigürasyonda, saydam bir katı maddeden oluşmuş film kullanılmaktadır. Burada boşluk; fiber-film ve fiber-hava arayüzleri tarafından sınırlanmış şekilde filmin içerisindedir. Bir başka çokça kullanılan harici Fabry-Perot (EFP) konfigürasyonunda(Şekil 5.4 (c)), iki adet yarılmış ya da parlatılmış fiber yüzeyi arasında oluşan hava boşluğu kullanılmaktadır, burada fiberler boş bir tüpe uç uca hizalanmıştır. Son olarak ILFE(in-line fiber etalon) olarak adlandırılan EFPI konfigürasyonunda(Şekil 5.4 (d)), iki tek modlu fiber arasına bağlanmış boş bir fiber bölmesi içindeki bir hava boşluğu kullanılmaktadır.

EFPI içindeki ışık sınırlandırılmadığından, kırınım nedeniyle interferometrede oluşan optik kayıp nedeniyle, çoğu uygulamalarda optik boşluğun uzunluğunu birkaç yüz mikron olacak şekilde sınırlanmaktadır.



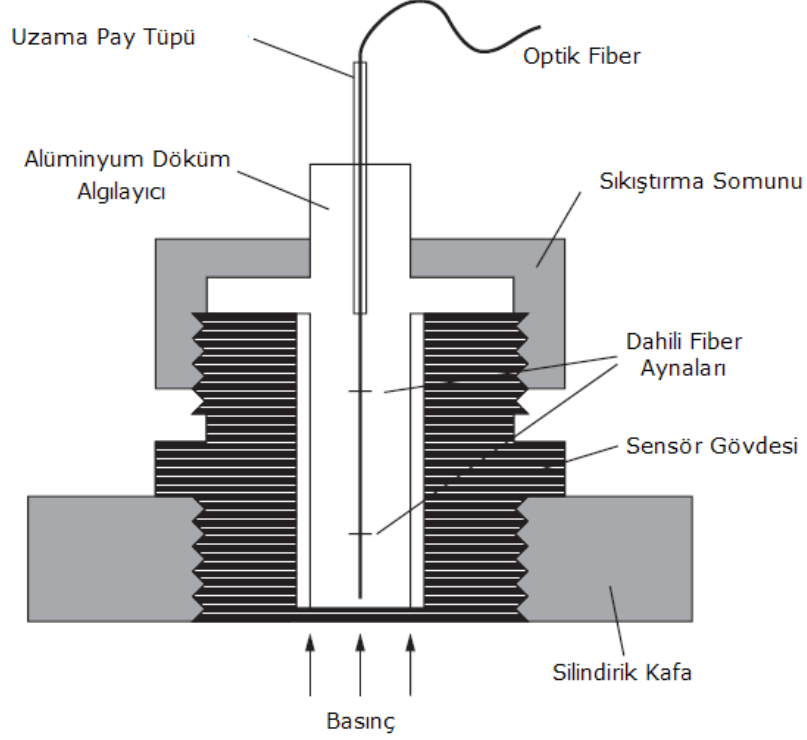
Şekil 5.4. Harici Fabry Perot Sensör Konfigürasyonları

5.3.3. Fabry-Perot İnterferometresi Tabanlı Basınç Ölçüm Sistemleri

Fabry-Perot interferometresi kullanılarak kısmi boşalmanın akustik olarak algılanması basınç tabanlı ölçüm sistemine dayanır. Bu nedenle bu bölümde Fabry-Perot interferometresi kullanılarak basınç ölçümü ile ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Bir sonraki bölümde bu çalışmalar ışığında geliştirilen kısmi boşalma algılama yöntemi anlatılacaktır.

Yüksek hassasiyetli FFPI sensörleri ilk olarak içten yanmalı motorların gaz basınç ölçümlerinde kullanılmıştır. Birçok motorda, yakıt enjektör valfi gibi yanma odası basıncına maruz kalan elemanlar silindir kafasına civatalanacak şekilde imal edilmektedir. Motor çevrimi esnasında civatalardaki boyuna uzamanın değişkenliği yanma odası basıncıyla yaklaşık olarak doğru orantılıdır. Bu nedenle, bu civatalardan

birinin içine açılmış bir deliğin içine yapıştırılan FFPI motor basınç ölçümleri için kullanılabilir. kullanılabilmektedir.



Şekil 5.5. Basınç Algılama için Geliştirilmiş Fabry-Perot İnterferometresi
Tabanlı Sensör Kafası

Yakın zamanlarda, Şekil 5.5'teki gibi hazırlanmış dahili algılama sensörü geliştirilmiş, FFPI ölçüm elemanı bir metal çubuğa ekseni boyunca yerleştirilmiştir. Daha sonra bu sensör 0.5 mm duvar genişliği olan bir metal muhafazanın içinde konumlandırılmıştır. Sensör silindir kafasının içindeki vidalanmış bir açıklığa monte edilmiştir. Hiçbir FFPI yanma sensöründe harici soğutma yoktur. Bu sensörler 200-300 °C'ye tabi tutuldukları doğal gazla çalışan büyük motorlarda yüz binlerce sensör saatine denk gelen zaman süresince çalışmıştır.

Bildirilmiş ilk optik fiberli Fabry-Perot interferometresiyle basınç ölçümleri Şekil 5.4(a)'daki EFPI-diyafraam konfigürasyonunu kullanmıştır. Diyafram, içine çok modlu fiber monte edilmiş, camdan oluşan alt bir tabakaya bağlanmış ince (4 µm) bir silikon zardan oluşmuştur. Boşluk uzunluğu 1.4 µm – 1.7 µm aralığındadır. Bu sensör beyin travması geçiren hastalardaki kafatası içindeki basıncı takip etme gibi

biyomedikal uygulamalar için geliştirilmiştir. Bu nedenle çok yüksek hassasiyete sahiptir. Bu çalışma bundan sonra çeşitli alanlarda kullanılan basınç ölçümlerine de temel teşkil etmiştir.

Diyafram tabanlı EFPI'lar duyarlı mikrofonlarda da kullanılmaktadır. Diyafram olarak metal kaplı Mylar zar kullanılmakta ve algılama aralığı 20 Hz – 30 kHz aralığında değişmektedir. Farklı EFPI mikrofonlarda ise çok modlu fiber ucuna basınç algılayıcı olarak 50 μm kalınlığında polietilen tereftalat (PET) konulur (Yin ve ark. 2008, Wang ve ark. 2004).

5.4. Kısmi Boşalmanın Algılanması ve Yerinin Belirlenmesinde Kullanılan Optik Fiberli Algılayıcıların Gereksinimleri

Daha önceki bölümlerde güç transformatörlerinin içerisinde oluşan kısmi boşalma işaretinin optik fiberli algılayıcılarla belirlenmesinin avantajlarına değinilmiştir. Bu bölümde ise sistem nedeniyle oluşan dezavantajlar ve gereksinimlere değinilecektir.

Optik fiberli akustik algılayıcılar ilk olarak su altı sistemlerinde kullanılan hidrofor uygulamaları için geliştirilmiştir. Yağ dolu güç transformatörlerinde, kısmi boşalmanın algılanmasının ve yerinin belirlenmesinin optik fiberli algılayıcı tasarımı açısından su altı sistemlerine nazaran bazı özel zorluklar mevcuttur. Bu bölümde bu tip uygulamalar için tasarlanacak fiber algılayıcıların gereksinimleri verilecektir.

5.4.1. Yalıtkan Yapı ve Yüksek Yalıtım Dayanımı

Optik fiberli algılayıcının algılama kafasının transformatör tankının içerisinde konumlandırılması nedeniyle yalıtkan malzemeden yapılması gerekir. Böylece algılayıcı, transformatörün yalıtım sisteminden etkilenmeyecektir. Çoğu zaman algılayıcı kafası elektriksel alan yoğunluğunun çok güçlü olmadığı transformatör tank duvarlarının yakınlarında konumlandırılır. Fakat bazen algılayıcı kafası, sarımlardaki yalıtım malzemeleri içerisinde bulunan boşluklarda oluşan küçük boşalmaları algılayabilmek için yüksek elektriksel alana sahip sargıların yakınına yerleştirilir. Tüm bunlar nedeniyle algılayıcı kafası yüksek yalıtım dayanımına sahip olmalıdır.

5.4.2. Frekans Aralığı

Mineral yağı içerisinde oluşan kısmi boşalma ultrasonik sinyali geniş frekans spektrumuna sahiptir. Spektrumun dağılımı elektrodun tipine ve boyutuna bağlıdır. Küçük kısmi boşalma genliği, yüksek frekans demektir. Kısmi boşalma kaynağının ultrasonik spektrumu, transformatör tank duvarlarının dışına konumlandırılan algılayıcıların kullanıldığı bir deney ile ölçülmüştür. Buradan açıkça görülmüştür ki, 20 kHz – 300 kHz frekans aralığında çalışan algılayıcılar güç transformatörlerinde kısmi boşalmanın tanısı için yeterlidir.

Ancak transformatör tankı transfer fonksiyonunun uniform olmaması nedeniyle tankın dışarısından ölçülen spektrum ile tankın içerisinden ölçülen gerçek spektrum arasında fark vardır. Yine de pratik uygulamalarda 20 kHz – 300 kHz frekans aralığının algılayıcı için uygun bir varsayım olduğu düşünülebilir.

Bununla birlikte, yüksek gerilim transformatörlerinde çekirdek gürültüsü, yağ çevrim gürültüsü gibi çevresel gürültüler mevcuttur. Bu gürültülerden kaçınmak için algılayıcı belirlenen alt frekans değerinden 50 kHz daha yüksekte çalışmalıdır. Yapılan deneysel ve teorik çalışmalar ile çevresel koşulların hepsi göz önüne alındığında, yağ dolu güç transformatörlerinde kısmi boşalma tespiti için kullanılacak ultrasonik algılayıcıların uygun çalışma frekansı 50 kHz – 300 kHz olarak belirlenebilir.

5.4.3. Duyarlılık

Mineral yağı içerisindeki ses basınç seviyesi ile kısmi boşalma genliği arasındaki ilişkiyi ilk olarak Harrold araştırmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu 1 pC'luk kısmi boşalma kaynağından 10 cm uzaktaki sesin basıncı 0.2 Pa iken 10 pC kısmi boşalma kaynağı için aynı değer 0.6 Pa'dır. Mineral yağı içerisinde 1 pC'dan daha düşük boşalmalar ise oluşmamaktadır.

Akustik basıncın kaynaktan uzaklık ile ters orantılı olduğu göz önüne alındığında, yağ içerisindeki 1 pC'luk boşalmanın 1 metre uzaklıktan algılanabilmesi için algılayıcı hassasiyetinin 0.02 Pa olması gerekmektedir. Daha küçük boşalmaların algılanması isteniyorsa hassasiyetin daha yüksek olması gerekir. Ancak pratikte güç transformatörleri için ilgili boşalma seviyesi onlarca hatta yüzlerce pC'lara kadar

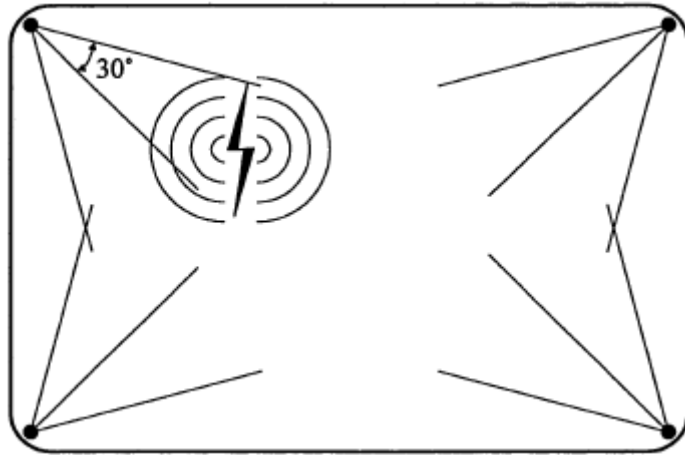
ulaşabilmektedir. Bu nedenle de gerekli duyarlılık düşmektedir. 1 pC-50 pC değerleri kısmi boşalmanın en çok görüldüğü aralıktır. Tüm bu değerler göz önüne alındığı takdirde tipik duyarlılık gereksinimi 0.2 Pa olarak kabul edilebilir.

5.4.4. Yönlülük

Üçgenleme yöntemi kullanılarak kısmi boşalmanın yerinin belirlenmesi için, algılayıcı ultrasonik dalganın geliş açısının geniş bir aralığına cevap verebiliyor olmalıdır. Başka bir deyişle algılayıcı düzgün bir doğrusallığa sahip olmalıdır. Eğer algılayıcı kafası şekilde gösterildiği gibi transformatör tankının köşelerine konulursa, algılayıcı cevabının en az 30°'nin içerisinde aynı olması gerekir (Şekil 5.6).

Yönlülük algılayıcının geometrik yapısına bağlıdır. Halka şeklinde fiber sarımlı akustik algılayıcılarda, ultrasonik dalganın dalgaboyu sarımın çapından küçük olduğunda algılayıcının yönlülüğü izotropik değildir. Daha yüksek akustik frekans daha keskin yönlülük demektir.

Kısmi boşalmanın yerinin yönlülük ile bulunabilmesi için sarım çapının yağ içerisindeki akustik dalgaboyundan küçük olması gerekir. Akustik dalganın transformatör yağı içerisindeki hızı ortalama 1400 m/s'dir. 100 kHz'lik ultrasonik dalga için dalgaboyu 14 mm'dir. 300 kHz için ise dalgaboyu sadece 5 mm'dir.



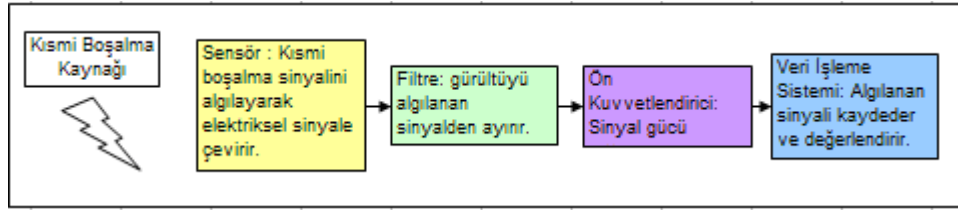
Şekil 5.6. Dört Köşesine Algılayıcı Yerleştirilmiş Transformatör Tankı

Fiber kullanarak 10 – 20 mm çapında fiber bobini yapılabilmektedir. Sarım boyutundaki azalma eğilme kaybı ile sınırlandırılmaktadır. Bu nedenle yüksek

duyarlılık için büyük fiber uzunluğu gerekmektedir. Buradan yola çıkarak duyarlılık ile yönlülük arasında bir takas olduğunu söyleyebiliriz. Yüksek duyarlılığın istendiği durumda büyük fiber uzunluğuna ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece sensör kafasının boyutları büyürken yüksek frekanslardaki yönlülüğü keskinleşir. Sensör kafasının yönlülüğü göz önünde bulundurulması gereken en önemli detaylardan biridir (Zhiqiang 1999, Macalpine ve ark. 2002).

5.5. Optik Fiberli Sistem Tasarımı

Herhangi bir kısmi boşalma algılama sisteminin temel yapısı sensör, filtre, ön kuvvetlendirici ve veri işleme sistemi olmak üzere dört bölümden oluşmaktadır (Şekil 5.7). Tüm kısmi boşalma algılama sistemleri; sinyali algılayacak bir sensör ya da dönüştürücüye, sinyali gürültüden ayıracak bir filtre devresine, sinyalin gücünü arttıracak bir ön kuvvetlendiriciye ve algılanan sinyali kaydedecek ve değerlendirecek bir veri işleme sistemine ihtiyaç duymaktadır (Zargari ve ark. 1998).

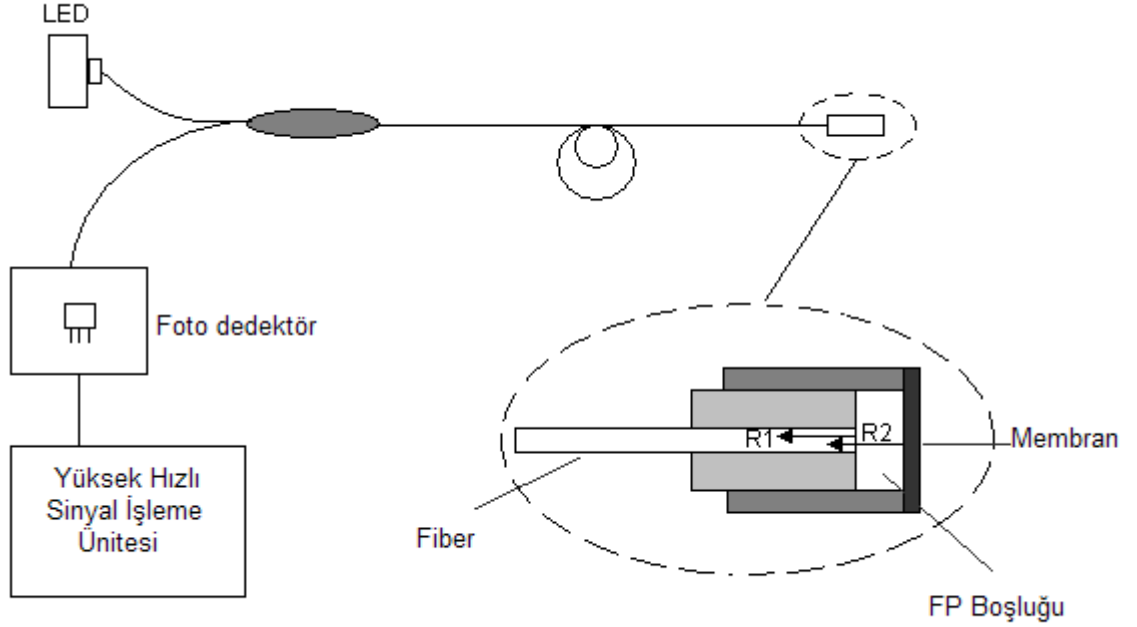


Şekil 5.7. Kısmi Boşalma Algılama Sistemlerinin Genel Yapısı

Şekil 5.8 iletim ortamı tek modlu fiber olan Fabry-Perot akusto optik kısmi boşalma algılama sisteminin genel yapısını göstermektedir. Sistem bir sensör, 1550 nm ya da 1310 nm dalgaboyunda çalışan bir yarı iletken ışın verici, bir optik alıcı (fotodiyot) ve bileşenler arasındaki bağlantıyı sağlayan tek modlu fiberden oluşmaktadır. Yarı iletken ışın vericiden hemen sonra konulan optik yalıtıcı (fiber kuplör) kaynağa gelen optik geribeslemeyi azaltmak için kullanılmaktadır.

Işın vericiden çıkan ışık, ilk olarak fiberin sonundan yansır. Kalan ışık hava boşluğundan ilerleyerek diyafram yüzeyine çarparak kısmen geri yansır. Bu çoklu yansımalar aynı fiber üzerinden geçerek optik alıcıya ulaşır. Burada fazı karşılaştırılır. Sistemin genel çalışma prensibi, ışın vericiden çıkarak algılayıcıya ulaşan optik sinyalin

sensörün yansıma katmanlarından farklı zamanlarda yansıması sonucu fazındaki değişimin karşılaştırılması olarak özetlenebilir (Lazarevich 2003, Deng ve ark. 2001).



Şekil 5.8. FP İnterferometresi Tabanlı Akusto Optik Sistemin Genel Yapısı

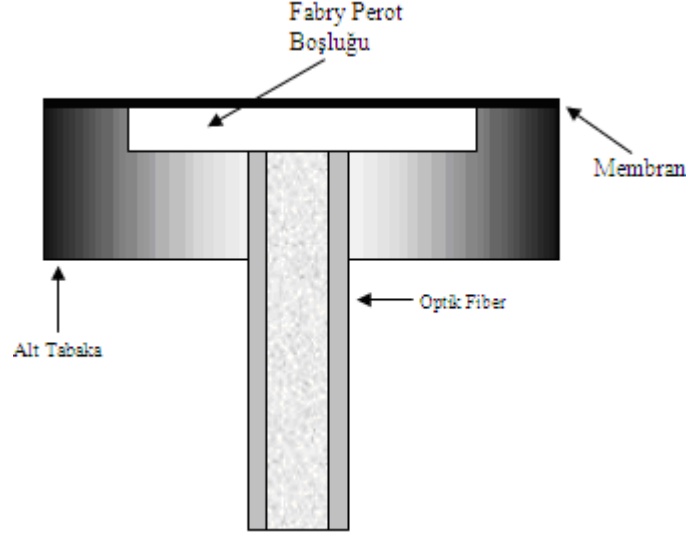
5.6. Optik Fiberli Sensör Tasarımı

Tez kapsamında tasarlanan sensör, tek modlu optik fiber içerisine konulan yansıtıcı aynaları kapsayan Fabry Perot interferometresini içermektedir. Bu interferometre faz değişikliklerini yansıyan ve iletilen optik güce dönüştürür. Optik sensörün yapısı Şekil 5.9’da şematik olarak gösterilmiştir.

Bu yapıda yansıma ortamı şekilden de görüldüğü üzere fiber, hava boşluğu ve membran olarak tanımlanabilir. Bu bölümde optik fiberli sensörün çalışma prensibi üzerinde durulmuş, sonraki bölümlerde de sistemde kritik öneme sahip olan sensör membranı ve Fabry-Perot boşluğunun değişimi ile ilgili analizler yapılmıştır.

Sensörün çalışma prensibi şu şekilde özetlenebilir: Fiber içerisinde ilerleyen optik ışının bir kısmı fiber sonundan yansırken, kalan kısmı Fabry-Perot boşluğundan geçerek kısmi boşalma nedeniyle meydana gelen akustik dalganın membranda

oluşturduğu çöken yüzeyden geri yansır. İki farklı yüzeyden yansıyan ışın demetleri bir faz farkı meydana getirir. Bu faz farkı, sesin varlığını algılayabilmek için kullanılır. Yağ dolu transformatörlerdeki kısmi boşalmaların yerinin ve şiddetinin akustik yayılım yardımı ile belirlenebilmesi için, fiber sensör yüksek duyarlılığa sahip olmalı, 50 kHz – 300 kHz frekans aralığında çalışmalı ve yalnızca dielektrik malzemeden yapılmalıdır (Wang 2005, Chen 2010).



Şekil 5.9. Optik Fiberli Sensör Kafasının Genel Yapısı

5.7. Optik Fiberli Sensör Membran Tasarım Parametreleri

Son on yılda, silikon basınç sensörlerinin popülaritesi giderek artmaktadır. Genellikle, bu mikro-elektro-mekanik sistem (MEMS) donanımları dairesel veya dikdörtgenel olarak birkaç mikron kalınlığında olarak üretilmektedirler. Yüksek performanslı diyafram yapısının geliştirilmesi, doğru ve hassas ölçüm yapılabilmesi için kritik öneme sahiptir. Pratikte, birçok basınç sensörü için diyaframın çökme kapasitesinin belirlenmesi olmazsa olmaz kriterlerden biridir (Pan ve ark. 1990).

Yükleme-çökme metodu ince film tabakalarının elastik özelliklerinin ölçülmesi için en bilinen ve en kullanışlı yöntemdir. Bu teknikte, ince filmde meydana gelen çökme miktarı uygulanan basıncın bir fonksiyonu olarak bulunur (Schneider ve ark. 1995). Membranın çökme miktarının genliği sensörün duyarlılığı ile doğrudan ilişkilidir. Öyle ki duyarlılık birim basınca düşen membrandaki çökme miktarı olarak

tanımlanabilir. Yükleme-çökme metodu eşitliği karesel ve dairesel membran için sırasıyla eşitlik (5.3) ve (5.4)'te verilmiştir.

$$\frac{Pa^4}{Eh^4} = \frac{4.2}{(1-\mu^2)} \left[\frac{y_0}{h} \right] + \frac{1.58}{(1-\mu)} \left[\frac{y_0}{h} \right]^3 \quad (5.3)$$

$$\frac{Pa^4}{Eh^4} = \frac{16}{3(1-\mu^2)} \left[\frac{y_0}{h} \right] + \frac{7-\mu}{3(1-\mu)} \left[\frac{y_0}{h} \right]^3 \quad (5.4)$$

Eşitlikte,

y_0 : diyafram merkezindeki maksimum çökme

μ : membran malzemesinin Poisson oranı

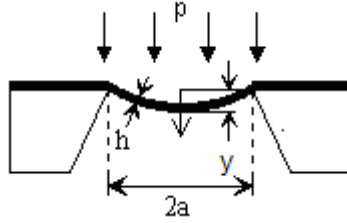
P : uygulanan basınç (Pascal)

a : membran yarıçapı / yarım yüzey uzunluğu

E : membran malzemesinin elastisite modülü

h : membran kalınlığı

olarak tanımlanır. Şekil 5.10'da eşitlikte tanımlanan parametreler gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Membran Parametreleri

Burada membran çökme aralığı doğrusal ve doğrusal olmayan olmak üzere iki bölgeye ayrılmaktadır:

1. Küçük çökme bölgesi: Membran kalınlığının % 25'inden daha küçük çökmeler için tanımlanan doğrusal bölgedir. Eşitlik 5.10 ve Eşitlik 5.11'deki doğrusal denklem grubu ile tanımlanır.
2. Büyük çökme bölgesi: Membran kalınlığının % 25'inden daha büyük çökmeler için tanımlanan doğrusal olmayan bölgedir. Eşitlik 5.10 ve Eşitlik 5.11'deki doğrusal olmayan kübik ifadelerle belirtilen denklem grubu ile tanımlanır.

Genellikle, membran merkezindeki çökmenin membran kalınlığından daha büyük olmaması ve % 0.3'lük doğrusallığın sağlanması için bu değerın membran kalınlığının çeyreği ile sınırlandırılması gerekir. Doğrusal bölge için dairesel membranın merkezindeki çökme eşitlik (5.5), karesel membranın merkezindeki çökme ise eşitlik (5.6)'daki gibi ifade edilir.

$$y_0 = \frac{3(1-\mu^2)Pa^4}{16Eh^3} \quad (5.5)$$

$$y_0 = \frac{(1-\mu^2)Pa^4}{4.2Eh^3} \quad (5.6)$$

Eşitliklerden de görüldüğü gibi membran merkezindeki çökme, membranın yapıldığı malzemeye, kalınlığına ve yüzey uzunluğuna bağlıdır. Diyafram kalınlığı ve yüzey uzunluğunun belirlenmesinde ölçülmesi istenen basıncın yanı sıra sensörün frekans cevabı da göz önünde bulundurulmalıdır (Wang ve ark. 2006). Bu nedenle bu parametrelerin membran tasarımına etkileri alt başlıklarda incelenmiştir.

5.7.1. Frekans Cevabının Membran Tasarımına Etkisi

Membran tasarımında kalınlık ve yüzey uzunluğu değerleri, donanımın hangi frekans aralığında çalışacağına bağlı olarak seçilir. Bu nedenle membranın kalınlığı ve yüzey uzunluğu ile ifade edilen sensör parametrelerinden ilki frekans cevabıdır. Membran, doğal frekansı ya da rezonans frekansı dışındaki frekanslar için düz bir karakteristik sergiler. Rezonans frekansında ise frekans cevabı eğrisi sert bir yükseliş yapıp ardından düşerek eski seyrine ulaşır.

Sensör geniş bantlı ya da dar bantlı olarak seçilebilir. Geniş bantlı seçilecek ise frekans cevabının düz bölgesi ilgili frekansları içermelidir. Örneğin kısmi boşalma sinyali için 50 kHz -300 kHz aralığı seçilen frekans bölgesi içerisinde olmalıdır. Dar bantlı seçilecekse de frekans cevabının orta frekans değeri rezonans frekansına eşit olmalıdır (Eleftherion 1995, Bengtsson ve ark. 1997).

Kenarlarından sabitlenen membran matematiksel olarak ince bir plaka olarak değerlendirilebilir. Membranın çökmesinin kalınlığına göre küçük olduğu kabul

edilirse, Rayleigh-Ritz yöntemi en düşük titreşim modunun bulunması için kullanılabilir. Dairesel membranın rezonans frekansı (5.7), karesel membranın rezonans frekansı ise (5.8) eşitliklerinde verilmiştir.

$$f_n = \frac{\alpha h}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{gE}{12(1-\mu^2)\rho_d}} \quad (5.7)$$

$$f_n = \frac{\alpha h}{a^2} \sqrt{\frac{gE}{12(1-\mu^2)\rho_d}} \quad (5.8)$$

Burada; g yerçekimi ivmesini, ρ_d membran malzemesinin özgül ağırlığını, α titreşim modunu ifade etmektedir ve $\alpha = 10.21$ 'dir.

Bu eşitlik membranın herhangi bir tarafında akışkan bir malzemenin temas etmediğini varsaydığı için kısmi boşalma algılama yönteminde kullanılamaz. Çünkü kısmi boşalmanın algılanmasında kullanılan EFPI optoakustik sensörlerde membran, transformatör yağı gibi çok viskoz bir malzemeye temas etmektedir. Bu nedenle, rezonans frekansı hesaplamada mutlaka bir doğruluk faktörüne gereksinim duyulur. Doğruluk faktörü ilave edilerek yeni rezonans frekansı (5.9)'daki eşitlik yardımıyla hesaplanır.

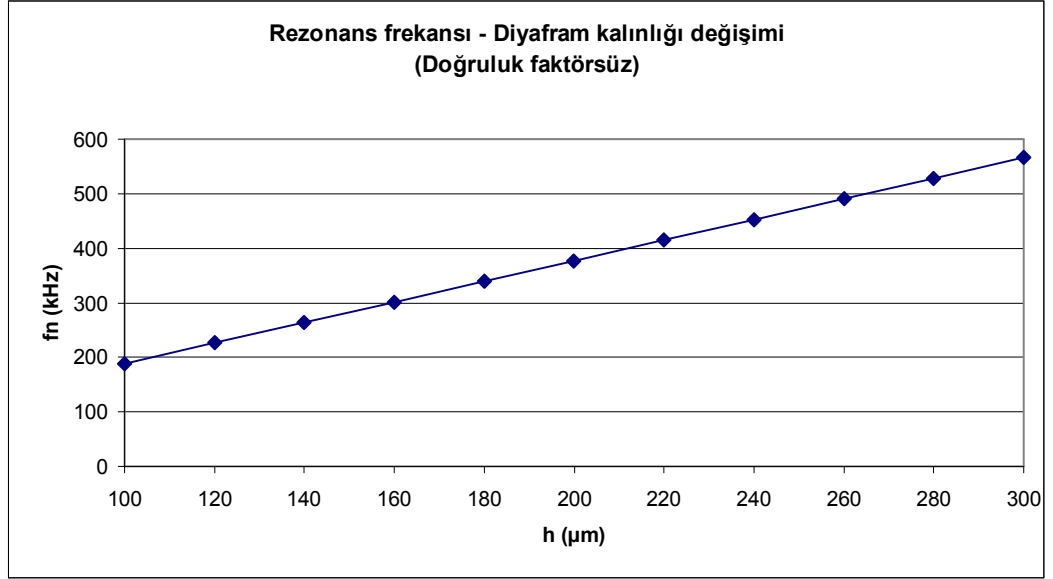
$$f_s = \frac{f_n}{\sqrt{1+\beta}} \quad (5.9)$$

$$\beta = 0.6689 \frac{\rho_m a}{\rho_d h} \quad (5.10)$$

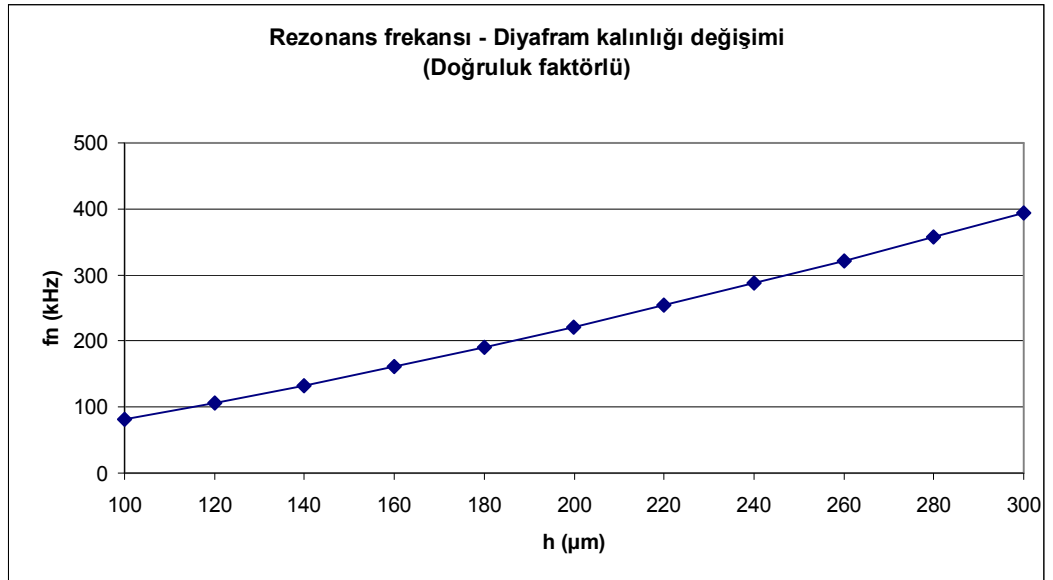
Bu eşitlikte f_n daha önce hesaplanan rezonans frekansı, ρ_m viskoz sıvının özgül ağırlığı, ρ_d membran malzemesinin özgül ağırlığı, a ve h ise sırasıyla membran yarım yüzey uzunluğu ile membran kalınlığı olarak ifade edilmektedir.

Şekil 5.11 belirtilen bu doğruluk faktörü dahil edilmeden yarıçapı 1.25 mm olan bir silika membranın kalınlığı ile rezonans frekansının değişimini göstermektedir. Şekil 5.12 ise doğruluk faktörü dahil edilerek aynı özelliklerdeki membranın rezonans frekansındaki değişimi göstermektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere membran

kalınlığı arttıkça düzeltme faktörü β da önemli ölçüde artmaktadır. Buradan yola çıkarak, kısmi boşalma algılama sistemlerinde kullanılan membranın açık hava uygulamalarındakinden daha kalın olduğu sonucuna ulaşılır.



Şekil 5.11. Doğruluk Faktörü Olmadan Rezonans Frekansı - Diyafram Kalınlığı Değişimi



Şekil 5.12. Doğruluk Faktörü Olduğunda Rezonans Frekansı - Diyafram Kalınlığı Değişimi

Doğruluk faktörünün dahil edilmesiyle rezonans frekansında büyük değişim olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle çalışma kapsamında rezonans frekansı bulunurken doğruluk faktörü de hesaplamalara dahil edilmiştir.

Doğruluk faktörü göz önüne alınarak bulunan yeni rezonans frekansı eşitliği dairesel ve karesel membran için sırasıyla (5.11) ve (5.12) eşitliklerinde verilmiştir. Formüllerde geçen D ise eşitlik (5.13)'te belirtilmiştir.

$$f_n = \frac{10.21h}{2\pi a^2 \sqrt{1+\beta}} \sqrt{\frac{gD}{\rho_d h}} \quad (5.11)$$

$$f_n = \frac{10.21h}{a^2 \sqrt{1+\beta}} \sqrt{\frac{gD}{\rho_d h}} \quad (5.12)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (5.13)$$

Geniş bantlı sensör için rezonans frekansı f_n , ölçülmek istenilen frekansların en yükseğinden çok daha büyük bir değerde olmalıdır. Dar bantlı sensör için ise f_n , sinyalin merkez frekansı olan f_c ile eşit seçilmelidir.

Literatürde kısmi boşalma sinyalinin frekans içeriğine dair belirgin bir uzlaşma yoktur. Bazı kaynaklar 100-300 kHz frekans aralığını içeren ve merkez frekansı 150 kHz olan dar bantlı sensörlerin kullanılması gerektiğini belirtir. Bu durumda rezonans frekansı f_n 150 kHz'e eşit olmalıdır. Buna karşın literatürdeki bazı kaynaklar ise 20-120 kHz frekans aralığını içeren geniş bantlı sensör kullanılması gerektiğini kabul eder. Yüksek frekanslı sensörlerin kullanılmasındaki neden yüksek gerilim transformatörlerinde manyetik çekirdekten kaynaklanan 50-60 kHz aralığındaki akustik gürültüdür. Düşük frekanslı sensörlerin tercih edilmesindeki neden ise yağın, akustik sinyallerin yüksek frekans bileşenlerini zayıflatmasıdır (Lazarevich 2003).

5.7.2. Malzeme Seçiminin Membran Tasarımına Etkisi

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan membranlar yaygın olarak silikon ve silika tabanlıdır. Malzemelerin elastisite modülü gibi mekanik özellikleri duyarlılık ve maksimum çökme miktarının belirlenmesinde kullanıldığı için, malzeme seçimi de membran tasarımında önemli bir kriterdir (Blackburn ve ark. 1992). Bu çalışmada kullanılan membran malzemelerinin mekanik özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Silikon ve Silika'nın Mekanik Özellikleri

Özellikler	Silikon	Silika
Yoğunluk (g/cm^3)	2.329	2.2
Elastisite Modülü (GPa)	150	73
Poisson Oranı	0.26	0.17

5.7.3. Duyarlılığın Membran Tasarımına Etkisi

Duyarlılık, birim basınç başına membranın yer değiştirmesi olarak tanımlanır ve dairesel membran için duyarlılık (5.14)'teki eşitlik ile ifade edilir (Giovanni 1982).

$$S = \frac{3(1-\mu^2)a^4}{16Eh^3} \quad (5.14)$$

Çalışma kapsamında dairesel membran tasarımı yapılacağı için grafiklerde dairesel membranın duyarlılığı incelenmiştir. Ancak karesel ya da dairesel membran için yapılan analiz sonuçları benzer özellik göstermektedir.

Duyarlılığın arttırılabilmesi için, membran kalınlığının yükleme-çökme cevabını maksimize edecek şekilde ince olması gerekir. Diğer taraftan, yüksek basınç altındaki ince filmler yüksek çökme değerlerine bu nedenle de doğrusal olmayan etkilere maruz kalırlar. Bu nedenle, membran kalınlığı, çökme ve duyarlılık arasındaki ilişkiyi doğru karakterize edebilmek mikro basınç sensörlerinin tasarımında büyük önem taşır (Wang 2005, Lazarevich 2003).

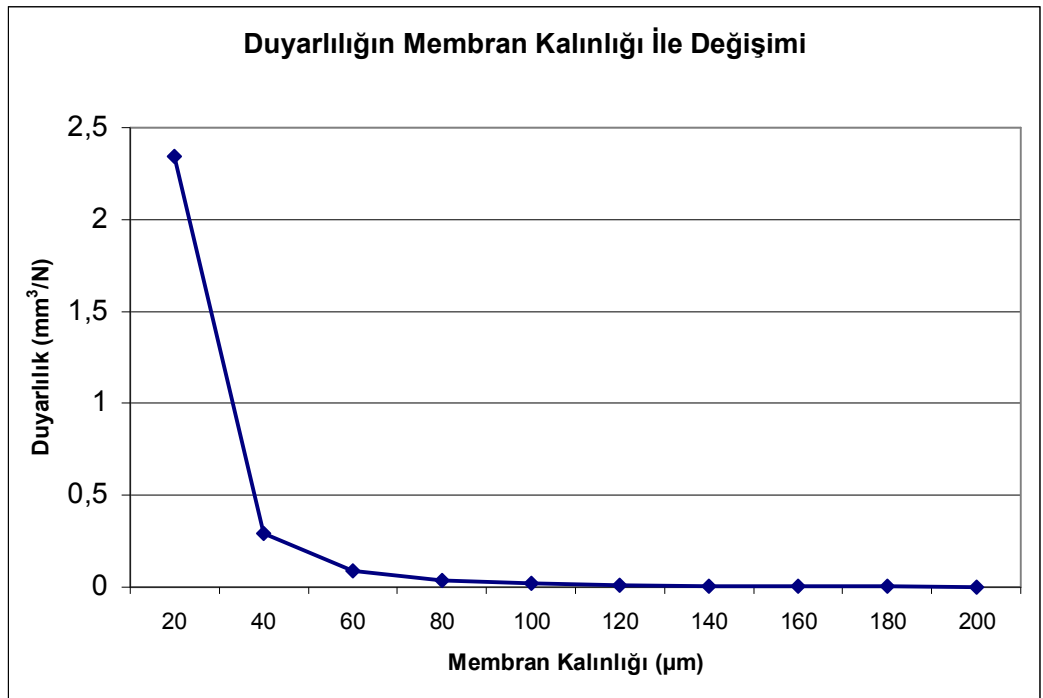
Eşitlikten de görüldüğü üzere duyarlılık membran kalınlığının küpü ile ters orantılıdır. Yani kalınlık arttırıldığında, akustik kısmi boşalma sinyalleri tarafından oluşturulan basınçta meydana gelen küçük değişimlerin sensör tarafından algılanması azalır. Kısmi boşalma sinyalleri mineral yağ tarafından zayıflatıldığı için kısmi boşalmayı algılamada çok küçük hassasiyet değerleri kullanılmaz. Diğer taraftan, duyarlılığı arttırabilmek için kalınlık azaltıldığında ve rezonans frekansı küçük tutulduğunda, yüksek gerilim transformatörü içerisinde meydana gelen çekirdek gürültüsü sinyali bozabilir ve sinyal bu nedenle hiç algılanamayabilir. Bu nedenle membran kalınlığı, hassasiyeti arttırmanın yanında sinyalin frekans cevabının gerekliliğini de sağlayacak şekilde seçilmelidir (Özen ve ark. 2010).

Şekil 5.13, şekil 5.14, şekil 5.15 ve şekil 5.16 şekillerinde; silikon ve silika malzemeleri seçilerek duyarlılığın membran kalınlığı ve yüzey uzunluğuna göre değişimini içeren grafikler verilmiştir.

Yarım yüzey uzunluğu 2 mm olan silikon membran için duyarlılığın membran kalınlığı ile değişimi Şekil 5.13'te verilmiş, sonuçlar ise Çizelge 5.2'de listelenmiştir.

Çizelge 5.2. Silikon Membranın Kalınlık - Duyarlılık Değerleri

h (μm)	S (mm^3/N)
20	2,3437
40	0,2929
60	0,0868
80	0,0366
100	0,0187
120	0,0108
140	0,0068
160	0,0045
180	0,0032
200	0,0023

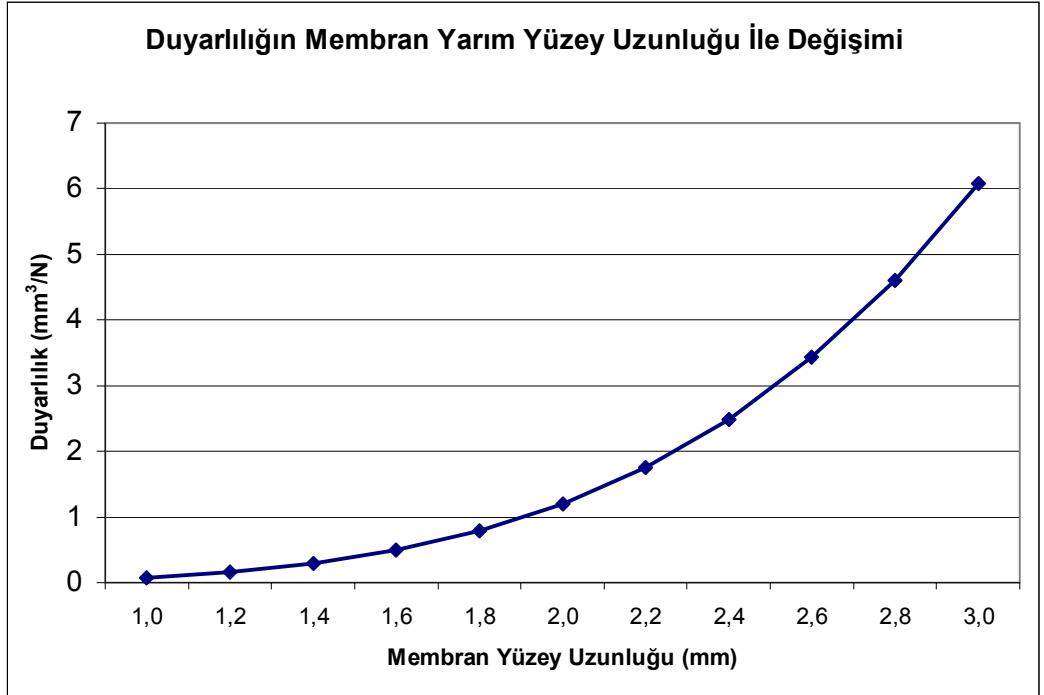


Şekil 5.13. Silikon Membranın Kalınlık - Duyarlılık Değişimi

Kalınlığı $25 \mu m$ olan silikon membran için duyarlılığın membran yarım yüzey uzunluğu ile değişimi Şekil 5.14'te verilmiş, sonuçlar ise Çizelge 5.3'te listelenmiştir.

Çizelge 5.3. Silikon Membranın Yarım Yüzey Uzunluğu - Duyarlılık Değerleri

a (mm)	S (mm ³ /N)
1,00	0,0750
1,20	0,1555
1,40	0,2881
1,60	0,4915
1,80	0,7873
2,00	1,2000
2,20	1,7569
2,40	2,4883
2,60	3,4273
2,80	4,6099
3,00	6,0750

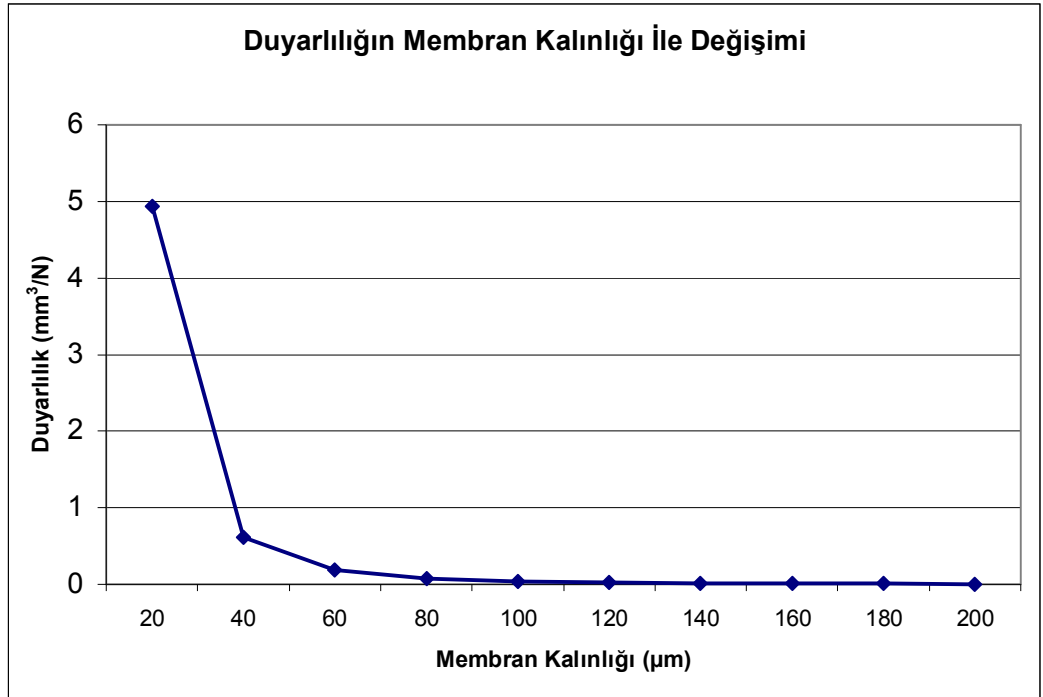


Şekil 5.14. Silikon Membranın Yarım Yüzey Uzunluğu - Duyarlılık Değişimi

Yarım yüzey uzunluğu 2 mm olan silika membran için duyarlılığın membran kalınlığı ile değişimi Şekil 5.15'te verilmiş, sonuçlar ise Çizelge 5.4'te listelenmiştir.

Çizelge 5.4. Silika Membranın Kalınlık - Duyarlılık Değerleri

h (μm)	S (mm^3/N)
20	4,9971
40	0,6246
60	0,1850
80	0,0780
100	0,0399
120	0,0231
140	0,0145
160	0,0097
180	0,0068
200	0,0049

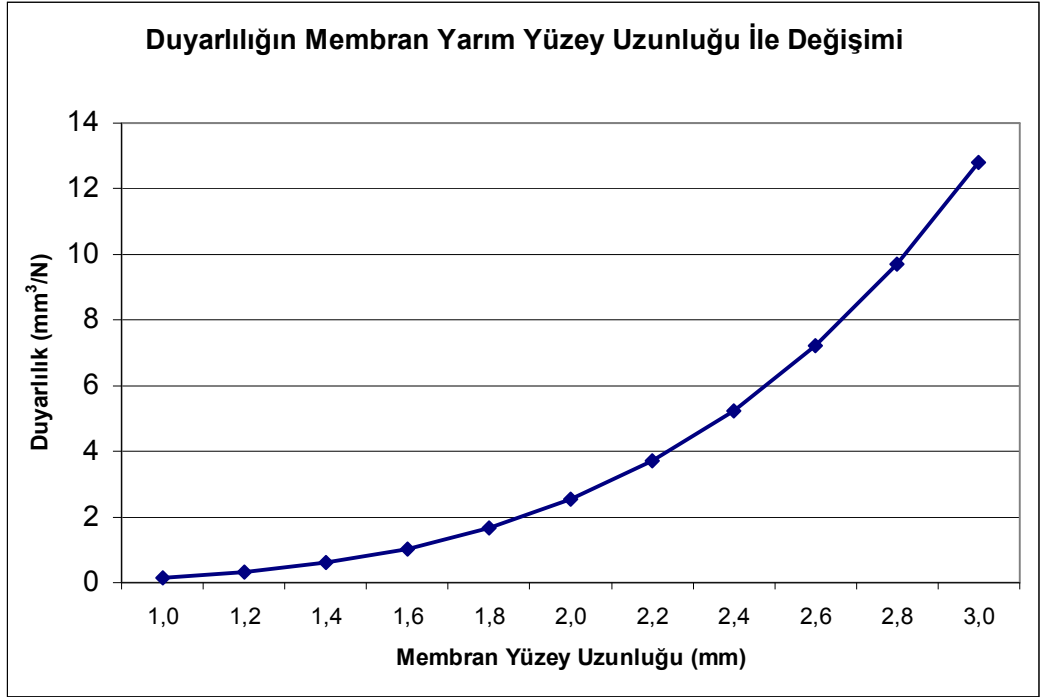


Şekil 5.15. Silika Membranın Kalınlık - Duyarlılık Değişimi

Kalınlığı $25 \mu\text{m}$ olan silika membran için duyarlılığın membran yarım yüzey uzunluğu ile değişimi Şekil 5.16'da verilmiş, sonuçlar ise Çizelge 5.5'te listelenmiştir.

Çizelge 5.5. Silika Membranın Yarım Yüzey Uzunluğu - Duyarlılık Değerleri

a (mm)	S (mm ³ /N)
1,00	0,1599
1,20	0,3315
1,40	0,6143
1,60	1,0479
1,80	1,6786
2,00	2,5585
2,20	3,7459
2,40	5,3053
2,60	7,3074
2,80	9,8288
3,00	12,9525

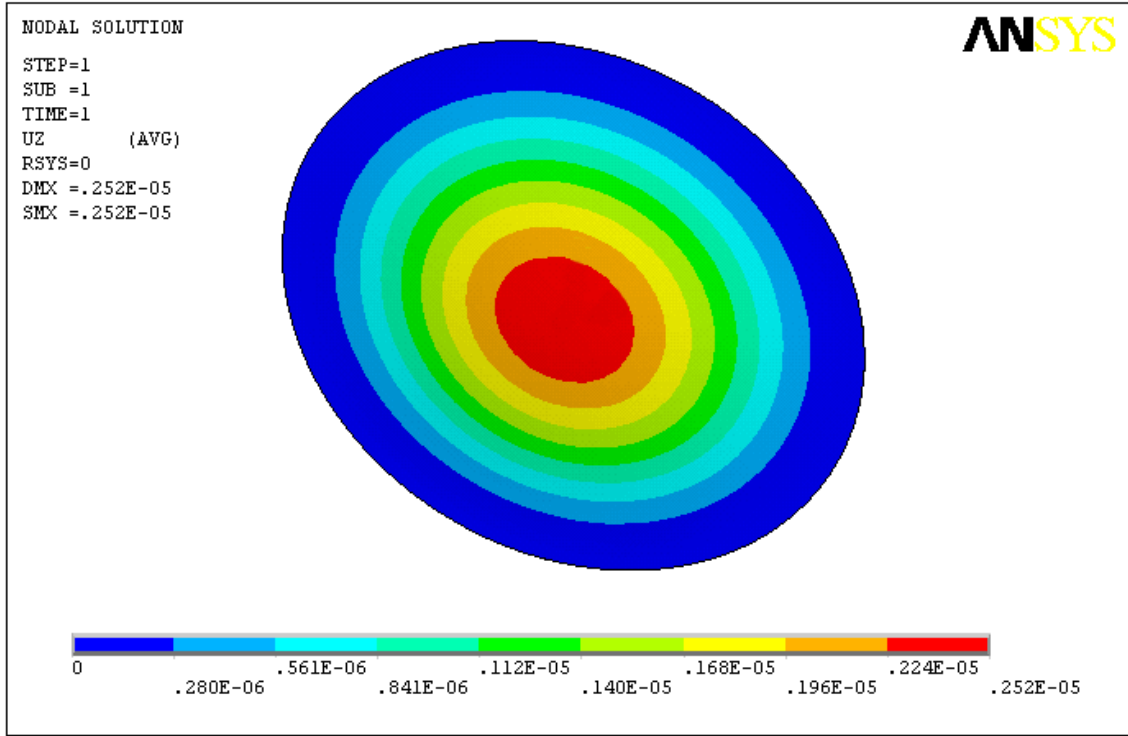


Şekil 5.16. Silika Membranın Yarım Yüzey Uzunluğu - Duyarlılık Değişimi

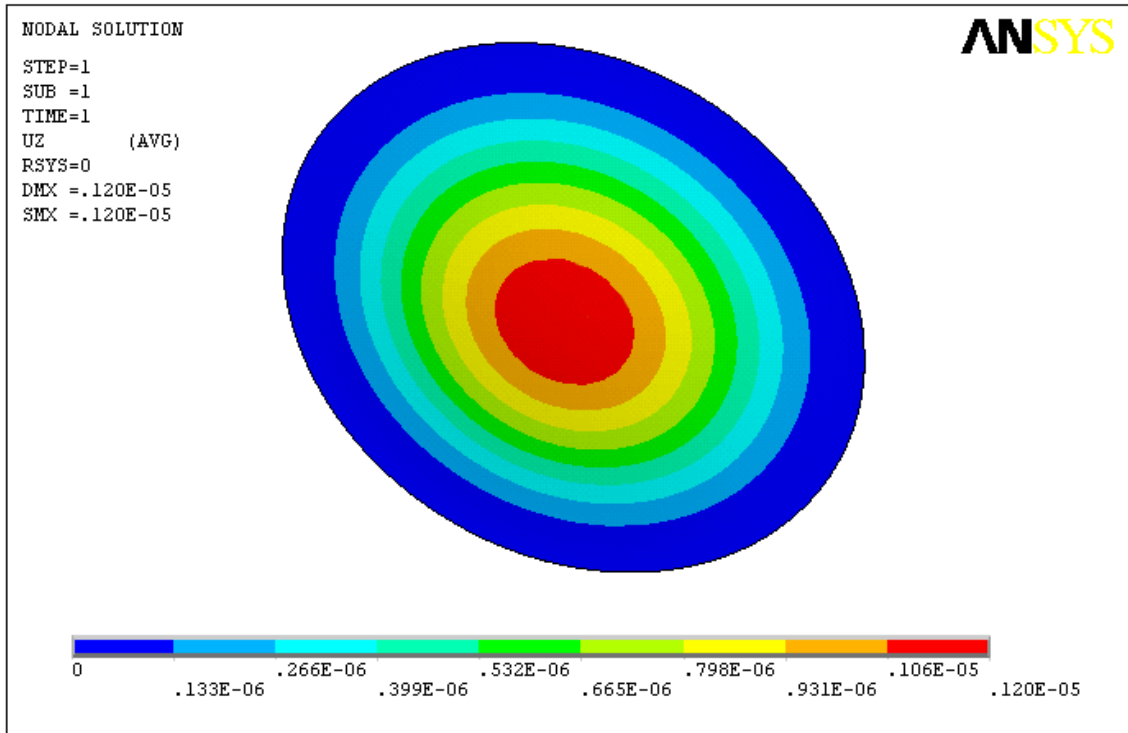
5.8. Optik Fiberli Sensör Membran Tasarımı ve Benzetim Sonuçları

Bir önceki bölümde membran tasarım parametrelerine değinilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, membran kalınlığının yüzey uzunluğuna kıyasla duyarlılık için daha belirleyici bir faktör olduğu söylenebilir. Silikanın elastisite modülünün silikonunkinin yaklaşık yarısı büyüklükte olması, aynı boyutlardaki membranın, silikon yerine silikadan yapılması durumunda duyarlılığı yaklaşık 2 kat arttırmaktadır.

Çalışmada silikadan ve silikondan üretilmiş membran seçilmiş, yarım yüzey uzunluğu (yarıçap) 2 mm ve kalınlığı 25 μm olarak ölçüendirilmiştir. Membrana, 50 pC'luk kısmi boşalma kaynağından 1 metre uzaktaki sesin basıncı esas alınarak 1 Pa'lık basınç uygulanması durumu için, ANSYS benzetim programında statik ortamda yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar Şekil 5.17'de ve Şekil 5.18'de verilmiştir. Membran merkezindeki maksimum çökme miktarı silika için yaklaşık 2.5 nm, silikon için ise yaklaşık 1.2 nm olmuştur. Eşitlik 5.13 kullanılarak yapılan matematiksel hesaplar neticesinde silika membranın çökme miktarı yaklaşık olarak 2.5 nm bulunmuştur. Benzetim sonuçları değerlendirildiğinde tüm sonuçların doğrusal çökme bölgesi içerisinde olduğu görülmüştür:



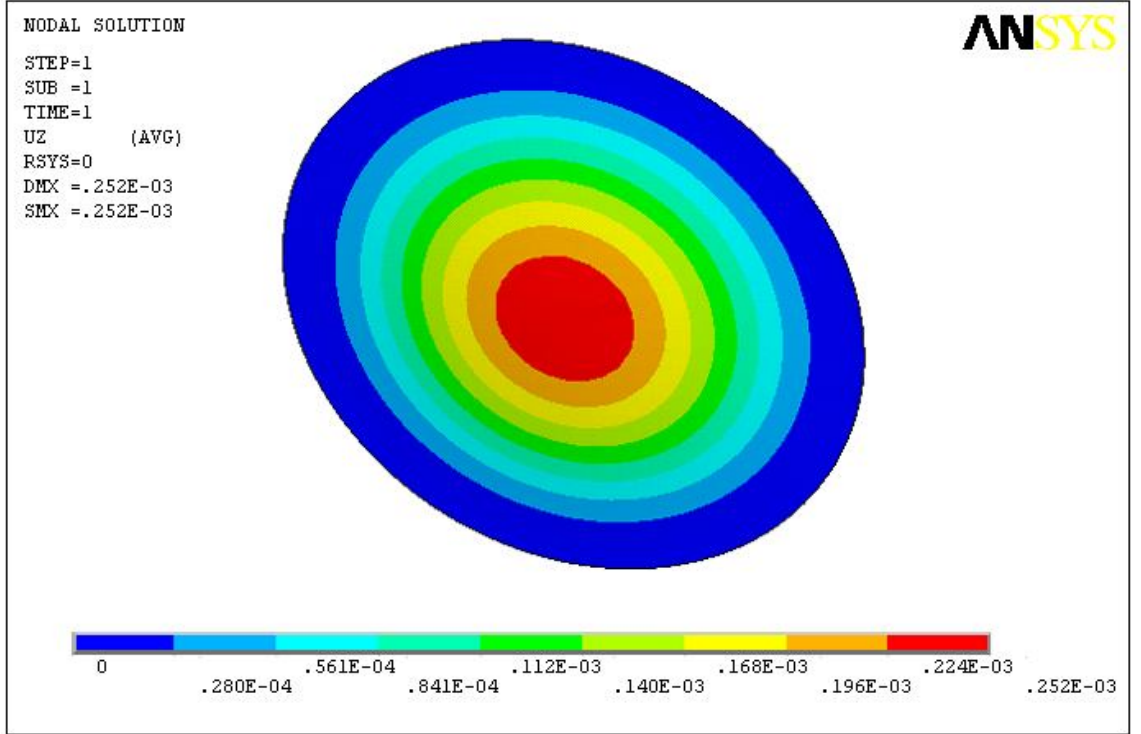
Şekil 5.17. 1 Pa Basınçta Silikadan Yapılmış Membranın Çökme Analizi



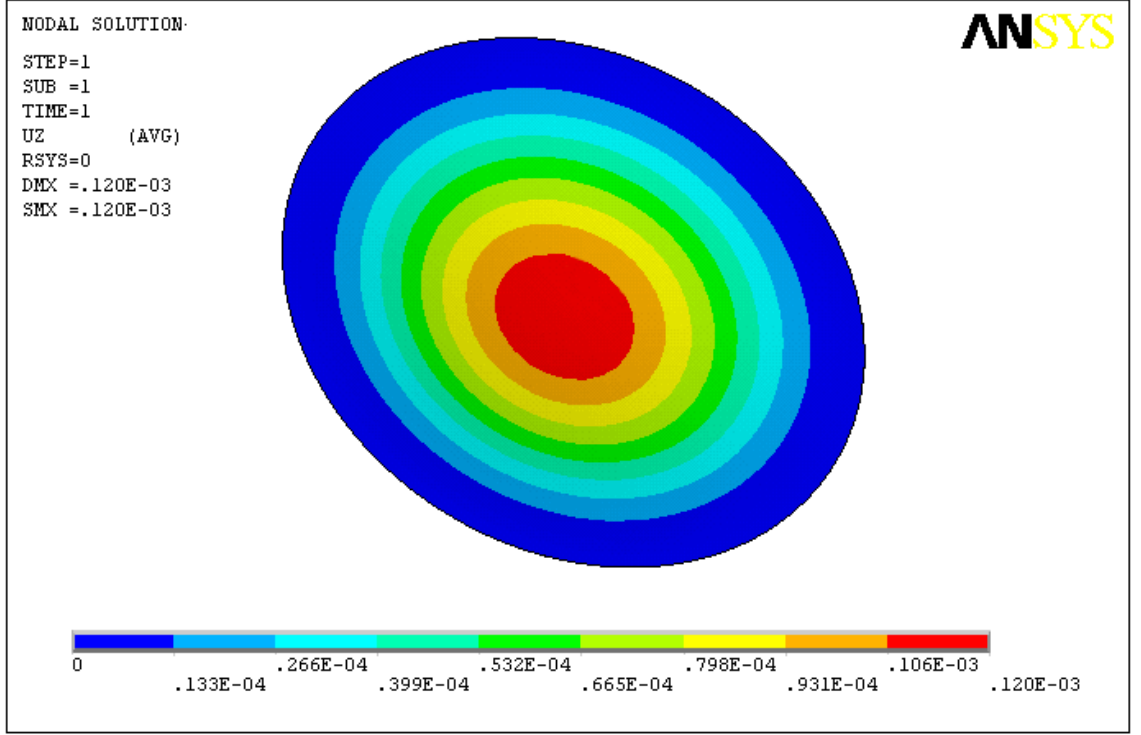
Şekil 5.18. 1 Pa Basınçta Silikondan Yapılmış Membranın Çökme Analizi

Aynı boyutlardaki silika ve silikon membrana 100 Pa basınç uygulanması durumunda oluşacak çökme miktarları Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de verilmiştir. (5.5) ve (5.6) eşitliklerinden de görüldüğü gibi, basınç ile membranda oluşacak çökme miktarı doğru orantılıdır. 100 Pa basınç uygulanan membranın merkezindeki maksimum çökme miktarı silika için yaklaşık 250 nm, silikon için ise yaklaşık 120 nm olmuştur.

25 μm kalınlığındaki bir membran için doğrusal çalışma bölgesi, maksimum çökmenin 6.25 μm ’nin altında olduğu durumlar için geçerlidir. Benzetimler neticesinde elde edilen sonuçların nanometre boyutunda olmasından yola çıkarak, daha yüksek basınçlarda dahi membranın doğrusal çalışma bölgesi içerisinde kalacağı sonucu çıkartılabilir.



Şekil 5.19. 100 Pa Basınçta Silikadan Yapılmış Membranın Çökme Analizi



Şekil 5.20. 100 Pa Basıncıta Silikondan Yapılmış Membranın Çökme Analizi

Benzetimler neticesinde elde edilen sonuçlar, aynı boyutlarda silikondan yapılan membranın eşit basınç altında silikaya nazaran daha az (yaklaşık olarak yarısı) çökmeye maruz kaldığını göstermiştir. Silikon malzemesinin elastisite modülünün silikaninkinin yaklaşık olarak iki katı olması, silikada meydana gelen çökmenin silikondaki çökme miktarının yaklaşık olarak 2.1 katına eşit olmasını gerektirir (5.15).

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{\frac{(1-\mu_1^2)Pa^4}{4.2E_1h^3}}{\frac{(1-\mu_2^2)Pa^4}{4.2E_2h^3}} = \frac{1-\mu_1^2}{1-\mu_2^2} = \frac{1-(0.16)^2}{1-(0.26)^2} = \frac{73.73}{150} \cong 2.1 \quad (5.15)$$

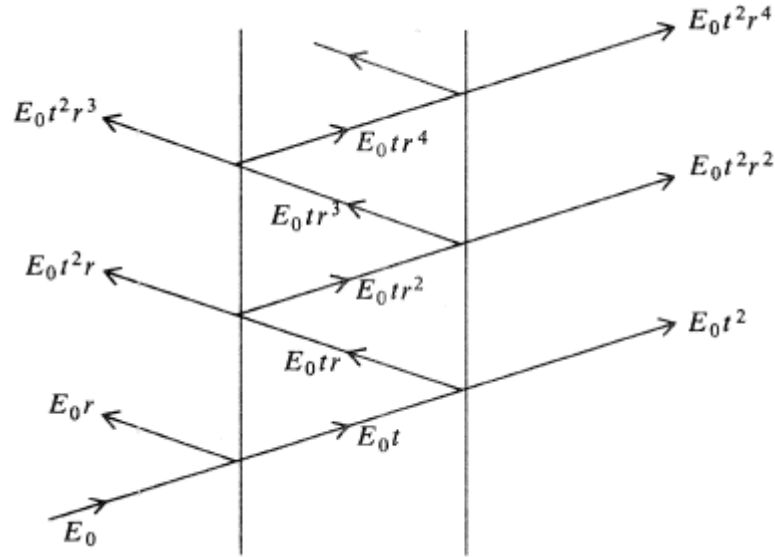
Yapılan benzetim sonucunda membran merkezindeki maksimum çökme değerleri oranlandığında ise bu değer 2.09 bulunmuştur. Bu da teorik sonuçlarla benzetim sonuçlarının birbirini doğruladığını gösterir.

5.9. Optik Fiberli Sensör Fabry-Perot Boşluğunun Tasarımı

Kısmi boşalma sensörlerinde kullanılan membranın Fabry-Perot boşluğu ile temas eden iç yüzeyi, yansımının yüksek olması istendiği için altın ile kaplanmaktadır. Fresnell eşitliğinden yararlanılarak gelen ışığın % 4'ünün fiber-hava arayüzünden yansıdığı söylenebilir. Işığın geri kalanı ise hava boşluğundan geçip membranın altın emdirilen yüzeyine çarparak % 96 oranında geri yansır. Buradan yola çıkarak fiber sensör membranın temas ettiği çevreden etkilenmediği sonucu çıkar. Tüm bunlar, optik işaretin yalnızca kapalı F-P boşluğunun uzunluğunun bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir (Denga ve ark. 2000).

5.9.1. Fabry Perot İnterferometresi ve Sensör Yansıma Ortamları

Fabry-Perot interferometresine göre çalışan optik fiberli basınç sensörü tasarımında, membran ile fiberin sonu arasındaki Fabry-Perot boşluğunun derinliği tasarımı etkileyen ikinci kritik parametredir. Bu nedenle sensör tasarımını tamamlamak için, gerekli olan optik analizler bu bölümde yapılmıştır. Öncelikle Fabry-Perot interferometresine değinilmiş, ardından Fabry-Perot boşluğunun değişimi incelenmiştir.

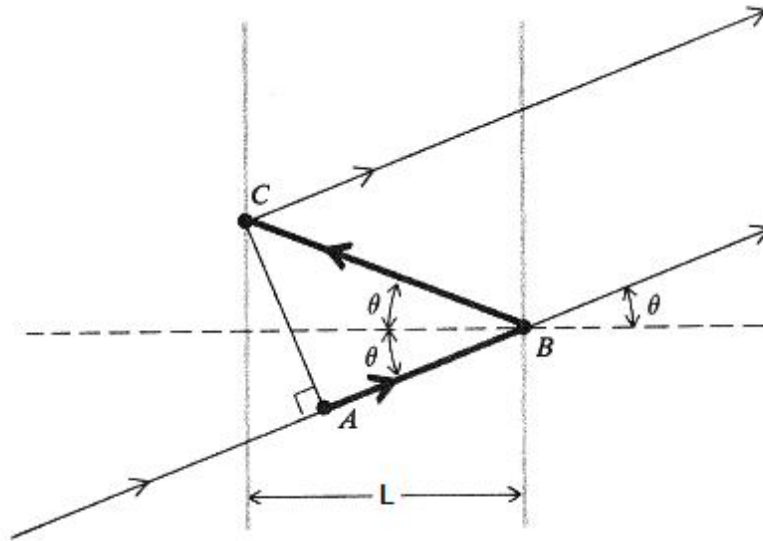


Şekil 5.21. İki Paralel Ayna Arasındaki Işığın Çoklu Yansıma Yolları

Fabry-Perot interferometresi için gereken matematiksel analizler son on yılda geliştirilmiştir. E_0 genliğindeki ışığın, iki paralel, homojen, kısmen yansıtıcı ayna

arasındaki çoklu yansımaları Şekil 5.21'de verilmiştir. Kolaylık olması açısından, aynaların oldukça ince yarı yansıtıcı yüzeyler olduğu kabul edilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, ilk ışın demetinin bir kısmı birinci yüzeyden geçerken kalan kısmı yansıtılarak geri döner. İletilen ışın demeti ikinci yüzeye ulaşır. Burada da aynı karakteristiği sergiler. Bu şekilde çoklu yansımalar meydana gelir.

Yansıma katsayısı r , iletim katsayısı ise t ile ifade edilmiştir. Yansıma yüzeyleri arasındaki ortamlarda herhangi bir emilimin ya da kaybın olmadığı kabul edilmiştir. Aynı özelliklerde, yarım yansıtıcı, çok ince aynaların kullanılması durumu için, birbirini izleyen yansıyan ışın genlikleri sırasıyla E_0t , E_0tr , E_0tr^2 şeklinde devam etmektedir. Benzer şekilde, E_0t^2 , $E_0t^2r^2$, $E_0t^2r^4$ şeklinde devam eden genlik değerleri de iletilen ışın genliklerini ifade etmektedir. Birbirini izleyen iletilen iki ardışık ışın arasındaki geometrik yolun, Şekil 5.22'den $2L \cos \theta$ olduğu kolayca görülmektedir. Burada L iki yansıma yüzeyi arasındaki mesafe, θ ise yüzeyin normali ile yansıyan ışın arasındaki açıdır (Fowles 1978).



Şekil 5.22. İki Ardışık Işın Arasındaki Geometrik Yolun Gösterimi

Fabry-Perot interferometresindeki her bir ayna için iletim t_i , yansıma da r_i ile karakterize edilebilir. Burada $i=1,2$ ve $r_i+t_i=1$ 'dir. Bu analizde kolaylık olması açısından, ayna tarafından emilen ya da saçılan güce karşılık gelen kayıp ihmal

edilmiştir. Geliş açısı θ ile ifade edilmektedir. Gidiş dönüş yayılım faz kayması olarak da tanımlanan, ard arda gelen iki ışın arasındaki faz farkı ϕ ;

$$\phi = \frac{4\pi n}{\lambda} L \cos \theta \quad (5.16)$$

olarak tanımlanır. Burada n aynalar arasındaki bölgenin yansımaya katsayısı ve λ optik dalgaboyudur. [15] Tasarlanan sensörde, gelme açısı ile normal arasındaki açı sıfır derecedir ($\theta = 0^0$). Bu durumda faz farkı (5.17)'deki eşitlikte verildiği gibidir.

$$\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (5.17)$$

Faz farkı formülü de göz önünde bulundurularak Fabry-Perot yansımaya R_{FP} ve iletim T_{FP} ifadeleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir. Burada R_{FP} Fabry-Perot interferometresi tarafından yansıyan gücün (P_r) gelen güce oranını (P_i), T_{FP} iletilen gücün (P_t) gelen güce (P_i) oranını temsil etmektedir.

$$R_{FP} = \frac{r_1 + r_2 + 2\sqrt{r_1 r_2} \cos \phi}{1 + r_1 r_2 + 2\sqrt{r_1 r_2} \cos \phi} \quad (5.18)$$

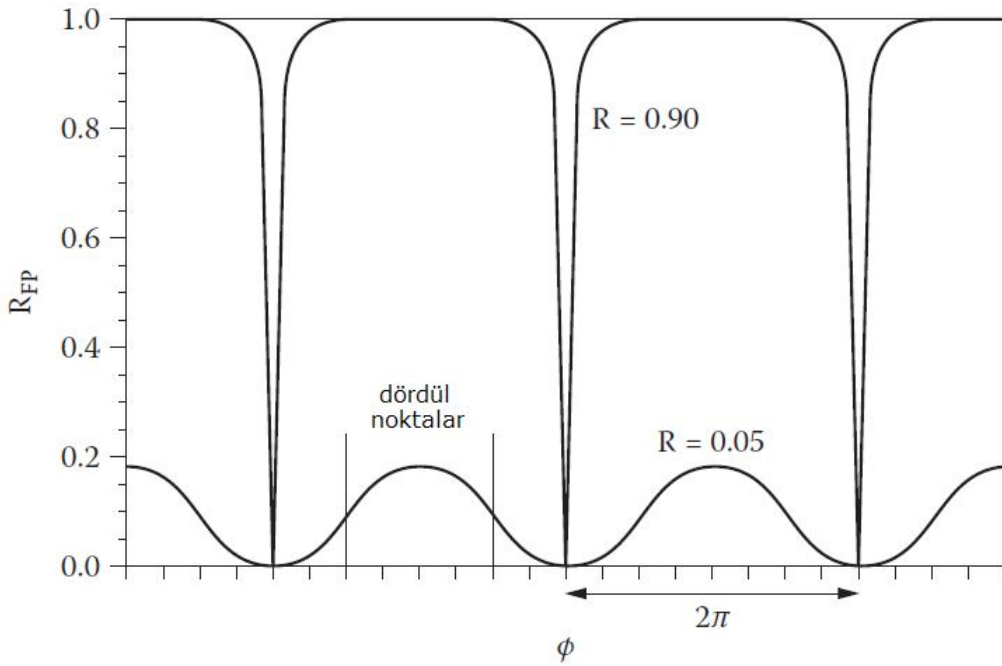
$$T_{FP} = \frac{t_1 t_2}{1 + r_1 r_2 + 2\sqrt{r_1 r_2} \cos \phi} \quad (5.19)$$

Eşitlik (5.19)'dan da görüldüğü gibi T_{FP} , $\cos(\phi) = -1$ ya da m tamsayı olmak şartıyla $\phi = (2m+1)\pi$ olduğu durumda maksimum değerdedir. (5.19)'dan, T_{FP} 'nin 2π periyodunda ϕ 'nin periyodik bir fonksiyonu olduğu, bu nedenle de bir tepe noktası ile diğeri arasında 2π radyanlık faz değişimi gerektiği sonucu çıkar.

Fabry-Perot interferometresi için çokça kullanılan bir parametre olan hassasiyet F , komşu geçirgenlik tepe noktaları arasındaki faz değişikliğinin, tepe noktalarının iki tarafındaki yarı-maksimum noktaları arasındaki faz değişikliğine oranı olarak tanımlanmıştır ve (5.20)'deki eşitlikte verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$F = \pi\sqrt{R}/(1-R) \quad (5.20)$$

Böylece, kayıpsız aynaların kullanıldığı interferometrede $R = 0.9$ için $F = 29.8$ ve $R = 0.99$ için $F = 312.6$ 'dır. Hassasiyet kavramının $R \ll 1$ olduğu durumlarda Fabry-Perot interferometresi için uygulanabilir olmadığı unutulmamalıdır. Kayıpsız Fabry-Perot interferometresinin yansımaları için verilen eşitlik (5.20), $R = 0.9$ ve $R = 0.05$ için gidiş geliş faz kaymasının bir fonksiyonu olarak Şekil 5.23'te çizilmiştir (Yin ve ark. 2008).



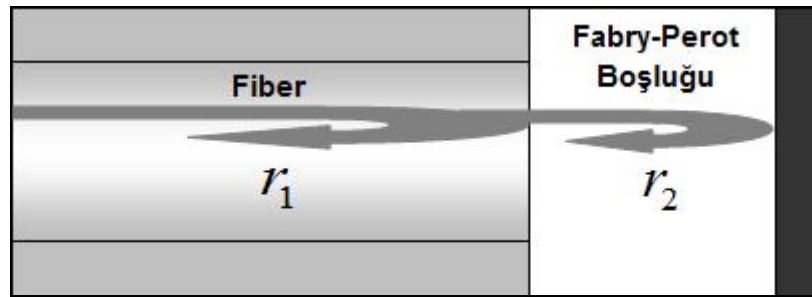
Şekil 5.23. Aynanın yansıtıcılık oranı $R = 0.9$ ve $R = 0.05$ için kayıpsız FPI'nın R_{FP} yansımalarının gidiş geliş faz kaymasına bağlılığı. $R = 0.05$ için, R_{FP} 'nin ϕ 'ye maksimum hassasiyetine denk gelen iki dördül nokta gösterilmiştir.

Kısmi boşalmanın algılanmasında kullanılan ve Fabry Perot interferometresine göre çalışan sensörün şematik gösterimi ve yansıma noktaları Şekil 5.24'te gösterilmiştir. Burada r_1 ile gösterilen referans yansıma iken, r_2 algılama yansımasıdır. Fiberin sonundan bir kısmı yansıyan ışığın (r_1) kalan kısmı Fabry-Perot boşluğunu geçerek membran iç yüzeyinden kısmen tekrar yansır (r_2). Sıvı basıncı diyaframda yer değiştirmeye neden oldukça Fabry-Perot boşluğunda bir değişim meydana gelecektir. Bu durumda yol uzunluğundaki değişime bağlı olarak r_2 yansıması belirlenir. Oluşan

bu çoklu yansımalar aynı fiberden geçerek optik alıcıya ulaşır. Algılanan optik yoğunluk (5.21)'de verilmiştir.

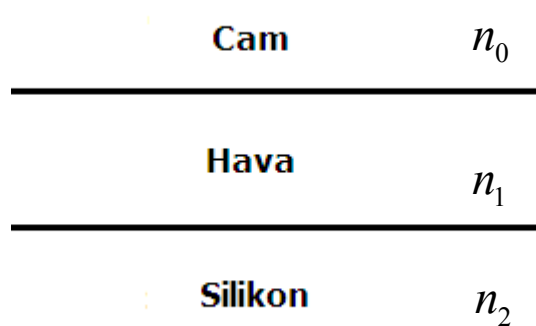
$$I_r = I_0 \frac{r_1 + r_2 - 2\sqrt{r_1 r_2} \cos(\phi)}{1 + r_1 r_2 - 2\sqrt{r_1 r_2} \cos(\phi)} \quad (5.21)$$

Bu eşitlikte I_0 lazer kaynağının gücü, ϕ faz kayması, r_1 ve r_2 sırasıyla fiber-hava ve hava-membran arayüzlerindeki yansıma katsayılarıdır (Wang ve ark. 2006, Kaufman ve ark. 2003).



Şekil 5.24. Kısmi Boşalma Optik Fiberli Akustik Sensöründeki Yansımalar

Kısmi boşalma nedeniyle membran yüzeyine basınç uygulandığında, Fabry-Perot boşluğu membrandaki çökme nedeniyle değişecektir. Fabry-Perot boşluğundaki optik yol farkının değişmesi, ışığın fazında değişikliklere neden olacaktır. Yansıyan ışığın faz kaymasının ölçülmesi sayesinde yüklenen basıncın bulunması oldukça kolay olacaktır. Optik fiberli sensördeki yansıma ortamı Şekil 5.25'te verildiği gibi cam, hava ve silikondan oluşmaktadır.



Şekil 5.25. Optik Fiberli Sensördeki Yansıma Ortamları

Şekilde belirtilen kırılma indisleri $n_0 > n_1$ ve $n_2 > n_1$ olduğu için, eşitlik (5.21)'de geçen yansıma katsayıları (5.22) ve (5.23) eşitliklerinde verildiği gibidir (Wang ve ark.2006).

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} > 0 \quad (5.22)$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_0 + n_1} < 0 \quad (5.23)$$

5.9.2. Fabry-Perot Boşluğu ile Görünürlük İlişkisi

Kısmi boşalmanın algılanmasında kullanılacak akustik optik fiberli sensörün Fabry-Perot boşluk derinliğini etkileyen önemli parametrelerden biri görünürlüktür. Görünürlük girişim saçaklarının algılanabilirliği açısından önemlidir. Yansıyan işaretin zıtlığı (kontras) ile ifade edilen görünürlük parametresi (5.24) eşitliği ile ifade edilmektedir.

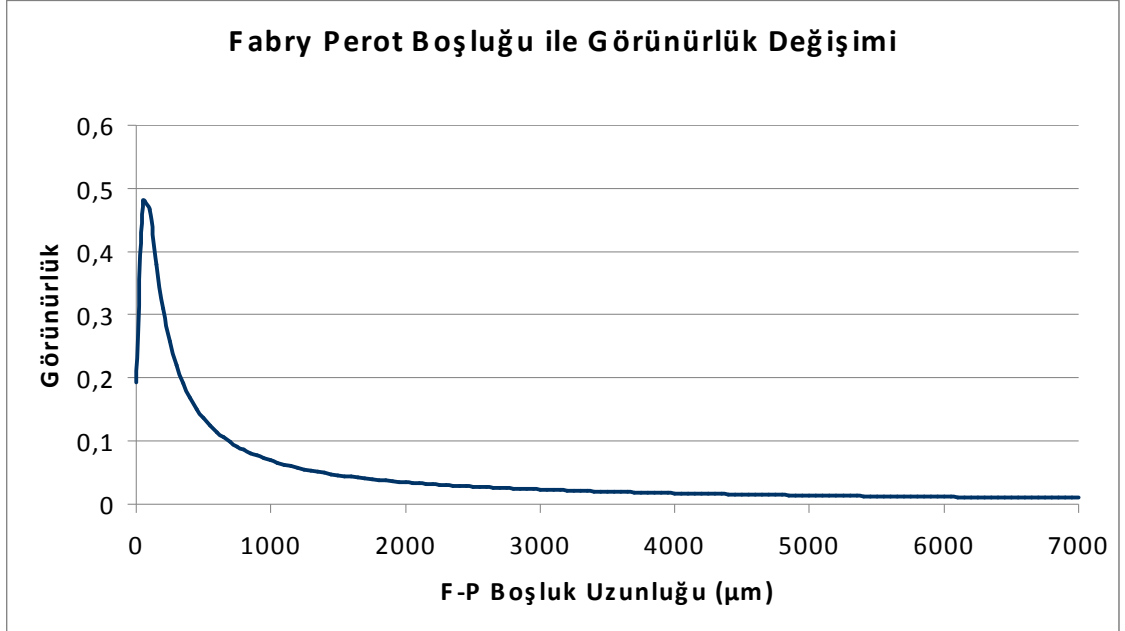
$$V = \frac{\sqrt{R_1[1+(AL/2\pi)^2]}}{1+R_1[1+(AL/2\pi)^2]} \quad (5.24)$$

$$A = \lambda \ln v / a^2 \quad (5.25)$$

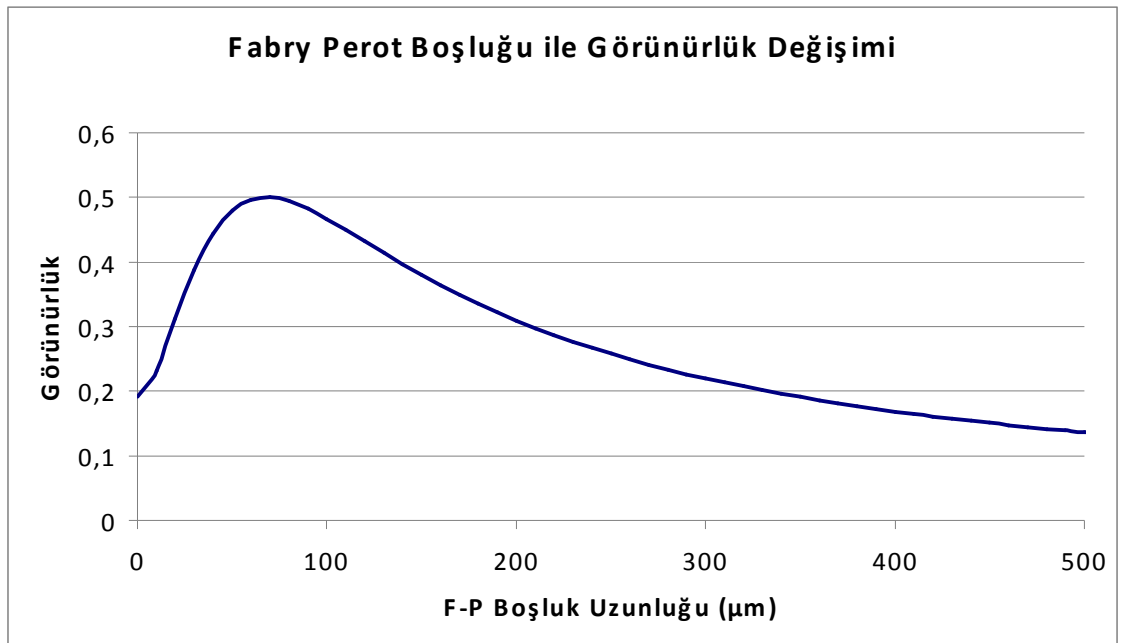
Burada V görünürlük, R_1 fiberin yansıtıcılığı, L Fabry-Perot boşluğunun derinliğidir. Eşitlikte geçen A ise (5.25) eşitliği ile ifade edilmiştir. A eşitliğinde geçen v , tek modlu fiberin normalize frekansını, a ise fiber çekirdeğinin yarıçapını temsil etmektedir. Seçilen fiberin özelliklerine göre görünürlük hesaplanabilir (Ge ve ark. 2008).

Çalışma kapsamında seçilen fiberin özellikleri şöyledir: $a = 5\mu m$, $R_1 = 0.04$, $\lambda = 1.55\mu m$, $v = 2.094$, $A = 0.0458$. Bu değerler ışığında Fabry-Perot boşluğunun değişimi ile görünürlük arasındaki ilişki Şekil 5.26'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, görünürlük belli bir boşluk değerine kadar artmakta ardından da azalarak sifıra yaklaşmaktadır. Fabry-Perot boşluğunun uzunluğu yaklaşık olarak $1000\mu m$ olduğu zaman görünürlük parametresinin 0.07 'ler mertebesinde olduğu

görülmektedir. Bu da boşluk değerinin $1000 \mu\text{m}$ 'den daha küçük değerlerde seçilmesinin görünürlük açısından daha uygun olacağını göstermektedir.



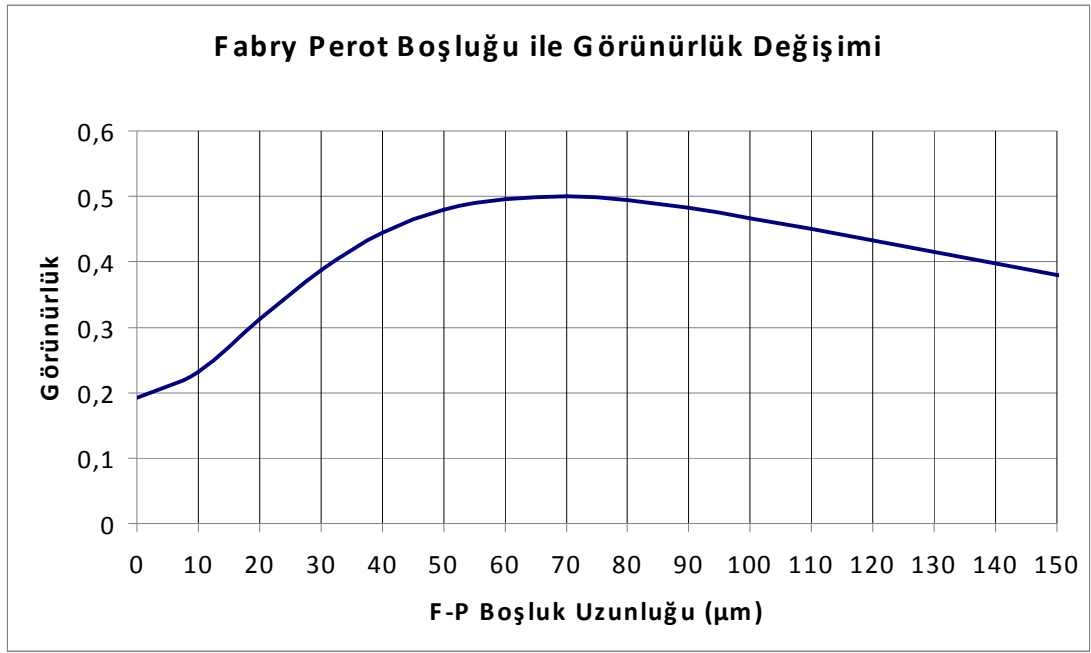
Şekil 5.26. Fabry-Perot Boşluğu ile Görünürlüğün Değişimi (0-7000 μm)



Şekil 5.27. Fabry-Perot Boşluğu ile Görünürlüğün Değişimi (0-500 μm)

Burada görünürlüğe göre bir değer aralığı seçilmesi gerekmektedir. Görünürlük, değişiminin daha net gözlenebilmesi için, değişimin hızlı olduğu 0-500 μm aralığı Şekil 5.27’de verilmiştir.

Şekil 5.28 incelendiğinde görünürlüğün ortalama olarak 70 μm ’ye kadar sürekli olarak arttığı ardından daha yavaş olarak azaldığı görülmüştür. Görünürlüğün yüksek değerlerde olması optik sinyalin ve girişim saçaklarının algılanması açısından sensör tasarımında önemlidir.

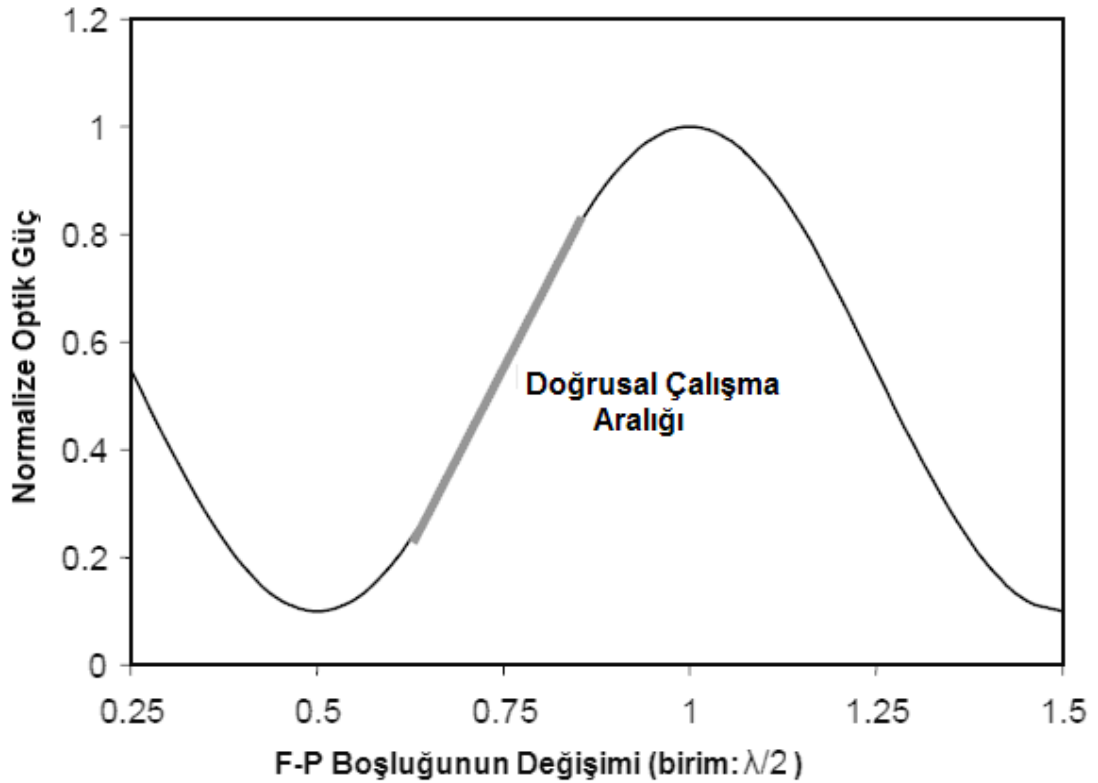


Şekil 5.28. Fabry-Perot Boşluğu ile Görünürlüğün Değişimi (0-150 μm)

Fiberin değiştirilmesi, farklı bir fiber seçilmesi durumunda Fabry-Perot boşluğu ile görünürlüğün değişim grafiği incelenen grafiklere benzerdir. Ancak görünürlüğün maksimum değere ulaştığı boşluk uzunluğu değişmektedir. Bu değişim çok büyük olmamakla birlikte 100 μm mertebesindedir. Şekil 5.26’daki grafikten Fabry-Perot boşluğunun 60-80 μm aralığında seçilmesi durumunda görünürlüğün maksimum olduğu görülmektedir.

5.9.3. Fabry-Perot Boşluğu ile Optik Yoğunluk İlişkisi

Fabry-Perot boşluğunu etkileyen bir diğer parametre optik yoğunluğun boşluk uzunluğuna göre değişimidir. Tasarımı yapılan sensörde gelen ışık Fresnell yasasına göre cam-hava arayüzünden yansır. Kalan ışık Fabry-Perot boşluğunu geçerek membran iç yüzeyine ulaşır. Gelen ışık hava-membran arayüzünden geri yansıyor boşluk ortamını geçerek aynı fiber üzerinden ilerleyip fotoalıcıya ulaşır. Bu iki yansımanın girişimi; (5.21) eşitliğinden de görüldüğü üzere sinüsoidal bir yoğunluk değişimi meydana getirir. Normalize optik gücün değişimi periyodiktir. (Deheng ve ark. 1991).



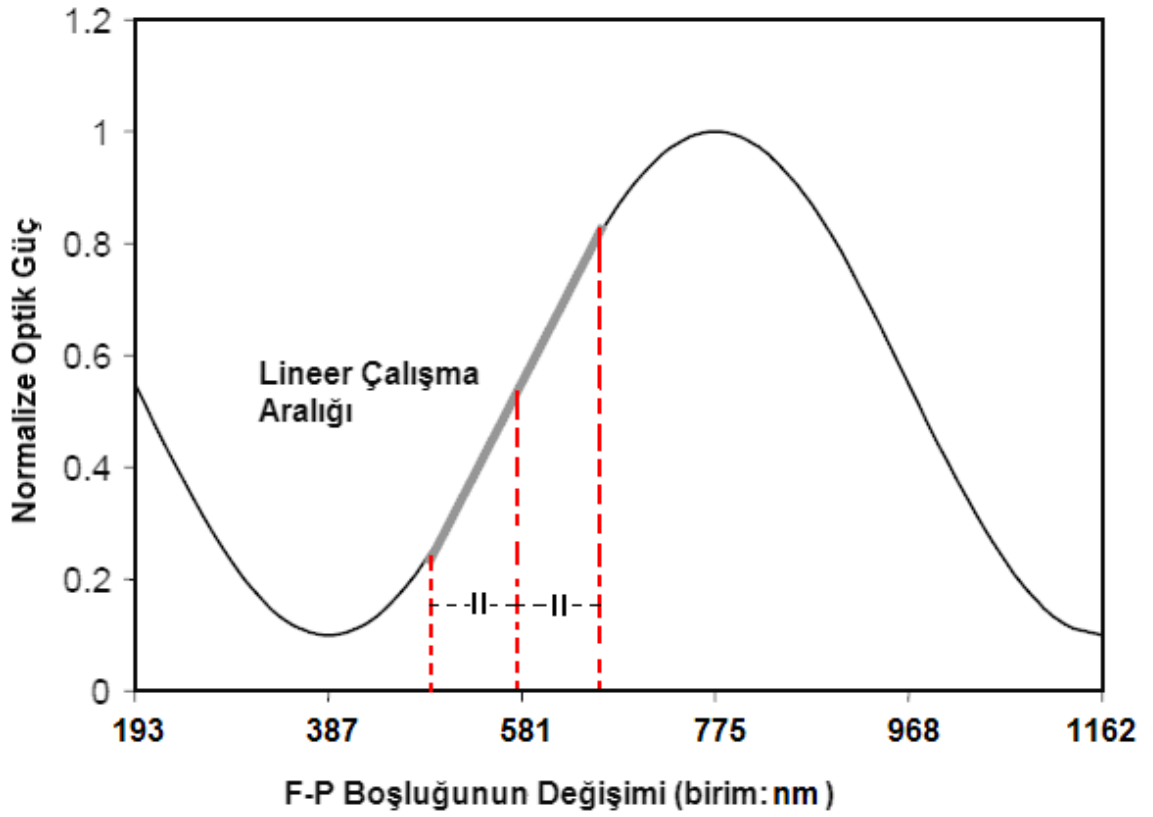
Şekil 5.29. Dalgaboyuna Göre Normalize Optik Güç ile F-P Boşluğu Değişimi

Şekil 5.29 Fabry-Perot boşluğunun normalize optik güç ile değişimini vermektedir. Normalize optik güç değişim grafiği, yarım dalgaboyuna bağlı F-P boşluğunun iki periyodunda bir kendini tekrar etmektedir. Fabry-Perot boşluğunun tasarımı yapılırken, akustik sinyalin olmadığı durumda fotoalıcı tarafından algılanan yoğunluğun, Şekil 5.29'da da görülen yarım periyodun % 60'ına tekabül eden doğrusal

çalışma aralığının ortasına denk gelmesi istenir. Böylece hava boşluğunun uzunluğu değiştikçe, alınan sinyalin yoğunluğu doğrusal çalışma noktasının yukarısına ya da aşağısına doğru hareket edecektir. Eğer alınan sinyal bu % 60'lık doğrusal bölge dışında ve halen yarım periyodun içerisinde ise; demodüle edilen sinyal doğrusal olarak değişmeyecek ve akustik dalganın genliğine dair doğru olmayan ölçüm sonucu verecektir. Eğer sinyal yarım periyodun dışına çıkarsa, belirsizlik problemleri yaşanacaktır. Çünkü optik yoğunluk birden fazla hava boşluğu uzunluk değeri ile ilişkili olacaktır. Bu nedenle tasarlanacak sensörde, Fabry-Perot boşluğu uzunluğunun optik yoğunluğun doğrusal olduğu bölgede seçilmesi önem taşımaktadır. Örneğin; 1300 nm dalgaboyunda çalışan ışık kaynağının kullanıldığı sistem için, yalnızca ± 200 nm deformasyon değerleri doğru olarak ölçülecektir. Benzer şekilde 1550 nm dalgaboyunda çalışan ışık kaynağının kullanıldığı sistemler için ise bu değer ± 230 nm olacaktır.

Fabry-Perot boşluğunun uzunluğunun belirlenmesinde, optik yoğunluk eğrisinden doğrusal çalışma bölgesi seçilirken girişim saçaklarının görünürlüğünün de maksimum olması gerektiği unutulmamalıdır (Lazarevich 2003).

Normalize güç parametresi göz önünde bulundurularak seçilecek Fabry-Perot boşluk uzunluğu belirlenirken Şekil 5.29'da verilen grafikten yararlanılmıştır. Tasarlanan sistemde 1550 nm dalgaboyunda çalışan bir ışık kaynağının kullanıldığı düşünülürse, bu grafik Şekil 5.30'daki gibi olur. Akustik sinyalin olmadığı durumda fotoalıcı tarafından algılanan yoğunluğun şekilde belirtilen doğrusal çalışma aralığının ortasına gelmesi gerekmektedir. Bu da tasarlanan sensörde Fabry-Prot boşluk uzunluğunun doğrusal bölgenin ortasında olacak şekilde seçilmesi gerektiğini göstermektedir. Şekil 5.30'daki grafikten yararlanılarak FP boşluk uzunluğunun 580 nm olması gerektiği görülmektedir. Grafiğin dalgaboyuna (λ) göre periyodik olduğu bilindiğine göre FP boşluk uzunluğu 580 nm'nin katlarında da doğrusal bölgenin orta noktasına denk gelecektir. 1550 nm dalgaboyunda çalışan ışık kaynağının kullanıldığı sistemler için membrandaki çökmenin ± 230 nm aralığında olması gerekmektedir. Yapılan mekanik analizler çökme miktarının bu değerler aralığında olduğunu göstermektedir.

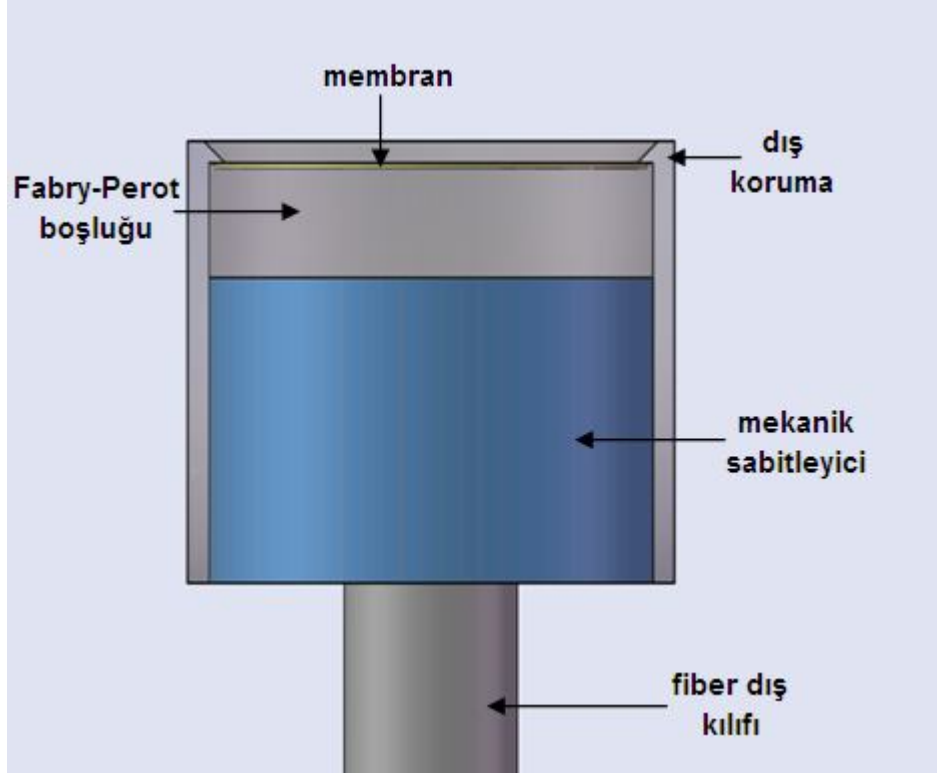


Şekil 5.30. Normalize Optik Güç ile F-P Boşluğu Değişimi

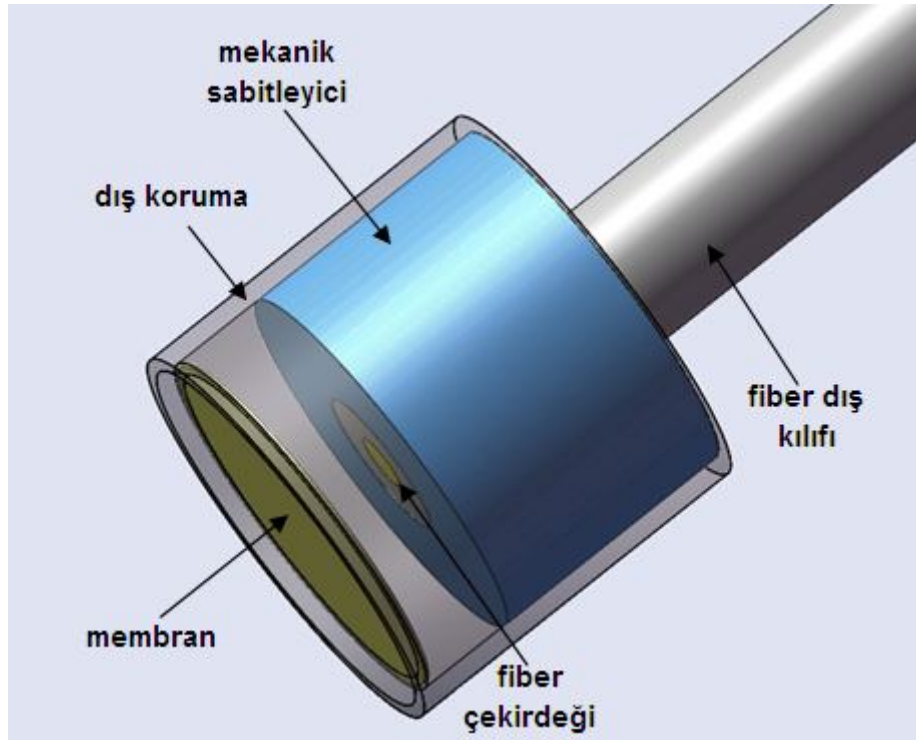
Şekil 5.28'deki Fabry-Perot boşluğu ile görünürlüğün değişimi grafiği göz önüne alındığında, Fabry Perot boşluk uzunluğunun 60-80 μm aralığında seçilmesinin uygun olduğu görülmüştür. Böylece saçakların görünürlüğü daha net olacaktır. Bunun yanında Şekil 5.30'daki Fabry-Perot boşluk uzunluğunun normalize optik güç ile değişim grafiği göz önüne alındığıdaysa, tasarlanan sensörün doğrusallığının sağlanabilmesi için boşluk uzunluğunun 580 nm ya da bunun katları olması gerektiği belirlenmiştir. Bu iki grafik göz önüne alınarak Fabry Perot boşluğunun uzunluğu 80 μm olarak seçilmiştir.

5.10. Optik Fiberli Kısmi Boşalma Sensörünün Tasarımı

Daha önceki bölümlerde kısmi boşalmanın algılanmasında kullanılacak sensörlerde kritik öneme sahip olan membran kalınlığı, malzemesi, yüzey uzunluğu ve Fabry-Perot boşluk uzunluğu ile ilgili yapılan çalışmalar neticesinde optimum değerler belirlenmiştir. Bu değerler ışığında Solidworks çizim ortamında sensörün tasarımı yapılmıştır.



Şekil 5.31. Optik Fiberli Akustik Sensör Yan Görünüşü

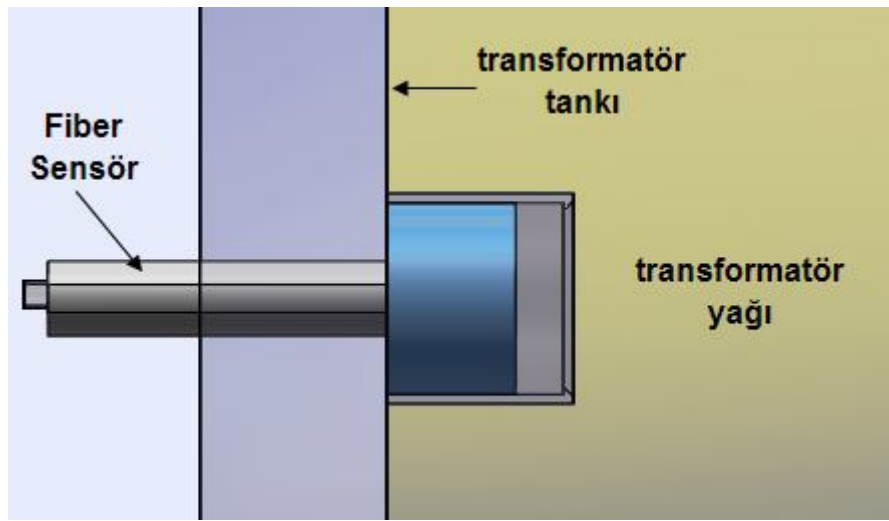


Şekil 5.32. Optik Fiberli Akustik Sensör İzometrik Görünüşü

Sensör ölçüm kafası, Şekil 5.31’de de görüldüğü üzere dış koruma içerisine yerleştirilmiş membran ve fiberden oluşmaktadır. Yansıtıcılığının artırılması amacıyla membran yüzeyi altın ya da yansıtıcılığı yüksek benzer bir malzeme ile buharlaştırma yöntemi ile kaplanabilir. Böylece gelen ışın membranın altın kaplanan yüzeyinden % 96 oranında yansır (Ge ve ark. 2008). Şekil 5.32’de tasarlanan sensörün izometrik görünüşü verilmiştir.

Tasarımda membran ile fiber sonu arasındaki Fabry-Perot boşluğu hava ile doludur. Kısmi boşalmayı algılamada kullanılan dahili optik fiberli akustik sensörler yağ dolu transformatör tankının içerisinde konumlandırılırlar. Bu nedenle membran iç yüzeyi ile dış yüzeyi arasında kısmi boşalma olmadığında dahi yağ basıncı mevcuttur ve bu da ilave bir çökme meydana getirecektir. İlk tasarım yapılırken çalışma şartlarından kaynaklanan bu durum göz ardı edilmiştir. Bu açık noktanın giderilmesi için iki farklı yöntem mevcuttur: Bunlardan ilki membrana kısmi boşalma tarafından uygulanan akustik basınca yağ basıncını da ilave etmektir. Buna göre analiz yapılacak ve elde edilen sonuçlar ışığında da gerekli iyileştirmeler gerçekleştirilecektir. Diğer yöntemde ise, membranının yağ ile temas ettiği yüzeye uygulanan yağ basıncı ile membran iç yüzeyinden uygulanan basıncın eşitlenmesi sağlanacak, böylelikle yapılan ilk analizler doğru olacaktır.

Transformatör tankı içerisinde konumlandırılan sensörün görünümü Şekil 5.33’te verilmiştir.



Şekil 5.33. Basıncı Ayarlanabilen Optik Fiberli Akustik Sensör İzometrik Görünüşü

5.11. Optik Fiberli Kısmi Boşalma Sensörüne Etki Eden Sıvı Basıncı

Bölüm 5.8’de, membrana etkiyen basıncın sadece kısmi boşalmadan kaynaklandığı kabul edilerek çökme analizleri yapılmış, buradan elde edilen sonuçlara göre duyarlılık ve doğrusallık belirlenmiştir. Oysa gerçekte tasarımı yapılan optik fiberli kısmi boşalma akustik sensörüne, transformatör yağı tarafından konumlandırıldığı yere göre değişen ilave bir basınç da uygulanmaktadır. Uygulanan basınç transformatör yağının yoğunluğuna, sensörün yağa göre ne kadar derinlikte konumlandırıldığına bağlıdır.

Bu bölümde Solidworks çizim ortamında 2x2x2 metre boyutlarında yağ dolu transformatör tankı modellenmiştir. Bu model üzerinde tasarlanan optik fiberli kısmi boşalma sensörü üç farklı noktada konumlandırılmıştır. Konumlandırıldıkları yere göre membrana etkiyen yağ basıncı hesaplanmıştır.

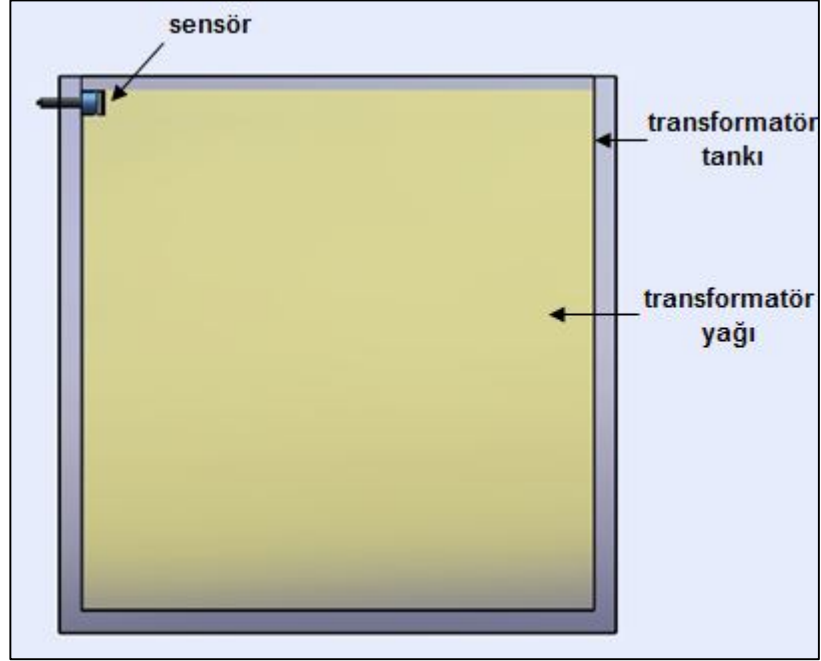
Membrana uygulanan yağ basıncı, yağa daldırılan sensörün yüzeyden derinliğine, transformatör yalıtım yağının yoğunluğuna ve yerçekimi ivmesine bağlıdır. Yerçekimi ivmesi $g = 9.81 \text{ N/kg}$ alınmıştır. Transformatör yağının yoğunluğu 0.85-0.89 g/cm^3 aralığında değişkenlik göstermektedir. Yapılan hesaplamalar için bu değer 0.85 g/cm^3 kabul edilmiştir.

Transformatör yağına daldırılan sensör membranına uygulanan basınç (5.26)’daki eşitlik ile hesaplanabilir. Eşitlikte ρ transformatör yağının yoğunluğunu, g yerçekimi ivmesini, h sensörün yağ yüzeyinden derinliğini ifade etmektedir (Umur 2001).

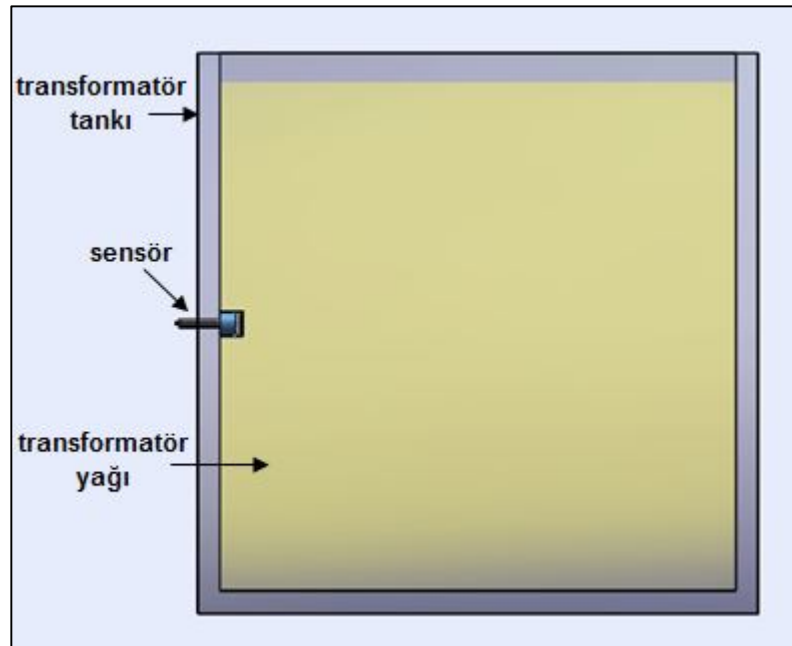
$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (5.26)$$

Şekil 5.34, tasarlanan optik fiberli akustik sensörün transformatörün üst noktalarında konumlandırıldığı durumu göstermektedir. Sensörün transformatör yağının yüzeyinden 0.1 m derinlikte konumlandırıldığı durum için; (5.26)’ya göre membrana uygulanan yağ basıncı 833.85 Pa’dır.

Şekil 5.35, tasarlanan optik fiberli akustik sensörün transformatör tankının ortasında konumlandırıldığı durumu göstermektedir. Sensörün transformatör yağının yüzeyinden 1 m derinlikte konumlandırıldığı durum için; (5.26)'ya göre membrana uygulanan yağ basıncı 8.34 kPa'dır.

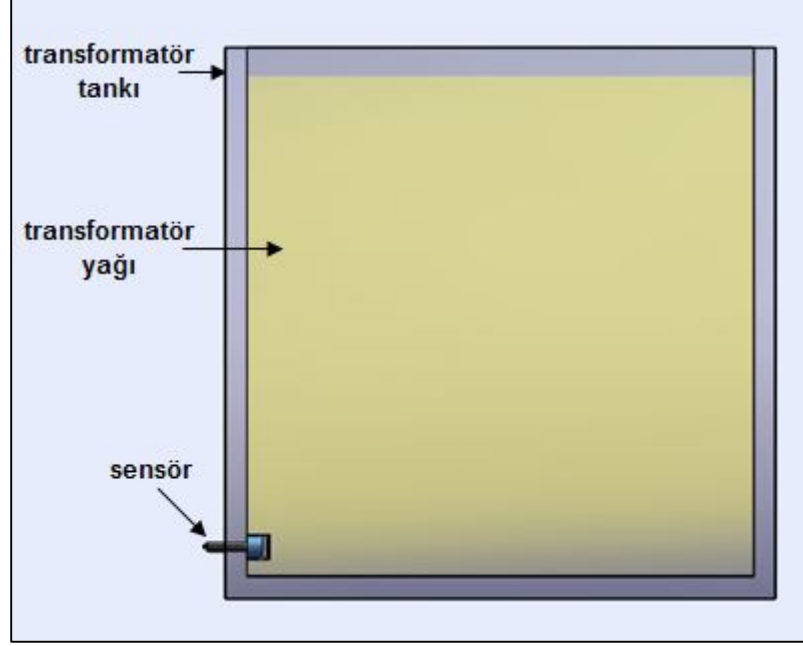


Şekil 5.34. Optik Fiberli Akustik Sensörün Transformatör Tankının Üstünde Konumlandırılması



Şekil 5.35. Optik Fiberli Akustik Sensörün Transformatör Tankının Ortasında Konumlandırılması

Şekil 5.36, tasarlanan optik fiberli akustik sensörün transformatör tankının altında konumlandırıldığı durumu göstermektedir. Sensörün transformatör yağının yüzeyinden 2 m derinlikte konumlandırıldığı durum için; (5.26)'ya göre membrana uygulanan yağ basıncı 16.68 kPa'dır.



Şekil 5.36. Optik Fiberli Akustik Sensörün Transformatör Tankının Altında Konumlandırılması

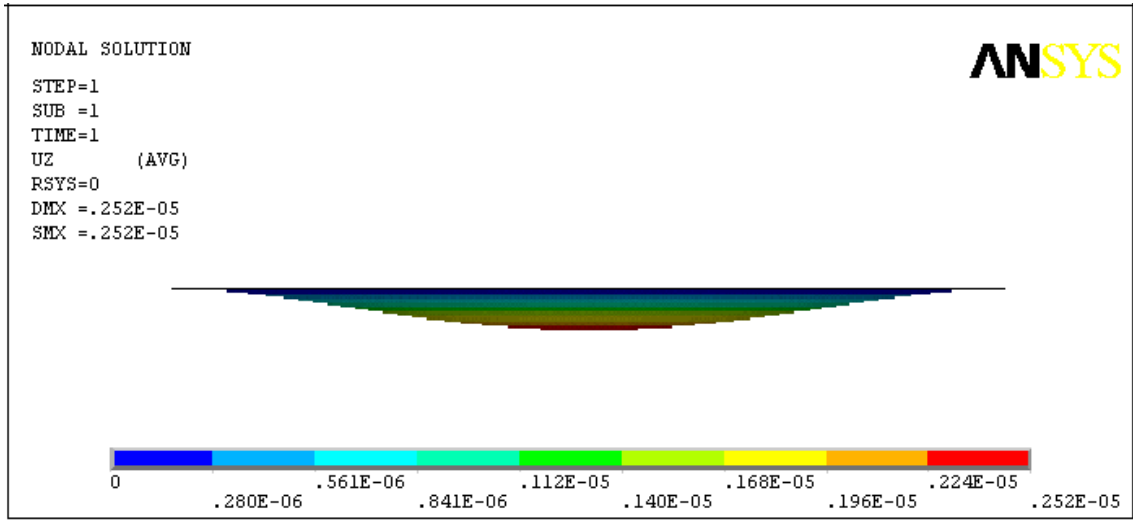
Membrana uygulanan yağ basıncı, kısmi boşalma akustik sinyali tarafından uygulanan basınca göre oldukça büyük değerlerdedir. Sensörün transformatör tankında yağ yüzeyine göre derine yerleştirilmesi durumunda, membranda yağ basıncından kaynaklanan çökmeler sensörün doğrusal olmayan bölgede çalışmasına yol açabilir. Bu da sensörden gelecek kısmi boşalma ölçüm değerlerinin doğruluğunu etkiler.

5.12. Optik Fiberli Kısmi Boşalma Sensöründe Sıvı Basıncı ve Kısmi Boşalmanın Membrana Ortak Etkisi

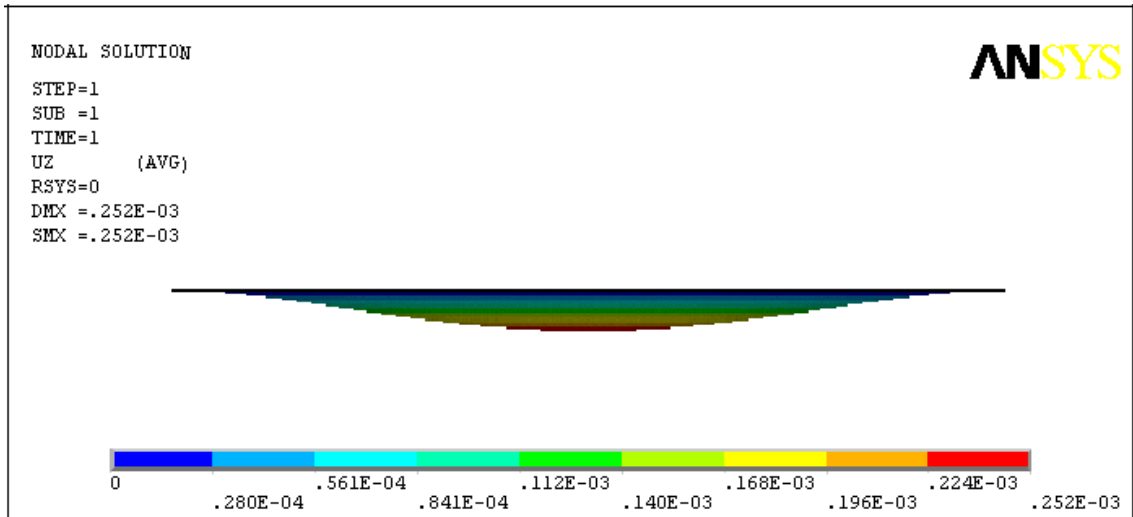
Daha önceki bölümlerde yapılan membran analizlerinde yağ basıncı göz ardı edilmiştir. Ancak matematiksel analizler yağ basıncının ihmal edilemeyecek büyüklükte olduğunu göstermektedir. Bu nedenle bu bölümde kısmi boşalma nedeniyle oluşan akustik basınca yağ basıncı da ilave edilerek analizler tekrarlanmıştır. Analizlerde, tasarımı yapılan optik fiberli kısmi boşalma sensörünü, transformatör tankı içerisinde üç

farklı yerde konumlandırılması durumu için bir önceki bölümde hesaplanan yağ basıncı değerleri kısmi boşalma değerine ilave edilmiştir.

Şekil 5.37 ve Şekil 5.38, yağ basıncının ihmal edildiği durumda, silika membrana kısmi boşalma kaynağı tarafından 1 Pa ve 100 Pa basınç uygulanması durumu için çökme miktarlarını vermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere çökme orta noktada maksimum değerindedir. Basınç ile çökme miktarı doğru orantılı olduğundan 100 Pa basınçta membrandaki çökme değeri 1 Pa'daki çökme değerinin 100 katıdır.

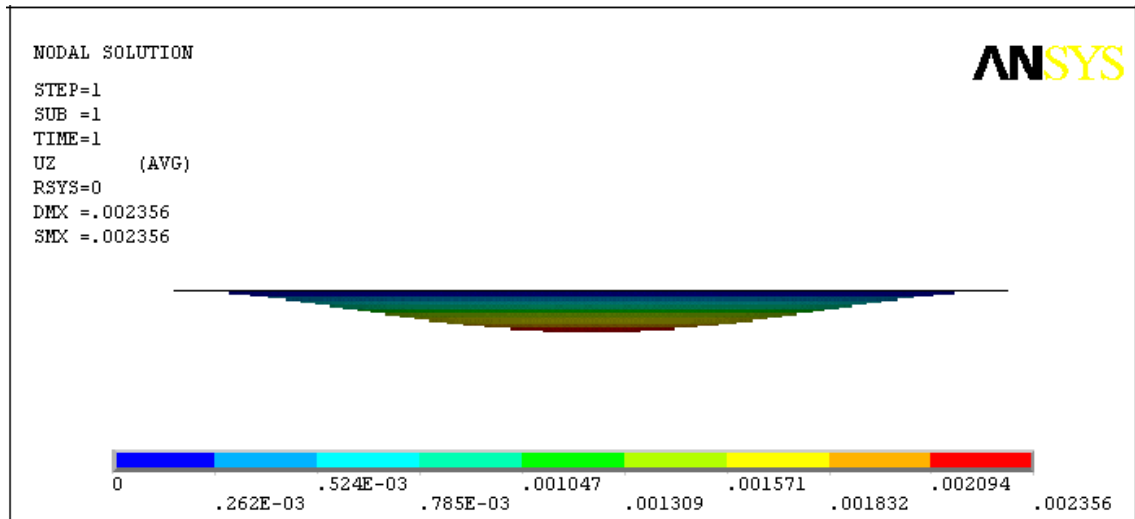


Şekil 5.37. 1 Pa Basınçta Silikadan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri

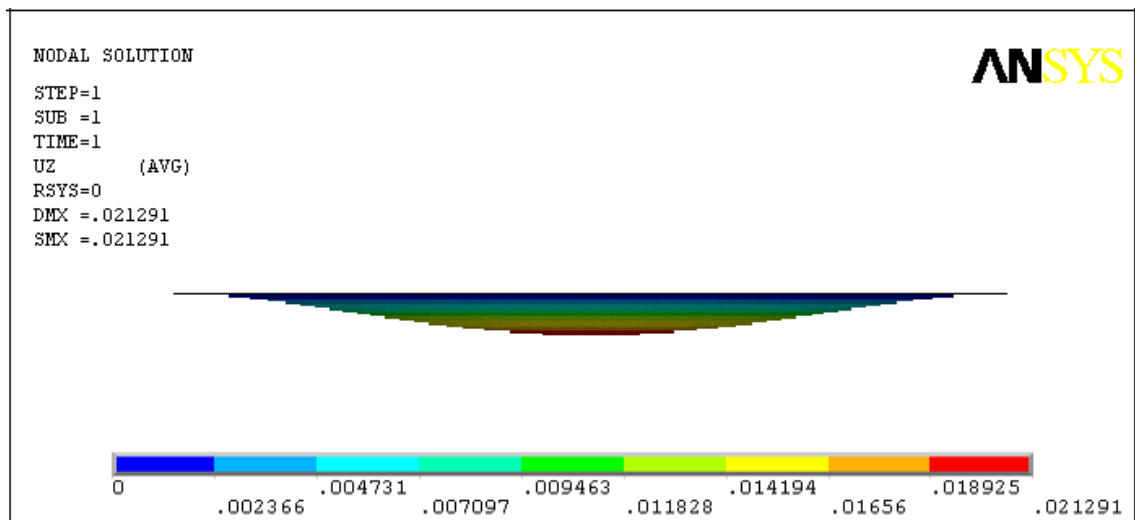


Şekil 5.38. 100 Pa Basınçta Silikadan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri

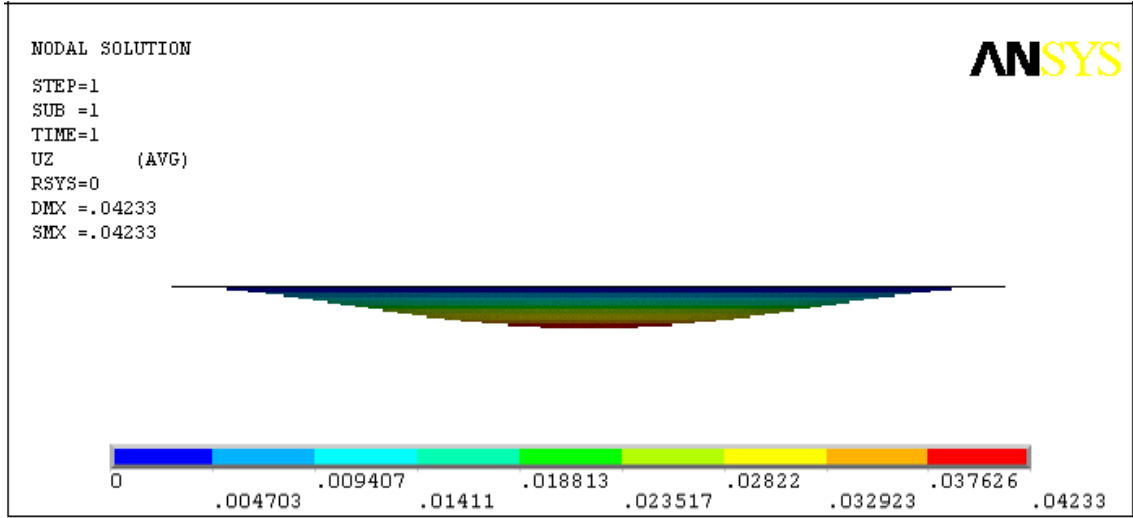
Bir önceki bölümde görüldüğü üzere sensörün transformatör yağının yüzeyinden 0.1 m derinlikte konumlandırıldığı durum için membrana uygulanan yağ basıncı 833.85 Pa; yağ yüzeyinden 1 m derinlikte konumlandırıldığı durum için membrana uygulanan yağ basıncı 8.34 kPa ve yağ yüzeyinden 2 m derinlikte konumlandırıldığı durum için membrana uygulanan yağ basıncı 16.68 kPa'dır. Bu değerlere ilave olarak kısmi boşalma nedeniyle oluşacak 100 Pa'lık bir basınç olduğunu kabul edelim. Bu durumda 0.1 m, 1 m ve 2 m derinlikteki sensördeki basınç değerleri sırasıyla 933 Pa, 8,44 kPa ve 16,78 kPa'dır. Bu değerler ışığında yapılan analizler Şekil 5.39, Şekil 5.40 ve Şekil 5.41'de verilmiştir.



Şekil 5.39. 933 Pa Basınçta Silikadan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri



Şekil 5.40. 8.44 kPa Basınçta Silikadan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri

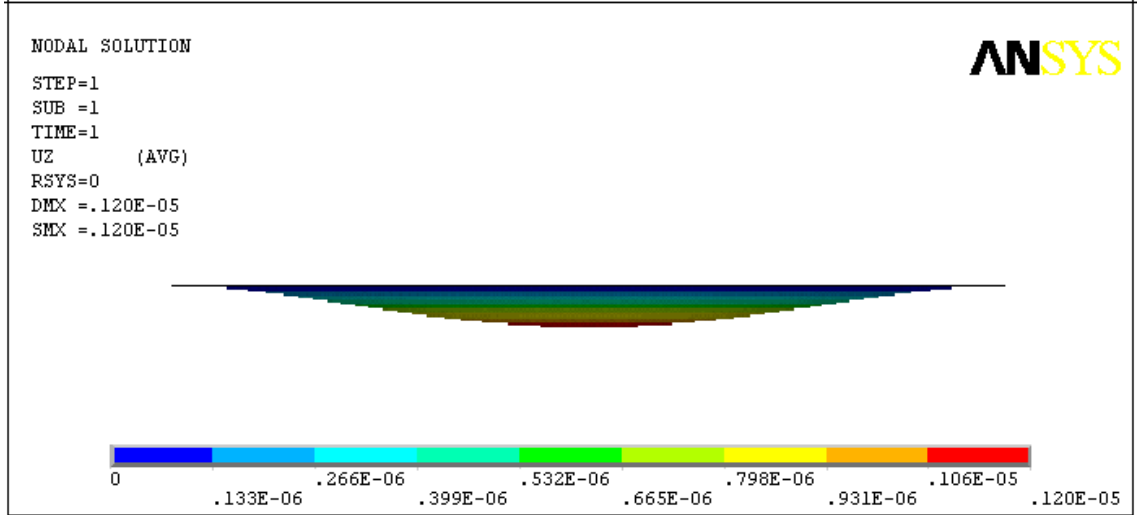


Şekil 5.41. 16.78 kPa Basıncıta Silikadan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri

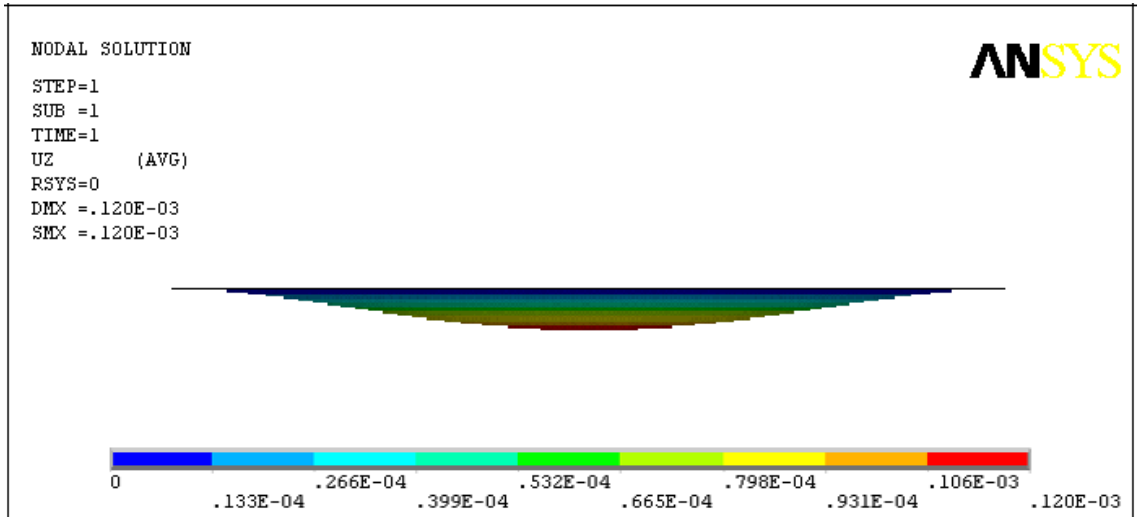
Yağ yüzeyinden 0.1 m derinde konumlandırılan optik fiberli sensör için kısmi boşalmanın oluştuğu durumda membranda meydana gelen çökme miktarı $2.356 \mu\text{m}$ 'dir. 2 mm yarıçapında ve $25 \mu\text{m}$ kalınlığındaki membran için doğrusal çökme bölgesi $6,25 \mu\text{m}$ 'den küçük çökmeleri kapsamaktadır. Buna göre membran küçük çökme bölgesi içerisinde olduğu için, mekanik olarak doğrusal özelliklere sahiptir. Ancak optik olarak doğrusal olabilmesi için Fabry-Perot boşluğundaki değişimin 1550 nm dalgaboyunda çalışan bir sistem için maksimum $\pm 230 \text{ nm}$ değerinde olması gerektiği unutulmamalıdır. Bu nedenle membran mekanik olarak doğrusallığı sağlasa dahi Fabry-Perot boşluğunda meydana gelen belirlenen değerin üzerindeki çökme nedeniyle sensör doğru çalışmayacaktır.

Benzer şekilde elde edilen diğer değerler ışığında yağ yüzeyinden 1 m derinde konumlandırılan optik fiberli sensör için kısmi boşalmanın oluştuğu durumda membranda meydana gelen çökme miktarı $21.12 \mu\text{m}$, 2 m derinlik için ise bu değer $42.33 \mu\text{m}$ 'dir. Buna göre daha derin noktalarda konumlandırılan sensör için, hem membran mekanik doğrusallığı sağlamayacak hem de membranda meydana gelen yüksek çökme değeri Fabry-Perot boşluğunda büyük değişimlere neden olarak optik olarak da doğrusallığı bozacaktır.

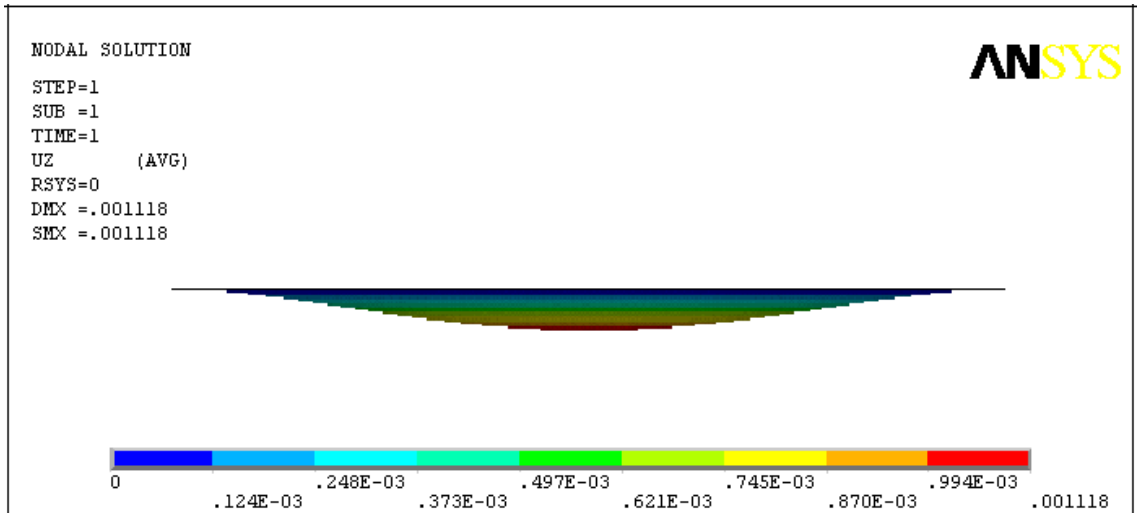
Aynı analizler eşit ölçülerdeki silikon membran için de yapılmış, elde edilen sonuçlar Şekil 5.42, Şekil 5.43, Şekil 5.44, Şekil 5.45 ve Şekil 5.46'da verilmiştir.



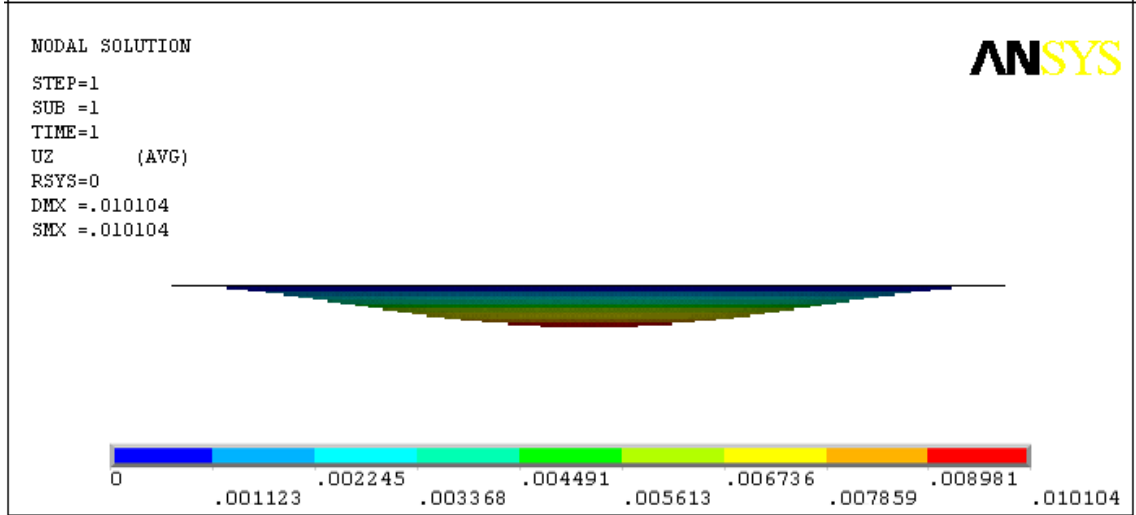
Şekil 5.42. 1 Pa Basıncıta Silikondan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri



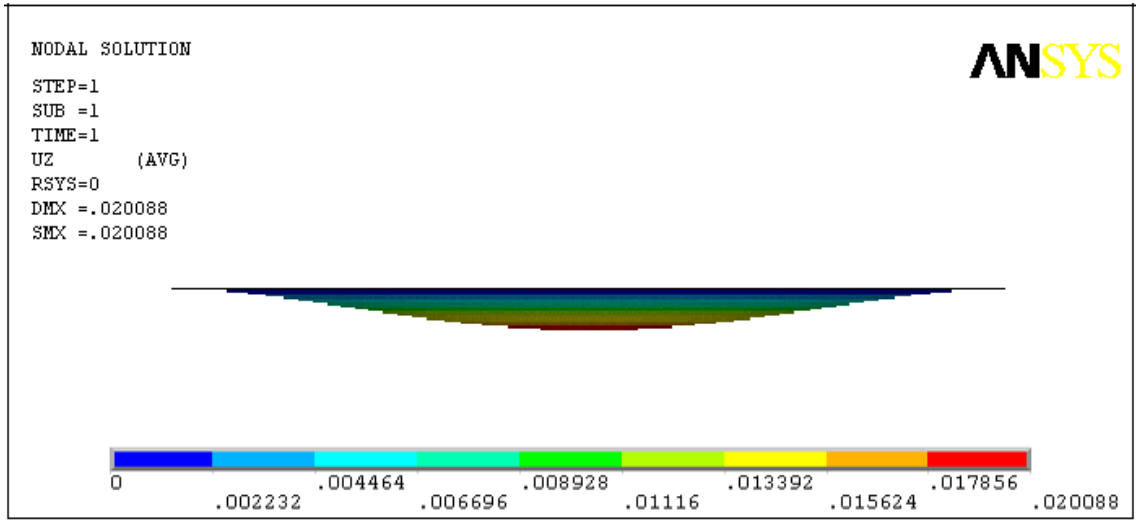
Şekil 5.43. 100 Pa Basıncıta Silikondan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri



Şekil 5.44. 933 Pa Basıncıta Silikondan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri



Şekil 5.45. 8.44 kPa Basınçta Silikondan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri



Şekil 5.46. 16.78 kPa Basınçta Silikondan Yapılmış Membrandaki Çökme Değeri

Elde edilen analiz sonuçları değerlendirildiğinde, silikadan yapılmış membranda meydana gelen çökme değerlerinin, silikonun yaklaşık olarak iki katı olduğu görülmüştür. Ancak silikon membran da, silika membranda olduğu gibi yüksek yağ basıncı değerlerinde doğrusal olmayan bölgede kalmaktadır. Bu nedenle yağ basıncı gözönüne alındığında sensörün tasarlandığı ölçülerde ve Şekil 5.32'deki tasarıma göre doğru ölçüm değerleri vermesi mümkün değildir. Yağ basıncı dahil edildiği durumda membranda meydana gelen çökmelerin doğrusal bölgede kalmasını sağlamak için, membran yeniden ölçülendirilebilir. Ancak yarıçap değeri düşürülüp membran kalınlığının artırılmasıyla sağlanacak bu durumda da kısmi boşalmanın algılanması mümkün olmaz. Bir sonraki bölümde bu soruna çözüm aranmıştır.

5.13. Optik Fiberli Kısmi Boşalma Sensöründe Sıvı Basıncı Etkisinin Ortadan Kaldırılması

Yağ basıncının da membrana uygulanan basınca ilave edildiği durum için sensörün doğru sonuçlar vermeyeceğine bir önceki bölümde değinilmiştir. Bu sorunun aşılabilmesi için yağ basıncının etkisini ortadan kaldıracak şekilde bir tasarım yapılması daha doğru olacaktır. Bu nedenle yeni tasarım gerçekleştirilirken, membrana yağ tarafından uygulanan dış basınç ile membran fiber arasındaki yüzeyden uygulanacak iç basıncın eşitlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için fiberi sabitlemek için kullanılan ve Fabry-Perot boşluğu ile temas eden mekanik sabitleyiciye kanal açılmıştır. Bu kanal vasıtasıyla, Fabry-Perot boşluğundan içeriye transformatör yağı girebilecek, sensörün konumlandırıldığı yerdeki yağ basıncına eşit bir basınç membranın iç yüzeyinden de uygulanacaktır. Böylelikle kısmi boşalma oluşmadığında, sensör membranının üst ve alt yüzeylerinde eşit basınç olacağından membranda yağ basıncından kaynaklanan bir çökme meydana gelmeyecektir.



Şekil 5.47. Kanal Açılmış Optik Fiberli Akustik Sensör Ön Görünüşü

Bu yöntemin zorluğu, Fabry-Perot boşluğunun yağ ile doldurulması nedeniyle fiber-hava-membran arayüzlerinin fiber - transformatör yağı - membran olarak değişmesidir. Havanın kırılma indisi 1 iken, transformatör yağının kırılma indisi farklı yağ çeşitleri ve ölçüm sıcaklıkları göz önüne alındığında ortalama olarak 1.40'tır. Fabry-Perot boşluğunun yağ ile doldurulması sonucu kırılma indisinde oluşan bu değişim, başta faz farkı ve optik yoğunluk olmak üzere birçok ifadede değişikliğe neden olmaktadır. Bu nedenle yağ ortamı için yeniden analizlerin yapılması daha doğru olacaktır. Yöntemin ikinci zorluğu ise kırılma indisinin sabit olmamasından kaynaklanmaktadır. Transformatör yağının kırılma indisi ilk ölçüm değerlerinde 1.40 olsa da, transformatör çalışıkça yağda meydana gelen kirlenmeler neticesinde kırılma indisinde de sürekli bir artış olacaktır. Bu nedenle yapılan hesaplamaların periyodik olarak kırılma indisinde belli bir artış yapılarak tekrar yenilenmesi gerekmektedir.

5.14. Yeni Tasarlanan Optik Fiberli Sensör İçin Fabry-Perot Boşluğunun Değişimi

Sıvı basıncı etkisinin ortadan kaldırılması amacıyla yeni tasarımda Fabry-Perot boşluğuna bir kanal açılmıştır. Böylelikle yeni tasarımda, Fabry-Perot boşluğu yağ ile dolacaktır. Bu da Fabry-Perot boşluk uzunluğu hava ile dolu farzedilerek yapılan hesaplamalarda değişikliklere neden olacaktır. Çünkü havanın kırılma indisi 1 iken, transformatör yağının kırılma indisi ortalama olarak 1.40'tır. Transformatör çalışıkça yağda meydana gelen kirlenmeler neticesinde transformatör yağının kırılma indisinde sürekli bir artış olacaktır. Ancak bu bölümde yağın kırılma indisi sabit kabul edilmiştir. Şekil 5.48'de yeni tasarlanan optik fiberli sensördeki yansıma ortamları verilmiştir.

Fresnell denklemleri ortam değiştiren elektromanyetik dalganın yansıma ve iletim karakteristiklerini tanımlar. Bu denklemler, yüzeye paralel ya da dik gelen dalgaların yansıma ve iletim katsayılarını belirler. Snell yasaının uygulanabildiği dielektrik bir ortam için gelen ve yansıyan açılar birbiri ile ilişkilidir ve Fresnell denklemleri gelen ve yansıyan açıların bir fonksiyonudur.

	Cam	n_0
	Yağ	n_1
	Silikon	n_2

Şekil 5.48. Yeni Tasarlanan Optik Fiberli Sensördeki Yansımaya Ortamları

Kırılma indisi n_1 olan bir ortamdan, kırılma indisi n_2 olan bir ortama, θ_i açısıyla gelen bir ışın için; θ_t iletilen ortamdaki açısı, r yansımaya katsayısı, t ise iletim katsayısını ifade etmektedir.

Fresnell eşitliklerine göre yansımaya katsayıları (5.27) ve (5.28)'de verilmektedir.

$$r_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad (5.27)$$

$$r_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (5.28)$$

Fresnell eşitliklerine göre iletim katsayıları (5.29) ve (5.30)'da verilmektedir.

$$t_{\parallel} = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)} \quad (5.29)$$

$$t_{\perp} = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (5.30)$$

Fresnell eşitliklerinde verilen katsayılar kesirli ifadelerdir ve dalganın geliş yönüne göre katsayıların işaretleri değişebilir. İletim katsayılarını 1'den büyük yapacak şekilde parametreler seçilebilir ancak bu enerjinin korunumu yasasına uymaz. Bu nedenle iletim katsayıları 1'den büyük olmamalıdır. Eşitliklerden elde edilen iletim

katsayısının karesi, birim alan başına iletilen enerji akısını yani iletilen enerji yoğunluğunu vermektedir.

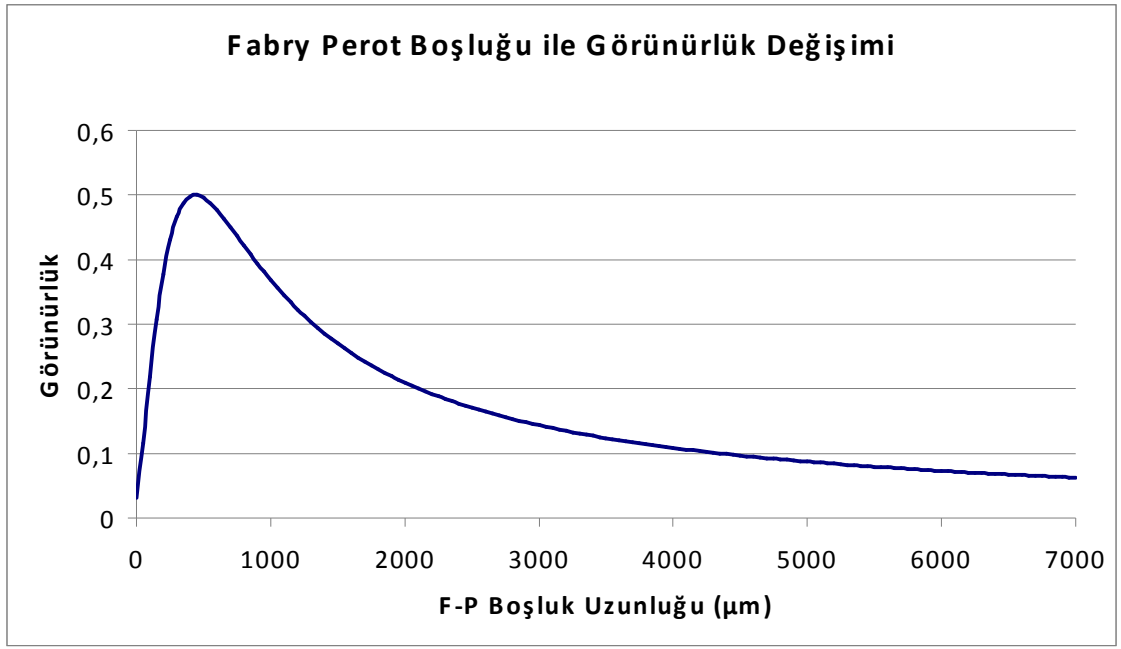
Enerjinin korunumu yasasından yola çıkarak (5.31) eşitliği yazılır.

$$r^2 + t^2 \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} = 1 \quad (5.31)$$

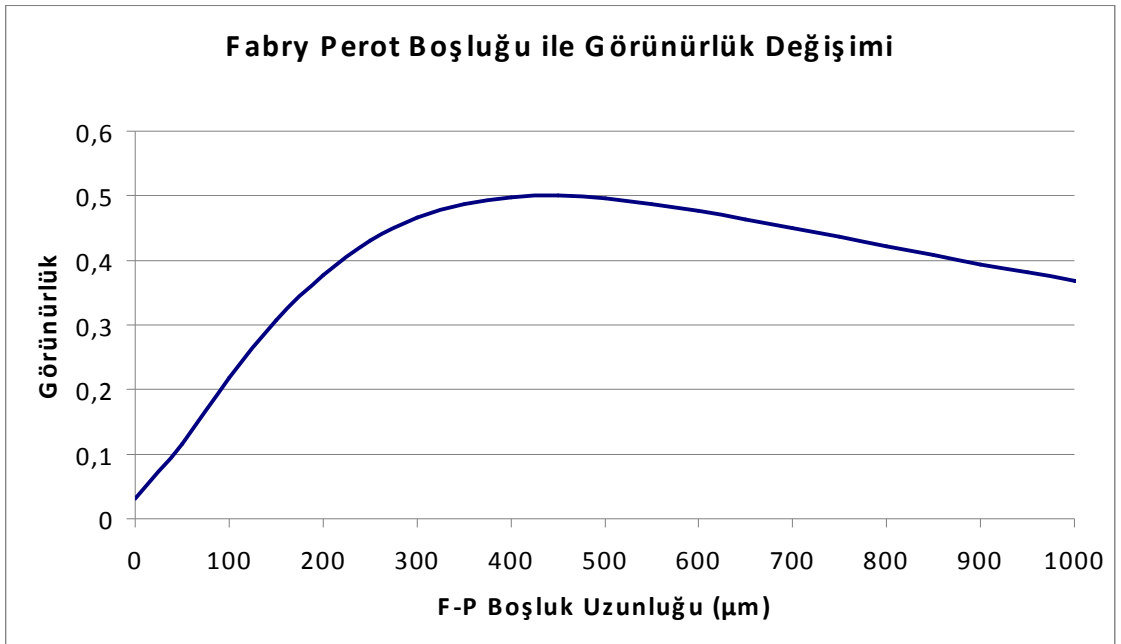
Tanımlanan bu eşitliklerden yola çıkarak Fabry-Perot boşluğunun hava ile dolu olduğu üç katmanlı yapıda; fiber çekirdeğinin kırılma indisi 1.49 ve havanın kırılma indisi 1 olmak üzere, gelen ışığın fiber-hava arayüzünden % 4'ünün, membran-hava arayüzüne ulaşan ışığın ise %96'sının yansıdığını daha önceki bölümlerde belirtmiştik. Bu bölümde Fabry-Perot boşluğunun yağ ile olduğu durum için yansıyan ve iletilen ışık miktarları incelenecektir.

Fiber çekirdeğinin kırılma indisi 1.49 ve transformatör yağının kırılma indisi 1.40 olarak alınır, aynı şartlarda Fresnell eşitliklerine göre fiber-yağ arayüzünden ışığın yaklaşık olarak % 0.1'i yansiyacaktır. Fiber çekirdeği ile transformatör yağının kırılma indislerinin birbirine yakın değerlerde olması nedeniyle yansımanın düşük olması beklenen bir sonuçtur. Gelen ışığın % 99.9'u ise yağ ile dolu Fabry-Perot boşluğunu geçerek membran yüzeyine ulaşmaktadır.

Fabry-Perot boşluk uzunluğunu belirlemede önemli parametrelerden biri olan görünürlük hesaplanırken, fiber-hava arayüzündeki yansıma oranı % 4 olduğundan fiberin yansıtıcılığı $R_1 = 0.04$ alınmıştır. Yeni tasarımda fiber-yağ arayüzündeki yansıtıcılık değeri % 0.1 olduğundan görünürlük değeri değişecektir. Fiberin yansıtıcılık oranı $R_1 = 0.001$ alınarak (5.24) eşitliği yeniden çözdürüldüğünde, Fabry-Perot boşluğunun değişimi ile görünürlük arasındaki ilişki Şekil 5.49'daki gibi elde edilmiştir. Elde edilen grafiğin karakteristiği Şekil 5.26 ile benzer olmakla birlikte maksimum noktalarında farklılıklar vardır. Grafikten yola çıkarak boşluk değerinin 1000 μm 'den daha küçük değerlerde seçilmesinin görünürlük açısından daha uygun olacağı kanısına varılabilir. Ancak en uygun değerler görünürlüğün maksimuma yakın olduğu değerlerdir. Şekil 5.50'de görünürlüğün maksimum olduğu bölge verilmiştir.



Şekil 5.49. Fabry-Perot Boşluğu ile Görünürlüğün Değişimi (0-7000 μm)



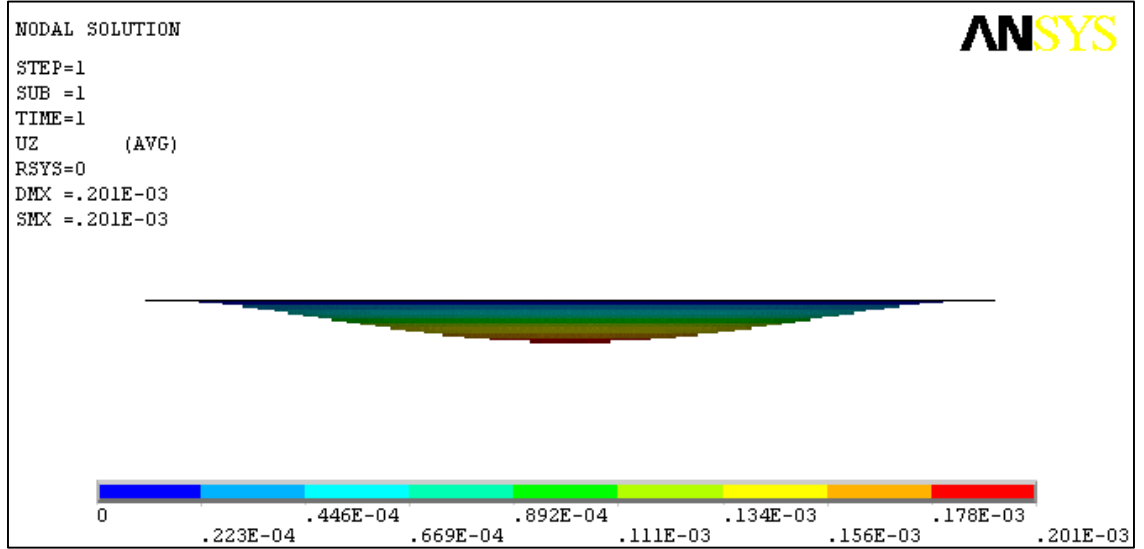
Şekil 5.50. Fabry-Perot Boşluğu ile Görünürlüğün Değişimi (0-1000 μm)

Şekil 5.50'deki grafikten Fabry-Perot boşluğunun 400-500 μm aralığında seçilmesi durumunda görünürlüğün maksimum olduğu görülmektedir. Buna göre optik yoğunluk değeri de göz önüne alınarak Fabry-Perot boşluğunun değeri 400 μm olarak seçilmiştir.

5.15. Sensör Duyarlılığının Arttırılması

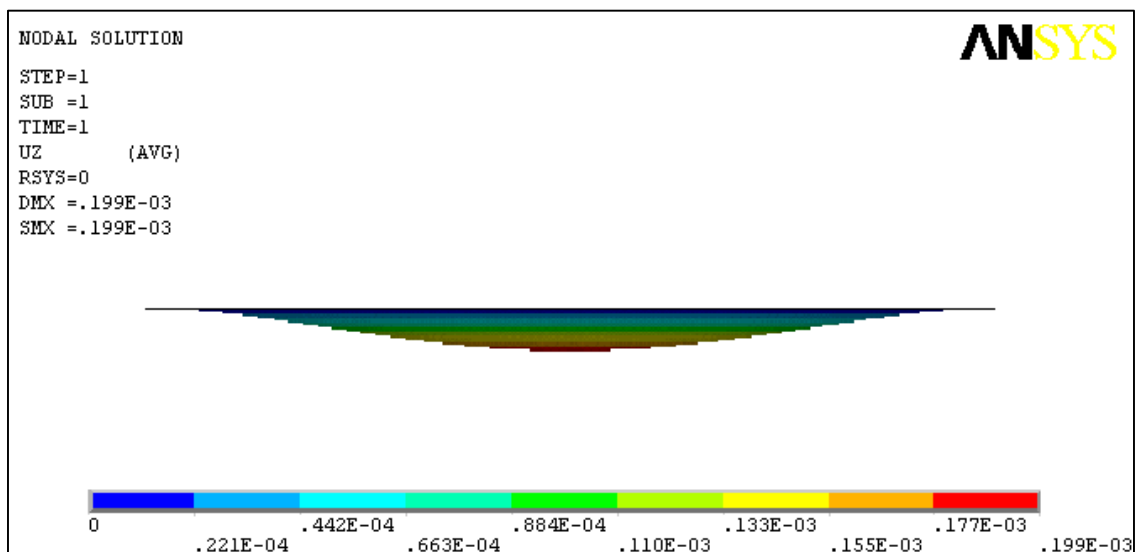
Sensör membranına kısmi boşalma nedeniyle 100 Pa'lık bir akustik basınç uygulanması durumu için ANSYS benzetim ortamında gerçekleştirilen analizlerde membran merkezindeki çökme değerleri; silika için yaklaşık 250 nm, silikon için ise yaklaşık 120 nm bulunmuştur (Şekil 5.38 ve Şekil 5.43). Bu değerler hem 6.25 μm değerinden küçük olduğu için membran doğrusallığını, hem de silikon için ± 230 nm değerinden küçük, silika için de bu değere yakın olduğu için Fabry-Perot boşluğundaki değişimden kaynaklanan normalize optik gücün doğrusallığı sağlamaktadır. Ancak kısmi boşalmanın çoğunlukla 0.2-5 Pa aralığında akustik basınç oluşturduğu, 100 Pa değerinin kısmi boşalma için oldukça büyük bir değer olduğu ve çok nadir gerçekleştiği göz önüne alındığında; 0.2-5 Pa değer aralığında çalışan yüksek hassasiyetli optik fiberli akustik sensörün tasarımı daha uygun olacaktır.

Mevcut sensör belirtilen aralıklarda da ölçüm yapmasına karşın hassasiyeti, düşüktür. Bu nedenle sensörü doğrusal bölge içerisinde tutarak duyarlılığını arttıracak şekilde yeniden tasarım yapılmış, gerçekleştirilen analiz sonuçları ile teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır. (5.14) eşitliğine göre duyarlılığın arttırılabilmesi için ya membran kalınlığı azaltılmalı ya da aynı kalınlık için membran yarıçapı arttırılmalıdır. (5.5) eşitliğinden yola çıkarak; 5 Pa basınçta silikon membran merkezinde meydana gelecek maksimum çökme miktarının 200 nm olması için; 2 mm yarıçapındaki membranda membran kalınlığı 7.75 μm olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar ışığında ANSYS benzetim ortamında 2 mm yarıçapında 7.75 μm kalınlığında silikon membran tasarımı yapılarak, 5 Pa basınç uygulanmıştır. Analiz sonuçları Şekil 5.51'de verilmiştir. Analiz sonuçlarında membran merkezindeki çökme değeri 201 nm olarak bulunmuştur. Teorik sonuçlarla analiz sonuçları karşılaştırıldığında arada % 0.5'lik bir fark olduğu görülmüştür.



Şekil 5.51. 0.2 – 5 Pa Aralığında Çalışan Sensör İçin Membran Kalınlığının Azaltılması

Benzer şekilde, (5.5) eşitliğinden yola çıkarak; 5 Pa basınçta silikon membran merkezinde meydana gelecek maksimum çökme miktarının 200 nm olması için; 25 μm kalınlığındaki membranda membran yarıçapı 4.8 mm olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar ışığında ANSYS benzetim ortamında 4.8 mm yarıçapında 25 μm kalınlığında silikon membran tasarımı yapılarak, 5 Pa basınç uygulanmıştır. Analiz sonuçları Şekil 5.52’de verilmiştir. Analiz sonuçlarında membran merkezindeki çökme değeri 199 nm olarak bulunmuştur. Teorik sonuçlarla analiz sonuçları karşılaştırıldığında arada % 0.5’lik bir fark olduğu görülmüştür. Böylelikle belirlenen ölçüler ışığında sensörün 0.2-5 Pa aralığında hasasiyeti arttırılmıştır.



Şekil 5.52. 0.2 – 5 Pa Aralığında Çalışan Sensör İçin Membran Yarıçapının Arttırılması

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Optik fiberli algılayıcılar küçük boyut, yüksek duyarlılık, elektriksel iletkensizlik, elektromanyetik girişime olan bağımsızlık gibi avantajları nedeniyle 90'lı yıllardan itibaren kısmi boşalmanın tespiti için uygun bir donanım halini almıştır. Çalışma kapsamında kısmi boşalma sinyalinin karakteristiği incelenmiş, buradan elde edilen bilgilerin ışığında kısmi boşalmanın algılanması ve yerinin belirlenmesinde kullanılan optik fiberli algılayıcıların gereksinimleri tartışılmıştır. Buna göre yağ dolu transformatörlerdeki kısmi boşalmaların yerinin ve şiddetinin akustik yayılım ile belirlenebilmesi için; fiber sensörün duyarlılık değeri en az 0.2 Pa olmalı, çekirdek gürültüsünden etkilenmemesi için 50 kHz –300 kHz frekans aralığında çalışmalı ve yüksek gerilim ekipmanlarında kullanılacağı için dielektrik malzemedan yapılmalıdır.

Çalışmada, kısmi boşalma algılama yöntemleri incelenmiş, transformatör tankının içerisine yerleştirilen dahili algılama sistemleri ile tank dışında konumlandırılan harici algılama sistemleri karşılaştırılarak avantajları nedeniyle dahili algılama yöntemi seçilmiştir. Çalışma kapsamında tasarımı yapılan sensör, Fabry-Perot interferometresini temel almaktadır. Bu interferometre, sensör içerisinde farklı yansıma ortamlarından (membran ve fiberin sonu) farklı zamanlarda yansıyan ışığın alıcı tarafından alınarak fazının karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu nedenle sensör tasarımında membranın yapısı ve Fabry-Perot boşluğunun uzunluğu algılamayı etkileyen kritik parametreler olarak belirlenmiştir.

Sensör membranının yüzey uzunluğu, kalınlığı ve malzemesi belirlenerek sensör duyarlılığı üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Eşitliklerden ve yapılan matematiksel analizlerden yola çıkarak, duyarlılığın membran kalınlığı ile ters, membran yarım yüzey uzunluğu ile doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda belirlenen boyutlara göre kısmi boşalma tarafından membranda oluşan çökmenin membran kalınlığının % 25'inden daha küçük olması gerekmektedir. Bu bilgiler ışığında membranın yarıçapı

2 mm ve kalınlığı 25 μm seçilmiştir. ANSYS benzetim ortamında, belirlenen ölçülerde silikondan ve silikadan membran tasarımı yapılmıştır. Membrana, 50 pC'luk kısmi boşalma kaynağından 1 m uzaktaki sesin basıncı esas alınarak 1 Pa'lık basınç uygulanması durumu için membran merkezindeki maksimum çökme miktarı silika için yaklaşık 2.5 nm, silikon için ise yaklaşık 1.2 nm olmuştur. 100 Pa basınç için analizler tekrarlanmış ve membran merkezindeki maksimum çökme miktarı silika için yaklaşık 250 nm, silikon için ise yaklaşık 120 nm bulunmuştur. Değerler membranın doğrusal çalışma bölgesi üst sınırı olan 6.25 μm 'nin altındadır. Basınç ile membranda oluşacak çökme miktarı doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir.

Kritik parametrelerden bir diğeri olan Fabry-Prot boşluğunun görünürlük ve optik yoğunluk ile ilişkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında yarıçapı 5 μm , yansıtıcılığı 0.04 olan tek modlu fiber seçilmiş, çalışma dalgaboyu da 1,55 μm olarak belirlenmiştir. Buna göre görünürlüğün ortalama olarak 70 μm 'ye kadar sürekli olarak arttığı ardından da azaldığı görülmüştür. Elde edilen grafiklerden Fabry-Perot boşluğunun 60-80 μm aralığında seçilmesinin görünürlük açısından en iyi sonucu vereceği belirlenmiştir. Fabry-Perot boşluk uzunluğunun normalize optik güç ile değişim grafiği göz önüne alındığıdaysa, tasarlanan sensörün doğrusallığının sağlanabilmesi için boşluk uzunluğunun 580 nm ya da bunun katları olması gerektiği görülmüştür. Bu iki grafik göz önüne alınarak Fabry Perot boşluğunun uzunluğu 80 μm olarak kararlaştırılmıştır. Fabry-Perot boşluğu uzunluğunun optik yoğunluğun doğrusal olduğu bölgede seçilmesi önem taşımaktadır. 1550 nm dalgaboyunda çalışan ışık kaynağının kullanıldığı sistemler için membranda oluşacak çökme ile Fabry-Perot boşluğunda meydana gelecek değişim doğrusallığının bozulmaması için ± 230 nm olmalıdır.

Belirlenen tüm bu değerler ışığında Solidworks çizim ortamında sensörün tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan sensör transformatör yağına daldırılarak kullanılacağı için, sensöre kısmi boşalma akustik basıncının yanı sıra transformatör yağından kaynaklanan ilave bir basınç da etkiyecektir. Başlangıçta yapılan analizlerde yağ basıncı göz ardı edilmiştir. Sensörün transformatör tankı içerisinde yağa daldırılarak konumlandırılacağı düşünülerek, 0.1 m, 1 m ve 2 m derinliklerdeki yağ basıncı sırasıyla 833.85 Pa, 8.34 kPa ve 16.68 kPa olarak hesaplanmıştır. Analizler bu basınç değerleri

de ilave edilerek tekrarlanmıştır. Silika membran için; 100 Pa değerindeki kısmi boşalmanın 0.1 m, 1 m ve 2 m derinlikteki sensörde yağ basıncı ile birlikte meydana getirdiği çökme değerleri 2.356 μm , 21.12 μm ve 42.33 μm olarak bulunmuştur. Aynı analizler silikon membran için de tekrar edilmiş benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar ışığında yağ basıncının da analizlere ilave edilmesi durumunda hem membranın mekanik doğrusallığı sağlamadığı hem de membranda meydana gelen yüksek çökme değerinin Fabry-Perot boşluğunda ± 230 nm'den büyük değişimlere neden olduğundan optik olarak da doğrusallığı bozduğu görülmüştür.

Bu sorunun aşılabilmesi için yağ basıncının etkisini ortadan kaldıracak şekilde bir tasarım yapılmasının daha doğru olacağı belirlenmiştir. Bu nedenle yeni tasarım gerçekleştirilirken, membrana yağ tarafından uygulanan dış basınç ile membran fiber arasındaki yüzeyden uygulanacak iç basıncın eşitlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için Fabry-Perot boşluğuna ulaşacak bir kanal açılmıştır. Bu kanal vasıtasıyla, Fabry-Perot boşluğundan içeriye transformatör yağı girebilecek, sensörün konumlandırıldığı yerdeki yağ basıncına eşit bir basınç membranın iç yüzeyinden de uygulanacaktır. Böylelikle kısmi boşalma oluşmadığında, sensör membranının her iki tarafında eşit basınç olacağından membranda yağ basıncından kaynaklanan bir çökme meydana gelmeyecektir. Bu yöntemde Fabry-Perot boşluğu yağ ile doldurulduğu ve yağın kırılma indisi 1.40 olduğu için, başta faz farkı ve optik yoğunluk olmak üzere birçok ifadede değişiklik meydana gelmektedir. Bu nedenle yağ ortamı için yeniden analizlerin yapılması daha doğru olacaktır. Yöntemin zorluğu ise kırılma indisinin sabit olmamasından kaynaklanmaktadır. Transformatör yağının kırılma indisi ilk ölçüm değerlerinde 1.40 olsa da, transformatör çalıştıkça yağda meydana gelen kirlenmeler neticesinde kırılma indisinde de sürekli bir artış olacaktır. Bu nedenle yapılan hesaplamaların periyodik olarak kırılma indisinde belli bir artış yapılarak tekrar yenilenmesi gerekmektedir.

Sıvı basıncı etkisini ortadan kaldırmak amacıyla yapılan yeni tasarım nedeniyle Fabry-Perot boşluk uzunluğu ile ilgili hesaplamalarda değişiklikler olacaktır. Çünkü havanın kırılma indisi 1 iken, transformatör yağının kırılma indisi ortalama olarak 1.40'tır. Yapılan hesaplamalar Fabry-Perot boşluğunun hava ile dolu olduğu durum için

geçerlidir. Bu nedenle yeni durum için yağın kırılma indisi sabit kabul edilerek hesaplamalar tekrarlanmıştır.

Fresnell yasasına göre, Fabry-Perot boşluğunun hava ile dolu olduğu üç katmanlı yapıda; fiber çekirdeğinin kırılma indisi 1.49 ve havanın kırılma indisi 1 olmak üzere, gelen ışığın fiber-hava arayüzünden % 4'ü, membran-hava arayüzüne ulaşan ışığın ise % 96'sı yansımaktadır. Fabry-Perot boşluğunun yağ ile dolu olduğu yeni durum için ise, fiber çekirdeğinin kırılma indisi 1.49 ve transformatör yağının kırılma indisi 1.40 olarak alınır, Fresnell eşitliklerine göre aynı şartlarda fiber-yağ arayüzünden ışığın yaklaşık olarak % 0.1'i yansiyacaktır. Fiber çekirdeği ile transformatör yağının kırılma indislerinin birbirine yakın değerlerde olması nedeniyle yansımının düşük olması beklenen bir sonuçtur. Gelen ışığın % 99.9'u ise yağ ile dolu Fabry-Perot boşluğunu geçerek membran yüzeyine ulaşmaktadır.

Fabry-Perot boşluk uzunluğunu belirlemede önemli parametrelerden biri olan görünürlük hesaplanırken, fiber-hava arayüzündeki yansıma oranı % 4 olduğundan fiberin yansıtıcılığı $R_1 = 0.04$ alınmıştır. Yeni tasarımda fiber-yağ arayüzündeki yansıtıcılık değeri % 0.1 olduğundan görünürlük değeri değişecektir. Fiberin yansıtıcılık oranı $R_1 = 0.001$ alınarak görünürlük yeniden hesaplandığında, Fabry-Perot boşluğunun 400-500 μm aralığında seçilmesi durumunda görünürlüğün maksimum olduğu görülmektedir. Buna göre optik yoğunluk değeri de göz önüne alınarak Fabry-Perot boşluğunun değeri yeni tasarım için 400 μm olarak seçilmiştir.

100 Pa değerindeki kısmi boşalma için gerçekleştirilen analizler neticesinde membran merkezindeki çökme değerleri; silika için yaklaşık 250 nm, silikon için ise yaklaşık 120 nm bulunmuştur. Bu değerler hem membran doğrusallığını hem de Fabry-Perot boşluğundaki değişimden kaynaklanan doğrusallığı sağlamaktadır. Ancak kısmi boşalmanın çoğunlukla 0.2-5 Pa aralığında akustik basınç oluşturduğu ve 100 Pa değerinin kısmi boşalma için oldukça büyük olduğu göz önüne alındığında; sensörün 0.2-5 Pa değer aralığında hassasiyetinin düşük olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle sensörü doğrusal bölge içerisinde tutarak duyarlılığını arttıracak şekilde yeniden tasarım yapılmış, gerçekleştirilen analiz sonuçları ile teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna göre 5 Pa basınçta silikon membran merkezinde meydana gelecek maksimum çökme

miktarı 200 nm olacak şekilde; 2 mm yarıçapındaki membran için membran kalınlığı 7.75 μm ; 25 μm kalınlığındaki membran için membran yarıçapı 4.8 mm olarak bulunmuştur. Böylelikle duyarlılığın arttırılabilmesi için membran kalınlığının azaltılması ya da aynı kalınlık için membran yarıçapının arttırılmasının gerektiği sonucuna varılmıştır. Teorik sonuçlarla ANSYS benzetim ortamından elde edilen analiz sonuçları arasında % 0.5 fark olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

ABEYSINGHE, D.C. DASGUPTA, S. BOYD, J. JACKSON, H. 2001. A Novel MEMS Pressure Sensor Fabricated on an Optical Fiber. *Photonics Technology Letters*, vol. 13, p.993–995.

ALLAN, D.J. FORREST, J.A.C. HOWITT, E.L. PETCHELL, A.B. 1973. Electric and Acoustic Location of Discharges in Transformers. *IEEE Conference on Diagnostic Testing of High Voltage Power Apparatus in Service*, p.65-70.

ANDERSON, J.G. 1956. Ultrasonic Detection and Location of Electric Discharges in Insulating Structures. *Power Apparatus and Systems: Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 75, p.1193-1198.

BENGTSSON, T. JONSSON, B. 1997. Transformer PD Diagnosis Using Acoustic Emission Technique. *10th International Symposium on High Voltage Engineering*, p.73-79, Canada.

BLACKBURN, T.R. JAMES, R.E. SU, Q. PHUNG, T. TYCHSEN, R. SIMPSON, J. 1991. An Improved Electric/Acoustic Method For The Location of Partial Discharges in Power Transformers. *3. International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, p.1132-1135.

BLACKBURN, T.R. KRCHO, D. ZARGARI, A. 1994. Modified Optical Fiber Sensor for Partial Discharge Detection in High-Voltage Power Transformer. *Australia Universty Power Engineering Conference*, p.417-442, Australia.

BLACKBURN, T.R. PHUNG, B.T. JAMES, R.E. 1992. Optical Fibre Sensor For Partial Discharge Detection And Location In High-Voltage Power Transformer. *Sixth International Conference of Dielectric Materials Measurements and Applications*, p. 33-36, Manchester.

BOGGS, S. 1990. Partial Discharge - Part III: Cavity-Induced PD in Solid Dielectrics. *Electrical Insulation Magazine*, vol 6, p.11-20.

BOGGS, S.A. 1990. Partial Discharge: Overview and Signal Generation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol 6, p.33-39.

BUCARO, J.A. DARDY, H.D. 1977. Fiber-Optic Hydrophone. *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 62, p.1302-1304.

CARPENTER, J.H. KRESGE, J.S. MUSICK, C.B. 1965. Ultrasonic Corona Detection in Transformers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol 84, p. 647-651.

CHAN, M. COLLINS, S. SMITH, R. 1994. A Micromachined Pressure Sensor with Fiber-Optic Interferometric Readout. *Sensors and Actuators. Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 43, p.196-201.

CHEN, H. 2010. Fiber Optic Pressure Sensor Based on a Single-Mode Fiber F-P Cavity. *Measurement*, vol. 43, p.370-374.

COLE, J.H. JOHNSON, R.L. BHUTA, P.G. 1977. Fiber Optic Detection of Sound. *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 62, p.1136-1138.

CULSHAW, B. 1988. Basic Concepts of Optical Fiber Sensors. *Optical Fiber Sensors: Principles and Components*, Artech House Publishers, vol. 1, p.344.

DEHENG, Z. KEXIONG, T. CHAMNGCHANG, W. XIANHE, J. 1991. Computer-Aided On-Line Detection of Partial Discharge in Power Transformer. *Proceedings of the 3rd International Conference of Properties and Applications of Dielectric Materials*, p.1128-1131, Tokyo.

DENG, J. XIAO, H. HUO, W. LOU, M. AY, R. WANG, A. LIU, Y. 2001. Optical Fiber Sensor-Based Detection of Partial Discharges in Power Transformers. *Optics & Laser Technology*, p.305-311.

- DENGA, J. XIAOB, H. HUOA, W. LUOB, M. MAYA, R. WANGA, A. LIUA, Y. 2000. Optical Fiber Sensor-Based Detection of Partial Discharges in Power Transformers. *Optics & Laser Technology*, p.305–311.
- ELEFTHERION, P. M. 1995. Partial Discharge XXI: Acoustic Emission-Based PD Source Location in Transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 11, p.22-26.
- FİDAN, M. 2003. Elektriksel Kısmi Boşalmaların Bilgisayar Destekli Ölçümü. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, 105 s.
- FOWLES, G. 1975. *Introduction to Modern Optics*. Dover Publications, 2nd Edition, New York. 323 p.
- FRIMPONG, G. 1994. Acoustic Detection and Location of Partial Discharges in Power transformer tanks. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- GE, Y. WANG, M. CHEN, X. RONG, H. 2008, An Optical MEMS Pressure Sensor Based on a Phase Demodulation Method. *Sensors and Actuators*, p.224-229.
- GIOVANNI, M.D. 1982. *Flat and corrugated diaphragm design handbook*. CRC Pres, 1. edition, 404 p.
- HECHT, E. 1975. *Optics*. McGraw Hill, p.40-46.
- HOWELLS, E. 1985. Acoustic Emission Detection of Partial Discharges in Power Transformers. EPRI Report.
- HOWELLS, E. NORTON, E.T. 1981. Location of Partial Discharge Sites in On-Line Transformers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. Pas-100, p.158-162.
- HOWELLS, E. NORTON, E.T. 1978. Detection of Partial Discharges in Transformers Using Acoustic Emission Techniques. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. Pas-97, p. 1538-1549.

HUI, R. SULLIVIAN, M. 2009. Fiber Optic Measurement Techniques. Elsevier Academic Pres, Hardbound, 672 p.

JONES, S.L. 1990. The detection of Partial Discharges in Power Transformers Using Computer Aided Acoustic Emission Techniques. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, p.106 – 110.

KAUFMAN, K. WAVERING, T. MORROW, D. DAVIS, J. LIEBER, R. 2003. Performance Characteristics of a Pressure Microsensor. Journal of Biomechanics, p.283-287.

KAWADA, H. HONDA, M. INOUE, T. AMEMIYA, T. 1984. Partial Discharge Automatic Monitor for Oil-Filled Power Transformer. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, p.422-428.

KEMP, I. 1995. Partial Discharge Plant-Monitoring Technology: Present and Future Developments. IEEE Proc.-Science Measurement and Technology, vol 142, p.4-10.

LAZAREVICH, A.K. 2003. Partial Discharge Detection and Localization in High Voltage Transformers Using an Optical Acoustic Sensor. Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 70 p.

LIANG, T. WEILIN, W. 1985. Acoustic Location of Partial Discharge in On-Line Power Transformer. 6. International Symposium on High Voltage Engineering.

MACALPINE, M. ZHIQIANG, Z. DEMOKAN, S. 2002. Development of a Fibre-Optic Sensor for Partial Discharges in Oil-Filled Power Transformers. Electric Power Systems Research, vol. 63, p.27-36.

MARKALOUS, S. TENBOHLEN, S. FESER, K. 2008. Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, p. 1576 – 1583.

OGIHARA, H. 1964. Detection and Location of Coronas in Oil-Immersed Transformer with Corona Detector. Electrical Engineering in Japan, p.12-21.

OZEN, I. YILMAZ, Y. KARLIK, E. 2010. Yüksek Gerilim Transformatörlerindeki Kısmi Boşalmaların Algılanmasında Kullanılan Dahili Akusto-Optik Sensörler için Membran Analizi. 3. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Çankaya Üniversitesi, s.453-460.

ÖZKAYA, M. 1996. Yüksek Gerilim Tekniği. Birsen Yayınevi, 1. cilt, s.300-305.

PAN, J. LIN, P. MASEEH, F. SENTURIA, S. 1990. Verification of FEM Analysis of Load-Deflection Methods for Measuring Mechanical Properties of Thin Films. 4th Technical Digest of Solid-State Sensor and Actuator Workshop, p.70-73.

SCHNEIDER, D. MAIBACH, J. OBERMEIER, E. 1995. A New Analytical Solution for the Load-Deflection of Square Membranes. Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 4, p. 238 – 241.

STONE, G. 1991. Partial Discharge-Part IVV: Practical Techniques for Measuring PD in Operating Equipment. IEEE Electrical Insulation Magazine. p.9-19.

TRAIN, D. MERCIER, A. THORNE, D. 1974. The Detection of Partial Discharges in High Voltage Potential Transformers in Service. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. Pas-93, p. 1909 – 1916.

UMUR, H. 2001. Akışkanlar Mekaniği. Nobel Yayın Dağıtım, 496 s.

UNSWORTH, J. KURUSINGAL, J. JAMES, R.E. 1994. On-line Partial Discharge Monitor for High Voltage Power Transformers. 4. International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, p.729-732.

WANG, X. 2005. An Optic Fiber Sensor For Partial Discharge Acoustic Detection. New Jersey Institute of Technology and Rutgers, 103 p.

WANG, X. LI, B. RUSSO, O. ROMAN, H. CHIN, K. FARMER, K. 2006. Diaphragm Design Guidelines and an Optical Pressure Sensor Based on MEMS Technique. Microelectronics Journal, vol.37, p.50-56.

WANG, W. LIN, R. GUO, D. SUN, T. 2004. Development of a Novel Fabry–Perot Pressure Microsensor. *Sensors and Actuators*, vol. 116, p.59–65.

YIN, S. RUFFIN, P.B. FRANCIS, T.S.Y. 2008. *Fiber Optic Sensors*, Second Edition, CRC Press, p.1-65.

ZARGARI, A. BLACKBURN, T.R. 1996. Application of Optical Fibre Sensor for Partial Discharge in High Voltage Power Equipment. *IEEE 1996 Annual Report of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, vol. 2, p. 541 – 544.

ZARGARI, A. BLACKBURN, T.R. 1998. Detection of Partial Discharges Using Non-Intrusive Optical Fibre Sensors. *IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, p. 573 – 576.

ZHAO, Z. DEMOKAN, M. 1996. Optical Fiber Acoustic Sensor for Sensing and Locating Partial Discharges in High-Voltage Oil-Filled Power Transformers. 21. *Australia Conference on Optical Fiber Technology*.

ZHIQIANG, Z. 1999. *Fibre Optic Acoustic Sensing for Partial Discharges In High-Voltage Oil-Filled Power Transformers*. Ph.D. Thesis, The Hong Kong Polytechnic University, 310 s.

EK-1 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ANSYS

Sonlu Elemanlar Yöntemi, mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir yöntemdir. Bu yöntemde çözüm alanının sonlu elemanlar adı verilen alt bölgelere ayrılması, karmaşık geometrilere de çözüm elde edilebilmesini sağlar.

Sonlu elemanlar, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal yöntemdir. Uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde etkin olarak kullanılan bu yöntem, günümüzde birçok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi yöntemlerden birisi olmuştur.

Sonlu elemanlar metodunda, çözüm bölgesi, çok sayıda, basit, küçük, birbirine bağlı, sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılmaktadır. Sonlu elemanlar metodundaki temel düşünce, karmaşık bir probleme, problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulmaktır. Esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmekte, ancak bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harçayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca çok yaklaşılması, hatta kesin sonuca ulaşılması mümkün olmaktadır. Elde bulunan konvansiyonel matematiksel araçların kesin sonucu, hatta yaklaşık bir sonucu dahi bulmakta yetersiz kalması durumunda ise sonlu elemanlar yöntemi kullanılabilir tek yöntem olmaktadır.

Sonlu elemanlar metodu, yapısal mekanik problemlerinin yanısıra, ısı iletimi, akışkanlar mekaniği, elektrik ve manyetik alanlar ile ilgili mühendislik problemlerinin çözümü için de kullanılmaktadır.

Son yıllarda mühendislik problemlerinin bilgisayar destekli çözümünde sonlu elemanlar yöntemi vazgeçilmez bir hale gelmiş ve bu yöntem temelinde hazırlanan çok kapsamlı paket programlar yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. ANSYS programı ise bugün için kullanılan belli başlı programlardan biridir.

ANSYS, mühendislik alanında kullanılan bir simulasyon yazılımıdır. rnlerin tasarım aşamasından sonra kullanılır ve prototip üretilmeden önce, sanal ortamda test imknı verir. Parçaların ve parça montajlarının 3 boyutlu benzetimleri yardımıyla, ürünün mukavemet, mekanik, titreşim gibi yönlerden incelenmesini sağlayarak tasarımı geliştirmeye yardımcı olur.

ANSYS sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir yazılımdır. İncelenecek olan parçayı birçok kk elemana bölerek işlemlerini sürdürür.

TEŐEKKÖR

Bu çalıőmayı gerekleőtirebilmemde bilgi birikimini ve emeđini benden esirgemeyen deđerli hocalarım Prof. Dr. Gűneő Yılmaz ve Yrd. Doç. Dr. Sait Eser Karlık'a, yűksek lisans eđitimim sűresince çalıőmalarına maddi destek sađlayan TűBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlıđına (BİDEB), çalıőmam sűresince katkılarını esirgemeyen arkadaşlarım Serkan alıőkan ve Betűl Gűlimen'e, beni bu gűnlere kadar getiren, maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan aileme teőekkűrű borç bilirim.

ÖZGEÇMİŞ

İrem Özen, 30 Eylül 1985'te Bursa'da doğmuştur. Lise öğrenimini Bursa Milli Piyango Anadolu Lisesi'nde tamamlamış, lisans öğrenimine 2003 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde başlamıştır. 2005 yılında Makine Mühendisliği Çift Anadal Programı'na kabul edilmiş, 2006-2007 Bahar Yarıyılı'nda Elektronik Mühendisliği, 2007-2008 Bahar Yarıyılı'nda da Makine Mühendisliği'nden mezun olmuştur. 2006-2007 Güz Yarıyılı'nda Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans programına başlamıştır. Kasım 2009'dan itibaren Bursa'da özel bir şirkette optik sistemler ve lazer uygulamaları üzerine çalışmaktadır.