

**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**FİBER BRAGG IZGARA (FBG) SENSÖR**

**TABANLI FİBER OPTİK İZLEME**

**SİSTEMLERİ TASARIMI**

**İbrahim Halil ÖZCAN**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Gökalg KAHRAMAN**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu: 609.01.00**

**Sunuş Tarihi: 17/07/2014**

**Bornova-İZMİR**

**2014**



İbrahim Halil ÖZCAN tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Fiber Bragg Izgara (FBG) Sensör Tabanlı Fiber Optik İzleme Sistemleri Tasarımı” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesinin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 17/07/2014 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**İmza**

<b>Jüri Başkanı</b>	<b>: Prof. Dr. Gökalp KAHRAMAN</b>	.....
<b>Raportör Üye</b>	<b>:Yrd. Doç. Dr. Ömer MERMER</b>	.....
<b>Üye</b>	<b>:Yrd. Doç. Dr. Fadıl KUYUCUOĞLU</b>	.....



## EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

### ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Fiber Bragg Izgara (FBG) Sensör Tabanlı Fiber Optik İzleme Sistemleri Tasarımı” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışım olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

17/ 07/2014

İmzası

Adı-Soyadı



**ÖZET****FİBER BRAGG IZGARA (FBG) SENSÖR TABANLI  
FİBER OPTİK İZLEME SİSTEMLERİ TASARIMI**

ÖZCAN, İbrahim Halil

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Gökalp KAHRAMAN

Temmuz 2014, 75 sayfa

Haberleşmenin, hayatın her alanında etkin bir biçimde kendine yer bulduğu günümüzde fiber optik haberleşme bilginin hızlı iletilebilirliği, güvenilirlik, gerçek zamanlı cevap alabilme olanakları gibi avantajları sayesinde gün geçtikçe kullanıcılar tarafından daha çok talep edilir olmuştur. Fiber optik haberleşmenin anahtar elemanlarından biri olan FBG sensörler ise özellikle acil tespit ve müdahale gerektiren uygulamalarda düşük maliyetleri, elektromanyetik girişimden etkilenmedikleri için düşük gürültülü olmaları, yüksek hassasiyet ve hatasızlık oranları ile yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Hızla gelişen teknoloji ile birlikte çok yakın bir gelecekte kendine çok daha fazla alanda kullanım alanı bulacaktır.

Dalga boyunda meydana gelen değişimleri inceleyerek algılama yapabilme özelliğine sahip Fiber Bragg Izgara (FBG) tabanlı sensörler yardımıyla, algılanmasına ihtiyaç duyulan parametrelerdeki değişim sonucu ortaya çıkan dalga boyu kayması çeşitli demodulasyon yöntemleri ile incelenerek gerekli bilgiye çok hızlı ve yüksek hatasızlıkla ulaşılabilmektedir. Bunun yanısıra teknolojik olarak en önemli avantajlarından biri olan çoğullanabilirliği, ağ yapısına olanak tanıyarak birçok FBG'nin tek hat üzerine konumlandırılarak aynı sistem üzerinden farklı noktalardan eş zamanlı ölçüm alınıp tek bir bilgisayarla izlenebilmesidir.

Bu projede, literatürde yer alan yüksek voltaj ve yüksek akım içeren sistemler için manyetostriktiflik özelliğine sahip Terfenol-D gibi bir malzeme kullanılarak hazırlanmış FBG tabanlı fiber optik izleme çalışmaları incelenmiştir. Özellikle şalt sahaları gibi insan eliyle düzenli olarak kontrol edilme imkanı olmayan alanlarda, verimli bir şekilde uzaktan denetleme imkanı sağlayan bu sistemler herhangi bir kısa devre benzeri hata durumunda, hat boyunca birden fazla kullanılabilen sensörler aracılığıyla hatanın olduğu bölgenin kendisini yada bölgeye en yakın noktayı tespit etme olanağı sağlamaktadır.

Bu çalışma ile ilgili alanda bugüne kadar yapılan yayınlar incelenip derlenerek yüksek voltaj ve yüksek akım sistemleri üzerine çalışmak isteyen araştırmacılara kapsamlı ve anlaşılır bir kaynak oluşturulmaya çalışılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Fiber Optik Haberleşme, Fiber Bragg Izgara, Terfenol-D, Yüksek Voltaj, Yüksek Akım, Manyetostriktif, Trafo.





**ABSTRACT****DESIGN OF FIBER BRAGG GRATING (FBG) SENSOR BASED FIBER OPTIC MONITORING SYSTEMS**

OZCAN, Ibrahim Halil

MSc in Electrical-Electronics Eng.

Supervisor: Prof. Dr Gökalp KAHRAMAN

July 2014, 75 pages

In today's world, communication efficiently takes place in every aspect of life. With the advantage of fast information communicability, reliability and real-time response features, fiber optic communication gradually becomes more demanable. FBG sensors, which are one of the key elements of fiber optic communication, are widely in used and preferred because of their specialities such as low cost, immune to electromagnetic interference, high sensitivity and accuracy rates in the field of application especially that needs immediate detection and intervention. In a very near future by the rapidly developing technology this kind of sensors will have more area of usage.

With the help of Fiber Bragg Grating (FBG) based sensors that able to sense wavelength shift as a result of alternation in parameters needed to be detected by examining the changes in wavelength by the use of various demodulation methods, required information can be acquired fastly and high accurately. Beside this, ability to multiplexing, which is technologically one of the most important advantages, allows to localize numerous FBG sensors on just one fiber line and to take measurements through the same system but from different spots simultaneously and to monitor via one computer.

Throughout this project, FBG based fiber optic monitoring works that take place in the literature for high voltage and high current systems which are prepared with a magnetostrictive material such as Terfenol-D are examined. Especially at the fields such as substations that are not able to control continuously without human intervention, in case of fault like short circuit, this kind of systems efficiently enable to remote surveillance the fields and to detect the location of the fault occurred or the closest location by means of multiple sensors used in the same fiber line.

By this survey, at the related fields of work, the up to present articles are examined and edited for the ones who is/are going to study on the high voltage and high current systems. An extensive and a comprehensible source is tried to be consituted for the researchers.

**Key Words:** Fiber Optic Communication, Fiber Bragg Grating, Terfenol-D, High Voltage, High Current, Magnetostrictive, Substations.



## **TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans eğitimin süresince danışmanlığımı yapan, çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen ve beni değerli yorum ve önerileriyle yönlendiren tez danışmanım sayın hocam Prof. Dr. Gökalg KAHRAMAN'a, çalışmalarım süresince yardımlarını ve desteğini eksik etmeyen kıymetli hocam Öğr. Gör. Seyhan COŞKUN'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca, bu süreçte bana fedakarlıkları ile maddi ve manevi destek olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	vii
ABSTRACT .....	ix
TEŞEKKÜR .....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Çalışmada Yapılanlar ve Çalışmaya Duyulan İhtiyaç .....	2
1.2 Tez Ana Hatları.....	3
2. FİBER BRAGG IZGARA (FBG) .....	4
2.1 FBG'nin Yapısı.....	4
2.2 Materyal ve Demodulasyon Yöntemleri.....	6
3. TERFENOL-D .....	11
3.1 Yapısı ve Optimizasyonu.....	11
3.2 Algılayıcı Etkileri .....	12
3.3 Terfenol-D'nin Teorisi .....	13
3.4 Optimizasyon İçin Yapılan Çalışma Sonuçları.....	17
4. ÖNGERİLMENİN TERFENOL-D DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜNÜN DİNAMİK PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....	23
4.1 Öngerilmenin Etkisi .....	23
4.2 Yarı-Durağan (Quasi-Static) Performans .....	25
4.3 Öngerilmenin ve Manyetik Bayasın Yarı-Durağan Etkisi .....	27
4.4 Bayas Koşulu ile Sürücü Seviyesinin Yarı-Durağan Etkisi .....	29
4.5 Dinamik ile Yarı-Durağan Performansın Karşılaştırılması .....	31

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
4.6 Manyetomekanik Kuplaj Faktörü .....	32
4.7 Young Modulüs .....	33
4.8 Geçirgenlik Faktörü .....	34
4.9 Mekanik Kalite Faktörü .....	36
4.10 Dinamik Gerilme Katsayısı .....	37
4.11 Malzeme Özellikleri ve Optimizasyon .....	38
5. UYGULAMALARIN LİTERATÜR TARAMASI .....	40
5.1 FBG- Terfenol-D'nin Birlikte Kullanımı .....	40
5.1.1 Optik voltaj sensörlerine genel bakış .....	40
5.1.2 Radyal Enerji Sistemlerinde Hata Algılayabilen Yeni Tipte FBG Sensör.....	46
5.1.3 Yüksek Voltaj Dönüştürücülerinde Hata Algılama İçin Uygulanabilir Yeni Fiber Bragg Izgara Sensörü.....	53
5.1.4 Terfenol-D Tabanlı FBG Manyetik Sensörlerinde Hassaslık Ayarlaması .....	62
6. SİSTEMLERİN KISACA KIYASLANMASI .....	66
7. ÖNERİLER .....	68
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	70
ÖZGEÇMİŞ .....	75

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 FBG'nin çalışma prensibi.....	5
2.2 WDM/SDM çoğullayıcı sensör ağı düzeneği .....	7
2.3 WDM çoğullayıcı sensör ağı düzeneği .....	7
2.4 Fotodedektörlü sorgu düzeneği genel şeması .....	8
2.5 Sorgulama düzeneği detaylı şeması .....	8
2.6 İki-dalga-karıştırıcı dalga boyu demodulasyon sistemi.....	9
2.7 Çift eşli FBG demodulasyon sistemi .....	9
2.8 Terfenol-D dönüştürücüsünün kuvvet sensörü olarak kullanıldığı test düzeneği .....	18
2.9 Yük hücresinden elde edilen kuvvet ile Terfenol-D sensöründen elde edilen kuvvetin karşılaştırılması .....	19
2.10 Zaman domeninde yük hücresinden elde edilen kuvvet ile sensörden elde edilen kuvvetin karşılaştırılması .....	20
2.11 Yük hücresi ile sensörden elde edilen kuvvetin transfer fonksiyonunun karşılaştırılması.....	21
3.5 Blok-serbest düzeninde yük hücresinden ve Terfenol-D'den elde edilen kuvvetin transfer fonksiyonunun karşılaştırılması.....	22
4.1 0,7 Hz'de (0,5), (0,75), (1,0), (1,25), (1,5) ksi için gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan grafiği (kelebek figürü).....	24
4.2 1 ksi öngerilme altında 150, 290, 415, 540 ve 675 Oe'de gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan grafikleri. Siyah çizgi manyetik bayası ( $H_0$ ) göstermektedir.....	27

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.3 Gerilmeye karşılık 4 bayas koşulu (0,75 ksi-300 Oe), (1,00 ksi-415 Oe), (1,25 ksi-480 Oe), (1,5 ksi-540 Oe) için uygulanan manyetik alan grafiği. DC manyetik bayas ve toplam gerilmenin yarısı etrafında merkezlenmiş. A, B ve C harfleri 1,25 ksi'lik, 0,75 ksi'lik ve 1,5 ksi'lik eğimlerin maksimum 1,0 ksi'lik eğimle eşleştiği bölgeleri göstermektedir.....	29
4.4 0.7 Hz'de soldan sağa artan öngerilme değerleri ve yukarıdan aşağıya artan AC sürücü seviyeleri için gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan grafikleri .....	30
4.5 0,7 Hz (üst kısım) ve 400 Hz için (alt kısım) soldan sağa artan (75, 100, 150, 200, 250 Oe) AC sürücü seviyesi genliği için gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan grafiği .....	32
4.6 (a) Öngerilme ve (b) sürücü seviyesine karşılık manyetomekanik kuplaj grafiği .....	32
4.7 (a) Öngerilme ve (b) sürücü seviyesine karşılık sabit manyetik alandan Young Modülüs grafiği. ....	33
4.8 Sabit gerilim altında geçirgenliğe karşılık bayas koşulu grafiği .....	34
4.9 Sabit gerilim altında geçirgenliğe karşılık sürücü seviyesi grafiği .....	35
4.10 Mekanik kalite faktörüne karşılık (a) öngerilme (b) sürücü seviyesi grafikleri. ....	36
4.11 Dinamik gerilme katsayısına karşılık (a) öngerilme (b) AC sürücü seviyesi grafikleri. ....	37
5.1 Pockel tabanlı Ovs'lerin prensibi .....	42
5.2 OVS'in şematik biçimlenimi .....	45
5.3 Sistemin deneysel düzeneği .....	48
5.4 FBG'deki gerilmeden kaynaklı dalga boyu kayması grafiği .....	49
5.5 Sensör konumları ile radyal sistemin tek hat diyagramı ve normal çalışma durumundaki akımları .....	50



## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.6	Sistemin normal çalışma durumunda her bir sensör konumu için Bragg dalga boyu kayması sütun grafiği ..... 50
5.7	İki fazlı sistemde 4 No'lu veri yolunda kısa devre durumunda herbir sensör konumu için Bragg dalga boyu kayması. .... 51
5.8	Üç fazlı sistemde 4 No'lu veri yolunda kısa devre durumunda her bir sensör konumu için Bragg dalga boyu kayması ..... 52
5.9	DeneySEL düzenek. .... 55
5.10	Sistemin sensör konumları içeren tek hatlı diyagramı ve sistemin yük akışı. .... 57
5.11	Kararlı durum koşulunda sistemdeki akımlar. .... 58
5.12	Sistemin normal düzende çalışırken her bir sensördeki Bragg dalga boyu kaymaları. .... 58
5.13	3 Fazlı sistemde sensörlerdeki Bragg dalga boyu kaymaları. .... 59
5.14	Hata olan SLG tipi bir sistemde $S_G$ ve $S_1$ sensörleri arasında bulunan dönüştürücüdeki Bragg dalga boyu kayması. .... 60
5.15	Hata olan DL tipi bir sistemde $S_G$ ve $S_1$ sensörleri arasında bulunan dönüştürücüdeki Bragg dalga boyu kayması ..... 61
5.16	Hata olan DLG tipi bir sistemde $S_G$ ve $S_1$ sensörleri arasında bulunan dönüştürücüdeki Bragg dalga boyu kayması ..... 61
5.17	50, 500 ve 1000 N'da sınırlı döngü ve hafızasız karakteristikli malzeme karakteristiği ..... 63
5.18	Uygulanan farklı yüklerde ve manyetik alanlarda hafızasız fonksiyonlar. .... 64

## ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇizelgeSayfa

3.1	Manyetostriktif Terfenol-D dönüştürücüsü malzeme özellikleri için deneysel ve yayınlanmış değerler. ....	16
3.2	12 kA/m'lik manyetik bayas altında, 4 farklı öngerilme değerinde hassasiyet seviyeleri. ....	19
4.1	Öngerilmedeki azami değişim (0'dan tepeye) ve rezonansta çalışan nominal öngerilmenin % değişimi. ....	26
4.2	1'den 4'e bayas koşulları; yarı-durağan simetrik gerilme alan kriteri kullanılarak optimize edilmiş farklı öngerilme seviyeleri için manyetik bayaslar. ....	28
4.3	0,7 Hz'de ve 400 Hz'de, 0,75 ksi-300 Oe'lik bayas koşulunda uygulanan alandaki nominal gerilmenin ( $\mu\epsilon/Oe$ ) karşılaştırılması. .	31

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\varepsilon$	<i>Stain (Gerilme)</i>
$\sigma$	<i>Stress ( Gerilim)</i>
$H$	<i>Applied Magnetic Field (Uygulanan Manyetik Alan)</i>
$B$	<i>Magnetic Flux Density within Terfenol-D (Terfenol-D içindeki Manyetik Akı Yoğunluğu)</i>
$E_y^H$	<i>Young Modulusü</i>
$q$	<i>Magnetostrictive Strain Derivative ( Manyetostriktif Gerilme Türevi )</i>
$q'$	<i>Magnetomechanical Effect (Manyetomekanik Etki )</i>
$\mu^\sigma$	<i>Magnetic Permeability at Constant Stress (Sabit Gerilim Altındaki Manyetik Geçirgenlik)</i>
$H_o$	<i>Critical Field (Kritik alan)</i>
$MPa$	<i>MegaPascal</i>
$Oe$	<i>Oersted ( Manyetik Alan Mukavemeti)</i>
$Ksi$	<i>kilopound per square inch, a unit of stress or pressure</i>
$Q_m$	<i>Mechanical Quality Factor (Mekanik Kalite Faktörü)</i>

Kısaltmalar

CT	Current Transformer (Akım Dönüştürücüsü)
CTEs	Coefficients of Thermal Expansion (Termal Genişleme Katsayısı)
DL	Double Line (Çift Hat)
DLG	Double Line to Ground (İki Fazlı Sistem)
FBG	Fiber Bragg Grating
FPGA	Field Programmable Gate Array (Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri)
GMPC	Giant Magnetostrictive Powder Composite (Dev Manyetostriktif Toz Kompozit)
OCS	Optical Current Sensor (Optik Akım Sensör)
OVS	Optical Voltage Sensor (Optik Voltaj Sensörü)
PM	Polarization Maintaining (Polarizasyonu Koruyan)
PT	Potential Transformer (Voltaj Dönüştürücüsü )
PZT	Piezoelectric Transducer -Lead Zirconate Titanate (Piezoelektrik Dönüştürücü)
SDM	Space Division Multiplexing (Uzaysal Bölmeli Çoğullayıcı)
SLG	Single Line to Ground (Tek Fazlı Sistem)
TDM	Time Division Multiplexing (Zaman Bölmeli Çoğullayıcı)
WDM	Wavelength Division Multiplexing (Dalga boyu Bölmeli Çoğullayıcı)

## 1 GİRİŞ

Optik haberleşmenin temel elemanlarından olan ve dalga boyunda meydana gelen değişimleri inceleyerek algılama yapan Fiber Bragg Izgara (FBG) tabanlı sensörler, günümüzde sağladığı önemli avantajları ve geniş kullanım sahası sayesinde gün geçtikçe bir hayli önemli hale gelmektedir.

Uygulama alanları arasında; petrol ve gaz boru hattı kontrolü, enerji hattı kontrolü, petrol ve gaz kuyusu kontrolü, yangın belirleme, akıllı yapılar ve yapısal sağlamlık kontrolü, şehir yol trafik yükünün izlenmesi, köprü, baraj ve bina kontrolü, güvenlik kontrolü gibi geniş bir yelpaze bulur. Bu çok çeşitli yapılar bir fiber örtüsü ile sarılarak ya da sistemin uygun direnç-destek noktalarına entegre edilerek yapının hangi zaman aralığında ne ölçüde gerildiğini veya sistemin hangi zaman aralığında ne kadar ısınıp soğuduğunu çok kısa süre zarfı içinde izleme ve oluşan değişimleri gözlemleyerek gerektiğinde müdahale etme imkanı elde edilebilir. Küçük gerilme ve sıcaklık değişimleri anlık belirlenip, acil tespit ve müdahalelerin gerekli olduğu güvenlik uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılabilir.

Yüksek sıcaklıkta ya da yüksek basınçta çalışan ve insan eliyle kontrol edilme olanağı tanımayan sistemlerde verimli bir şekilde uzaktan denetleyip kullanılma imkanı tanıdığı gibi, köprü, otoyol, petrol/gaz boru hatları gibi çok yüksek maliyetli yapılarda hata oluşmadan bir nevi erken uyarı sistemi vazifesi görerek maddi kayıpların önlenmesine olanak sağlayabilmektedir. En önemli kullanım avantajı olarak ise, yine köprülerde ve yaşam alanları olarak kullanılan binalarda özellikle olası deprem vb. afetler sonrasında yapıların sağlamlığı, kullanışa elverişliliği hakkında hızlı bir şekilde fikir sahibi edip onlarca hayatın kurtarılmasına imkan sağlayabilmektedir.

Bu FBG optik sensör ağı ile yapılan ölçüm ve gözlem, klasik elektriksel sistemlere göre daha hassas ve daha güvenlidir. Optik sistem elektromanyetik endüksiyondan etkilenmediği için sistem daha düşük gürültüdedir. Optik sistemde yangın tehlikesi (ark oluşumu) yoktur. Sistem daha düşük maliyetlidir. Daha az enerji harcanır.

Fiber Bragg ızgaralar (FBG) temelli optik sensörler, hem sıcaklık ve basınç, hem de gerilmede olan değişimleri ölçen çok ileri bir sensör sistemidir. FBG'ler sıcaklık, basınç, gerilme kuvveti gibi bazı parametrelere doğrudan duyarlı iken elektriksel gerilime doğrudan duyarlı değildir. Gerilim ölçmek için bir piezoelektrik veya manyetostriktif dönüştürücü kullanılarak fibere bir mekanik gerilme uygulanır. Sistem üzerindeki elektrik gerilimi bu dönüştürücüler sayesinde algılanıp ölçülebilir.

FBG sensörler ile enerji dağıtım şebekelerinde bulunan şalt sahalarında şebekenin yükünü izlemek amaçlı olarak, akım, manyetik alan ve voltajları izlemek için Terfenol-D aktuatörler üzerinden FBG izleme sistemi tasarlanabilmektedir. Bu sensör sistemi ağ yapısı şeklinde tasarlanarak şalt sahası tamamen tek bir merkezde izlenebilecektir.

Sensörler WDM (Wavelength Division Multiplexing) ve/veya SDM (Space Division Multiplexing) teknikleri ile birbirine bağlanıp bir ağ yapısı oluşturulabilmektedir. Her FBG sensörde Terfenol-D aktuator ve sürücü devreler bağlanarak optik ağdan gelen optik sinyaller tek bir merkezde bulunan sorgulama düzeneğine gelecek burada işlenip ölçüm değerleri olarak izlenip depolayabilmeye olanak sağlamaktadır. Zamana göre değişimler ile günlük, mevsimlik ve yıllık istatistikî değerlendirmeler yapılabilmektedir. Grafikler çıkarılarak elektrik idaresi için gerekli olabilecek veriler elde edilebilmektedir.

## **1.1 Çalışmada Yapılanlar ve Çalışmaya Duyulan İhtiyaç**

Bu çalışma sırasında sensör olarak kullanılan Fiber Bragg Izgara yapısı ve dönüştürücü olarak kullanılan Terfenol-D manyetostriktif malzemesinin prensipleri üzerine çalışmalar incelenip bu çalışmalarda ortaya konulan farklı fiziksel koşullar altındaki değişimleri ve performans değerleri raporlanmıştır. Her iki malzemenin birlikte kullanıldığı sistemler üzerine literatür taraması yaparak yüksek voltaj ve yüksek akım gibi uygulama alanlarında kullandıkları metotlara göre gruplanmıştır. Yüksek voltaj ve akım içeren sistemler için Terfenol-D dönüştürücüsü kullanan FBG tabanlı sensörler üzerinde çalışacak kişilerin kaynak olabilecek nitelikte kapsamlı bir literatür taraması hazırlanmıştır.

## 1.2 Tez Ana Hatları

*İkinci bölümde*, bir sensör uygulaması olarak kullanılan Fiber Bragg ızgara (FBG) yapısından bahsedilmiştir. FBG'nin yapısı, modülasyon-demodülasyon teknikleri hakkında bilgi verilip FBG'nin çalışma prensiplerine değinilmiştir.

*Üçüncü bölümde*, manyetik alan altında şekil değiştirme özelliğine sahip bir malzeme olan Terfenol-D'nin ( $Tb_xDy_{1-x}Fe_y$ ) yapısı ve teorisi ayrıntılı şekilde anlatılıp optimizasyonu için yapılan çalışmaların sonuçlarına yer verilmiştir.

*Dördüncü bölümde*, Terfenol-D için önemli bir parametre olan öngerilmenin (prestress) Terfenol-D dönüştürücüsünün dinamik performansı üzerindeki etkisi incelenip, hem öngerilmenin hem de manyetik biasın (bias) neredeyse DC (quasi-DC) dönüştürücü performansı üzerindeki etkilerini üzerine yapılan çalışma anlatılmıştır. Bunun yanında maddenin özelliklerinin dönüştürücü üzerindeki etkilerinden de bahsedilmiştir.

*Beşinci bölümde*, Literatür taraması yapılarak optik voltaj sistemlerinde FBG'nin ve Terfenol-D'nin birlikte kullanıldığı çalışmalar incelenmiştir. Özellikle yüksek voltaj sistemlerinde başarılı bir sensör uygulaması olarak kullanılabilirliği üzerinde durulmuştur.

*Altıncı bölümde*, Yapılan literatür taraması sonrasında incelenen çalışmalar ile ilgili kısa özetler sunulmuştur.

*Yedinci bölümde*, Gelecek çalışmalar için öneriler verilmiş ve geliştirilebilir yanları belirtilmiştir.

## 2 FİBER BRAGG IZGARA (FBG)

Haberleşme alanında çok hızlı bir şekilde gelişen fiber optik haberleşme sistemlerinde fiber optik sensörler hızlı tepkileri, yüksek hatasızlık (accuracy) oranları ve performansları ile önemli bir uygulama alanı olarak dikkat çekmektedir. Bu sensör çeşitlerinden biri olan Fiber Bragg Izgara yapılı sensörler ise algılanan parametredeki değişimin dalga boyu kayması olarak anında kendini göstermesi gibi bir avantaja sahip olması ile optik sensörler arasında kendine bir adım önde yer bulmaktadır. Dalga boyunda meydana gelen bu kaymalar demodulasyon yöntemleri ile incelenerek sıcaklık, basınç, gerilme gibi değişkenlere ek olarak pH, ultraviyole, gaz, nem vb. birçok farklı alanda meydana gelen değişimler için algılama birimi olarak kullanılabilir. (Coşkun, 2009).

### 2.1 FBG'nin Yapısı

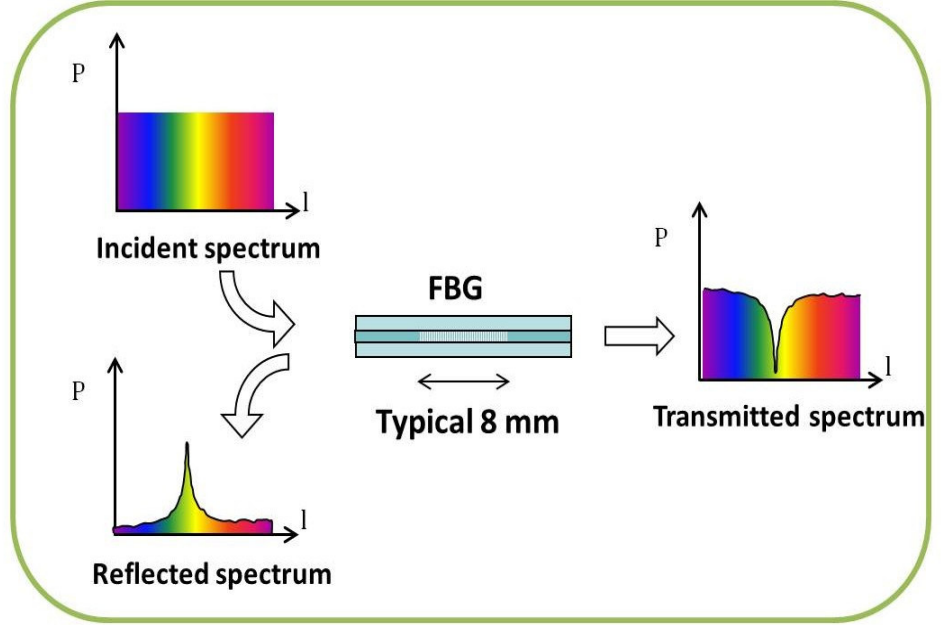
FBG, optik fiberin küçük bir uzunluğunda dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki kırılma indisinin, fiber uzunluğu boyunca belirli periyotlar ile değişim oluşturulmasıyla elde edilmektedir. Kırılma indisindeki bu değişim, dalga boyu, yoğunluk ve ışığın miktarı değiştirilerek çeşitlendirilebilir. Bir girişim deseni oluşturmak için, Ge (germanyum) ile katkılanmış optik fibere 244- 248 nm dalga boyunda ultraviyole ışık fiberin özüne enlemesine uygulanmaktadır. (Coşkun, 2009). Böylece bir girişim deseni elde edilebilmektedir.

Izgaranın yapısına bağlı olarak ızgara, yansıma ya da iletim modunda tasarlanabilmektedir. Yansıma modunda fiber Bragg ızgaraları girişine gelen ışığı, her bir ızgara saçağından bir miktar yansıtarak ızgara girişinde toplamsal bir yansıtıcılık oluşturulmaktadır. Bu yansıtıcılık Bragg dalga boyunda azamiye ulaşıp fiber Bragg ızgaraları  $\lambda_B$  dalga boyunda bir optik yansıtıcı filtre gibi davranmaktadır. (Güler ve Navruz, 2005).

FBG sensörler sıcaklık, gerilme ve basıncı gerçek zamanlı ölçmek için dizinler halinde çalışmaktadır. Yüksek hassasiyet, elektriksel olarak pasif işleyiş ve çoğullama özelliği ki bu özelliği sayesinde enerji sistemlerinde kurmak için doğru adaydır, gibi birçok avantajı bulunmaktadır. FBG'lerin en bilinen iki özelliği sıcaklık ve gerilme ölçümüdür. +5000  $\mu\epsilon$ 'e kadar gerilme ve -40 ile



120°C aralığında sıcaklık ölçebilmektedir. Sensördeki gerilme, ızgara yapısında ve fiberin indeksinde değişmeye sebep olmaktadır. FBG sensör içindeki algılanan gerilme doğrudan dalga boyuna kodlanır. FBG gelen ışığın dar bir bandını yansıtırken geri kalan tüm dalga boylarını geçirir. Diğer bir deyişle FBG'ler belirli bir dalga boyu için filtre gibi çalışan optik fiberlerdir. (Moghadas and Shadaram, 2010).



Şekil 2.1 FBG'nin çalışma prensibi

FBG temelli sensörlerin temel prensibi sıcaklık ya da gerilme değişiminden kaynaklı yansıyan Bragg dalga boyu kaymasındaki değişimi belirlemektir. Bu değişimi belirlerken ise aşağıdaki denklem kullanılmaktadır. (Dziuda et al.).

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (2.1)$$

Denklemden  $\Lambda$  ızgara periyodunu temsil ederken  $n_{eff}$  merkez dalga boyunda öz bölgesinin etkin kırılma indisini ifade etmektedir.

## 2.2 Materyal ve Demodülasyon Yöntemleri

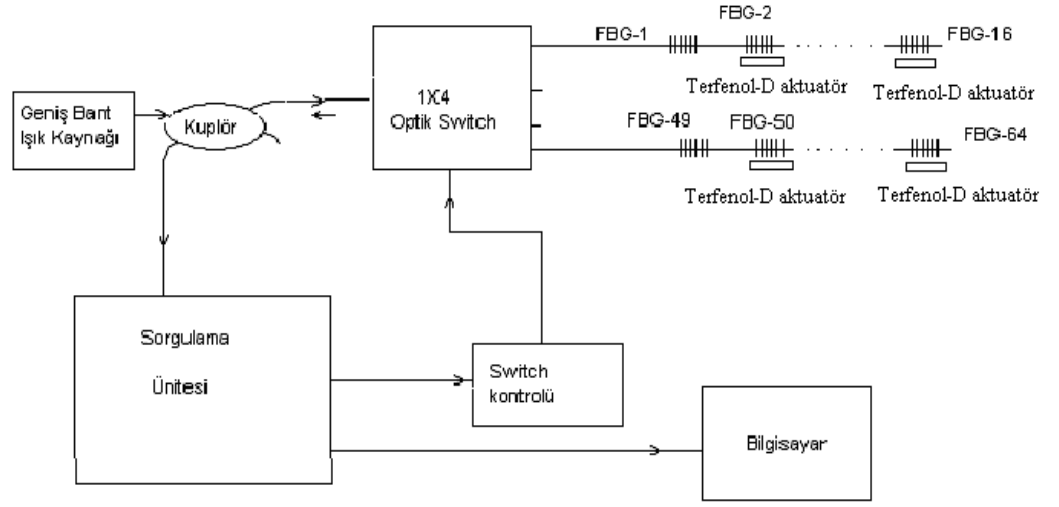
Optik fiberlerde özel tekniklerle oluşturulan ızgara yapısındaki kırılma indisi modülasyonu belli bir dalga boyundaki ışığı geriye yansıtır. Geriye

yansıyan bu dalga boyu bazı ortam değişkenlerine (sıcaklık, basınç, gerilme) bağlı olarak değişir. Geriye yansıyan Bragg dalga boyundaki ışık, uygun kuplörle (couplers) alınıp demodüle edilip değerlendirilerek ortam değişkenlerinin algılanması gerçekleştirilir.

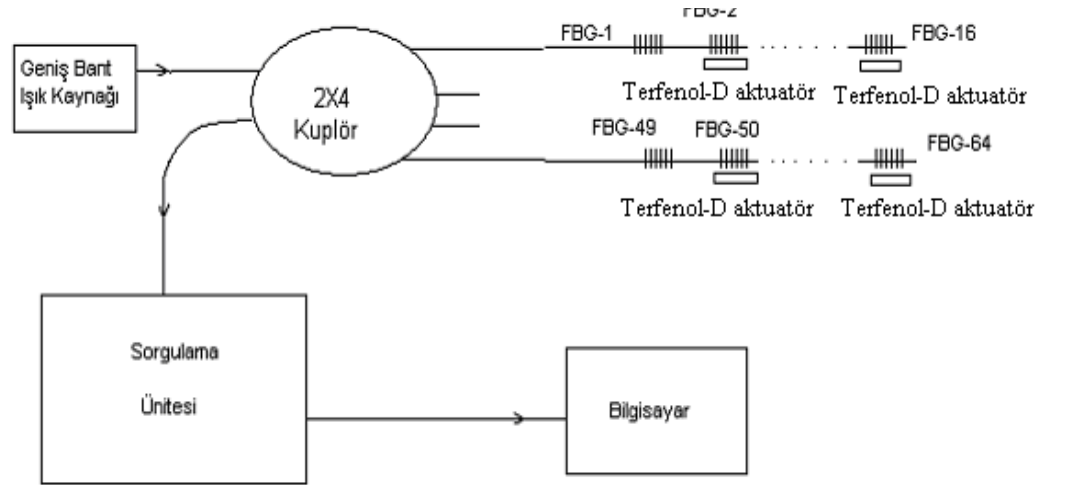
TDM, WDM ve SDM çoğullama tekniklerinin birisi veya bunların kombinasyonları şeklinde çoğullama teknikleri kullanılarak çok sayıda değişken tek bir demodülatör sistemi üzerinden tek bir noktadan izlenebilir. Kullanılacak demodülasyon yönteminin yeteri kadar geniş bir dalga boyu izleme aralığı ve istenen ölçüde hassasiyeti olması gerekir. Bunun yanında demodülasyon tekniğinin istenen değerde çoğullama tekniklerine uygun olması gerekir.

FBG'ler direk voltaja duyarlı olmadıklarından bu projede elektriksel gerilimi mekanik gerilime dönüştüren manyetostriktif dönüştürücüler (Terfenol-D) kullanılacaktır. Terfenol-D elemanına manyetik alan uygulandığında malzeme mekanik olarak uzar. Manyetik alan şiddetine bağlı olarak doğrusala yakın bir karakteristikte uzama gerçekleşir. Manyetik alanı oluşturmak için de Terfenol-D malzemesinin içine yerleştirildiği bobinlerden akım geçirilmesi gerekir. Bu bobinlerden elektrik akımı geçirildiğinde, uygulanan akım manyetik alan doğurur. FBG ye tutturulmuş olan ve büyük manyetostriksiyon özelliğine sahip Terfenol-D malzemesi uzar. Bunun sonucu olarak Terfenol-D üzerindeki FBG kesitinin yansıma tepesi daha uzun dalga boyuna ötelenir.(Liu et al.,2004). Bir manyetostriktif malzemeye bağlanması metodu ile üretilen sensörlerde gözlemlenen dezavantaj ise sıcaklık sorunudur. Bu sebepten ötürü tasarlanan sensörlerde sıcaklık dengelenmesine ihtiyaç duyulur. Karşılaşılan bu sorun akım algılayıcı ögeden izole edilmiş ayrı FBG kullanımı ile aşılabılır.(Reilly et al.,2006)

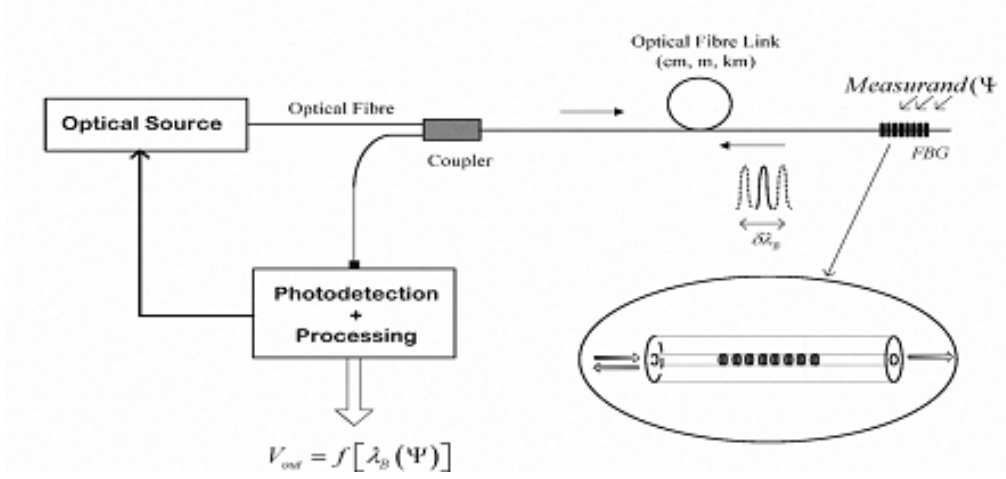
Aşağıda Şekil 2.2'de bir WDM/SDM çoğullayıcı; Şekil 2.3'de WDM çoğullayıcı sensör ağları gösterilmiştir. Şekil 2.4'te genel bir sorgu düzeneği gösterilirken, Şekil 2.5 ise sorgulama düzeneğinin detayları gösterilmiştir. Sorgulama düzeneğinde bir taramalı optik filtre ve fotodetektör ile optik sinyalin alınıp zaman domeninde (domain) sıralanmış darbeler elde edilmesi ve sinyal işleme devresi ile zamanda sürekli elektrik sinyallerine dönüştürülmesi sağlanmaktadır. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'da ise FBG'lerdeki demodülasyon sistemleri örneklendirilmiştir.



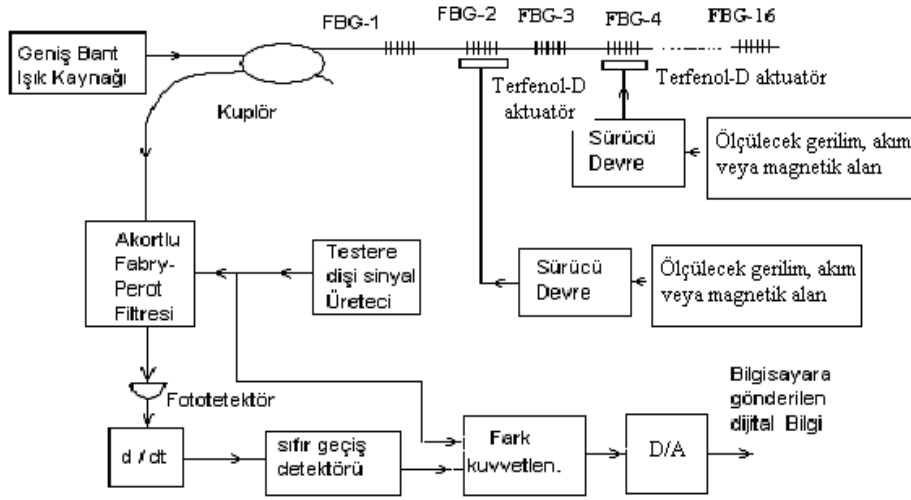
Şekil 2.2 WDM/SDM çoğullayıcı sensör ağı düzeni (Coşkun, 2009)



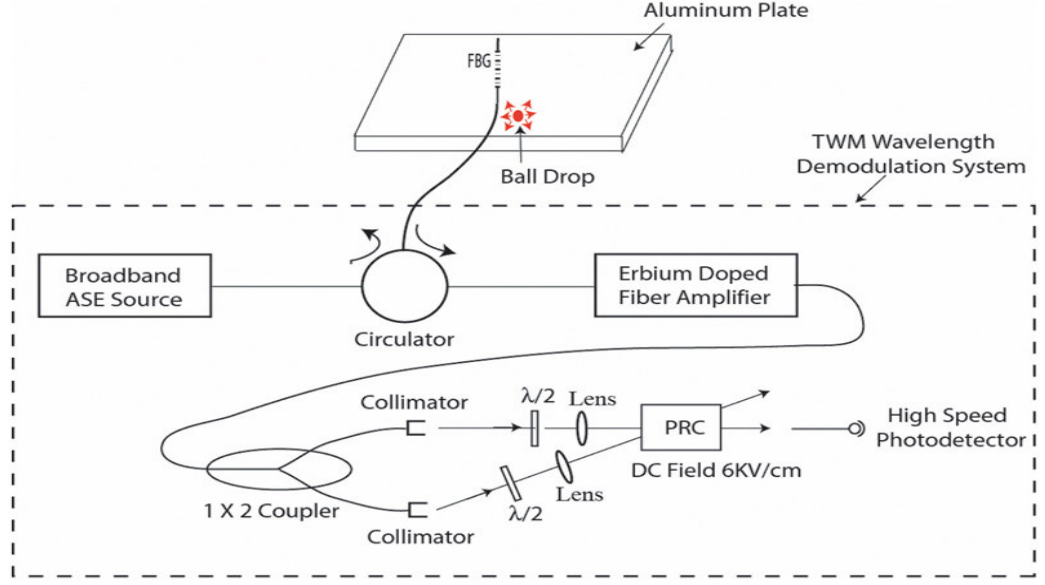
Şekil 2.3 WDM çoğullayıcı sensör ağı düzeni (Coşkun, 2009)



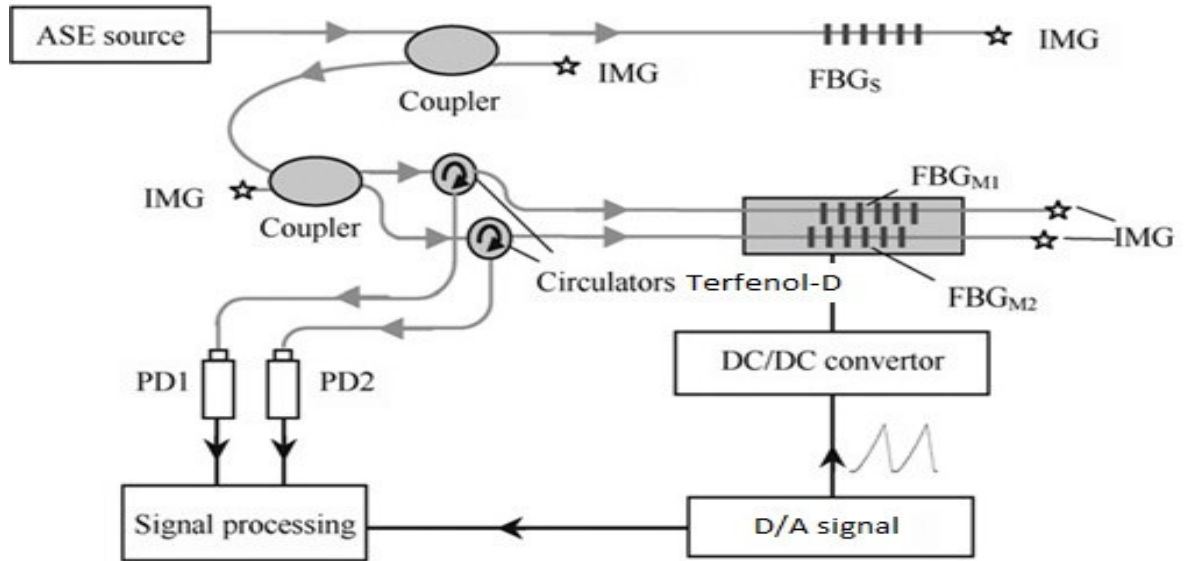
Şekil 2.4 Fotodedektörlü Sorgu Düzeneği Genel Şeması (Santos et al., 2009)



Şekil 2.5 Sorgulama düzeneği detaylı şeması. (Coşkun, 2009)



Şekil 2.6 İki-dalga-karıştırıcılı dalga boyu demodulasyon sistemi (Balagun et al., 2009)



Şekil 2.7 Çift Eşli FBG demodulasyon sistemi (Jiang et al., 2010)

Yapılan literatür incelemesinde, Pawel Niewczas ve James R. McDonald'ın yapmış olduğu bir çalışmada tek bir FBG kullanılan ve eş zamanlı olarak sıcaklığı ve AC akımını ölçebilen bir sensörün tanımlandığı görülmüştür. Bu sistemde kullanılan cihazın FBG'ye tutturulmuş olan manyetik olarak bayaşlanmış manyetostriktif alaşım içerdiği ifade edilmiştir. Özel olarak tasarlanmış bobinden akım geçirmek sureti ile yaratılan manyetik alanın manyetostriktif alaşımında bir iç

gerilme ürettiği ve bu iç gerilimin FBG tarafından tespit edildiği, algılama noktalarındaki sıcaklığın ise sensör çıkış sinyalinin ortalaması alınarak tespit edildiği belirtilmiştir.(Reilly et al.,2006). Başka bir çalışmada ise Yunqi Liu, Kin Seng Chiang ve Pak Lim Chu'un, dual dalga boyu lazer darbelerini (pulse) meydana getirmede kullanılan basit bir tekniğin, FBG manyestostriktif sensörleri çoğullamak için de kullanılabilirliğinin sunulduğu görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan her bir sensör, neredeyse özdeş termal genişleme katsayısına ve belirgin bir şekilde farklı manyetostriksiyon katsayısına sahip, FBG'ye tutturulmuş iki parça metal alaşım içermektedir. Manyetik alan uygulandığında, FBG'nin yansıma spektrumu, sensörün sıcaklığına duyarlı iki yakın tepeye ayrıldığı, FBG'leri Fabry-Perot lazer diyotları için dalga boyu seçici eleman olarak kullanarak, FBG'lerin iki yansıyan dalga boyunda, lazer diyotun modlarından birinde eş zamanlı, kararlı kısa darbeler meydana getirildiği ifade edilmiştir. Dağılan bir fiber boyunca bu darbeleri ileterek, iki dalga boyundaki darbelerin dalga boyu ayrımı zaman farkına dönüştüğü, bu durumda dalga boyu ayrımında dolayısıyla uygulanan manyetik alan (ya da elektrik akım) da bir ölçüm imkanı sağladığı anlatılmıştır.(Liu et al.,2004). Yine bir başka literatür araştırması sırasında incelenen P. Niewczas, G.Fusiek ve J.R. McDonald'ın "Hibrit Fiber-Optik Gerilim ve Akım Sensörlerinin Dinamik Kabiliyeti" isimli makalelerinde petrol ve gaz endüstrisinde kullanılan, uzaktan idare edilen, elektrikli sualtı dalgıçlarını izlemeye yönelik hibrit fiber-optik gerilim ve akım sensörlerinin dinamik kabiliyetleri hakkında yaptıkları teorik ve deneysel araştırmadan bazı önemli bilgiler edinilmiştir. Burada gerilim sensörü, voltaj-gerilme dönüştürücüsü gibi davranan çok katmanlı piezoelektrik yığıt (stack) ve yığın (bulk) içerisindeki voltajla indüklenmiş gerilme değişimini kapsamaktadır. Akımı ölçmek yerine aynı sensör tipinin özel olarak tasarlanan ferrit çekirdekli akım dönüştürücüsünü izlemek için kullanıldığından ve bu tip dönüştürücülerin yüksek mertebedeki gerilimi ve akım harmoniklerinin ölçülmesi konusunda yeterliliğinden ilk defa bu makalede bahsedilmektedir.(Niewczas et al.,2006).

### 3 TERFENOL-D

Maddelerin manyetostriktif etkisinin keşfinden sonra birçok alanda bu yararlı fiziksel etkiden faydalanmak üzere çeşitli fonksiyonel ekipmanlar üretmek adına çalışmalar yapılmaktadır. Temelde manyetostriksiyon, mıknatıslanmadan kaynaklı malzemenin şeklindeki değişimdir. Manyetostriktif malzemeler ise manyetik alan altında şekil değiştiren malzemeler olarak ifade edilebilir. Temel seviyede, malzemenin boyutundaki değişim uygulanan manyetik alan ile malzemenin özgün domenlerindeki manyetik momentlerinin interaktif bir şekilde eşlenmesinden kaynaklanır. Bu malzemeler manyetik enerjiyi kinetik enerjiye, kinetik enerjiyi de manyetik enerjiye çevirebilme kabiliyetine sahiptir.

En bilinen manyetostriktif malzeme olan Terfenol-D, 1970 yıllarında Kuzey Amerika'da Naval Ordnance Laboratuvarlarında geliştirilmeye başlanıp 1980'lerde ABD donanması tarafından finanse edilen program kapsamında Ames Laboratuvarlarında tekrar geliştirilip yenilenmiştir.

#### 3.1 Yapısı ve Optimizasyonu

Dış Etkenlere uyum sağlayabilme özelliği ile "Akıllı Malzemeler" sınıfına giren ve adını yapısında bulundurduğu nadir toprak elementi olan Disprosyum, 3d geçiş metali demir ile terbiyumdan alan dev manyetostriktif Terfenol-D ( $Tb_xDy_{1-x}Fe_y$ ) dönüştürücüler içerisinde DC'den 20 kHz üzerinde frekans aralığında salınımlı hareket ve kuvvet üretmek amacı ile kullanılmaktadır. Geleneksel manyetostriktif malzemelerden 100 kat, piezoelektrik malzemelerden ise 2-2,5 kat daha güçlü elektriksel-mekanik çevirim yapabilen bir dönüştürücüdür. Oda sıcaklığında orta seviyede mıknatıslanma değerlerinde 0,002 m/m'nin üzerinde yığın doyum gerilimine duyarlıdır. Katı (monolitik), toz (GMPC), ve ince filmler olmak üzere birçok çeşitli formlarda üretilmektedir. Hem yüksek hem de düşük frekanslarda geniş yer değişimlerine ihtiyaç duyan geniş bant çalkalayıcılar, cerrahi gereçler, ultrasonik dönüştürücüler ve benzeri uygulamalarda, aktuatör olarak kullanılabilirliği detaylı şekilde belgelenmiştir.(Calkins et al.)

Terfenol-D'nin nispeten geniş gerilimi ve kuvvet çıkışı, aktuatör olarak kullanmak üzere birçok araştırmacıyı cezbetmiştir. Bunun yanı sıra tersinir doğası

yani hem aktuatör hem de dönüştürücü olarak gösterdiği manyetomekanik etkileri Terfenol-D dönüştürücülerinin etkili bir sensör uygulaması olabileceği konusunda fikir vermektedir. Terfenol-D'nin aktuatör ve sensör olarak tersinir kullanım uygulamalarını geliştirme çalışmaları devam ederken, şimdiye kadar işitme cihazları, yük hücreleri, ivmelendiriciler, yakınlık sensörleri, tork sensörleri, manyetik ölçerlerinin yanı sıra daha birçok başarılı sensör tasarım örneği mevcuttur.

### 3.2 Algılayıcı Etkileri

Malzemenin mıknatıslanması ve manyetostriksiyonu arasındaki birçok kuplaj (coupling) oranı, ilgilenilen parametreleri algılamak için kullanılabilir. Algılama için kullanılan etkilerden Joule etkisi ile Villari etkisi tersinir yapıdadırlar. Joule etkisi uygulanan manyetik alan altında uzunlukta olan boylamsal değişimi ifade ederken, Villari etkisi malzemeye uygulanan gerilime karşılık mıknatıslanmasında meydana gelen değişikliği ifade etmektedir. Mıknatıslanmasındaki bu değişim algılanıp kalibre edildikten sonra uygulanan gerilimi ya da kuvveti ölçmek için kullanılabilir. Villari etkisinden yük hücreleri, kuvvet hücreleri, ivmelendiriciler gibi alanlarda faydalanılmaktadır. Bir başka ilgilenilen etki Wiedemann etkisidir. Bu etki spiral manyetik alandan kaynaklanır. Manyetostriktif malzemeyi ya da mıknatıslanmış teli bükmeğin mıknatıslanmasında değişime sebep olur. Bu değişim harici tork ile ilişkilendirilebilmektedir. Bir başka deyişle uygulanan torktan manyetik alan elde edilirken ters Wiedemann etkisi olarak da bilinen Matteuci etkisi ile spiral manyetik alandan tork elde edilmesi manyetoelastik tork sensörlerinde kullanılmasını sağlamaktadır.

Terfenol-D özellikleri tabanlı sensörler, ilgilenilen parametreleri ölçmek için Terfenol-D'nin manyetomekanik özelliklerinin nasıl kullanılabilineceğine dayalı üç gruba ayrılabilir. Pasif sensörler, aktif sensörler ve birleşik sensörler. Pasif sensörler, ilgilenilen ölçümü yapabilmek için çevresel uyarı yoluyla malzemenin değişim yeteneğine dayanırlar ve Villari etkisi gibi manyetomekanik etkiyi harici yük, kuvvet, basınç, titreşim ve akış oranını ölçmek için kullanılırlar. Aktif sensörler, bazı ölçümleri yapabilmek için harici etki ile değişen Terfenol-D'nin içsel uyarılmasını kullanırlar. Sıcaklığın bir fonksiyonu olan geçirgenlikteki değişimin Terfenol-D örneğinde bilinen anlamda uyarılması yoluyla sıcaklığa



karar verilebilmesi gibi. Birleşik sensörler ise Terfenol-D'yi istenilen özelliğin ölçümüne izin verecek şekilde başka bir malzemeyi uyararak veya değiştirmek için aktif elaman gibi kullanılmaktadır. Örneğin, fiber optik manyetik alan sensörü, manyetik alanın varlığında fiber optik sensörün optik yol uzunluğunu değiştirmek için manyetostriktif elemanın uzunluğundaki değişimi kullanır. Akım, şok, gerilim, yakınlık, temas ölçümleri gibi birleşik sensörlerin birçok uygulaması vardır. Gerilim fotoelastik malzemeler kullanılarak ölçülebilmektedir ve manyetostriktif kılavuz yardımı ile yüksek hatasızlıkla yer değiştirme ölçümleri yapılabilmektedir. Fiber optik ve diyot lazerlerinin manyetik akı yoğunluğunu ölçmek için manyetometre yapımında kullanılması ise bu tip sensörlere başka bir örnektir.

Bahsi geçen tersinir etkilerin varlığı, manyetostriktif dönüştürücüleri iki farklı modda çalışabilir kılmaktadır. Manyetik enerjiyi mekanik enerjiye aktarması aktuator özelliğini ortaya koyarken, mekanik enerjiyi manyetik enerjiye aktarması algılayıcı yapısını ortaya çıkarmaktadır. Elektromanyetik, piezoelektrik vb. gibi diğer birçok dönüştürücüyle benzer şekilde manyetostriktif dönüştürücüler, sistemi eş zamanlı olarak hem harekete geçirme hem de algılama yeteneğine sahiptirler. Telefon, tarayıcı sonar çift yönlü kullanıma iyi birer örnektirler. Terfenol-D sonar dönüştürücü aynı zamanda hem alıcı hem de verici olarak kullanılabilir.

### 3.3 Terfenol-D'nin Teorisi

Terfenol-D dönüştürücü modeli hem aktuatör hem de algılama yeteneğini bünyesinde barındırmalıdır. Bu durum manyetostriktif malzemenin mekanik ve manyetik enerjisi arasındaki kuplaj hali göz önünde bulundurularak tamamlanabilir. Eşitlik (3.1) ve Eşitlik (3.2) düşük sinyal, doğrusal ve manyetostriktif bileşke denklemleri olup manyetostriktif özelliği tanımlamak için kullanılır. Bu denklemin kaynağını ise uygulanan manyetik alan vektörü ( $\mathbf{H}$ ) ve gerilim ( $\sigma$ ) gibi sadece iki faktörün değişmesi ile gerilmenin ( $\epsilon$ ) ve manyetik akı yoğunluğunun ( $\mathbf{B}$ ) diferansiyel cevabının doğrusallaştırılması oluşturur.

$$\epsilon = \sigma / \mathbf{E}_y^H + \mathbf{q} \mathbf{H} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{q}' \sigma + \mu^\sigma \quad (3.2)$$

Bu denklemde kullanılan katsayıların doğrusal, tekil değerli olmalarına gerek olmamasına rağmen genelde bu şartları sağladıkları yaklaşımı kabul edilmektedir. Denklemi etkileyen parametrelerin yanında sıcaklık, öncelikli olarak mıknatıslanmayı dolayısıyla manyetostriktif değişimi etkilediği belirlenmiştir. Belirtilen tüm bu değişkenler tensör nicelik olmalarına rağmen, sadece eksensel yön hesaba katılmıştır. Bu yüzden yön belirten alt simgeler kullanılmamaktadır. İlk olarak dönüştürücünün doğrusal işlemi hesaba katılmaktadır. Manyetostriktif etki doğrusal olmayan bir etki olmasına rağmen, düşük sinyal seviyeleri için manyetik alanda belirli bir frekansta, azami gerilme kapasitesinin yaklaşık 1/3'ünden düşük frekanslarda, manyetostriksiyonun doğrusal denklemleri güzel bir şekilde ilk yaklaşımları sağlamaktadır. Sonrasında, Eşitlik (3.3) uyarınca manyetostriksiyon sürecin tersinir olduğu, hem aktuatör hem de sensör olarak kullanılabilirliği, farz edilmektedir.

$$\mathbf{q}' = \frac{d\mathbf{B}}{d\sigma} \Big|_H = \frac{d\epsilon}{dH} \sigma = \mathbf{q} \quad (3.3)$$

İlgili varsayımlar uyarınca, Eşitlik (3.3)'e göre  $\mathbf{q}' = \mathbf{q}$  olmasından ötürü Eşitlik (3.1) ve (3.2)'de sadeleştirmeye gidilebilmektedir. Ancak gerilime karşı uygulanan manyetik alan grafiklerinde ortaya çıkan histerisis varsayımların yetersiz kaldığını kanıtlamaktadır ancak malzeme modellemesi açısından bir başlangıç noktası sağlamaktadır. Son olarak, gerilme, gerilim,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{B}$  Terfenol-D örnekleme boyunca eş değerli (uniform) kabul edilmektedir.

Ayrıca görülmektedir ki mekanik ve manyetik etkiler arasındaki etkileşim çok önemlidir. Manyetik domen duvar hareketi ve domen rotasyonu dolayısıyla mekanik gerilme hem mekanik gerilim hem de uygulanan manyetik alan tarafından üretilmektedir. Benzer şekilde manyetik indüksiyon ( $\mathbf{B}$ ), uygulanan manyetik alana ( $\mathbf{H}$ ) aynı zamanda mekanik gerilime tepki göstermektedir. İlgili denklemler ilk bakışta harici koşullarda malzemenin tepkisi ve manyetostriktif dönüştürücünün performansı hakkında bize yorum yapabilme olanağı sağlamaktadır. Örnek olarak uygulanan manyetik alandaki artış, sabit bir öngerilme (prestress) altındaki gerilme çıkışında artışa sebep olduğu yorumu yapılabilmektedir. Benzer şekilde denklemde negatif olarak gösterilen ve sıkışmaya karşılık gelen gerilimdeki artış, sabit manyetik alan altında gerilmede

azalmaya sebep olduğu şeklinde yorumlanabilmektedir. Ya da manyetik indüksiyonun, sabit gerilim altında uygulanan manyetik alan ile (ya da artan geçirgenlikle) arttığı, uygulanan alan sabit tutulduğunda azalan (daha az sıkıştırılmış hali ) gerilim altında arttığı sonucuna ulaşılabilmektedir.

Eşitlik (3.1)'in  $\mathbf{H}$  için çözülmesi ve Eşitlik (3.2)'de yer değiştirmesi durumunda ortaya çıkan Eşitlik (3.4), dönüştürücünün algılama kabiliyeti için basit bir model geliştirilmesinde kullanılabilir.

$$\mathbf{B} = \sigma (\mathbf{v} - \mu^\sigma / \mathbf{q} \mathbf{E}_y^H) + \varepsilon \mu^\sigma / \mathbf{q} \quad (3.4)$$

Faraday yasası uyarınca, Terfenol-D örneklemini saran, N sarımlı ve A kesit alanlı bobin içerisindeki indüklenmiş voltaj Eşitlik (3.5) ile ifade edilmektedir.

$$\mathbf{V} = \mathbf{N}\mathbf{A} \frac{d\mathbf{B}}{dt} = \mathbf{N}\mathbf{A} \frac{d\sigma}{dt} (\mathbf{q} - \mu^\sigma / \mathbf{q} \mathbf{E}_y^H) + \mathbf{N}\mathbf{A} \frac{d\varepsilon}{dt} \mu^\sigma / \mathbf{q} \quad (3.5)$$

$\mu^\sigma$ ,  $\mathbf{E}_y^H$ ,  $\mathbf{q}$  parametrelerinin zamanla değişmediği farz edilip, Eşitlik (3.5)'de sağ tarafda bulunan üç terimden ilk ikisi kuvvetin zamana göre türeviyle doğru orantılı iken üçüncü terim gerilimin zamana göre türevi ile ya da hız ile doğru orantılıdır. İlk terime sadece sistem ayrıştırıldığında ve mıknatıslanmadaki değişimler, yalnızca uygulanmış kuvvetin sonucu olduğunda ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak manyetomekanik etkinin modeli eşlenmiş denklemlerin kullanımına ihtiyaç duyduğu için, ilk terimle 180 derece faz farkı olan ikinci terim ve ilk terimle aynı fazda olan üçüncü terim dahil edilmelidir.

Harmonik tahrik için Eşitlik (3.5), Eşitlik (3.6) haline gelmektedir.

$$\mathbf{V} = \mathbf{N}\mathbf{A}(2\pi f) \sigma(\mathbf{q} - \mu^\sigma / \mathbf{q} \mathbf{E}_y^H) + \mathbf{N}\mathbf{A} \varepsilon (2\pi f) \mu^\sigma / \mathbf{q} \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.6)'nın sağ tarafı üç terimin bağıl boyutuna karar vermek için değerlendirilebilir. Bu denklemde yer alan parametrelerin kullanılan tipik değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Birinci ve ikinci terim aynı derecede iken

üçüncü terim daha küçük derecedir. Gerilmenin doğrudan gerilimin Young Modülüne eşit olduğu durumda üçüncü terimle ikinci terim büyüklük olarak eşit ancak zıt işaretli olmaktadır. Fakat Eşitlik (3.1) ile ilgili durum için geçerli olmadığını göstermektedir. Bobin içerisinde Terfenol-D özünü saran voltaj indüklenmesi temelli kuvveti ( $F = \sigma A$ ) hesaplayabilmek için sadece birinci ve ikinci terim kullanılabilir. Terfenol-D sensörü tarafından ölçülen kuvvetin Eşitlik (3.7)'de ifade edilmiştir. Bu denklem  $(V/2\pi f)$ 'in  $V$ 'nin zamana göre türevine eşit olduğu durumda herhangi bir (arbitrary) sinyal için geçerlidir.

$$F = \frac{V}{N(2\pi f)} [ 1 / (q \cdot \mu^\sigma / q E_y^H) ] \quad (3.7)$$

En hassas Terfenol-D sensörünü yapabilmek için tasarımını ve performans kriterlerini optimize etmek çok önemlidir. Dönüştürücüyü optimize etmek için öngerilme, manyetik bayas, yük ve çalışma frekansı gibi bazı parametreler kullanılmaktadır. Ayrıca Eşitlik (3.7)  $\frac{V}{F}$  hassasiyet oranının  $N$  sarım sayısı ile doğru orantılı olduğunu ve hassasiyetin malzemenin mıknatıslanma kabiliyetinin ( $\mu^\sigma$ 'nin artması) artmasıyla orantılı olarak arttığını, malzemenin mekaniksel olarak daha az uyumlu olmasıyla ( $E_y^H$ 'nin artması) azaldığını göstermektedir.

Tablo: 3.1 Manyetostriktif Terfenol-D dönüştürücüsü malzeme özellikleri için deneysel ve yayınlanmış değerler. (Calkins et al.).

Material Property	Young's Modulus $E_y^H$ (GPa)	Permeability $\mu^\sigma$ (Tm/A)	strain coefficient $q$ (m/A)	coupling factor $k^2$
Butler	25-30	11.56e-6	15e-9	0.7-0.75
ISU study	50-60	2.2-6.7 e-6	3-4.5 e-9	0.35-0.5
Value used	60	2.2e-6	4.5 e-9	0.4

İdeal Terfenol-D sensörü, sıkıştırılan kuvvetleri ölçebilmesi için uygulanan gerilim eksenini ile tüm manyetik domenleri paralel olarak hizalamaya yetecek kadar minimum manyetik bayasa sahip olmalıdır. İlgili domen hizalanmasını  $H_0$  olarak gösterilen manyetik bayas ya da kritik alan sağlamakta olup, bu durum mıknatıslanmada step değişime sebep olmaktadır. Gerekli  $H_0$  ancak domenleri kuvvet ekseninde hizalandırabilecek kadar küçük olmalıdır çünkü düşük kritik alan kullanımı yüksek sensör hassasiyetiyle ilişkilidir. Düşük manyetik alanda domenlerin  $90^\circ$  dönebildiği durumda hassasiyet daha fazla artmaktadır. Algılama

açısından mekanik gerilim, domenleri döndürerek mıknatıslanmada büyük değişikliklere sebep olmaktadır. Bu değişim ise algılayıcı sinyal olarak ölçülebilmektedir. Domenlerin hizalanması için gerekli olan kuvvet yetersiz kaldığında domenleri döndürmek için harici manyetik bayastan faydalanılır. Genel anlamda kritik alan öngerilmeyle artmaktadır, bu yüzden izin verilen en düşük mekanik öngerilmenin kullanımı en hassas sensörleri elde etmek için önemli bir parametredir.

Eşitlik (3.3)'te  $q' = q$  kabulü, tersinir mıknatıslanma durumunda kaybın olmadığı farz edilerek termodinamik denklik ilkesine dayandırılmaktadır. Bu durum artan aktuasyon için  $q'$  nun azamileştirildiği koşullar altında çalışan Terfenol-D'nin, eş zamanlı olarak gerçekleştirilebilir ve artmış algılama kapasitesine sebep olan geniş  $q'$ 'ya yol açtığı vurgulanmaktadır. Bu sebepten ötürü geniş aktuasyon kabiliyeti ( $q$ ), hassasiyet algılama optimizasyonuna ( $q'$ ) denk gelmektedir. Ancak sensör hassasiyeti optimize etme girişimleri, Eşitlik (3.3)'ün sadece belirli koşullar altında geçerli olup öngerilme ve manyetik bayas için temel sağlamamaktadır.

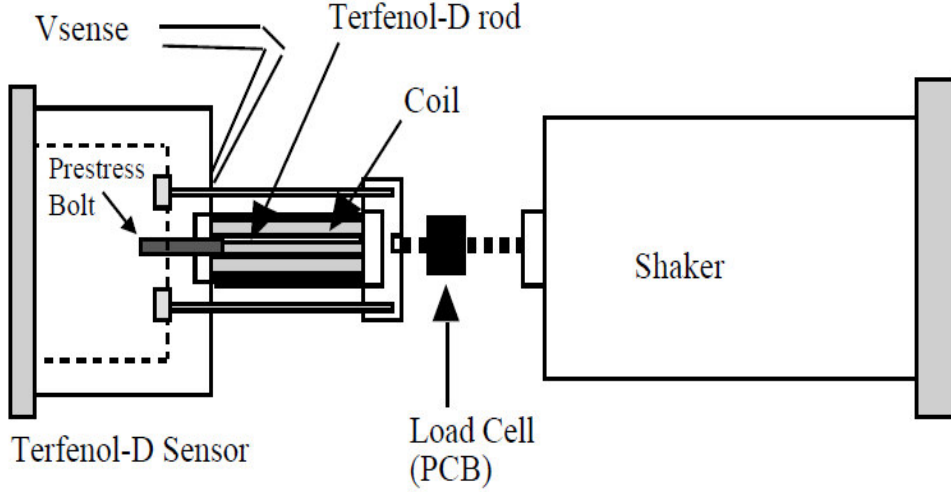
Aktuatör için artan verim ise algılama için artan hassasiyete dönüştürülmektedir. Dönüştürme (transduction) işlemi doğada tersinir bir süreçtir. Diğer bir deyişle, mekanikten manyetik hale (algılama) en verimli şekilde transfer edilen enerji, aynı koşullar altında manyetikten mekanik hale (aktuasyon) en verimli şekilde transfer edilen enerjiye denktir.

### 3.4 Optimizasyon için Yapılan Çalışma Sonuçları

Standart geniş bant dönüştürücünün sensör olarak kullanıldığı çalışmada, aslen aktuatör olarak tasarlanan Şekil 3.1'deki deney düzeneği kuvveti ve stresi ölçmek için kullanılmıştır. İstenmeyen rezonanslar olmadan çıkış üretmesi için tasarlanan yapı ayarlanabilir öngerilme ve manyetik bayasa imkan tanımaktadır.

Yaklaşık 5,1 cm uzunluğunda ve yaklaşık 1,3 cm çapında kaplanmış Terfenol-D çubuğu, tek katmanlı 110 sarımlı pikap bobini ile 1100 sarımlı sürücü bobini arasına yerleştirilmiştir. Algılayıcı durumda her bir bobin manyetik akı

yoğunluğunu ölçmek için kullanılabilir. Akım kontrol yükselticisi için Techron 7780 marka modeli kullanılmıştır. Bu yükseltici, ihtiyaç duyulan DC manyetik bayası üretmek için sürücü bobinine girişi sağlamaktadır. İlave manyetik bayas ise bobini saran silindirik kalıcı mıknatıs ile sağlanmaktadır. Terfenol-D çubuğuna seri bağlan washerlar mekanik öngerilmesini sağlama görevindedir. Bu düzenekte sürücü bobini aracılığı ile akım ve voltaj, pikap bobinin aracılığı ile voltaj (B'nin zaman türevi ile doğru orantılı olacak şekilde) ve mekanik giriş ile kuvvet ölçülebilir niceliklerdir. Manyetostriktif sensörler yükün kendisini değil de yükün zamana göre türevini ölçtükleri için ek bir yazılıma ya da donanıma ihtiyaç duymaktadırlar.



Şekil 3.1 Terfenol-D dönüştürücüsünün kuvvet sensörü olarak kullanıldığı test düzeneği.

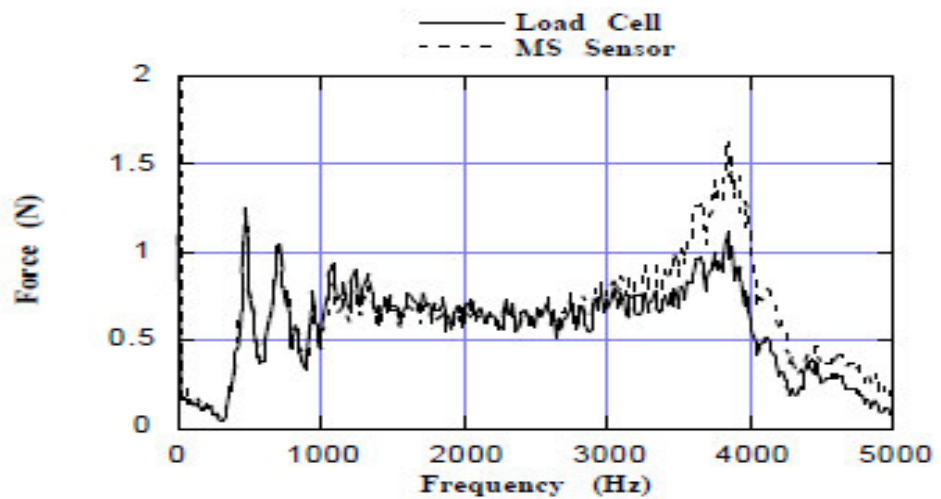
(Calkins et al.)

Yapılan ilk testlerde, optimizasyonun öngerilmeye göre yapılmasının amacı en iyi hassasiyeti bulmaya çalışmaktır. Sensör hassasiyeti voltaj çıkışının kuvvet girişine bölümü şeklinde değerlendirilmiştir. Bu sistem için 0-5000 Hz aralığındaki geniş bant sinyal ile sürülen çalkalayıcı, bu bant aralığında 10 N rms'lik kuvvet ortaya çıkarmaktadır. Tablo 3.2'de 0-5 kHz rms voltaj/ Newton kuvvetin 12 kA/m (150 Oe)'de 4 farklı öngerilmeye karşılık gelen hassasiyet değerleri listelenmiştir. Açıkça görülmektedir ki hassasiyet öngerilme ile ters orantılı bir şekilde değişmekte, öngerilme arttıkça hassasiyet azalmaktadır (Bknz. Tablo 3.2). 0,79 MPA değeri Terfenol-D çubuğunu test sırasında elverişli durumda tutabilmek için gerekli olan asgari öngerilme değerini ifade etmektedir.

Tablo 3.2 12 kA/m'lik manyetik bayas altında, 4 farklı öngerilme değerinde hassasiyet seviyeleri. (Calkins et al.).

Test Number	Prestress (MPa)	Sensitivity (Vsens/N)
1	0.79	0.109
2	1.6	0.104
3	3.98	0.089
4	7.96	0.075

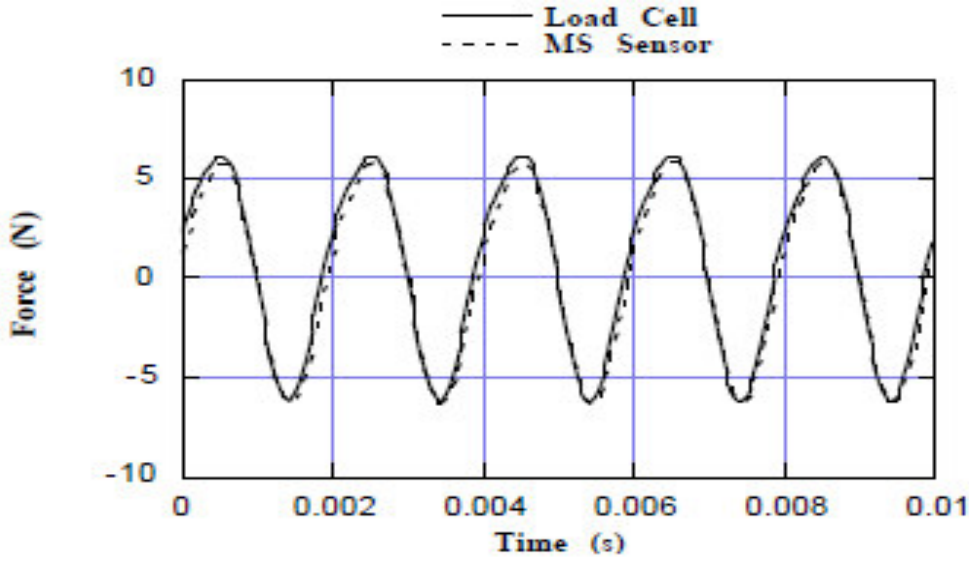
Calkins ve arkadaşlarının yaptığı optimizasyonda kuvveti ve gerilimi (Terfenol-D çubuğu üzerindeki kuvvetin çubuğun alanına bölümü) deney düzeneklerini farklı limit koşulları altında hazırlayıp deney sonuçlarını grafiklerle ifade etmişlerdir. Şekil 3.1'deki deney düzeneğinde bulunan dönüştürücüye başka bir geniş bant dönüştürücü bağlayarak düzeneğin her iki tarafını bloklamak suretiyle 0'dan 10 kHz'e kadar değişen frekans aralığında 10 N altında bloklanmış kuvvet için sınırlandırma testi yapmışlardır. Çalkalayıcı ve sensör dönüştürücüsüne PCB 208A03 model yük hücresini seri bağlayarak yük hücreesindeki yük ile sensör sürücüsünün bobinindeki indüklenmiş voltaj, geniş bant rasgele tahrik için sistemi izlemiş, deney sonuçlarını grafiklemiştir. (Bknz. Şekil 3.2). İlgili şekilde, yük hücrelerinden elde edilen frekansın bir fonksiyonu olan kuvveti ve sensörden toplanan veriler ile Tablo 3.1'den alınan  $\mu^\sigma$ ,  $q$  ve  $E_y^H$  değerleri Eşitlik (3.7)'de kullanılarak hesaplanan kuvvetin ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Yük hücrelerinden elde edilen kuvvet ile Terfenol-D sensöründen elde edilen kuvvetin karşılaştırılması (Calkins et al.)

Şekil 3.2 dikkatli bir biçimde incelendiğinde sol tarafta düşük sağ tarafta yüksek frekans değerlerinin yer aldığı, 200 Hz mertebelerinden 3000 Hz mertebelerine kadar hesaplamalardan elde edilen sonuçların deneyden elde edilen sonuçlarla örtüştüğü sonucuna varılmaktadır. Yaklaşık olarak 3000 Hz'in üstündeki frekans değerlerinde ise sensör rezonansının fark edilebilir duruma geldiği anlaşılabilmektedir.

Çok düşük frekanslardaki olabilecek tutarsızlıklar katsayılarla, özellikle  $q$ 'nun frekans değişimine çok duyarlı olmasına dayandırılmaktadır. Şekil 3.3'de PCB yük hücresinden elde edilen kuvvet ile sensörden elde edilen 500 Hz gibi düşük bir sinüsoidal tahrik örnekleminde Eşitlik (3.7)'ye göre hesaplanmış kuvvetin zaman izleri karşılaştırması gösterilmektedir. Şekil 3.3 incelendiğinde ise fazda ve genlikte mükemmel bir uyum göze çarpar iken sadece harmonik bozukluktan kaynaklı azalan eğimde sensör sinyalinin geriden geldiği gözlemlenmektedir.

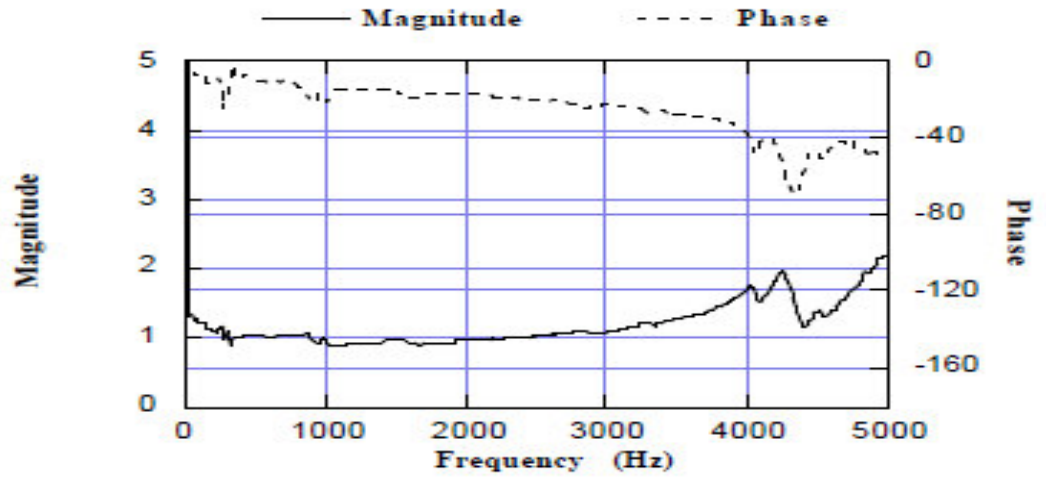


Şekil 3.3 Zaman domeninde yük hücresinden elde edilen kuvvet ile sensörden elde edilen kuvvetin karşılaştırılması (Calkins et al.)

Büyüklik ve fazın transfer fonksiyonu üzerine yapılan çalışmadaki yük hücresi aracılığıyla ölçülen kuvvet ile sensör tarafından elde edilip Eşitlik (3.7)'yi kullanmak suretiyle hesaplanan kuvvetin karşılaştırmasını grafiksel olarak Şekil 3.4'de göstermişlerdir. Transfer fonksiyonunun büyüklüğü ( $F_{\text{sensör}}/F_{\text{pcb}}$ ) yaklaşık olarak 250 Hz ile 3000 Hz aralığında 1'e yakındır ve Şekil 3.2 ile tutarlılık göstermektedir. 3000 Hz'den sonra bozulma olduğu ve frekans artıca

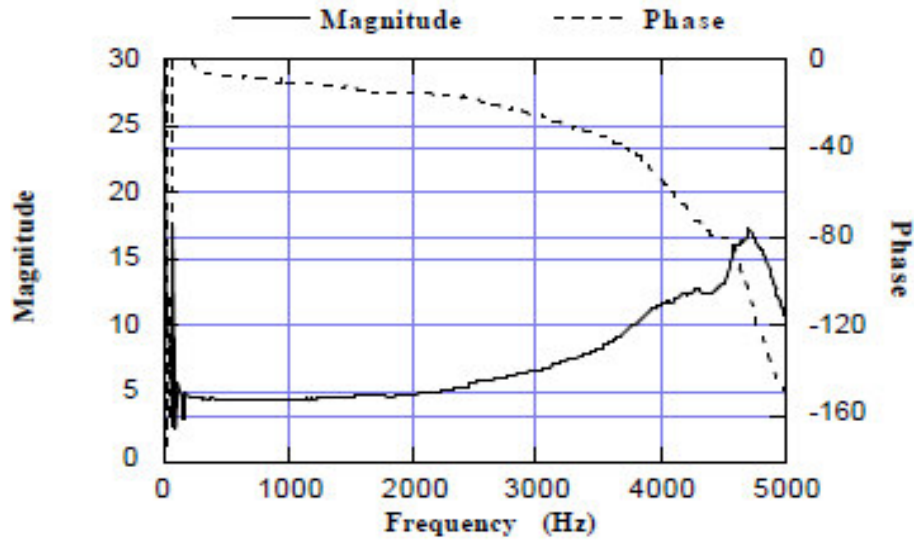


büyükliğin arttığı çıkarımı şekilden yapılabilmektedir. Şekil 3.3’de gözlemlenen fazın ve genliğin tutarlı olup sensör hesaplamalarının kuvvet anlamında yük hücresinden  $10^\circ$  kadar geriden geldiği durumda faz farkı probleminin sebebi olarak modelin sınırlandırılmasına (blok-blok durumu) işaret edilmektedir.  $\mu^\sigma$ ,  $\mathbf{q}$  ve  $\mathbf{E}_y^H$  katsayılarının doğrusal, sabit, gerçek olduğu varsayılarak modelin uygulanabilir olduğu frekans aralığında sınırlandırdığı varsayılmaktadır. Calkins ve Flatau bu modelin, kuvvet seviyelerine göre makul derecede güvenilir olduğunu çünkü  $\mu^\sigma$ ,  $\mathbf{q}$  ve  $\mathbf{E}_y^H$  için aynı değerlerin 500 Hz’lik sinüsodyal tahrik ile hem 1 N hem de 10 N için mükemmel bir uyum sağladığını ileri sürmüşlerdir.



Şekil 3.4 Yük hücresi ile sensörden elde edilen kuvvetin transfer fonksiyonunun karşılaştırılması. (Calkins et al.)

Optimizasyon testleri sırasında, deney düzeneğinin blok-serbest konumunda sensörün ivmelendirici gibi davrandığı titreşim testlerini de yapmışlardır. Şekil 3.1’in  $90^\circ$  döndürülmüş hali test edildiğinde hem yük hücresi hem de Terfenol-D tarafından kütleyle orantılanabildiğinden ivme (Kuvvet/sensörün kütlesi, yaklaşık 0,75 kg) ölçülmektedir. Büyüklüğün 2000 Hz civarında sabit kaldığı ve blok-blok düzenine benzer sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir. Ortaya çıkan fark ise sensör rezonansına yaklaştıkça fazın 3000 Hz’den sonra çok daha hızlı bir şekilde azalmasıdır. Tablo 3.1 ilgili düzene aynı katsayılar ile uygulandığında ise tutarlılığın azaldığı, büyüklüğün ise yaklaşık 5 kat arttığı sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 3.5 Blok-serbest düzeninde yük hücresinden ve Terfenol-D'den elde edilen kuvvetin transfer fonksiyonunun karşılaştırılması. (Calkins et al.)

## 4 ÖNGERİLMENİN TERFENOL-D DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜNÜN DİNAMİK PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

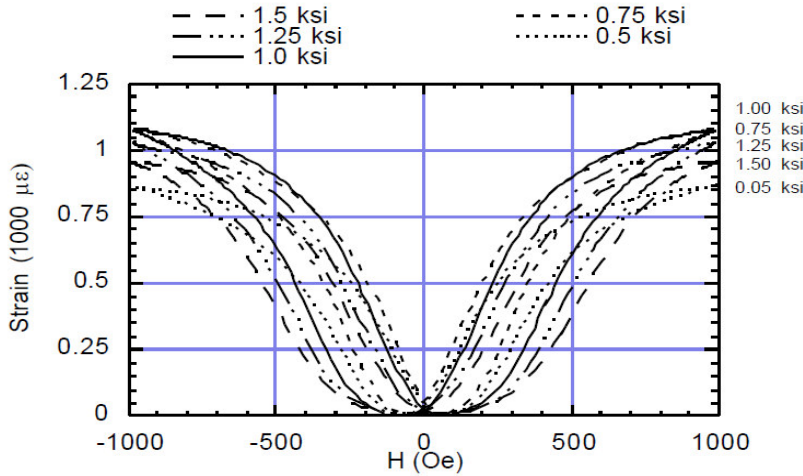
Manyetostriktif Terfenol-D'nin performansı malzemenin durumuna özellikle mekanik öngerilme kuvvetli bir şekilde bağlıdır. Calkins ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışmada öngerilmenin Terfenol-D dönüştürücüsünün dinamik performansı üzerindeki etkisini inceleyip, hem öngerilmenin hem de manyetik bayasın neredeyse DC dönüştürücü performansı üzerindeki etkilerini göstermişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmalarda dönüştürücünün hassasiyetinin gerilime, uygulanan manyetik alanlı gerilme oranına ve malzeme özelliklerinin başlangıç mekanik öngerilmesindeki küçük değişimlere olan tepkisini göstermişlerdir. Aynı zamanda malzemenin özelliklerindeki trendler, Young Modulusü, manyetomekanik kuplaj faktörü, geçirgenlik, dinamik gerilme kat sayısı, öngerilmeli ve sürücü seviyeli mekanik kalite faktörü gibi etkenler altındaki etkilerini incelemişlerdir. Manyetik bayasın ve uygulanan farklı manyetik alanlardaki gerilmenin çalışma frekansının etkisini incelemişlerdir ve dönüştürücünün çıkışının verilen öngerilme seviyesiyle belirgin şekilde değiştiğini gözlemlemişlerdir.

### 4.1 Öngerilmenin Etkisi

Mekanik öngerilme, manyetik alan ve sıcaklık boyunca manyetostriktif malzemenin performansını etkileyen birincil faktörlerden biri olmuştur. Bu yüzden Terfenol-D tasarımcılarının, öngerilmenin Terfenol-D dönüştürücüsü üzerindeki etkisini enine boyuna araştırmaları gerekmektedir.

Sıkıştırılan mekanik yükün ya da diğer bir ifadeyle öngerilmenin Terfenol-D örneği üzerinde birçok gözlemlenebilir etkisi bulunmaktadır. Öncelikle öngerilme ile birlikte malzemenin toplam gerilme kapasitesi ilk sıkışma gerilmesine göre arttığı söylenebilir. Yüksek ivmelerde ve şok koşullarında malzemenin sağlam kalabilme yeteneği artmaktadır çünkü Terfenol-D malzemesi serbest durumdayken sıkıştırılmış duruma kıyasla daha kırılımandır. Serbest durumda gerilme mukavemeti yaklaşık 28 MPa iken sıkıştırılma durumunda mukavemeti 700 MPa mertebesindedir. (Butler, 1988). Bu yüzden dayanıklılığı daha fazla arttırmak için Terfenol-D önce sıkıştırılmaktadır. Son olarak malzeme özelliği ile ölçülen Terfenol-D'nin performansı artırılıp düşürülebilmektedir.

Öngerilme ile toplam gerilme kabiliyetinin artması etkisi Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Bu etki, eğim ve azami gerilme değiştirilerek kelebek figüründe gözlemlenmektedir. Süre çok yavaş değiştirilerek çok düşük frekanslı örnekler alınmaktadır. Neredeyse DC (quasi-DC) olarak kabul edilen bu durumda öngerilmenin 0,5 ksi’den 1,5 ksi’ye kadar değişen değerleri için gerilmenin uygulanan manyetik alana göre değişimi incelendiğinde öngerilme 0,5 ksi’den 1,00 ksi’ye kadar arttığında bu oranın doğru orantılı olarak arttığı, daha sonra öngerilme 1,00 ksi’den 1,5 ksi’ye artırılmasına rağmen oranın ters orantılı olarak değiştiği sonucu çıkartılmaktadır. Optimum öngerilmenin 1,00 ksi mertebelerinde olduğu şeklinde yorumlansa da manyetostriktif malzeme üzerinde öngerilme ile manyetik bayasın içinden çıkılması zor bir etkileşimi olduğu bilinmektedir.



Şekil 4.1 0,7 Hz’de (0,5), (0,75), (1,0), (1,25), (1,5) ksi için gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan grafiği (kelebek figürü). (Calkins et al., 1997).

Terfenol-D üzerindeki öngerilme ile ilgili yapılan en kapsamlı çalışmalardan birinde Moffet ve arkadaşları manyetik bayas altında sürücü seviyesinin (AC) 100 Oe’den 2000 Oe’e (0’dan tepeye) ve öngerilmenin ise 1,0 ksi’den 9,0 ksi’ye kadar olan değişimlerin etkisini incelemiş ve şu sonuca ulaşmışlardır:  $d_{33}$  (eksenel gerilme mukavemeti, uygulanan alanlı gerilme oranı),  $\mu_{33}^T$  (geçirgenlik),  $s_{33}^H$  (mekanik uyumluluk) gibi faktörler gerilme ve manyetik alana bağlıdır dolayısıyla uygun mekanik öngerilme ve manyetik bayas koşullarının Terfenol-D’nin hem aktuatör hem de dönüştürücü olarak başarılı bir şekilde kullanılmasında çok kritiktir.

Öngerilmenin ve manyetik bayasın manyetostriktif malzemeler üzerindeki etkisi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda malzeme trendleri, azami ve asgari eksensel gerilme mukavemeti, manyetomekanik kuplaj, geçirgenlik tepe mekanik çıkışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Buna ek olarak bazı çalışmalar ise öngerilme ile eş zamanlı olarak tüm değişkenlerin optimize edilemeyeceğini öne sürmüştür. Schulze ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kuplaj ve gerilme katsayısı için sırasıyla optimal öngerilmesini 0,29 ve 1,12 ksi olarak bulmuşlardır. Başka bir çalışmada ise 0,29 ksi'lik öngerilmede asgari geçirgenlik değeri belirlenmiştir. (Greenough et al., 1991). Calkins ve arkadaşları geniş bantta 1,9 ksi'de azami dönüştürücü ivmelenme çıkışına ulaşmışlardır. Ancak şu ana kadar yapılan hiçbir çalışma manyetik bayas ile sürücü seviyesinin doğrudan etkileşimini raporlamamıştır. Bu çalışmalara ek olarak Young Modülüs'ün öngerilme ile arttığı, elektriksel empedans fonksiyonun ise öngerilme ile değiştiği sonuçlarına ulaşılmıştır. (Moffet et al.,1991; Calkins and Flatau,1996).

Burada dikkat edilmesi gereken durum şudur ki, farklı çalışmaların sonuçlarını karşılaştırmak her zaman çok sağlıklı olmamaktadır çünkü sıcaklık, yük ve öngerilme mekanizması gibi performans üzerinde belirgin bir etkisi olan çalışma koşullarının performans üzerindeki etkileri farklı olmaktadır.

## 4.2 Yarı-Durağan (Quasi-Static) Performans

Bu bölümde manyetik bayasın olmadığı, DC durumunda öngerilme seviyesinin 0,5 ksi'den 1,5 ksi'ye kadar olan yüksek sürücü (AC) seviyesinde gerilmeye karşı uygulanan manyetik alanın değişimi incelenmektedir. Bu değişimi gözlemleyebilmek için öncelikle manyetostriktif çubuğa bir öngerilme uygulanmaktadır. Çubuğu sürerek washer'a karşı bir iş yaptırılmaktadır. Bu durum altında öngerilmedeki değişim, tepe noktası kayması olarak kendini göstermektedir. 5 farklı sürücü seviyesine karşılık gelen her bir öngerilmenin nominal değerden % olarak kayması Tablo 4.1'de listelenmektedir. 1000 Oe'ye kadar olan geniş bir aralıkta rezonansta çalışan sistemin değişimi şu şekildedir;

Tablo 4.1: Öngerilmedeki azami değişim (0'dan tepeye) ve rezonansta çalışan nominal öngerilmenin % değişimi. (Calkins et al., 1997).

Bias	25 Oe		50 Oe		75 Oe		100 Oe		1000 Oe	
	psi	%	psi	%	psi	%	psi	%	psi	%
750	13.9	1.85	29.2	3.89	43.8	5.84	54.6	7.28	306.0	40.0
1000	13.9	1.39	27.3	2.73	43.0	4.30	52.8	5.28	314.0	31.4
1250	14.7	1.18	28.8	2.30	42.2	3.38	51.9	4.15	292.7	23.4
1500	4.9	0.30	17.7	1.18	30.2	2.01	40.4	2.69	280.0	18.7

Dinamik testlerde kullanılan düşük sürücü seviyeleri için öngerilmedeki %7 ya da %7'den düşük değişimler daha kabul edilebilir seviyelerdir. 1000 Oe mertebelerinde ise bu oran 750 psi için % 40'lara ulaşmaktadır. Bu durum dönüştürücü tasarımında istenmeyen ve dikkat edilmesi gereken bir durum olduğu gözler önüne serilmektedir.

İlgili çalışmada dönüştürücü 0,7 Hz, 1000 Oe (79,6 kA/m)'lik AC manyetik alan ile sürülmektedir. % farklı öngerilme değeri için mıknatıslanmaya karşılık uygulanan manyetik alan grafiğinde harici manyetik bayas olmadığı için manyetostriksiyon mıknatıslanma ile simetriktir ve iki taraflı gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan grafiğinde kelebek figürü ortaya çıkmaktadır. (Bknz. Şekil 4.1).

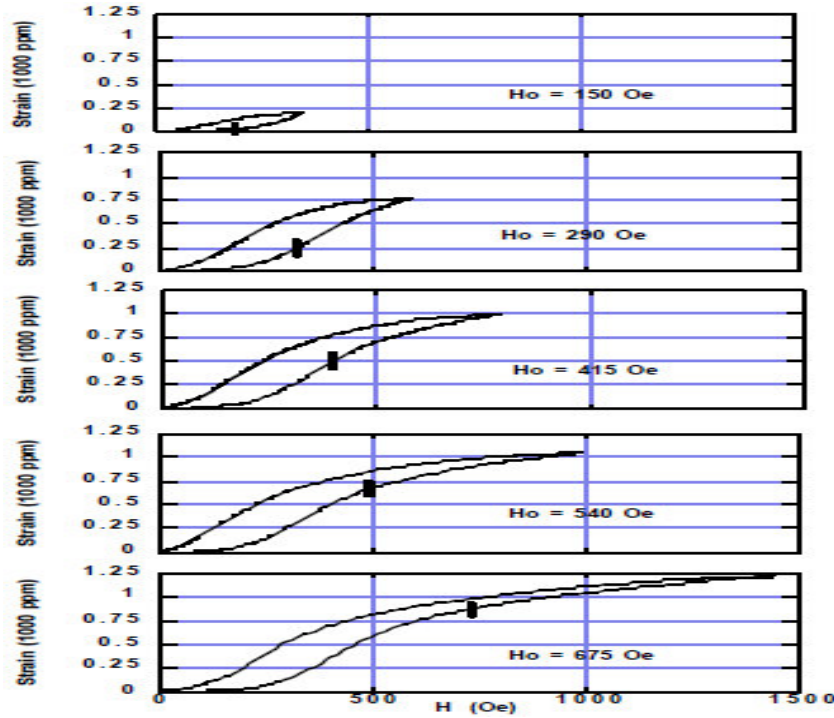
Şekil 4.1 yorumlandığında 1000 Oe'de 0,5 ksi için 860  $\mu\epsilon$ 'den yine 1000 Oe'de 1,0 ksi için tepe noktası olan 1075  $\mu\epsilon$ 'ye kadar artmakta daha sonra ise 1000 Oe'de 1,5 ksi için 960  $\mu\epsilon$ 'ye düşmektedir. Eğim cinsinden yorumlanacak olur ise, azami eğim 0,5 ksi'de 2,2  $\mu\epsilon$ /Oe'den 0,75 ve 1 ksi'de neredeyse düz bir çizgi halini aldığı 2,77  $\mu\epsilon$ /Oe'ye kadar arttığı bu bölgeden sonra 1,25 ksi'de 2,44  $\mu\epsilon$ /Oe'ye, 1,5 ksi'de ise 2,17  $\mu\epsilon$ /Oe'ye düştüğü çıkarımı yapılabilmektedir. Eğimin en yüksek olduğu yer ya da bir diğer deyişle uygulanan manyetik alana karşın gerilmenin en çok olduğu yer "patlama (burst) bölgesi" olarak tanımlanmaktadır. 0,75 ksi'nin ötesinde öngerilme arttırılmaya devam eder ise patlama bölgesi azami manyetik alana ulaşır çünkü öngerilmeyi yenmek için daha fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadır.

Şekilde görülen kelebek figürü uygulanan manyetik alan arttıkça artmasından, azaldıkça ise farklı bir oranla azalmasından ötürü histerisis göstermektedir. Histerisisin tutarı (bir turdaki kayıp) kelebek döngüsü ile çevrelenmiş alan ile doğrudan ilişkilidir. Histerisis artan öngerilme ile artmaktadır. Azalan ve artan alanlar tarafından takip edilen yol için belirgin bir

şekilde değiştiği anlaşılmakta olup sadece manyetik bayasın olmadığı durumda bu etki gözlemlenmektedir. Kelebek figürü değişik öngerilmelerdeki performans farkını açıklamak için tek başına yeterli değildir. Özellikle AC uygulamalarında (yüksek öngerilme ve sıfır manyetik bayasta) düşükten orta sürücü seviyelerine kadar olan bölgede yetersiz kalmaktadır. Bu durumun sebebi olarak, bu bölgelerde eğimin çok yüzeysel kalması söylenebilir. Bu tarz AC uygulamalarında dışarıdan bir DC yardımı ile eğim bölgesini daha dik bölgelere kaydırmak ilgili probleme bir çözüm olarak sunulabilmektedir.

### 4.3 Öngerilmenin ve Manyetik Bayasın Yarı-Durağan Etkisi

AC'ye ek olarak DC uygulandığında yüzeysel olan eğim bölgesi daha dik bölgelere kaydığından, gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan grafiğinde ortaya çıkan döngünün şekli farklı AC seviyelerine göre değişiklik göstermektedir.



Şekil 4.2 1 ksi öngerilme altında 150, 290, 415, 540 ve 675 Oe'de gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan grafikleri. Siyah çizgi manyetik bayası ( $H_0$ ) göstermektedir. (Calkins et al., 1997).

Üstteki şekil incelendiğinde 1,0 ksi öngerilmede 150 Oe'lik, 290 Oe'lik, 415 Oe'lik, 540 Oe'lik, 675 Oe'lik DC bayas uygulandığı durumların gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan grafikleri yer almaktadır. Frekans katlamasına engel olmak için 0,7 Hz AC sürücü seviyesi kullanılmaktadır. Grafikler incelendiğinde manyetik bayas arttıkça döngü şekillerinin değiştiği, ulaştıkları azami gerilime değerlerinin düzenli arttığı, DC'nin olmadığı bir önceki şekille kıyaslandığında ise sabit bir değerde azami seviyesine çıkamadığı sonucuna rahatlıkla ulaşılabilmektedir.

Uygulanan farklı manyetik bayaslar karşılaştırıldığında en simetrik halin 415 Oe'de olduğu açıkça görülmektedir. Her bir öngerilme için seçilen uygun kriter optimize manyetik bayas durumudur. Optimize manyetik bayas ( $H_0$ ) simetrik ya da dengede bir gerilme-uygulanan manyetik alan ilişkisi için gerekli olan bayastır ve DC kısmında kullanılan bu manyetik bayas 150 Oe'lik etkin bir kuvvete sahip kalıcı mıknatıs ile üretilmektedir. Tablo 4.2'de farklı öngerilme seviyeleri için gerekli olan  $H_0$  değerleri listelenmiştir. Başka türlü belirtilmediği her durum için öngerilme optimize manyetik bayas olarak kabul edilmektedir.

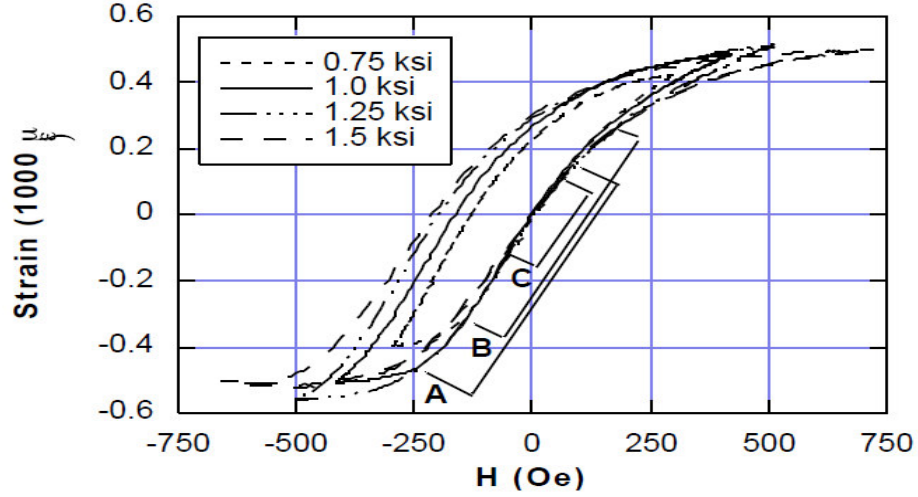
Tablo 4.2 1'den 4'e bayas koşulları; yarı-durağan simetrik gerilme alan kriteri kullanılarak optimize edilmiş farklı öngerilme seviyeleri için manyetik bayaslar. (Calkins et al., 1997).

Bias Condition	1	2	3	4
Prestress	0.75 ksi	1.0 ksi	1.25 ksi	1.5 ksi
Magnetic bias (Oe)	300 Oe	415 Oe	480 Oe	540 Oe

Şekil 4.3'de yarı-durağan gerilmeye karşılık optimize manyetik bayaslı (verilen DC manyetik bayas kadar AC sürücü seviyesinin genliğinin ayarlanmış hali) her bir öngerilme için uygulanan manyetik alan grafiği gösterilmektedir. Bölgelere ayrılmış gösterim farklı eğim aralıklarını belirtmektedir. Azami eğimlerin değerleri C bölgesinde tüm öngerilme değerleri için aynıdır. A ve B bölgelerinde ise 1,25 ksi'lik ve 0,75 ksi'lik öngerilmelerin eğimleri maksimum eğime sahip 1,0 ksi'lik öngerilme ile eşleşmektedir. 1,5 ksi'lik öngerilme C bölgesinin hemen üstünde ve altında dar bir eğim göstermektedir. Tüm verilen öngerilmeler için eğimler karşılaştırıldığında 1,0 ksi'lik öngerilme, gerilmedeki en büyük değişime karşılık en yüksek eğime sahip olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.



Bayaslanmamış durum ile karşılaştırıldığında (Bknz. Şekil 4.1), bayaslanmamış durumun aksine, optimize edilmiş bayaslı durumdaki tüm öngerilme seviyelerinin aynı azami eğim bölgesinde eşleştiği gözlenmektedir. Bu karşılaştırma Terfenol-D dönüştürücüsü için bayaslanmanın önemine ve patlama bölgesinde merkezlenmiş çalışmalara mücade etmesine dikkat çekmek açısından faydalı olmaktadır.



Şekil 4.3 Gerilmeye karşılık 4 bayas koşulu (0,75 ksi-300 Oe), (1,00 ksi-415 Oe), (1,25 ksi-480 Oe), (1,5 ksi-540 Oe) için uygulanan manyetik alan grafiği. DC manyetik bayas ve toplam gerilmenin yarısı etrafında merkezlenmiş. A, B ve C harfleri 1,25 ksi'lik, 0,75 ksi'lik ve 1,5 ksi'lik eğimlerin maksimum 1,0 ksi'lik eğimle eşleştiği bölgeleri göstermektedir. (Calkins et al., 1997).

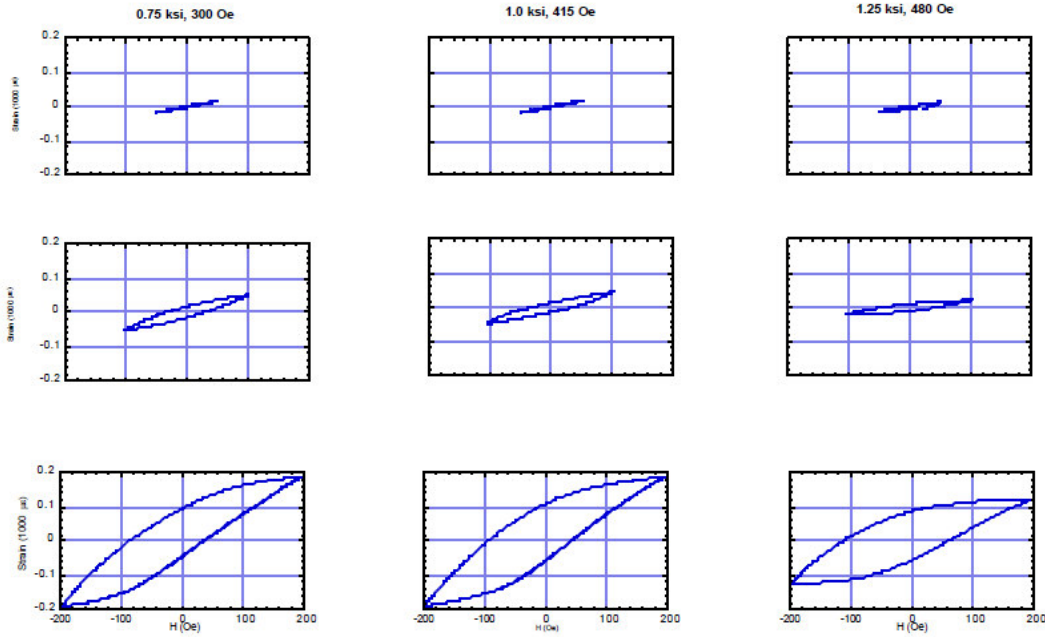
Bir dönüştürücüyü, farklı manyetik bayaslarda aynı öngerilme ile çalıştırmak farklı performanslar alınmasına yol açmaktadır. Bu durum Moffet ve arkadaşlarının daha önce öne sürdüğü hem mekanik öngerilme hem de manyetik bayas'ın "bayas koşulları" başlığı altında ayrı ayrı değerlendirilmelidir önermesiyle tutarlıdır.

#### 4.4 Bayas Koşulu ile Sürücü Seviyesinin Yarı-Durağan Etkisi

Yapılan çalışmanın ilgili kısmında manyetik bayasın verilen öngerilme değeri için çeşitlendirilmek suretiyle yarı-durağan durumda manyetik bayasın etkisi gözlemlenmeye çalışılmıştır. Farklı sürücü seviyelerindeki bayas koşullarının etkisi, 0,7 Hz'de neredeyse DC durumunda manyetik bayasa kadar seri sürücü seviyeleri için gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan ölçümleri

ile incelenmektedir. Şekil 4.4'te 0,7 Hz'de gerilmenin uygulanan manyetik alana karşılık değişen öngerilme ve AC sürücü seviyeleri için değişimi gösterilmektedir.

Şekilde 3x3 lük 9 farklı durum için değerlendirme yapılmaktadır. Yukarıdan aşağıya doğru inildikçe AC sürücü seviyelerinin arttırıldığı (sırasıyla 50 Oe, 100 Oe, 200 Oe); soldan sağa doğru gidildikçe ise öngerilme değerlerinin (sırasıyla 0,75 ksi-300 Oe, 1 ksi-415 Oe, 1,25 ksi-480 Oe) arttırıldığı anlaşılmaktadır. Her bir bayas koşulunda minör döngülerin artan AC sürücü seviyesiyle arttığı gözlemlenmektedir. Gerilim arttıkça bayas koşulundan geçen AC sürücü seviyesinin gösterdiği yarı-durağan döngünün gösterdiği nominal değerine ise azaldığı gözlemlenmektedir. Şekilde orta satır sayısal olarak ele alınırsa; 100 Oe'lik döngüde 0,75 ksi'de eğim  $0,44 \mu\epsilon/Oe$  iken 1,0 ksi'de  $0,43 \mu\epsilon/Oe$ 'ye çok düşük bir miktarda azaldığı sonucuna ulaşılmaktadır. 1,25 ksi'de ise eğimdeki değişim daha keskin bir şekilde ( $0,24 \mu\epsilon/Oe$ ) gerçekleşmektedir.



Şekil 4.4 0,7 Hz'de soldan sağa artan öngerilme değerleri ve yukarıdan aşağıya artan AC sürücü seviyeleri için gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan grafikleri. (Calkins et al., 1997).

Hem öngerilmenin hem de AC sürücü seviyelerinin değiştirilmesiyle yapılan bu çalışma, geniş sürücü seviyeli yarı-durağan (Bknz. Şekil 4.3) duruma ait çiziminin zıttıdır. İlgili durumda AC sürücü seviyesi olmadığı ve sürücü sadece DC'den ibaret olduğu için tüm öngerilme değerlerine karşılık gelen eğim aynı idi.

Bu iki durumun sonuçları göz önüne alındığında, manyetik bayaslı olsun ya da olmasın gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan testlerinden hala dönüştürücü performansını optimize edebilmek için gerekli tüm bilginin elde edilemediği kanısına varılmaktadır.

Aşağıda iki farklı frekans değeri için 0,75 ksi-300 Oe'lik tek bir bayas koşulunda farklı sürücü seviyeleri için ortaya çıkan eğim karşılaştırması listelenmiştir. Tablo 4.3 incelendiğinde her bir öngerilme seviyesi için, frekansın artması durumunda  $\mu\epsilon/Oe$  olarak ifade edilen eğimin azaldığı anlaşılmaktadır. Aynı frekans değeri, uygulanan manyetik alana göre incelendiğinde ise uygulanan manyetik alan arttıkça eğiminde doğru orantılı olarak arttığı söylenebilmektedir.

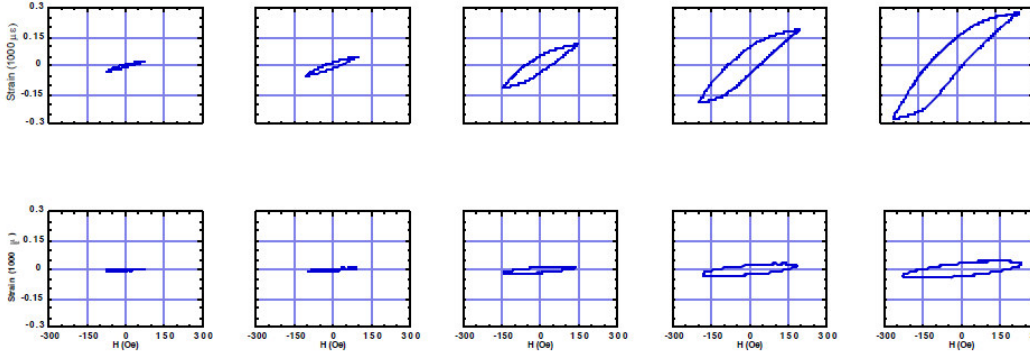
Tablo 4.3 0,7 Hz'de ve 400 Hz'de, 0,75 ksi-300 Oe'lik bayas koşulunda uygulanan alandaki nominal gerilmenin ( $\mu\epsilon/Oe$ ) karşılaştırılması. (Calkins et al., 1997).

H (Oe)	25	50	75	100	150	200	250
0.7 Hz	0.303	0.330	0.393	0.502	0.757	0.963	1.117
400 Hz	0.060	0.065	0.078	0.088	0.125	0.152	.203

#### 4.5 Dinamik ile Yarı-Durağan Performansın Karşılaştırılması

Calkins ve arkadaşları bu bölümde yarı-durağan durumdan dinamik halde çalışma durumuna çeşitlendirildiğinde bayas koşullarının (manyetik bayas ve öngerilme) etkileri incelenmiştir. 0,75 ksi'lik 300 Oe'lik bayas koşulunda test için 0,7 Hz ve rezonansın hemen altında olan 400 Hz'lik frekans seçilmiştir. İki set arasındaki karşılaştırma Şekil 4.5 üzerinden rahatça yapılabilmektedir.

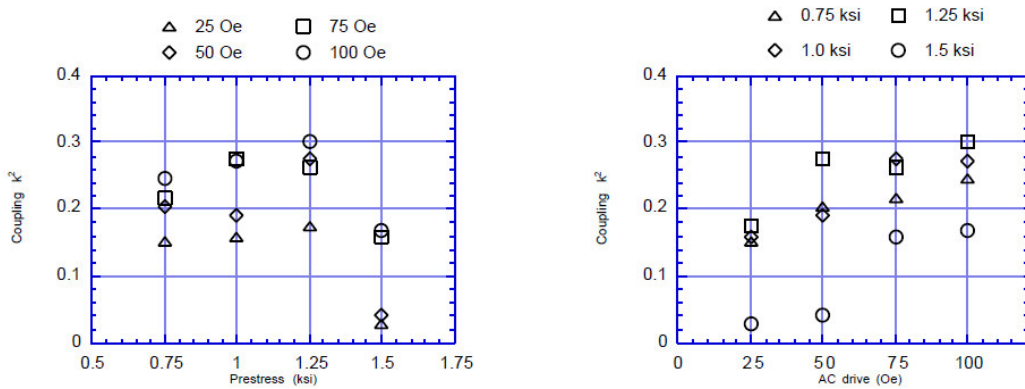
İki çalışmanın sonuçları karşılaştırıldığında hem 0,7 Hz için hem de 400 Hz için, uygulana manyetik alana karşılık gerilme testlerinde eğimin soldan sağa gidildikçe arttığı, diğer bir deyişle sürücü seviyesi arttıkça eğimin arttığı sonucuna ulaşılmaktadır. Ancak 0,7 Hz'lik set ile 400 Hz'lik set arasında eğim oranında ciddi miktarda fark bulunmaktadır. 0,7 Hz'lik sette eğim çok daha dik ve hızlı artar iken 400 Hz'lik sette eğim daha düz ve yavaş artmaktadır. Kısaca özetleyecek olursak frekans arttıkça eğimin artış hızı azalmaktadır.



Şekil 4.5 0,7 Hz (üst kısım) ve 400 Hz için (alt kısım) soldan sağa artan (75, 100, 150, 200, 250 Oe) AC sürücü seviyesi genliği için gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan grafiği. (Calkins et al., 1997).

#### 4.6 Manyetomekanik Kuplaj Faktörü

Manyetomekanik kuplaj faktörü, Terfenol-D özünün dönüştürme verimliliğinin ölçümünü ifade eder. Bir diğer anlamda depolanan mekanik enerjinin manyetik alanda depolanan enerjiye oranıdır. Şekil 4.6 (a)'da kuplajın tüm sürücü seviyeleri için öngerilme ile artan ve 1,25 ksi'de azamiye ulaşan artışı gösterilmektedir. 1,25 ksi'yi aştıktan sonra 1,5 ksi'den sonra hızlı bir şekilde düştüğü gözlenmektedir. Kuplajdaki 1,25 ksi'ye kadar olan bu artış malzemenin artan mıknatıslanma kabiliyetine öncülük eden tercihli başlangıç manyetik durumunun bir sonucudur.



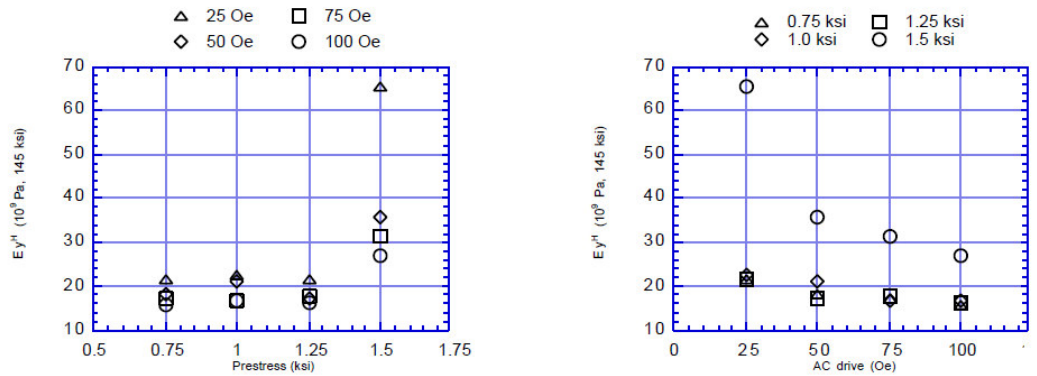
Şekil 4.6 (a) Öngerilmeye ve (b) sürücü seviyesine karşılık manyetomekanik kuplaj grafiği.

(Calkins et al., 1997).

Yarı-durağan koşuldaki kelebek figüründe, başlangıç manyetik durumundan kaynaklı performansda gelişim görülebilmektedir. Bu çıkarımı tepe noktasının 0,75 ksi'den 1,0 ksi'ye kayma durumu desteklemektedir. 1,25 ksi'nin ötesinde ise kuplajın azaldığı görülmektedir. Bu durumun sebebi olarak, mekanik öngerilmenin artmasını yenmek için ve dönüşüm için artık yeterli olmadığı söylenebilir.

#### 4.7 Young Modülüs

Young Modülüs ( $E_y^H$ ), Terfenol-D malzemesinin sağlamlığı gibi önemli bir tasarım parametresi açısından önemli bir faktördür. Sabit uygulanan manyetik alan altında yapılan ölçümlerde, Young Modülüs'ün öngerilme ile olan değişimi incelendiğinde tüm sürücü seviyeleri (0,75 ksi, 1,0 ksi ve 1,25 ksi) için 1,25 ksi'ye kadar yaklaşık 15-20 GPa (2150-2900 ksi) aralığında neredeyse sabit kaldığı gözlemlenmiştir. 1,5 ksi'den sonra ise 50, 75 ve 100 Oe'lik sürücü seviyeleri için  $E_y^H$  30 GPa (4355 ksi) mertebelerine; 25 Oe'lik sürücü seviyesi için ise yaklaşık iki katı olan 65 GPa mertebelerine yükselmiştir. Bu durumun sebebi olarak 25 Oe'lik sürücü seviyesinin öngerilmenin enerjisini yenmeye yetecek kadar enerjisinin olmamasından kaynakladığı bu yüzden de küçük bir manyetostriksiyon ile görece sağlam bir sisteme neden olduğu yorumu yapılabilmektedir. Bu durumun düşük manyetomekanik kuplaj (Bknz. Şekil 4.7) koşulu için de geçerli olduğu söylenebilmektedir.



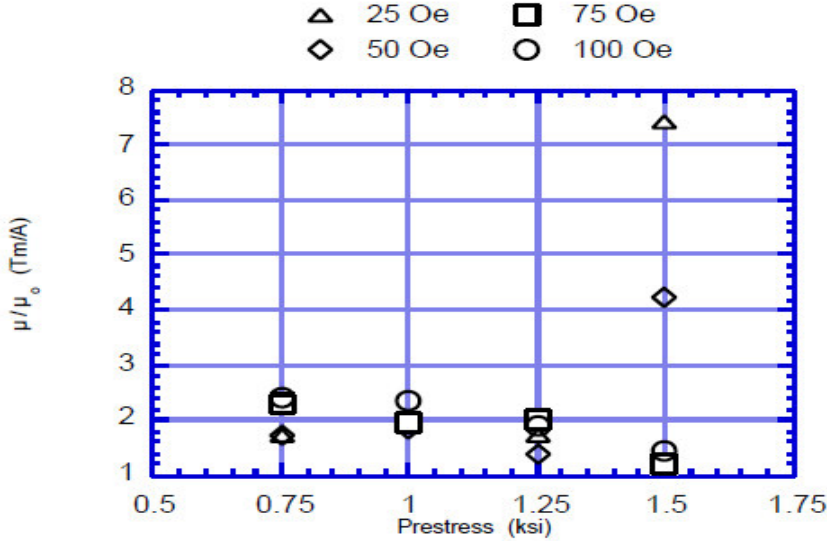
Şekil 4.7 (a) Öngerilme ve (b) sürücü seviyesine karşılık sabit manyetik alandan Young Modülüs grafiği. (Calkins et al., 1997).

AC sürücü seviyesine karşılık Young Modülüs testi değerlendirildiğinde, 0,75 ksi'lik, 1,25 ksi'lik, 1,0 ksi'lik ve 1,5 ksi'lik öngerilme değerleri için  $E_y^H$ 'ın artan sürücü seviyesi ile azaldığı gözlemlenmektedir. En belirgin düşmenin ise 1.5 ksi'lik öngerilmeye yaşandığı kolayca yorumlanabilmektedir.

#### 4.8 Geçirgenlik Faktörü

Üç parametre metodu ile ölçülen sabit gerilim altındaki geçirgenlik, Terfenol-D özü içerisinde uygulanan manyetik alana maruz kaldığında ortaya çıkan manyetik indüksiyonun (B) ölçüsüdür.

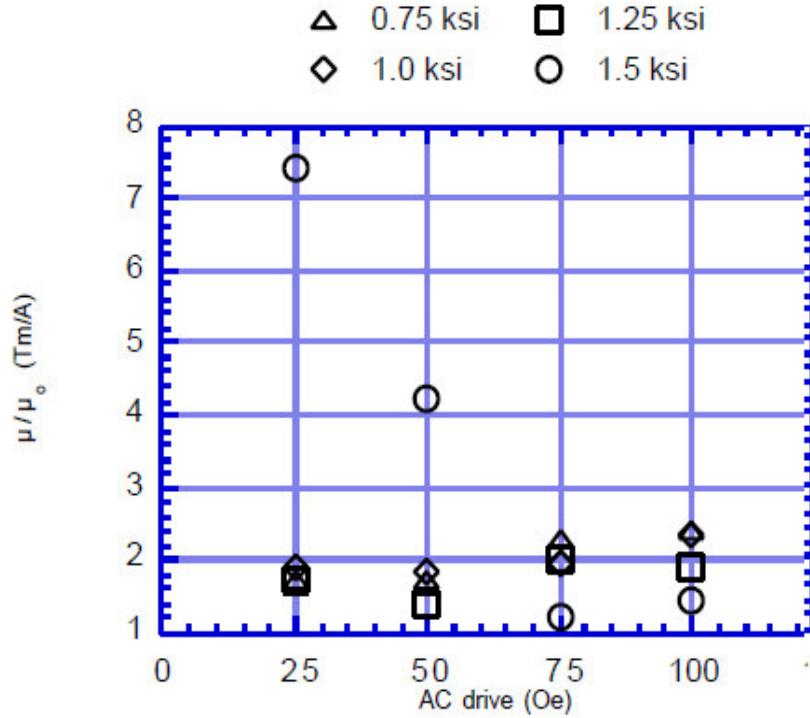
Terfenol-D Malzemesi düşük (25 Oe, 50 Oe) ve yüksek (75 Oe, 100 Oe) AC sürücü seviyelerinde artan öngerilmeye karşı farklı karakteristikler göstermektedir. Yüksek sürücü seviyelerinin tamamında beklenen ters orantıyı gösterirken düşük sürücü seviyelerinde 1,5 ksi'ye kadar düzgün olarak azalmaktadır ancak yüksek öngerilme seviyesinde ani bir sıçrama karakteristiği göstermektedir.



Şekil 4.8 Sabit gerilim altında geçirgenliğe karşılık bayaş koşulu grafiği. (Calkins et al., 1997).

Şekil 4.8’de artan öngerilme altında 25 Oe, 50 Oe, 75 Oe ve 100 Oe’lik sürücü seviyelerine karşılık geçirgenliğin değişimi gösterilmektedir. Tüm sürücü seviyeleri için 1,25 ksi’lik öngerilmeye kadar, artan öngerilme ile geçirgenliğin azaldığı kaydedilmişken 1,5 ksi’lik öngerilmede 25 Oe ve 50 Oe için aniden artış gösterdiği anlaşılmaktadır.

Bu düşük sürücü seviyelerinde gözlemlenen ani sıçramanın ana sebebi olarak önceki testlerde de karşımıza çıkan verilen düşük sürücü seviyesinde uygulanan manyetik alanın daha az mıknatıslanma üretmesi ve dolayısıyla yüksek öngerilmelere doğru gidildikçe ortaya çıkan mekanik öngerilmenin enerjisini yenmeye yetecek enerjisinin olmaması olarak açıklanabilir.



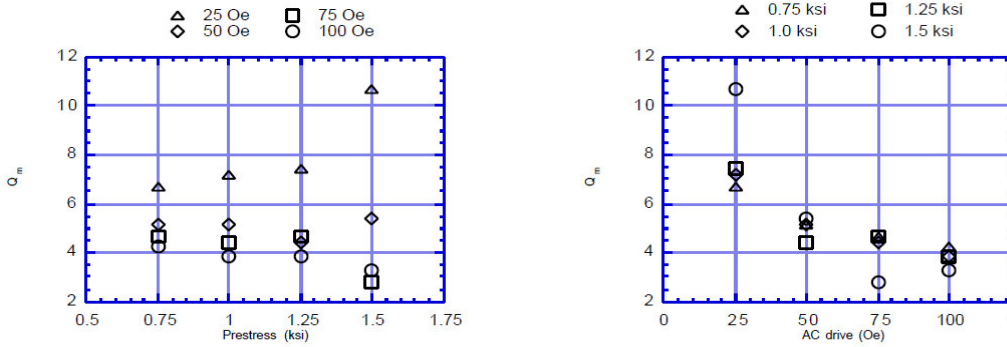
Şekil 4.9 Sabit gerilim altında geçirgenliğe karşılık sürücü seviyesi grafiği. (Calkins et al., 1997).

Şekil 4.9’de ise 1,5 ksi dışındaki üç öngerilme değeri için artan sürücü seviyelerine karşılık geçirgenlik ölçümlerinde sürücü seviyeleri arttıkça geçirgenlikte eser seviyede bir artış olduğu gözlemlenmektedir. 1,5 ksi için ise çok daha farklı bir karakteristik ortaya çıkmaktadır. 25 Oe’te azami değerine ulaşırken 75 Oe’de asgari değerine ulaşmakta daha sonra ise 100 Oe’de tekrar

artmaktadır. Bu istisnai durum için ise yüksek öngerilmenin dönüşüm işlemini domine etmesi olarak yorumu yapılabilir.

#### 4.9 Mekanik Kalite Faktörü

Kalite faktörü, salınım yapan sistemlerde salınımın verimini ifade etmek için kullanılan bir terimdir. Mekanik kalite faktörü ( $Q_m$ ) ise dönüştürücünün tüm sistem sönümlenmesinin, mekanik kayıplarla ters orantılı, ölçüsü olarak tanımlanabilmektedir. Aynı zamanda rezonans frekansında çalışma durumunda büyütme faktörü işlevi gördüğü de belirtilmektedir. Piezoseramik malzemelere kıyasla Terfenol-D dönüştürücüler düşük kalite faktörüne sahip olmalarından ötürü daha yüksek sönümlenmeye sahiptirler. Geçirgenlik testinde de görüldüğü üzere 25 Oe-1,5 ksi koşulu tüm durumlarla karşılaştırıldığında en düşük dönüşümü göstermektedir, dolayısıyla en az enerjilendirilmiş haldedir.



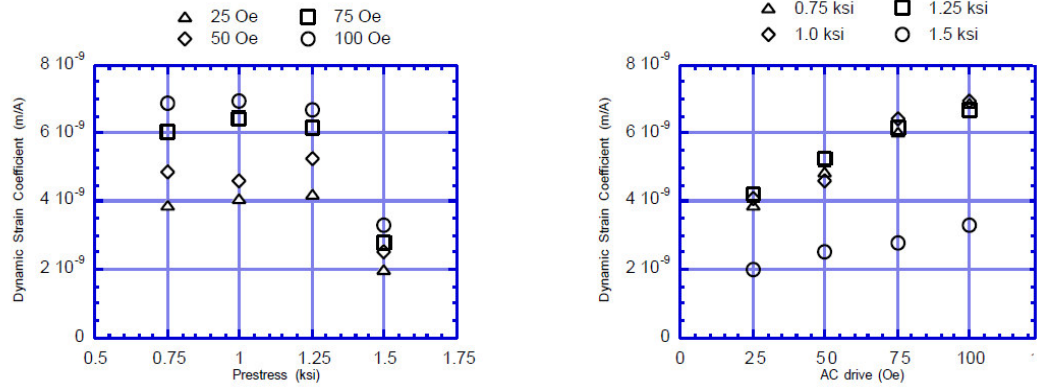
Şekil 4.10 Mekanik kalite faktörüne karşılık (a) öngerilme (b) sürücü seviyesi grafikleri. (Calkins et al., 1997).

Sürücü seviyeleri ve öngerilme arttıkça sönümlenmede eser seviyede bir artma meydana gelmektedir. Bu sebepten ötürü alan, yarı-durağan gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan döngüleri (Bknz. Şekil 4.3, 4.4, 4.5) tarafından çevrelenmiş olsa da artan öngerilme ve sürücü seviyeleriyle doğru orantılı olarak artmaktadır. Ancak dinamik olarak ölçülen  $Q_m$ , her durumda bu artan enerji kaybı eğilimini yansıtmamaktadır. Dikkat edilirse 25 Oe testleri artan öngerilme ile kayıplarda düşüş, daha yüksek  $Q_m$ , gösterdiği anlaşılabilmektedir.



#### 4.10 Dinamik Gerilme Katsayısı

Dinamik gerilme katsayısı olan  $q$  (m/A), AC manyetik alanı için üretilmiş gerilme ölçüsüdür. Harmonik işlemlerde gerilime karşılık uygulanan manyetik alan grafiğindeki anlık eğime karşılık gelmektedir. İlgili testlerde sayı olarak verilen dinamik gerilme katsayısı, yaklaşık 100 Hz'den 600 Hz'e kadar olan aralıkta uygulanan manyetik alan başına gerilmenin avarajını ifade etmektedir. Bu yüzden belirli çalışma frekansındaki gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alana oranından elde edilen eğim olarak ifade etmek pek de doğru bir tanımlama değildir. Rezonans frekansının altında testin çalışma koşulları (dönüştürücü yükü, sıcaklık v.b) için sistem parametresi olarak ifade etmek daha doğru olacaktır.



Şekil 4.11 Dinamik gerilme katsayısına karşılık (a) öngerilme (b) AC sürücü seviyesi grafikleri.

(Calkins et al., 1997).

Yukarıda yer alan şekillerden sol tarafta yer alan dinamik gerilme katsayısına karşılık öngerilme grafiklerinde genel anlamda öngerilme arttıkça farklı sürücü seviyeleri için dinamik gerilme katsayısının arttığı, 1,5 ksi'de ani bir düşüşün yaşandığı ve kuplajdaki duruma benzer şekilde 1,0 ksi-1,25 ksi aralığında tepe noktasına yaklaştığı sonucuna ulaşılmaktadır. Bu durumun sebebi yine kuplajda olduğu gibi mekanik öngerilme tarafından tanımlan ve malzemenin tercih edilen manyetik durumundan kaynaklanmaktadır.

Şekilde sağ tarafta bulunan dinamik gerilme katsayısına karşılık AC sürücü seviyesi grafiği incelendiğinde ise tüm farklı öngerilme değerleri için AC sürücü seviyesi arttıkça dinamik gerilme katsayısının da doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Ancak 1,5 ksi'lik öngerilme değeri diğer öngerilme

değerleriyle karşılaştırıldığında değişim aralığında kayda değer bir farklılık göze çarpmaktadır. İlave öngerilme dönüşümü azaltmaktadır, böylece yüke daha az giriş enerjisi iletilmektedir.  $q$ , artan sürücü seviyesiyle birlikte çok düşük oranda artmakta, dolayısıyla 0,75 ksi, 1,0 ksi ve 1,25 ksi için eğim ( $q$ 'nun  $H$  ile değişimi) neredeyse sabit kalmaktadır. 1,5 ksi testi sürücü seviyesinin  $q$  ile değişimine benzer bir artış göstermekte ancak düşük öngerilme değerlerinin yarı değerinde bu benzerliği göstermektedir.

Bu bölümde yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular, daha önce yorumlanan yarı-durağan gerilmeye karşılık uygulanan manyetik alan koşulundaki eğim analiziyle çelişmektedir. Hatırlanacağı gibi ilgili durumda 100 Oe'lik sürücü seviyesinde tüm öngerilme değerleri için eğim neredeyse sabit bulunmuştu. Bu durum dinamik ölçümlerin önemini bir kez daha gözler önüne sürmektedir.

#### 4.11 Malzeme Özellikleri ve Optimizasyon

Calkins ve arkadaşlarının Terfenol-D malzemesinin farklı koşullara altında optimizasyonu için yapmış olduğu tüm bu testler ile bazı sonuçlara ulaşmamız sağlanmıştır. Özetleyecek olursak,

- **Kuplaj ve dinamik gerilme katsayısının;** öngerilme ile arttığı ve 1,0-1,25 ksi arasında tepe noktasında yer aldığı,
- **Young Modülüs'ün;** artan öngerilme ile yavaşça arttığı (özellikle 1,25 ksi'nin ötesinde) ancak artan sürücü seviyesiyle azaldığı
- **Malzeme özelliklerinin;** özellikle 25 ve 50 Oe sürücü seviyelerinde diğer tüm kalan testlere göre mekanik kalite faktörü ve geçirgenlik açısından ayırt edici farklılıklar gösterdiği ve çok düşük sürücü seviyelerinde mekanik öngerilme enerjisini aşmada giriş enerjisinin yetersiz kaldığını,
- **Mekanik öngerilme enerjisinin aşılamadığı durumun;** çok düşük kuplaja ve dinamik gerilme katsayısına, daha yüksek Young Modülüs'e ve mekanik kalite faktörüne sebep olduğunu,
- **Manyetomekanik kuplajın;** artan sürücü seviyesiyle arttığını,
- **Dinamik gerilme katsayısının;** artan sürücü seviyesiyle arttığını,
- **Young Modülüs'ün;** artan sürücü seviyesiyle azaldığını,
- **Mekanik kalite faktörünün;** artan sürücü seviyesiyle azaldığını,

Söylenme imkanı tanımaktadır. Ayrıca Terfenol-D enerjilendirildikçe, daha hareketsiz ve daha fazla manyetostriksiyon hali görülmektedir. Böylece kuplaj,

gerilme katsayısı, uygunluk ve sönümlenme artmaktadır. Kuplaj ve dinamik gerilme katsayısı testlerinde ortaya çıkan tepe noktaları, Terfenol-D dönüştürücüsünün performansını öngerilme ile optimize etmenin mümkün olduğunu göstermektedir.

## 5 UYGULAMALARIN LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde yukarıda teorisi anlatılan FBG ve Terfenol-D'nin birlikte kullanıldığı çalışmalar incelenerek bir literatür taraması yapılmıştır. FBG'nin kullanıldığı birçok sensör uygulaması içerisinde özellikle yüksek voltaj ve yüksek akım uygulamaları seçilmiştir. Bu seçimde ilgili alanlarda yayınlanmış çok fazla çalışmanın olmaması, daha yeni ve gelişmeye açık olması rol oynamıştır.

### 5.1 FBG-Terfenol-D'nin Birlikte Kullanımı

Literatür taramasında sırasında FBG ve Terfenol-D'nin yüksek akım ve yüksek voltaj alanında birlikte kullanıldığı uygulamalar incelendiğinde çok sınırlı sayıda çalışmaya ulaşılabilmektedir. Bu çalışmalar aşağıda makale isimlerini içeren başlıklar altında sıralanmıştır. Farklı sistemler ve farklı durumlar üzerinden uygulamalar gerçekleştirildiğinden direk olarak avantaj/dezavantaj karşılaştırması yapılamamaktadır ancak uygulamaların verimliliğinden ve bu çalışmaların uygulanabilirliğinden bahsedilmiştir. Bu çalışmalarda FBG'li sistemlerde optik voltaj sensörlerinin algılamayı nasıl yaptıklarının anlatımının yanı sıra enerji nakil hatlarında (bir, iki yada üç fazlı) kısa devre olması durumunda oluşan hatanın olduğu yerin FBG sensör düzenekleri ile nasıl tespit edilebildiğinden detaylı bir şekilde bahsedilmiştir.

#### 5.1.1 Optik Voltaj Sensörlerine Genel Bakış

Voltaj dönüştürücüler, elektrik enerjisinin üretilmesinde, iletiminde ve dağıtımında anahtar elemanlardan biri olarak kabul edilmektedir. Geleneksel voltaj dönüştürücülerin yapısını tüm boş alanları yağ ile doldurulmuş bakır, seramik ve demir oluşturmaktadır. Ancak bu dönüştürücülerin ağır olması, demir özün doyuma ulaşma (iron core saturation) sorunu ve önden uyarı vermeden patlama olasılığı gibi olumsuzlukları vardır. Optik voltaj sensörler ise hafif olmaları, küçük boyutları geniş bant genişlikleri, yüksek hatasızlık oranları ve elektromanyetik endüksiyondan etkilenmemeleri sayesinde geleneksel teknolojilerin olumsuz etkilerini aşabilecek potansiyeldedir. Bu yüzden de yüksek voltaj algılama konusunda uygun alternatif olarak dikkat çekmektedir.

Optik voltaj sensörler, sıklıkla kristal malzemeler içerisinde elektro-optik etkiyi (Kerr etkisi ya da Pockel etkisi), piezokristal malzemeler içerisinde piezoelektrik etkiyi (PZT) kullanmaktadır. Diğer bir alternatif ise Fiber Bragg Izgara tabanlı voltaj sensörleridir.

1970'lerde optik Kerr etkili OVS'ler çokça incelenip çalışılmıştır. Kerr etki tabanlı OVS'lerde karmaşık bir demodulasyona ihtiyaç duyulduğu için 1990'lara doğru Pockel etkisini kullanan voltaj algılama üzerinde çalışmaya yönelinmiştir. Aynı süre zarfında ters piezoelektrik etki temelli OVS'lerde dikkat çekmeye başlamıştır. Şu an da kullanılabilir ticari OVS ürünler daha çok Pockel etkisi ve ters piezoelektrik etkisi tabanlıdır. Diğer voltaj algılama tipleri için uygun biçimlenimler ise hızla gelişmektedir.

Bu yayında voltaj algılama tekniklerini Pockels etkisi, ters piezoelektrik etki ve Fiber Bragg Izgara yapısı olarak sınıflandırılmıştır (Bi and Li, 2012).

### **5.1.1.1 Pockel Etkisi Tabanlı Optik Voltaj Sensörleri**

Pockel etkisi kullanan OVS'ler üzerinde çokça geleneksel voltaj dönüştürücülerin yerini alabilmesi adına çalışmalarda bulunulmuştur. Günümüzde yüksek voltaj trafolarında uygulama alanları bulmaktadır. Genel olarak Pockel etkisi tabanlı voltaj sensörlerin iki farklı biçimlenimi vardır: kristal yığın tipi (Michie et al., 2007) ve entegre optik dalga kılavuzu tipi (Li and Yoshino, 2002; Rahmatian and Jaeger, 1994).

- Entegre Optik Dalga Kılavuzu Tipi

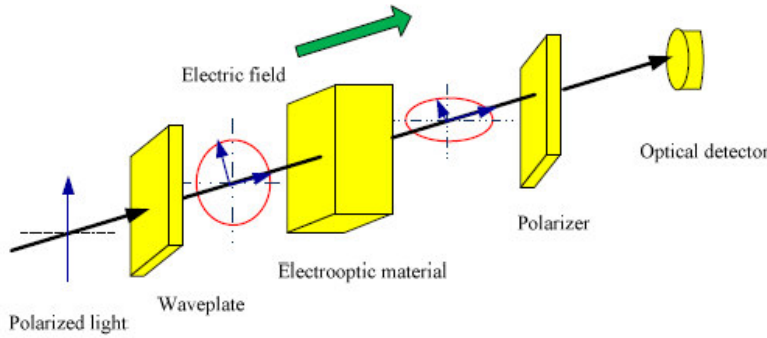
Entegre optik Pockel hücrelerinin yüksek enerji sensörleri için kullanım prensipleri Rahmatian ve Jaeger tarafından 1994'de tanıtılmıştır. Pockel hücreleri, Y kesim lityum niyobat substrat içinde üretilen şerit dalga kılavuzunu, polarizasyon koruyucu (PM- polarization maintaining) optik fiberleri, bir lazer diyodu ve optoelektronik dönüşüm birimini içerir. Lazer diyottan çıkan doğrusal olarak polarize olmuş ışık, dalga kılavuzu içinde eşlenir. Dalga kılavuzu çıkışının

polarizasyon durumu, polarizasyon elipsinin hem majör hem de minör eksenlerine paralel olan optik güçleri algılanmasıyla ölçülmektedir. PM fiberi, optik gücü optoelektronik dönüştürücü birimine iletir. Böylece sensörler bu metot ile mekanik titreşime daha az hassasiyet gösterirler.

Elektrooptik dalga kılavuzu tipli voltaj sensörlerinin basit bir biçimlenimi ve geniş frekans tepkisi gibi avantajları varken dalga kılavuzunun düşük yarı-dalga voltajından kaynaklı yüksek gerilimi ölçmeye uygun değildir.(Jaeger and Rahmation).

- Kristal Yığın Tipi Sensörler

En olgun OVS'lerden biridir. Pockel etkisi gösteren yığın tipi yapılara tipik bir örnektir. Elektrik alana paralel kristale doğru yayılan dairesel polarize olmuş ışık hızlı ve yavaş eksenlerinde bileşenleri arasında bir faz tehirine maruz kalır. Dairesel polarizasyon eliptik polarizasyona dönüşmektedir. Bu sonuç faz tehiri, elektrik alanın büyüklüğüyle doğru orantılıdır.



Şekil 5.1 Pockel tabanlı Ovs'lerin prensibi (Bi and Li, 2012).

Şekil 5.1'de doğrusal olarak kutuplanmış ışık dalgası bir çeyrek dalga plakasından geçirilerek dairesel kutuplu bir dalga elde edilmiştir. Daha sonra bu dairesel kutuplu dalga elektrooptik bir malzemeden geçirilerek faz tehiri maruz bırakılan dalga, çift kırınıma uğrayıp hızlı ve yavaş eksenlere ayrılmıştır. Dolayısıyla doğrusal olarak sisteme gönderilen dalga artık eliptik bir yapıya sahiptir. Bu eliptik kutuplu dalga bir polarizörden daha geçirilerek optik detektöre istenilen şekilde ulaştırılmaktadır.

Işık şiddeti ile modüle edilmiş sinyal, sayısal sinyal işleme yardımıyla sensör üzerindeki voltajın büyüklüğünü ve dalga formunu yeniden kurmak için yeterli bilgiyi sağlamaktadır. Yığın kristallerden yapılmış lityum niyobat gibi Pockel hücreleri, lensler ve polarize edici filtreler ile açık optik (open optic) yaklaşımlara ihtiyaç duyduğu için sıcaklık değişimine, şoka ve ek olarak kararlı olmayan bir diğer deyişle hizalanmakta zorluk yaşayan sistemlerden kaynaklı titreşimlere karşı kırılgen yapıdadır.

Le (1990a), AC yığın optik sensörün kararlılığındaki istenmeyen çift kırınım etkilerini elemine etmek için bir telafi metodu geliştirmiştir. Bir başka çalışmasında ise voltaj sensörlerinin kararlılığını geliştirmek için diğer bir metod ise kristal ısı işleme (anneal) tabi tutmaktır (1990b). Bu çalışmaların yanında sıcaklık etkisini telafi etmek için sıcaklık sensörü olarak kullanılması (Rose and Day, 1992) ve voltaj sensörünün kendisini sıcaklık hassasiyet elemanı olarak kullanılması üzerine de (Filippov et al., 2000) bazı çalışmalar yapılmıştır. İlgili çalışmalar göstermektedir ki sıcaklık faktörü doğrudan sistemin verilerini etkilediği için sıcaklık bilgisi kullanılarak voltaj sinyali optimize edilmelidir.

Yüksek voltaj trafolarında algılama sistemlerinde Pockel Tabanlı Ovs'lerin ticari birkaç uygulama örneklerinden çeşitli çalışmalarda faydalanılmıştır (Rahmatian and Chavez., 2003; Bohnert et al., 2003) ancak bu uygulamalarda hatasızlığı devamlı kılmak, yüksek sıcaklık değişimleri ve aşırı alan bozundurmaları (extreme field perturbations) gibi çeşitli zorlu çevre şartları altında uzun süreli kararlılığı sağlayabilme ve bu tip dönüştürücülerin maliyetinin yüksek olması gibi bazı problemlerle karşılaşmıştır.

### **5.1.1.2 Ters Piezoelektrik Etki Kullanan Voltaj Sensörleri**

Bu tip voltaj sensörlerinde fiber, piezoelektrik bir malzemeye bağlanmaktadır. Piezoelektrik malzemenin voltajla indüklenmiş bozunumu polarimetrik (Bohnert et al., 2010) ya da interferometrik (Fabiny,1993) bir sistemle algılanmaktadır.

En çok var olan voltaj algılama sistemleri, ışık şiddeti tespit sistemi tabanlı fiber Mach-Zehnder interferometresini kullanır. Ancak bu tarz sistemlerde ışık güç dalgalanması ve ışık kaynağındaki dalga boyu sürüklenmesi gibi olaylar ölçüm hatalarına sebep olabilmektedir. Bu gibi olumsuz etkileri gidermek için Leon ve arkadaşları (2003) bazı metotlar önermişlerdir.

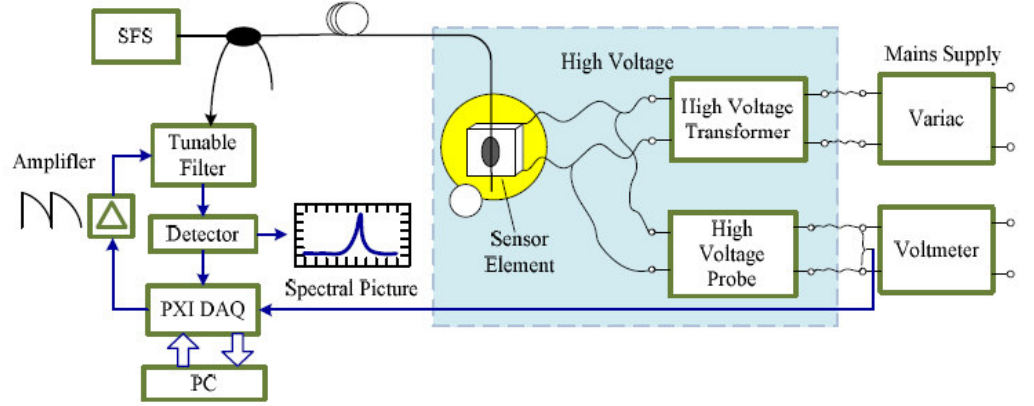
Pockel tabanlı Ovs'lerin çalışma prensibine bakıldığında ölçülen ışık frekansı uygulanan voltajla kodlandığı görülmektedir. Bu tip sensörlerin faz sürüklenme telafisine ihtiyaç olmaması ve minimum polarizasyon kontrolü gibi avantajlarının yanı sıra frekans özelliklerinin uygulanan voltajın genliğine bağlı olmasından ötürü uygulanan voltaj fazını elde etmede karşılaşılan zorluk gibi dezavantajlara sahiptir.

### **5.1.1.3 FBG Yardımı ile Voltaj Algılama**

Elektro-optik etki veya ters piezoelektrik etki kullanan polimetrik sensörler sinyal şiddeti dalgalanmasına karşı hassas ve korunmasızdır. FBG sensörler ise frekans kodlu olduğu için bu problemin üstesinden gelebilmektedirler. Daha yakın süreçte ise FBG'lerin PZT'lere bağlanmak sureti ile elektrik alanın ölçülmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. (Fusiek et al., 2008; Kahraman and Coskun, 2009).

FBG sensörler polimetrik sensörlerle karşılaştırıldığında, polimetrik sensörlerin aksine küçük boyutları, optik sinyal şiddeti modülasyonundan etkilenmemesi ve daha büyük çoğullama kapasitesi ile birlikte voltaj ölçümü için çekici bir alternatif temeli oluşturmaktadırlar. Şekil 5.2'de gösterildiği gibi çoklu katman piezoelektrik yığın içeren voltaj sensörü, voltajdan gerilmeye dönüştürücü gibi davranır ve FBG burada voltajla indüklenmiş gerilme değişimlerini yığın ile Bragg yansıma dalga boyu kaymasının içine kodlamak amacı ile kullanılmaktadır. (Niewczas et al., 2005)





Şekil: 5.2 OVS'in şematik biçimlenimi (Bi and Li, 2012)

Bragg yansıması gerilme ve sıcaklığa karşı hassas olduğu için dalga boyu kayması eşitlik (5.1) şeklinde ifade edilebilmektedir. Ancak Bragg yer değiştirmesi hem gerilimin hem de sıcaklığın fonksiyonu olduğu için sıcaklık değişimi sensör cevabını etkilemektedir ve bu etkileşimden istenmeyen sürüklenme ortaya çıkmaktadır. Sıcaklık sonucu ortaya çıkan bu istenmeyen etkiyi telafi edebilmek adına halen birçok çalışma yapılmaktadır.

$$\Delta\lambda_B = [(1-\rho_e)\epsilon_z + (\alpha+\eta)\Delta T] \lambda_B \quad (5.1)$$

Eşitlik (5.1)'de  $\lambda_B$  Bragg yansıma dalga boyunu,  $\epsilon_z$  boylamsal gerilmeyi,  $\Delta T$  sıcaklık değişimini,  $\rho_e$  fotoelastik katsayıyı,  $\alpha$  termal genişleme katsayısını,  $\eta$  ise termooptik katsayıyı ifade etmektedir. FBG'den geri yansıyan spektral sinyaller yüksek hızlı tarayıcılı bir Fabry-Perot ayarlanabilir filtre ile analiz edilmektedir.

Tüm fiber sistemlerde olduğu gibi FBG tabanlı OVS'ler de çok hızlı yayılan bir şekilde araştırma konularına dahil olmaktadır. Örneğin elektrikli denizaltı pompalarını uzaktan görüntüleyen bir hibrit voltaj ve akım sensörü ile yapılan çalışmada (Niewczas et al., 2006) yüzüncü harmoniğe kadar (5 kHz) ve 5kV ortalama karaköke kadar algılama yapabilmek için başarılı bir şekilde kullanılabilmiştir. (Riberio and Werneck, 2011).

Şimdiye kadar yapılan çalışmalardan hem Pockel hem de ters piezoelektrik OVS sistemlerin sıcaklık ve gerilim altında kararlı olmadığı ve bu gibi şartlar

altında ortaya çıkan istenmeyen etkileri elemine edebilmek için karmaşık telefi yöntemlerine ihtiyaç duyulduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu tip voltaj sensörlerinde uzun vadeli güvenilirliği ve kararlılığı geliştirmek optik voltaj dönüştürücüleri adına çetrefilli bir konudur. Klasik OVS ürünlerin ise hala çok pahalı bir çözüm olduğu aşıkardır. FBG'ler ise diğer sensör tipleri ile karşılaştırıldığında sunduğu avantajları ile ticari bir ürün olarak gün geçtikçe pazarda kendine daha çok yer bulacağı rahatlıkla ifade edilebilmektedir.

### **5.1.2 Radyal Enerji Sistemlerinde Hata Algılayabilen Yeni Tipte FBG Sensör**

Enerji nakil hatlarında akımdan kaynaklı manyetik alan oluşmaktadır ve oluşan bu manyetik alan gerilme anlamında manyetostriktif malzemelerde FBG tarafından tespit edilebilir değişikliğe sebep olmaktadır. Gerilmede oluşan değişiklik FBG'den geri yansıyan sinyalin değişmesine sebep olmaktadır. Sorgu sistemleri ise ilgili sinyali algılayıp Bragg dalga boyu kaymasını hesaplama amacıyla kullanılmaktadır.

Enerji nakil hatlarında kullanılan geleneksel akım ve voltaj dönüştürücülerinin yalıtkan ve demir ile doldurulan demir tabanlar kullanması bu sistemleri hacimli ve ağır kılmaktadır. Yeşil enerjinin ve küçük yenilenebilir sistemlerinin revaçta olmasıyla günümüzde elektrik santrallerinin uzaktan izlenebilmesi daha popüler olmasına neden olmaktadır.

Daha önce Dziuda ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada piezoelektrik yığınlı (stack) FBG sensör sistemi simüle edilip uygulandığında bu düzeneğin AC enerji nakil hatlarında kullanılabileceğini göstermişlerdir. Moghadas ve arkadaşlarının 2010 da yaptıkları bu yayında ise herhangi bir piezoelektrik yığın ihtiyacı olmadan düzeneğin optik akım sensörüne uygulanabilirliğini anlatmışlardır.

#### **5.1.2.1 Kavramın Geliştirilmesi**

Önerilen fiber optik akım sensörleri (OCS), epoksi (yapıştırıcı) aracılığı ile bağlanmış FBG ve büyük manyetostriktif malzemedden (Terfenol-D) oluşmaktadır.

Sistemin ölçüm aralığı değişken olmakla birlikte çalışma noktası manyetostriktif malzemeye uygulanan mekanik öngerilme ve DC bayaslama ile değişebilmektedir. Moghadas ve arkadaşlarının önerdiği bu düzenek, akım dönüştürücüye (CT) ya da voltaj dönüştürücüye (PT) bayaslama için ihtiyaç duymamaktadır. Hızlı tepkisinden ( $< 0,1$  ms) ve manyetik alanda hatırı sayılır miktarda gerilme üretme özelliğinden ötürü dönüştürücü olarak Terfenol-D seçilmiştir. Düzenekte ise tekil modlu fiber ve optik kuplör boyunca FBG'yi aydınlatmak için geniş bant bir süper floresan kullanılmaktadır. Gerilmedeki ve sıcaklıktaki küçük değişim, yansıyan FBG dalga boyu üzerinde dalga boyu kaymasına sebep olmaktadır ve bu değişim ve yarattığı etki Eşitlik (5.2) ile ifade edilmektedir.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k * \varepsilon + \alpha_{nTemp} * \Delta T \quad (5.2)$$

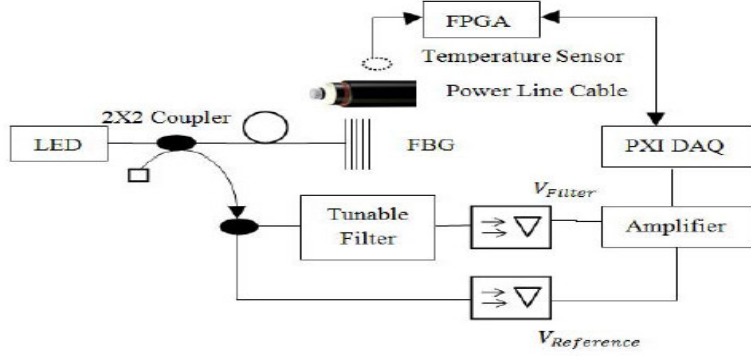
Eşitlikte  $\Delta\lambda$  dalga boyu kaymasını,  $\lambda_0$  nominal sıcaklıktaki ve gerilmedeki baz dalga boyunu,  $\Delta T$  sıcaklık değişimini,  $k$  gage faktörünü (elektriksel dirençteki kısmi değişimin uzunluktaki kısmı değişime oranı,  $k=0.78$ ),  $\alpha_{nTemp}$  kırılma indisinin sıcaklıkla olan değişimini ( $\alpha_{nTemp} = \left(\frac{\delta n}{n}\right)\delta T$ ) ve  $\varepsilon$  ise gerilmeyi ifade etmektedir.

Genellikle FBG'lerdeki sıcaklık telafisi için kullanılan yöntem, biri sıcaklığa bağımlı diğeri ise bağımsız iki FBG kullanmak ve ikisi arasındaki etki farkını okumak olarak uygulanmaktadır. Bu deneyde sıcaklık telafisi için özel bir yapılanma kullanılmaktadır. Sadece bir adet FBG kullanılıp FBG'deki sıcaklık FPGA ile telafi edilmektedir.

Tüm sensörler akımı ölçtükleri faza olabildiğince yakın olmalı ancak aynı zamanda diğeri fazlar sensör üzerinde etkiye sahip olduğundan ötürü ilgili fazlarla etkileşime girmeyecek kadar uzak olmalıdır. Ortaya çıkıp sistemi etkileyebilecek bu gürültüler hesaplamalar yapılırken göz önünde bulundurulmalıdır.

Sensörler, sonsuz uzunluktaki düz bir teldeki manyetik indüksiyon prensibini kullanmaktadır. Sonsuz uzunluktaki düz bir teldeki manyetik alan bilindiği üzere Eşitlik (5.3)'teki gibi ifade edilmektedir.

$$H = \frac{I}{2\pi d} \quad (5.3)$$



Şekil 5.3 Sistemin deneysel düzeni (Moghadas et al.,2010)

Simülasyonda tasarlanan sistemi 25°C’de, 12,36 mm yarıçaplı enerji hattı kablosunda 900 A’lık akım için optimize etmişlerdir. Sistem LED’den yayılan geniş bant ışık sistemi tarafından aydınlatılmaktadır ve bir sıcaklık sensörü sıcaklık etkilerini telafi etmek için kullanılmaktadır.

Düzenekte her bir bitime iki adet optik akım sensörü kurulmaktadır.  $V_{reference}$  ve  $V_{filter}$  sırasıyla primer ve sekonder fotodiyotun çıkışı olarak belirtilmiştir. Diğer bir yoldan yansıyan ışık doğrudan başka bir fotodiyota  $V_{reference}$  çıkışı ile yollanmaktadır. Daha önceden yapılan bir çalışmada  $V_{filter} / V_{reference}$ ’in doğrudan fiber Bragg dalga boyu kayması ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir (Melle et al., 1992). Eşitlikte, K ayarlı filtrenin ya da eğimin köşesini,  $\lambda_0$  sıfır geçirgenlikli uç filtrenin dalga boyunu,  $\lambda_B$  ızgaranın tepe dalga boyunu  $\Delta\lambda$  ise Bragg yansıma spektrumunun özel genişliğini ifade etmektedir. Bu metodun seçilme sebebi kurulumunun basitliği ve Bragg dalga boyu kaymasını hızlı tepki zamanı ile ölçebilmesinden ötürü olduğu belirtilmiştir.

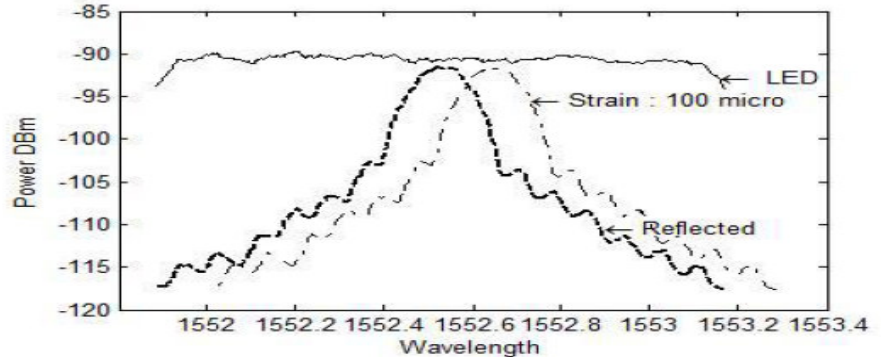
$$\frac{V_{filter}}{V_{reference}} = K(\lambda_B - \lambda_0 + \frac{4\lambda}{\sqrt{\pi}}) \quad (5.4)$$

### 5.1.2.2 Simülasyon Sonuçları

Basitlik açısından, tüm yükler için delta bağlantı varsayımı ile basit radyal sistemi incelenmiştir. Bu metot farklı kablo ölçüleri, kablo biçimlenimleri ve kutup yapıları için kullanılabilir. Deneysel çalışma sırasında yatay biçimlenim kullanılıp sensörleri her bir fazdan 3 cm uzak olacak şekilde konumlandırmışlardır.

Sonuçlar incelendiğinde manyetik alanın, sensör kablodan uzaklaştırıldıkça keskin bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Her ne kadar diğer fazlardan uzak konumlandırılrsa dahi bu fazlardan kaynaklı ortaya çıkan manyetik alanın etkisi görülebilir ancak bu etki ihmal edilebilecek kadar zayıftır. Ancak dikkat edilmesi gereken nokta akım ölçümü sırasında daha doğru ölçüm için sensörler olabildiğince fazlara yakın konumlandırılmalıdır.

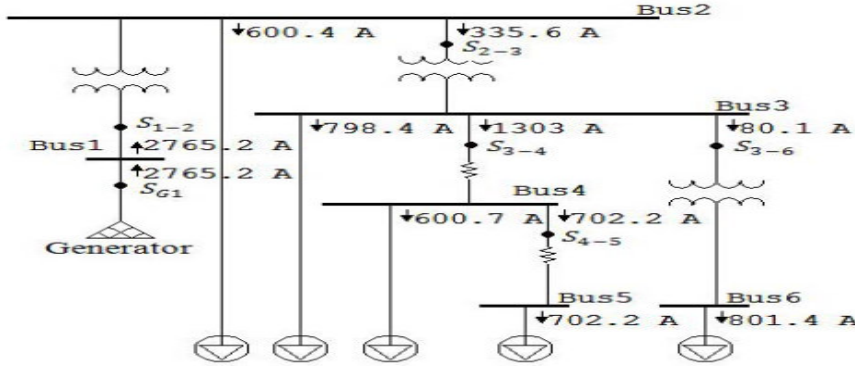
Sistemde tüm sensörler aşağı akış (downstream) hattında koruma rölesine yakın kurulmuştur. Sistemde hatadan kaynaklı akımda artış olduğu durumda kablo etrafında manyetik alanda artış olduğu görülmektedir.



Şekil 5.4 FBG'deki gerilmeden kaynaklı dalga boyu kayması grafiği. (Moghadas et al.,2010)

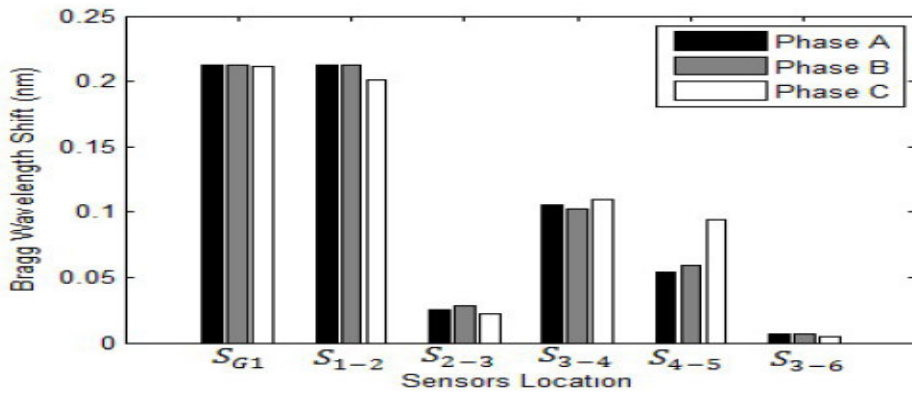
Gerilmeden kaynaklı FBG'deki dalga boyu kayma grafiği Şekil 5.4'de gösterilmektedir. Grafikte koyu çizgi LED'den yayılan geniş bant sinyali kesikli çizgiler ise normal yük koşulunda sensörden yansıyan FBG sinyalini, noktalı çizgiler sistemde hata olduğunda her bir sensörden yansıyan dalga boyu sinyalini

göstermektedir. Sistemde kısa devre olduğunda, hatalı veri yolunun Bragg dalga boyu, keskin akım değişimi nedeniyle kaydığı açık bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 5.5 Sensör konumları ile radyal sistemin tek hat diyagramı ve normal çalışma durumundaki akımları (Moghadas et al.,2010)

Simüle edilmiş enerji nakil hattının gösterildiği Şekil 5.5'de 6 tane veri yolu mevcuttur. Her bir hatta 3 sensör uygulanıp kullanılmakta olan tüm ekipmanlar topraklanmaktadır. Başka bir deyişle her bir faz için 1 adet sensör kullanılmıştır. Şekilde küçük siyah noktalar optik sensörleri sembolize etmektedir. Tüm sinyaller Matlab. aracılığıyla işlenmiştir. Şekil 5.6'da ise sistemin normal çalışma durumunda her bir sensör için tüm yansıyan Bragg dalga boyu kaymaları gösterilmektedir. Sütun grafiğinden de açıkça görülebildiği gibi optik fiberin çoğullanabilirlik özelliği sayesinde birçok optik akım sensörü tek bir fiber optik tel üzerinde kullanılabilmiştir.

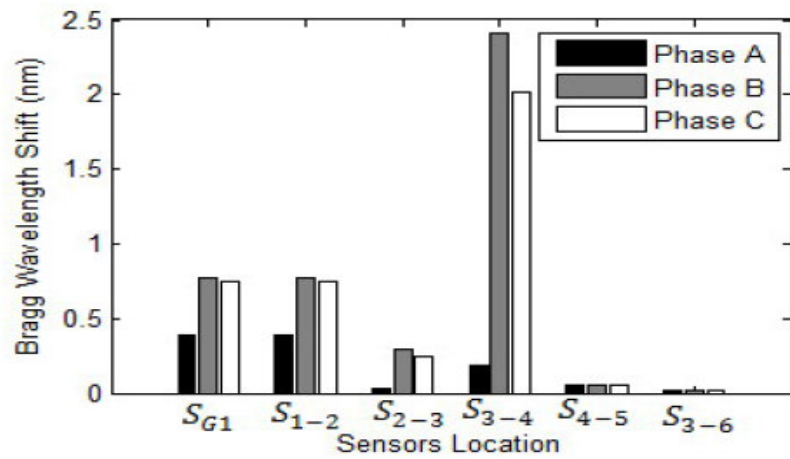


Şekil 5.6 Sistemin normal çalışma durumunda her bir sensör konumu için Bragg dalga boyu kayması sütun grafiği. (Moghadas et al.,2010).

Sistemde  $S_{1-2}, S_{2-3}, S_{3-4}, S_{4-5}, S_{G1}, S_{3-6}$  sensörlerindeki dalga boyu kaymaları devamlı olarak trafolarında izlenmiş ve Şekil 5.6'daki gibi sütun grafikleri ile ifade edilmiştir. Grafikler incelendiğinde en yüksek dalga boyu kaymasının  $S_{4-5}$  ve  $S_{3-4}$  sensörlerinde olduğu görülmekte bu durumdan da hatanın bu sensörlere yakın olduğu ya da bu sensörler arasında olduğu tahmini yapılabilmektedir. Kontrol odasında bulunan sorgu sistemi, hangi kesicinin tetiklenmesi gerektiğine karar vermek adına FBG sensörlerden yansıyan sinyallerin tamamını işlemek üzere almaktadır.

- 4 No'lu Veri Yolunda DLG Hata Simülasyon Sonuçları

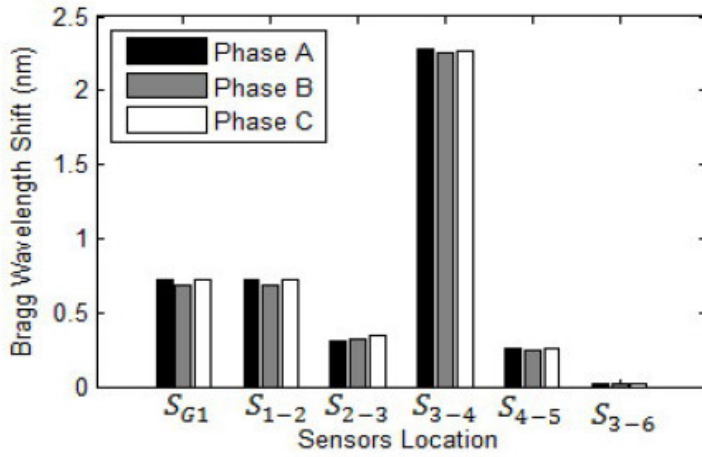
Şekil 5.7'de 4 No'lu veri yolu üzerinde B ve C fazları arasında oluşan iki fazlı sistemde hata sonrası sistemdeki akımı göstermektedir. Kurulan Düzenekte her fazın kendine özgü sensörü olduğu bilinmektedir. Sütun grafikleri incelendiğinde B ve C fazları arasındaki dalga boyu kaymasının  $S_{3-4}$ 'te en büyük olduğu anlaşılabilmektedir. Buna karşın sistemin normal çalışmasına kıyasla A fazındaki dalga boyu kaymasında çok küçük bir fark vardır. Ancak faz B ve C'de ise büyük bir kayma olması DLG hatasının veri yolu 4'te olduğu konusunda ipucu vermektedir. Eğer veri yolu 4'ten tüm giriş besleyicilerinin hem A hem B fazında akımda artış olması durumunda ise hatanın veri yolu 4'te olduğu kesinlik kazanmaktadır.



Şekil 5.7 İki fazlı sistemde 4 No'lu veri yolunda kısa devre durumunda herbir sensör konumu için Bragg dalga boyu kayması. (Moghadas et al., 2010)

- 4 No'lu Veri Yolunda 3 Fazlı Sistemde Hata Simülasyon Sonuçları

3 fazlı sistem simülasyonunda 4 No'lu veri yolundaki  $S_{1-2}, S_{2-3}, S_{3-4}, S_{4-5}, S_{G1}, S_{3-6}$  gibi tüm sensörlerin büyüklükleri sürekli olarak araştırmacılar tarafından trafoda izlenip elde edilen hataya ait bulgular Şekil 5.8 sütun grafikleri ile ifade edilmiştir. Hatanın veri yolu 4'te olduğu bilindiği için, tüm sensörler akımı bu veri yoluna ileten besleyici içerisinde kurularak akımdaki artışın algılanabilmesini amaçlamışlardır. Grafikler incelendiğinde geniş Bragg dalga boyu kayması görülebilmektedir.



Şekil 5.8 Üç fazlı sistemde 4 No'lu veri yolunda kısa devre durumunda her bir sensör konumu için Bragg dalga boyu kayması. (Moghadas et al., 2010)

$S_{2-3}, S_{3-4}$  ve  $S_{3-6}$  sensörlerindeki dalga boyu kayması aranan hatanın bu sensörlere yakın olduğu konusunda ipucu vermektedir. Sistemin radyal olması ve en yüksek dalga boyu kaymasının  $S_{3-4}$  sensöründe olması hata noktasına en yakın sensörün bu sensör olduğunu ifade etmektedir.

Yapılan bu çalışma özetlenecek olunursa Moghadas ve arkadaşları enerji sistemlerinde hata tespiti yapabilen fiber Bragg ızgara sensör sistemi üzerinde çalışmışlardır. Bu yeni önerilen FBG akım sensörü hafif, elektromanyetik girişimden etkilenmeyen, kurulumu kolay, çok daha ucuz ve yüksek hassasiyetli dolayısıyla enerji sistemleri için çok iyi bir aday olduğu söylenebilmektedir. Sıcaklık telafili manyetostriktif kılıfla sarılmış bu yeni FBG sensörünü radyal



enerji sisteminde simüle edip sistemdeki kısa devreden kaynaklı manyetostriktif kılıftaki gerilmenin FBG'den geri yansıyan sinyallerde dalga boyu kaymasına sebep olduğunu göstermişlerdir. Aynı zamanda bu FBG'deki gerilmeden kaynaklı dalga boyu kaymasını trafo merkezinde sürekli olarak izleyerek tespitini yapmışlar, dalga boyu kaymasına denk gelen sensörlere en yakın bölgelerden sistemdeki hatanın olduğu yerler hakkında tutarlı tahminler yürütebilmişlerdir. Daha sonra radyal sistem içerisinde SLG, DLG ve 3 fazlı sistemlerde de gerilmeden kaynaklı dalga boyu kaymaları sürekli olarak izlenip tüm olası hata durumlarını incelemişlerdir.

Yapılan bu çalışma sonucunda, radyal sistemde faz tipinden ve konumundan bağımsız olarak başarılı bir şekilde FBG sensör tasarımıyla sistem aracılığıyla geri yansıyan dalga boyu spektrumunu analiz ederek hata olarak değerlendirilen kısa devrenin olduğu bölgeyi ya da hataya en yakın bölgeyi doğru bir şekilde tespit edebilmeyi başarmışlardır.

### **5.1.3 Yüksek Voltaj Dönüştürücülerinde Hata Algılama İçin Uygulanabilir Yeni Fiber Bragg Izgara Sensörü**

Bu çalışmada Moghadas ve Shadaram enerji sistemlerindeki hatayı algılayabilmek için Bragg dalga boyu kayması kullanmaktadırlar. Dönüştürücünün içerisinde hata akımlarının oluşturduğu manyetik alan manyetostriktif malzemelerde bir gerilime sebep olmaktadır ve bu durum ise FBG tarafından ortaya çıkartılmaktadır. FBG sorgulama sisteminin görevi, yansıyan FBG sinyalini algılayıp Bragg dalga boyu kaymasını hesaplamaktır. Daha sonra elde edilen sinyaller işlenip anlamlı cevaplar elde edilmektedir. Hem ilk hem de ikinci dönüştürücüdeki hata FBG'de farkedilebilir bir dalga boyu kaymasına sebep olmaktadır.

Diferansiyel koruma, kapsamlı olarak trafoların korunmasında, geniş motorlarda ve iletim hatlarında kullanılmaktadır. Bu koruma metodunda akımın boyutu ve yönü önemli faktörlerdir ve vektör olarak gösterilmektedirler. Akım koruma röleleri, akım dönüştürücü (CT) ayarında çok dikkatli bir seçime ihtiyaç duyar ve bu tarz koruma rölelerinde her zaman tam sarım çoklu oran CT'ler kullanıldığında kullanılmalıdır.

CT'ler diferansiyel koruma şemasının en kaçınılmaz parçasıdır. Enerji hatlarındaki geleneksel CT'ler ve voltaj dönüştürücüler (PT) demir tabanlıdır. Bu yüzden hacimli ve ağırdırlar. Fiber optik akım sensörleri (OCS) ise hafif, daha ucuz, küçük ve elektromanyetik endüksiyondan etkilenmeyen (EMI) yapıdadırlar.

İlgili çalışmada yüksek voltaj trafolarının korunmasında, piezoelektrik yığın olmadan daha az karmaşaya sahip ve daha hızlı tepki gösteren, yüksek voltaj dönüştürücülerinde kullanılan geleneksel diferansiyel koruma yöntemlerine kıyasla kısmen ucuz bir sensör önerilmiştir.

### 5.1.3.1 Kavramın Geliştirilmesi

Bir önceki çalışmada yapılabenzer şekilde sistem birbirine epoksi ile bağlanmış çok büyük bir manyetostriktif bir malzemeye (Terfenol-D) sıkıca bağlı olan hem FBG gerilme hem de sıcaklık sensörü içermektedir. Hem manyetostriktif malzeme üzerine mekanik öngerilme uygulayarak hem de bobinin sarım sayısını değiştirerek sensörün bayaslama noktası ayarlanabilmektedir. Bu sensör herhangi bir CT'ye ya da PT'ye ihtiyaç duymaması yüksek voltaj sistemlerine bu sistemi kurmayı daha az maliyetli bir hale getirmektedir.

Bu sistemde Moghadas ve Shadram, bir önceki çalışmayla benzer sebepten ötürü dönüştürücü olarak Terfenol-D seçmektedirler ve yine tekil modlu fiberi ve optik kuplörleri aydınlatmak için geniş bant kaynak kullanılmaktadır. Gerilmedeki ve sıcaklıktaki küçük değişim, yansıyan FBG dalga boyu üzerinde dalga boyu kaymasına sebep olmaktadır ve bu değişim ve yarattığı etki ise bu kez aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda \cdot 10^6}{F_G - \varepsilon_{T0}} \quad (5.5)$$

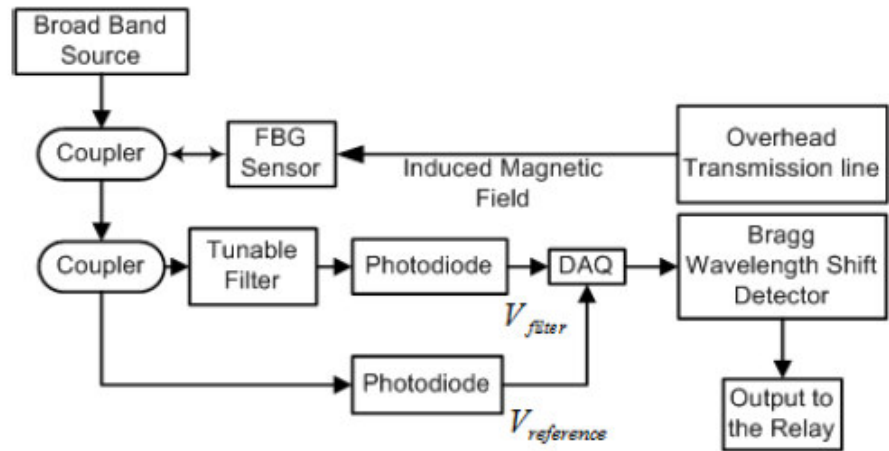
$$\varepsilon_{T0} = \Delta T \left[ \frac{C_1}{F_G} + CTE_s - C_2 \right] \quad (5.6)$$

İlgili Eşitliklerde  $\Delta\lambda$  dalga boyu kaymasını,  $\lambda_0$  nominal sıcaklıktaki ve gerilmedeki baz dalga boyunu,  $\Delta T$  sıcaklık değişimini,  $F_g$  ise 22 °C'de normal

olarak 0,796 olan gage faktörünü (gage: elektriksel dirençteki kısmi değişimin uzunluktaki kısmi değişime oranı) ifade etmektedir.  $\epsilon_{T_0}$  ise  $\mu\text{m}/\text{m } ^\circ\text{C}$  cinsinden termal olarak indüklenmiş görünen gerilmeyi belirlemektedir.  $C_1$  ilk gage sabitini ( $22^\circ\text{C}$ 'de  $6,156 \mu\text{m}/\text{m } ^\circ\text{C}$ ) ,  $C_2$  ikinci gage sabitini ( $22^\circ\text{C}$ 'de  $0,7 \mu\text{m}/\text{m } ^\circ\text{C}$ ) ifade ederken,  $\epsilon$  gerilmeyi ifade etmektedir. Test örneğindeki CTEs'in değeri ise  $0,59 \mu\text{m}/\text{m } ^\circ\text{C}$  olarak verilmektedir. Merkez dalga boyunun ( $\lambda_0$ )  $1528,0 \text{ nm}$  ,  $\Delta\lambda$ 'nin  $1,17 \text{ pm}/(\mu\epsilon)$  ve sensör için dalga boyu kaymasının  $\Delta\lambda = 13,48 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  olduğu farz edilmiş.

Bu çalışmada  $-40^\circ\text{C}$  ile  $120^\circ\text{C}$  arasında çalışma aralığı olan ayrı FBG sıcaklık sensörleri, sıcaklığın ve telafi sıcaklığın etkilerini ölçmek için kullanılmıştır. Primer ve sekonder dönüştürücülerin her bir fazında, bir sensör kurulup ve diğer tüm sensörler kendi iletkenlerine sahip olacak kadar yakın konumlandırılmaktadır çünkü ölçümler sırasında diğer iletkenlerden mümkün olduğunca uzakta yer alıp etkileşime girmemesi gerekmektedir. Ek olarak dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta dönüştürücülerin her bir fazının faz farkı sürekli olarak karşılaştırılmalıdır çünkü bazı hatalar sadece sistemde faz değişimi olarak ortaya çıkmaktadır.

Deneysel düzenek Şekil 5.9'da gösterilmektedir. Bu düzenek daha önce yapılan çalışmadaki düzenekle benzerlikler göstermektedir. Yine her bir bitime iki adet optik akım sensörü kurulup  $V_{\text{reference}}$  ve  $V_{\text{filter}}$  sırasıyla primer ve sekonder fotodiyotun çıkışı olarak belirtilmiştir.



Şekil 5.9 Deneysel düzenek.(Moghadas and Shadaram, 2010).

$V_{\text{filter}} / V_{\text{reference}}$ 'in doğrudan fiber Bragg dalga boyu kayması ile ilişkili olduğu bir önceki çalışmada ifade edilmiştir (Bknz. Eşitlik 5.4). Bu metodun seçilme sebebi kurulumunun basitliği ve Bragg dalga boyu kaymasını hızlı tepki zamanı ile ölçebilmesinden ötürü olduğu belirtilmiştir.

### **5.1.3.2 Simülasyon Sonuçları**

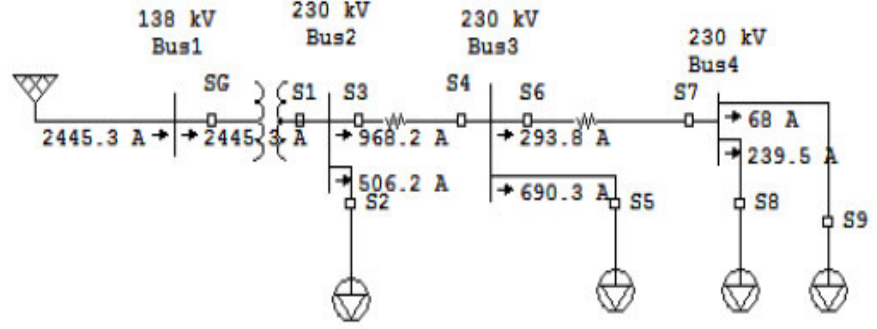
Bir elektrik geçici analizör programı (Etap) kullanılan tipik bir yüksek voltaj sisteminde, tüm yükler ve “delta-wye, delta-delta, wye-delta ve wye-wye” bağlantı tiplerini de içeren tüm farklı tipteki dönüştürücü bağlantıları için delta bağlantı varsayımı ile simüle edilmiştir. Sensörün DC besleme noktasını değiştirerek bu metod farklı kutup yapıları farklı kablo ölçütleri ve kablo biçimlenimleri için uygulanabilmektedir.

Deney düzeneğinde yatay biçimlenim kullanılmaktadır ve sensörlerin her biri ilgili fazdan 3 cm uzağa yerleştirilmiştir. Böylece diğer fazların etkisini göz ardı etmek mümkün olmaktadır. Farklı tipteki dönüştürücü sekonderde farklı faz kaymalarına sebep olmaktadır. Diferansiyel korumadaki küçük faz farklılıkları ise rölenin tetikleyici sinyali göndermesine sebep olmaktadır. FBG sensörleri bu faz kaymalarını ayırt edemediği için her bir kayma durumunun ayrı ayrı izlenmesi gerekmektedir.

Dalga boyu kayması ile hem primer hem de sekonder fazlar trafo kontrol odasında monitör edilmektedir. Böylece sistemde hata olduğu durumda oluşan keskin dalga boyu kayması sistem tarafından izlenip röleyi tetikleyecek sinyal yollanmaktadır. Genellikle primer ve sekonder akım arasında faz farkı olması rölenin, sistemin normal işleyişinin altında çalışmasına sebep olmaktadır.

Bu sebepten ötürü CT'nin dönüştürücüdeki diferansiyel korumasını seçerken uygun CT oranı kullanılmalıdır. Sistemin nominal yük akımı (rating load current) normal ve sabit durumdaki çalışmasında, iki CT'deki hem primer hem de sekonder akımlar, büyüklük olarak eşit, faz bakımından ise zıt olmaktadır. Bu durumda kesici gibi çalışan röle bobininde akım akmamaktadır. Harici hata

durumunda ise tüm CT'ler aynı büyüklüklü fakat farklı fazlı olan ve çalışma röle bobini tarafından algılanamayan bu akımı algılayabilmektedirler.

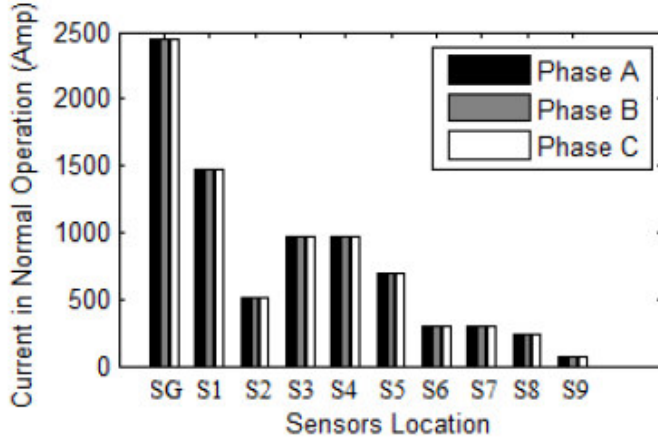


Şekil 5.10 Sistemin sensör konumları içeren tek hatlı diyagramı ve sistemin yük akışı.(Moghadas and Shadaram, 2010).

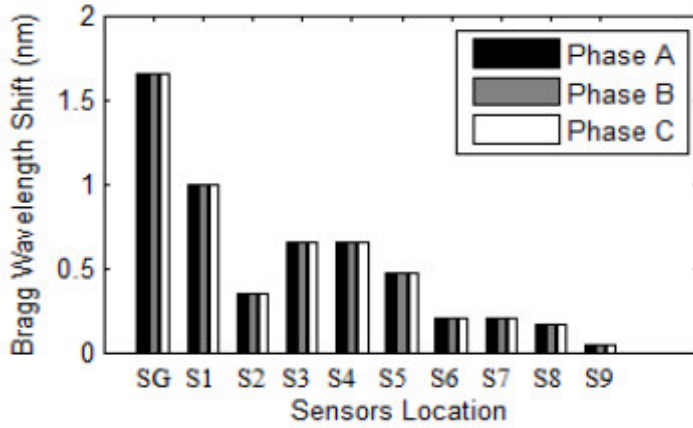
4 adet veri yolu bulunan enerji sistemi Şekil 5.10'da gösterilmektedir. İlgili simülasyonda tüm ekipmanlar etkili bir şekilde topraklanıp 3 adet sensör, dönüştürücünün her bir fazına uygulanmaktadır. Daha önce belirtilen sebepten ötürü tüm sensörler koruma rölesine yakın konumlandırılmaktadır ve S harfini takip eden sensör numarasıyla isimlendirilmektedir.

Dönüştürücüdeki hatadan kaynaklı akımdaki artış, kablo çevresindeki manyetik alanda artışa sebep olmaktadır. Kısa devre olduğu durumda optik akım sensörünün Bragg dalga boyunun hatalı elamanın içerisindeki keskin akım değişiminden kaynaklı kaydığı görülmektedir.

Kurulan sistemde  $S_G$  ve  $S_1$  arasındaki, SLG, DLG ve DL'de dahil olmak üzere, tüm dönüştürücüler için olan hata çeşitleri incelenmektedir. Ancak bu metot DLG hatalarını algılama konusunda yeterli olmamaktadır. Şekil 5.11'de sistemin normal çalışması sırasındaki akımın sensör tarafından algılanması ve Şekil 5.12'de ise yansıyan Bragg dalga boyu kayması sütun grafikleri ile ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.11 Kararlı durum koşulunda sistemdeki akımlar.(Moghadas and Shadaram, 2010).



Şekil 5.12 Sistemin normal düzende çalışırken her bir sensördeki Bragg dalga boyu kaymaları.(Moghadas and Shadaram, 2010).

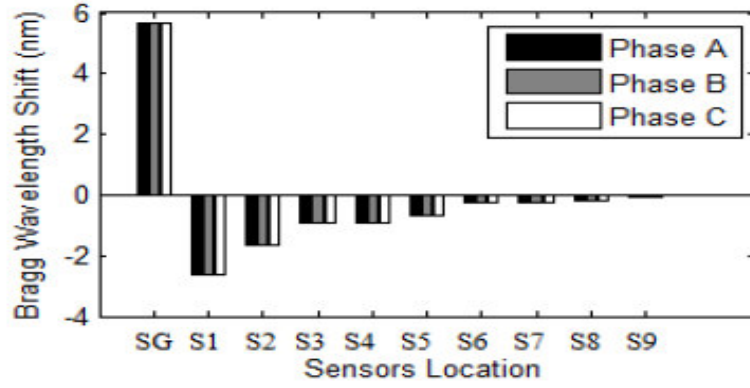
- Üç Faz Hata Simülasyonu Sonuçları

Trafo kontrol odasında primer ve sekonder dönüştürücülere kurulan tüm sensörlerin, faz ve büyüklüklerinin izlenerek bazı ölçümler alınmaktadır ve bu her bir fazın ayrı ayrı ölçülmesi gerekmektedir.

Şekil 5.13’de 3 fazlı sistemde iletim hattında  $S_G$  ve  $S_1$  sensörleri arasında hatanın gerçekleştiği durumda ortaya çıkan farklılıklar sütun grafikleri ile gösterilmektedir. Sistem radyal olduğu için tüm giriş besleyicileri ve veri yolları

yüksek kısa devre akımını algılayabilmesi gerekmektedir. Sütun grafikleri incelendiğinde en yüksek dalgalanmanın (surge)  $S_G$  sensöründe olduğu ifade edilmektedir (Moghadas and Shadaram,2010). Bu yaklaşım baz alınarak hata bölgesine en yakın sensörlerin  $S_G$  ve  $S_1$  sensörleri olduğu sezdirilmektedir.

Bragg dalga boyu kayması ile akım arasında doğrudan olan ilişkiden ötürü  $S_G$  sensöründe dalgalanmaya neden olmaktadır. Kısa devre olduğunda motor, jeneratör gibi çalışmaya başladığı için bir müddet sonra akım geri dönüp ters akmaya başlamaktadır Sensörün aşağı akış tarafında akımın yönü değişmesi bu sebepte ötürüdür.  $S_1$  sensöründen sonra ters kısımda akım bir süre aktıktan sonra röle kapatılarak sistemin korunması sağlanmaktadır.

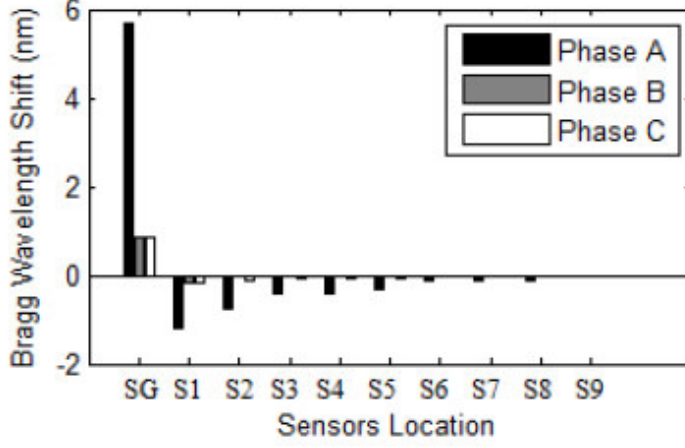


Şekil 5.13 3 Fazlı sistemde sensörlerdeki Bragg dalga boyu kaymaları.(Moghadas and Shadaram, 2010).

- SLG Hata Simülasyon Sonuçları

Şekil 5.14’de tek fazlı sistemde (SLG) A fazı ile toprak arasında, hata olduğunda gerçekleşen FBG dalga boyu kaymasını göstermektedir. En yüksek dalgalanma  $S_G$  sensöründe olduğu görülmektedir ve bu durum ifade etmektedir ki hata olan bölge bu sensöre yakın olmalıdır. Dalga boyu kaymasının  $S_1$  sensörünün negatif kısmına doğru değişmesinden ötürü ise hatanın sistemin sol giriş kısmında olduğunu konusunda kesin yargıya varılabilmektedir.

Sistemin radyal olması ve kaynağın sistemin sadece bir kısmında olduğu farz edilerek, Bragg dalga boyu kaymasının negatif işareti, sensörün giriş kısmında olduğunu göstermektedir.

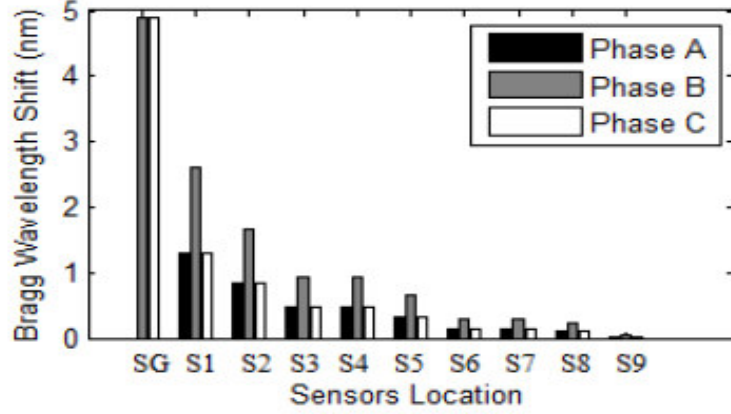


Şekil 5.14 Hata olan SLG tipi bir sistemde  $S_G$  ve  $S_1$  sensörleri arasında bulunan dönüştürücüdeki Bragg dalga boyu kayması. (Moghadas and Shadaram, 2010).

- DL ve DLG Hata Simülasyon Sonuçları

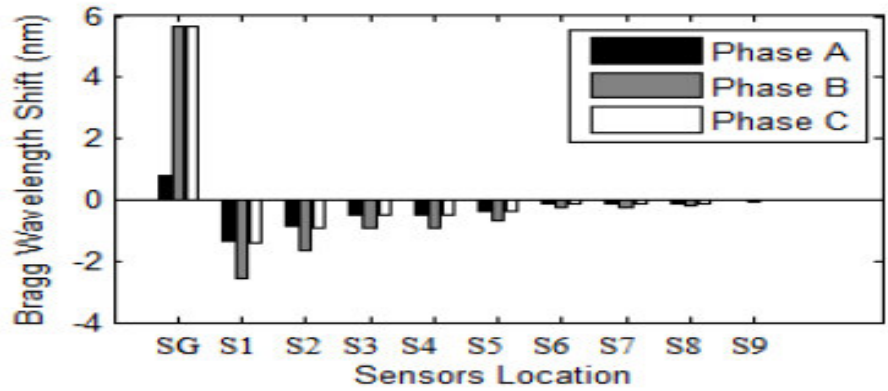
İki fazlı (DL) sistemde veri yolu 1 ve veri yolu 2 arasında aynı dönüştürücü içinde B ve C fazları arasındaki hata durumunu Şekil 5.15’de, B, C ve toprak (DLG) fazları arasındaki hata durumunu ise Şekil 5.16’da gösterilmektedir Diğer tüm simülasyon örneklerinde olduğu gibi sistemdeki en yüksek dalgalanma en yüksek dalga boyu kaymasını ve sonuçlar ise hataya en yakın sensörü ifade etmektedir.





Şekil 5.15 Hata olan DL tipi bir sistemde  $S_G$  ve  $S_1$  sensörleri arasında bulunan dönüştürücüdeki Bragg dalga boyu kayması. (Moghadas and Shadaram, 2010).

Yapılan bu çalışmalarda Moghadas ve Shadaram, manyetostriktif malzeme kullanan FBG optik akım sensörüne bağımlı yüksek voltaj sistemlerinde uygulanabilir olan yeni bir koruma sistemi üzerinde çalışıp elde edilen bulguları sütun grafikleri ile göstermişlerdir. Sistemdeki en yüksek performansa manyetostriktif malzemenin önerilmesini ve sensörün DC bayas noktalarını ayarlayarak ulaşılmıştır. İletim hattı enerji sistemlerindeki tüm hata tiplerini inceleyip bu sistemdeki hataların FBG optik sensörleri tarafından algılanabildiğini göstermişlerdir. Çalışmada FBG akım sensörünün tercih edilmesindeki en önemli faktörün ise önerilen koruma metodunda çoğullanabilme yeteneği sayesinde genel maliyeti düşürme potansiyeli olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 5.16 Hata olan DLG tipi bir sistemde  $S_G$  ve  $S_1$  sensörleri arasında bulunan dönüştürücüdeki Bragg dalga boyu kayması. (Moghadas and Shadaram, 2010).

### 5.1.4 Terfenol-D Tabanlı FBG Manyetik Sensörlerinde Hassaslık Ayarlaması

Teknolojinin birçok alanında geniş bir kullanım oranına sahip manyetik sensörler, manyetostriksiyon etkisini kullanarak manyetik alan algılamak üzere fiber optik sistemlerde kullanılmaya başlamıştır. Bu sistemler temelde FBG'lerin sorgulanması üzerine kurulmuştur. FBG'yi bir gerilme sensörü olarak kullanmak yüksek dinamik aralık, rekabetçi fiyat, algılama anlamında başarılı özelliklerinin yanı sıra çözünürlük ve bant genişliği gibi birçok avantaj sunmaktadır.(Culshaw and Dakin, 1996). Ancak bu olumlu özelliklerinin yanında bilinen olumsuzluk olarak Terfenol-D malzemesinin kendisi deforme etmesi söylenebilmektedir. Bu teknolojilerin entegrasyonu, yüksek hassasiyete ve geniş ölçüm aralığına sahip basit ve güvenilir manyetik alan sensörlerinin gelişmesine olanak sağlamaktadır.(Ambrosino et al.,2007). Daha önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktör, bu tip malzemelerin uygulanan mekanik öngerilm altında manyetoelektik karakteristiğe bağlılığıdır.(Engdahl,2000; Calkins et al.,1997). 2008 yılında yaptıkları bu çalışmada Ambrosino ve arkadaşları sistemin algılayıcı performansında öngerilmeyi kullanarak kolaylıkla ince ayar yapılabildiğini ve ilgili manyetik alan sensörlerinin uygulanan gerilme ile çeşitlenen farklı endüstriyel uygulamalar için çalışma aralığı ve hassasiyet cinsinden dinamik olarak ayarlanabildiğini göstermeye çalışmışlardır.

#### 5.1.4.1 DeneySEL DÜZENEK

Merkez dalga boyu 1550 nm olan ve 1.1 nm FWHM bant genişliğine sahip FBG ile 47 mm çaplı 20 mm uzunluğundaki Terfenol-D çubuğunu “cyanoacrylate” yapıştırıcı kullanarak birbirine yapıştırıp elde edilen örneği farklı öngerilme değerlerinde bir itme-çekme test makinası aracılığıyla 50 N'dan 1kN'a kadar aralıkta test etmişlerdir. Sistemi ise 20 A'den 250 kA'e kadar olan aralıkta 0.6 m'lik 1200 sarımlık solenoid ile besleyip manyetik alan oluşturmuşlardır. Mıknatıslanma sıcaklık telafili bir DSP gaussmetre ile ölçülmüştür.

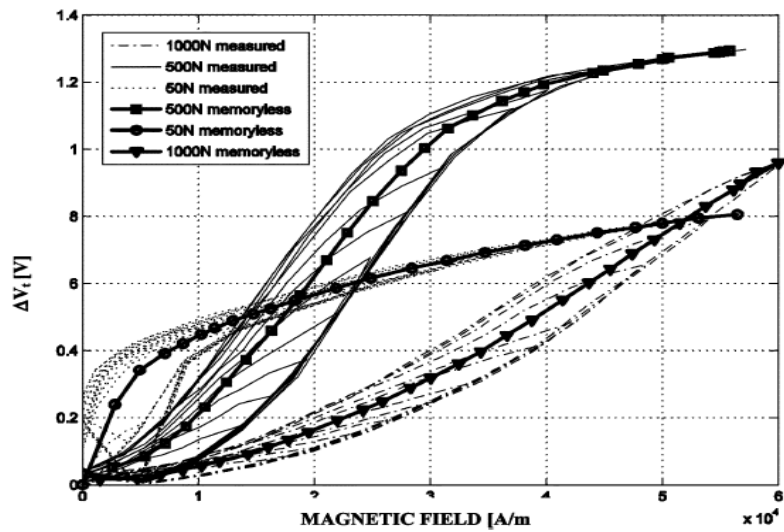
Sisteme manyetik alan uygulandıklarında Terfenol-D kristali içindeki manyetik domenler dönme suretiyle doğru orantılı, pozitif ve tekrar eden bir genişleme elde etmişlerdir. Bu deformasyon, aktif malzemeye bağlı FBG'yi

hareketlendirerek Bragg dalga boyunu değiştirmektedir. (Culshaw and Dakin, 1996). Dalga boyu kaymasındaki bu değişim, sinyalin inişini veya çıkışını algılayan bir filtre ve geniş bant sorgulama tabanlı FBG sorgulama sistemi kullanılarak ışık şiddeti çeşitlenmesine dönüştürülmektedir.(Cusano et al.,2003).

FBG geniş bant (süper lüminesans diyot, SLED, Exalos ESL 1510-1111, 1550 nm’de merkezlenmiş, 40 nm FWHM bant genişlikli, 2mA’de 9 mW nominal güce sahip) bir kaynakla aydınlatıldığında,  $\lambda_B$ ’de merkezlenmiş dar bant bir sinyali geri yansıtmaktadır. Bu sistemdeki anahtar eleman, dalga boyu-ışık şiddeti dönüşümünden sorumludur. Bu eleman, geçirgenliği optik dalga boyu ile doğrusal olarak değişen optik bir aygıt içermektedir. Bragg dalga boyu kaydığı zaman optik filtre bu dalga boyu kaymasını genliğe çevirmektedir. Böylece fotodedektörün (GaAs FGA04) çıkış sinyali çeşitlenmesi ( $\Delta V_T$ ) Bragg dalga boyunun doğrudan bir ölçümü olarak ifade edilebilmektedir.

#### 5.1.4.2 Deneyin Sonuçları

Bu çalışma sırasında sıcaklıklar izlenerek farklı öngerilme değerleri için gerçekleştirilmişlerdir. 0,05 Hz’de azami genlik olan 80 kA/m’den 10 kA/m’ye azalan sinüsodyal manyetik alan döngüsünde herbir ayrıık düzenek için 50 N’den 1 kN’a kadar olan öngerilme değerleri için test etmişlerdir. Bu deney sırasında elde edilen bulgular Şekil 5.17’de gösterilmektedir.

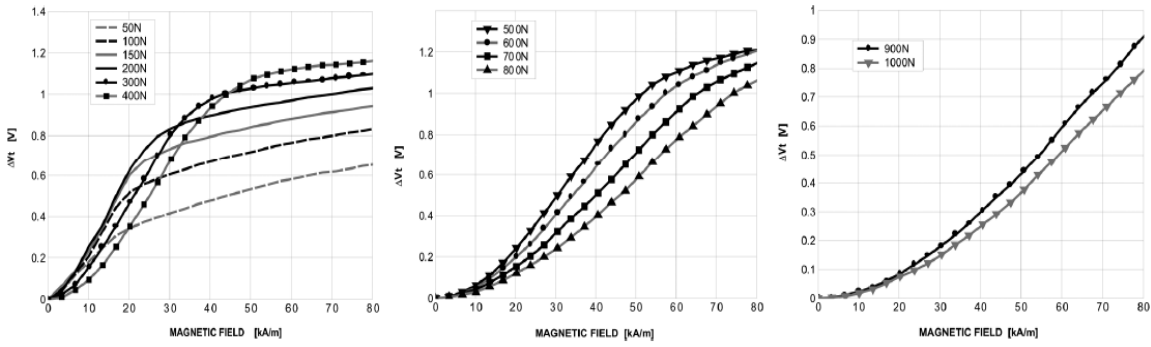


Şekil 5.17 50, 500 ve 1000 N’da sınırlı döngü ve hafızasız karakteristikli malzeme karakteristiği

(Ambrosino et al.,2008)

Şekil 5.17’de kelebek şeklindeki manyetostriktif örnek cevabının 50, 500 ve 1000 N’luk farklı öngerilme değerlerindeki sistem çıkış voltaj çeşitlenmesine göre değerlendirilmesini göstermektedir. Farklı öngerilme değerleri için manyetik alana  $\Delta V_T$  grafiğinde histerisislerin oluştuğu açıkça görülebilmektedir.

Ambrosino ve arkadaşları sistem sonuçlarına genel olarak bakıldığında FBG sensörleri üzerindeki manyetik alan ve uygulanan gerilim tarafından tespit edilen gerilmeye bağımlılığı hafıza ile bağımsız fonksiyonel oranı olarak tanımlanabileceğini ancak ilk yaklaşımda böyle bir fonksiyonelin hafızasız fonksiyon olarak tahmin edilebileceğini ifade etmişlerdir.



Şekil 5.18 Uygulanan farklı yüklerde ve manyetik alanlarda hafızasız fonksiyonlar.

(Ambrosino et al., 2008).

50 N’den 1000 N’a kadar olan aralıkta hafızasız eğriler ile gerçekleştirilen ölçümler Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde uygulanan gerilimin manyetostriktif çubuğun manyetoelastik davranışını dolayısıyla manyetik alana olan cevabını değiştirdiği görülmektedir.

Şekil 5.18’de soldaki şekil, 50 N’den 400 N’a kadar olan düşük mekanik öngerilme altında 30 kA/m’lik genlikle sınırlandırılmış sensör hassasiyetini ifade etmektedir. Genlik 30 kA/m ile sınırlandırılmış olsa da hassasiyet en yüksek olan durumdur. Hassasiyet doğrusallık ile orantılıdır. Örneğin bu sensör doğrusal kısımlar karşılaştırıldığında 200 N’luk öngerilme değeri en yüksek doğrusallığa sahip olduğu için en yüksek hassasiyete sahip olduğu yorumu yapılabilir. Bu sistemde çıkış sinyali çeşitlenmesi ( $\Delta V_T$ ) değerini eğimle çarparak manyetik alandaki hassasiyet elde edilebilmektedir.

Soldaki ve sağdaki figürlerden artan mekanik öngerilme ile ölçülebilir manyetik alan aralığının arttığını ancak sensör hassasiyetinin azaldığı sonucu çıkarılabilmektedir. Burada öngerilme ayarlaması kalibre edilmiş ayarlanabilir bir yay sistemi ile sağlanmaktadır. En sağdaki figürde en yüksek öngerilme değerleri (900N-1000N) için hassasiyet en düşüktür. Diğer bir deyişle farklı uygulamalarda kullanmak üzere her bir manyetik alan aralığı için en iyi hassasiyet performansını sağlayan uygun bir mekanik yük bulunmaktadır. (Ambrosino et al.,2008). Özetle bu tip bir sensör sisteminin aynı altyapıyla ne kadar kolay çeşitlendirilebileceğinin ve ihtiyaca göre sadece öngerilme değıştirmek gibi basit bir işleme farklı uygulama alanlarında kullanılabileceğini bizlere göstermektedir.

## 6 SİSTEMLERİN KISACA KIYASLANMASI

Voltaj ve akım algılama adına kullanılan çeşitli optik voltaj sensörleri üzerine yapılan bu literatür taramasında görülmüştür geleneksel elektrik tabanlı voltaj sensörlerine kıyasla birçok önemli avantaja sahiptirler. Ancak kendi içlerinde de bazı olumsuzluklara sahiptirler. Gelişen ve değişen teknolojilerle bu olumsuzluklar elemine edilmeye çalışılmaktadır.

1970'lerde çalışılmaya başlanan Kerr etkili OVS'lerde algılanan bir sinyali anlamlı hale getirebilmek için çok karmaşık demodulasyon sistemine ihtiyaç duyarken, daha kullanışlı bir OVS yapabilmek amacıyla 1990'lı yıllarda üzerinde çalışılan Pockel etkisi kullanılabilecek entegre optik dalga kılavuzu tipi OVS'lerde ise geniş frekans tepkisi basit biçimlenimi gibi avantajlarına rağmen dalga kılavuzunun düşük yarı-dalga voltajından kaynaklı yüksek gerilimi ölçmeye uygun olmadığı anlaşılmıştır. Bir başka Pockel etkisi kullanan kristal yığın tipi OVS'lerde ise kullanılan kristalden yapılmış Pockel hücreleri, filtreler ve lensler açık optik yaklaşımı kullandıkları için sıcaklık değişimi ve şok gibi durumların yanı sıra hizalanmakta zorluk yaşayan sistemlerden kaynaklı titreşimlere karşı kırılma yapıdadır. Diğer bir deyişle çeşitli zorlu çevre şartları altında uzun süreli kararlılığı sağlayabilmekte gibi temel bir probleme sahiptir. Bu durumun yanı sıra bu tip sensör sistemlerinin görece maliyetli olduğu bilinmektedir. Ticari pazarda kendine en çok yer bulan piezoelektrik bir malzeme yardımıyla algılama yapan ters piezoelektrik tipi sensörler, genellikle ışık şiddeti tespit sistemi tabanlı Mach-Zender interferometresini kullanmaktadırlar ancak bu tip sensörlerde de ışık güç dalgalanması ve ışık kaynağını dalga boyu sürüklenmesi gibi ortaya çıkan istenmeyen durumlardan ötürü sistemsel hatalı ölçümler meydana gelmektedir.

Elektrooptik ve ters piezoelektrik etki kullanan sensörlerin sinyal şiddeti dalgalanması durumu altında etkisiz ve yetersiz kalması üzerine geliştirilen fiber Bragg ızgara yapılı sensörler frekans kodlu bir yapıya sahip olmasından ötürü çevresel faktörlerden bu denli etkilenmemesi diğer OVS'lerle karşılaştırıldığında çok önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra dalga boyu kaymasında meydana gelen değişimlerin anında görüntülenebilmesi ile gerçek zamanlı sonuçlar elde edilebilmesi küçük boyutlar, optik sinyal şiddeti modülasyonlarından etkilenmemesi, elektromanyetik girişimin olmamasından kaynaklı düşük gürültülü olması gibi birçok özelliklere sahiptir. Ancak bahsedilen

avantajlarının yanında FBG tabanlı sensörlerin günümüzde daha çok alanda tercih edilip kullanım alanlarının hızla artmasındaki en önemli faktör çoğullanabilme yeteneğidir. Birçok FBG tabanlı sensörü tek hat üzerinde konumlandırarak ayrı ayrı sistemlere ihtiyaç duymadan ölçümler yapılabilmekte, farklı noktalardan gelen algılama bilgileri tek bir bilgisayar tarafından izlenebilmektedir. Bu durum da maliyeti oldukça düşürmektedir. FBG tabanlı sensörlerin bilinen ve kabul edilen tek dezavantajı sıcaklık gibi bir parameterenin etkilerinin doğrudan dalga boyu kayması olarak kendini göstermesinden ötürü sıcaklık takibi dışında ölçümü yapılması istenen sistemlerde bir sıcaklık telafisine ihtiyaç duyulmasıdır. Bahsedilen olumsuz durum ise sadece sıcaklık ölçümü için kullanılacak ekstra bir referans fiberi ile ortadan kaldırılabilir. Bunun yanı sıra aynı fiber hattı üzerinden sıcaklık telafisi yapılabilen sistemler üzerine çalışılmaya başlandığına da rastlanılmıştır.

## 7 ÖNERİLER

Sağladığı önemli avantajları ile algılama sistemleri anlamında çok fazla kullanım alanına hitab edebilen FBG tabanlı sensörler üzerine yapılan çalışmaların incelenmesinin ardından edinilen bilgiler ışığında yüksek voltaj ve yüksek akım algılama alanında da etkili, yüksek hatasızlık ve bir şekilde kullanılabilmesi anlaşılmıştır. Özellikle kısa devre benzeri hata oluşması durumunda bir, iki ya da üç fazlı sistemlerde tek bir fiber hattı üzerinde aralıklarla yerleştirilen FBG voltaj/akım sensörleri yardımıyla gerçekleşen hatanın tam yeri ya da hataya çok yakın bölgeler sensörlerden elde edilen bilgiler ışığında anlık olarak tespit edilebilmekte ve bu tespitler doğrultusunda tüm sistemi kontrol etmek yerine hatanın olduğu yere çok daha hızlı tehlikesiz ve daha az maliyetli bir şekilde müdahale edilerek hatanın olumsuz etkilerini ortadan kaldırılabilenmekte ya da sistem tekrar çalışır duruma getirilebilmektedir.

Hassasiyet oranları uygulanan öngerilmenin değiştirilmesiyle kolaylıkla ayarlanarak farklı türdeki sistemler için dahi rahatlıkla kullanım imkanı bulan ve yüksek voltaj/akım uygulamalarında kullanılabilen durumdaki FBG tabanlı sensörler için yapılan ticari araştırma sonucunda Türkiye pazarında henüz kendine yer bulamadığı, çoğu firma tarafından ise henüz haberdar dahi olunmadığı görülmüştür. İzmirde faaliyet gösteren elektrik dağıtım firmasıyla yapılan görüşmede bu tip sensörlerin ilgili faaliyet alanlarında verimli bir şekilde kullanılabilirliği üzerinde durulmuştur.

FBG tabanlı sensörlerin enerji dağıtım firmalarının şalt sahalarında enerji nakil hatları üzerinde kullanılmalarının gerçekleşmesi yüksek olasılıklıdır. Örneğin saha içerisinde yer alan her bir direkt sensör uygulaması içeren fiber hattın çekilerek tek sistemde izlenmesi ve dolayısıyla hangi direkte voltaj/akım dalgalanmasının olduğu tespit edilebileceği gibi tek/çok fazlı sistemlerde kısa devreden kaynaklı hatanın olduğu kısım anında müdahale edilerek son kullanıcıya yansımadan veya yüksek maliyetli problemler yaşanmadan önüne geçme imkanın tanımaktadır. Bunun yanı sıra tamamiyle uzaktan takip sistemi olmasından ötürü paha biçilemez insan hayatı da riske edilmemiş olmaktadır.

Şimdiye kadar üzerinde durulan sistem günümüz teknolojileri kullanılarak daha da geliştirilebileceği düşünülmektedir. Üzerinde hali hazırda da çalışılmakta



olan sıcaklık bağımlılığı ekstra bir fibere ihtiyaç duymadan aynı hat üzerinde daha verimli ve daha yüksek doğruluklu olarak sıcaklığın telafi edilebileceği öngörülmektedir. Kullanım alanları geliştirilerek enerji nakil hatları gibi yüksek voltaj/akım sistemlerinden öte düşük voltaj/akım içeren sistemlerde de koruma ve ya erken uyarı amaçlı tekil kullanıcılar arasında yaygınlaştırılabileceği düşünülmektedir. Ek olarak bu görece yeni teknolojinin maliyetin daha da düşürülerek pazarda daha fazla talep edilir hale getirilebilir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ambrosino C., Capoluongo P., Campopiano S., Cutolo A., Giordano M., Davino D., Visone C. and Cusano A.,** Fiber Bragg Grating and Magnetic Shape Memory Alloy: Novel High-Sensitivity Magnetic Sensor, *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, No. 2, February 2007.
- Ambrosino C., Capoluongo P., Campopiano S., Cutolo A., Giordano M., Davino D., Visone C. and Cusano A.,** Sensitivity tuning in Terfenol-D based fiber Bragg grating magnetic sensors, *IEEE Sens. J.*, 8(9), PP 1519-1520, 2007.
- B Balogun O., Regez B. and Krishnaswamy S.,** Spectral Shifts in Fiber Bragg Grating Sensors, *SPIE Newsroom*, December 2009
- Bi L. and H.,** An overview of optical voltage sensor, 2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering, PP 197-201, March 2012
- Butler J.,** Application Manual for The Design of ETREMA Terfenol-D Magnetostrictive Transducers, *EDGE Technologies, Inc., Ames, Iowa*, 1988.
- Bohnert K., Gabus P. and Brandle H.,** Fiber-optic current and voltage sensors for high-voltage substations, 16th International conference on optical fiber sensors, pp.752-754, 2003.
- Bohnert K., Wildermuth S., Frank A. and Brändle H.,** Fiber-Optic Voltage Sensor Using Fiber Gyro Technology,” *Procedia Engineering*, vol. 5, pp. 1091–1094, September 2010.
- Calkins F., Dapino M. and Flatau A.,** Optimization of a dynamic magnetostrictive material property testing capability, *Proceedings of the 24th Midwestern Mechanics Conference*, Vol 18, Iowa State University, Ames, IA 1995.
- Calkins F. and Flatau A.,** Transducer based measurements of Terfenol-D material properties”, *Proceedings of SPIE 1996 Symposium on Smart Structures and Materials*, #2717-67, San Diego, CA, March 1996.
- Calkins F. and Flatau A.,** Terfenol-D sensor design and optimization.(n.d.)
- Calkins F., Dapino M. and Flatau A.,** Effect of prestress on the dynamic performance of a Terfenol-D transducer, *Proceedings of SPIE 1997 Symposium on Smart Structures and Materials*, #3041-23, San Diego, CA, March 1997.
- Calkins F. T., Dapino M. J., and Flatau A.B.,** in *Proc. SPIE Smart Struct. Materials Conf.*, 1997
- Coskun S.,** Sıcaklık ve EKG Takibi için Fiber Optik Izgara Sensör Ağı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 154 s, Ocak 2009

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Coskun S. and Kahraman G.,** An FBG sensor system for low voltage AC signals, IEEE, pp. 258-259, 2009.
- Culshaw B. and Dakin J.,** “Optical Fiber Sensors: Applications, Analysis, and Future Trends.” Norwood, MA: Artech House, 1996, vol. 3.
- Cusano, A., Cutolo, A., Nasser, J., Giordano, M. and Calabro, A.,** Dynamic Strain Measurements by Fibre Bragg Grating Sensor, Sensors and Actuators A, 110, 276-281, 2004.
- Dziuda L., Fusiek G., Niewczas P., Burt G.M. and McDonald J.R.,** Laboratory evaluation of the hybrid fiber-optic current sensor, Sens. Actuators A: Phys. 136 pp. 184-190.
- Engdahl G.,** *Handbook of Giant Magnetostrictive Materials*, G. Engdahl, Ed. New York: Academic, 2000.
- Fabiny L.,** High resolution fiber-optic low frequency voltage sensor based on the electrostrictive effect. IEEE photonic technology letters, vol. 5, pp. 952-953, 1993.
- Filippov V.N., Starodumov A.N., Minkovich V.P. and Pena Lecona F.G.,** Fiber sensor for simultaneous measurement of voltage and temperature, IEEE Photon. Technol. Lett, vol.12, PP.1543– 1545,2000
- Fusiek G., Niewczas P. and McDonald J.R.,** Feasibility study of the application of optical voltage and current sensors and an arrayed waveguide grating for aero-electrical systems, Sensors and Actuators A, vol. 147, pp. 177–182, May 2008.
- Greenough R., Jenner A., Schulze M., Wilkinson A.,** The properties and applications of magnetostrictive rare-earth compounds, J. of Magn. and Mag. Matl., 101, pp. 75-80, 1991
- Hill K.O. and Meltz G.,** Fiber Bragg grating technology and overview, IEEE J. Lightwave Technol. 15, 1263-1276 (1997).
- Jaeger N.A.F. and Rahmatian F.,** Integrated optics Pockels cell as a high voltage sensor, IEEE, PP. 153-156.
- Jiang B., Zhao J., Qin C., Huang Z., and Fan F.,** An optimized strain demodulation method based on dynamic double matched fiber Bragg grating filtering,” Opt. Laser. Eng. 49(3), 415–418 (2011).

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- John D. and Culshaw B.**, Eds., *Optical Fiber Sensors : Components and Subsystems, and Optical Fiber Sensors: Applications, Analysis and Future Trends*, Artech House, Vol. 3 – 4, 1996 – 1997
- Kersey A.D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M., Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A. and Friebele E.J.**, Fiber Grating sensors, *J. Lightwave Technol.*, 1997, Vol.15 No.8, 1442–1463.
- Li C.S. and Yoshino T.**, Optical voltage sensor based on electrooptic crystal multiplier, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, pp. 843-849, 2002
- Liu Y. and Chiang K.S.**, *Member, IEEE*, and **Chu P.L.**, *Member, IEEE* Multiplexing of Temperature-Compensated Fiber-Bragg-Grating Magnetostrictive Sensors With a Dual-Wavelength Pulse Laser,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 2, February 2004.
- Lee B.**, Review of the present status of optical fiber sensors, *Optical Fiber Technology*, 2003, 9, 57-79.
- Lee K.S.**, New compensation method for bulk optical sensors with multiple birefringences, *Applied Opticals*, vol. 22, PP. 2001-2011, October 1990.
- Lee K.S.**, Electrooptic voltage sensor: birefringence effects and compensation methods, *Applied Opticals*, vol. 29, PP. 4453-4461, October 1990.
- Martínez-León L., Díez A., Cruz J.L. and Andrés M.V.**, A frequency-output fiber optic voltage sensor with temperature compensation for power systems, *Sensors and Actuators A*, vol. 102, pp. 210–215, 2003.
- Melle S., Liu K., and Measures R.**, A passive demodulation system for guided wave Bragg grating sensors, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.4, no. 3, pp. 516–518, Mar. 1992.
- Michie A., Bassett I. M., Haywood J. H. and Ingram J.**, Electric field and voltage sensing at 50 Hz using a thermally poled silica optical fibre, *Measurement Science and Technology*, vol. 18, pp. 3219– 3222, 2007
- Moffett M.B., Clark A.E., Wun-Fogle M., Linberg J., Teter J.P. and McLaughlin E.A.**, Characterization of Terfenol-D for Magnetostrictive Transducers, *J. Acoust. Soc. Am.* 89 (3), March 1991.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Moghadas A. and Shadaram M.**, Novel fiber Bragg grating sensors applicable for fault detection in high voltage transformers, IEEE Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply, PP 433-436, September 2010.
- Moghadas A., Barnes R. and Shadaram M.**, An innovative fiber Bragg grating sensor capable of fault detection in radial power systems, Systems Conference, 2010 4th Annual IEEE, PP 165-168, 2010
- Niewczas P., Dziuda L., Fusiek G., and McDonald J.R.**, Design and Evaluation of a Preprototype Hybrid Fiber-Optic Voltage Sensor for a Remotely Interrogated Condition Monitoring System, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 54, pp.1560- 1564, August 2005.
- Niewczas P., Fusiek G. and McDonald J.R.**, Dynamic Capabilities of the Hybrid Fiber-Optic Voltage and Current Sensors, IEEE Sensors 2006, Exco, Daegu, Korea / October 22-25, 2006
- Othonos A.**, Fiber Bragg Gratings, Review of Scientific Instruments, 68 (12) December, 1997.
- Rahmatian F. and Jaeger N.A.F.**, Integrated optics Pockels cell choice of crystal cut and waveguide orientation, Applied Optics. PP. 8127-8129, December 1994
- Rahmatian F. and Chavez P. P.**, “SF6-free 550 kV combined optical voltage and current transducer system,” IEEE Transmission & Distribution Conference, pp. 379-382, 2003.
- Rao Y.J.**, In-fibre Bragg grating sensors, Meas. Sci. Technol. 8 (1997) 355-375
- Reilly D., Willshire A.J., Fusiek G., Niewczas P. and McDonald J.R.**, *Member IEEE*, “A Fiber-Bragg-Grating-Based Sensor for Simultaneous AC Current and Temperature Measurement,” IEEE Sensors Journal, vol.6, No. 6, December 2006, 1539.
- Ribeiro B. and Werneck M.M.**, FBG-PZT sensor system for high voltage measurements, IEEE. 2011.
- Rose A.H. and Day G.W.**, Optical fiber voltage sensors for broad temperature ranges, Proc. SPIE, vol. 1580, PP.95–103.1992.
- Santos J. L., Frazao O., Baptista J.M., Jorge P. A. S., Dias I., Araujo F. M. and Ferreira L.A.**, Optical Fibre Sensing Networks” International Microwave and Optoelectronics Conference, 2009.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

**Schulze M., Greenough R. and Galloway N.,** The stress dependence of  $k_{33}$ ,  $d_{33}$ ,  $l$ , and  $m$  in  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.95}$ , preprint.

**Yin S., Ruffin P.B. and Yu F.T.S.,** Fiber Optic Sensors, 2nd Edition, CRC Press, 2008.

**Yu F.T.S. and Yin S.,** Editor, Fiber Optic Sensors, Marcel Dekker Incorporated, 2002.

**Zhao Y. and Liao Y.,** Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors, Optics and Lasers in Engineering, 41, (2004) 1-18

**Zhao Y., Meng Q. and Chen K.,** Novel current measurement method based on fiber Bragg grating sensor technology, Sensors and Actuators A, 126 (2006) 112–116.

**ÖZGEÇMİŞ**

Ad Soyad : İbrahim Halil ÖZCAN

Doğum tarihi : 14.06.1985

Doğum yeri : Mersin (TR)

Adres : 1409 Sk. No:4 K:7 D:14 Bucakoop.-Buca/İzmir

Telefon :(+90) 5505 345 2456

E-mail : [i.halilozcan@gmail.com](mailto:i.halilozcan@gmail.com)

Eğitim :

- 2010–2014 Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü 77,52/100
- 2004–2010 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik (İng) Bölümü 2.50/4
- 1996–2004 İzmir Çiğli Milli Piyango Anadolu Lisesi 4.52/5

İş Tecrübeleri :

- 2012-halen İzmir Ekonomi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü- Araştırma Görevlisi