



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**GEMİLERDEKİ METAL YORGUNLUĞUNUN BELİRLENMESİ
İÇİN OPTİK DÜZENEK GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

SEMİH ÖZTÜRK

Tez Danışmanı

PROF. DR. MUSTAFA KURT

ÇANAKKALE – 2022



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

**GEMİLERDEKİ METAL YORGUNLUĞUNUN BELİRLENMESİ İÇİN OPTİK
DÜZENEK GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

SEMİH ÖZTÜRK

Tez Danışmanı

PROF. DR. MUSTAFA KURT

ÇANAKKALE – 2022



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



tarafından yönetiminde hazırlanan ve tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nda olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

(Danışman)

.....
.....
.....

Tez No :

Tez Savunma Tarihi :

.....

Enstitü Müdürü

.../...2022

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

../2022

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleŐtirilmesinde, yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Mustafa KURT ve değerli arkadaŐım Dr. Öğretim Üyesi Yavuz Hakan ÖZDEMİR'e çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen, hayatımın her evresinde bana destek olan değerli annem ve kardeŐime sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.”

Semih ÖZTÜRK
anakkale, Ağustos 2022



ÖZET

GEMİLERDEKİ METAL YORGUNLUĞUNUN BELİRLENMESİ İÇİN OPTİK DÜZENEK GELİŞTİRİLMESİ

Semih ÖZTÜRK

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Mustafa KURT

24/08/2022, 72

Önkestirime dayalı bakım teknikleri, bakımın ne zaman yapılması gerektiğini tahmin etmek için hizmet içi ekipmanın durumunu belirlemeye yardımcı olmak üzere tasarlanmıştır. Gemiler gibi büyük metalik yapılarda artık gerilim kaynaklı kritik arızaların önkestirim ile belirlenebilmesi için tahribatsız ve yerinde ölçüm yapabilecek maliyet-performans etkin yaklaşım ve yöntemlere gereksinim vardır. Bu çalışmada, AISI4040 ve DUPLEX malzemelerde artık gerilme dağılımının izlenmesi için, tahribatsız yüzey manyetik geçirgenlik katsayısının hesabına dayalı optik bir yöntem önerilmiştir. Gemilerdeki devasa levhaların birleşme yerlerindeki artık gerilmelerin belirlenmesi için önerdiğimiz yöntemimizde, artık gerilmeyi teorik olarak hesaplamak için Lorentz-Drude modeli ve Fresnel yaklaşımı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar bu çalışmada önerilen yöntemin metalik yapılardaki artık gerilmelerin belirlenmesi için oldukça etkin bir yaklaşım olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: AISI4140, DUPLEX, Artık Gerilim, Fresnel Denklemleri, Brewster Açısı

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF OPTICAL SETUP FOR DETERMINATION OF METAL FATIGUE ON SHIPS

Semih ÖZTÜRK

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Doctoral Dissertation in Department of Physics

Advisor Prof. Dr. Mustafa KURT

24/08/2022, 72

Predictive maintenance techniques are designed to help determine the condition of in-service equipment to predict when maintenance should be performed. The cost-performance effective approaches and methods that can make non-destructive and on-site measurements in order to predict residual stress induced critical faults in large metallic structures such as ships are needed. In this study, an optical method based on the calculation of the non-destructive surface magnetic permeability coefficient is proposed for monitoring the residual stress distribution in AISI4040 and DUPLEX materials. In our proposed method for determining residual stress in junction of huge plate in ships, Lorentz-Drude model and Fresnel approach were used to calculate the residual stress theoretically. Our results showed that the method proposed in this study is a very effective and usable for the determination of residual stresses in huge metallic structures.

Keywords: AISI4140, DUPLEX, Residual Stres, Fresnel Approximation, Brewster Angle

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Metalik Yapılarda Gerilme ve Gerinim	1
1.2. Metalik Yapılarda Elektronik Yapı	8
1.3. Fresnel Denklemi	10
1.4. Metalik Yapılarda ve Gemilerde Artık Gerilim Kaynaklı Stres ve Yapı Bozukluğu Tespit Yöntemleri.....	11
1.4.1. Artık Gerilim Ölçüm Yöntemleri	11
Tahribata Neden Olan Yöntemler/Mekanik Yöntemler (Tam Yıkıcı, Yarı Yıkıcı)	14
Delik Delme Yöntemi.....	15
Kontur Yöntemi	17
Çatlak Uyum Yöntemi	18
Halka Çekirdek Yöntemi	19
Katman Kaldırma Yöntemi	19
Kesitleme	20
Derin Delik Yöntemi	21
Tahribatsız Yöntemler	21

X Işını Kırınımı Yöntemi	22
Nötron Kırınımı Yöntemi	23
Ultrasonik Hız Yöntemi	24
Barkhausen Gürültü Analizi Yöntemi.....	25
1.5 Gemilerde Mukavemet	27
1.5.1 Boyuna Mukavemet	29
1.6 Tezde İzlenecek Yöntem.....	32

İKİNCİ BÖLÜM ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Literatür İncelemesi.....	34
--------------------------------	----

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL YÖNTEM

3.1. Elektromanyetik Dalgalar	38
3.2. Dalga Denklemi ve Uzayda İlerlemesi	39
3.3. Sınır Şartlarında Elektromanyetik Dalga Denklemi Çözümü	41
3.4. Fresnel Denklemleri	44
3.4.1. Paralel Polarizasyon (R_s mod)	45
3.4.2. Dik Polarizasyon	46
3.4.3. Yansıma ve İletim Katsayıları	47
3.5. Kırılma İndisi	49
3.5.1. Kompleks Kırılma İndisi	50
3.6. Metallerin Optik Özellikleri	51
3.7. Drude Model	52

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Stres Altında Metalin Dielektrik Katsayısı Değişimi	58
4.2. Kırılma İndisi Değişiminin Fresnel Denklemi Üzerine Etkisi	58
4.3. Farklı Gelme Açısı Durumunda Fresnel Denkleminin Hesaplanması ve Grafikler	60
4.4. Farklı Stres Değerleri İçin Fresnel Denkleminin Hesaplanması ve Grafikler.....	63

4.5. Yorumlar	65
---------------------	----

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ ve ÖNERİLER

KAYNAKÇA	68
----------------	----

ÖZGEÇMİŞ	II
----------------	----



SİMGELER VE KISALTMALAR

c	Işık hızı
E_R	Yansıyan EM dalganın genliği
E_i	Gelen EM dalganın genliği
n	Reel kırıcılık indisi
\tilde{n}	Kompleks kırıcı indisi
ϵ_0	Boşluğun elektrik duyarlık katsayısıdır
ϵ	Malzemenin elektrik duyarlığı
μ	Malzemenin manyetik duyarlılığı
σ	İletkenlik
κ	Sönümlenme katsayısı
R^2	Korelasyon katsayısı
v	Işığın iletken ortamdaki hızı
ω	Dış alanın frekansı
ω_p	Metalin plazma frekansı
θ_i	Işığın gelme açısı

TABLolar DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	Artık gerilim ölçümünde kullanılan başlıca yöntemler	26
Tablo 2	Geleneksel artık gerilme ölçüm tekniklerinin karşılaştırılması	27
Tablo 3	AISI4140 ve DUPLEX için deneysel verilere itere edilen Denklem 4.1 katsayıları	58
Tablo 4	AISI4140 ve DUPLEX malzemenin basınca bağlı kırıcılık indisleri	59
Tablo 5	AISI4140 ve DUPLEX malzeme için basınca bağlı Brewster açısı değerleri	62
Tablo 6	AISI4140 ve DUPLEX için farklı gelme açılarında basınca göre R_s/R_p oranı değerleri	64
Tablo 7	Tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerin avantaj ve dezavantajları	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Çekme gerilimi ve basma gerilimi	2
Şekil 2	Young Modülü'nün nasıl belirlendiğinin gösterimi	4
Şekil 3	Gemi inşa çeliğinin gerinim/gerilim ilişkisi	4
Şekil 4	Belirgin bir akma noktası olmayan malzeme için gerinim-gerilim eğrisi	5
Şekil 5	Metallerde çatlak oluşumunun ve büyümesinin şematik gösterimi	7
Şekil 6	Delik delme yöntemleri: (a) geleneksel delik delme yöntemi, (b) halka çekirdek yöntemi ve (c) derin delik yöntemi	15
Şekil 7	Kontur yöntemi şematik gösterimi	17
Şekil 8	Kontur yöntemi (a) orijinal gerilmeler, (b) kesmeden sonra gerilmemiş, (c) düz yüzeyi eski haline getirmek için gerilmeler	17
Şekil 9	Çatlak uyum yönteminin şematik gösterimi	18
Şekil 10	Katman çıkarma yöntemi	19
Şekil 11	Kesit yöntemi şematik gösterimi	20
Şekil 12	Bir kristal yapı içindeki radyasyon kırınımı şematik gösterimi	22
Şekil 13	Stres ölçümü için bir X-ışını kırınımı methodu şematik gösterimi	22
Şekil 14	Nötron kırınım yöntemi şematik gösterimi	23
Şekil 15	Ultrasonik yöntem kullanılarak çelikte elastik/plastik etki ölçümü şematik gösterimi	24
Şekil 16	Barkhausen gürültü analizi şematik gösterimi	25
Şekil 17	Gemilerdeki gerilmeler	28
Şekil 18	Çelik tekne ağırlığı dağılım grafiği	29
Şekil 19	Toplam ağırlık dağılım grafiği	30
Şekil 20	Sakin su durumu deplasman dağılımı	30
Şekil 21	Durgun suda dikey kesme ve boyuna eğilme	31
Şekil 22	Dalga bükme momentleri; dalga tepesi durumu (sarkma), dalga çukuru durumu (kamburlaşma)	31
Şekil 23	Dalga çukuru durumunda kesme kuvveti ve eğilme momenti şematik gösterimi	32

Şekil 24	Dalga tepesi durumunda kesme kuvveti ve eğilme momenti şematik gösterimi	32
Şekil 25	Elektromanyetik dalga	38
Şekil 26	Vakumda hareket eden bir düzlem harmonik elektromanyetik dalgadaki alan konfigürasyonu	41
Şekil 27	\vec{E} alanının gelme düzlemine dik olduğu durum için bir xy düzlem arayüzünde gelen yansıyan ve iletilen dalgaları tanımlayan şematik gösterimi	42
Şekil 28	\vec{E} alanının gelme düzlemine paralel olduğu durum için bir xy düzlem arayüzünde gelen, yansıyan ve iletilen dalgaları tanımlayan şematik gösterim	46
Şekil 29	Basınca bağlı dielektrik katsayısının deneysel ve hesaplanan değerleri	58
Şekil 30	AISI 4040 ve DUPLEX için basınca bağlı hesaplanan kırıcılık indisi	59
Şekil 31	AISI4140 malzeme için S ve P polarizasyona sahip gelen ışık açısına bağlı olarak yansıma oranları	60
Şekil 32	DUPLEX malzeme için S ve P polarizasyona sahip gelen ışık açısına bağlı olarak yansıma oranları	61
Şekil 33	AISI4140 ve DUPLEX malzeme için basınca bağlı Brewster açısı değişimi	62
Şekil 34	AISI4140 malzeme için basınca bağlı farklı gelme açılarında R_s/R_p değişimi	63
Şekil 35	DUPLEX malzeme için basınca bağlı farklı gelme açılarında R_s/R_p değişimi	64

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

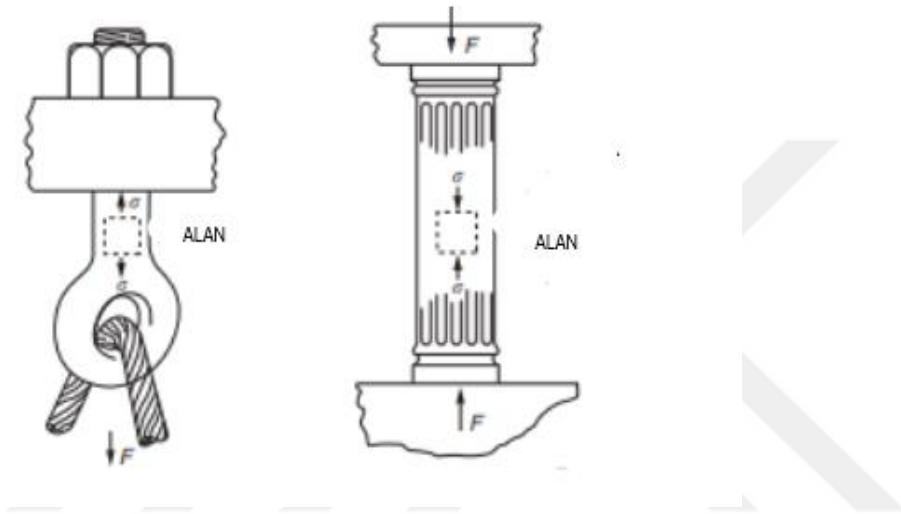
Gemiler ve deniz araçları, denizlerde çalışan metal yapılardır. Bu yapılar birçok büyük metal plakanın bütünleştirilmesiyle inşaa edilir. Büyük metal plakaların birleşim noktalarında yüksek basınçlar meydana gelebilir, bağlantı noktasındaki gerilim ve gerilme döngüsel yük deformasyonlarına veya mikro kırılmalara neden olur. Bunun sonucunda metalik yapıda bir metal yorgunluğu ortaya çıkar. Gemilerde metalik plakaların birleşim noktasındaki basınç, metalin Young Modülünden belirlenen eşik değerin üzerinde ise buna bağlı olarak metal yorulma süreci hızlanır. Metal levhaların birleşim noktasında gerinme ve gerilmeyi belirlemek için bazı teknikler olmakla birlikte, daha basit ve daha etkili yenilikçi bir çözüme ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, metal plakaların birleşme noktası etrafındaki gerilimi tespit etmek için kavramsal yeni bir optik yöntem önerilmiştir. Önerilen yeni yöntemin temeli, gerçek kırılma indisindeki değişikliğin, olay ortamı ile metal yüzeyi arasındaki Brewster açısının değerinde bir değişikliğe yol açmasıdır. Bu çalışmada, Lorentz-Drude denklemi çözülerek metalin kırılma indisi basıncın bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Teorik sonuçlar, optik yöntemeye dayalı yeni yöntemin, metal plakaların birleşme noktası etrafındaki basıncı veya gerilme oranını belirlemek için uygun olduğunu göstermektedir.

1.1. Metalik Yapılarda Gerilme ve Gerinim

Gerilme, birim alan başına kuvvet temelinde her türlü şekil değişiminde neden olan kuvveti karakterize eden nicelik olarak tanımlanır. Başka bir nicelik olan gerinim, ortaya çıkan deformasyonu tanımlar. Elastik bölgedeki bir malzeme için gerilimin gerinime oranı Young Modülü olarak adlandırılır. Gerilme ve gerinim yeterince küçük olduğunda, genellikle ikisinin doğru orantılı olduğu bu doğrusal oran küçük gerilim oranlarında daha genel olarak Hooke yasası olarak bilinir (Schweitzer, 2003; Young vd., 2010).

İngiliz fizikçisi Thomas Young (18.yy) için adlandırılan Young modülü (E), bazen elastisite modülü olarak da adlandırılır. Bir malzemenin uzunlamasına gerilim veya

sıkıştırma altında uzunluktaki değişikliklere dayanma yeteneğinin başka bir deyişle, malzemenin sertliğinin veya rijitliğinin bir ölçüsüdür. Gerilim malzemelerin deforme olmasına neden olur, ancak varolan gerilim kaldırıldıktan sonra malzeme önceki durumuna geri döner. Elastiklik malzemedeki deformasyon sürecinin tersine çevrilebilir bir özelliğidir (Pelleg, 2013). En bilindik gerilme çeşitleri çekme gerilmesi ve basma gerilmesidir.



Şekil 1. Çekme gerilimi ve basma gerilimi

Kaynak: (Ashby ve Jones, 2012).

Şekil 1’de basit çekme veya sıkıştırma (basma) gerilimine örnek olarak uçlarından pim eklemleri tarafından çekilen bir çekme elemanı ve sıkıştırmada bir yapıyı destekleyen bir sütun gösterilmiştir (Ashby ve Jones, 2012).

Çekme gerilmesi birim alan başına kesite uygulanan dik kuvvet olarak tanımlanır.

$$\sigma = \frac{F_{\perp}}{A} \quad (1.1)$$

Çekme gerinimi birim uzunluk başına uzamadır ve birimsiz bir niceliktir.

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.2)$$

Çekme gerilimi için Young modülü (E):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F_{\perp} / A}{\Delta l / l_0} \quad (1.3)$$

E : Young Katsayısı

F_{\perp} : Cisme uygulanan kuvvet

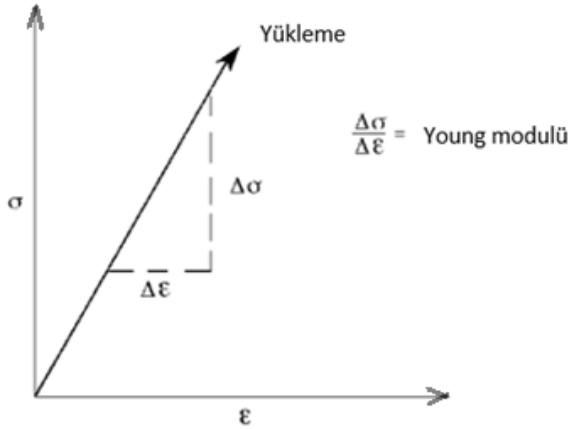
A : Kuvvetin uygulandığı birim alan

Δl : Cismin değişen uzunluğu

l_0 : Cismin başlangıç uzunluğu

olarak verilir (Young vd., 2010).

Young Modülünün birimi Gerilimin SI birimi pascaldır (N / m^2). Örnek olarak, yapı çeliği için young modülü $E_{\text{çelik}} = 2 \times 10^{11} N / m^2$, alüminyum için $E_{\text{alüminyum}} = 7 \times 10^{10} N / m^2$ 'dir (Young vd., 2010).



Şekil 2. Young Modülü'nün nasıl belirlendiğinin gösterimi

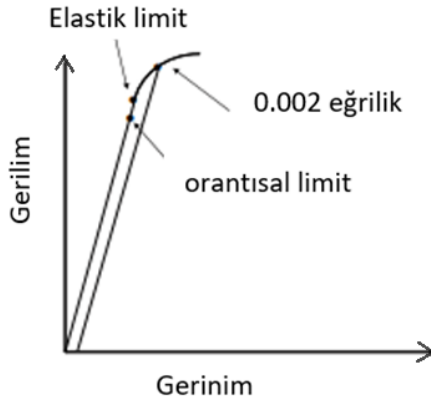
Kaynak: (Schweitzer, 2003)

Bir malzemenin elastik bölgede gerilim-gerinim ($\sigma - \varepsilon$) eğrisinin eğimi olan Young modülü, söz konusu malzemenin kalıcı olmayan deformasyonuna karşı direncinin bir ölçüsüdür. Metaller gibi kırılğan malzemeler, kauçuk gibi sünek malzemelerden daha dik eğime, böylece daha yüksek bir Young modüle sahiptir. Kalıcı deformasyon için gerilme gerinim eğrisinde gösterilen yüklenen malzemenin elastik bölgeden ve akma noktasından geçmesi plastik bölgeye girmesi gerekir. Malzemenin Young Modülü ne kadar büyükse malzeme o kadar serttir ya da elastik şekil değişimi o kadar küçüktür (Modulus of Elasticity, t.y.).



Şekil 3. Gemi inşa çeliğinin gerinim/gerilim ilişkisi

Kaynak: (Eyres, 2007)



Şekil 4. Belirgin bir akma noktası olmayan malzeme için gerinim-gerilim eğrisi

Kaynak: (Pelleg, 2013)

Gemilerde metalik plakaların birleşim noktasındaki basınç, metalin Young Modülünden belirlenen eşik değerin üzerinde ise metal yorulma süreci hızlanır (Öztürk ve Kurt 2022).

Operasyonlar sırasında çeşitli deniz yüklerine maruz kalan gemi yapıları, hizmet ömürleri boyunca yorulma nedeniyle mukavemet azalması yaşarlar. Bu nedenle, tasarım ve değerlendirme aşamalarında yorgunluğun hizmet ömrü tahmini gerçekleştirilmelidir (Kwon vd., 2013).

Gemi yapılarının yorulma analizi çok karmaşık bir problemdir. En önemli faktörler (Kozak ve Górski, 2011):

- Malzeme türü (yapısı, mekanik özellikleri, kimyasal bileşimi), yükleme modu (büyüklüğü, boyutu ortalama gerilmelerin etkisi), yapısal eleman geometrisi, çevresel koşulların etkisi vb.,
- Tüm gövde yapısına ve belirli elemanlarına (bölgeler, eklemler) uygulanan yüklerin kesin olarak belirlenmesindeki zorluklar, hem bileşenlerin yüklenmesi, yönleri ve hareket eşzamanlılığı,
- Özellikle gemide farklı koruyucu kaplama durumu farklı derecelerde çevresel etki nedeniyle farklı olaylara neden olabilen bölgeler,

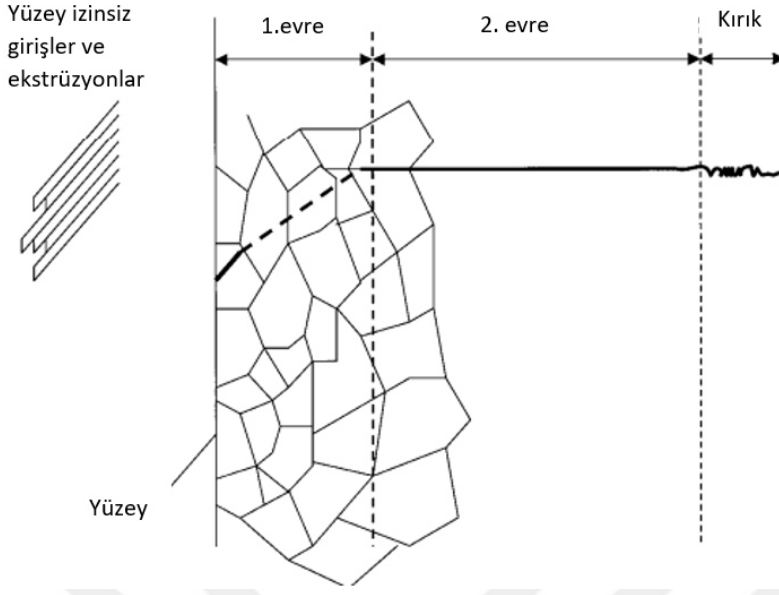
- Geometrik, teknolojik ve maddi çentiklerin etkileşimi.

Gemilerde, genel olarak, yüksek döngüsel gerilime maruz kalan tüm yapısal elemanlar yorulmaya eğilimlidir. Yorulma yüklemesi sebebi; dalgalar, itme kuvvetleri, dümen kuvvetleri, değişen yükleme koşulları ve yük yükleme olabilir. Yorulma mukavemetini etkileyen diğer faktörler ise malzeme, ortalama stres ve stres oranı, artık gerilim, kalite ve kusurlar, boyut ve plaka kalınlığı etkisidir (Fricke, 2017). Literatürde yorulmayı etkileyen bu faktörler çeşitli açılardan (malzeme, yapı, çevre gibi) ele alınmıştır (Cui, 2002; Kozak ve Górski, 2011). Literatürde mevcut kaynaklardaki faktörlerden bazıları aşağıda verilmiştir.

Malzeme türü (ör. Kırılgan dökme demir, sünek çelik, alüminyum, titanyum), işleme koşulları (ör. Yeniden ısıtma, soğuk biçim, sıcak dövme, soğuk ekstrüzyon, su verilmiş, tavllanmış), tanecik yapısı, boyutu ve temel malzeme özellikleri yorulma mukavemetini etkileyen önemli faktörlerdendir (Cui vd., 2010). Yorgunluk yüklemesine neden olan deniz yükleri; dalgalar, sevk kuvvetleri, dümen kuvvetleri, değişen yükleme koşulları ve kargo uygulamalarından kaynaklanır (Fricke, 2017).

Daimi bir yük etkisindeki malzemede, yorgunluk belli bir aşamadan sonra çatlak çekirdeği mikroskobik olarak başlar. Özellikle kaynaklarda bulunan bu mikro çatlaklar büyür ve makroskobik bir çatlak oluşturmak üzere birleşir ve makro çatlak kritik bir yapısal başarısızlık durumuna gelir. Metallerdeki yorulma çatlakları genelde malzemenin yüzeyinden başlar (Cui vd., 2010).

Çatlak oluşumunun aşamaları ise Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Metallerde çatlak oluşumunun ve büyümesinin şematik gösterimi

Kaynak: (Cui, 2002)

Şekil 5, çatlak oluşumunun ve metallerde büyümenin şematik gösterimidir. I. aşama çatlak büyümesidir. Geçici bir dönemden sonra, II. aşamada çatlak büyümesi uygulanan stress doğrultusunda gerçekleşir. Son aşamada çatlak dengesiz hale gelir ve kırılma meydana gelir (Cui, 2002). Bu kırılmalar, büyük felaketlere sebep olabilir.

Gemi yapılarında yorulma mekanizmasını anlamamıza, kullanılan malzemenin özelliği, yüzey kalitesi, artık gerilme ve çevresel etkiler gibi yorgunluk ömrünü ve yorgunluktan oluşan çatlakların büyümesini etkileyen teknik koşulları göz önüne almak yardımcı olmaktadır. Günümüzde yüksek mukavemetli çelik, kullanımı giderek arttığından, bunun yapının daha yüksek gerilime dayanabilmesini sağladığı, fakat bunun stres genliğini arttırdığı, bu sebeple yüksek mukavemetli çelikten imal edilen gemilerde yorgunluk arızasının daha muhtemel olduğu belirtilmekle birlikte özellikle büyük gemiler için oluşan hasarın başlıca sebebidir (Cui vd., 2010).

Pahalı onarımları ve birtakım felaket olaylarından korunmak için ilgili arızadan kaçınılmalı veya en azından kontrol edilmelidir. Yorgunluk, “dalgalanan gerilmelere ve gerginliklere maruz kalan bir malzemede hasar birikimi döngü süreci” olarak

tanımlanmaktadır. Uygulanan yükün hemen arızaya yol açmaması fakat belli bir sayıda yük dalgalanması yaşandıkça birikmiş hasarın kritik eşiği aşmasıyla birlikte arıza meydana gelmesi yorgunluğun en önemli özelliğidir (Fricke, 2017). Yorulma ömrünü ve kırılma mukavemetini azalttıkları için, bir parçanın yüzeyindeki artık çekme gerilmeleri genellikle istenmeyen bir durumdur. Üretilen ürünlerdeki artık çekme gerilmeleri de belirli bir süre boyunca gerilme çatlama veya gerilme-korozyon çatlama yol açabilir (Kalpakjian ve Schmid, 2014).

1.2. Metalik Yapılarda Elektronik Yapı

Bu bölümde metallerin elektronik yapısını anlamada en kullanışlı model olan Drude Modelden bahsedilmektedir. İletkenlerin dielektrik katsayısı ile kırılma indisi arasında ilişki kuran Lorentz-Drude modeli, metallerin optik özelliklerini belirlemede en kullanışlı model olarak bilinmektedir. Lorentz-Drude modeline göre, iletkenin plazma frekansındaki gerilim veya baskı gibi harici olarak indüklenen herhangi bir değişiklik, metalin gerçek kırılma indisinde diferansiyel bir değişikliğe neden olur (Öztürk ve Kurt 2022)

Metaller, metal atomlarının değerlik elektronlarından kaynaklanan büyük yoğunlukta serbest elektron sayesinde güçlü serbest elektron etkileri gösterir. Metallerin serbest elektron modeli P. Drude tarafından 1900 yılında önerilmiştir (Fox, 1997). Drude Modeli, oldukça basit bir model olmasına rağmen metallerin elektriksel iletkenliğini, ısıl iletkenliğini ve optik özelliklerini tanımlayan ilk gerçekçi model olarak bilinir (Drude, 1900).

Metallerde elektronlar çekirdeğe bağlı değildir ve metalik bir kafesin potansiyel enerji dağılımı, elektronların bir çekirdekten diğerine atlamasını enerjik olarak uygun kılar. Bu delokalize elektronlar, çekirdek kafesi etrafında serbestçe akan “elektron denizi” olarak bilinir ve metallerin elektriği iletmesine izin verir. Drude modelindeki serbest elektron yoğunluğu, metal atomlarının yoğunluğunun değerlikleriyle çarpımına eşittir. Metallerin yüksek elektriksel iletkenliklerinin sebebi bu çok büyük serbest elektron yoğunluklarıdır (10^{28} - $10^{29} m^{-3}$) (Almog vd., 2011).

Drude modeli metallerin ısı ve elektriği iyi iletmelerinin ve iyi yansıtıcı olma nedenlerini açıklamakta da başarılı bir modeldir (Fox, 1997). Metallerin tipik optik özelliği parlak olmalarıdır. Işığın metaldeki serbest elektronlarla etkileşiminden kaynaklanan çok yüksek yansıma katsayılarından oluşan bu parlak görünüşleri eskiden beridir gümüş ve alüminyum gibi metallerin ayna imalatında kullanılmasına yol açmıştır.

Bu genel davranış tüm metallerde görülür. Morötesi spektral bölgede ki dalga boyuna karşılık gelen Plazma frekansı adı verilen tipik bir kesme frekansının altındaki tüm frekanslar için (kıızılötesi, görünür) güçlü bir yansıma, morötesi dalga boylarında iletim vardır. Bu etkiye metallerin ultraviyole iletimi denir. Bazı metallerin kendine has renkleri vardır (bakır pembemsi, altın sarımsı vb.). Bu renkler yansımaya neden olan serbest taşıyıcı etkilerine ve oluşan bantlar arası (interband) elektronik geçişlerden kaynaklanmaktadır (Fox, 1997).

Işığın madde ile etkileşimi Maxwell denklemleri olarak Hendrik Lorentz tarafından yapılmıştır. Tamamen klasik bir tanım olmasına rağmen, Lorentz osilatör modeli 1900'lerde kuantum mekaniğine uyarlanmıştır ve bugün hala önemli ölçüde kullanılmaktadır. Lorentz tarafından; elektronun, atomun çekirdeğine Hook yasasına göre yay benzeri bir kuvvetle bağlı olduğunu öne sürülmüştür. Malzemeye uygulanan bir elektrik alanı daha sonra elektronun yükü ile etkileşecek ve yayın "gerilmesine" veya "sıkıştırılmasına" neden olacak ve bu da elektronu salınım hareketine sokacaktır (Almog vd., 2011).

$$\frac{\tilde{\epsilon}}{\epsilon_0} = 1 + \frac{\omega_p^2}{(\omega_0 - \omega^2) + j\omega\gamma} \quad (1.4)$$

Denklem 1.4'e göre, “ ϵ ” ortamın elektrik geçirgenliği, “ ϵ_0 ” vakumun elektrik geçirgenliği, “ ω_0 ” osilatörün rezonans (açısal) frekansı, “ ω ” osilatörü çalıştıran zamanla değişen elektrik alanının açısal frekansı, “ ω_p ” malzemenin plazma frekansıdır.

Metaller ve katkılı yarı iletkenler önemli sayıda serbest elektron içerir. Drude modelinde metallerde bulunan yüksek yoğunluklu serbest elektronlar, adından da

anlaşılacağı gibi herhangi bir atoma bağlı olmayan elektronlardır ve bu nedenle elektromanyetik dalgalar ile etkileştirilerek yer değiştirdiklerinde herhangi bir geri çağırıcı kuvvete maruz kalmazlar. Bu sebeple Lorentz modelindeki rezonans frekansı Drude modelinde sıfır olarak kabul edilir ($\omega_0 = 0$) ve model şu hale gelir (Almog vd., 2011; Fox, 1997).

$$\frac{\tilde{\epsilon}}{\epsilon_0} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - j\omega\gamma} \quad (1.5)$$

Metallerin serbest elektron modeli Paul Drude'a atfedilir ve bu nedenle Lorentz modelinin serbest elektron sistemlerine uygulanmasına genellikle Drude-Lorentz modeli denir. Lorentz modeli, $\omega_0 = 0$ ayarlamamız dışında baştan sona tamamen geçerlidir (Fox, 1997). Lorentz-Drude modeli ayrıntılı olarak bilgi Bölüm 3'de anlatılmıştır.

1.3. Fresnel Denklemi

Kırılma indisleri farklı optik ortamların ara yüzlerinde ışığın davranışını belirleyen Fresnel denklemleri Fransız fizikçi Augustin Jean Fresnel (d. 10 Mayıs 1788, ö. 14 Temmuz 1827) tarafından bulunmuştur. Işığın yansımaları ve iletimini belirleyen bir dizi denklemden oluşan Fresnel denklemleri, klasik optiğin temel denklemleri arasında yer alır. Fresnel denklemleri gelen yansıyan ve geçen dalgaların genliklerini verir. Veriler sadece kırılma indisindeki değişime ve yüzeye geliş açısına değil, gelen ışığın polarizasyonuna da bağlıdır. Fresnel Denklemleri kırılma indisi farklı herhangi iki ortam arayüzü için uygulanabilir ve yansıma geçme oranları hakkında bilgi verebilir (Pedrotti vd., 2017).

1.4. Metalik Yapılarda ve Gemilerde Artık Gerilim Kaynaklı Stress ve Yapı Bozukluğu Tespit Yöntemleri

Gemiler büyük metalik yapılardır. Metalik yapılardaki metal yorgunluğu yaklaşık 200 yıldır çalışılan bir konu olmasına ve teorik modeller oluşturulmasına rağmen, gerçek durumları tam olarak karşılayamamaktadır (Huang vd., 2013). Bu yüzden metalik yapılardaki stres bölgelerinin belirlenmesi için yenilikçi düzeneklere ihtiyaç vardır. Mevcut geleneksel sistemler genel olarak x-ray ve ultrasonik tabanlıdır. Bu sistemlerin genel yapıya uygulama zorlukları içermekte ve maliyetleri yüksektir. Bu yüzden pratik ve hızlı çözüm üretebilecek sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde bütünsel olarak yorgunluğu ölçen optik tabanlı sistemlere rastlanmamakla birlikte, artık stresi ölçen optik tabanlı çalışmalara rastlanmıştır (Nelson, 2010; Huang vd., 2013; Yoshida vd., 2016). Artık gerilim, malzemelerin mukavemeti, plastisitesi ve yüzey bütünlüğü gibi mekanik özelliklerini etkileyen ana faktörlerden biridir (Guo vd., 2021).

1.4.1. Artık Gerilim Ölçüm Yöntemleri

1860'lı yıllarda yorulma mukavemetine dayanan yapıların doğrulanması önerilmiş ve artık gerilimin tren akslarının çatlamasına sebep olduğu Wohler tarafından belirtilmiştir (Huang vd., 2013). Artık gerilme, çevresiyle dengede ve sabit kalan bir malzeme içindeki gerilme olarak ifade edilebilir. Uygulanan streslerin etkisi, sıcaklık değişimi veya kimyasal etkiler nedeniyle düzgün olmayan elastik veya elastoplastik deformasyondan kaynaklanır ve her zaman imalat, birleştirme veya ısıl işlem sırasında üretilir. Artık gerilim, bir malzemenin performansına ve bir bileşenin ömrüne çok zararlı olabilir (Huang vd., 2013). Artık gerilmelerin kökeni aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Rossini vd., 2012):

- Diferansiyel plastik akış (differential plastic flow),
- Diferansiyel soğutma oranları (differential cooling rates),
- Hacim değişimleri ile faz dönüşümleri (phase transformations with volume changes) vb.

Yorulma, sürünme, aşınma, stres korozyonu çatlaması, kırılma, burkulma ve birçok nedenden dolayı oluşan arızalarda ciddi payı olan artık gerilmeler, bir parçayı işledikten sonra ya da ısıl işlemde sonra sıklıkla bozulma gibi boyutsal dengesizliğe neden olur.

Artık gerilmeler, dış yüklerden arınmış bir parçada bulunmaktadır. Tüm üretim süreçlerinde meydana geldiğini söylemek mümkündür. Artık gerilmeler uygulanan yüklere eklenirler. Artık gerilmeler gizlidir, dengeyi sağlarlar ve varlıklarına ilişkin hiçbir dış kanıt sunmazlar (Prime, 1999). Artık gerilmeler uyumsuzluklardan kaynaklanırlar. Bu uyumsuzlukların birçok kökeni ve uzunluk ölçeği olabilir. Tip I olarak adlandırılan sürekli uzun menzilli gerilmeler genellikle en çok endişe duyulan konulardır. Tip II olarak adlandırılan taneden taneye anizotropiden veya özelliklerdeki varyasyondan kaynaklanabilecek tane ölçeğindeki gerilmeler veya kusurlardan, çukuklardan ve çökeltilerden kaynaklanabilen tane ölçeği altı gerilmeler (Tip III) genellikle ihmal edilir (Withers vd., 2008). Artık gerilim, malzemelerin mukavemeti, plastisitesi ve yüzey bütünlüğü gibi mekanik özelliklerini etkileyen ana faktörlerden biridir. Örneğin, çekme gerilimi koşulları malzeme performansını veya bileşen ömrünü olumsuz etkileyebilirken, basınç gerilimi koşulları malzeme yorulma mukavemetini iyileştirebilir (Guo vd., 2021).

Artık gerilimi ölçmek için kullanılan çeşitli yöntemler arasından seçim yaparken, saha fizibilitesi ve uyarlanabilirliği, masraflar ve verimlilik vb. gibi bileşenin özel koşulları tamamen dikkate alınmalıdır. Artık gerilme gevşemesi tarafından doğrudan uyarılan elastik deformasyonu ölçmek için mekanik açığa çıkarma yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntemler çeşitli çalışma koşullarına uygulanabilen, son derece doğru ve güvenilir ölçümler sunarken, aynı zamanda ölçülen nesneye zarar verebilirler (Huang vd., 2013).

Artık gerilme bilgileri, mühendislik yapılarında önemlidir. Çünkü artık gerilmeler, büyük arızalara sebep olmaktadır. Artık gerilimin gelişimi, genellikle doğrusal olmayan talaş kaldırma, faz dönüşümleri ve birleştirilmiş mekanik ve termal problemler gibi doğrusal olmayan malzeme davranışını içerir. Mevcut tahmin yetenekleri ile problemlerin çoğu için artık gerilmeler hakkında yeterli bilgi vermek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, artık gerilimi ölçme yeteneği iki amaca ulaşabilmek için kritiktir (Prime, 1999):

- 1) Artık gerilime bağılı arızaları en aza indirmek,
- 2) Modelleri doğrularak tahmine dayalı yeteneklerin geliştirilmesine yardımcı olmak.

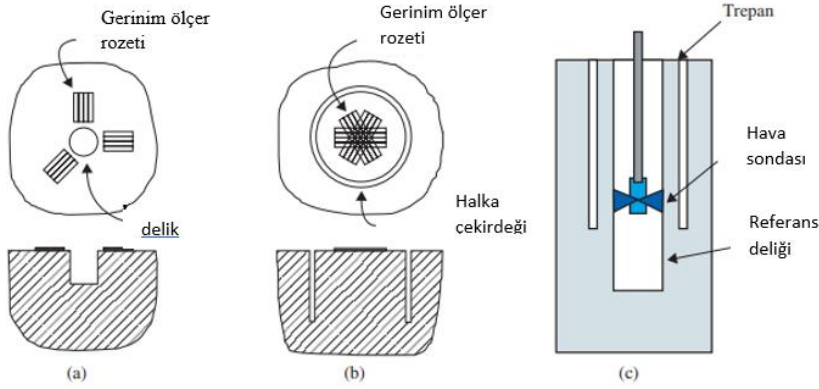
Genellikle imalat işleminin sonucu, metalik parçalarda bulunan artık gerilimlerin ölçülmesine yönelik yöntemler mevcut olmakla birlikte stress asla ölçülen miktar değildir. Çünkü stres bir metale uygulanan ve sadece uygulama sürecinde ölçülebilen miktardır. Artık gerilimi belirlemek için sürekli ölçülen parametre, elastik gerilim ya da doğrudan metaldeki mevcut artık gerilmeden kaynaklanan elastik gerilim veya mevcut artık gerilmenin bir kısmının veya tamamının hafifletilmesinden kaynaklanan elastik gerilim değişimidir (Totten vd., 2002). Artık gerilim ölçme yöntemlerinin gelişimi 1930'lu yıllara kadar dayanır. Sonraki yıllarda birçok yöntem geliştirilmiştir. X-ışını kırınımı, nötron kırınımı, delik delme ve katman kaldırma yaygın kullanılan artık gerilme ölçme tekniklerindedir. Artık gerilim ölçme yöntemleri numunede tahribata neden olup olmamasına göre iki kategoride incelenebilir (Prime, 1999; Withers vd., 2008; Huang vd., 2013) ve bu sınıflandırma tam yıkıcı, yarı-yıkıcı veya tahribatsız yöntemler olmak üzere üç kategoride de ele alınabilir (Leggatt vd., 1996; Rossini vd., 2012). Tam yıkıcı yöntemler kesme, dilimleme ve blok kaldırma ve katmanlamayı içerirken, yarı yıkıcı yöntemler delik delme, trepanlama ve derin delik delme yöntemlerini içerir. Tahribatsız yöntemler arasında ise X-ışını ve nötron kırınımı, ultrasonik ve elektromanyetizma bulunur (Leggatt vd., 1996). Bu ölçme tekniklerinin genel yapıya uygulama zorlukları içermesi ve uygulama maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı, daha basit ve daha etkili yenilikçi bir çözüme ihtiyaç vardır.

Mekanik olarak açığa çıkan gerilim için gelişmiş optik algılama geleneksel gerinim ölçer ölçümlerine göre, basit, kullanışlı ve ekonomik, temassız ve yüksek hassasiyetli ölçüm sağlar, çok çeşitli işleme geometrilerine ve boyutlarına uyarlanabilir. Ayrıca, optik algılama, tam alan deformasyon bilgisi sağlayabilir. Ayrıca, mekanik salma ölçümlerinden kalan gerilim değerlendirmesinin doğruluğunu geliştirmek için bazı ek veriler kullanılabilir (Huang vd., 2013).

Tahribata Neden Olan Yöntemler/Mekanik Yöntemler (Tam Yıkıcı, Yarı Yıkıcı)

Tahribata neden olan yöntemlerden bazıları tam bazıları yarı tahribata neden olur. Yarı yıkıcı yöntemler, orijinal ölçüm noktasına eşdeğer konumlar kullanılabilirdiği sürece bir dereceye kadar esnekliğe izin verir (Leggatt vd., 1996). Delik delme yöntemi, kesit alma, halka çekirdek, çatlak uyumu ve katman kaldırma gibi yöntemler yarı ve tam tahribatlı yöntemlere örnektir. Bu tekniklerden blok kesitleme, dilme, katman çıkarma ve delik delme gibi bazıları kabul görmüşken, kontur yöntemi ve derin delik yöntemi gibi diğerleri, laboratuvarında daha az dikkat çeken yeni tekniklerdir (Withers vd., 2008). Tahribata neden olan yöntemler mekanik yöntemleri veya mekanik açığa çıkarma yöntemleri olarak da ifade edilebilir (Rossini vd., 2012). Mekanik açığa çıkarma yöntemleri, artık gerilimi serbest bırakmak için bileşeni bölgesel olarak ayırır veya bölerek hasara neden olur (Huang vd., 2013).

Mekanik stres ölçüm yöntemleri, artık gerilmelerin oluşumu esnasında ya da sonrasında, gerilimlerin gevşemesine imkan vermek için kasıtlı olarak materyali çıkararak bileşen bozukluğundaki değişikliklerin izlenmesine dayanır. Başka bir deyişle, numuneden malzeme çıkarılırken artık gerilimlerin serbest kalmasıyla oluşan deformasyonların ölçümüne dayanır. Bu yöntemlerden eğrilik ölçümleri, kaplamalar ve tabakalar içindeki gerilmeleri belirlemek için sıklıkla kullanılır. Diğer mekanik stres ölçüm yöntemi ise delik delme metodudur. Artık gerilmeler içeren bir numunenin bozulmamış bölgeleri, lokal olarak işlendiğinde farklı bir şekle gevşeyecek ve böylece artık gerilimin geriye doğru hesaplanması için veri sağlayacaktır. Deliği kademeli olarak derinleştirerek gerilimdeki değişimi derinliğe göre çıkarmak mümkün olsa da, çapa eşit bir derinliğin çok ötesinde güvenilir ölçümler elde etmek zordur.



Şekil 6. Delik delme yöntemleri: (a) geleneksel delik delme yöntemi, (b) halka çekirdek yöntemi ve (c) derin delik yöntemi.

Kaynak: (Schajer ve Ruud, 2013)

Delik Delme Yöntemi

1934 yılında Mathar tarafından geliştirilen delik delme yöntemi artık gerilmeyi ölçmede kullanılan popüler yöntemlerden biridir. Bu yöntemin teorisi Soeteve Rendler vd. tarafından kurulmuş ve uygulama döneminde daha da geliştirilmiştir. Ölçümün mantığı, numune yüzeyine oldukça hassas bir gerinim rozeti yerleştirmektir ve ardından rozet merkezine mekanik olarak bir delik açılır. Malzemenin kaldırılması, gerinim rozeti yöntemiyle ölçülen dairesel delik etrafındaki bölgede bir gerilme gevşemesine neden olacaktır. Önceki denge durumunu yok edecek ve malzeme deformasyonunu çevreleyen yeni bir gerilim dağılımı elde edilecektir (Huang vd., 2013).

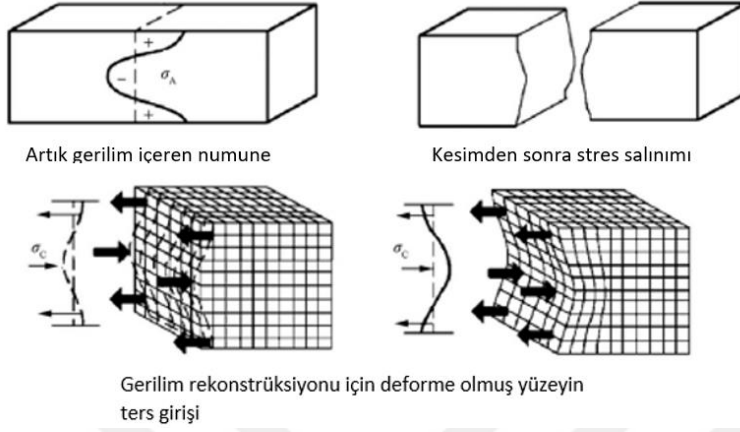
Delik delme yöntemi nispeten basittir, çok az hasara neden olur ve etkili, son derece hassas, uygulanması pratik ve çok çeşitli mühendislik uygulamalarında artık gerilmeyi değerlendirebilir. Yöntem artımlı delik delme adımlarını kullanarak derinliğe göre değişen artık gerilimi ölçmek için uygundur. Sınırlı delik geometrisi aralığı, özel ölçü rozet tasarımı, delik delme işlemi sırasında doğru hizalama ihtiyacı ve kullanılan gerinim ölçerin uzunluk aralığında ortalaması alınan sınırlı gerinim verileri yöntemin dezavantajıdır. Son zamanlarda, fotoelektrik teknolojisinin gelişmesiyle, artık gerilimi ölçmek için gelişmiş

optik sensörler bu tür mekanik açığa çıkarma yöntemleriyle birleştirilmiştir. Optik yöntemler çok daha karmaşık ölçümler yapabilmekte ve tam alan deformasyon verileri ve temassız, geliştirilmiş doğruluk elde etme avantajlarına sahiptir. Delik delme yöntemleri aşağıda verilmiştir (Huang vd., 2013):

- Gerilme Ölçer Rozet Delik Delme
- Moire' İnterferometri Delik Delme
- Dijital Görüntü Korelasyonu Delik Delme
- Lazer Benek İnterferometrisi Delik Delme
- Holografi Delik Delme

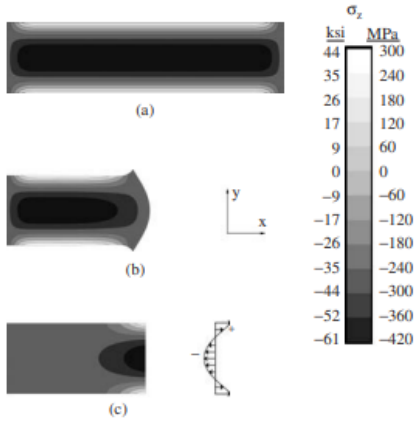
Yarı tahribatlı yöntemdir. Kalınlık boyunca kalan gerilme dağılımının büyüklük, yön ve anlamda ölçülmesini sağlayabilir. Doğru ve güvenilir, standart test prosedürleri ve uygun pratik uygulama avantajlarına sahiptir. Numunede oluşan hasar küçük, delinmiş delikte bölgeseldir ve genellikle tolere edilebilir veya onarılabilir. Artık gerilimlerin ölçüleceği yere küçük bir delik (yaklaşık 1.8 mm çapında ve yaklaşık 2.0 mm derinliğe kadar) yerleştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Deliğin delinmesi nedeniyle kilitlenen artık gerilimler serbest bırakılır ve yüzeydeki karşılık gelen gerinimler uygun gerinim ölçerler kullanılarak ölçülür. Delik delme yöntemi, diğer artık gerilim ölçüm tekniklerine göre genel olarak tüm malzeme gruplarına uygulanabilir. Öncelikle malzemeler izotropik olmalı ve elastik parametreleri bilinmelidir. İkinci olarak, analiz edilen malzemeler işlenebilir olmalıdır, yani deliğin delinmesi ölçülen gerinime zarar vermemelidir (Rossini vd., 2012).

Kontur Yöntemi



Şekil 7. Kontur yöntemi şematik gösterimi

Kaynak: (Guo vd., 2021)



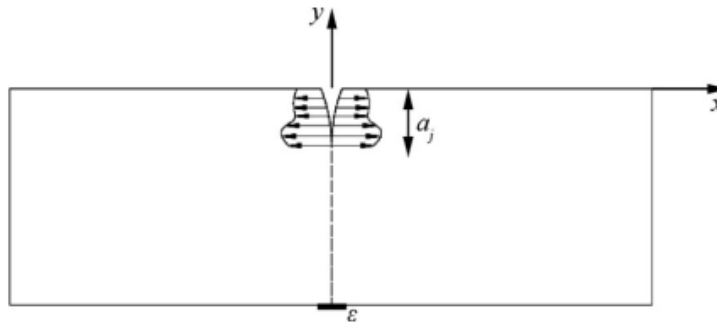
Şekil 8. Kontur yöntemi (a) orijinal gerilmeler, (b) kesmeden sonra gerilmersiz, (c) düz yüzeyi eski haline getirmek için gerilmeler

Kaynak: (Schajer ve Ruud, 2013)

Katı mekaniğine dayanan kontur yöntemi, bir numunenin dikkatlice iki parçaya kesilmesini ve artık gerilimin yeniden dağılımından dolayı ortaya çıkan deformasyonun ölçülmesini içeren bir deney yoluyla artık gerilimi belirler. Ölçülen yer değiştirme verileri,

numunenin sonlu eleman modelini içeren bir analiz yoluyla artık gerilmeleri hesaplamak için kullanılır. Analizin bir parçası olarak, ölçülen deformasyon, modele bir dizi yer değiştirme sınır koşulu olarak uygulanır. Sonlu eleman modeli, benzersiz bir sonuç sağlamak için malzemenin sertliğini ve parça geometrisini hesaba katar. Çıktı, ölçüm düzlemine normal olan artık gerilimin iki boyutlu bir haritasıdır. Kontur yöntemi, özellikle geleneksel noktasal ölçüm teknikleri kullanılarak haritalanması zor (veya yavaş) olan karmaşık, uzamsal olarak değişen artık stres alanları için yararlıdır. Örneğin, kaynaklara özgü kalıntı gerilimin karmaşık uzaysal değişimleri, kontur yöntemi kullanılarak iyi şekilde ortaya konulabilir. Kontur yöntemi ölçümleri tipik olarak bir telli elektrik deşarj makinesi (EDM) kullanılarak kesilebilen metalik parçalar üzerinde gerçekleştirilir. Belirli bir boyut kısıtlaması yoktur, ancak enine kesitte 5 mm'den küçük parçalar üzerinde ölçümler yapmak aşırı hassasiyet gerektirir. Parçanın bir sonlu eleman modeli kullanılarak karmaşık geometrinin hesaba katılmasından dolayı numunenin şeklinde herhangi bir kısıtlama yoktur (Schajer ve Ruud, 2013).

Çatlak Uyum Yöntemi (The Crack Compliance Method)



Şekil 9. Çatlak uyum yönteminin şematik gösterimi

Kaynak: (Guo vd., 2021)

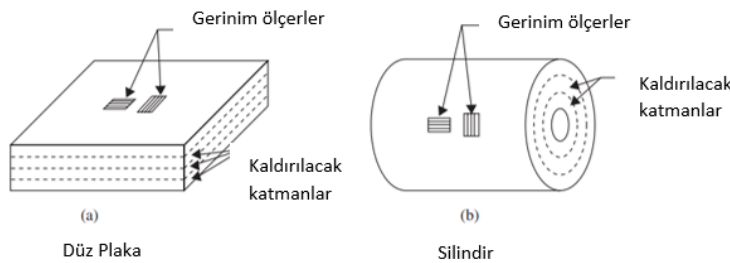
Diğer bir mekanik ölçüm yöntemi çatlak uyum yöntemidir. Çatlak uyum yönteminde artık gerilme, çatlak uzunluğu bilinir ve artık gerilmeyi hesaplamak için ölçülen gerinim kullanılır. İlk defa 1971 yılında Vaidyanathan ve Finnie tarafında tanıtılmıştır (Prime, 1999). Yöntemde, çatlak çevresindeki gerilme gevşemesini izlemek için malzemeye küçük bir yarık açılır. Bu yöntemin delik delme yöntemine göre avantajı, tüm numune derinliği boyunca

stres profilini değerlendirebilmesi, yüzeye yakın gerilimler için veri sağlayan yüzey gerinim ölçümü ve daha derin gerilimler için veri sağlayan geri gerinim ölçümü sağlamasıdır. Bununla birlikte, delik delme yöntemi, üç düzlem içi gerilim bileşeninin tümünü sağlarken, çatlak uyum yöntemi yalnızca kesme yüzeyine dikey olan artık gerilme bileşenlerini sağlar. Diğer gerilim bileşenlerini bulmak için ek kesimler yapılması gerekir (Huang vd., 2013).

Halka Çekirdek Yöntemi (Ring Core Method)

İlk kez 1951 yılında Milbradt tarafından önerilmiştir. Yöntem, malzemeyi çevreleyen dairesel yarığın kesilmesinden kaynaklanan merkezi bir alandaki deformasyonun ölçülmesini içerir. Delik delme ve çatlak uyum yöntemleri gibi, halka çekirdek yöntemi de üç boyutlu artık gerilmeleri değerlendirmek için kullanılabilir. Ayrıca, bu yöntem optik yöntemle birleştirilmiştir ve son derece küçük/mikro bölgelerdeki artık gerilimi bulmak için uygulanmıştır. Halka çekirdek yöntemi, çok daha büyük yüzey gerilmeleri sağlaması bakımından delik delme yöntemine göre avantajlıdır. Bununla birlikte, numuneye çok daha fazla zarar verdiği ve pratikte uygulanması çok daha az kullanışlı olduğu için yöntem daha az kullanışlıdır (Huang vd., 2013).

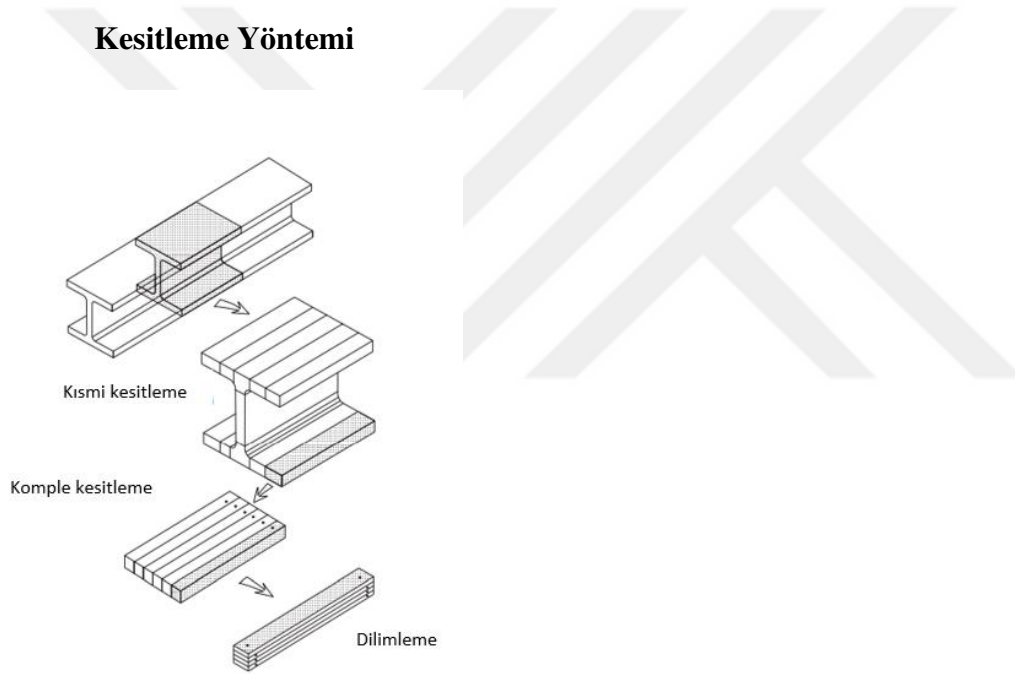
Katman Kaldırma Yöntemi



Şekil 10. Katman çıkarma yöntemi

Kaynak: (Schajer ve Ruud, 2013)

Katman kaldırma yöntemi bir malzeme katmanının (artımlı) kaldırılmasının neden olduğu eğrilik değişikliğinin gözlemlenmesini içerir. Malzemelerin numune yüzeyinden kaldırılması, kimyasal aşındırma veya mekanik öğütme ile gerçekleştirilebilir. Artık gerilimin ilk dağılımı, Michelson interferometrisi, saçak projeksiyon yöntemi ve 3D DIC gibi yüksek hassasiyetle gelişmiş optik algılamaya ile gerçekleştirilebilen eğrilik ölçümlerinden elde edilebilir. Yöntem ilk olarak bir yuvarlak çubuğun artık gerilmesini ölçmek için uygulanmıştır. Katman kaldırma yöntemi, artık gerilmeler derinlikle değiştiği bilinen, ancak yüzeye düzgün bir şekilde paralel olması gereken düz plaka ve silindirik numuneler için uygundur (Huang vd., 2013).



Şekil 11. Kesit yöntemi şematik gösterimi

Kaynak: (Schajer ve Ruud, 2013)

Kesitleme yöntemi, yapısal malzemelerdeki artık gerilmeleri ölçmek için onlarca yıldır kullanılmaktadır ve numunenin parçaları kesilerek iç gerilmelerin hafifletilmesi ilkesine dayanmaktadır. Yalnızca boyuna gerilmelerin (tek eksenli olarak dağıtılmış) önemli olduğu durumlarda en iyi şekilde uygulanır ve enine gerilmelerin ihmal edilebilir olduğu varsayılarak analizi basitleştirir. Bir plakanın kalınlığı boyunca artık gerilim dağılımı, testere ile kesilen parçaların "dilimlenmesinden" sonra gerilim okumalarındaki değişikliklerden

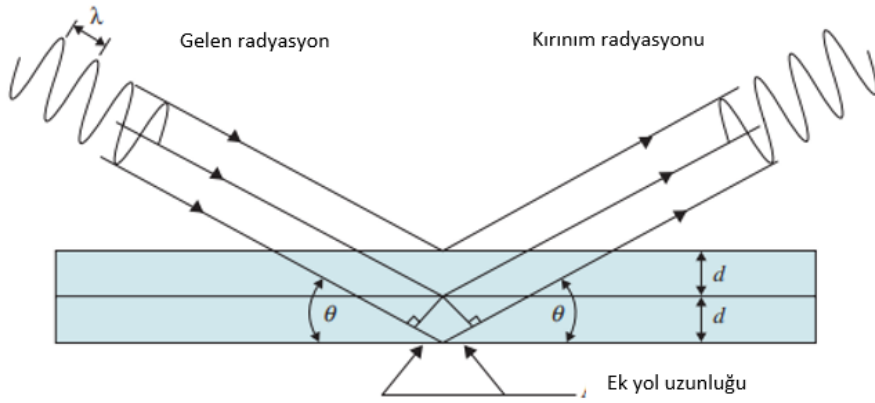
belirlenebilir. Araştırmacılar, artık gerinimi değerlendirmek için optik yöntemlerle birleştirilmiş kesit yöntemleri ortaya koymuştur. Numunenin hazırlanmasında ve ölçüm prosedüründe gerekli özenin gösterilmesi halinde, yöntemin yeterli, doğru ve ekonomik olduğu kanıtlanmıştır. Bununla birlikte, kesitleme yöntemi numunede geri dönüşü olmayan bir tahribat yaratır, bu nedenle sadece ince plakalar gibi belirli numuneler için kullanılır (Huang vd., 2013).

Derin Delik Yöntemi

Derin delik yöntemi hem delik delme hem de halka-çekirdek yöntemlerinin elemanlarını birleştiren bir başka varyant yöntemdir. Numunenin derinliklerine bir delik açılmasını ve daha sonra çevre malzeme aşırı renk alırken çap değişimini ölçmeyi içerir. Yöntemin ana özelliği, derin iç gerilmelerin ölçülmesini sağlamasıdır. Örnekler oldukça büyük olabilir. Örneğin; birkaç ton ağırlığında çelik ve alüminyum dökümler. Daha büyük bir ölçekte, derin delik yöntemi genellikle büyük kaya kütlelerindeki gerilmeleri ölçmek için kullanılır (Schajer ve Ruud, 2013).

Tahribatsız Yöntemler

Tahribatsız teknikler metalin kristal kafesindeki boyutu veya kristal kafes boyutundan etkilenen fiziksel parametreleri ölçer. Katı bir metal bileşen üzerine akma mukavemetinden daha düşük bir gerilimle sonuçlanan mekanik bir kuvvet uygulandığında, o bileşen elastik olarak deforme olur ve elastik olarak gerinir. Bu elastik gerinim, atomik kafes boyutunda bir değişikle sonuçlanır ve bu boyut veya değişiklik, tahribatsız stres ölçüm prosedürleri ile ölçülür (Ruud, 2002: 111; Totten vd., 2002). Tahribatsız yöntemler fiziksel tespit yöntemleri (X-Ray kırınımı, manyetikler, ultrasonik ve Raman yöntemleri olarak ifade edilebilir (Huang vd., 2013). Tahribatsız yöntemler, malzeme veya test parçalarında işleme, hizmet ömrü ve onarım yoluyla oluşan artık gerilimin gelişimini izleme potansiyeline sahiptir.

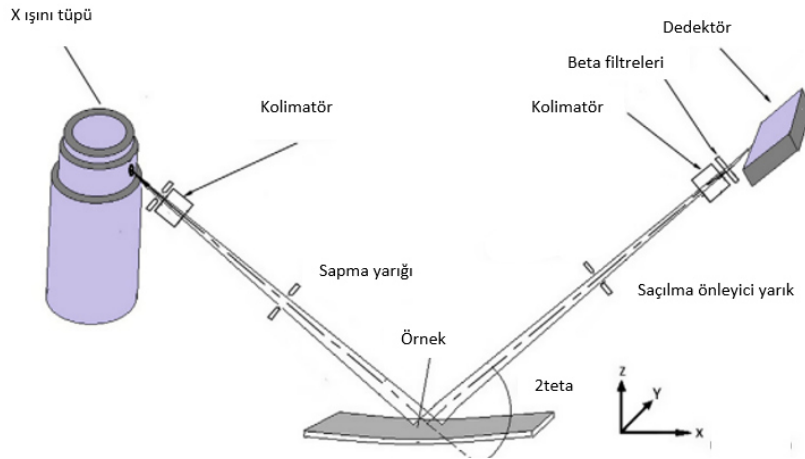


Şekil 12. Bir kristal yapı içindeki radyasyon kırınımı şematik gösterimi

Kaynak: (Schajer ve Ruud, 2013)

Yukarıdaki şekilde “d” kafes düzlemleri arasındaki boşluk, “ θ ” Bragg açısı ve “ λ ” radyasyonun dalga boyunu ifade etmektedir.

X-Işını Kırınımı Yöntemi

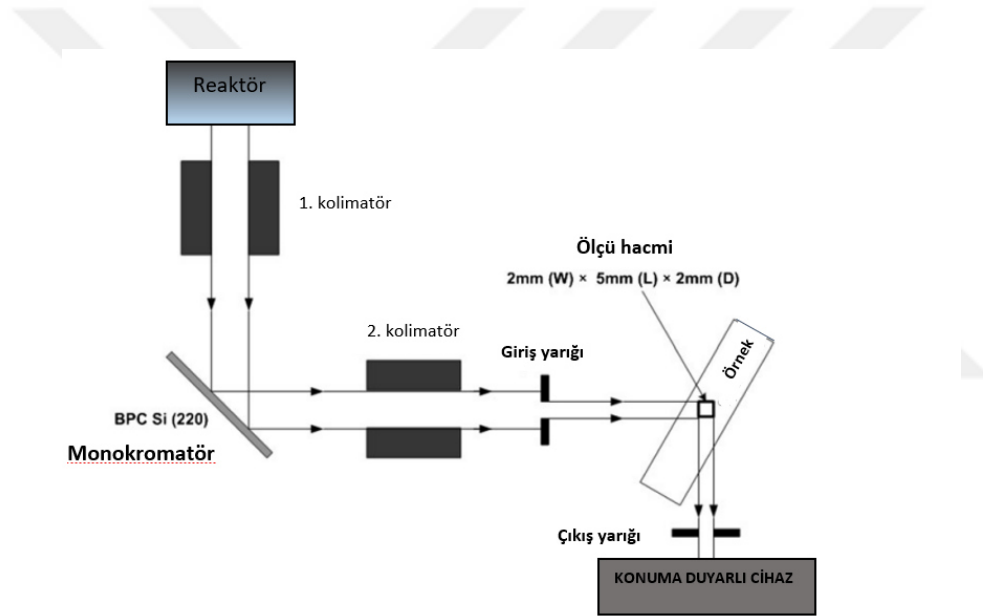


Şekil 13. Stres ölçümü için bir X-ışını kırınımı methodu şematik gösterimi

Kaynak: (Mahmoodi vd., 2012)

Bu yöntem, bir metal stres altındayken ortaya çıkan elastik gerilmeler, metalik kristal yapıdaki atomik düzlemlerin aralıklarının değiştirmesine neden olduğu sonucuna dayanmaktadır. X-ışını kırınımı bu düzlemler arası atomik aralığı doğrudan ölçebilir ve bu sonuçtan metal üzerindeki gerilimin tamamı elde edilir (Ruud, 2002: 112; Totten vd., 2002). X-ışını kırınım artık gerilmeleri ölçümü, kristalli, nispeten ince taneli olan ve numune yüzeyinin herhangi bir oryantasyonu için kırınım üreten malzemelere uygulanabilir (Rossini vd., 2012).

Nötron Kırınımı Yöntemi

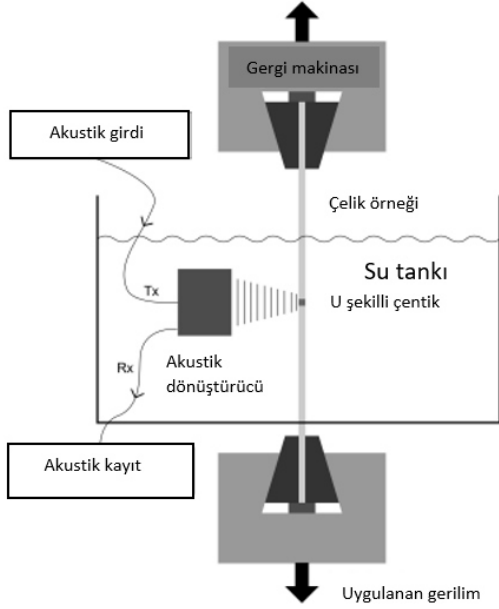


Şekil 14. Nötron kırınım yöntemi şematik gösterimi

Kaynak: (Shin vd., 2013)

Bu yöntem, 1 mm³ kadar küçük uzaysal çözünürlüğe sahip, nispeten kalın çelik parçaların hacmi boyunca artık gerilmeler tarafından indüklenen elastik gerilimi ölçebilir. Böylece bölümlere ayırma veya katman kaldırma olmaksızın artık gerilme ölçme imkânı doğar. XRD yöntemlerinde olduğu gibi, bu yöntemde de bir bileşendeki kristalografik düzlemler arasındaki boşluk, artık ve uygulanan gerilimden etkilenir (Ruud, 2002: 113; Totten vd., 2002).

Ultrasonik Hız Yöntemi

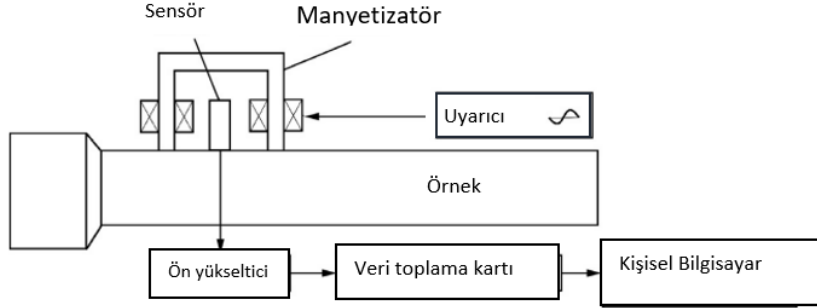


Şekil 15. Ultrasonik yöntem kullanılarak çelikte elastik/plastik etki ölçümü şematik gösterimi

Kaynak: (Eldevik vd., 2012)

Uygulanan stres ile ultrason hızında yaklaşık doğrusal bir değişim olgusu bu yöntemin temelinde yatan ilkedir. Belirli kısıtlı koşullar altında artık gerilim bu olgudan yararlanılarak ölçülebilir. Stres, metal numuneye birkaç MHz (Megahertz) frekansında bir ses dalgası indükleyerek ve akış süresini ölçerek (hızla ilgili farklı parametrelerde kullanılabilir) ölçülür. Stres kaynaklı elastik gerilmelerin yanında metallerin birçok özelliği hızı etkiler (Ruud, 2002: 113).

Barkhausen Gürültü Analizi Yöntemi



Şekil 16. Barkhausen gürültü analizi şematik gösterimi

Kaynak: (Guo vd., 2021)

Barkhausen gürültü analiz tekniği (BNA), bir ferromanyetik metalde manyetik alanların genişlemesi ve daralmasıyla yapılan ani manyetik yeniden yönlendirmelerin sayısını ve büyüklüğünü ölçer. Bu yeniden yönlendirmeler, genişlik, süre ve zamansal ayırırda bir miktar rastgele darbeler olarak gözlemlenir ve bu nedenle kabaca gürültü olarak tanımlanır. BNA yönteminin kesinlikle ferromanyetik malzemelerdeki stres koşullarına duyarlı olduğu kanıtlanmıştır. BNA, elementel bileşim, faz bileşimi, tane boyutu, gerinim sertleşmesi, kristalografik doku tane şekli, tane yönü, karbür boyutu ve dağılımı ve diğer mikroyapısal özelliklerdeki değişikliklerin artık gerilimdeki değişikliklere eşlik ettiği durumlarda önerilmez (Ruud, 2002: 114-115; Totten vd., 2002). Manyetik Barkhausen gürültü (MBN) yöntem, manyetik alan adı verilen küçük sıralı manyetik bölgelerden oluşan ferromanyetik malzemelere uygulanabilir (Rossini vd., 2012). Manyetik stres ölçümleri hızlı, yapılması ucuz ve taşınabilir olma avantajına sahiptir ve bu nedenle bakım için kapandığı sırada nükleer santrallerde yerinde ölçümler yapmak için idealdir. Ayrıca, özellikle temel stres yönlerini belirlemede başarılıdırlar. Bununla birlikte, sınırlı uzamsal çözünürlük ve derinlik penetrasyonu ile mikroyapısal etkilere karşı savunmasızlık dezavantajlarındandır (Withers vd., 2008).

Tablo 1

Artık gerilim ölçümünde kullanılan başlıca yöntemler

Yöntem	Penetrasyon (Delme)	Uzaysal Çözünürlük	Doğruluk (Accuracy)	Açıklama
Delik Delme	~ 1,2 × delik çapı	50 µm uzunluk	±50 MPa	Düzlem içi noktasal ölçümüyle üç boyutlu gerilim, yarı tahrip edici ve ekonomiktir.
Kesit	Numune kalınlığı/uzunluğu	> 1 mm ³	±1.38 MPa (üç ölçüm için)	Sadece boylamsal gerilmenin önemli olduğu durumlarda doğru ve ekonomiktir; geri dönüşü olmayan tahribat oluşturur
Katman kaldırma	0.1 ~ 0.5 kalınlık	0.05 kalınlık	Minimum ölçülebilir eğrilik ile sınırlıdır	Katmandan katmana kaldırma ile üç boyutlu gerilim ve zaman alıcı olabilir.
Manyetik	10 mm	1 mm	%10	Yalnızca manyetik malzemeler için tahribatsızdır, ekonomik cihazdır ve düzlem içi stres ölçümü yapar.
X-Ray Kırınımı	<50 µm (Al), <5 µm (Ti) <1 mm (katman kaldırma ile)	1 mm çap 20 µm derinlik	±20 MPa	Sadece yüzey tekniği olarak tahribatsızdır. Düzlem içi gerilimi ölçer, yüzey pürüzlülüğüne duyarlıdır. Pahalı bir ekipmandır.
Ultrasonic	> 10 cm	5 mm	±50 x 10 ⁻⁶ gerinim	Tahribat oluşturmaz, mikro yapılara ve kusurlara duyarlıdır. Gerilimsiz kaynakların güvenilirliği ile sınırlıdır
Raman	< 1 µm	<1 µm ~	50 MPa (≡ Δλ ≈ 0.1 cm ⁻¹)	Yüzey pürüzlülüğüne duyarlıdır.

Kaynak: (Huang vd., 2013: 571)

Tablo 2

Geleneksel artık gerilme ölçüm tekniklerinin karşılaştırılması

Artık Stres Ölçüm Teknikleri							
Parametre	Tahribatlı ve Yarı Tahribatlı Yöntemler						
	Mekanik Yöntemler				Kimyasal Yöntemler		
	Delik Delme	Kesme	Halka Maça	Ters (Counter)	Kazıma	Kalitatif Ölçümler	
Maliyet	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük	
Uygulanabilirlik	Düşük	Orta	Düşük	Orta	Düşük	Düşük	
Başlangıç	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	
Güvenilirlik	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta	Düşük	
Yerinde Uygulama	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	
Bakım Maliyeti	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta	
Parametre	Tahribatsız Yöntemler						
	Kırınım Yöntemleri		Ultrasonik Yöntemler	Manyetik Yöntemler		Optik Yöntemler	
	Nötron Işını	X-Işını	Ultrasonik	Manyetik Gerinim	Manyeto Mekanik	Raman Spektrumu	Fresnel Yaklaşımı
Maliyet	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek	Orta	Düşük
Uygulanabilirlik	Düşük	Düşük	Orta	Orta	Düşük	Düşük	Yüksek
Ön hazırlık	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük
Güvenilirlik	Yüksek	Yüksek	Orta	Düşük	Orta	Düşük	Orta
Yerinde Uygulama	Orta	Orta	Orta	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek
Bakım onarım Maliyeti	Yüksek	Orta	Orta	Orta	Yüksek	Orta	Düşük

Kaynak: (Öztürk ve Kurt, 2022)

1.5. Gemilerde Mukavemet

Gemilerde mukavemet hesapları klasik yöntemde iki ana başlık altında incelenmekte olup bunlar boyuna mukavemet ve enine mukavemettir.



Şekil 17. Gemilerdeki gerilmeler

Kaynak: (Cult of Sea, t.y.)

Bir geminin boyuna mukavemet analizleri orta kesitte meydana gelen maksimum eğilme momentinin tespiti için gerçekleştirilir ve standardize edilmiş bir hesaplama yöntemidir. Hesaplamaların yapılabilmesi için ilk önce geminin ağırlık ve yük dağılımının tespit edilmesi gerekir. Şekiller 18-19’da örnek bir yük dağılımı grafiği gösterilmiştir. Yük dağılımının haricinde gemiye etki eden deplasman kuvveti de bulunmaktadır ve örnek bir deplasman kuvveti grafiği Şekil 20’de verilmiştir. Boyuna mukavemet analizlerinde ağırlık ve deplasman kuvvetleri kullanılarak teknenin dalga tepesi, dalga çukuru ve sakin suda yayılı yük, kesme kuvveti ve eğilme momenti eğrileri çizilerek orta kesitte meydana gelen maksimum eğilme momenti tespit edilir. Hesaplamalara ilk önce yayılı yükler tespit edilerek başlanır temel mukavemetten bilindiği gibi (İnan, 1988; Bakioğlu, 2009) yayılı yük eğrisi altında kalan alan kesme kuvvetini, kesme kuvveti eğrisi altında kalan alan eğilme momentini verir. Bu toplama işlemleri (Trapez, Simpson vb.) gibi sayısal integral alma teknikleri kullanılarak gerçekleştirilir (Savcı, 1988). Örnek bir yayılı yük, kesme kuvveti ve eğilme momenti grafiği Şekiller 21-24’te dalga tepesi ve dalga çukuru şartları altında gösterilmiştir.

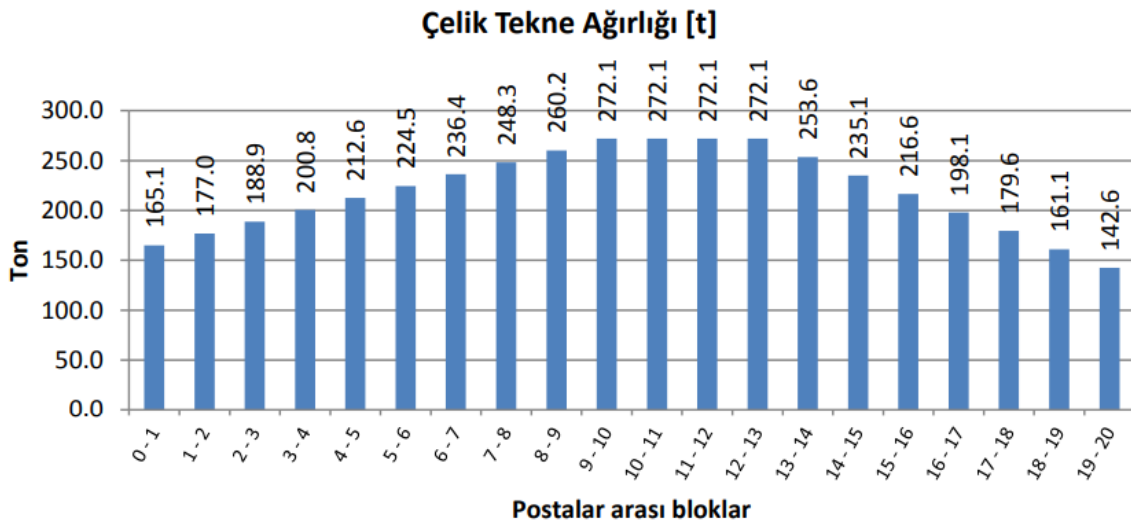
1.5.1. Boyuna Mukavemet

Boyuna mukavemet analizlerinde gemi bir kiriş kabulü altında analiz edilir. Bu tekniğin hangi şartlar ve kısıtlar altında kullanılabileceği verilen referanslar kullanılarak incelenebilir (Mustafa, 1988; Mehmet, 2009). Klasik mukavemetten bilindiği gibi eğilme momenti altında zorlanan bir kesitin çekme-basma gerilmeleri aşağıdaki formül kullanılarak tespit edilir (Mustafa, 1988).

$$\sigma_{g\u00fcv} = \frac{M_{max}}{I} y_1 \quad (1.6)$$

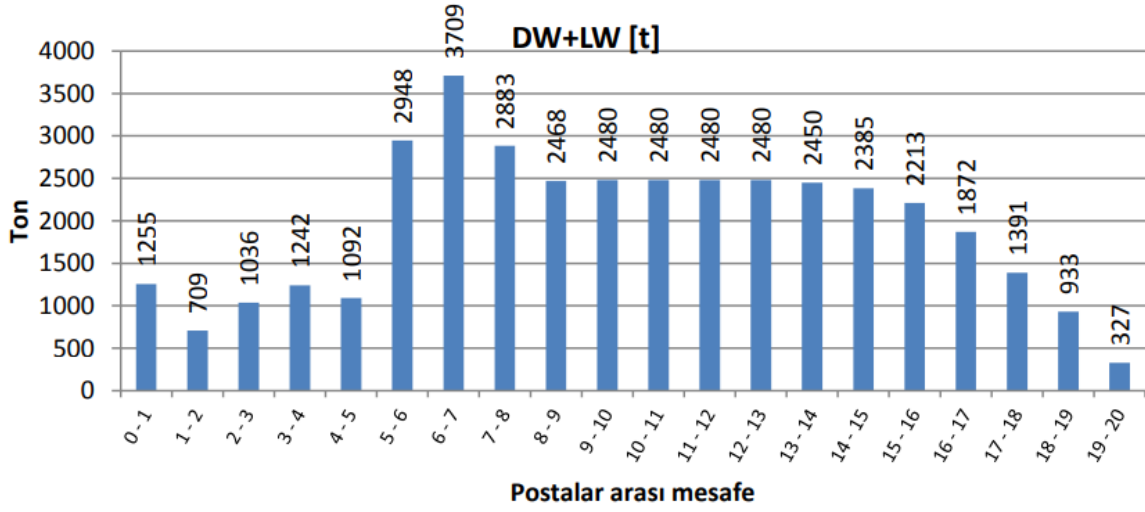
$$\sigma_{dip} = \frac{M_{max}}{I} y_2 \quad (1.7)$$

Burada $\sigma_{dip}, \sigma_{g\u00fcv}$ orta kesitte meydana gelen güverte ve dip kaplamasındaki gerilmeleridir. I orta kesitin tarafsız eksene göre atalet momenti ve M_{max}, M_{min} maksimum ve minimum eğilme momentleridir. y_1 ve y_2 ise tarafsız eksene olan uzaklıktır.



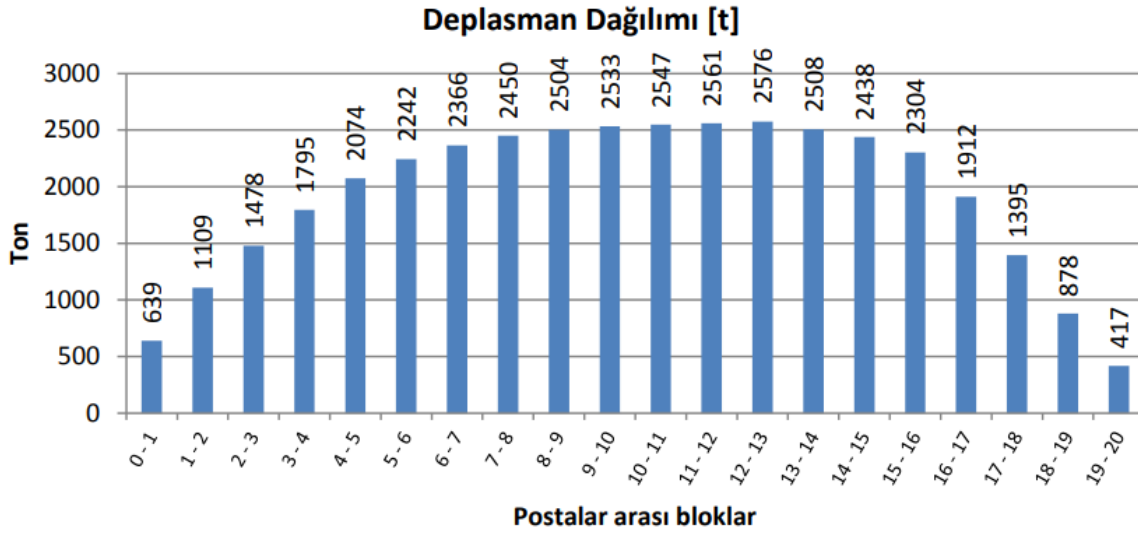
Şekil 18. Çelik tekne ağırlığı dağılım grafiği

Kaynak: (Baykurt, 2011)



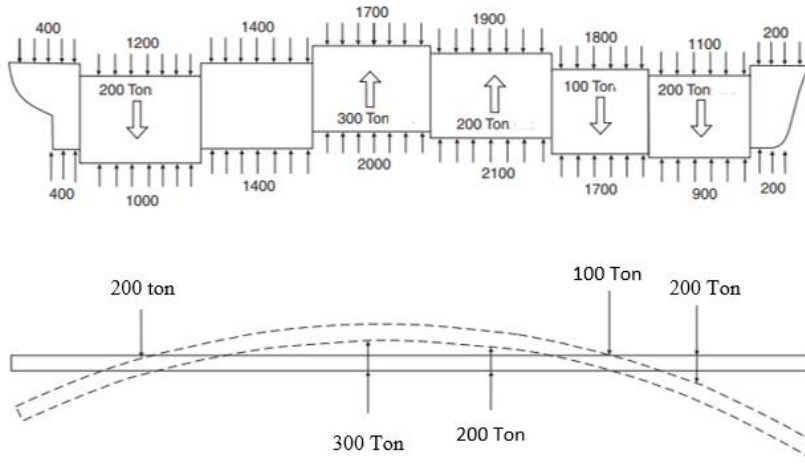
Şekil 19. Toplam ağırlık dağılım grafiği

Kaynak: (Baykurt, 2011)



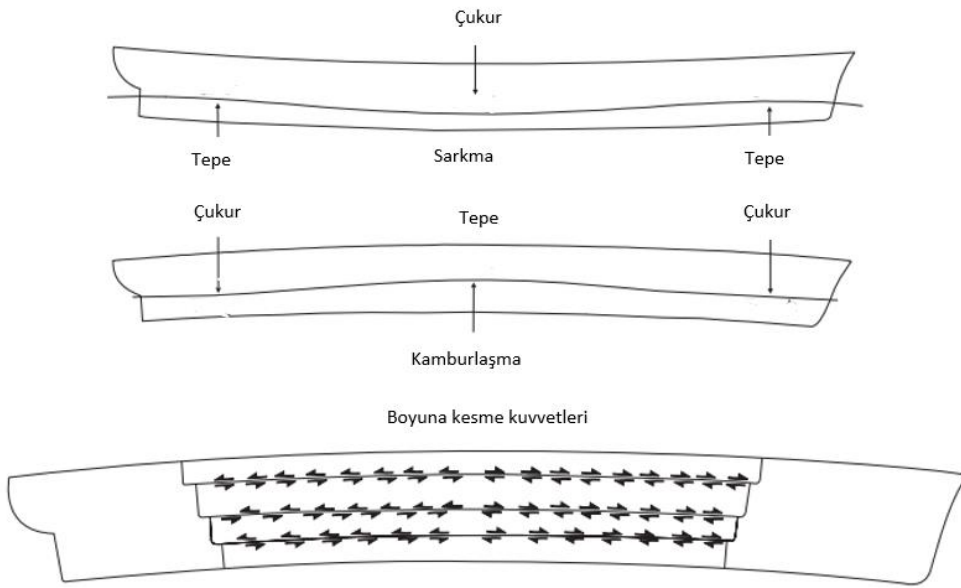
Şekil 20. Sakin su durumu deplasman dağılımı

Kaynak: (Baykurt, 2011)



Şekil 21. Durgun suda dikey kesme ve boyuna eğilme

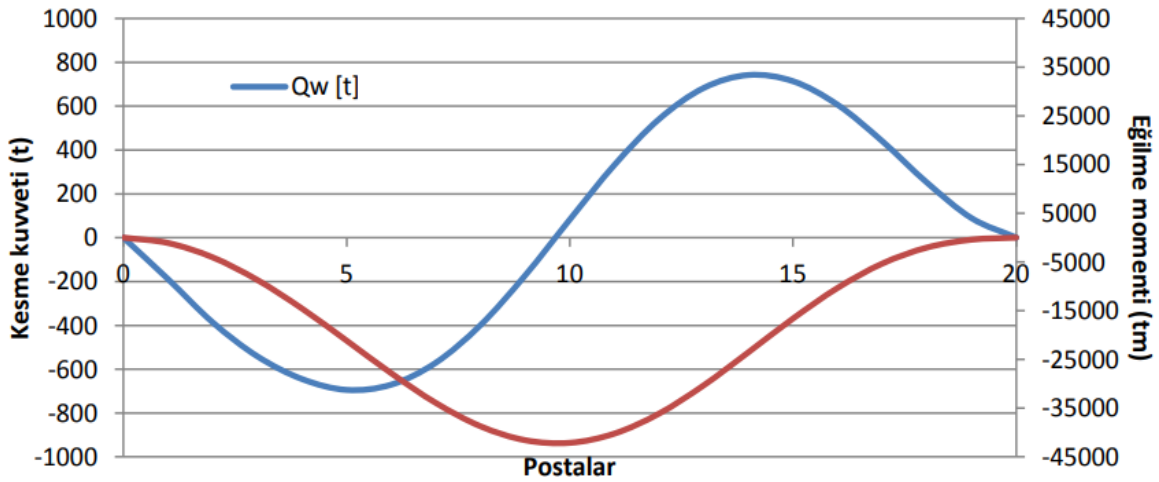
Kaynak: (Eyres, 2007)



Şekil 22. Dalga bükme momentleri; dalga tepesi durumu (sarkma), dalga çukuru durumu (kamburlaşma)

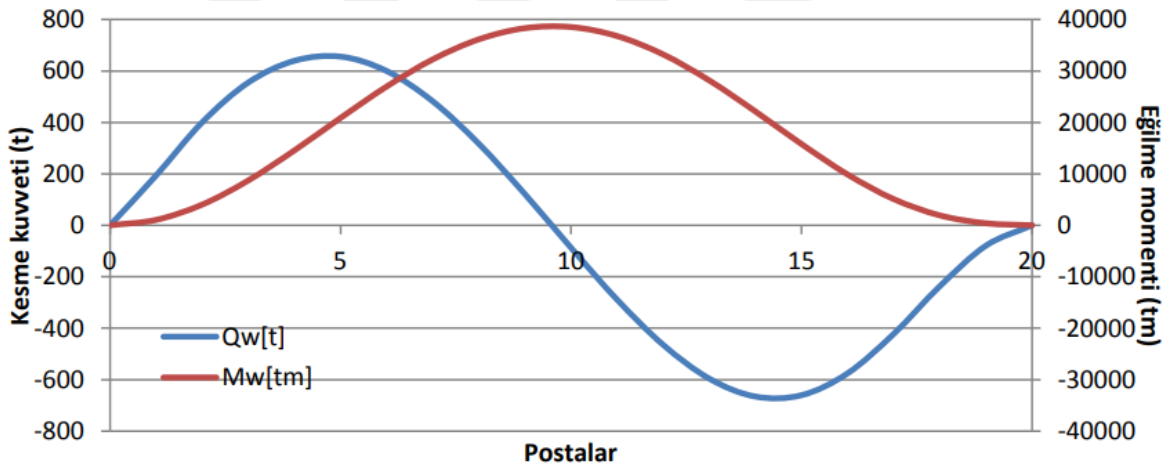
Kaynak: (Eyres, 2007)

Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere kesme kuvvetinin sıfır olduğu yerde eğilme momenti maksimumdur.



Şekil 23. Dalga çukuru durumunda kesme kuvveti ve eğilme momenti şematik gösterimi

Kaynak: (Baykurt, 2011)



Şekil 24. Dalga tepesi durumunda kesme kuvveti ve eğilme momenti şematik gösterimi

Kaynak: (Baykurt, 2011)

1.6. Bu Tezde İzlenecek Yöntem

Bu tezde, AISI4140 ve DUPLEX malzeme için farklı gelme açılarındaki S- ve P-polarizasyona sahip lazer ışınmasında Fresnel denklemlerini çözerek yansımadaki oranı basıncın bir fonksiyonu olarak hesapladık. Teorik sonuçlarımız, optik yöntemeye dayalı yeni

yöntemimizin, metalik plakaların birleşme noktası etrafındaki basıncı veya gerilme oranını belirlemek için uygun olduğunu göstermiştir.



İKİNCİ BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde konuya ilişkin daha önce yapılan araştırmalar incelenmiştir.

2.1 Literatür İncelemesi

Cuı (2002), metal yorgunluğunu incelediği çalışmasında metal yapıların yorulma ömrünü etkileyen tüm faktörleri malzeme, yapı, yükleme ve çevre olmak üzere dört kategoriye ayırmıştır. Özetle, yorgunluk ömrünü etkileyen faktörler; malzeme işleminin kalitesi (kalıntıların, boşlukların boyutu ve dağılımı), malzeme işleme prosedürü (tavlanmış, su verilmiş, temperlenmiş vb.), numune üretim prosedürü (numune şekli, işleme metodu), numune üretiminin kalitesi (çizik, yüzey durumu); - malzeme özellikleri (akma dayanımı, nihai dayanım, bozulmada gerinim, s – e eğrisi), geometri (uzunluk, genişlik, kalınlık, çap, geçiş yarıçapı, kısıtlama etkisi), stres durumu (tek eksenli, çok eksenli, gerilim oranı, ortalama gerilim), çevrenin etkisidir (sıcaklık, aşındırıcı ortam).

Fricke vd. (2012) çalışmalarında, 30 mm'ye kadar boşluklarla gerçekleştirilen kaynakların yeterli dayanımını belirlemek için 250 mm genişliğinde ve 15 mm kalınlığında, hafif ve yüksek çekme çelikten yapılmış, farklı boşluklarla kaynaklanmış, alın derzleri kırılma tokluğu ve yorulma dayanımını incelenmişlerdir. Sonuçlar, yorulma ve kırılma mukavemeti üzerinde kaynak tekniğinin açık bir etkisini göstermiştir.

Leggatt vd. (1996) çalışmalarında mevcut yöntemlere dayalı olarak, tanımlanan artık gerilmelerin kalınlık boyunca dağılımını ölçmek için derin delik yöntemi geliştirmişlerdir. Çeşitli analitik teknikler ile yöntemde kullanılan numune deliğin bozukluğu, mevcut artık gerilmeler belirlenmiştir. Yöntemin doğruluğu 100 mm derinliğinde plastik olarak deforme olmuş ferritik çelik dikdörtgen bir çubuk kullanılarak araştırılmış ve çubuktaki gerilmeler, yüzey gerinim ölçerleri ile belirlenmiştir. Derin delik yöntemiyle gerçekleşen deney sonucunda, çubuğun derinliği boyunca eksenel artık gerilmelerin, çubuğun 80 mm'lik

merkezindeki gerinim ölçerlerden belirlenen gerilmelerin ± 35 MPa içinde olduğuna ulaşılmıştır.

Prime vd. (2004), yüzey konturlarını ölçmek için eş odaklı lazer probu ile temassız tarama (non-contact scanning) tanımlamışlardır. Bu yöntem, artık gerilim ölçmede kullanılmıştır. Kontur yönteminde düz bir kesimle bir parça ikiye ayrılmakta ve parça artık gerilmelerin gevşemesiyle deforme olmaktadır. Kesilen yüzeylerin konturlarının ölçümünden sonra ise artık gerilmelerin bir kesit haritası belirlenmektedir. Lazer tarama kullanan kontur yöntemi, ferritik bir çelik (BS 4360 kalite 50D) kaynağı üzerindeki ölçümlerin, aynı spesifikasyondaki nötron kırınım ölçümleriyle karşılaştırılmasıyla doğrulanır. Daha düşük çözünürlüklü dokunmatik prob teknikleri ile karşılaştırıldığında, lazer yüzey şekillendirme daha küçük parçaların veya daha düşük gerilim seviyelerine sahip parçaların ölçülmesine ve /veya artık gerilmelerin daha doğru bir şekilde ölçülmesine imkan sağlar.

Karşılaştırılabilir stress haritasını ölçen yöntemlerle göre kontur yönteminin en önemli avantajları uygulanmasının nispeten basit ve ucuz olması ve gerekli ekipman yaygın olarak bulunabilmesidir. Temassız lazer yüzey şekillendirme, kontur yönteminin kapasitesini geliştirir. Bunu, bir yüzey konturunun daha yüksek çözünürlüklü ölçümüne olanak sağlayarak yapar. Artan çözünürlük, hem ölçülen yüzey yüksekliğinin doğruluğunda, veri noktalarının yoğunluğunda oluşur. Bu artırılmış çözünürlük, kontur yönteminin artık gerilmeleri daha önce mümkün olandan daha düşük stres seviyelerine sahip parçaları veya daha küçük parçaları, daha doğru ölçmesine olanak tanır (Prime vd., 2004: 183).

Düz kesim varsayımından sapmalar, lazerle ölçülen konturdaki belirsizlikten daha büyük olduğundan, kesim yapmak artık kontur yönteminin doğruluğunu ve çözünürlüğünü sınırlar (Prime vd., 2004:183).

Prime (1999) artık gerilme profilinin belirlenmesi için literatürde kırılma mekaniği temelli bir yaklaşım, yerleştirme yöntemi, ardışık kırma yöntemi, çatlak uyum yöntemi

olarak bilinen yöntemin kronolojik gelişimini özetleyerek, yöntemi oluşturan bileşenleri tanımlamıştır.

Hristoforou vd. (2018) çeliklerde artık gerilimi incelediği çalışmasında dielektrik ve optik özelliklerin basınç ve gerilim gibi mekanik etkilerle değiştiğini gözlemlemiştir. İncelenen çeliklerde manyetik değerler, numunelerin akma noktasına kadar daha düşük bir geçirgenlik (permeability) değişiminden neredeyse dört kat daha yüksek bir değişim oranına geçiş göstermiştir.

Rakic ve Markovic (1990a), Lorentz-Drude modeline elektronun yeniden ışıınının etkisini ekleyerek ve en küçük kareler regresyon yöntemini kullanarak alüminyum metalindeki elektronların tipik parametrelerini (ω_p, Γ, τ) ortaya koymuşlardır. Bu parametrelerin değerleri, 43.5 nm – 200 μ m dalga boylarındaki ışık için alüminyumun optik özelliklerinin belirlenmesine imkan vermiştir. Elektronların yeniden yer değiştirmesiyle Lorentz-Drude modelinin kesinliği kızılötesi (1 μ m - 200 μ m dalgaboyu aralığında) bölgesinde artmıştır. Ayrıca elektronların yeniden ışıması, sönüm frekansı için frekansın karesine bağımlılığını vermektedir. Bu da Lorentz-Drude modelinin uzak kızıl ötesi bölgeden ultraviyole bölgesine kadar geniş dalga boyları aralığında elverişli şekilde uygulanmasını sağlar. Bu çalışma ile Lorentz-Drude modelinin alüminyum için kullanılabileceği kısa dalga sınırının yaklaşık 43,5 nm'de meydana geldiği tahmin edilmiştir.

Rakic ve Markovic (1990b), 0.22- 200 μ m dalga boylarındaki lazer ışığının alüminyum yüzeyinden yansıma katsayılarının Lorentz-Drude modeli kullanılarak belirlemişlerdir. Lorentz-Drude modelinin uygulanabilirliği sadece IR bölgesinde değil, aynı zamanda görünür ve UV bölgelerinde de görülmüştür. Plazma frekansı ve sönüm frekansı değerlerini belirlemişlerdir. Lorentz-Drude modeliyle hesaplanan değerleri deneysel değerler ile kıyasladıklarında IR, görünür ve UV bölgelerinde uyumsuzlukların %3'ten düşük olduğunu ve alüminyumun bant-bant geçişlerinin neden olduğu güçlü bir şekilde soğurduğu dar bir bölgede maximum tutarsızlığı %7 olarak tespit edilmiştir.

Umeda vd. (2009), 614–744 THz frekans aralığında, Drude ve Lorentz-Drude modelinden faydalanarak Altın için optik sonuçlar elde etmişlerdir. Altının kırılma indisini 614 THz, 679 THz ve 744 THz frekans değerleri için Drude modelini kullanarak -3.24, -1.00, 0.67, Lorentz-Drude modelini kullanarak ise -2.09, -1.7, -1.57 olarak bulmuşlardır. Sonuç olarak, Lorentz-Drude modelinin, kullanılan frekans aralıkları için daha uygun veriler verdiğini açıklamışlardır.

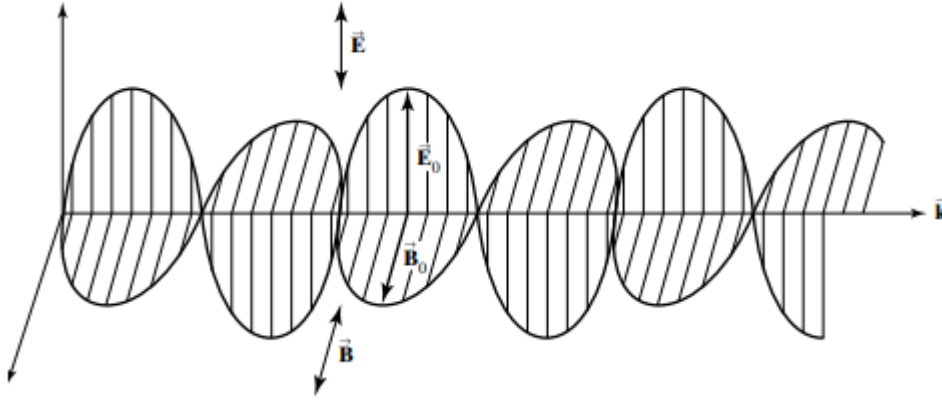
Vial vd. (2005), Drude modelini ve Lorentz-Drude modelini kullanarak, altının real ve imajiner dielektrik sabitlerini ve geçiş katsayısını, 1.24–2.48 eV enerji için bulmuşlardır. Lorentz -Drude modeli ile Drude modeline göre daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Elektromanyetik Dalgalar

Elektromanyetik dalga kavramı J.C. Maxwell tarafından 1864 yılında ortaya atılmıştır. İvmelenen yüklü bir parçacığın hareketi sonucunda zaman ile değişen bir manyetik alanın kendisiyle dik yönde elektrik alan ürettiğini aynı şekilde zaman ile değişen elektrik alanında kendisiyle dik yönde manyetik alan ürettiğini ileri süren Maxwell, bu düşüncesiyle Elektrik alan (\vec{E}) ve manyetik alan (\vec{B})'nin birbirlerini karşılıklı olarak etkileyeceğini ve elektrik alan ve manyetik alandan oluşan elektromanyetik dalganın vakum ortamında, ışık hızı ile yol alacağını buradan da ışığın bir elektromanyetik dalga olduğunu teorik olarak bulmuştur.



Şekil 25. Elektromanyetik dalga

Kaynak: (Pedrotti vd., 2014)

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) , \quad (3.1)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) . \quad (3.2)$$

Yukarıda \vec{E} ve \vec{B} , elektrik ve manyetik alanları ifade etmektedir. \vec{E}_0 ve \vec{B}_0 alanların genlikleridir, dalga her noktasında aynı yayılma sabiti \vec{k} ve frekans ω ile ilerler.

3.2. Dalga Denklemi ve Uzayda İlerlemesi

Heinrich Hertz, Maxwell'in teorik çalışmalarından yola çıkarak 1888 yılında gerçekleştirmiş olduğu deneylerle elektromanyetik dalgaların var olduğu ve Maxwell'in teorik çalışmalarına uyumlu bir şekilde davrandıklarını göstermiştir. Elektrik ve manyetik alanının davranışını belirten Maxwell denklemleri aşağıdaki gibidir. Hiçbir yükün olmadığı veya akımın bulunmadığı uzay bölgelerinde Maxwell denklemleri şöyledir (Griffiths, 2003):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0, \quad (3.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad (3.4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3.5)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (3.6)$$

Burada verilen denklemler E ve B için, birinci dereceden kısmi türevli bir diferansiyel denklem takımı oluştururlar. Denklem 3.5 ve 3.6'ya rotasyonel uygulanarak bu denklemler düzenlenebilir (Griffiths, 2003).

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2 \vec{E} = \vec{\nabla} \times \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (3.7)$$

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) - \vec{\nabla}^2 \vec{B} = \vec{\nabla} \times (\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (3.8)$$

$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ ve $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ olduğundan dolayı;

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} , \quad (3.9)$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} , \quad (3.10)$$

olur. Böylece vakumda E ve B nin her bir kartezyen bileşeni üç boyutlu dalga denklemini sağlar.

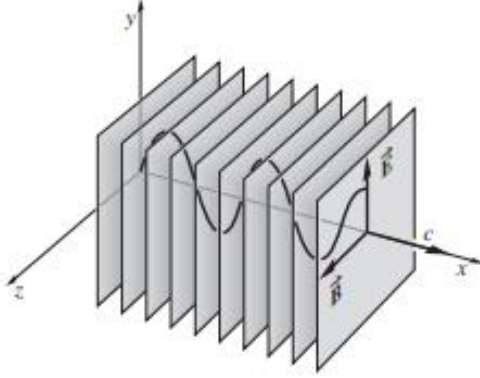
$$\vec{\nabla}^2 f = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} . \quad (3.11)$$

Böylece Maxwell denklemleri boş uzayda,

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3,00 \times 10^8 \text{ m / s} , \quad (3.12)$$

hızıyla yayılan elektromanyetik dalgaları desteklediğini önerir. Bu ise tam olarak c ışık hızı kadar olmaktadır. Yukarıdaki formülde ϵ_0 ve μ_0 sabitleri, boş uzayın elektrik ve manyetik alan geçirgenlik katsayılarını ifade eder (Pedrotti vd. 2014; Griffiths, 2003).

Elektromanyetik dalganın ilerleme yönü elektrik alan ve manyetik alan vektörlerinin vektörel çarpımı ($\vec{E} \times \vec{B}$) yönündedir, buradan hareketle enine dalga olduğunu, vakum ortamında ışık hızı ile yol aldığını, yayılmaları için ortama gerek olmadığını söylenebilir.



Şekil 26. Vakumda hareket eden bir düzlem harmonik elektromanyetik dalgadaki alan konfigürasyonu

Kaynak: (Hecht, 2015).

3.3. Sınır Şartlarında Elektromanyetik Dalga Denklemi Çözümü

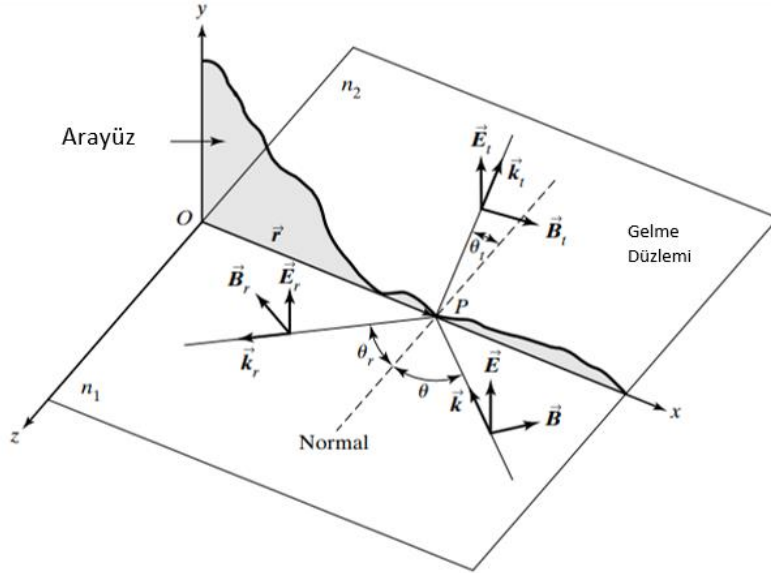
İki izotropik ortamı ayıran düzlemsel yüzey üzerine bir düzlem monokromatik düzlemsel dalganın geldiği varsayıldığında (Şekil 27 de P noktasına gelen düzlem dalga), geniş düzlemi xz düzlemidir. Gelen ışığın aşağıdaki gibi gösterilen düzlem harmonik dalgalardan oluştuğu varsayıldığında (Pedrotti vd., 2017; Hecht, 2015);

$$\vec{E} = E_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (3.13)$$

gelen dalganın dalga vektörü \vec{E} , +y yönünde seçilir, böylece dalga doğrusal kutupludur. Karşılık gelen manyetik alan vektörünün yönü $\vec{E} \times \vec{B}$ nin yönünün dalga yayılma yönü \vec{k} olmasını sağlayacak şekilde seçilir. \vec{E} alanının gelme düzlemine dik ve paralel olduğu iki hal için yansıma ve iletim katsayıları hesaplanır. Şekil 27'deki yansıyan ve iletilen dalgalar, sırasıyla Denklem 3.13'teki gelen dalganın gibi formlarda ifade edilebilir (Pedrotti vd, 2017).

$$\vec{E}_r = E_{0r} e^{i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega_r t)} \quad (3.14)$$

$$\vec{E}_t = E_{0t} e^{i(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega_t t)} \quad (3.15)$$



Şekil 27. \vec{E} alanının gelme düzlemine dik olduğu durum için bir xy düzlem arayüzünde gelen yansıyan ve iletilen dalgaları tanımlayan şematik gösterimi

Kaynak: (Pedrotti vd., 2017)

Şekil 27'deki xy düzleminde gelen, yansıyan ve iletilen dalgaların r ve t ye bağlı fazları eşittir.

$$(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) = (\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega_r t) = (\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega_t t) , \quad (3.16)$$

$$\vec{r} = 0 \text{ noktasında,} \quad (3.17)$$

$$\left. \begin{array}{l} -\omega t = -\omega_r t = -\omega_t t , \\ \text{ya da} \\ \omega = \omega_r = \omega_t , \end{array} \right\} \quad (3.18)$$

olmalıdır. Böylelikle frekanslar eşittir. Öte yandan $t=0$ ' da sınır düzlemi içerisindeki Denklem 3.16 aşağıdaki sonucu verir.

$$\vec{k} \cdot \vec{r} = \vec{k}_r \cdot \vec{r} = \vec{k}_i \cdot \vec{r} \quad (3.19)$$

Denklem 3.19'dan çıkan birkaç sonuç aşağıda verilmiştir.

$$(\vec{k} - \vec{k}_r) \cdot \vec{r} = (\vec{k} - \vec{k}_i) \cdot \vec{r} = (\vec{k}_r - \vec{k}_i) \cdot \vec{r} = 0 \quad (3.20)$$

Denklem 3.20, vektörlerin aynı düzlemde yer almasını gerektirir. Buradan üç yayılma vektörünün de xz düzleminde olduğu ve yansıyan ve kırılan dalgaların geliş düzleminde olduğu sonucuna varılır. Ardından, Denklem 3.19'un ilk iki terimi için Şekil 27 de gösterilen açılar türünden aşağıdaki denkleme ulaşılır:

$$kr \sin \theta = k_r r \sin \theta_r \quad (3.21)$$

Her iki dalga da aynı ortamda hareket ettiği için dalga boyları aynıdır ve dolayısıyla $k = k_r$ olur. Böylelikle, yansıma yasasına ulaşılmış olunur. Yansıma yasası:

$$\theta = \theta_r \quad (3.22)$$

Sonuç olarak (3.19)'ün son iki terimi;

$$kr \sin \theta_r = k_i r \sin \theta_i \quad (3.23)$$

denkleminde eşdeğer olur.

$k_r = \omega / v_r = n_r \omega / c$, $k_t = n_t \omega / c$ yazılarak denklem (3.23) Snell kırılma yasası elde edilir. Snell kırılma yasası;

$$n_r \sin \theta_r = n_t \sin \theta_t . \quad (3.24)$$

3.4. Fresnel Denklemleri

Bir dalganın z yönünde ilerlediğini ve bir x veya y bağımlılığının olmadığı varsayıldığında, yayılma yönüne dik her düzlem üzerinde alanların düzgün olmasından dolayı bunlara düzlem dalgalar adı verilir (Griffiths, 2003). Sonsuz genişliğindeki düzlemsel dalga cephelerine sahip düzlem dalgalar, yayılma yönüne dik yönlerde sonlu bir genişliği olan gerçek dalgalara bir yaklaşıklıkla. Elektromanyetik dalgayı tanımlamak için elektrik alanını tanımlamak yeterlidir. Çünkü E biliniyorsa manyetik alan ve poynting vektörü belirlenebilir. Elektrik alanın yönü dalganın kutuplanması olarak bilinir. Optik uygulamaların birçoğu elektromanyetik dalgaların kutuplanma doğasına ve onların işlenmesine kritik olarak bağlıdır (Pedrotti vd., 2017).

Kırılma indisleri farklı optik ortamların ara yüzeylerinde ışığın davranışını belirleyen denklemler, Fransız fizikçi Augustin Jean Fresnel tarafından türetilmiştir ve Fresnel denklemleri olarak adlandırılmıştır (Hecht, 2015; Pedrotti vd., 2017). Fresnel denklemleri, ideal bir düzlemsel yüzey varsayılarak Maxwell denklemlerinin çözümünden elde edilebilir. Rastgele bir polarizasyon için yansıma formülü, Elektromanyetik (EM) Dalgasının salınımı (polarizasyon) yüzeye paralel veya dik olduğunda iki temel çözümden bahsedilebilir. Fresnel denklemleri gelen ışığın polarizasyonuna ve gelme açısına göre, yansıyan ışının genliğini belirlemek için kullanılır (Pedrotti vd., 2017).

3.4.1. Paralel polarizasyon (R_s mod)

Şekil 26'daki elektrik alanlarının yönü için yapılan seçimler açısından Denklem 3.13 ve 3.15'in kompleks alanlarının vektör genlikleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\vec{E}_0 = E\hat{y} \quad \vec{E}_{0r} = E_r\hat{y} \quad \vec{E}_{0t} = E_t\hat{y} \quad (3.25)$$

Burada E , E_r ve E_t gelen, yansıyan ve iletilen dalgalarla ilgili karmaşık alan genlikleridir. Sınır düzlemine paralel elektrik alanının bileşeninin sınırda sürekli olması şartı,

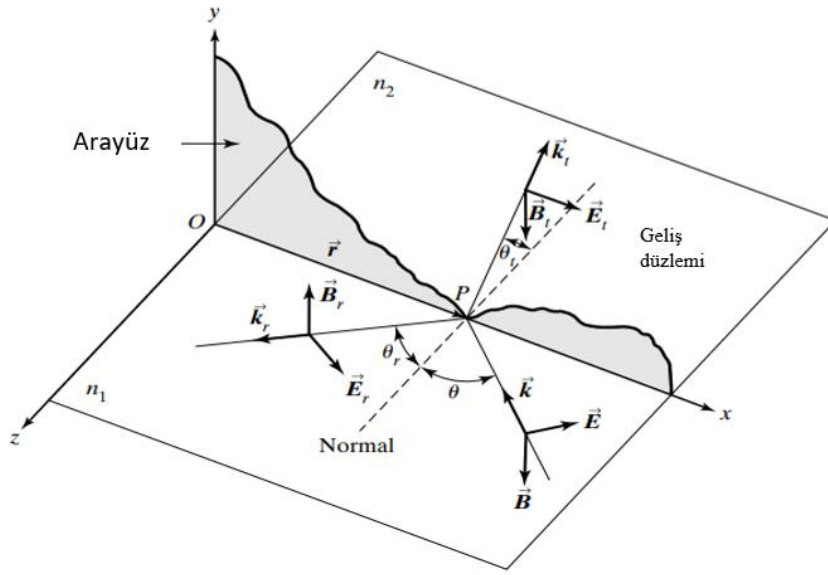
$$E + E_r = E_t \quad (3.26)$$

denklemini verir. Şekil 27'deki elektrik alanlarıyla ilişkili manyetik alanlar aşağıdaki şekildedir:

$$\left. \begin{aligned} \vec{B} &= (B \cos \theta \hat{x} - B \sin \theta \hat{z}) e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}, \\ \vec{B}_r &= (-B_r \cos \theta_r \hat{x} - B_r \sin \theta_r \hat{z}) e^{i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega t)}, \\ \vec{B}_t &= (B_t \cos \theta_t \hat{x} - B_t \sin \theta_t \hat{z}) e^{i(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega t)}. \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

Manyetik alanın paralel bileşenlerinin sürekliliği, alan genliklerinin aşağıdaki şekilde ilişkilendirilmesini gerektirir:

$$B \cos \theta - B_r \cos \theta = B_t \cos \theta \quad (3.28)$$



Şekil 28. \vec{E} alanının gelme düzlemine paralel olduğu durum için bir xy düzlem arayüzünde gelen, yansıyan ve iletilen dalgaları tanımlayan şematik gösterim

Kaynak: (Pedrotti vd., 2017)

3.4.2. Dik polarizasyon

Bu durumda elektrik ve manyetik alanlar aşağıdaki şekilde yazılabilir (Pedrotti vd., 2017).

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &= (E \cos \theta \hat{x} - E \sin \theta \hat{z}) e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \\ \vec{E}_r &= (E_r \cos \theta_r \hat{x} + E_r \sin \theta_r \hat{z}) e^{i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega t)} \\ \vec{E}_t &= (E_t \cos \theta_t \hat{x} - E_t \sin \theta_t \hat{z}) e^{i(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega t)} \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

ve

$$\left. \begin{aligned} \vec{B} &= -B\hat{y}e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)} \\ \vec{B}_r &= B_r\hat{y}e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)} \\ \vec{B}_t &= -B_t\hat{y}e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)} \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

bu durumda Sınıra paralel olan elektrik ve manyetik alanların bileşenlerinin sürekliliğini gerektiren aşağıdaki denklemler bulunur (Pedrotti vd., 2017).

$$-B + B_r = -B_t \quad (3.31)$$

$$E \cos \theta + E_r \cos \theta = E_t \cos \theta \quad (3.32)$$

3.4.3. Yansımaya ve İletim Katsayıları

Denklemler 3.28 ve 3.31'deki manyetik alan genlikleri, karşılık gelen elektrik alan genlikleri tarafından aşağıdaki genel bağıntı yardımıyla gösterilebilir (Pedrotti vd., 2017);

$$E = vB = \left(\frac{c}{n}\right)B \quad (3.33)$$

Gelen ve kırılan ortam için kırılma indisinin sırasıyla n_1 ve n_2 olarak yazılarak, Denklemler 3.26, 3.28, 3.31 ve 3.32 aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir (Pedrotti vd., 2017):

1. Hal için

$$E + E_r = E_t \quad (3.34)$$

$$n_1 E \cos \theta - n_1 E_r \cos \theta = n_2 E_t \cos \theta \quad (3.35)$$

2. Hal için

$$-n_1 E + n_1 E_r = -n_2 E_t \cos \theta \quad (3.36)$$

$$E \cos \theta + E_r \cos \theta = E_t \cos \theta \quad (3.37)$$

Ardından, her bir denklem çiftinden E_t çıkarılır ve yansıma katsayısı $r = E_r / E$ için yazılırsa, aşağıdaki denklemler elde edilir (Pedrotti vd., 2017):

$$R_s = \frac{E_r}{E} = \frac{\cos \theta - n \cos \theta_t}{\cos \theta + n \cos \theta_t} \quad (3.38)$$

$$R_p = \frac{E_r}{E} = \frac{-n \cos \theta + \cos \theta_t}{n \cos \theta + \cos \theta_t} \quad (3.39)$$

Denklem 3.38 ve 3.39'da bağıl kırılma indisi $n \equiv n_2 / n_1$ dir. Sonrasında n ve θ_t Snell yasasıyla, R_s ve R_p durumları arasında ayırım yapmak için alt simgeler kullanılır. Son olarak, n ve θ_t Snell yasası ile $\sin \theta = n \sin \theta_t$, θ ile ilişkili olduğundan θ_t aşağıdaki denklem vasıtasıyla elimine edilebilir (Pedrotti vd., 2017).

$$n \cos \theta_t = n \sqrt{1 - \sin^2 \theta_t} = \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} \quad (3.40)$$

Sonuçta aşağıdaki denklemler elde edilir (Pedrotti vd., 2017):

$$R_s = \frac{E_r}{E} = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}, \quad (3.41)$$

$$R_p = \frac{E_r}{E} = \frac{-n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}. \quad (3.42)$$

Denklem 3.34 ve 3.37’de, E_t yerine E_r elenirse, iletim katsayısını $t = E_t / E$ tanımlayan aşağıdaki denklemlere ulaşılır:

$$T_s = \frac{E_t}{E} = \frac{2 \cos \theta}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}, \quad (3.43)$$

$$T_p = \frac{E_t}{E} = \frac{2n \cos \theta}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}. \quad (3.44)$$

Denklem 3.41 ile 3.44 arasındaki denklemler hem yansıyan hem de iletilen \vec{E} alanı genliklerinin gelen \vec{E} alanı genliğine oranı olan yansıma ve iletim katsayılarını veren Fresnel denklemleridir.

3.5. Kırılma İndisi

Işık ışınlarının bir ortamdan diğer bir ortama geçiş yaparken bükülmesine kırılma denir. Mutlak Kırılma indisi n bu bükülmenin ne kadar keskin olacağını bir ölçüsüdür. Ortamın özelliklerine ve gelen ışığın dalga boyuna bağlıdır. Işığın boşlukta yayılma hızı ile ortamdaki yayılma hızı arasındaki oran olarak tanımlanır (Fox, 1997; Hecht, 2015).

$$n \equiv \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3.45)$$

3.5.1. Kompleks Kırılma İndisi

Metaller gibi iletken ortamlar için kırılma indisi bir gerçek ve bir sanal bileşenden oluşur (Öztürk ve Kurt, 2022, Pedrotti vd., 2017). Yansıtıcı yüzey metalik olduğunda, elde ettiğimiz Fresnel denklemlerinin önemli bir değişiklikle geçerli olmaya devam eder. Kırılma indisi, absorpsiyonun bir ölçüsü olan hayali bir kısım içeren karmaşık bir sayı haline gelir. Yansıtıcı yüzey homojen bir dielektrik olduğunda malzemenin iletkenliği sıfırdır. İletkenlik, Ohm yasasındaki orantı sabitidir.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3.46)$$

Yukarıda \vec{j} , \vec{E} tarafından üretilen akım yoğunluğudur. Böyle durumlarda hem E hem de B alanları, bir diferansiyel dalga denklemini sağlar.

$$\nabla^2 E = \left(\frac{1}{c^2}\right) \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (3.47)$$

Denklemleri sağlayan harmonik dalga aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$E = E_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (3.48)$$

Malzeme metalik veya kayda değer bir iletkenliğe sahipse, elektrik ve manyetizmanın temel Maxwell Denklemleri (3.47) ve (3.48) denklemlerinde bir değişikliğe yol açar. Bu durumda \vec{E} nin diferansiyel dalga denklemi,

$$\nabla^2 E = \left(\frac{1}{c^2}\right) \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0 c^2}\right) \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3.49)$$

olur. Denklem 3.49, yeni dalga denklemdir. Bu denklemde, \vec{E} 'nin iletkenliği ve zamana göre birinci türevini içeren ek bir terim mevcuttur. Sonuç olarak, Denklem 3.48 formundaki bir harmonik dalga Denklem 3.49'da yerine yazıldığında, \vec{k} yayılma vektörünün karmaşık büyüklüğe sahip olması gerektiği bulunur.

$$\tilde{k} = \frac{\omega}{c} \left[1 + i \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \right) \right]^{1/2} \quad (3.50)$$

Kırılma indisi n , $n = (c / \omega)k$ ile k ile ilişkili olduğundan, kırılma indisi Denklem 3.51'deki karmaşık sayı olur:

$$\tilde{n} = \left[1 + i \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \right) \right]^{1/2} \quad (3.51)$$

Genel olarak yazılışı ise Denklem 3.52'de gösterilmektedir. Metaller gibi iletken ortamlar için kırılma indisi reel ve imajiner bileşenden oluşur.

$$\tilde{n} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}} = \sqrt{1 + i \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \right)} = n_r + i\kappa \quad (3.52)$$

Burada σ iletkenlik, ω metalin plazma frekansı ve ε_0 boşluğun elektrik duyarlık katsayısıdır.

3.6. Metallerin Optik Özellikleri

İletken ortamın karakteristik özelliği, bir dizi serbest elektrik yükünün (bağlı olmama, yani malzeme içinde dolaşabilme anlamında serbest) mevcudiyetidir. Metaller için

bu yükler elbette elektronlardır ve hareketleri bir akım oluşturur. \vec{E} alanının uygulanmasından kaynaklanan birim alan başına akım (Denklemler 3.52) $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ ile ilişkilidir. Bir dielektrik için serbest veya iletken elektron yoktur ve $\sigma = 0$ iken metaller için $\sigma \neq 0$ dır ve sonludur. Tersine, idealleştirilmiş bir "mükemmel" iletken sonsuz bir iletkenliğe sahip olacaktır. Bu, harmonik bir dalga tarafından salınım yapan elektronların alanın değişimlerini takip edeceğini söylemekle eşdeğerdir. Geri getirme kuvveti olmayacak, doğal frekanslar olmayacak ve absorpsiyon olmayacak, sadece yeniden yayılım olmayacaktır. Gerçek metallerde iletim elektronları, termal olarak çalkalanan kafesle veya kusurlarla çarpışmalara maruz kalır ve bunu yaparken elektromanyetik enerjiyi geri dönüşümsüz olarak ısıya dönüştürür. Radyan enerjinin bir malzeme tarafından emilmesi, iletkenliğinin bir fonksiyonudur (Hecht, 2015).

3.7. Drude Model

Metallerin optik özellikleri, iç elektronları uygulanan elektrik alan ile zayıf olarak etkileştiği için, serbest (valans) elektronlar tarafından belirlenir. Bu serbest elektronlar uygulanan elektrik alanında hızlandırılır ve enerji kazanır. Alan vektörünün periyodik değişimi sebebiyle, salınan elektronlar metallerin yüksek yansıtıcılığına neden olan enerjiyi yeniden yayarlar. Pals müddeti eğer tipik temel saçılma sürelerine (pikosaniye) kıyasla uzunsa, lazer radyasyonunun madde ile etkileşimleri önemli ölçüde basitleştirilir ve klasik Drude teorisi kullanılabilir (Schaaf ve Peter, 2010). Doğrudan bantlar arası geçişlerle ışığın soğurulması, doğru enerjiye sahip bir fotonun soğurulması yoluyla elektronların daha yüksek bir banda yükseltilmesini içerir. Fotonun çok küçük momentumu nedeniyle elektron k vektörünü önemli ölçüde değiştirmez. Böylece geçişler, katının E-k bant diyagramında dikey oklar olarak görünür. Metallerde bantlar arası soğurma önemlidir, çünkü elektromanyetik dalgalar yüzeye kısa bir mesafede nüfuz eder ve bantlar arası soğurma için önemli bir olasılık varsa, yansıma azalacaktır (Fox, 1997).

İletkenlerin dielektrik katsayısı ile kırılma indisi arasında ilişki kuran Lorentz-Drude modeli, metallerin optik özelliklerini belirlemede en kullanışlı model olarak bilinmektedir. Lorentz-Drude modeline göre, iletkenin plazma frekansındaki gerilim veya baskı gibi harici olarak indüklenen herhangi bir değişiklik, metalin gerçek kırılma indisinde diferansiyel bir değişikliğe neden olur. İletkenlerin dielektrik katsayısı ile kırılma indisi arasında ilişki kuran

Lorentz-Drude modeli, metallerin optik özelliklerini belirlemede en kullanışlı model olarak bilinmektedir. Lorentz-Drude modeline göre, iletkenin plazma frekansındaki gerilim veya baskı gibi harici olarak indüklenen herhangi bir değişiklik, metalin gerçek kırılma indisinde diferansiyel bir değişikliğe neden olur (Öztürk ve Kurt, 2022; Drude, 1900; Hecht, 2015).

Metallerin dielektrik ve optik özellikleri, basınç ve gerilim gibi mekanik etkilerle değişir (Vourna vd., 2018; Hristoforou vd., 2018). Bu özellik sayesinde, metalik yapının dielektrik ve optik özellikleri ölçülerek çeliğin mekanik durumu belirlenebilir. Metallerin dielektrik ve optik özellikleri, elastik veya artık gerilmeye (plastik deformasyon) neden olan uygulanan bir stres tarafından farklı şekillerde etkilenir, böylece bu iki etki, optik ölçümler kullanılarak birbirinden ayırt edilebilir (Qiu vd., 2018). Drude modeli, oldukça basit bir model olmasına rağmen metallerin elektriksel iletkenliğini, ısıl iletkenliğini ve optik özelliklerini tanımlayan ilk gerçekçi model olarak bilinir (Drude, 1900). Metallerin optik özellikleri; serbest ve bağlı elektronlar (Drude terimi) ile harmonik bağlı parçacıkları (Lorentz osilatörü) içeren Lorentz-Drude modeli kullanılarak daha gerçekçi olarak tanımlanabilmektedir. Rakic (Rakić, 1995) ve Johnson (Johnson ve Christy, 1972), Lorentz-Drude modelini farklı plazma frekans ve bağlanma enerji durumları için yeniden yapılandırmış ve modellerini deneysel olarak doğrulamışlardır (Johnson ve Christy, 1972; Rakić, 1995). Bu model kullanılarak, metalik malzemelerin reel kırılma indisleri dış elektromanyetik alan varlığında hassas biçimde hesaplanabilmektedir. Lorentz-Drude modelinde metallerin iletim elektronlarının bağlı olmadığı kabul edilir. Lorentz salınım terimlerini Drude modeline ekleyerek metallerin optik geçirgenliğini tanımlamanın daha uygun olduğunu gösteren deneysel çalışmalar yapılmıştır (Umeda vd., 2009; Vial vd., 2005). Metal atomu içindeki elektronların serbest hareketi, dış bir basınç altında yeniden elektron dizilimlerine ve metal içinde elektrik potansiyel dağılımının değişmesine sebep olur. Metal içindeki elektrik potansiyelindeki bu değişim, o metalik malzemenin dielektrik katsayısında küçük değişimler yaratır. Metalik ortamın dielektrik yer değiştirmesinin, elektrik alan ve kutuplanma ile arasındaki ilişki aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_r \epsilon_0 E \quad . \quad (3.53)$$

Drude modelindeki serbest elektron yoğunluğu, metal atomlarının yoğunluğunun değerlikleriyle çarpımına eşittir. Drude modelinde, bir metalin elektriksel geçirgenliğini serbest elektronlarla karakterize edildiğinden, sadece band içi geçişleri dikkate alınır (Ehrenreich ve Philipp, 1962). Ancak valans ve iletim bandları arasındaki geçişleri veren bandlar arası geçişleride, dielektrik fonksiyonun belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar. Lorentz-Drude modeli her iki geçişi de içerecek şekilde Drude modeli ve Lorentz osilatör terimlerinin birleşiminden oluşur. Lorentz-Drude modeli (Rakić, 1995; Markovic ve Rakic, 1990a):

$$\varepsilon_R = \varepsilon_{bandiçi} + \varepsilon_{bandlararası} \quad (3.54)$$

$$\varepsilon_R = \varepsilon_\infty - \frac{\Omega_p^2}{(\omega^2 + i\omega\Gamma_0)} + \sum_{j=1}^m \frac{f_j \omega_p^2}{((\omega_j^2 - \omega^2) + i\omega\Gamma_j)} \quad (3.55)$$

Denklemden, ε_∞ bandlar arası geçişlerden dolayı bir katkıdır, $\Omega_p = \omega_p \sqrt{f_0}$ modifiye plazma frekansı, f_0 osilatör kuvveti, Γ_0 ve Γ_j sönüm sabitleri, ω_p plazma frekansı, m osilatörlerin sayısı, ω_j osilatör frekansı, f_j kuvvettir. Eğer kırıcılık indisi kompleks olursa;

$$\varepsilon_{med} = \varepsilon_0 \tilde{n}^2 = \varepsilon_0 (n + i\kappa)^2 \quad (3.56)$$

Burada n reel kırıcılık indisi ve κ sönümlenme katsayısıdır.

$$n = \sqrt{\frac{1}{2\varepsilon_0} (|\varepsilon| + \varepsilon_R)} \quad , \quad \kappa = \sqrt{\frac{1}{2\varepsilon_0} (|\varepsilon| - \varepsilon_R)} \quad (3.57)$$

Eğer iletkenlik yüksek olursa, $\sigma / \varepsilon_0 \omega \gg 1$ olacağından κ çok küçük olacaktır ve yüzey yüksek yansıtıcılığa sahip olur. Metaller için dielektrik fonksiyonun ifadesi;

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i2\omega\Gamma} \right). \quad (3.58)$$

Burada ω_p metalin plazma frekansı, ω dış alanın frekansıdır. Metaller için Drude modelde elektronlar serbest kabul edildiği için plazma frekansı çok büyük olacak ve dielektrik katsayısının imajiner kısmı sıfıra gidecektir. Dielektrik sabitleri ile reel kırılma indisi arasındaki bilindik ifade;

$$n = \frac{c}{v} = c\sqrt{\mu\varepsilon_r} = \sqrt{\frac{\mu_r\varepsilon_r}{\mu_0\varepsilon_0}}. \quad (3.59)$$

Burada c ışık hızı, v ışığın iletken ortamdaki hızı, μ malzemenin manyetik duyarlılığı ve ε malzemenin elektrik duyarlılığıdır. Basınç veya gerilim altında interband geçişler arasındaki değişim elektrik duyarlılıkta bir değişime sebep olacak, buda malzemenin reel kırıcılık indisinde bir değişim olarak ortaya çıkacaktır (Jiles, 1988). Elektromanyetik dalga bir ara yüze geldiğinde geçme ve yansıma oranları arayüzün iki tarafındaki reel ve imajiner kırıcılık indislerine bağlıdır.

Metaller için (3.41) ve (3.42) nolu Fresnel denklemleri gelen ışığın S-polarizasyon (paralel) ve P-polarizasyon (dik) olmasına göre;

$$R_S = \frac{E_R}{E_i} = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2\theta_i}} \quad (3.60)$$

$$R_P = \frac{E_R}{E_i} = \frac{-\tilde{n}^2 \cos\theta_i + \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2\theta_i}}{\tilde{n}^2 \cos\theta_i + \sqrt{\tilde{n}^2 - \sin^2\theta_i}} \quad (3.61)$$

Burada θ_i ışığın gelme açısı, E_R yansıyan EM dalganın genliği, E_i gelen EM dalganın genliği ve $\tilde{n} = n + i\kappa$ kompleks kırıcı indisidir. (3.52) no'lu denklemi, (3.60) ve (3.61) nolu denklemler yerine koyduğumuzda, Karmaşık kırılma indisine sahip metalik yüzey için her iki polarizasyonun Fresnel denklemleri;

$$R_s = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{(n^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta_i) + i(2n\kappa)}}{\cos \theta_i + \sqrt{(n^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta_i) + i(2n\kappa)}} \quad (3.62)$$

$$R_p = \frac{E_r}{E_i} = \frac{-[(n^2 - \kappa^2) + i(2n\kappa)] \cos \theta_i + \sqrt{(n^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta_i) + i(2n\kappa)}}{[(n^2 - \kappa^2) + i(2n\kappa)] \cos \theta_i + \sqrt{(n^2 - \kappa^2 - \sin^2 \theta_i) + i(2n\kappa)}} \quad (3.63)$$

Metallerin ara yüzdeki yansıtma oranı, gelme açısının ve kompleks kırıcılık indisinin bir fonksiyonudur. Gelme açısı ve kompleks kırıcılık indisindeki değişimler, metalden yansıyan EM dalganın genliğinin değişimine neden olur. Gelen EM dalganın P-polarizasyona sahip olması durumunda, yansıyan EM dalganın genliği belirli bir dalga boyu için minimuma sahiptir, bu gelme açısı Brewster açısı olarak bilinen kritik bir açı değeridir. Brewster açısı değerinde gelen EM dalga durumunda, yüzeydeki soğrulma maksimum değere sahip olur ve kısmi yansıma gerçekleşir. Metal yüzeyler genel olarak yüksek yansıtıcılığa sahiptir ve Brewster açısı dışındaki gelme açılarında soğrulma oldukça düşük olacaktır. Bu durumda, Denklem 3.62 ve 3.63 de yer alan κ değerinin fonksiyona katkısı düşük olacaktır, bu yüzden hesaplamalarda kompleks kırıcılık indis değeri sabit olarak kabul edilmiştir. Basınç veya gerilme kaynaklı kırıcılık indisi hesaplamalarında Denklem 3.59'dan faydalanılmıştır.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

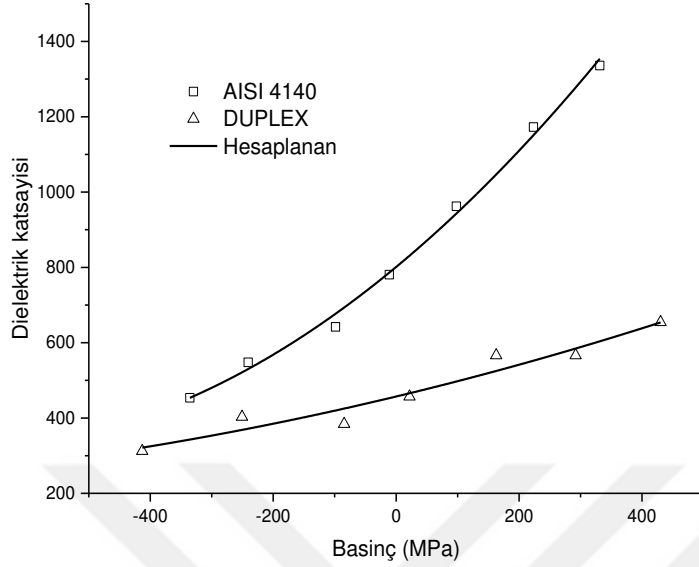
ARAŞTIRMA BULGULARI

Metalik yapılarda üretim aşamasında veya hizmet çevrimi süresinde ortaya çıkan gerilim veya basınç kaynaklı kafes bozulmaları, hem metal tanelerin hem de metal içindeki elektrik-manyetik alanların yeniden düzenlenmesine neden olur (Iordache vd., 2003; Perevertov, 2007). Metal yapı içindeki manyetizasyon, manyetik duvarların çekirdeklenmesini ve hareketini içerir; böylelikle çeliklerdeki mikro yapı, tane boyutu, gerilme durumu ve deformasyondaki değişikliklerle güçlü bir şekilde bağlantılıdır (Jiménez vd., 2017; Shea, 2005). Hristoforou vd. (2018), metalik yapılarda tahribatsız muayene yöntemi için yaptıkları çalışmada, deneysel olarak bir yük altındaki AISI4140 ve DUPLEX metalinin yüzey manyetik duyunluğunu deneysel olarak ölçmüşlerdir. Bu çalışmalarında, -300 MPa gerilme ve +300 MPa basınç değerleri arasında manyetik duyunluğun, basıncın bir fonksiyonu olarak değiştiğini deneysel olarak göstermişlerdir.

$$\mu(P) = a_0 + a_1P + a_2P^2 \quad (4.1)$$

Bu tezde ilk olarak, Hristoforou vd. (2018), tarafından bulunan deneysel veriler, 2. dereceden bir polinoma fit edilerek Denklem 4.1, manyetik duyarlık basıncın bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Manyetik duyarlık için ölçülen deneysel veriler ve hesaplanan değerler Şekil 29'da gösterilmiştir, ayrıca AISI4140 ve DUPLEX için belirlenen iterasyon katsayıları Tablo 3 sunulmuştur, her iki malzeme için korelasyon katsayısı (R^2) yaklaşık 1 olmuştur.

4.1. Stress Altında Metalin Dielektrik Katsayısı Değişimi



Şekil 29. Basınca bağlı dielektrik katsayısının deneysel ve hesaplanan değerleri

Kaynak: (Öztürk ve Kurt, 2022)

Tablo 3

AISI4140 ve DUPLEX için deneysel verilere itere edilen Denklem 13 katsayıları

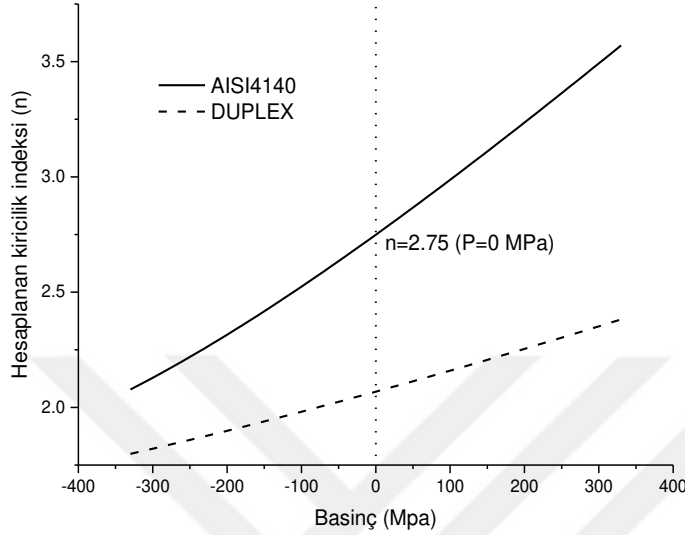
	a_0	$a_1\left(\frac{1}{MPa}\right)$	$a_2\left(\frac{1}{MPa^2}\right)$	R^2
AISI4140	801.09	1.35	9.49×10^{-4}	0.99
DUPLEX	457.11	0.39	1.53×10^{-4}	0.92

Kaynak: (Öztürk ve Kurt, 2022)

4.2. Kırılma İndisi Değişiminin Fresnell Denklemi Üzerine Etkisi

Kırılma indisi, sıcaklığın, basıncın (veya yoğunluğun) ve gelen ışığın frekansının bir fonksiyonudur. Kırılma indisinin karesi, yoğunluk ve ortalama polarize edilebilirliğin çarpımı ile orantılı olduğu bulunmuştur (Malitson, 1965; Tan, 1999; Tan ve Arndt, 1997). Katı malzemelerin yoğunluğu ve moleküler düzeni basınç altında kısmen artmaktadır, bu yüzden basınca bağlı olarak kırılma indisinde artacaktır. Denklem 4.1 ve Tablo 3'teki veriler kullanılarak, Denklem 3.59 ile kırıcılık indisinin basınca bağlı değerleri hesaplanmıştır ve

Şekil 30 da gösterilmiştir. Hem AISI4140 hem de DUPLEX malzemenin kırıcılık indisinin beklendiği gibi basınç ile arttığı görülmektedir.



Şekil 30. AISI 4040 ve DUPLEX için basınca bağlı hesaplanan kırıcılık indisi

Kaynak: (Öztürk ve Kurt, 2022)

Tablo 4

AISI4140 ve DUPLEX malzemenin basınca bağlı kırıcılık indisleri

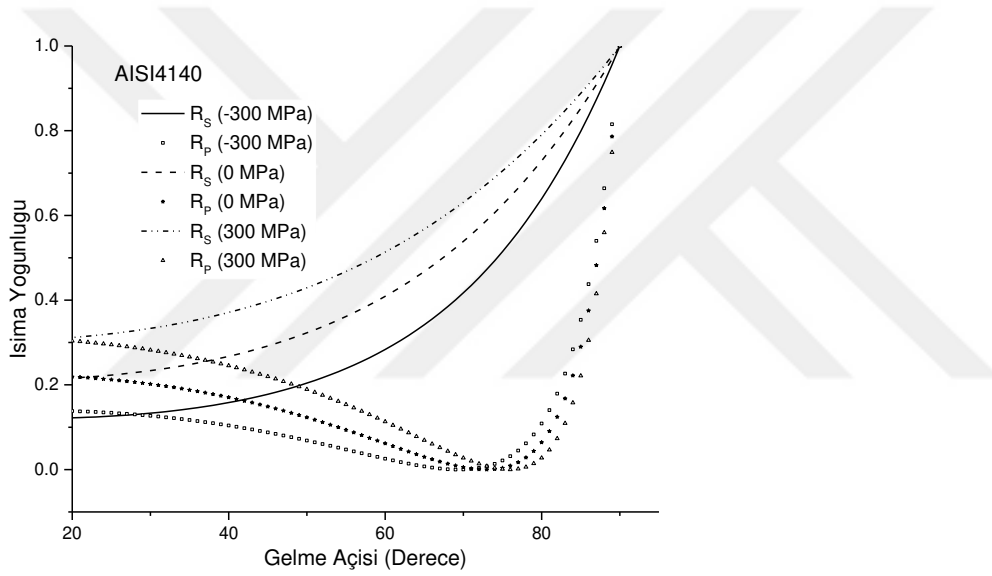
Basınç (MPa)	Kırıcılık İndeksi (n)	
	AISI 4140	DUPLEX
-300	2.128	1.821
-200	2.315	1.898
-100	2.524	1.981
0	2.749	2.068
100	2.987	2.159
200	3.236	2.254
300	3.492	2.352

Kaynak: (Öztürk ve Kurt, 2022)

AISI4140 ve DUPLEX malzemeler için, Denklemler (3.63) ve (4.1) ile S ve P polarizasyonda gelen tek dalgaboyuna sahip lazer ışığının basınca göre yansıma oranları hesaplanmıştır. Şekil 31 ve 32 de sırasıyla bu malzemeler için hesaplanan yansıma oranları gösterilmektedir, değerlerin daha iyi anlaşılabilmesi için hesaplanan değerler 1'e normalize

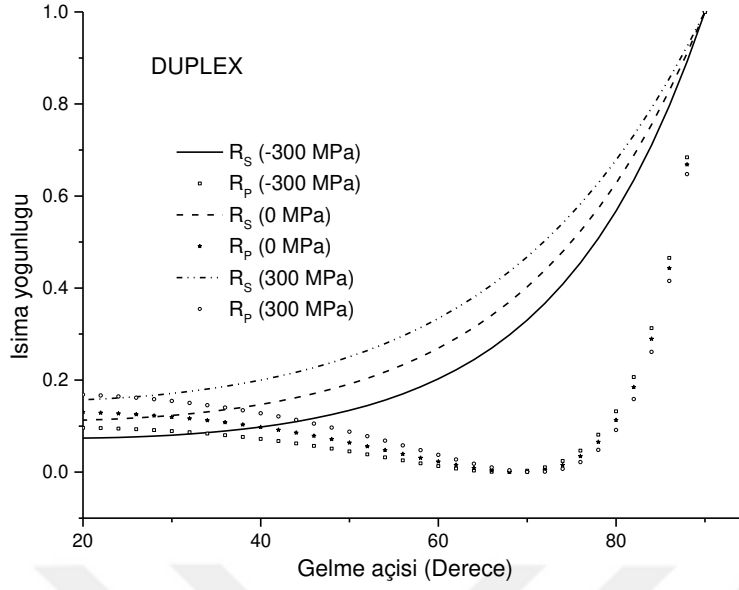
edilmiştir. Her iki malzemede de sabit gelme açısı için basınç arttıkça S ve P polarizasyona sahip ışığın yansım oranlarının arttığı görülmektedir, bu davranım kırıcılık indisindeki değişime atfedilebilir. AISI4140 malzemenin DUPLEX malzemeye göre basınca göre kırıcılık indisi diferansiyel olarak daha fazla değiştiğinden Şekil 29, basınç arttıkça hem S hem de P polarizasyon için yansım oranlarının gelme açısına bağıllığı daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 31-32).

4.3. Farklı Gelme Açısı Durumunda Fresnell Denkleminin Hesaplanması ve Grafikler



Şekil 31. AISI4140 malzeme için S ve P polarizasyona sahip gelen ışık açısına bağıllı olarak yansım oranları

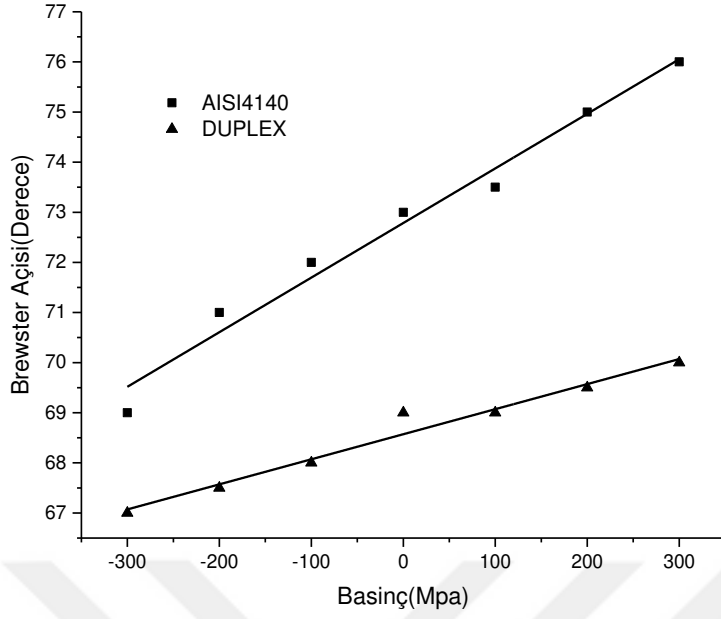
Kaynak: (Öztürk ve Kurt, 2022)



Şekil 32. DUPLEX malzeme için S ve P polarizasyona sahip gelen ışık açısına bağlı olarak yansım oranları

Kaynak: (Öztürk ve Kurt, 2022)

Metallerin, P-polarizasyona sahip lazer ışını için yansıtıcılığının gelme açısının bir fonksiyonu olduğu ve Brewster açısında belirli bir dalga boyu ve kırıcılık indisi için minimuma sahip olduğu bilinmektedir. Brewster açısında soğrulma maksimumdur ve normal gelme açısı için olan soğrulmadan çok daha yüksek olabilir (Hüttner, 1995). Brewster açısı foton enerjisinin güçlü bir fonksiyonudur ve deneysel olarak ölçülmesi kolay değildir, ancak ölçüm yapılacak gelme açısı için önemli bir bilgi sağlar. Denklem 3.63 ün minimizasyonundan her iki malzeme için Brewster açı değerleri hesaplanmıştır (Şekil 33, Tablo 5). AISI4140'ın basınca göre Brewster açısı değişimi DUPLEX'e göre diferansiyel olarak daha büyüktür, bu davranış tıpkı yansım oranlarında olduğu gibi basınç altında kırıcılık indisi değişimine atfedilmektedir. AISI4140 malzeme için Brewster açısının -300 MPa den, +300 MPa basınca oldukça yüksek oranda değiştiği ve lineer bağımlı olduğu görülmektedir, bu gemiler gibi yüksek yük yoğunluğuna sahip yapılarda bu parametreyi kullanarak, Brewster açısından gerilme ve baskı değerini belirleyebileceğimizi göstermektedir.



Şekil 33. AISI4140 ve DUPLEX malzeme için basınca bağlı Brewster açısı değişimi

Kaynak: (Öztürk ve Kurt, 2022)

Tablo 5

AISI4140 ve DUPLEX malzeme için basınca bağlı Brewster açısı değerleri

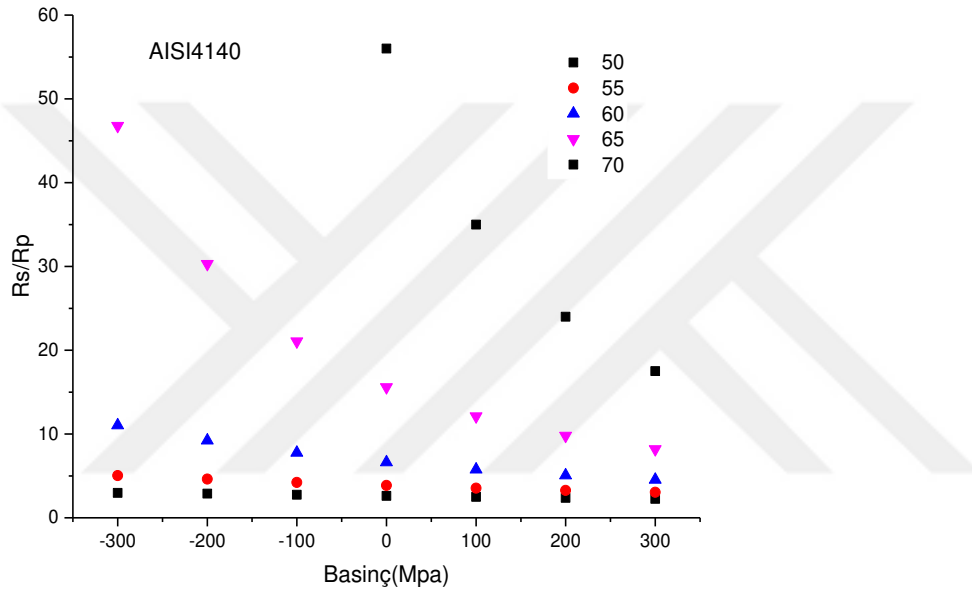
Basınç (MPa)	Brewster Açısı (Derece)	
	AISI 4140	DUPLEX
-300	69	67
-200	71	67.5
-100	72	68
0	73	69
100	73.5	69
200	75	69.5
300	76	70

Kaynak: (Öztürk ve Kurt, 2022)

DeneySEL ölçümlerde Brewster açısının belirlenmesi oldukça zor olduğundan dolayı (Hüttner, 1995), S ve P polarizasyona sahip gelen lazer ışığın yansıma oranına bakmak çok daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Denklem 3.63 ve 4.1 ile, her iki malzeme için Brewster açısı altında farklı gelme açıları için R_s/R_p oranları basıncın bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır (Şekiller 34, 35 ve Tablo 6). Beklendiği gibi her iki malzeme için Brewster açısına yaklaştıkça bu oranın çok büyüdüğü görülmüştür.

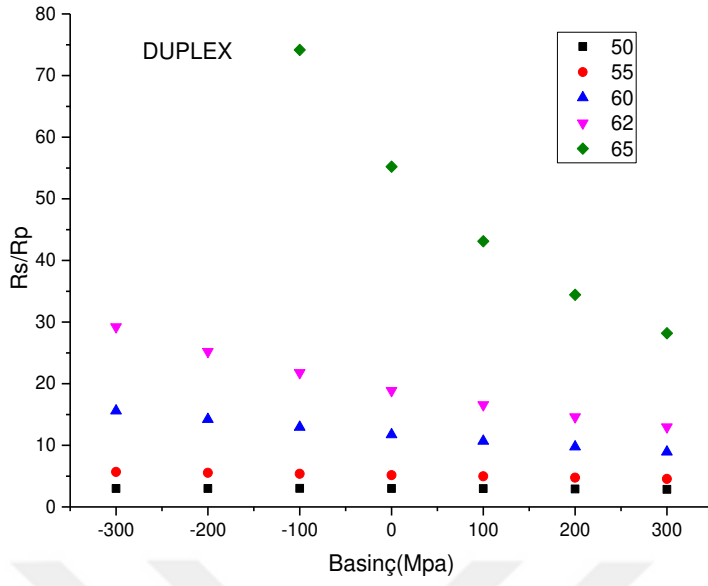
4.4. Farklı Stress Değerleri İçin Fressnel Denkleminin Hesaplanması ve Grafikler

AISI4140 ve DUPLEX malzeme için yüzeydeki gerilimi S ve P polarizasyona sahip ışık yansımalarını analiz ederek belirlemek için sırasıyla 65⁰ ve 62⁰ gelme açısının en uygun olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 34. AISI4140 malzeme için basınca bağlı farklı gelme açılarında R_s/R_p değişimi

Kaynak: (Öztürk ve Kurt, 2022)



Şekil 35. DUPLEX malzeme için basınca bağlı farklı gelme açılarında Rs/Rp değişimi

Kaynak: (Öztürk ve Kurt, 2022)

Tablo 6

AISI4140 ve DUPLEX için farklı gelme açılarında basınca göre Rs/Rp oranı değerleri

Gelme Açısı (Derece)	Rs/Rp					
	AISI4140			DUPLEX		
	-300 Mpa	0 MPa	300 MPa	-300 MPa	0 MPa	300 MPa
50	2.97	2.62	2.26	2.99	2.99	2.85
52,5	3.79	3.13	2.60	3.99	3.84	3.54
55	5.03	3.86	3.04	5.68	5.16	4.55
57,5	7.13	4.93	3.65	8.79	7.42	6.15
60	11.04	6.63	4.54	15.59	11.73	8.93
62,5	19.76	9.60	5.89	35.49	21.73	14.44
65	46.78	15.58	8.18	151.47	55.22	28.19
67,5	239.83	31.06	12.55	22518	370.32	82.72
70	2399.42	99.43	23	-	-	-

Kaynak: (Öztürk ve Kurt, 2022)

4.5. Yorumlar

300 MPa, 3059 Kilogram-kuvvet/Santimetre Kare (kg/cm²) değerine karşılık gelmekte, bu değer yükleme ve dalgalar nedeniyle gemilerde oluşabilecek yük değerlerine karşılık gelmektedir (Asmael vd., 2020). Gemi üzerinde etkiyen en belirgin yükler geminin kendi ağırlık dağılışı ile sephiye kuvveti arasındaki farktan doğan yüklerdir. Ticaret gemileri değişik ambar yükleriyle seyir yapacağından ve geminin her draft ve trim durumu için sephiye kuvveti dağılımı değişeceğinden iki kuvvet dağılımı ortaya çıkar.

Bir geminin sarkma ve çökme durumu ve gemiye göre dalgaların alacağı izafi durum bunun sonucu olarak sephiye kuvvetleri dağılımı değişimi sarkma ve çökme ile ortaya çıkan gerilmelerin artmasına sebep olur. Gemiler hayatını denizlerde geçirirken dalgalar ve rüzgarların dinamik yükleri etkisinde kalırlar. Dinamik yüklerin bir kısmı lokal olarak büyük yüklerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu tip oluşumlar baş vurma (slamming) ve güverteyi su basması (green water on deck) olaylarıdır. Dip vurma darbe basıncı baş civarındaki levhaların çatlamasına, darbe sonucu ortaya çıkan eğilme momenti güverte borda saçlarında akmaya (yani plastik deformasyona) ve ambar ağzı gibi açıklıkların köşelerindeki gerilme yığılması (stress concentration) dolayısıyla yırtılmaya sebep olabilir.

Tablo 7

Tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerin avantaj ve dezavantajları

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj
X-Işını Kırınımı	Biçimlendirilebilir Genellikle uygulanabilir Çok çeşitli malzeme kullanımı El tipi Sistemler Makro ve mikro artık gerilim	Laboratuvar temelli sistemler Küçük bileşenler Sadece temel ölçümler
Delik Delme	Hızlı olması Kolay kullanım Genellikle uygulanabilir El tipi Sistemler Çok çeşitli malzeme kullanımı	Verilerin yorumlanması Yarı Tahribatlı Sınırlı gerinim hassasiyeti ve çözünürlüğü
Nöron Kırınımı	Makro ve mikro artık gerilim Optimum penetrasyon ve çözünürlük 3D haritalar	Sadece uzman becerisi Laboratuvar temelli sistemler
Barkhausen Gürültü	Çok hızlı Geniş şekilde duyarlı Özellikle kaynaklarda mikroyapı etkileri El tipi	Sadece ferromanyetik malzemeler Stres nedeniyle mikro yapı sinyalinin ayırması gerekir

Tablo 7'in devamı

Ultrasonik	Genellikle uygulanabilir Çok hızlı Düşük maliyet El tipi	Sınırlı çözünürlük Tüm hacim üzerinde toplu ölçümler
Kesitleme	Çok çeşitli malzeme kullanımı Ekonomik ve hızlı El tipi	Tam tahrip edici Verilerin yorumlanması Sınırlı gerinim çözünürlüğü
Kontur	Kesme yüzeyine normal gerilmenin yüksek çözünürlüklü haritalar El tipi Çok çeşitli malzeme kullanımı Daha büyük bileşenler	Tam tahrip edici Verilerin yorumlanması Birbirini takip eden payları birbirine yakın yapmanın imkansızlığı
Derin delik	Derin iç gerilim ölçümü Kalın kesit bileşenleri Çok çeşitli malzeme kullanımı	Yarı tahrip edici Verilerin yorumlanması Sınırlı gerinim hassasiyeti ve çözünürlüğü
Senkrotron (Synchrotron)	Geliştirilmiş penetrasyon ve X-ışınlarının çözünürlüğü Derinlik profili Hızlı Makro ve mikro artık gerilim	Sadece uzman becerisi Laboratuvar temelli sistemler

Kaynak: (Rossini vd., 2012: 584)

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Gemiler gibi büyük metal parçaların tümleştirilmesi ile oluşan yapılar görev döngü süresi boyunca yüksek gerilme ve baskılara maruz kalırlar. Bu yükleme döngüsü sırasında oluşan stres tasarım parametresi olarak belirlenen değerin üzerinde olursa, yapıda geçici veya kalıcı deformasyonların oluşmasına neden olur. Yapının optimum ömür süresini tamamlayabilmesi ve arıza giderim maliyetlerini düşürebilmek için, gerçek zamanlı kestirimci bakımlar için yerinde ölçüm yapabilecek yöntemlere gereksinim vardır. Bu çalışmada önerilen tahribatsız ölçme yöntemi gemi saçlarının kaynak noktalarındaki yorulma analizleri için rahatlıkla kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında, AISI4140 ve DUPLEX malzemelerin basınç altında elektronik yapısının yeniden düzenlenmesi sonucu ortaya çıkan kırıcılık indisindeki değişim dikkate alınarak, Fresnel denklemlerinin basınca bağlı türetimi yapılmış ve basınca bağlı kırıcılık indisi, Brewster açısı ve S ve P polarizasyona sahip lazer ışığı gelme durumu için yansım oranları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar tahribatsız ve görece çok daha basit optik bir yöntem ile metalik yapılardaki artık gerilmelerin ölçümünde, önerdiğimiz yöntemin kullanılabilceğini göstermiştir.

KAYNAKÇA

- Almog, I. F., Bradley, M. S. ve Bulovic, V. (2011). The Lorentz Oscillator and Its Applications. Electromagnetic Energy: From Motors to Lasers MIT OpenCourseWare. <http://ocw.mit.edu/terms>.
- Ashby, M. M. ve Jones, D. R. H. (2012). *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties*. Butterworth-Heinemann: Oxford. Doi: 10.1016/C2009-0-64288-4.
- Bakioğlu, M. (2009). *Cisimlerin Mukavemeti*. Beta Basım Yayım: İstanbul.
- Baykurt, N. (2011). Bir Tankerin Orta Kesit Boyutlandırması ve Sonlu Elemanlar Yöntemine Dayalı Boyuna Mukavemet Değerlendirmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Cui, W. (2002). “A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures”. *Journal of Marine Science and Technology*, 7(1), 43–56. doi: 10.1007/s007730200012.
- Cui, W., Wang, F. ve Huang, X. (2010). *Towards a unified fatigue life prediction (UFLP) method for marine structures*. Springer: Shanghai.
- Cult of Sea (t.y.) Stresses in Ships. Erişim adresi: <https://cultofsea.com/ship-construction/ship-stresses/>
- Drude, P. (1900), “Zur Elektronentheorie der Metalle”. *Ann. Phys.*, 306, 566-613. <https://doi.org/10.1002/andp.19003060312>
- Ehrenreich, H. ve Philipp, H.R. (1962). “Optical properties of ag and cu”. *Physical Review*, 128, 4, 1622–29.
- Elastic Modulus (t.y.). Erişim adresi: <https://www.corrosionpedia.com/definition/429/elastic-modulus>.
- Eyres, D. J. (2007). *Ship Construction*. Butterworth-Heinemann: Oxford. doi: 10.1016/B978-0-7506-8070-7.X5000-2.
- Fox, M. (1997). *Optical Properties of Solids*. Oxford University Press:U.S.

- Fricke, W. (2017). "Fatigue and Fracture of Ship Structures". J. Carlton, P. Jukes ve Y.S. Choo (Ed.). İçinde *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*. (s.1-12). John Wiley & Sons, Ltd.:U.S.A. <https://doi.org/10.1002/9781118476406.emoe007>
- Griffiths, D.J. (2003). *Elektromagnetik Teori*. Basri Ünal (çev.). Gazi Kitabevi: Ankara 2003.
- Guo, J., Fu, H., Pan, B. ve Kang, R. (2021). "Recent progress of residual stress measurement methods: A review". *Chinese Journal of Aeronautics*, 34 (2), 54–78. doi: 10.1016/J.CJA.2019.10.010
- Hecht, E. (2015). *Optics* (Fifth Edition). N. Armağan ve N. Can (çev.). Akademi Yayın Hizmetleri: Ankara.
- Hristoforou, E., Ktena A., Vourna P. ve Argiris K. (2018). "Dependence of Magnetic Permeability on Residual Stresses in Alloyed Steels". *AIP Advances*, 8 (4), 1–5, doi:10.1063/1.4994202.
- Huang, X., Liu, Z. and Xie, H. (2013). "Recent progress in residual stress measurement techniques". *Acta Mechanica Solida Sinica*, 26 (6), 570–583. doi: 10.1016/S0894-9166(14)60002-1.
- İnan, M. (1988). *Cisimlerin Mukavemeti*. İstanbul Teknik Üniversitesi Vakfı Yayınları: İstanbul.
- Jiles, D. C. (1988). "Variation of the Magnetic Properties of AISI 4140 Steels with Plastic Strain". *Physica Status Solidi (A)*, 108 (1), 417–29. doi:10.1002/pssa.2211080144.
- Johnson, P. B. ve Christy R. W. (1972). "Optical Constant of the Nobel Metals". *Physical Review B*, 6(12), 4370–79.
- Kalpakistan S. ve Schmid, Steven R. (2014). *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. Pearson Education.
- Kozak, J. ve Górski, Z. (2011). "Fatigue strength determination of ship structural joints", *Polish Maritime Research*, 18(2), 28–36. doi: 10.2478/v10012-011-0009-8.
- Kwon, K., Frangopol, D. M. ve Kim, S. (2013). "Fatigue performance assessment and service life prediction of high-speed ship structures based on probabilistic lifetime

- sea loads”, *Structure and Infrastructure Engineering*, 9 (2), 102–115. doi: 10.1080/15732479.2010.524984.
- Leggatt, R.H., Smith, D.J., Smith, S.D. ve Faure, F. (1996). “Development and experimental validation of the deep hole method for residual stress measurement”. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 31(3), 177-186. doi: 10.1243/03093247V313177.
- Mahmoodi, M., Sedighi, M. ve Tanner, D. A. (2012). “Investigation of through thickness residual stress distribution in equal channel angular rolled Al 5083 alloy by layer removal technique and X-ray diffraction”. *Materials and Design*, 40, 516–520. doi: 10.1016/j.matdes.2012.03.029.
- Marković, M. I., ve Rakić A. D. (1990a). “Determination of optical properties of aluminium including electron reradiation in the Lorentz-Drude Model”. *Optics and Laser Technology*, 22 (6), 394–98. doi:10.1016/0030-3992(90)90093-J.
- Markovic, M. I., ve Rakić, A. D. (1990b). “Determination of the reflection coefficients of laser light of wavelengths $\Lambda \in (0,22 \text{ Mm}, 200 \text{ Mm})$ from the surface of aluminum using the Lorentz-Drude Model”. *Applied Optics*, 29(24), 3479. doi:10.1364/ao.29.003479.
- Modulus of Elasticity (t.y.). Erişim adresi: <https://www.instron.com/en/our-company/library/glossary/m/modulus-of-elasticity>.
- Nelson, D. V. (2010). “Residual stress determination by hole drilling combined with optical methods”. *Experimental Mechanics*, 50 (2), 145–158. doi: 10.1007/s11340-009-9329-3.
- Pedrotti, F.L., Pedrotti, L.M. ve Pedrotti, L.S. (2017). *Introduction to Optics*. Cambridge University Press: Cambridge. doi: 10.1017/9781108552493.
- Pelleg, J. (2013). *Mechanical Properties of Materials*. Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/978-94-007-4342-7.
- Prime, M. B. (1999). “Residual stress measurement by successive extension of a slot: The crack compliance method”. *Applied Mechanics Reviews*, 52(2), 75–96. doi: 10.1115/1.3098926.

- Qiu, W., Ma, L. L., Li, Q., Xing, H.D., Cheng, C.L., Huang, G.Y. (2018). "A general metrology of stress on crystalline silicon with random crystal plane by using micro-Raman spectroscopy". *Acta Mechanica Sinica/Lixue Xuebao*, 34(6), 1095–107. doi:10.1007/s10409-018-0797-5.
- Rakić, A. D. (1995). "Algorithm for the determination of intrinsic optical constants of metal films: Application to aluminum". *Applied Optics*, 34(22), 4755. doi:10.1364/ao.34.004755.
- Rossini, N. S., Dassisti, M., Benyounis, K.Y. ve Olabi, A.G. (2012). "Methods of measuring residual stresses in components". *Materials and Design*, 35, 572–588. doi:10.1016/j.matdes.2011.08.022.
- Ruud, C. (2002). "Measurement of Residual Stresses". Totten, G., Howes, M., Inoue, T. (Ed.). İçinde *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. (s.99-117), ASM International Materials Park: U.S.
- Savcı, M. (1988). *Gemi Kirişleri Mukavemeti*. İTÜ: İstanbul.
- Schaaf, P. (2010). *Laser Processing of Materials: Fundamentals, Applications and Developments*. Springer Science & Business Media.
- Schajer, G. S. ve Ruud, C.O. (2013). "Overview of Residual Stresses and Their Measurement". G. S. Schajer (Ed). İçinde *Practical Residual Stress Measurement Methods*. (s. 1-28). A John Wiley & Sons, Ltd. Publication:Kanada.
- Schweitzer, P. E. (2003). *Metallic Materials: Physical, Mechanical, and Corrosion Properties*. Marcel Dekker Inc.: New York. doi: 10.1201/9781315177281-4.
- Umeda, R., Totsuji, C., Tsuruta, K. ve Totsuji, H. (2009). "An FDTD analysis of nanostructured electromagnetic metamaterials using parallel computer". *Materials Transactions*, 50(5), 994–998. doi:10.2320/matertrans.MC200822
- Vial, A., Grimault, A., Macias, D., Barchesi, D. ve de la Chapelle, M. (2005). "Improved analytical fit of gold dispersion: Application to the modeling of extinction spectra with a finite-difference time-domain method". *Physical Review B*, 71(8), 1-7. doi:10.1103/PhysRevB.71.085416.

- Vourna, P., Ktena, A., Tsarabaris, P., ve Hristoforou, E. (2018).” Magnetic residual stress monitoring technique for ferromagnetic steels”. *Metals*, 8(8), 592. doi:10.3390/met8080592.
- Withers, P.J., Turski, M., L. Edwards, L., Bouchard, P.J. ; Buttle; D.J. (2008). “Recent advances in residual stress measurement”. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85 (3),118-127. doi: 10.1016/j.ijpvp.2007.10.007.
- Yoshida, S., Sasaki, T., Usui, M., Sakamoto, S., Gurney, D., ve Park, I. K. (2016). “Residual stress analysis based on acoustic and optical methods”. *Materials*, 9(2), 1–24. doi: 10.3390/ma9020112.
- Young, H. D., Freedman, R.A., Ford, A.L., Lain, N., Sethia, N.K. (2010). *University Physics for JEE*. Pearson India.