

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

LAZER BİNDİRME KAYNAKLI ENİNE İÇ PERDE
TAKVİYELİ HİBRİD PROFİLLERİN
DAYANIM VE ÖMÜR ANALİZLERİ

Ömer Gökmen VATANDAŞ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ÖZDEN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 625.02.00
Sunuş Tarihi : 25.02.2010

Bornova-İZMİR

2010

Ömer Gökmen VATANDAŞ tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “LAZER BİNDİRME KAYNAKLI ENİNE İÇ PERDE TAKVİYELİ HİBRİD PROFİLLERİN DAYANIM VE ÖMÜR ANALİZLERİ ” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 25.02.2010 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

Jüri Başkanı : Doç. Dr. Kadri Turgut GÜRSEL

Raportör Üye : Yrd. Doç. Dr Hüseyin ÖZDEN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Özler KARAKAŞ

İmza

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

ÖZET**LAZER BİNDİRME KAYNAKLI ENİNE İÇ PERDE TAKVİYELİ
HİBRİD PROFİLLERİN DAYANIM VE ÖMÜR ANALİZLERİ**

VATANDAŞ, Ömer Gökmen; Mak. Müh.

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Bölümü

Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ÖZDEN

Şubat 2010, 129 sayfa

Bu tezde incelenen lazer bindirme kaynaklı enine iç perde takviyeli hibrid profilleri, açık ve kapalı profiller olup, iç kısmında dıştan lazer kaynak dikişli, enine yerleştirilmiş, dayanım arttırıcı takviye perdeleri bulunmaktadır. Konstrüksiyon profillerinin endüstride çok amaçlı ve geniş kullanım alanları bulunmaktadır. Bu hibrid profilleri, tabiattaki kargıların ve bambu ağaçlarının yapıları, dayanımları incelenerek, 21. yüzyıl teknolojisinde belirleyici olan lazerler imalat yöntemleri dikkate alınarak geliştirilmişlerdir. Ayrıca Aralık-2008 tarihli patent başvurusu bulunmaktadır (H.Özden Patent Başvurusu).

Lazer bindirme kaynaklı enine iç perde takviyeli konstrüksiyon profilleri bu çalışmada çizimlerle açıklanmaktadır. Takviyeli ve takviyesiz kapalı boru tipi profillerin dayanım, deformasyon ve ömür analizleri yapılmıştır. Bunun için sonlu elemanlar yöntemine dayalı hazır paket programlarından Ansys12'nin Workbench arayüzü tercih edilmiştir. Sonuçlar birçok diyagram ve tablolarla tartışmaya sunulmaktadır. Hibrid profillerin yüksek zorlamalarda yayılı yüklerde, eğilme yüklerinde ve bileşke yüklemelerde standart takviyesiz profillerden daha dayanıklı, rijit ve uzun ömürlü oldukları sonucuna varılmıştır.

Anahtar sözcükler: Lazer, lazer kaynağı, ömür analizi, dayanım analizi, konstrüksiyon profilleri, sonlu elemanlar yöntemi, ANSYS.

ABSTRACT**STRENGTH AND LIFE ANALYSIS OF LASER LAP WELDED
INSIDE WALL REINFORCED HYBRID CONSTRUCTION TUBES**

VATANDAŞ, Ömer Gökmen

BSc in Mech. Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin Özden

February 2010, 129 pages

In this thesis, laser lap welded inside wall reinforced hybrid construction tubes examined. For increasing strength of these tubes, there are inside transverse placed walls which are laser lap welded from outside. Construction tubes are frequently using in the industry for multi purposes. These hybrid construction tubes are designed conclusion of examining structure and strength of javelin and bamboo trees with 21. Century technology laser material processing. In addition, the patent application is dated December-2008 (H.Ozden Patent Application).

Laser lap welded inside wall reinforced hybrid construction tubes are described with drawings in this study. Strength, deformation and life analysis are performed for non-reinforced and reinforced tubes. For this purpose, Ansys 12 Workbench interface program preferred which based on finite element method. Results are presented for discussion with many diagrams and tables. It was concluded that hybrid tubes are rigid, more strength and has more life on high-force spread loads, bending loads and resultant loads from standart construction tubes.

Keywords: Laser, laser welding, life analysis, strength analysis, construction tubes, finite element method, ANSYS.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarında beni destekleyen, bilgisini ve tecrübesini aktaran değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Hüseyin Özden'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam süresince bana her türlü konuda yardımlarını esirgemeyen, destek olan arkadaşlarıma ve benim bugünlere gelmem için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan sevgili aileme çok teşekkür ederim.

Ömer Gökmen VATANDAŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. LAZER	4
2.1. Lazerler İle İlgili Genel Bilgiler	4
2.2. Lazerlerin Çalışma Prensipleri	5
2.3. Lazer Karakteristikleri (Özellikleri)	8
2.4. Lazer Işını Kesitindeki Yoğunluk Dağılımları	10
2.5. Lazer Işınının Kalitesi	11
2.6. Lazerin Temel Bileşenleri.....	12
2.6.1. Lazer aktif madde	13
2.6.2. Enerji kaynağı ile enerji pompalama	13
2.6.3. Optik rezonatörler	14
2.7. Endüstriyel Alanda Kullanılan Lazerler	14
2.7.1. Karbondioksit (CO ₂) lazeri:	16

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.7.2. Nd: Yag lazeri	18
2.7.3. Fiber lazeler.....	20
2.7.4. Diyet lazerler.....	21
2.8. Lazer İle Malzeme Etkileşimi	22
2.9. Lazer İmalat Yöntemleri	25
2.9.1. Lazer kesim	26
2.9.2. Lazer delme	28
2.9.3. Lazer yüzey temizleme	28
2.9.4. Lazer markalama.....	29
2.9.5. Lazer lehimleme.....	29
2.9.6. Lazer kaynağı.....	30
2.9.7. Lazer ısıtma işlemi.....	30
3. LAZER KAYNAĞI.....	32
3.1. Lazer Kaynak Yöntemleri.....	35
3.1.1. İletim kaynağı	36
3.1.2. Derin nüfuziyet kaynağı.....	37
3.2. Lazer Kaynağı Parametreleri	38

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.3. Lazer Kaynağında Birleştirme Türleri.....	41
3.3.1. Lazer alın birleştirmeleri.....	43
3.3.2. Lazer bindirme birleştirmeleri	43
3.3.3. Lazer kenar birleştirmeleri.....	44
3.3.4. Lazer T alın ve bindirme radyüslü birleştirmeleri	44
3.3.5. Lazer flare birleştirmeleri	45
3.4. Lazer Kaynağı Uygulamaları.....	47
4. LAZER GÜVENLİĞİ	50
5. İŞLETME VE YORULMA DAYANIMI KAVRAMLARI	52
6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	57
6.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi Adımları	57
6.2. ANSYS Sonlu Elemanlar Yöntemi Paket Programı.....	59
6.2.1. Modelin oluşturulması	60
6.2.2. Sonlu eleman seçimi	60
6.2.3. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması	60
6.2.4. Malzeme ve eleman sabitlerinin belirlenmesi	61
6.2.5. Yük ve sınır koşullarının belirlenmesi.....	61

İÇİNDEKİLER (devam)Sayfa

6.2.6. Çözüm	61
6.2.7. Sonuçların değerlendirilmesi	61
7. TASARIM VE NÜMERİK ANALİZ	62
7.1. Tasarım.....	62
7.2. Nümerik Analizler.....	67
7.2.1. Dayanım analizleri	69
7.2.2. Ömür analizleri	90
8. SONUÇLAR	98
KAYNAKLAR DİZİNİ	100
ÖZGEÇMİŞ	105

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Kyoto Japonyadan bir bambu bitkisi türü	2
1.2 Tamamen bambu bitkisinden yapılmış bir ev	3
2.1 Lamba ile lazer ışığı	4
2.2 Işığın temel nitelikleri.....	5
2.3 Dalga boyuna göre ışığın sınıflandırılması.....	6
2.4 Bohr atom modeli	6
2.5 Lazer prensibi	7
2.6 Farklı enine elektromagnetik mod ($TEM_{x,y}$) şekilleri.....	10
2.7 Lazer ışınının dağılması	11
2.8 Lazerin temel bileşenleri	12
2.9 Lazer gücü sabit bir sürekli dalga lazer için lazer gücü-zaman ilişkisi..	15
2.10 Lazer gücü kademeli olarak arttırılan bir sürekli dalga lazerde lazer gücü-zaman ilişkisi.....	15
2.11 Lazer gücü darbeleri bir lazer için lazer gücü-zaman ilişkisi.....	16
2.12 CO_2 Lazer makine sistemin şematik yapısı ve bileşenleri	17
2.13 Nd:YAG lazerinin şematik gösterimi	19
2.14 Bir fiber lazerin şematik gösterimi	20

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.15 Rofin Sinar 1.5kW diyot lazer	22
2.16 Metallerde absorbsiyon ve enerji aralığı ilişkisi	23
2.17 Foton demetlerinin bir malzemeyi geçerken etkileşimden dolayı yönlerini değiştirmeleri.....	24
2.18 Lazer kesim prensibi	26
2.19 Diyot lazer ile devre kartı lehimlemesi.....	30
2.20 Lazer ısıtım işlem teknikleri	31
3.1 Lazer kaynağı ile gaz altı kaynağının karşılaştırılması.....	33
3.2 Lazer kaynağı şematik resmi	35
3.3 Lazer kaynağı yöntemleri basit prensibi	35
3.4 Nd:YAG lazeri ile derin nüfuziyet kaynağı yapılan 6mm kalınlığında karbon-manganez çeliğinin kesiti.....	38
3.5 Farklı kalınlıklardaki karbonlu çelik levhalar için kaynak hızının (CO ₂) lazer gücüne göre fonksiyonu	39
3.6 Lazer kaynağında birleştirme türleri	42
3.7 Lazer flare birleştirmesi	46
3.8 Robot kol ile otomobil çatısı lazer kaynağı	47
3.9 Lazer kaynaklı eşanjör tüpü	49

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.10 Lazer kaynaklı dişli parça.....	49
4.1 Lazer ışının insan gözü üzerindeki etkisi.....	50
4.2 Lazer ikaz işareti.....	51
5.1 Wöhler eğrisi ve hasar çizgisi.....	53
5.2 İşletme dayanımı diyagramları farklı modifikasyonları	56
5.3 Gerilme-zaman diyagramı	56
6.1 Çözüm bölgesinin üçgen elemanlara bölünmesi	58
6.2 Bir üçgen sonlu eleman ve düğüm noktaları	59
7.1 Bambu bitkisi boyuna kesit görüntüsü	63
7.2 Hibrid konstrüksiyon profili perde tipleri.....	64
7.3 Hibrid konstrüksiyon profili perde tipleri ölçüleri	64
7.4 Hibrid konstrüksiyon profili perde kaynak bağlantısı	65
7.5 Tip A hibrid konstrüksiyon profili	65
7.6 Tip A hibrid konstrüksiyon profili boyuna kesit görüntüsü	66
7.7 Tip A hibrid konstrüksiyon profili ölçüleri	66
7.8 “Meshing” işlemi.....	68

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.9 “Engineerin Data” ilişkilendirmesi	68
7.10 Uygulanan yüklemeler	69
7.11 Çekme kuvveti altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	70
7.12 Çekme kuvveti altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	70
7.13 Çekme kuvveti altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	71
7.14 Çekme kuvveti altında Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	71
7.15 Eğme kuvveti altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	72
7.16 Eğme kuvveti altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	72
7.17 Eğme kuvveti altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	73
7.18 Eğme kuvveti altında Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	73
7.19 Burulma momenti altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	74
7.20 Burulma momenti altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	74

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.21 Burulma momenti altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	75
7.22 Burulma momenti altında Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	75
7.23 Çekme+eğme kuvvetleri altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	76
7.24 Çekme+eğme kuvvetleri altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	76
7.25 Çekme+eğme kuvvetleri altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	77
7.26 Çekme+eğme kuvvetleri altında Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	77
7.27 Eğme kuvveti+burulma momenti altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	78
7.28 Eğme kuvveti+burulma momenti altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	78
7.29 Eğme kuvveti+burulma momenti altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	79
7.30 Eğme kuvveti+burulma momenti altında Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	79
7.31 Çekme+eğme kuvvetleri+burulma momenti altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	80

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.32 Çekme+eğme kuvvetleri+burulma momenti altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	80
7.33 Çekme+eğme kuvvetleri+burulma momenti altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	81
7.34 Çekme+eğme kuvvetleri+burulma momenti Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	81
7.35 Yayılı kuvvet (tüm yüzeye) altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	82
7.36 Yayılı kuvvet (tüm yüzeye) altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	82
7.37 Yayılı kuvvet (tüm yüzeye) altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	83
7.38 Yayılı kuvvet (tüm yüzeye) altında Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	83
7.39 Yayılı kuvvet (takviye noktalarına) altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	84
7.40 Yayılı kuvvet (takviye noktalarına) altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	84
7.41 Yayılı kuvvet (takviye noktalarına) altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	85
7.42 Yayılı kuvvet (takviye noktalarına) altında Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	85

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.43 Yapısal denge halleri	86
7.44 Yapısal analiz ve burkulma analizi ilişkisi	87
7.45 Lineer burkulma analizinde düz profilde toplam deformasyon dağılımı ve çarpma faktörü.....	88
7.46 Lineer burkulma analizinde Tip A hibird profilde toplam deformasyon dağılımı ve çarpma faktörü.....	88
7.47 Lineer burkulma analizinde Tip B hibird profilde toplam deformasyon dağılımı ve çarpma faktörü.....	89
7.48 Lineer burkulma analizinde Tip C hibird profilde toplam deformasyon dağılımı ve çarpma faktörü.....	89
7.49 Sabit genlikli tam değişken yükleme durumu	91
7.50 Sabit genlikli sıfır tabanlı yükleme durumu	91
7.51 “Mean stress correction” teorisi	92
7.52 Yorulma ömrü analizi yükleme biçimi.....	92
7.53 Yorulma ömrü analizi yapılan profillerin kesit görünümü.....	93
7.54 Yayılı kuvvet ($R = -1$) altında düz profil yorulma ömrü dağılımı.....	94
7.55 Yayılı kuvvet ($R = -1$) altında Tip A hibrid profil yorulma ömrü dağılımı.....	94
7.56 Yayılı kuvvet ($R = -1$) altında Tip B hibrid profil yorulma ömrü dağılımı.....	95

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.57 Yayılı kuvvet ($R = -1$) altında Tip C hibrid profil yorulma ömrü dağılımı	95
7.58 Yayılı kuvvet ($R = 0$) altında düz profil yorulma ömrü dağılımı	96
7.59 Yayılı kuvvet ($R = 0$) altında Tip A hibrid profil yorulma ömrü dağılımı	96
7.60 Yayılı kuvvet ($R = 0$) altında Tip B hibrid profil yorulma ömrü dağılımı	97
7.61 Yayılı kuvvet ($R = 0$) altında Tip C hibrid profil yorulma ömrü dağılımı	98

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
7.1 Çekme kuvveti altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri.....	71
7.2 Eğme kuvveti altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri.....	73
7.3 Burulma momenti altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri.....	75
7.4 Çekme+eğme kuvvetleri altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri.....	77
7.5 Eğme kuvveti+burulma momenti altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri.....	79
7.6 Çekme+eğme kuvvetleri+burulma momenti altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri.....	81
7.7 Yayılı kuvvet (tüm yüzeye) altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri.....	83
7.8 Yayılı kuvvet (takviye noktalarına) altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri.....	85
7.9 Lineer burkulma analizinde profillerdeki burkulma dayanımı ve maksimum toplam deformasyon değerleri	89
7.10 Yayılı kuvvet altında profillerin yorulma ömrü değerleri	97

1. GİRİŞ

Hızla gelişen yeni teknolojiler, insanların farklı, yeni tasarımlar arayışları, yeni teknolojileri deneme, uygulama dürtüleri yeni, ilginç, hatta uçuk tasarımların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Artan ve ağırlaşan rekabet koşulları, teknolojilerdeki hızlı gelişmeler bu arayışlara ivme kazandırmaktadır. Örneğin, daha evvel konvansiyonel imalat yöntemleri ile imkânsız veya çok külfetli olarak değerlendirilen birçok konstrüksiyonun, yeni tasarımların, günümüzde lazer imalat yöntemleri ile ekonomik ve daha kaliteli imalatı mümkündür.

Serbest rekabet koşulları bir çok endüstriyel tasarımda, gereğinden fazla malzemedен, işçilikten ve enerjiden kaçınmayı, gerekli kaliteden ve dayanımdan ödün vermemek suretiyle şart koşmaktadır. Kuvvet, moment ve güç ileten, taşıyan yapı elemanlarının, makine parçalarının, kullanılan profillerin; hafif, küçük boyutlu ve gerekli dayanımda olması istenmektedir. Lazer bindirme kaynaklı enine iç perde takviyeli hibrid profilleri, bu amaç ve ilkeler doğrultusunda ortaya çıkmıştır. Yani konvansiyonel kaynak yöntemleri ile imalatı mümkün olmayan hibrid profiller günümüzde lazerli imalat yöntemleri ile rahatlıkla yapılabilmektedir. Kısacası bazı yeni buluşlar, yeni teknolojiler ile ortaya çıkmaktadır.

Lazer bindirme kaynaklı enine iç perde takviyeli hibrid profillerin konstrüksiyon özellikleri taslak çizimlerle açıklanmaktadır. Hibrid profillerin boru tipi profillerden farkı; profilin içinde dayanımı ve rijitliği arttıran enine perdelerin, yani takviye elemanlarının bulunmasıdır. Hibrid profil gövdeleri geleneksel, konvansiyonel yöntemlerle imal edilirken, profil içindeki enine ve boyuna perdeler profil gövdesine, malzeme cinsine ve profilin kalınlığına göre dıştan lazer bindirme kaynak dikişi ile yada lazer lehim ile yada lazer hibrid kaynak dikişi ile birleştirilmektedir. Boyuna perdelerin sayısı ve aralarındaki mesafe zorlama tipine ve profillin boyutuna göre değiştirilebilir. Zorlamaların yoğunlaştığı bölgelerde enine iç perdeler yoğunlaştırılabilir, yani aralarındaki mesafe azaltılabilir. Profildeki iç perdeler büyük kuvvetlerin etki noktalarına denk gelecek şekilde yerleştirilebilir. Lazer bindirme kaynaklı enine iç perde takviyeli hibrid profilleri, endüstride farklı alanlarda kullanılabilir. Bunlardan bazıları; taşıyıcı kiriş, makine elemanı (mil, aks v.b.), gemi, yat ve yelken direkleri,

elektrik ve aydınlatma lamba direkleri, reklam panosu direkleri, yüksek binalarda çelik kolonlar, rüzgâr türbinleri kuleleri. Hibrid profillerinde malzeme olarak yapı çeliği ve yüksek dayanımlı alaşımlı çeliklerin yanında, yüksek dayanımlı alüminyum ve magnezyum alaşımlı hafif metaller, karbon elyaf (CFK) ve cam elyaf (GFK) gibi kompozit malzemeler de kullanılabilir.

Lazer bindirme kaynaklı enine iç perde takviyeli hibrid profillerin başlıca konstrüksiyon ve üretim özellikleri;

- Hafif olmalarına rağmen eğilme, burulma, yayılı yük gibi basit ve karmaşık zorlamalara karşı yüksek dayanıma ve rijitliğe sahiptir.
- Kullanım amacına ve profil tipine göre geometrik boyutları belirlenebilir.
- Kolaylıkla ve ekonomik olarak üretilebilir.
- Mevcut üretim bant, portal, tezgahlarına uyumludur.
- Endüstride çok geniş alanlarda kullanılabilir.

İnceleyeceğimiz yeni hibrid profiller tasarlanırken bambu ağaçlarından esinlenilmiştir. Bazı bambu türleri özellikle güneydoğu asyada yüzyıllar boyunca konstrüksiyon amacıyla kullanılmıştır. Ev yapımı, köprü yapımı, deniz ve nehir taşımacılığı gibi birçok alanda yapı elemanı olarak kullanılmıştır (Şekil 1.1; Şekil1.2).



Şekil 1.1 Kyoto Japonyadan bir bambu türü (Wikipedia)



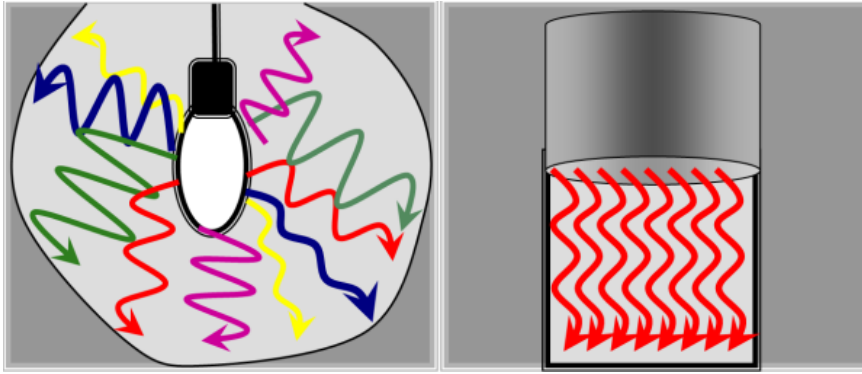
Şekil 1.2 Tamamen bambudan yapılmış bir ev (Wikipedia)

Hibrid konstrüksiyon profillerde kaynaklı bağlantılar vardır. Tüm kaynaklı parçalar az ya da çok distorsiyona uğrarlar ve daima parça içerisinde artık gerilmeler kalır. Kaynak işleminden sonra kalan gerilmeler parçanın emniyetine önemli ölçüde etki eder. Sistemdeki çalışma gerilmeleri ile birleşen bu artık gerilmeler, gevrek kırılma ve gerilmeli korozyona sebep olurlar. Lazer kaynağından sonra oldukça dar ve kaliteli kaynak dikişi oluşur, artık gerilmeler çok düşük seviyededir. Lazer kaynağının imalat sanayinde kullanılmaya başlanmasından dolayı, inceleyeceğimiz hibrid profillerin kullanılabilir yapıda imali mümkün olmuştur. Bu projenin amacı hibrid profilin düz profile karşı üstünlüğünü değerlendirmektir. Bu çalışmada genel olarak lazerden, lazer imalat yöntemlerinden özellikle lazer kaynağından, lazer güvenliğinden, işletme ve yorulma dayanımı kavramlarından, sonlu elemanlar yönteminden bahsedilmektedir. Ayrıca hibrid profilin modellemesi yapılarak nümerik olarak dayanım ve ömür analizleri yapılmıştır. Hibrid profiller çekme, basma, eğme, burulma, yayılı kuvvet, çekme+eğme, eğme+burulma ve çekme+eğme+burulma gibi yüklemelere karşı davranışları incelenmiştir. Nümerik analizler sonlu elemanlar yöntemi paket programı olan Ansys 12 FEM programının Workbench arayüzü kullanılarak yapılmıştır.

2. LAZER

2.1. Lazer Işını İle İlgili Genel Bilgiler

Lazer kelimesi, “**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation”, ışınmanın uyarılmış yayınımları ile ışığın kuvvetlendirilmesi anlamına gelen cümledeki kelimelerin baş harflerinden oluşan kısaltmadır. Lazer, ışığı güçlendiren, çok yönlü ve yüksek yoğunlukta, çoğu kez temiz frekans veya dalga boyuna sahip ışın üreten bir cihazdır (Silfvast, 2004).



Şekil 2.1 Lamba ile lazer ışığı

Şekil 2.1’de incelendiğinde soldaki bir lambanın yaydığı , eş fazlı olmayan ve farklı renklerdeki ışıklardır. Sağdaki lazer ışığı ise tek renkli, oldukça düz, yoğun, aynı fazlı paralel dalgalar halinde ve yüksek güçteki ışıklardır.

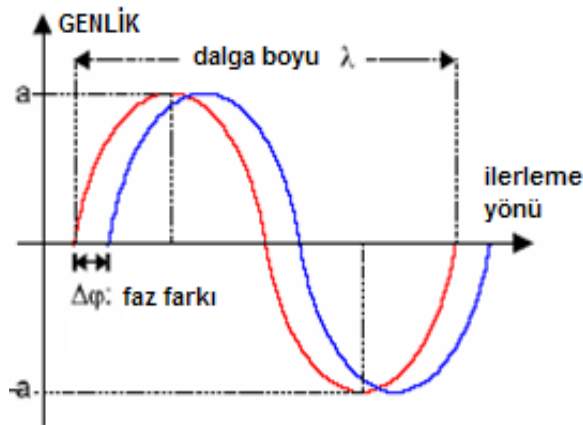
Lazerin prensipleri, ışık yayınımları teorisi ve uyarılmış yayınımları kavramı ile 1917 yılında Albert Einstein tarafından ortaya konmuştur. 1951 yılında ilk defa Charles H. Townes tarafından ilk MASER (Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation - Işınmanın Uyarılmış Yayınımları ile Mikrodalga Yükseltilmesi) icat edilmiştir. Uyarılmış emisyonu dayalı ilk aygıt 1964’ te Nobel ödülünü almıştır. 1958 yılında da Charles H. Townes ve A. L. Schawlow ilk detaylı Optik Maser’i yani Lazer’i icat etmiştir. 1960 yılında bu iki bilim adamı ilk Lazer’in patentini almışlardır. Aynı yıl Hughes Araştırma laboratuvarında Dr. T. Maiman ilk Rubin (Ruby) Lazeri icat etmiştir. 1961 yılında Bell laboratuvarlarında A. G. Fox ve T. Li optik rezonatörlerin teorik analizini ortaya koymuşlardır. 1964 yılında yine aynı laboratuvarlarda J. E. Geusic, H. M. Marcos,

L. G. Van Uteit ilk çalışan Nd:Yag lazeri icat etmişlerdir. Aynı yıl yine aynı yerde Kumar N. Patel tarafından CO2 lazer bulunmuştur, Hughes Araştırma laboratuvarında W. Bridges tarafından Argon lazeri icat edilmiştir. Ayrıca bu konuda çalışmalarından ötürü A. Sshawlow ve N.Blombergen'e 1981 yılında Nobel Fizik Ödülü verilmiştir (Allmen, 1998; Tokdemir,2007).

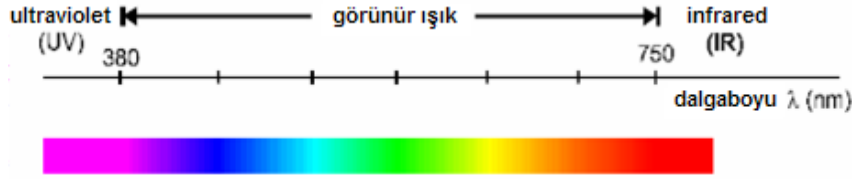
Rubin Lazeri'nin bulunmasından sonra lazer çok hızlı bir şekilde gelişme göstermiştir. 1960 yılında ilk Lazer'in geliştirilmesinden bu yana lazer teknolojisinde çok büyük gelişmeler olmuştur. Lazer teknolojisinin önemli derecede gelişmesi, lazer ışığına özgü bazı özelliklerin kullanıldığı geniş bir alanda, bilimsel ve teknolojik uygulamaları hızlandırdı. Son yıllarda yapılan lazer sisteminde, lazer malzemesi olarak çok çeşitli gazlar, katılar veya sıvılar kullanılmaktadır. Bu sistemler sürekli veya darbeli, tek renkli demetler biçiminde ışıyacak ve optik spektrumunun geniş bir bölgesinde (mor ötesi, görünür ve kızıl ötesi), mikrowattlardan megawatlara kadar değişen çıkış güçlerinde çalışabilecek şekilde planlanabilir. Bir lazer sistemi bu özelliklerin hepsine birden sahip değildir. Sistemin seçimi: dalga boyu, güç mertebesi ve uygun diğer değişkenlerin kullanılacağı özel uygulamanın şartlarına göre yapılır (Charles, 2004; Kurt, 2006).

2.2. Lazerin Çalışma Prensipleri

Lazer ışınım basit bir ifade ile ışıktır, daha belirli bir biçimde anlatmak gerekirse lazer-aktif malzemesi tarafından oluşturulan elektromanyetik dalgadır. Işığın temel nitelikleri lazer ışını içinde geçerlidir (Şekil 2.2; Şekil 2.3).

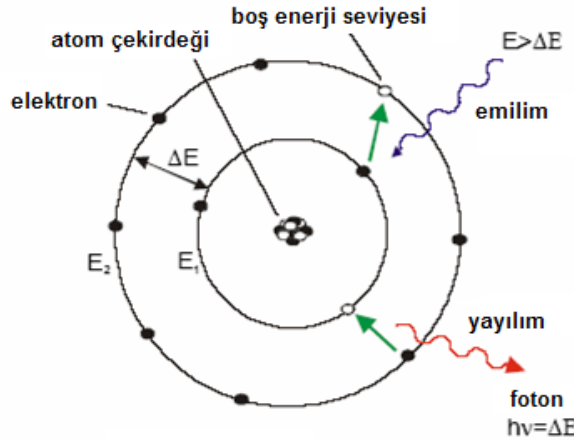


Şekil 2.2 Işığın temel nitelikleri (Rofin, 2003)



Şekil 2.3 Dalga boyuna göre ışığın sınıflandırılması (Rofin, 2003)

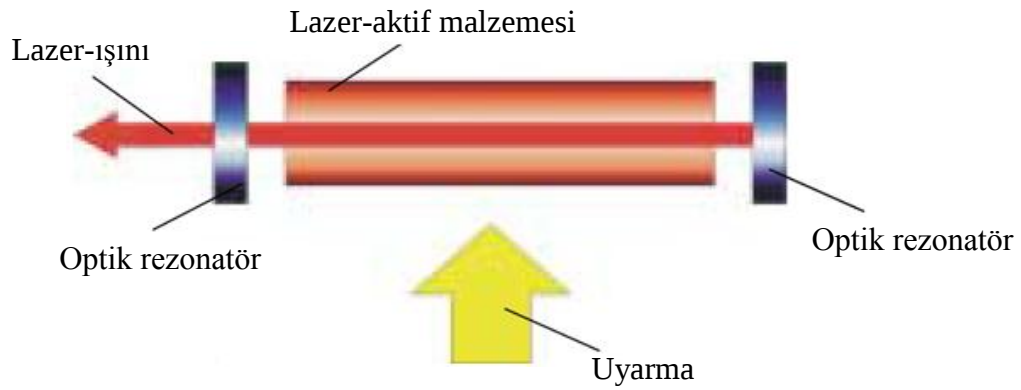
Her elementin atom yapısında yalnız o elemente özgü olan elektron yerleşim düzeni vardır; yani o elementteki atomların elektronları kararlı yörüngeleri olan belli bir enerji düzeyinde bulunurlar. Yörüngelerinde kararlı olarak bulunan elektronların, dışarıdan gelen bir enerji ile uyarılıp bir üst yörüngeye çıkarak tekrar eski kararlı konumuna dönmesi sırasında aldığı enerjiyi dışarı salma işlemi lazerin ana prensibini oluşturmaktadır. Atomların yörüngelerindeki elektronlar uygun enerjili fotonları emerek veya yayarak daha yüksek veya daha düşük enerjili yörüngelere atlayabilirler. Bu bohr atom modelidir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Bohr atom modeli

Temel olarak tüm atomlar, moleküller v.b. en düşük enerji seviyelerine ulaşmak için çabalarlar. Üst enerji seviyesine pompalanan lazer-aktif malzemelerin, lazer-aktif olmayan malzemelere göre belirli üstünlükleri vardır. Bu malzemelerin yüksek enerji halleri, fiziksel olarak beklenenden daha uzun ömürlüdür (yarı-kararlı durum). Bu prensipden, temel halden daha fazla uyarılmış iyonlar ve moleküller meydana getiren lazer ışın kaynağı yararlanır.

Eğer yüksek-enerji partiküllerinden biri şans eseri (spontan yayınma) düşük enerji seviyesine dönerse, bu iki seviye arasındaki enerji farkı nedeniyle bir foton serbest kalır. Bu foton lazer-aktif ortamı ve uygun optik rezonatörler arasında yansiyarak uyarma ile kuvvetlendirme (amplification by stimulation) olarak sonuçlanır. Bu foton Albert Einstein'ın önermesine (1917) göre lazer-aktif ortamındaki başka bir yüksek-enerji partikülünü uyararak daha düşük enerji seviyesine döndürür (uyarılmış yayınma). Eş zamanlı olarak aynı optik eksen boyunca aynı fazda titreşen (coherent) ve eşit enerjiye sahip ikinci bir foton (monokromatik) yayınır. Bu lazer üretiminin temelini oluşturur (Şekil 2.5) (Rofin, 2003).



Şekil 2.5 Lazer prensibi (Rofin, 2003)

Lazerin-aktif ortamında kullanılan malzeme (kristal, gaz, sıvı) cam bir tüp içinde bulunur. Malzemenin yapısını oluşturan atomların en son yörüngelerindeki elektronların dışarıdan enerjilendirilerek bir üst yörüngeye çıkması sağlanır. Dışarıdan ışık verme, ortamdan elektrik akımı geçirme metotları gibi yöntemlerden biri ile elde edilen veya kimyasal bir yolla kazanılan enerji ortamdaki atomlara ulaşmaktadır. Verilen enerji kesildiği zaman, elektron tekrar kararlı konumuna geçer (bir alt yörüngeye düşer). Bu sırada kazanmış olduğu enerjiyi foton şeklinde yayar. Yayılan bu enerji lazer kaynağının iki tarafında bulunan yansıtıcı aynalar (optik rezonatörler) vasıtası ile kendi ortamına döndürülür. Bu işlem elektronların tekrar tekrar uyarılması ile devam eder. Böylece eş fazda şiddeti çok artarak uyarılmış ve o atomun frekans (renk) karakteristiklerini taşıyan güçlü bir ışınım (foton demeti) elde edilir. Atomların hepsi foton yaymaya başlayınca meydana gelen foton enerjisi yoğunluğuyla kuvvetlenen ışık, yarı sırlı uçtan dışarıya çıkar. Fotonların atomlara ulaşarak foton

yayılımını sağladıkları bu yöntemle elde edilen ışık “lazer ışını” olarak adlandırılır (Durmuş, 2006).

2.3. Lazer Işını Özellikleri

Odaklanmış bir lazer ışını, endüstride mevcut en yüksek güç yoğunluğuna sahip kaynaklardan biridir. Lazer gücünün hem uzaysal, hemde zamansal alanlarda dağılımından dolayı lazer ışını özellikleri oldukça karmaşıktır (Çelen, 2006).

Lazer ışığının önemli özellikleri şunlardır;

- Lazer ışığı normal bir ışık kaynağına göre çok yoğun ve şiddetlidir. Lazerler yoğunluğu yüksek ışıklardır. Parlaklıkları çok fazladır. Bir karşılaştırma yapacak olursak; Güneş ışığının yoğunluğu yaklaşık 130 W/cm^2 iken bir lazerin yoğunluğu malzeme işlemede $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ dolaylarında olmaktadır. Işık yoğunluğunun 10^8 W/cm^2 gibi yüksek seviyelerde olması özellikle ileride değinilecek olan derin nüfuziyet-anahtar deliği kaynak yönteminde büyük önem taşımaktadır.

Lazer *Stefan-Boltzmann* kanunu aracılığıyla sıcaklıkla da ilişkilendirilebilir.

$$I = \sigma \times T^4$$

Burada σ ($5.67 \times 10^{-8} \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{K}^{-4}$) Boltzmann sabiti T ise K cinsinden yüzeye yayılan mutlak sıcaklıktır. 10^6 W/cm^2 ’lik bir lazer yoğunluğu aşağı yukarı 25000 K sıcaklık meydana getirmekte ve bu da bilinen metallerin buharlaştırılması için yeterli bir sıcaklık olmaktadır. Burada lazerin küçük bir noktada odaklanmasıyla yoğunluğunun arttırılabileceğini buna karşın parlaklığın arttırılamayacağını da not etmek gerekmektedir (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004; LIA, 2001; Ion, 2005).

- Lazerlerde aynalara dik doğrultuda ışık oluşmasından ve yüksek derecede doğrultu özelliğine sahip olmasından dolayı, lazer ışığı çok uzak mesafelere kadar açısal çarpılmaya uğramadan gidebilir. (düşük diverjans) Lazer, bir lambadan çıkan ışık gibi dağılmaz, bir demet halinde ilerler ancak belirli bir mesafeden sonra dağılmaya başlar, bu dağılmada mili radyan olarak ölçülür. Bu özellik ayrıca lazerin kolayca odaklanmasına izin vermektedir. Diverjans, lazer ışınının yayılma eğilimi şeklinde ifade edilir ve aşağıdaki gibi gösterilmektedir;

$$\theta = \left(\frac{2}{\pi}\right) \times \left(\frac{\lambda}{d_B}\right)$$

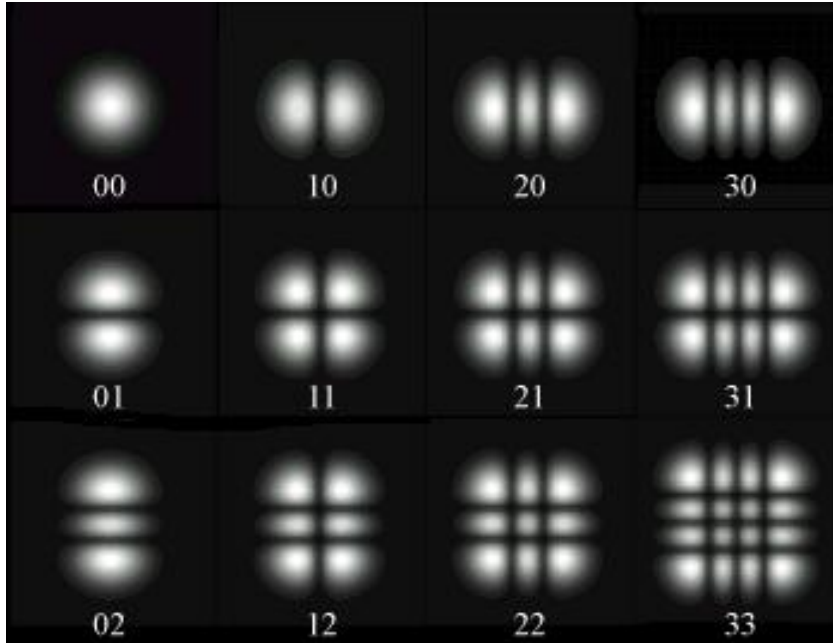
Burada λ lazerin dalga boyu, θ diverjans, d_B lazer ışın çapıdır. d_B ne kadar büyük olursa diverjans kadar küçük olmaktadır. Eğer malzeme işlemede işlenecek parça ile lazer arasında mesafe fazlaysa, diverjansın küçük olması ve tercihen 1 mrad ' dan küçük olması istenmektedir. Kısa dalga boyuna sahip lazerler uygulamada daha küçük diverjans elde edilmesine imkan vermektedir (Ion, 2005).

- Lazerin tek dalga boyluluğa (monokromatiklik) sahip olması. Her lazer kendi karakteristik dalga boyunda ışık yayar. Örneğin; Yakut lazeri: 6943 Å°, He-Ne lazeri: 6328 Å°, Argon lazeri: 5145 Å°. Diğer ışık kaynaklarından elde edilen ışığın frekans şeridi 100 Å° iken, lazer ışığının frekans şeridi yaklaşık 10^{-3} Å°'dur. Yani lazerler normal ışığa göre 10^5 kat daha fazla monokromatikliğe sahiptir.
- Yüksek derecede uyumluluğa (coherent) sahip olması. Monokromatiklikle de ilişkili olarak lazer ortamından çıkan lazerin maksimum genliği ve dalga boyları eşittir, yani uyumludur.
- Enerji aynı frekans değerinde yayıldığından hedeflenen noktada çok yüksek yoğunluğa ulaşabilir.
- Lazer ışını, tek renkli ve aynı fazlı paralel dalgalar halinde genliği yüksek bir ışık demetidir.

2.4. Lazer Işını Kesitindeki Yoğunluk Dağılımları

Bir lazer ışınının çıkış noktası enine elektromagnetik mod (Transverse Electro Magnetic Mode) olarak adlandırılır ve $TEM_{m,n}$ ile gösterilir. Burada mod terimi lazer ışını kesitindeki yoğunluk dağılımını ifade etmektedir. Bir lazer ışının $TEM_{m,n}$ 'i (enine elektromagnetik modu) elektromagnetik ışınımının ışın üretimine dik düzlemde ölçülen ışınım yoğunluğu şeklidir.

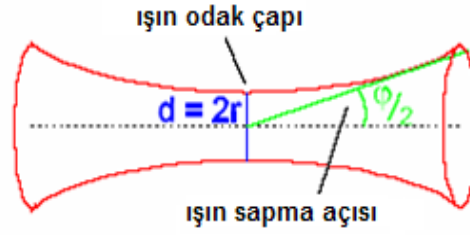
$TEM_{m,n}$ ifadesinde m ve n indisleri ışın boyunca oluşan enine düğüm noktalarının integral numaralarını belirtmektedir. Diğer bir deyişle; ışın, kesitlerde katmanlara ayrılmaktadır. En basit yoğunluk dağılımı $TEM_{0,0}$ 'dır, ışının enine kesitindeki akı yoğunluğu yaklaşık olarak Gauss dağılımını göstermektedir. $TEM_{0,0}$ en iyi odaklanabilen ışıdır. m ve n 'nin yüksek değerli olduğu çok yoğunluk dağılımlı ışınlarda tabakalı kesit görülür. Yoğunluk dağılımı ne kadar yüksek olursa, ışın da o derece zor odaklanmaktadır (Kaluç, 2004;).



Şekil 2.6 Farklı enine elektromagnetik mod ($TEM_{x,y}$) şekilleri (Wikipedia)

2.5. Lazer Işınının Kalitesi

Lazer ışınının odaklanabilen minimum boyutu difraksiyon limitidir ve λ / π olarak verilen (λ : Dalga boyu) bir (Gaussian) TEM_{0,0} ışınıdır ve minimuma tekabül eder. Lazerin kalitesi ışının odaklanabilirliğiyle ölçülür ve çeşitli şekillerde ifade edilebilir. Bu ifadeler aşağıda belirtilmektedir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Lazer ışınının dağılması

K faktörü TEM₀₀ ışını yönünden ışının odaklanabilirliğini ifade etmektedir.

$$K = \frac{\lambda \times 4}{\pi \times d_B \times \theta}$$

Burada d_B ışının çapını, θ en yüksek diverjans açısını göstermektedir. K en fazla 1'e eşit olmakla birlikte değeri 0 ile 1 arasındadır. TEM₀₀ için K=1 olmaktadır. Daha yüksek ışın modları için ise K değeri 1'den küçük olmaktadır. Endüstriyel gaz lazerlerde K değeri genellikle 0.2-0.7 değer aralığında olmaktadır. Bu gösterim özellikle Almanya'da çok kullanılmaktadır.

Bir diğer ışın kalite sistemi de M^2 gösterimi şeklindedir.

$$M^2 = \pi \times d_B \times \frac{\theta}{(4 \times \lambda)}$$

TEM₀₀ (K=1) için $M^2=1/K$ olmaktadır. 1.2 değerindeki M^2 'nin, TEM₀₀ modlu bir ışına göre %20 daha geniş bir odak çapı ürettiği düşünülebilir. M^2 diğer TEM_{mn} modları için yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$M^2 = 2 \times m + n + 1$$

Örnek olarak; TEM₂₀ için $M^2=5$ olmaktadır. M^2 değeri küçüldükçe ışın

kalitesi de artmaktadır. M^2 ifadesi daha çok Amerika Birleşik Devletlerinde kullanılmaktadır.

Katı hal lazerlerinde veya fiber optik dağıtımlı lazerlerde ise ışın kalitesini ifade etmede *BPP* ifadesi kullanılmaktadır. *BPP* İngilizcede “The **B**eam **P**arameter **P**roduct” sözcüklerinin baş harflerinin kullanılmasıyla türetilmiş bir ifadedir. *BPP* değeri lazer ışının çapı (fiber çapı ya da fiber optik çapı) ve ışının diverjans açısı ile orantılıdır, aşağıdaki gibi gösterilebilir;

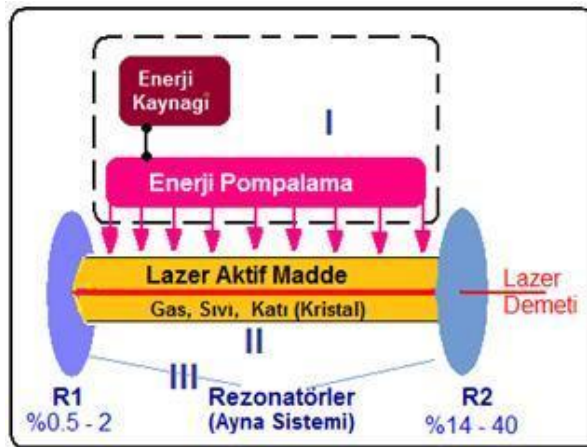
$$BPP = d_B \times \frac{\theta}{4} = M^2 \times \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)$$

BPP ifadesi mm*mrad olarak ölçülmektedir.

Lazer ışınının kalitesinin iyi olması malzeme işlemede birtakım avantajlar sağlamaktadır. Odak çapının küçük olması ile daha yüksek bir işlem verimi, daha az enerji girdisi, kesim ve kaynak kalitesinin daha iyi olması, çalışmada esnekliklerin sağlandığı daha ince bir çalışma-işlem başlığı kullanılması, uzaktan-mesafeli işlemlerin kolay yapılması gibi avantajlar örnek olarak sıralanabilmektedir (İon, 2005).

2.6. Lazerin Temel Bileşenleri

Lazerler üç temel bileşenden oluşmaktadır; bunlar enerji kaynağı ile enerji pompalama, lazer aktif madde ve optik rezonatörlerdir.



Şekil 2.8 Lazerin temel bileşenleri (Özden, 2007a)

2.6.1. Lazer aktif madde

Lazer aktif madde lazer ışınlarını elde etmek için kullanılan maddelerdir. Lazer aktif maddeye göre lazerleri; katı, sıvı ve gaz olarak üç ana grupta toplayabiliriz.

Gaz lazerlerde kendi arasında atom, molekül, iyon, excimer lazerler şeklinde sınıflandırılabilir. Atom lazerlere He-Ne lazeri, molekül lazerlere malzeme işlemede en çok kullanılan lazer türlerinden biri olan CO₂ lazeri, iyon lazerlere Ar lazeri, excimer lazerlere de ArF lazeri örnek gösterilebilir.

Sıvı lazerler boya lazerleridir. Katı lazerlere de piyasada yine en çok kullanılan lazerlerden biri olan Nd:YAG lazeri ve bunun yanında yarı iletken-diodyod lazerler örnek gösterilebilir (Ion, 2005).

Günümüzde sanayide malzemelerin işlenmesinde CO₂, Nd:YAG, diodyod lazerler ve 2003 yılında ortaya çıkan fiber lazerler yoğunlukla kullanılmaktadır.

2.6.2. Enerji kaynağı ile enerji pompalama

Lazer ışınının elde edilebilmesi için mutlak suretle aktif maddenin bir enerji kaynağı ile pompalanması yani uyarılması gerekmektedir. Genel olarak iki pompalama yöntemi kullanılmaktadır, bunlar:

- Elektrik ile pompalama
- Optik pompalama

Pompalama işlemi farklı lazerlerde farklı şekillerde yapılmaktadır. Örnek olarak; malzeme işlemede kullanılan CO₂ lazerlerinde pompalama işlemi elektrik yolu ile yapılırken Nd:YAG ve fiber lazerlerde, diodyod lazer pompalı optik pompalama yöntemi ile pompalanmaktadır. (Özden, 2008)

Elektrik ve optik pompalama yanında kimyasal pompalama yöntemi de lazer üretiminde kullanılmaktadır, ancak kimyasal pompalamanın kontrolü zordur. Buna karşın kimyasal lazerlerde etkili bir yöntemdir. (Ion, 2005).

2.6.3. Optik rezonatörler

Lazer ışınının meydana geldiği ve aktif maddenin bulunduğu kısımdır, İki tarafında biri % 0,5-2 geçirgen diğeri %15-30 geçirgen olan optik çukur iki ayna bulunur. Kısmen geçirgen olan ayna belirli yoğunluğa ulaşan lazer ışınını geçirir. (Özden, 2008)

Pompalama sonucunda elde edilen fotonlar aynalar arasında tekrar tekrar sağa sola yansıtılıp, aktif halde bulunan maddeye (uyarılmış olan maddeye) çarpması sağlanarak foton sayısı arttırılabilmektedir. Eğer rezonatörden lazer çıkışıyla birlikte pompalama devam ederse, lazer ışın üretimi de devam etmektedir (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004).

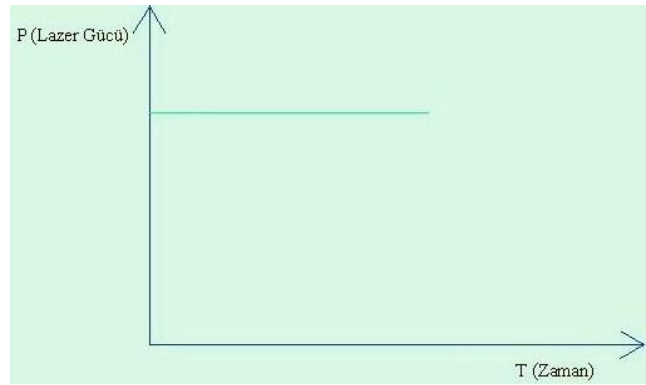
2.7. Endüstriyel Alanda Kullanılan Lazerler

Endüstriyel alanda en çok kullanılan lazer, bir gaz lazeri olan karbondioksit (CO₂) lazeridir. Gaz lazerlerinde, lazer ışınımının elde edilebilmesi için birtakım özel gazların kullanılması gerekmektedir. Fakat bu gazların belirli oranlarda karıştırılması gerekir. Ayrıca bu özel gazların saflıkları oldukça yüksektir. Karbondioksit lazerinden sonra en çok kullanılan lazer, bir katı hal lazeri olan Nd:YAG lazeridir. Bunun yanında son yıllarda gelişen fiber lazerler ve diyet lazerlerde malzeme işlenmesinde kullanılmaktadır. Bunların dışında;

- He-Ne lazeri
- Excimer lazeri
- Argon lazeri
- Karbonik oksit lazeri
- Azot lazeri

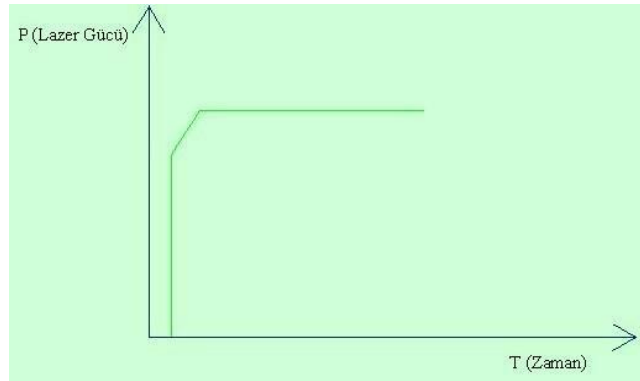
Çok fazla uygulama alanları olmamasına rağmen bazı uygulamalarda kullanılmaktadır.

Kullanılan lazerler duruma göre sürekli dalga (CW) (Şekil 2.9), darbeli (pulse) (Şekil 2.11) yada Q-anahtarlama olabilmektedir. Sürekli lazerlerde, lazer ışını parçaya aktarılmaya başladıktan sonra herhangi bir kesinti meydana gelmemektedir ve lazer aktif maddesi sürekli olarak pompalanmaktadır. Darbeli lazerlerde lazer ışını malzeme üzerine belli bir enerji ile gönderilmekte ve ardından belirli bir süre beklenerek tekrar ışın malzeme üzerine yollanmaktadır. Bu durum periyodik olarak tekrarlanmaktadır. Bu şekilde malzeme işlenmesinde tek bir darbenin gücü sürekli dalgadakinin 4-5 katına ulaşabilmektedir (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004; Karaaslan, 2009).

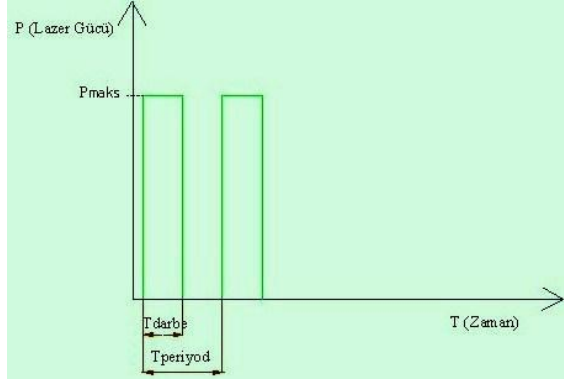


Şekil 2.9 Lazer gücü sabit bir sürekli dalga lazer için lazer gücü-zaman ilişkisi (Önçağ, 2009)

Bunların dışında bazı lazerlerde lazer gücü programlanan bir zamanda kademeli olarak artırılarak ve azaltılarak işlem yapılabilmektedir (Şekil 2.10). Bu sistem özellikle lazer kaynağında kaynak başlangıcında yavaşça gücün artırılmasına ve kaynak sonunda da yavaşça azaltılmasına, böylelikle kaynakta başlangıç deliğinin (anahtar deliği) kontrolüne olanak sağlamaktadır (TLF).



Şekil 2.10 Lazer gücü kademeli olarak artırılan bir sürekli dalga lazerde lazer gücü-zaman ilişkisi (Önçağ, 2009)



Şekil 2.11 Lazer gücü darbeleri bir lazer için lazer gücü-zaman ilişkisi (Önçağ, 2009)

Darbeleri lazerlerde darbe gücü:

$$P_{darbe} = P_{maks}/T_{darbe}$$

Ortalama güç:

$$P_{ort} = P_{maks}/T_{periyod} \text{ olmaktadır.}$$

Q anahtarlama lazerlerde ise rezonatörde oluşan lazer ışınlarının çıkışına bir süre izin verilmemekte ve arkasından birden dışarı salınmakta, böylece gücü çok yüksek lazer ışın darbeleri elde edilmektedir. Lazerin güç yoğunluğu darbenin süresine ve Q-anahtarının hızına bağlı olmaktadır. Kullanımda mekanik olarak 10^{-6} s kapatma-açma süreli ve elektro optik olarak 10^{-9} s kapatma-açma süreli iki tür Q-anahtarı bulunmaktadır (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004; Karaaslan 2009; Önçağ, 2009).

2.7.1. Karbondioksit (CO₂) lazeri:

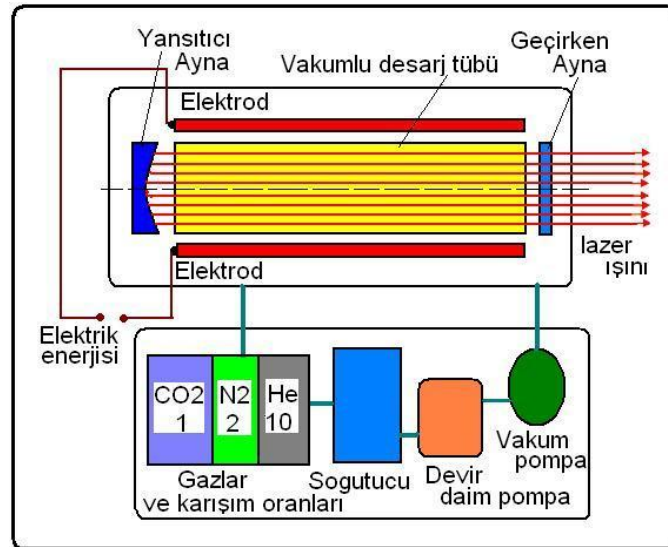
Bu lazer türü endüstride kesme, markalama ve kaynak işlemlerinde oldukça fazla kullanılmaktadır. Karbondioksit lazeri, endüstrideki en yüksek çıkış gücüne sahiptir. Elektrodların gerilime maruz kalmasıyla yüksek olmayan basınçlı bir gaz boşalımı tutuşur. Elektron darbeleri sonucu inversiyon olayı meydana gelir. İnversiyon için karbondioksit gazı dışında azot ve helyum gazları gereklidir (Mungan, 2006).

CO₂ lazerler gaz lazerleri sınıfına girmektedir. CO₂ lazerler infrared bölgede

10.6 μ m dalga boyuna sahiptir. CO₂ lazerinde lazer radyasyonunun üretimi elektrik pompalama ile olmaktadır (TLF). Pompalama işlemi AC veya DC olabilmektedir. CO₂ lazer sistemlerinin soğutulması sulu sistemler ile gerçekleştirilmektedir. CO₂ lazerleri çektikleri elektriğin önemli bir kısmını ısıya dönüştürdüğü için çoğu zaman verimleri %10 dan az olmaktadır (LIA, 2001).

Elektron darbeleri ile karbondioksitin uyarılması; karbondioksit moleküllerinin üst seviyeye doğrudan uyarılması ya da azot ve karbondioksit molekülleri arasındaki darbelerle meydana gelir. Azot'la karbondioksit molekülleri arasındaki, darbelerle uyarma daha çok kullanılır. Azotun yüksek konsantrasyonu ve uzun ömürlü olmasından dolayı enerji bakımından, karbondioksit üst bir lazer seviyesine ulaştırılabilir. Bu moleküllerin darbenmesiyle enerji transferi meydana gelir.

Diğer bir gaz olan helyum gazı ise; darbe boşalması esnasında alt lazer seviyesini hızla boşaltıp, yüksek ısı iletkenliğiyle gaz karışımını soğutup, alt seviyenin de termik bir yüklemeye maruz kalmasını sağlar (Şekil 2.12) (Karaören, 1999; Mungan, 2006).



Şekil 2.12 CO₂ Lazer makine sistemin şematik yapısı ve bileşenleri (Özden, 2007a)

Karbondioksit, azot ve helyum katılarak, düşük verimde olan karbondioksit gazının veriminin artması sağlanır.

CO₂ lazerler malzeme işlemede yüksek güçler sunabilmektedir. 1000W lazer çıkış gücünün altındaki cihazlar düşük güçlü olarak düşünülmektedir, 1000W gücün üzerindeki ise yüksek güçlü lazerler olarak adlandırılmaktadır. CO₂ lazerlerin güçleri 50 kW ' a kadar çıkabilmektedir, buna karşın sanayide kullanılan CO₂ lazerlerinin büyük çoğunluğu 15 kW 'ın altındadır. CO₂ lazerler yüksek güçlere çıkabilmesi sayesinde malzeme işlenmesinde geniş yer edinebilmektedir (LIA, 2001).

CO₂ lazerler hem darbeli (pulse) hem de sürekli dalga (CW) şeklinde üretilmekte ve kullanılmaktadır. Bunun yanında lazer gücü programlanan belli zaman diliminde istenilen güçlere çıkarılarak da (kademeli modu) kullanılabilir. Bu özellik bilhassa lazer kaynağında, kaynağın başlangıç kısmında gücün yavaşça artırılması ve bitiş sırasında yavaşça azaltılması şeklinde kullanılmaktadır (TLF).

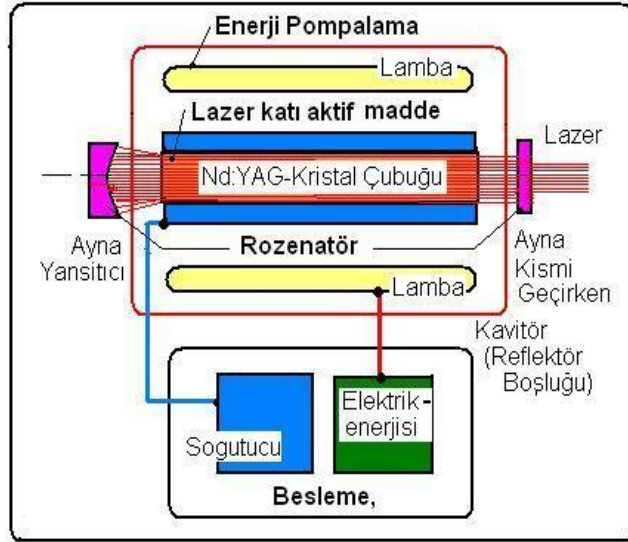
Üretilen lazerin dağıtımı aynalı sistemler vasıtasıyla yapılmaktadır.

2.7.2. Nd: Yag lazeri

Nd:YAG lazeri sanayide malzeme işlemede en çok kullanılan lazerlerden biri olup, katı hal lazerler sınıfına girmektedir. Şekil 2.13'da Nd:YAG lazeri şematik olarak gösterilmektedir.

YAG; Yttrium-Aluminium-Granat kelimelerinin baş harflerinden meydana gelmiştir, yapısı Y₃Al₅O₁₂ şeklindedir. Nd:YAG lazerlerinin kullanımında oluşan lazerin dalga boyu 1064 nm' dir. Bir katı hal lazeri olan Nd;YAG lazeri endüstride kaynak işlemlerinde, delme işlemlerinde, ve genellikle metallerin mikro işleme uygulamalarında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Neodyum, bu lazer çeşidinde lazer yayan elemandır.

Neodyum'un yüksek güçlü ark lambalarının ışığı ile uyarılması sonucu YAG kristali ışığa maruz kalır. Neodyum bu ışığı absorbe ederek uyarılmış olur. YAG kristalinde iyon hızla üst lazer seviyesinin biraz daha üstüne çıkar. Bunun sonucu olarak serbest kalan enerji, ısı enerjisi şeklinde kristale geçer (Karaören, 1999; Mungan, 2006).



Şekil 2.13 Nd:YAG lazerinin şematik gösterimi (Özden, 2007a)

Lazer ışın üretimi neodyumun enerji seviyeleri arasındaki geçişi ile meydana gelmektedir. Aktif maddenin uyarılma işlemi yapay bir kristal içerisinde gerçekleşmektedir. Kristalin çapı 8-10 mm' den 200 mm' ye kadar çıkmaktadır. Birden fazla kristal bir arada kullanılarak Multikilowatt lazerler üretilabilmektedir. Kristalin arka uç kısmında tam yansıtıcı bir ayna, ön uç kısmında kısmen geçirgen bir ayna kullanılmaktadır. Gaz lazerlerle kıyaslandığında daha düşük yansıtıcılığa sahip aynalar kullanılabilir. Yüksek güçlü lazerlerde dielektrik özellikte, düşük güçlü lazerlerde ise altın kaplı metalik aynalar kullanılmaktadır. Lazer üretiminde pompalama için flaş lambası, ark lambası, yada yarı iletken (diyot) lazerler kullanılmaktadır.

Nd:YAG lazerlerde lazer ışınının üretimi sürekli dalga, darbeli (pulse) veya Q-anahtarlama şeklinde gerçekleştirilebilir. Bunun yanında hem sürekli dalga hem darbeli lazerler üretilmekte böylece malzeme işlemede geniş bir seçim aralığı oluşmaktadır. Sürekli dalga Nd:YAG lazerler çeşitli kaynak uygulamalarında CO_2 ile yarışabilir durumdadır. Darbeli lazerler ise kısa atım süreleri ve yüksek pik gücü ile özellikle delme işlemleri için uygundur (Ion, 2005).

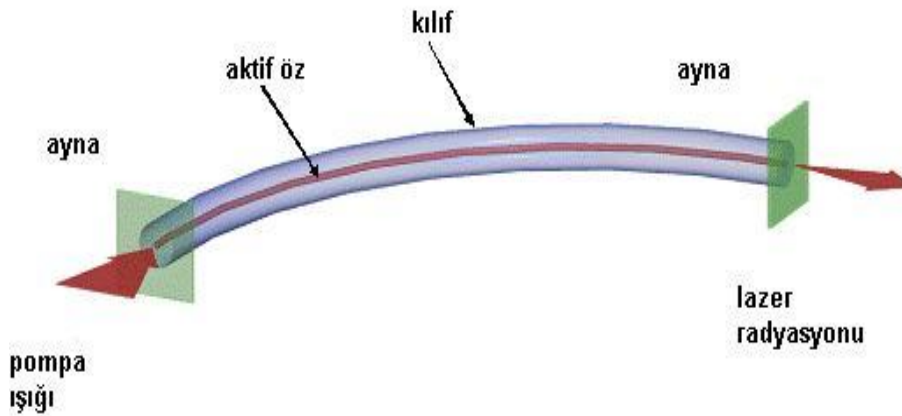
Elektrik tüketiminin yaklaşık olarak %50' si kristal içinde ısı olarak israfa gitmektedir. Soğutma işlemi, düşük güçlü Nd:YAG lazerlerde hava ile yapılırken, yüksek güçlülerde sulu sistemler ile yapılmaktadır.

Nd:YAG lazerlerde, lazer ışınının parçaya iletimi fiber kablolar vasıtasıyla gerçekleştirilebilmektedir, bu da robotlu çalışmalara ve uzak mesafelere lazer ışınının gönderilmesine imkan sağlamaktadır.

2.7.3. Fiber lazeler

Fiber lazerler nadir toprak elementleri olan Erbiyum, Yterbium, Neodmium, Dysprosium, Praseodymium ve Thulium elementlerinden amfiter vasıtasıyla üretilen fotonlara sahip olan bir lazer türüdür. Fiber lazerler geleneksel hard optik rezonatörler ve geleneksel lazer ışın dağıtım metotları yerine lazer ışını üretmek ve dağıtmak için fiber optiği kullanmaktadır, üretilen ışınların optik kablolarla istenilen mesafelere taşınmasına imkan tanımaktadır. Fiber lazerler yarı iletken diyot lazer ile pompalama teknolojisiyle de kombine edilerek yüksek güçlere çıkarılabilmektedir (Alabama Laser; Rp-Photonics; Limpert et. al., Rp-Photonics).

İhtiyaca göre darbeli (pulse) veya sürekli dalgalı (CW) şeklinde çalışılabilecek yapıda üretilmektedir. Fiber lazerlerin güçleri Watt seviyelerinden 50 kW'a kadar çıkabilmektedir. Genel olarak malzeme işlemede Yterbium (Yb^{3+}) aktif maddeli (özlü) fiber lazerlerin kullanımı dikkat çekmektedir. (IPG Photonics; SPI Laser) Şekil 2.14'de fiber lazerin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 2.14 Bir fiber lazerin şematik gösterimi (Rp-Photonics)

Fiber lazerler malzeme işlemede diğer lazerlerle karşılaştırıldığında bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlar;

- Basitlik

- 100,000 saat diyot ömrü. Pompalama için lamba kullanılan Nd:Yag lazerlerde bir lambanın maliyeti 300 dolar civarında yüksek bir değerde iken ömürleri 300 ile 800 saat arasında değişmekte ve 4 Kw gücündeki bir Nd:Yag lazerde 12 lambaya ihtiyaç duyulmaktadır (The Auto/Steel Partnership Tailor Welded Blank Project Team, 2001; Önçağ, 2009)

- Yüksek verimlilik (genellikle: CO₂ – 10%, YAG – 2%, Fiber – 25%)

- Yüksek güvenilirlik

- Modüler güç ölçeklendirme

- Fazla bakıma gerek duyulmaması

- Mobil çalışmaya olanak tanınması

- Yüksek ışın kalitesinin fiber kablolarla korunması ve dağıtılması

- Çalışması için ek sistemlere ihtiyaç duymaması

- Diğer standart katı hal lazerlerine göre daha az yer kaplaması.

Fiber lazerler oldukça geniş uygulama alanına sahiptir. Kaynak, kesme, ısıtıl işlem, sertleştirme, sinterleme, markalama, delme, modelleme işlemlerinde yoğun olarak kullanılabilmekte bunun yanında tıp, otomotiv, elektronik gibi genel endüstri alanlarında geniş uygulamaları olmaktadır. (Alabama Laser; IPG Photonics; SPI Laser; Önçağ, 2009)

2.7.4. Diyot lazerler

Diyot lazerler ölçme teknolojisinde, CD okuyucularında, işaretleyicilerde ve benzeri pek çok uygulamada kullanılmakta bunun yanında malzeme işlemede de zaman zaman tercih edilmektedir. (Tarakçıoğlu ve Özcan 2004).

Günümüzde yüksek güçlü diyot lazerler kaynak ve yüzey işlemlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Diyot lazerlerin en büyük avantajı yüksek verimliliği (%50 e kadar çıkabilmekte), düşük işletme maliyeti ve çok küçük boyutta olmasından dolayı robotlara ve makinelere çok kolay monte edilmesidir (Şekil 2.15). Ancak diyot lazerlerin elektriksel verimliliği CO₂ lazerle karşılaştırıldığında 4-5 kat yüksek olmasına karşın ışın kalitesi malzeme işlemede kullanılan diğer lazerlerden daha düşüktür (Kujanpää and Salminen, 2005).

Diyot lazerlere katı lazerleri pompalamada kullanılan Gallium Alüminyum Arsenid (GaAlAs) örnek gösterilebilir. Diyot lazerlerin dalga boyu 750 nm ile 25000 nm arasında değişmektedir.



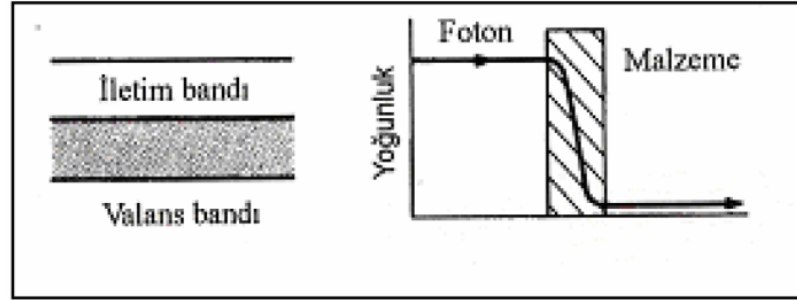
Şekil 2.15 Rofin Sinar 1.5kW diyot lazer (Rofin, 2003)

2.8. Lazer İle Malzeme Etkileşimi

Fotonlar malzemenin elektronik veya kristal yapısı ile etkileştiğinde pek çok optik olaylara neden olur. Bunlar; absorbsiyon, geçme (transmisyon), kırılma ve yansımadır. Bu olayları tek tek inceleyecek olursak;

Absorbsiyon: Bir malzemeye çarpan foton enerjisini bırakarak absorbe edilir. Metallerde valans bandı doldurulmadığı için hemen hemen herhangi bir foton bir elektronu iletim bandına uyuracak yeterli enerjiye sahiptir. (Pauli prensibine göre her enerji seviyesi bir band içerisine genişler ve bu teori ‘band teorisi’ olarak adlandırılır.) Bu nedenle metaller çok ince olmadıkça görülebilir ışıkları absorbe ederler ve ışığı geçirmezler. Absorbsiyon katsayısı malzemenin yoğunluğuna,

ışınımın dalga boyuna, iletim ve valans bandları arasındaki enerji aralığına bağlıdır. (Şekil 2.16) (Çelen, 2006)



Şekil 2.16 Metallerde absorpsiyon ve enerji aralığı ilişkisi (Çelen, 2006)

Geçme (Transmisyon): Fotonlar, bir elektronu yüksek bir enerji seviyesine uyarmak için yeterli enerjiye sahip değilse, absorbe edilme yerine geçme olayı meydana gelir. Bir fotonun absorbe edilmesi veya geçirilmesi fotonun enerjisine ve iletim veya valans bantları arasındaki enerji aralığına bağlıdır. Metallerde bant aralığı yoktur ve hemen hemen bütün fotonlar metalde (istisna olarak çok ince değilse) absorbe edilir.

Geçmenin düzeyide atomik dizilişler ile ilgilidir. Cam ve bazı polimerler gibi amorf malzemeler saydam olabilir. Buna karşın malzeme kristalize olduğunda fotonlar kristal yapı ile etkileşebilir ve kısmen absorbe edilebilir.

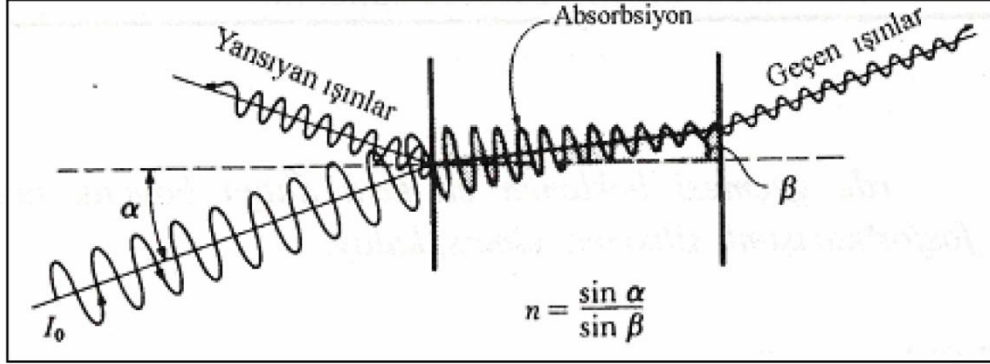
Kırılma: Fotonlar bir malzemedan geçse bile, foton bir miktar enerji kaybeder ve bu nedenle hafif daha uzun bir dalga boyuna sahiptir. Bundan sonra foton, malzemede ışığın hızı azaltılmış yönü değiştirilmiş bir foton demeti gibi davranış gösterir. α ve β sırasıyla çarpan ve kırılan ışınların açıları malzemenin yüzeyine bir dik oluşturur. Bu durumda n kırılma indisi aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (Şekil 2.17).

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{vakum}}{\lambda} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

Burada; n kırılma indisi, c ışığın boşlukta yayılma hızı, v ışığın malzemedeki hızıdır. Fotonlar, malzemedeki elektronlar daha kolay kutuplaştığında etkileşir ve daha fazla kırılır. Bu nedenle kırılma indisi ve malzemenin dielektrik sabiti arasında aşağıdaki bağıntı vardır.

$$n = \sqrt{K}$$

Dielektrik malzemeler gibi kolay kutuplaşan malzemeler, daha yüksek bir kırılmaya sahiptir. Kırılma indisi, yoğun malzemeler için daha büyüktür.



Şekil 2.17 Foton demetlerinin bir malzemeyi geçerken etkileşimden dolayı yönlerini değiştirmeleri (Çelen, 2006)

Yansıtma: Malzeme yüzeyi düzgünse ve çarpan fotonlar düşük bir enerjiye sahipse çarpan fotonların bir kısmı metal yüzeyinden yansıyacaktır. Yansıtma oranı R , kırılma indisi ile ilgilidir ve aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir. Yüzeyleri çok düzgün metallerde yansıtma oranı çok yüksek olup, %100'e yakındır.

$$R = \text{Yüzde Yansıtma} = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \times 100$$

Yüksek kırılma indisli malzemeler düşük kırılma indeksli malzemelerden daha yüksek bir yansımaya sahiptir. Işık düşük kırılma indisli malzemelerde yansımadan daha çok geçer. (Askeland, çev. ,2002; Çelen, 2006)

2.9. Lazer İmalat Yöntemleri

Lazer imalat yöntemlerinin konvansiyonel yöntemlere göre belirli avantajları vardır. Bunlar;

- Temassız ve kuvvet gerektirmeyen işlem yapması
- Takım aşınması olmaması
- Otomatik operasyonlar için mükemmel ışın kontrolü yapılabilmesi
- İşlem noktasındaki çok yüksek enerji yoğunluğuna rağmen iş parçasında üzerinde düşük termal girdi olması
- Yüksek işlem hızına sahip olması
- Çok sert, gevrek ve yumuşak malzemelerde işlem yapabilmesi
- Uygun sistemlerle birleştirilerek istenilen şekillerin işlenebilmesi
- Takım değiştirmeden farklı geometrilerin gerçekleştirilebilmesi
- Işının gecikme olmadan etkinleştirilip ve etkisizleştirilebilmesi sayesinde ölü zamanların azalması
- Çeşitli imalat yöntemlerine göre çok yönlü olması
- Konvansiyonel imalat yöntemlerine kolay entegre edilebilmesi

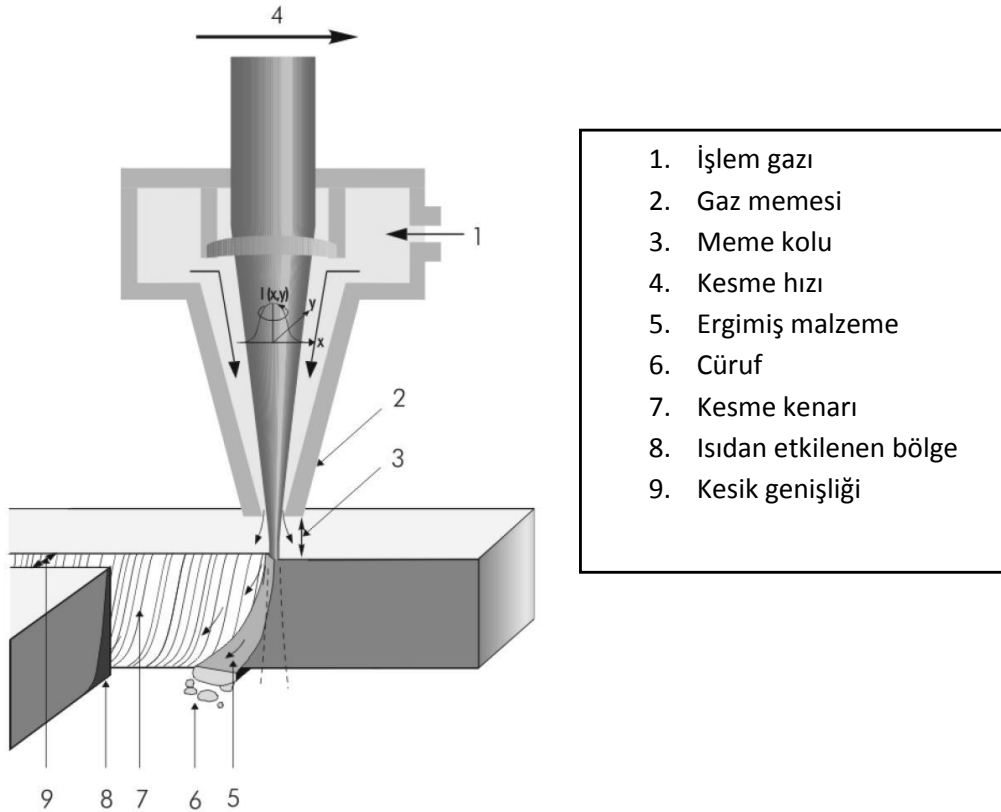
Lazer imalat yöntemleri ile ilgili genel bilgiler üç ana başlıkta toplanmıştır. Bunlar lazer ayırma, lazer birleştirme ve lazer ısıl işlemdir.

- Lazer ayırma yöntemleri kesim, delme, yüzey temizleme ve markalamadır.

2.9.1. Lazer kesim

Lazer ile kesim aslında bir ısıl işlemdir. Bu kesimde lazer ışınımı, ısı kaynağı yani kesici görevini yapmaktadır. İyi bir kesimin elde edilebilmesi için lazer ışınının malzemeye tam olarak nüfuz etmesi gerekir. Böylece eriyen malzeme dışarı atılarak yapışması engellenir. Lazer kesme yönteminin, işlem gazı ve enerji kaynağına göre üç farklı şekli vardır. Bunlar;

- Lazer Fizyon (Eriterek) Kesim
- Lazer Alevli (Yakarak) Kesim
- Lazer Süblimleşme (Arıtarak) Kesim



Şekil 2.18 Lazer kesim prensibi (Rofin, 2003)

2.9.1.1. Lazer fizyon (eriterek) kesim

Bu kesme yönteminde iş parçası lazer ışınımı ile kesme bölgesinde eritilir. Eriyen malzeme inert bir gaz yoluyla dışarı atılır. Inert gazlar lazer ışınımı içerisinde bulunan yüksek saflıktaki gazlardır. Genellikle azot ve argon inert gaz olarak kullanılır.

Bu kesmede, kesme hızı malzeme kalınlığı ve malzemenin erime sıcaklığıyla ters orantılı olup, lazerin gücü ile doğru orantılıdır (Mungan, 2006).

2.9.1.2. Lazer alevli (yakarak) kesim

Lazer ile yakarak kesimde, fizyon kesimde olduğu gibi iş parçası lazer ışınımı ile ısıtılır. Fizyon kesimden farklı olarak oksijen gazı kullanılır. Oksijen ile iş parçası ekzotermik bir reaksiyona girer. Bu reaksiyonla birlikte daha yüksek bir enerji yoğunluğu elde edilir. Ve kesme bölgesinden de malzeme uzaklaştırılmış olur.

Kesme hızı lazer gücüyle orantılıdır. Lazer gücüne bağlı olarak oksijen ve enerji iletimi de kesme hızını etkiler.

2.9.1.3. Lazer süblimleşme (arıtarak) kesim

Bu kesim işleminde kesme bölgesi yüksek yoğunluktaki lazer ışınımı ile buharlaştırılır. Eriyen malzemenin atılmasını önlemek için, malzeme kesme bölgesinde yoğunlaşmamalıdır. Bu nedenle malzemenin kalınlığının, lazer ışınımının çapından büyük olmaması uygundur. Metal olmayan malzemelerde de (tahta, seramik, kağıt, plastik) uygulanabilmektedir. Malzeme kalınlığı ışın çapından büyük olsa da kesme işlemi yapılabilir. Çünkü malzeme yoğunlaşmaz.

Enerji yoğunluğu odaklanmanın düzgün olmasına, malzeme ve kesme bölgesi derinliğine bağlıdır. Kesme hızı malzeme kalınlığına ve lazer gücüne bağlıdır.

2.9.2. Lazer delme

Lazer ile delme yöntemi kalın ve ince saclarda kullanılmakta ve matkap ve panç gibi yöntemlerin yerini almaktadır. Lazer ile delme özellikle mikro işlemlerde kullanılmaktadır. Lazer ışınının malzemeyi eritmesi ve buharlaştırması sonucunda oluşan üst basınç etkisi ile işlem gerçekleştirilmektedir. Uygulamada tek darbe ile veya seri darbeler halinde ışınlar malzemeye gönderilerek işlem gerçekleştirilmektedir. Bunun dışında darbeli atımlı lazer kullanarak ve odaklama merceği döndürülerek de delikler kesilerek açılmaktadır. (Karaaslan, 2009)

2.9.3. Lazer yüzey temizleme

Uzun bir süredir bilinen ve endüstride kullanım alanı bulan Lazer kesim ve lazer kaynak yöntemlerinin yanında son yıllarda lazer ile yüzey temizleme de gündeme gelmektedir.

Lazer ile yüzey temizleme işlemi; kalıpların temizlenmesi, boya sökümü, kaynak öncesi hazırlık, yağ ve oksit gibi istenmeyen maddelerin yüzeyden uzaklaştırılması gibi pek çok uygulamada kullanılmaktadır.

İşlem lazer ışınlarının atımlar-darbeler (pulse) şeklinde malzeme yüzeyine gönderilmesi ve uzaklaştırılması istenen malzemenin süblimleştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Burada kullanılan lazer ışının gücü, dalga boyu, darbe süresi ve yüzeyden uzaklaştırılacak malzemenin lazer ışınlarını absorblamaya ne kadar uygun olduğu önem arz etmektedir. Yüzeyden uzaklaştırılacak malzeme ışınları ne kadar iyi absorbe ederse o kadar hızlı yüzey temizleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Kullanılan lazerin darbe süresi nanosaniye (ns) mertebesinde veya milisaniye mertebesinde olabilmektedir. Süre malzemeye ısı transferini mümkün olduğunca önleyecek şekilde seçilmekte ve değişmektedir. Darbe süresine odaklanılan noktanın çapı da etki etmektedir. Daha geniş bir odak çapı için darbe süresi artmaktadır.

Lazer ile yüzey temizleme işlemi el kontrolü ile yapılabildiği gibi otomasyon içinde son derece uygun bir yöntem olmaktadır. Ayrıca mobil

çalışmaya elverişli bir yöntemdir. Uygulamada Nd:YAG, CO₂ ve fiber lazerler yüzey temizlemede kullanılmaktadır. (Jetter, 2002; Heidelmann, 2009)

Bunun yanında Excimer lazerinde yüzey temizlemede kullanılabildiği literatürde görülmektedir (Sundar et. al., 2009).

Lazer ile yüzey temizlemenin konvansiyonel olarak kullanılan kimyasal temizleme ve kumlama yöntemlerine göre bir takım avantajları bulunmaktadır. Lazer ile yüzey temizlemede kumlama olduğu gibi bir abrezif malzemeye gerek duyulmamakta dolayısıyla işlem sonrasında fazla atık ortaya çıkmamaktadır. Ayrıca hassas yüzeyler kumlama olduğu gibi zarar görmemektedir. Kimyasal temizlemede de sağlık açısından zararlı olabilen solventler kullanılabilmekte ve bunların atıkları sorun yaratabilmektedir. Buda kimyasal temizleme için önemli bir dezavantaj teşkil etmektedir. Ayrıca Lazer ile yüzey temizleme hem kumlama hem de kimyasal yüzey temizleme ile karşılaştırıldığında otomasyona daha uygundur. (Jetter, 2002; Heidelmann, 2009)

2.9.4. Lazer markalama

Lazer Markalama işlem mantığı açısından yüzey temizleme işlemine benzerdir. Markalanmak istenen bölgeye lazer ışınları yollanmakta ve süblimleşme meydana getirilmekte malzemenin bir bölümü buhar fazına geçirilmektedir. (Karaaslan, 2009)

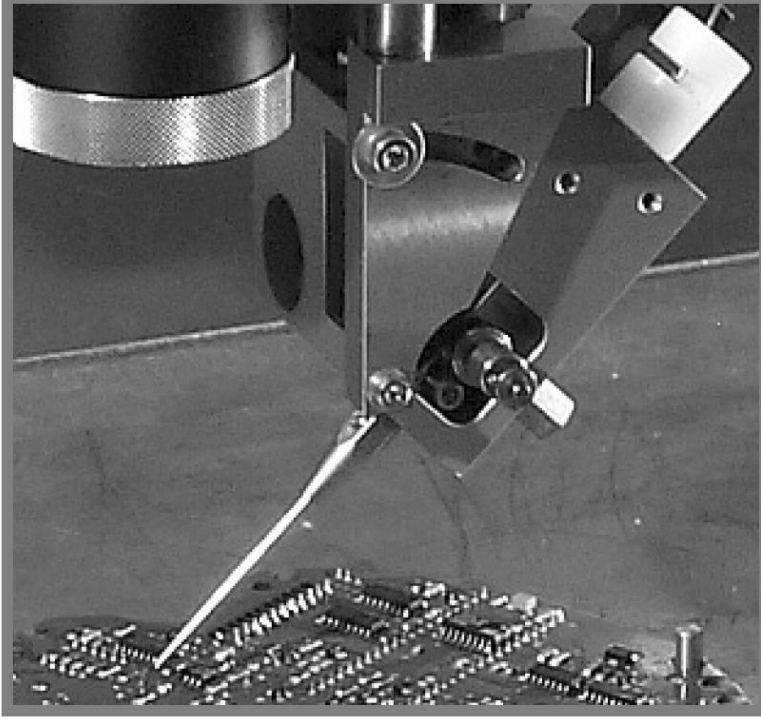
- Lazer birleştirme yöntemleri lehimleme ve kaynaktır.

2.9.5. Lazer lehimleme

Lehimleme çok küçük geometrideki iş parçalarında birleştirme işlemleri için kullanılmaktadır. Lazer lehimleme yöntemi bütün lehimleme teknikleri için uygundur. Lehimleme malzemesi olarak tel biçiminde veya macun formunda işleme katılmaktadır.

Lazer ışını etkileşim zamanı süreç akışında kontrol edildiğinde lazer lehimleme yüksek işlem güvenilirliğine sahiptir. Bu da yüzey sıcaklığının

zamanın fonksiyonu olarak kontrol edilmesiyle gerçekleştirilir. Bu sayede farklı miktarlarda lehimleme malzemesi ve yüzey özelliklerindeki değişim dengelenmiş olur.(Rofin, 2003)



Şekil 2.19 Diyot lazer ile devre kartı lehimlemesi (Rofin, 2003)

2.9.6. Lazer kaynağı

Lazer kaynağı yönteminden ayrıntılı olarak sonraki bölümlerde bahsedilecektir.

2.9.7. Lazer ısı işlem

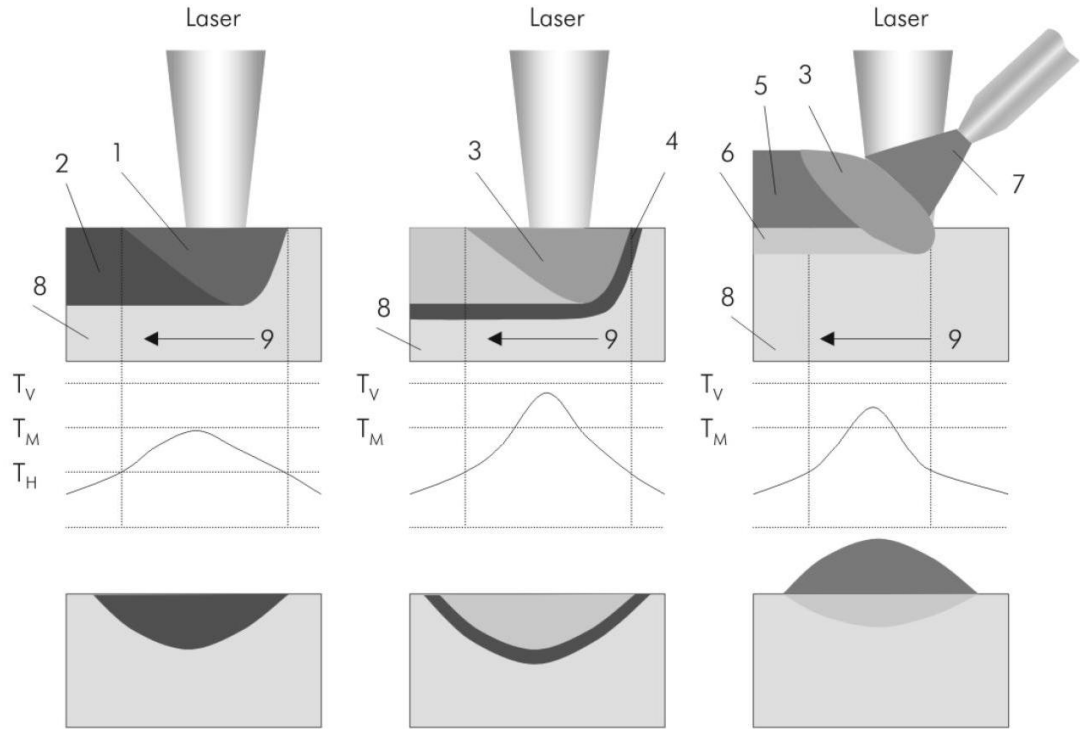
Isıl işlem teknikleri iş parçasındaki aşınmaya olan direnci arttırmak için uygulanır.

Lazer ısı işlem ile aşağıdaki iyileştirmeler gerçekleştirilebilir.

- Sertliğin artırılması
- Yüzey topografisinin değiştirilmesi

- Aşınmaya dayanıklı kaplamaların uygulanması
- Sıkıştırıcı iç gerilmeler yaratılması
- Tepki katmanları oluşturulması

Lazer ısıtım işlem teknikleri Şekil 2.20’de gösterilmiştir;



a: Sertleştirme

b: Yeniden eritme

c: Giydirme

1: Ostenit, 2: Mortensit, 3: Erime, 4: Isıdan etkilenmiş bölge, 5: Kaplama, 6: Karışmış bölge, 7: Ek malzeme, 8: Zemin malzemesi, 9: Besleme yönü, T_H : Sertleştirme sıcaklığı, T_M : Erime sıcaklığı, T_V : Buharlaşma sıcaklığı

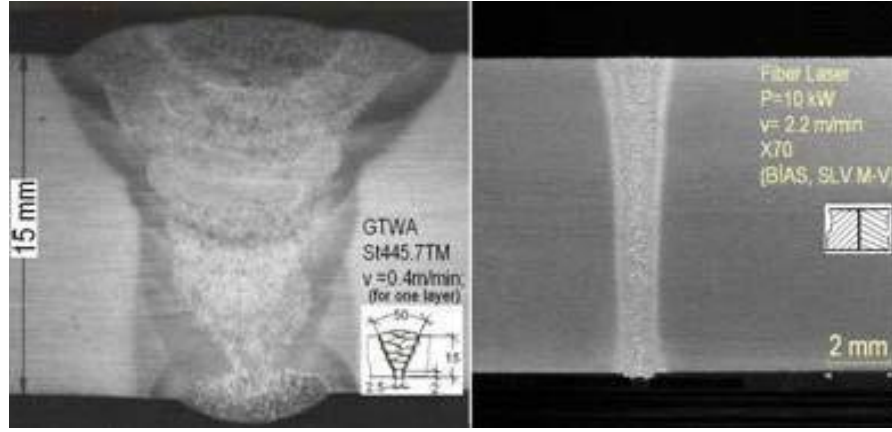
Şekil 2.20 Lazer ısıtım işlem teknikleri (Rofin, 2003)

3. LAZER KAYNAĞI

Lazer kaynağının konvansiyonel kaynak yöntemlerine göre çeşitli **avantajları** vardır. Bunlar;

- Lazer, temiz bir enerji kaynağıdır.
- Takım aşınması olmaz ve malzeme ile temas yoktur.
- Bir çok tipteki ve farklı kalınlıklardaki malzemelerin kaynatılabilir.
- Otomasyona oldukça elverişlidir.
- Kaynak işlemi oldukça hızlıdır.
- Düşük ısı girdisi nedeniyle malzeme etkileşimi çok azdır. (Deformasyon ve distorsiyonlar)
- Kaynak işlemi, dolgu malzemesi kullanmadan veya kullanılarak yapılabilir.
- Estetik açıdan güzel görünüm oluşur, taşlama gerektirmez.
- Yüksek derinlik/genişlik oranına sahip dar kaynak dikişi oluşur.
- Konvansiyonel kaynak yöntemleriyle ulaşamayacak yerlerde kaynak yapılabilir.
- İstenilen her birleştirme şekli elde edilebilir.
- Lazer çıkışı elektriki değildir, elektriki süreklilik gerektirmez dolayısıyla manyetik olarak bir etkisi yoktur. Konvansiyonel kaynak yöntemlerinin bir kısmında görülen manyetik üfleme söz konusu değildir.
- Şeffaf malzemelerin kaynağı yapılabilir.

- Kaynak esnasında geometrik sensörler kullanarak kaynak dikişinin izlenmesi ve pozisyon kontrolü yapmak mümkündür. Bununla birlikte kaynak öncesi temaslı sensörler kullanarak izlenecek yolu belirlemek ya da lazer sensörler kullanarak kaynak sırasında izlenecek yolu otomatik olarak tespit etmek mümkündür. Böylelikle lazer kafasının kaynak sırasında yanlış bir bölgeyi kaynatması engellenmiş olmaktadır (Erdem ve Akkuş, 2009).



Şekil 3.1 Lazer kaynağı ile gaz altı kaynağının karşılaştırılması (Özden, 2008c)

Lazer kaynağının bazı **dezavantajları**da vardır. Bunlar;

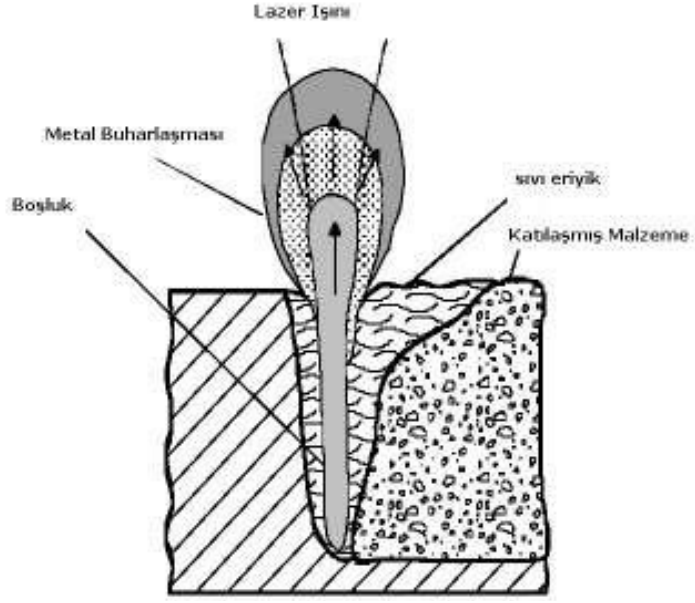
- Sertleştirilebilir malzemelerde son derece sert kaynak dikişi; hızlı ısıtma ve soğutmaya bağlı soğuk çatlak veya sıcak çatlak oluşabilir.
- Diğer bir çok kaynak yöntemiyle karşılaştırıldığında çok yüksek yatırım masrafları gerektirir.
- Lazer ekipmanlarındaki, optik elemanların korunması bakımından temiz bir çevre gerektirmektedir.
- Kullanılan lazerler göze veya deriye direkt veya dolaylı olarak temas ettiklerinde ciddi sağlık sorunlarına neden olmaktadır. Bundan dolayı, lazerin radyasyon tehlikesine karşı uyarı işaretleri, lazer çalışırken yanan ikaz lambaları kullanmak gerekmektedir. Lazer operasyonu eğitim ve tecrübe gerektirmektedir. Çalışan personelin lazerin tehlikelerinden haberdar olması gereklidir.

- Özellikle yüksek yansıtma kabiliyetine sahip malzemelerin kaynağında ek tedbirler almak gerekebilir. (Örneğin; yüzeyin siyah boya ile boyanması, grafit, manganez vb. maddelerle kaplanması gibi).
- Lazer teknolojisi ve lazer kaynağı halen daha gelişmekte olan bir teknoloji ve kaynak yöntemi olduğundan özellikle seri imalattaki bir uygulama öncesinde lazer tipinin seçiminden kaynaklanacak malzemelerin konstrüksiyonun ve metalürjik yapısından kaynaklanmaya uygunluğuna kadar ciddi bir ön çalışma gerektirmektedir.

Yüksek işlem hızları, bağlantıdaki yüksek dayanım, çarpılmaları yok etmek için sınırlandırılmış enerji girişinden dolayı lazer kaynak işlemi uygun bir birleştirme teknolojisidir. Pek çok avantaja rağmen kaynak bağlantısındaki mekanik özellikleri düşüren oyuk veya çentikler oluşabilir. Farklı alüminyum alaşımlarının davranışı kendi viskozitesine bağlıdır. Bakır, titanyum veya demir gibi alaşım elementleri viskoziteyi ve kaynak işleminin kararlılığını arttırır silisyum ve magnezyum gibi elementler kaynak dikişinde viskoziteyi azaltır. Gelecekte uçak gövdeleri perçinlenmiş gövde bağlantısı ağırlık azaltma ve daha düşük maliyetler için lazer kaynaklı olacaktır (Schubert, 2001).

Lazerler diğer ısı ile ilgili işlemlerle karşılaştırıldığında yüksek ısıya neden olan etkenleri kontrol eder. Yine de ısıdan bölgesel sertleşme olur (Choi et al., 2001).

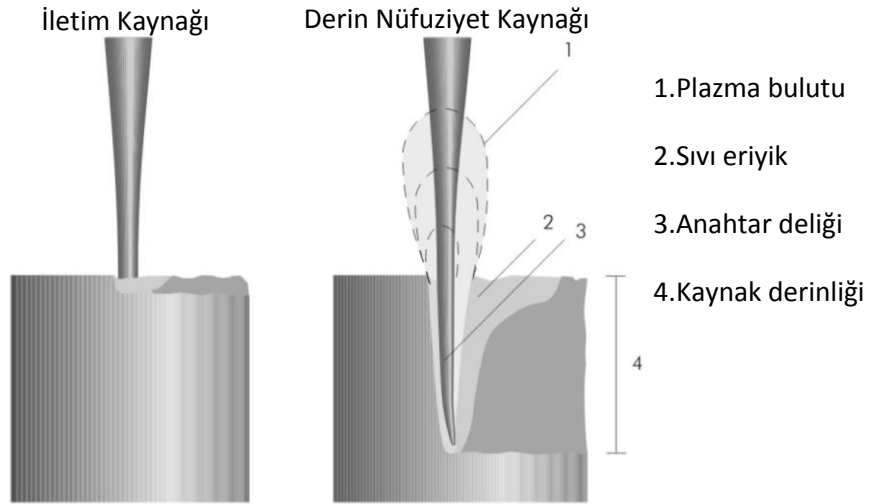
Kaynak sırasında lazer ışını malzeme içinde dikine dar bir buhar kanalı oluşturur. Bu kanalın hareket yönü tarafında devamlı olarak sıvı metal oluşur ve bu sıvı türbülans akımıyla kanalın arka tarafına toplanır. Böylece dar fakat derinlemesine bir kaynak dikişi elde edilir. Kaynaklanan parçalarda ısıl büzülme, çarpılma çok azdır. Çizgisel kaynak hızı yüksek işlemlerdeki dikişler daha da ince olur. Çizgisel enerji az olduğundan ana malzemenin değişimi de çok azdır. Böylece dikiş yakınındaki ısı etkisinde kalan bölge çok az olur. Bu nedenle de kristal büyümesi oluşmaz (König and Otmanbölük, 1998). Lazer kaynağının şematik resmi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Lazer kaynağı şematik resmi (Walz, 2003)

3.1. Lazer Kaynak Yöntemleri

Lazer kaynağı iki ana yöntemi kapsar, İletim Kaynağı (Conduction Welding) ve Derin Nüfuziyet Kaynağı (Deep Penetration Welding). Bu iki yöntemin basit prensipi Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Lazer kaynağı yöntemleri basit prensibi (Rofin, 2003)

Yapılacak işlemin iletim kaynağı mı yoksa derin nüfuziyet kaynağı mı olacağını belirleyen en önemli parametre malzeme yüzeyine odaklanan lazer ışınının yoğunluğudur. Lazer ışığının yoğunluğuna göre malzeme ısıtılabilir, ergitilebilir veya buharlaştırılabilir.

3.1.1. İletim kaynağı

Lazer İletim kaynağında, Şekil 3.3’de görüleceği üzere düşük enerji yoğunluğuyla yüzeysel derine inmeyen, sık ve geniş bir kaynak dikişi oluşturulur. Malzeme ısı iletim ile lazer ışınını yüzeyde soğurarak erir, katılaştıran eriyik malzeme ile birleşerek işlemi gerçekleştirir. Kaynak nüfuziyet derinliği 1 mm’nin altındadır.

İletim ve nüfuziyet kaynağı arasındaki en temel fark; iletim kaynağı esnasında kaynak banyosu aralıksızdır, lazer ışını tarafından kesilmemiş olmasıdır. İletim kaynağı sistem için daha az rahatsızlık vericidir, çünkü lazer ışınımı kaynak edilmiş malzeme içine nüfuz etmez. Sonuçta iletim kaynakları, kaynak esnasında daha az gaz tutucu özelliğe sahiptir (Çelen, 2006)

Bu yöntem derin nüfuziyet yöntemiyle karşılaştırıldığında oldukça yavaş bir işlem olmaktadır. Gönderilen enerjinin malzemeyi etkili şekilde ısıtması ve ergimenin iç kısımlara ulaşması yani nüfuziyetin artması daha uzun sürmektedir. Dolayısıyla iletim kaynağı daha çok teller ve ince saclar gibi küçük ve düşük kalınlıklı malzemelerin kaynatılmasında tercih edilmektedir. Lazer iletim kaynağı yöntemi kalın ve büyük parçaların kaynağında kullanıldığında kaynak bölgesinin büyümesine ve termal çarpılmalara neden olmaktadır (Lia, 2001 ; Ion, 2005).

Normalde ark kaynağı ile kaynatılabilen malzemeler lazer iletim kaynağı ile de kaynatılabilmektedir. Lazer iletim kaynağının düşük ısı girdisi sınırlandırılmış ve düşük çarpılmalar oluşturmaktadır ki bu da tekrar işlem yapma ve malzemenin hasarlı sayılarak atılmasını önlemektedir. Hızlı termal çevrimler fosfor ve sülfür segregasyonlarını azaltmakta ve iyi bir katılaşma mikro yapısının oluşumunu sağlamaktadır. Hızlı soğuma çevrimi aynı zamanda tane büyümesini sınırlandırmaktadır (Ion, 2005).

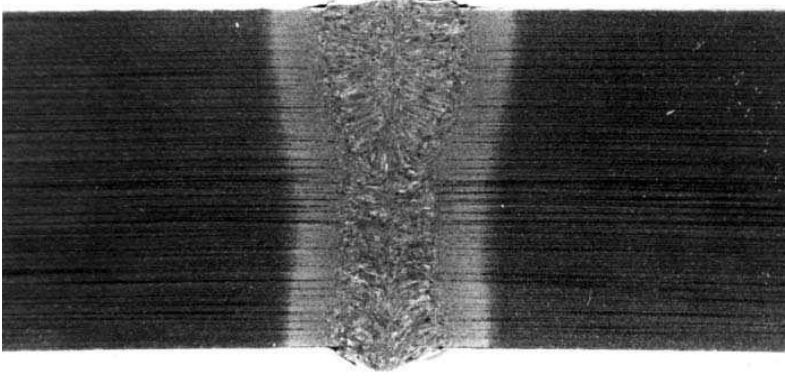
Bir lazer kaynağının iletim kaynağı olarak kabul edilebilmesi için en temel koşul kaynak edilen malzemenin yüzey sıcaklığının ergime noktasını geçmesi ancak buharlaşma noktasına ulaşmamasıdır. İletim kaynağı darbeleri (pulse) Nd:YAG lazerler için uygun bir yöntemdir. Daha çok elektronik sanayi ve küçük tıbbi parçaların yapımında kullanılmaktadır (Ion, 2005).

3.1.2. Derin nüfuziyet kaynağı

Lazer Derin Nüfuziyet kaynağında derin ve dar bir kaynak dikişi oluşturulur. Lazerin odaklanmasıyla bir noktayı ergime sıcaklığının üzerine ısıtarak erimiş metal içerisinde buharla çevrelenmiş bir ergime bölgesi oluşturulur.(Şekil 3.3) Metalin bir kısmı buharlaşmaya kadar ısınarak bir boşluk (delik) oluşturur. Bu oluşturulan boşluk iyonize edilmiş metalik gaz ile plazma dolarak verimli olur. Buharlaşmış metal, çevreleyen sıvıyı buhar basıncıyla arkasında tutarak, iş parçası boyunca aşağıya doğru anahtar deliği olarak adlandırılan bir silindirik hacim oluşturur. Buhar iyonize olarak gelen lazer ışınımını absorbe eder ve enerjiyi anahtar deliği etrafındaki ergimiş metal boyunca sevkeder. Böylece deliğin etrafındaki malzeme lazer ışınından gelen tüm enerjiyi soğurur. Böylece lazer enerjisinin % 95 civarı bir silindirik hacim içerisine hapsedilir. Anahtar deliği içerisindeki sıcaklık 25000° C'ye kadar ulaşabilir. Enerji tüm anahtar deliği (silindirik hacim) boyunca transfer edildiğinden lazer plazma kolonu içerisinde kayıp vermeden derine inebilir (nüfuz eder). Anahtar deliği tekniğini çok verimli kılan temel sebepte budur. Lazer kafası ve iş parçası arasındaki bağıl hareket anahtar deliğinin malzeme boyunca hareketiyle bir dikiş kaynağı oluşumunu sağlar. Anahtar deliği hareket ettiğinde, sıvı metal onun ön yüzeyinden arkasına doğru akar ve orada katılır. Bu akış, ergimiş metalin yüzey gerilimi ve sıcaklığın sebep olduğu değişimlerle sürdürülmektedir (Çelen, 2006).

Bugünlerde yeterli lazer gücü kullanıldığında derin nüfuziyet kaynağında, kaynak derinliği 25 mm'ye kadar çıkabilmektedir (Rofin, 2003).

Derin nüfuziyet kaynağının çok verimli olmasının sebepleri buhar kanalı lazer ışınını hapsederek, yansımayla olan enerji kaybını azaltmaktadır, buhar kanalı içinde lazer kayıp vermeden derine iner ve anahtar deliği bir silindirik ısı kaynağı gibi hareket etmekte, iş parçası yüzeyini aşağıya doğru genişleterek ergime bölgesinin dışındaki ısı iletimle enerji kaybını azaltmaktadır (Çelen, 2006)



Şekil 3.4 Nd:YAG lazeri ile derin nüfuziyet kaynağı yapılan 6 mm kalınlığında karbon-manganez çeliğinin kesiti (Ion, 2005)

Lazer ile derin nüfuziyet kaynağında dolgu maddesi kullanılarak da kaynak yapmak mümkün olmaktadır. Eğer kaynaklanacak malzemeler arasındaki boşluk kaynak derinliğinin % 5'inden büyük ise sağlıklı bir kaynak bağlantısı meydana gelmeyecektir. Bu durumda kaynak işlemi sırasında kaynaklanacak malzemelerin bir dolgu malzemesi ile beslenmesine gerek duyulmaktadır. Kaynak telinin ne kadar miktarda kullanılacağı kaynak hızına, kaynak derinliğine ve kaynaklanacak malzemeler arasındaki boşluğa bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte çok ince dolgu tellerinin tam pozisyonu da büyük önem arz etmektedir. (TLF)

Dolgu maddesinin kullanılma sebebi yukarıda belirtilen nedenden başka kaynak dikişinin alaşımlandırılması ve uygun dolgu maddesi seçerek kaynak dikişlerinde çatlakların önlenmesi amacıyla da kullanılmaktadır (TLF).

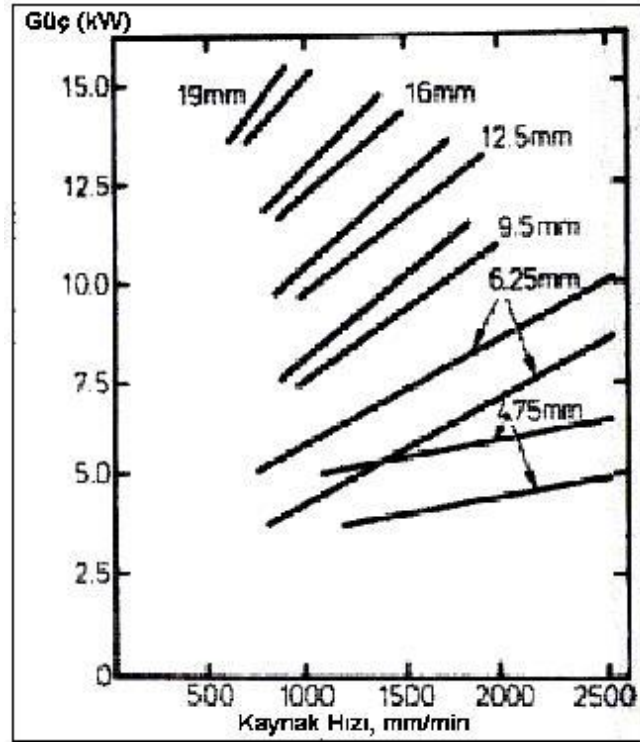
Lazer ile derin nüfuziyet kaynağı yüksek güçlü lazer makineleri ile gerçekleştirilmektedir. Derin nüfuziyet kaynağında YAG, CO₂ ve son yıllarda da fiber lazerlerin kullanıldığı göze çarpmaktadır.

3.2. Lazer Kaynağı Parametreleri

Lazer iletim kaynağının kalitesini etkileyen esas parametreler şunlardır; Lazerin dalga boyu ve kullanılan merceklerin lazer demetini yutma oranı, lazer ışının gücü, lazer ışının leke boyutu, lazerin çalışma modu (sürekli dalga veya darbeli), lazer ışının odak uzaklığı ve odak noktası, iş parçasının kimyasal bileşimi, iş parçasının fiziksel geometrisi (iş parçasının kalınlığı, iş

parçasının yüzey durumu), koruyucu gaz(karışım oranı, akış hızı, basınç, meme boyutu ve pozisyonu), kaynak karakteristiği (kaynak hızı, birleştirme geometrisi, aralık toleransı).

Kaynağın malzemeye nüfuz derinliği güç yoğunluğu ve kaynak hızına bağlıdır. Malzemeye uygulanan güç yoğunluğu arttıkça ve kaynak hızı azaldıkça nüfuz derinliği artar.



Şekil 3.5 Farklı kalınlıklardaki karbonlu çelik levhalar için kaynak hızının (CO₂) lazer gücüne göre fonksiyonu (Duley, 1998).

Şekil 3.5’de görülebileceği üzere levha kalınlığının artmasıyla kaynak hızı azalırken, iş parçasına verilen güç, dolayısıyla enerji miktarı yükselmektedir.

İlk önce üretim hızının olması gereken en alt hız değeri başlangıç kaynak hızı olarak seçilir. Bu hızda istenen nüfuz derinliğini sağlayan lazer çıkış gücü belirlenir. Malzemeye en uygun olan güç yoğunluğu ise denemeler sonucunda bulunur. Genellikle lazer kaynağı için gerekli işlem parametreleri seçilirken teoriler üzerinden, denemelerden ve geçmişte yapılan deneyimlerden faydalanılır. Teorik hesaplamaların ışığında, çeşitli parametreler için değişik değerler denenerek en uygun olanı seçilir. Kaynak hızının, iş parçasına uygulanan güç

yogunluğunun ve odak noktasının yanlış seçilmesi, merceklerin kirliliği, gerekli kaynak ortamının sağlanmaması vs. gibi hatalar kaynağın bozuk olmasına sebep olmaktadır (Özcan ve diğerleri, 2004).

Lazerlerin ilk endüstriyel uygulamalarından biri metallerin kaynağıdır. İki metalin kaynağı sadece alaşım tipine ve bileşimine bağlı değildir. Gözeneklilik kaynak kalitesini açıklamak için önemli bir parametredir. Gözeneklilik derin kaynaklarda önemlidir (Duley, 1999).

Bütün kaynak işlemlerinde en önemli parametrelerden biri de koruyucu gazın özellikleridir. Lazer kaynağında koruyucu gaz plazma oluşumunu minimuma indirerek istenilen kaynak nüfuziyetini elde edebilmek açısından önemli bir role sahiptir. Gazın ilk rolü kaynak bölgesinde oksidasyonu önlemektir. İkinci ve kritik fonksiyonuda, kaynak bölgesi üzerindeki buhar ve kaynak bölgesi içinde yaratılabilecek plazma oluşumunu bastırmak ve plazma oluşumunu durdurmaktır. En son rolü ise, lazer ışınının kaynak bölgesine minimum kesilme ile ulaşmasını temin etmektir. Böylece kaynak kalitesi iyileştirilir.

Genellikle koruyucu gaz olarak Helyum ve Argon kullanılmaktadır, yüksek iyonizasyon enerjisinden dolayı Helyum gazı tercih edilir. Azot da Helyum ile yer değiştirebilecek ve genellikle kullanılan bir gazdır, aynı özelliklerin bir çoğuna sahiptir fakat daha ucuzdur. Gaz debileri genellikle 10-40 litre/dak, daha yüksek kaynak hızları için daha yüksek debiler gereklidir (Behler ve diğerleri, 1988).

Kaynak bölgesi boyunca gaz akışı banyodaki sıvı akışının dengesini bozabilir, bu da düşük kalitede kaynaklara sebep olmaktadır. Bu akış etkileri nozul geometrisinin kuvvetli bir fonksiyonudur ve bu problemi minimuma indirmek için çeşitli nozul dizaynları gerçekleştirilmiştir (Çelen, 2006).

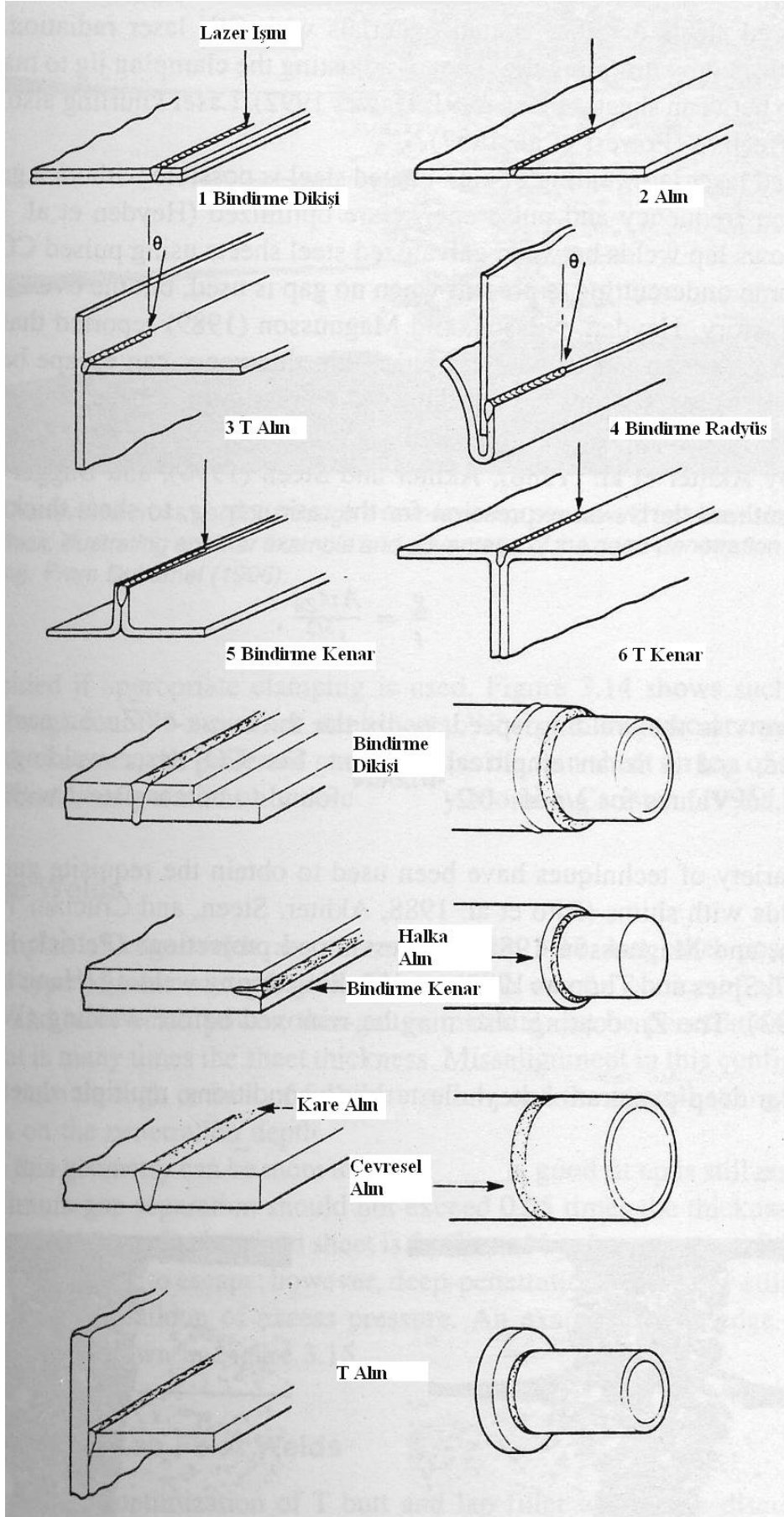
Aluminyum ve titanyum gibi hızlı oksitlenebilen malzemelerin kaynağı yapıldığı zaman kaynağın kökünün havadan çok etkilenen arka tarafından korunması gereklidir. Argon ve N₂ gazları bu uygulamada sık sık kullanıldığı halde, He gazı tercih edilir çünkü havadan hafif olduğu için kaynağın altından iş parçasının yüzeyine doğru yükselir.

3.3. Lazer Kaynağında Birleştirme Türleri

Lazer kaynak sistemlerinin en önemli özelliği esnekliktir ve malzemelerin çeşitli geometrilerde birleştirilmesine geniş bir olanak sağlamaktadırlar. Birçok durumda, lazer kaynağı ilave dolgu malzemesi kullanılmadan yürütülür, fakat iyi bir kaynak için tüm şartlarda karşılaşılan ortak sorun kaynak edilecek parçaların yerleştirme uygunsuzluğudur. Kaynak edilecek parçaların uygun bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu gereklilik dikiş geometrisindeki dar toleransla sonuçlanmaktadır ve buda dikişe olan lazer odaklamasıyla ilişkilidir.

Lazer kaynağı, lazer ışınının ısıtma etkisi kaynak edilecek birleştirme içine yayıldığında meydana gelir ve bu lazer ışını ve kaynakla birleştirilecek parçaların ara yüzeyleri arasındaki kesin optimizasyon yaklaşımına olanak sağlar. Lazer kaynağında kullanılan bir dizi standart birleştirme geometrisi şekli Şekil 3.6'da özetlenmiştir.

Lazer kaynağıyla birleştirilecek parçalar çok ince olmadıkça lazer nüfuziyet kaynağı iletim kaynağından daha çok tercih edilir (Duley, 1998; Çelen, 2006).



Şekil 3.6 Lazer kaynağında birleştirme türleri (Çelen, 2006)

3.3.1. Lazer alın birleştirmeleri

Lazer kaynağı için en basit birleştirme şekli kaynak edilecek parçaların alın birleştirilmesidir. Kaynak edilecek levhalar arasındaki boşluk levha kalınlığının $\sim 0,05$ katından küçük olmalıdır. Lazer ışını her iki levhaya da eşit olarak gönderilmeli, ışın çapı merkez hattı boyunca $\pm \% 10$ 'dan daha fazla sapmamalıdır. Örneğın; $300 \mu\text{m}$ 'lik bir ışın çapı için bu değır $\pm 30 \mu\text{m}$ demektir.

Farklı kalınlıklardaki malzemelerin kaynağında optimum odaklama pozisyonu birleştirmenin merkez hattı dışında, ışının büyük kısmı kalın olan malzeme üzerine yapılmalıdır. Galvanizli çelik sacların kaynağında özellikle alın birleştirmesi tercih edilmektedir, çünkü birleştirmedeki çınko buharı tahliyesi bu şekilde daha kolay mümkün olmaktadır.

Alın birleştirmesinde en önemli şart kaynak edilecek parçaların mengeneyle sıkıştırılıp kaynağın yapılmasıdır. Levhalar termal gerilmeler ve distorsiyondan dolayı kaynak sırasında distoriyon eğilimine sahip olacağından ince levhaların kaynağa başlanmadan önce puntalanması gereklidir.

Düşük viskoziteli malzemelerin alın kaynağı prosesinde (örneğın; Al alaşımları) destek plakası kullanılmalıdır. Kaynağın kökü destek noktasına bir T birleştirmesi şeklinde uzar. Bu kaynağın kök kısmından damlanın düşmesini ve kaynak başlangıcındaki oluk oluşumunu önlemektedir (Duley, 1998; Çelen, 2006).

3.3.2. Lazer bindirme birleştirmeleri

Bindirme birleştirmelerinde kaynak dikişinin pozisyonu çok kritik olmadıkça lazer ışının iş parçasına olan yanlış hizalamalarında bile iyi sonuçlar vermektedir.

Kaynak dikişi pozisyonu kritik olmadıkça, bindirme kaynakları ışının yanlış ayarlamalarını dahi affetmektedir. Yerleştirmede mengene kullanımı gereklidir, bununla beraber levha ara yüzeylerinde iyi bir birleştirme elde edilmek istenirse, galvanizli çeliklerin veya diğır kaplama yapılmış malzemeler sürekli (CW) lazer

ışınıyla bindirme kaynağı yapılacaksa bu sıkıştırmada ince bir boşluk bulunmak zorundadır. Bu mendenin saclar arasında $\sim 0,1$ mm boşluk olacak şekilde ayarlanmasıyla sağlanmalıdır.

Derin nüfuziyet (anahtar deliği) kaynak koşulları altında eğer mengeneyle sıkıştırmada uygun yöntem kullanılırsa çoklu saclar başarılı bir şekilde kaynak edilebilir. Farklı kalınlıklardaki iki veya daha fazla levhanın kaynağında tercih edilen geometri ince sacın kalın sac üzerinde olmasıdır (Duley, 1998; Çelen, 2006).

3.3.3. Lazer kenar birleştirmeleri

Hizalamanın, kaynak hızının, lazer gücünün dikkatli bir şekilde seçimi ile ince sac malzemelerin sac kalınlıklarının kat kat üstündeki derinliklerde nüfuziyet kaynağı yapılabilir. Bu konfigürasyondaki yanlış ayarlama boyunca yanmaya, nüfuziyet yetersizliğine ve birleştirmedeki tüm dayanımın nüfuziyet yetersizliğine bağlı olarak değişimine sebep olur.

Bu geometride boşluk toleransı çok daha önemlidir, çok iyi bir yerleştirme gerektirmektedir ve maksimum boşluk en ince sac kalınlığının 0,05 katını aşmamalıdır. Galvanizli sacların kaynağında bir kenarın varlığı işlemi kolaylaştırmaktadır, buna karşın, derin nüfuziyetli kaynaklarda basınç artımını engellemek için bir boşluk gerekmektedir (Duley, 1998).

3.3.4. Lazer T alın ve bindirme radyüslü birleştirmeleri

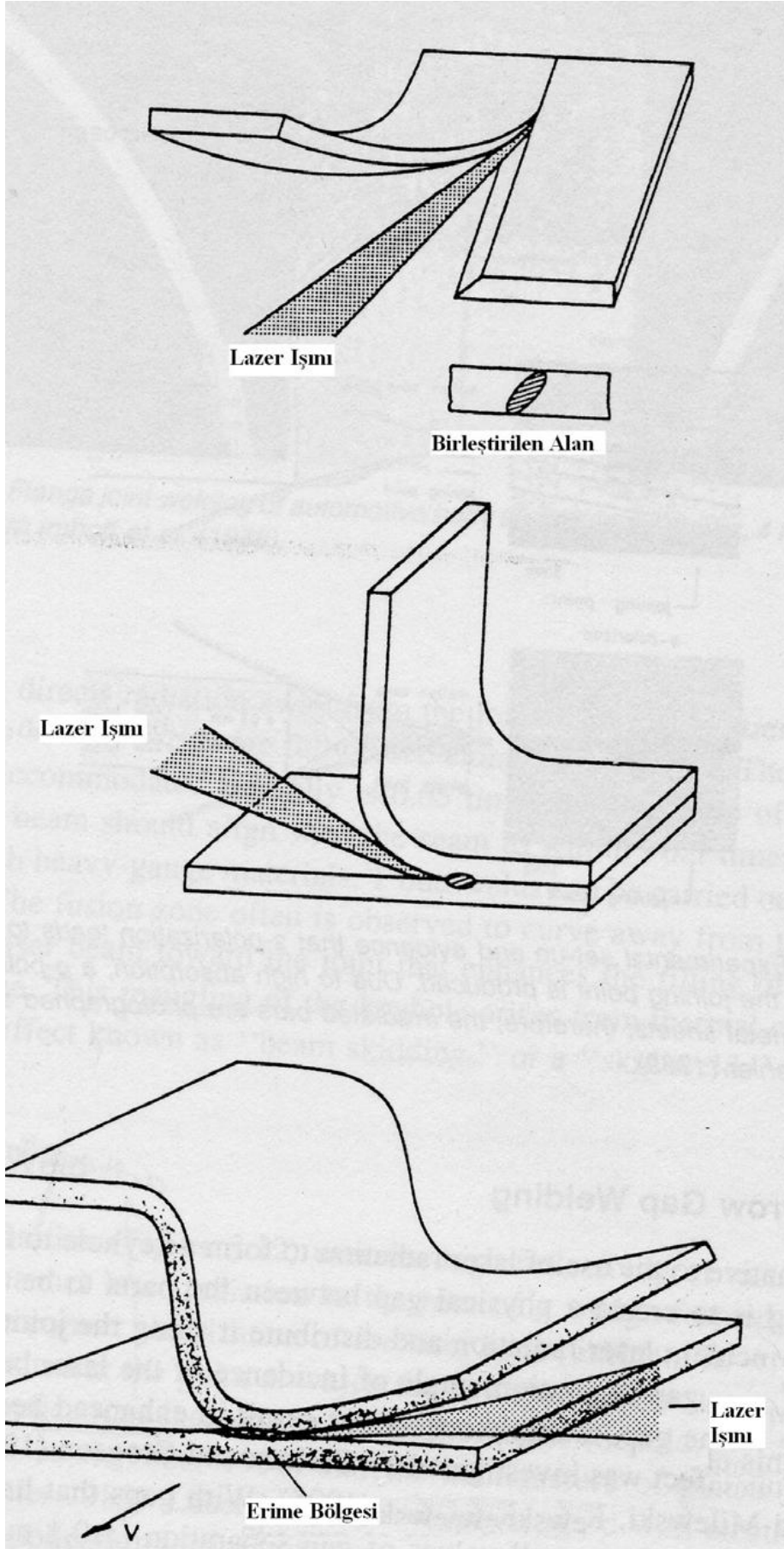
Bu geometrideki birleştirmelerde bir köşe yoksa ve normal giriş mümkünse lazer ışını $7-10^\circ$ lik bir açı ile girmek zorundadır. Birleştirmeye bağlı olarak odak noktası pozisyonu oldukça kritiktir, çünkü ışın yansıması meydana gelebilir ki bu da tam nüfuziyetin temininde önemlidir. İyi bir kaynak dayanımı tüm bileşenlerin dikiş hattı boyunca tamamen ergitilmesiyle elde edilir. Bu birleştirmede de boşluk genellikle kalınlığın 0,05 katı olabilir ve lazer ışını dikişe lazer odak (ışın) çapının maksimum $\sim 0,5$ katı olacak şekilde hizalanmalıdır. Ağır-ölçekli malzemelerde T alın kaynakları birleştirmenin her iki tarafından yapılabilir. Erime bölgesinde giren lazer ışınından dışarı doğru bir eğri gözlemlenir ve bu durum erime

bölgesinin doldurulmasını arttırır. Anahtar deliğinin yeniden açılanması ısı iletimi arttırır ve “ışın kayması” veya “kaymış kaynak” etkisini üretir (Duley, 1998; Çelen, 2006).

3.3.5. Lazer flare birleştirmeleri

Bu birleştirme geometrisi yüksek yansıtmaya sahip metallerde kullanılmaktadır. Eğik gelen lazer ışını iki levha içerisine alınarak kaynağın kökünde bir kama formu oluşturur. Lazer ışınının doğru kutuplanmasıyla giren lazer gücü iki levhanın birleştirildiği noktada etkin bir şekilde depolanabilir (Behler ve diğerleri, 1988 a,c). Bu uygulama boru kaynağında ve kaplamalı metal levha imalatında kullanılmaktadır. Lazer ısıtma elektrik direnç kaynağıyla birleştirilebilir, bu uygulama proses veriminin arttırılması için kullanılmaktadır.

Bu geometri, birleştirme geometrisinin lazer ışını hapsedmesi ve dikişten çevreleyen birleştirme bileşenlerine yansımasını engellemesi bakımından da yararlıdır. Çünkü bu metod lazer gücü verimini arttırır, kaynak hızı daha yüksek olabilir. Bu uygulama halkaların eliptik bindirme kaynağı şeklinde birleştirilmesini kapsamaktadır (Duley, 1998; Çelen, 2006).

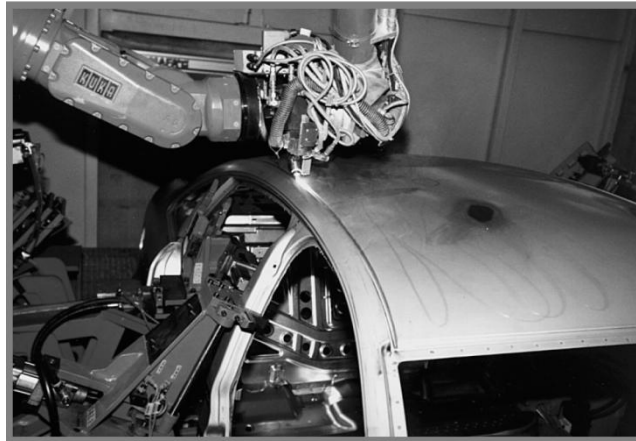


Şekil 3.7 Lazer flare birleştirmesi (Çelen,2006)

3.4. Lazer Kaynağı Uygulamaları

Lazer kaynağı son yıllarda endüstriyel üretim için önemli bir oranda gelişme göstermiştir. Bu gelişme işlemin çok fazla anlaşılmasıyla artmaktadır. Mühendisler lazer kaynağının uygulamalarının geniş çapta yayılması için çalışmaktadırlar. İşlem ekonomik olmasının yanında kaynak kalitesinde de en iyiye ulaşılmaktadır. Bu işlemde kritik rol kaynak dikişinin geometrik şekli ve mukavemeti gibi özellikleriyle oynamaktadır. Kısa dalga boyları kullanılmaktadır. İşlem gazı kontrol edilebilmekte ve plazmanın etkisini düşürmektedir (Kern et al, 2000).

Lazer kaynağı; elektronik, havacılık, otomotiv endüstrisinde geniş çapta kullanılmaktadır. Bu kaynak yöntemi kompleks parçaların kaynağı için uygundur. Yüksek güçlü lazerler otomotiv endüstrisinde, transmisyonlar, ocaklar, katalitik dönüştürücüler, egzost sistemleri ve dikiş kaynaklı tabakalar gibi pek çok parçada kullanılmaktadır. Gözeneklilik, yüzey hataları, tepecikler, katılama çatlakları, görülmektedir. Endüstriyel lazer kullanıcıları iş parçaları için kaynak kalitesini geliştirmek için ekonomik yöntemler araştırılmaktadır (Xie, 2002). Günümüzde alüminyum ve çelikler için geniş çapta lazer kaynağı kullanılmaktadır. Tüm ticari kaynak uygulanabilen malzemelere lazer kaynağı uygulanabilir. Kaynak hızı; lazer gücüne, malzeme bileşimine, geometrisine, işlem gazına lazer dalga boyuna bağlıdır. Yüksek yansıtma sahip alüminyum iş parçası yüzeyinde yüksek güçlü lazer radyasyonu ister. Endüstride alüminyumun kaynağı için CO2 lazerleri kullanılmaktadır (Wirth, 2004; Durmuş, 2006)



Şekil 3.8 Robot kol ile otomobil çatısı lazer kaynağı (Rofin, 2003)

Lazer kaynağı paralel kenarlı erime bölgesi, kaynak genişliği ve yüksek nüfuziyetle karakterize edilir. Bu avantajlar, yüksek güç yoğunluğundan gelmektedir. İyi kaynak kalitesi için çıkış gücünün kombinasyonu, kaynak hızı, odak pozisyonu, koruyucu gaz ve pozisyonu doğru seçilmelidir (Benyounis et al, 2005). Yakıt enjektörleri ve filtreler gibi küçük üniteler de bu yöntemle kaynak edilmektedir (Gourd, 1996).

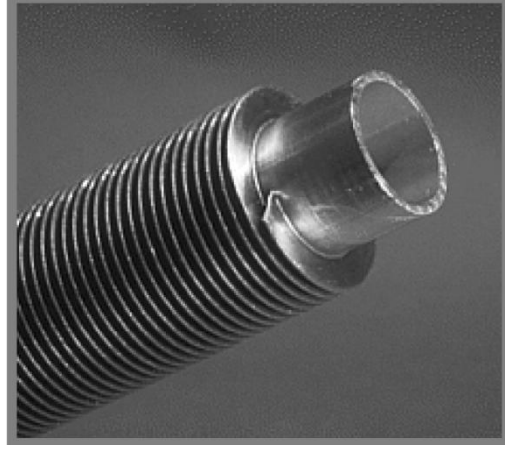
Paslanmaz çelik tüplerin çok büyük bir kısmı TIG kaynağı ile kaynak edilmektedir. Alternatif olarak yüksek güç kaynaklı lazer kaynağı işlemi paslanmaz çelik tüplerin kaynağı için hızlı bir harekete sahiptir. Son yıllarda ASTM A249'e göre basınçlı tüplerin üretiminde çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. TIG kaynağında olduğu gibi, lazer kaynaklı tüpün kalitesi üreticisine göre farklı olmaktadır (Fenton, 2001; Durmuş, 2006).

Sanayide titanyum alaşımından üretilen parçalar lazer kaynağı ile birleştirilmektedir. Birleştirilen titanyum levhaların en yüksek kalınlık değeri 13 mm olarak belirlenmiştir. Daha kalın parçalarda titanyum ve alaşımlarında nüfuziyet eksikliği ve bununla beraber mekanik özelliklerde kötüleşme söz konusudur. Titanyum ve alaşımlarının kaynağında koruyucu gaz olarak yalnızca argon veya helyum kullanılmaktadır. Ayrıca bu iki gazın bir arada kullanıldığında görülmektedir. Böylelikle üretim maliyeti azalmakta, kaynak havuzunun korunmasında daha etkili sonuçlara ulaşılmaktadır (Yavuz ve Çam; 2005).

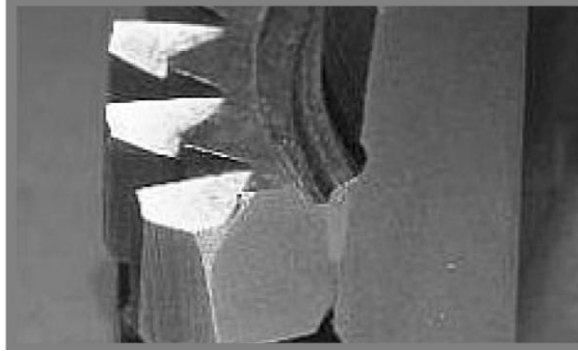
Endüstride alüminyum alaşımlarının kaynağında genellikle ark kaynağı veya direnç kaynağı kullanılmaktadır. Lazer kaynağı yüksek hızı, esnekliği ve düşük ısı girişi gibi özelliklerinden dolayı bu teknoloji de son zamanlarda kullanılmaktadır (Durmuş, 2006).

Yüksek güçlü CO_2 lazerleri ısı eşanjörleri, transmisyon parçaları, araba gövdelerinin kaynağında kullanılır. Medikal ve elektronik parçalar gibi küçük parçalarda da lazer kaynağı başarıyla uygulanmaktadır. Otomobil gövdelerinin kaynağı gibi 3-boyutlu çalışmalarda robotların yardımıyla kaynak işlemi kolay bir şekilde yapılır. Nd-YAG lazer kaynağı plastik enjeksiyon kalıplarının tamirinde kullanılmaktadır. Lazer kaynağı ile kalıp tamiri, lazer ışını ve kalıp arasına dolgu malzemesinin takviye edilmesiyle gerçekleşir. Dolgu malzemesi elle ya da

otomatik olarak eklenebilir (Kwiatkowski, 2003). Metalik malzemelerin en az deformasyonla kaynağından dolayı balatalarda lazer kaynağı kullanılmaktadır. İşlem sırasında koruyucu gaz olarak genellikle argon kullanılmaktadır.



Şekil 3.9 Lazer kaynaklı eşanjör tüpü (Rofin, 2003)

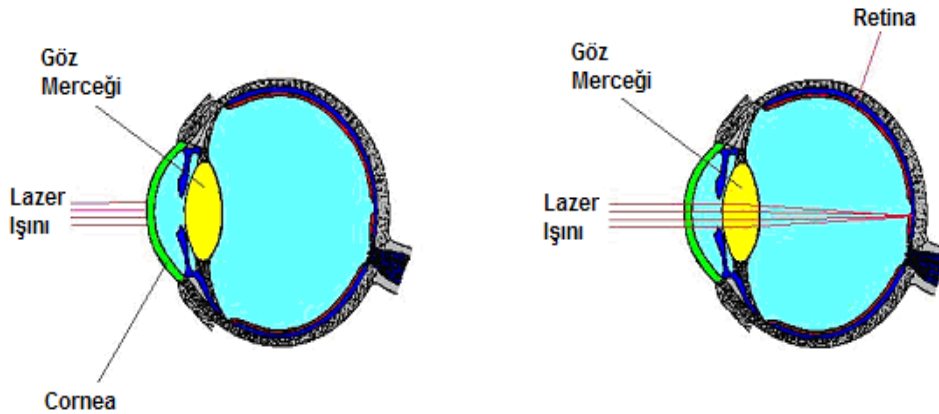


Şekil 3.10 Lazer kaynaklı dişli parça (Rofin, 2003)

4. LAZER GÜVENLİĞİ

Lazerler potansiyel tehlikelerine göre 1’den 4 e kadar güvenlik sınıflarına katagorize edilirler. Malzeme işlemede kullanılan yüksek güçlü lazerler (CW modda >0.5 W değerindekiler) her zaman 4.Sınıflardır, bu nedenle en katı güvenlik prosedürüne ihtiyaç duyarlar. Fakat yüksek güçlü lazerler bile dalga boyu ve insan gözüne etkisi nedeniyle potansiyel tehlike öncelikleri bakımından majör farklılıklar gösterirler.

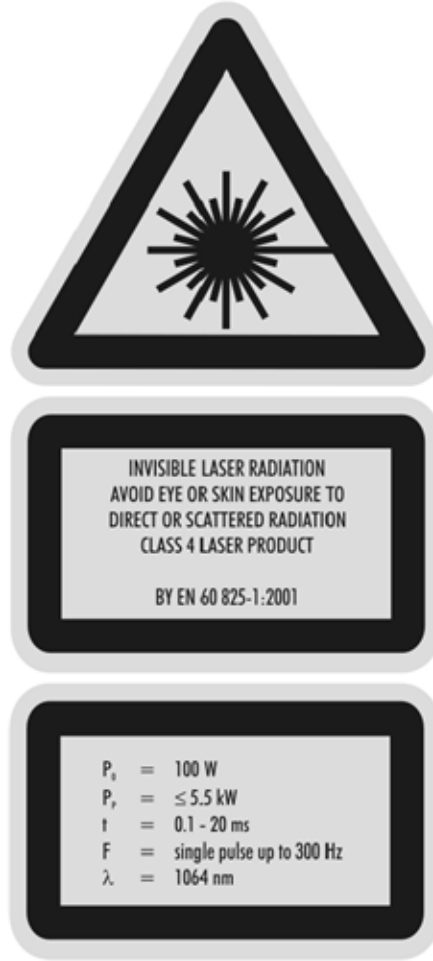
Göz merceği, hizalanmış lazer ışını çok küçük bir nokta üzerinde odaklar. Böylece ışının güç yoğunluğunu yaklaşık 300.000 katına yükseltmiş olur, bu olay “burning-glass effect” veya “convection-lens effect” olarak bilinir ve retinaya kolaylıkla retinaya zarar verir. $10.6 \mu\text{m}$ dalga boyuna sahip CO_2 lazer ışını orta-kızılötesi aralıktadır ve dış kornea tabakası tarafından tamamen absorbe edilir, bu sayede “burning-glass effect” bertaraf edilmiş olur. Bu durumdaki esas tehlike kornea yanmasıdır. Öte yandan $1.06 \mu\text{m}$ dalga boyuna sahip Nd:Yag lazerlerde ışının %40’ı retinaya ulaşarak göze büyük zarar verir (retina yanması, katarakt). $0.8 - 1 \mu\text{m}$ dalga boyuna sahip diyot lazerlerde ışının nerdeyse tamamı retinaya ulaştığından dolayı yeterli göz koruması sağlanması gereklidir. 4.Sınıf lazerler sadece ışın ile direkt temas halinde tehlike oluşturmazlar, ışının düz metal yüzeylerden yansıması veya pürüzlü yüzeylerden dağılmasında tehlikelidir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Lazer ışının insan gözü üzerindeki etkisi (Rofin, 2003)

Lazer ışınından ayrı olarak çalışanlar yangın tehlikesinden ve lazer malzeme işleme sırasında oluşan zararlı maddelerden (duman, toksik malzeme) korunmalıdır.

Üretici firma standart lazer ikaz işareti bulunan bir etiket ile makinayı tanımlamak zorundadır. Bu etiketde dalga boyu, maksimum çıkış gücü, darbe frekansı ve güvenlik sınıfı yer almalıdır. (Şekil 4.2)



Şekil 4.2 Lazer ikaz işareti (Rofin, 2003)

Lazer koruyucu gözlükler ışının dalga boyuna, çalışma şekline (sürekli, darbeli) ve güç yoğunluğuna bağlı olarak seçilir. Koruma zamanı 10 saniyenin altında olmamalıdır. Aynı odada farklı dalga boylarına sahip lazerler var ise kombinasyon bir koruyucu gözlük kullanılmalıdır.

5. İŞLETME VE YORULMA DAYANIMI KAVRAMLARI

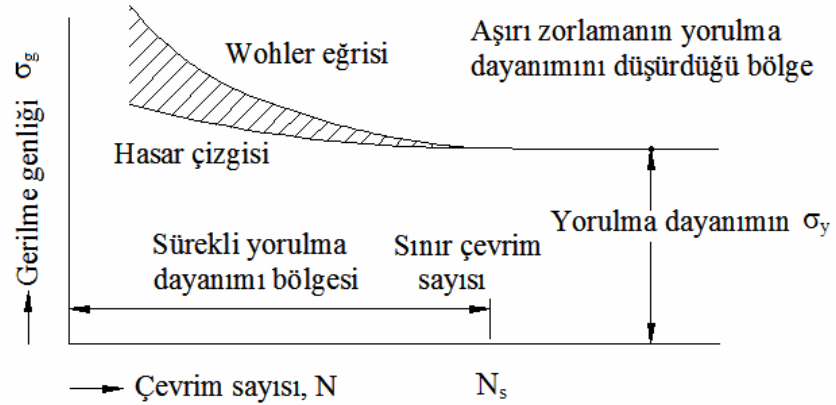
1940'lı yıllarda Almanya'da Ernst Gaßner tarafından ortaya konan "İşletme Dayanımı" kavramı, yapı elemanlarını belirlenen işletme koşullarında daha sağlam ve daha güvenli olarak işlevlerini yerine getirmesi açısından pek çok endüstri kolunda uygulanır olmuştur. Bugün artık, otomotiv sektörü, uçak taşımacılığı, nakliye araçları, kıyı ötesi yapıları, boru hatları, reaktörler, rüzgar türbinleri gibi yapı elemanlarının yorulma ömrü ile ilgili değerlendirmelerinde, işletme dayanımı biliminin tahmin, hesap ve değerlendirmelerini kullanmak zorunluluk haline gelmiştir (Karakaş ve Gülsöz, 2004).

İşletme dayanımı; önceden belirlenen bir işletme süresi içerisinde ve işletme koşulları altında teknik bir yapının sağlamlığı, güvenilirliğidir. Ekonomik, kaliteli ve güvenli yeni teknik ürünlerin konstrüksiyonunda; malzeme özellikleri, geometrik şekli, işlevsel parametreler ve işletme dayanımı bilgilerinin bir korelasyonu gereklidir. Genelde teknik yapılar işletme koşullarında düzensiz değişken, çok boyutlu kompleks zorlanmalara maruz kalmaktadırlar. İşletme ömrünün, işletme dayanımının tespitinde pek çok zorluklarla karşı karşıya kalınmaktadır. Çok sayıdaki faktör ve örneğin kaynak işlevi sırasında önceden belirlenemeyen oluşumlar matematiksel kesin bir çözümü imkansız kılıyor. Hesap daha çok deneylerden kazanılan varsayımlara, hipotezlere, katsayılara ve tecrübelere dayanıyor. İstatistiksel hesap yöntemlerini de kapsadığından değerler belli bir olasılıkla, yüzde oranı ile verilmektedir. Elde edilen sayısal değerler birbirinden, ortalama değerden büyük sapmalar göstermektedirler. Farklı hesap yöntemlerinin kullanımında da birbirinden farklı değerler elde edilmektedir. Külfetli deneyler sonucu elde edilen değerler, hesap yöntemi ile elde edilen değerlerden daha emin değerlerdir (Özden ve Gürsel, 2005).

Düzgün veya çentikli parçalarda, belirli ortalama gerilme için parçanın kırılmadan veya belirli bir şekil değiştirmeyi aşmadan sonsuz çevirim sayısında taşıyabileceği gerilme genliğine yorulma dayanımı denir (Uzun, 2002). Müsaade edilebilir şekil değiştirmenin miktarı yorulma değerinin yapıldığı şartlara veya deney malzemesi cinsine bağlıdır. Sonsuz sayıda yük tekrarını kırılmadan veya aşırı şekil değişimine uğramadan taşıyabilen bir yapı elemanı, yorulmaya karşı dayanıklıdır denir. Taşınabilir maksimum gerilme genliği de yapı elemanının

yorulma dayanımı olarak adlandırılır. Bir yapı elemanının yorulma dayanımı sadece bir malzeme özelliği olmayıp, bunun yanında parçanın büyüklüğü, biçimi ve üretim şekline bağlı olduğundan anma gerilmesi ile verilen yorulma dayanımı, belirli bir biçim ve yüzey kalitesindeki parçanın konstrüktif dayanımı diye de tanımlanır.

Malzemelerin yorulma dayanımının saptanması için eksene paralel doğrultuda mekanik veya elektrolit olarak parlatılmış düzgün deney parçaları kullanılır. Çentik duyarlılığının araştırılması içinde, çentik katsayıları belli çentikli deney parçalarından yararlanılır. Yorulma dayanımı normal olarak Wöhler yöntemiyle bulunur. Bu yöntemde, malzeme, biçim ve yüzey kalitesi bakımından tümüyle aynı olan deney parçalarının herbiri, aralıksız şekilde ve farklı seviyelerde zorlanarak kırılmanın olduğu çevrim sayıları saptanır. Bu deney serisinde çoğunlukla 6–10 adet parça gereklidir. Deneyin amacına, malzeme ve deney makinasına göre yük veya şekil değiştirme genlikleri kontrol edilir ve büyüklükler gerilme veya birim şekil değiştirme değerine düşürülür. Wöhler yönteminde bir deney süresinde tüm parçalar için ortalama gerilme σ_{ort} veya alt gerilme σ_{alt} sabit tutularak her deney için ayrı gerilme genliği σ_g seçilir. İlk deney parçası, üst gerilme genlikle akma sınırına yakın olacak şekilde yüksek düzeyde zorlanır. Daha sonraki deney parçalarına ise gittikçe daha düşük zorlama uygulanarak kırılma çevrim sayısının çok yüksek değerlere ulaşması sağlanır. Bu deney serisi sonunda uygulanan gerilme genlikleri ve kırılmanın görüldüğü çevrim sayılarının bir eğri olarak çizimi ile Şekil 5.1’de verilen Wöhler eğrisi elde edilir (Aran, 1983; Özmen, 2007).



Şekil 5.1 Wöhler eğrisi ve hasar çizgisi

Bu grafikte normal olarak apsis (çevrim sayısı) logaritmik, ordinat (gerilme genliği) bölümü ise metrik olarak seçilir. Sonsuz çevrim sayısında kırılmanın görülmediği en büyük gerilme genliği yani eğrinin asimptotuna karşılık gelen değer yorulma dayanımı olup σ_y ile gösterilir. Diğer yandan belirli bir çevrim sayısından sonra (N_s sınır çevrim sayısı) eğri sonsuz çevrim sayısına yaklaşıyor kabul edilir. Sınır çevrim sayısı oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda çelik için 10×10^6 , ağır ve hafif metaller için oda sıcaklığında 100×10^6 veya daha fazla olarak alınır. Deney süresinin kısaltılması amacıyla çelik için 2×10^6 ve hafif metaller için 10×10^6 ila 50×10^6 sınır çevrim sayıları da kullanılmaktadır.

Mühendislik uygulamaları için, bir malzemenin tekrarlı zorlanmasında hangi yüklemde, hangi N tekrarında kırılma beklendiğini bilmekten ziyade, hangi gerilme genliğinde artık kırılmanın olmayacağını bilmek gerekir. Sabit tutulan belirli bir ortalama gerilmede hangi yükleme değerinde seçilen malzemenin sonsuz yük tekrarını taşıyabileceğinin bilinmesi mühendislik uygulamaları açısından önem arz eder (Demirci, 2004; Özmen, 2007).

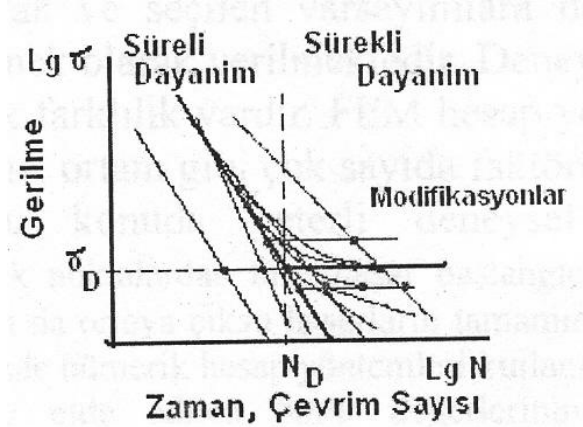
Yorulma dayanımında daha büyük gerilme genliklerinin bir süre uygulanmasının muhakkak hasara veya diğer bir deyişle yorulma dayanımının azalmasına yol açacağı söylenemez. Önemli olan bu aşırı yükün seviyesi ve bunlara ait çevrim sayısıdır. Hangi koşullarda hasarın başlayacağını belirten ve görünümü bakımından wöhler eğrisine benzeyen “hasar çizgisi” süreli yorulma bölgesi için söz konusu olup yüksek çevrim sayılarında wöhler eğrisi ile birleşir. Hasar çizgisi yorulma dayanımı üzerinde bir zorlamanın, daha aynı parçada yorulma dayanımına eşit bir zorlamada kırılma meydana gelmemek koşuluyla, en çok kaç çevrim taşıyabileceğini göstermektedir.

Yorulma dayanımını malzemeye bağlı, teknolojik ve deney tekniği ile çok sayıda faktör etkilediğinden, bu değer normal wöhler yöntemi yani 6–10 deney parçası yardımıyla güvenilir bir şekilde bulunması oldukça güçtür.

İşletme dayanımında; aşırı, darbeli zorlamalar karşısında dayanım, ömür belirlendiği gibi sünme, yani yüksek sıcaklıkta değişken zorlamalar karşısında yapının davranışı da incelenmektedir. Düzenli ve düzensiz sabit veya değişken genlikli zorlamalar altında kalan yapıların dayanımı, ömrü de hesaplanmaktadır. İşletme dayanımı, çatlak sonrası işletme ömrünü ve veya işletme dayanımını hesaplamaktadır. Bunun yanında çatlak, boşluk, çentik yuvaları gibi kaçınılmaz malzeme ve imalat hataları sonucunda yapının dayanım davranışını da incelemektedir. Düzensiz değişken zorlamalara maruz kalan çentikli yapılarda, örneğin kaynak bağlantılı gemi konstrüksiyonlarında yüksek alaşımlı dayanıklı malzeme secimi ile yapının ömrünün, dayanıklılığının iyileştirilmesi sağlanamaz. Bunun yerine konstrüktif tedbirlerle, yüzey iyileştirmeleriyle, uygun imalat yöntemleri ile çentik etkisi azaltılarak, gerilme yığılmaları dağıtılarak daha etkili bir sonuca varılmaktadır. Ancak bu sağlandıktan sonra yüksek dayanımlı malzeme seçimi düşünülmelidir.

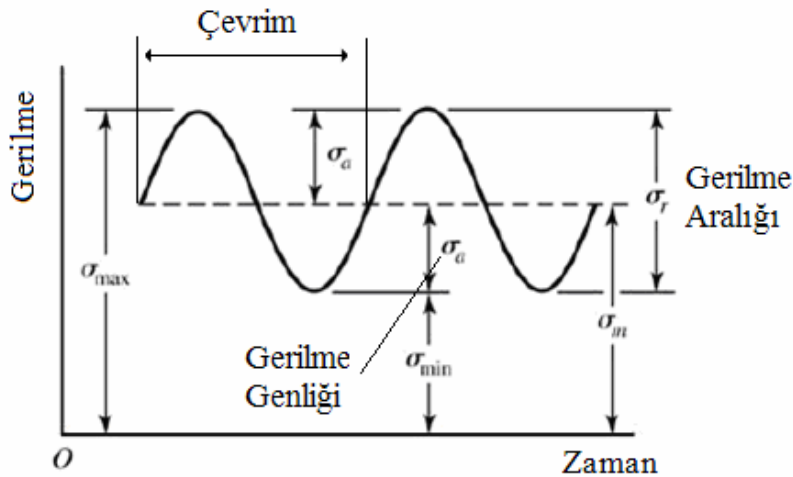
İşletme Dayanımı, ömür hesap yöntemleri: -Normal gerilme, - Lokal gerilme, Çentik gerilme, - Çatlak ilerleme gibi farklı yöntemler bulunmaktadır. Malzeme yorulma diyagramları, yani Wöhler eğrileri ve yük kolektifi belli olan yapıların dayanım ve ömür hesapları belli varsayımlara, hipotezlere göre yapılmaktadır, Çentik gerilme ve lokal gerilme işletme dayanımı hesap yöntemleri prensip olarak aynidir. Normal gerilme yöntemin uygulanması kolaydır ve işlem hacmi da azdır. Bazı durumlarda yapı kesitlerinde normal gerilmelerin analitik yöntemlerle hesaplanmasında belirsizlikler çıkmaktadır. Bu gibi durumlarda lokal gerilme yöntemin uygulanmasında avantajlar sağlamaktadır. Bu yöntem, sonlu elemanlar yöntemine uygunluğu nedeniyle bilgisayar destekli ömür hesaplarında tercih edilmektedir. Çatlak ilerleme yöntemi daha çok kırılma mekaniği içerisinde kullanım alanı bulmaktadır. Bilgisayar destekli hesap yöntemleri ile yapılan işletme dayanımı hesapları, ömür analizleri, henüz yeterli sonuçlar vermemektedirler. Bilgisayar destekli hazır paket programları ile (Patran, Nastran, Ansys) kullanılarak FEM (Finite Element Method) yöntemi ile işletme dayanımı analizi yapılabilir. Hesap yöntemiyle elde edilen değerlerdeki yanılma payı çok yüksektir. Bu tür hesaplar daha çok karşılaştırma için günümüzde kullanılmaktadır, kalitatif değer taşımaktadır. Deneylere ve tecrübelerle dayanılarak yapılan ömür hesapları kullanım için daha emin değerlerdir. Deneylere dayanılarak ve seçilen varsayımlara dayanılarak ortaya çıkan ömür hesabı

(Şekil 5.2) bir örnek olarak verilmektedir. Deney değerleri ile FEM hesap yöntemi arasında büyük farklılık vardır. FEM hesap yönteminde malzeme, konstrüksiyon, bileşik gerilme, ortam gibi çok sayıda faktörün dikkate alınması zorlaşmaktadır. ayrıca bu konuda yeterli deneysel değerler bulunmamaktadır. Her iki yöntemin ortak noktalardan biri; hasar başlangıcının, tehlikeli kesitin aynı olmasıdır. Günümüzde nümerik hesap yöntemleri kullanılarak yaptırılan ömür analizlerin gerekliliği ve elde edilen ömür değerlerinin geçerliliği tartışılmaktadır (Özden ve Gürsel, 2005).



Şekil 5.2 İşletme dayanımı diyagramları farklı modifikasyonları

Çevrim, gerilme-zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına denir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Gerilme-zaman diyagramı

6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Mühendislerin karşılaştıkları karmaşık ve zor fiziksel problemlerin çözümünde kullandıkları yöntemler genel olarak ikiye ayrılır.

- Analitik Çözüm Yöntemleri
- Sayısal Çözüm Yöntemleri

Mühendislikte karşılaşılan birçok problemi analitik yöntemler ile çözmek mümkün değildir. Analitik çözümler, sadece basitleştirilmiş bazı özel haller için elde edilebilir. Geometrisi, malzeme özellikleri ve sınır şartları karmaşık problemleri yaklaşık olarak çözebilmek amacıyla, kabul edilebilen sonuçlar veren sayısal yöntemler kullanılmalıdır.

Sonlu elemanlar yöntemi, sayısal yöntemler içerisinde önemi gün geçtikçe artan, mühendisler tarafından tercih edilen ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

Sayısal yöntemlerin çoğu, bilgisayarlar yaygın olarak kullanılmaya başlanmadan önce geliştirilerek kullanılmış ve daha sonra bilgisayara uyarlanmıştır. Ancak sonlu elemanlar yöntemi bilgisayar gelişiminin bir ürünüdür ve diğer sayısal yöntemlerden farkı, yüksek hızlı bilgisayarlara ihtiyaç duyar.

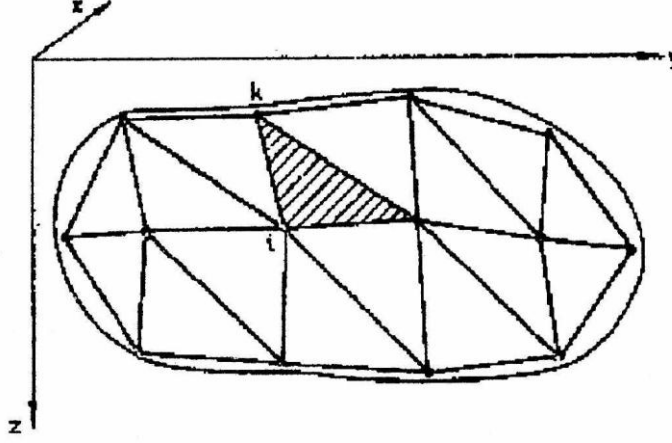
Sonlu elemanlar yönteminin statik analiz, akışkan mekaniği, ısı transferi, elektromanyetik analiz ve akustik gibi birçok fiziksel olayın çözümünde uygulama alanı bulması ve bilgisayarlara uygulanması kolay bir algorithmaya dayanması karşılaşılan problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır (Kocacı, 2000; Benli, 2004).

6.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi Adımları

Sonlu elemanlar yöntemi sürekli ortamlara genellikle şu adımlar ile uygulanır;

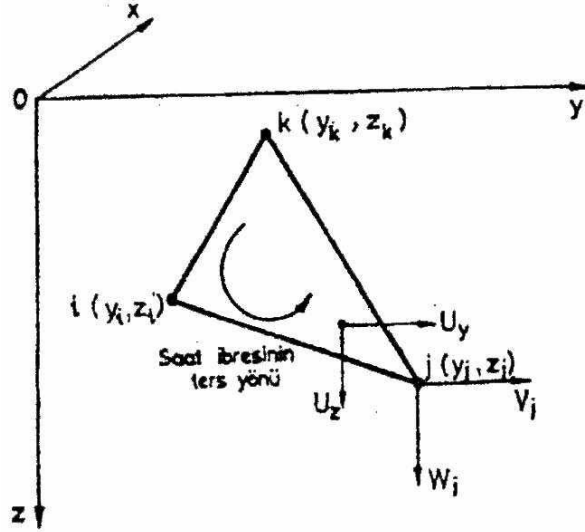
- Sürekli ortam, eğri ya da yüzeyler ile belirli şekilde ve sayıda “sonlu

elemanlara” bölünür. Şekil 6.1’ de çözüm bölgesi üçgen elemanlara bölünmüştür.



Şekil 6.1 Çözüm bölgesinin üçgen elemanlara bölünmesi (Benli, 2004)

- Sonlu elemanlar, birbirlerine ve sürekli ortama belirli sayıda “düğüm noktaları” ile bağlanırlar. Bu noktaların yer değişimleri ya da dönmeleri problemin bilinmeyenleridir. Örneğin Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’ de üçgen elemanların köşeleri düğüm noktalarıdır ve bunlar iki doğrultuda hareket ederler yani iki serbestlik derecesine sahiptirler. Bu demektir ki, üçgen eleman altı serbestlik derecesine sahiptir ve bilinmeyen sayısı altıdır. Bunlara “düğüm yer değiştirmeleri” adı verilir.
- Serbest değişkenlerin sonlu eleman içerisindeki değişimleri “değişken fonksiyonları” ya da “değişken modelleri” ile ifade edilir.



Sekil 6.2 Bir üçgen sonlu eleman ve düğüm noktaları (Benli, 2004)

- Sonlu eleman deformasyon hali, deformasyon – yer değişim bağlantıları kullanarak, gerilme hali, gerilme – deformasyon bağlantıları kullanarak düğüm yer değişimleri cinsinden ifade edilmektedir.
- Sonlu elemana etki eden tüm iç ve dış yükler dengede olmalıdır. Bunun için minimum enerji prensibi kullanılarak denge denklemleri kurulur.
- Kurulan bu denge denklemleri, her bir sonlu eleman için ayrı ayrı yapılarak, aynı düğüm noktasına komşu elemanlardan gelen etkiler toplanır. Böylece düğüm yer değistirmeleri hesaplanır.
- Sürekli ortamın sınırlarındaki şartlar kullanılır ve denklem takımı çözülür. Böylece düğüm yer değistirmeleri hesaplanır.
- Bulunan yer değistirmeleri yardımıyla elemanlardaki deformasyon hali, gerilme hali bileşenleri ve istenirse asal gerilmeler hesaplanır.

6.2. ANSYS Sonlu Elemanlar Yöntemi Paket Programı

ANSYS, SAP 80/90/2000, NASTRAN, IDEAS, ADAMS, LUCAS, MARC, ABAQUS, FLOTRAN vs. dünyada çok kullanılan sonlu elemanlar yöntemine dayalı paket programlardır.

ANSYS programı 1970' li yıllardan beri Amerika' daki Swanson Analysis System Şirketi tarafından geliştirilen bir sonlu elemanlar analiz sistemidir. Bu yazılım sayesinde, yapılması çok zor işlemler kolayca ve kısa sürede gerçekleştirilerek ve çözümün görselleştirilmesi ile de sonuçların daha anlaşılır olması sağlanmaktadır (ANSYS Theory Manual Release 5.4, 1998).

Sonlu elemanlar yöntemine dayalı programların analizlerde takip ettikleri işlem sırası genel olarak hemen hemen aynıdır. Takip edilen işlem sırası genel hatlarıyla yedi adımda özetlenebilir (Benli, 2004).

i. Modelin oluşturulması

Çözümü istenen problem geometrisi kullanılan paket program içerisinde ya da CAD programında oluşturulur. Model başka CAD programında oluşturulursa, IGES, DXF, SAT gibi dönüştürücü formatlar ile transfer edilebilir

ii. Sonlu eleman seçimi

Bu bölüm için kullanıcının sonlu eleman yöntemi ile ilgili yeterince bilgi sahibi olması gerekir. Çözümü istenen cismin geometrisi, analizin tipi (mukavemet, ısı transferi, manyetik analiz gibi) ve sınır şartları eleman seçimini etkiler. Sonlu eleman paket programının kütüphanesinden ya da kullanıcının model geometrisine ve problem tipine uyumlu bir eleman tanımlaması ile eleman seçimi yapılabilir. Örneğin ANSYS paket programında farklı analiz tipleri için yaklaşık olarak 140 adet eleman bulunmaktadır.

iii. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Karmaşık olan model geometrisi daha küçük ve davranışı bilinen elemanlara bölünerek sonlu elemanlar modeli oluşturulur. Model ne kadar hassas olarak küçük elemanlara bölünürse, elde edilecek sonuçlar da gerçeğe o kadar yakın değerlerde olacaktır. Ancak fazla eleman sayısı demek modeldeki bilinmeyen sayısının da artması demektir ki bu da bilgisayarlarda daha fazla hesaplama yapılması anlamına gelir ve sonucun elde edilme süresi uzar. Genellikle sonlu elemanlar paket programları otomatik olarak sonlu elemanlar modelini

oluştursalar da, bazı hassas bölgeler üzerinde düzeltmeler yapmak gerekebilmektedir.

iv. Malzeme ve eleman sabitlerinin belirlenmesi

Elastisite modülü, poisson oranı, yoğunluk, ısı transfer katsayısı gibi malzeme özellikleri ve seçilen eleman ve analiz tipine göre kesit alanı, atalet momenti gibi değerler sabit olarak ya da bir değişkene bağımlı olarak kullanıcı tarafından belirlenmelidir.

v. Yük ve sınır koşullarının belirlenmesi

Model üzerine gelen yükler belirlenir. Bu aşamada modelin bağlantı şekilleri kullanıcı tarafından doğru bir şekilde tanımlanmalıdır.

vi. Çözüm

Bu aşamada sonlu elemanlar modelinin denklemleri, seçilen bir matris çözüm yöntemi vasıtasıyla çözülür.

vii. Sonuçların değerlendirilmesi

Elde edilen analiz sonuçlarının liste halinde ya da grafiksel olarak ekranda görüntülenmesi işlemidir.

7. TASARIM VE NÜMERİK ANALİZ

Çeşitli yüklere maruz katı cisimlerde oluşan gerilmeler ve bu yüklerden oluşan deformasyonlar, geometride meydana gelen değişimler, mevcut yükler altındaki parçaların güvenli görev yapıp yapmayacağı, meydana gelen deformasyonların kabul edilebilirliği yüzyıllar boyunca mühendis ve fizikçiler tarafından analitik yöntemlerle çözmeye çalışılmıştır. Çünkü çeşitli yükler altında model üzerinde oluşan gerilme dağılımı, istenilen sınır değerleri altında kalması sağlandıktan sonra, mevcut yükleri taşıyacak minimum ağırlık ve en uygun tasarımın saptanması mühendislik problemleri açısından çok önemlidir.

Bu bölümde lazer teknolojisi sayesinde imalatı mümkün olan yeni hibrid konstrüksiyon profilinin tasarımı, dayanım ve ömür analizleri yapılmıştır. Tasarım Solidworks 2010 CAD programı kullanılarak yapılmıştır. Nümerik analizler Sonlu elemanlar yöntemi paket programı olan ANSYS 12 FEM programının WORKBENCH arayüzü kullanılarak yapılmıştır. Bu yeni konstrüksiyon profili tasarlanırken bambu bitkisinden esinlenilmiştir. Aynen bambu bitkisinin yapısında olduğu gibi uygun aralıklarla disk formundaki perdeler lazer bindirme kaynağı ile düz boru konstrüksiyon profiline kaynatılacaktır. Buradaki amaç boru konstrüksiyon profilinin dayanımını ve ömrünü arttırmaktır. Hem düz boru konstrüksiyon profilin, hem de hibrid konstrüksiyon profilin analizleri yapılarak, sonuçlar karşılaştırılmıştır, yeni tasarımın dayanım ve ömür yönünden avantajı kontrol edilmiştir.

7.1. Tasarım

Tasarımını yaptığımız konstrüksiyon profili enine perde takviyelidir. Bu takviyeler bambu bitkisinin yapısı incelenerek oluşturulmuştur. Bambu bitkisi yüzyıllar boyunca yapı elemanı olarak kullanılmıştır. Evler, köprüler ve su taşıma hatlarında kullanılmıştır. Bunun başlıca nedeni konstrüksiyona uygun formu ve dayanıklı yapısıdır. Bambu suya dayanıklı yapısı ile nehir ve deniz ulaşımında da kullanılmıştır. Yapısı itibari ile sıkı dokulu ve çok sağlamdır. Ayrıca dünya üzerinde en hızlı büyüyen bitki olarak bilinir. Bazı türlerinin 24 saatlik periyot içinde 121 cm uzunluğa ulaştığı ölçülmüştür ve 80 cm kalınlığa, 38 m uzunluğa ulaşabilen türleri vardır (Wikipedia).

Bambu bitkisinin boyuna kesidi incelendiğinde belirli aralıklarla disk formuna yakın perdeler göze çarpmaktadır (Şekil 7.1). Bu perdeler bambu bitkisinin dayanıklı olmasının başlıca sebeplerinden bir tanesidir. Düz boru konstrüksiyon profiline bambu bitkisinin yapısındaki gibi enine takviye perdeler ekleyerek daha dayanıklı bir konstrüksiyon profili elde etmeye çalıştık.



Şekil 7.1 Bambu bitkisi boyuna kesit görüntüsü

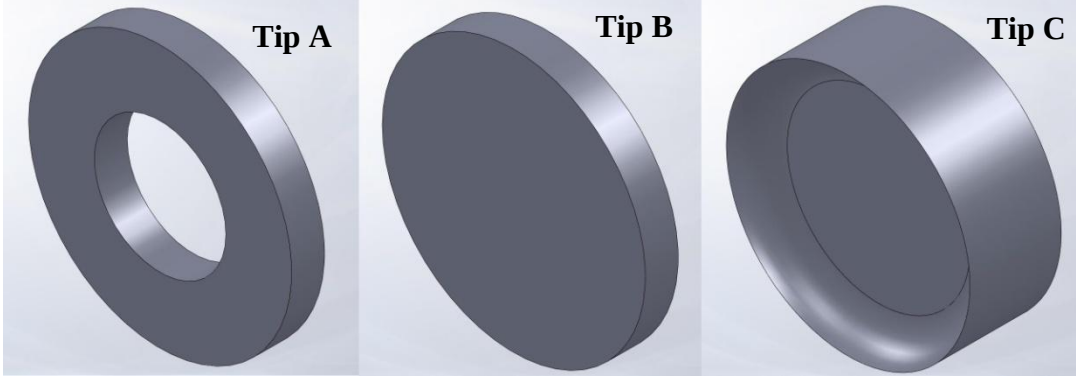
Takviye perdeler belirli aralıklarda kaynaklı bağlantılar ile düz boru profile eklenecektir. Kaynak birleştirmesi form itibariyle bindirme birleştirmesidir. Kaynak işlemi sırasında profilin yapısının bozulmaması için konvansiyonel yöntemlere göre üstünlüklerinden daha önce bahsettiğimiz lazer kaynağı kullanılacaktır.

Tasarım ile ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

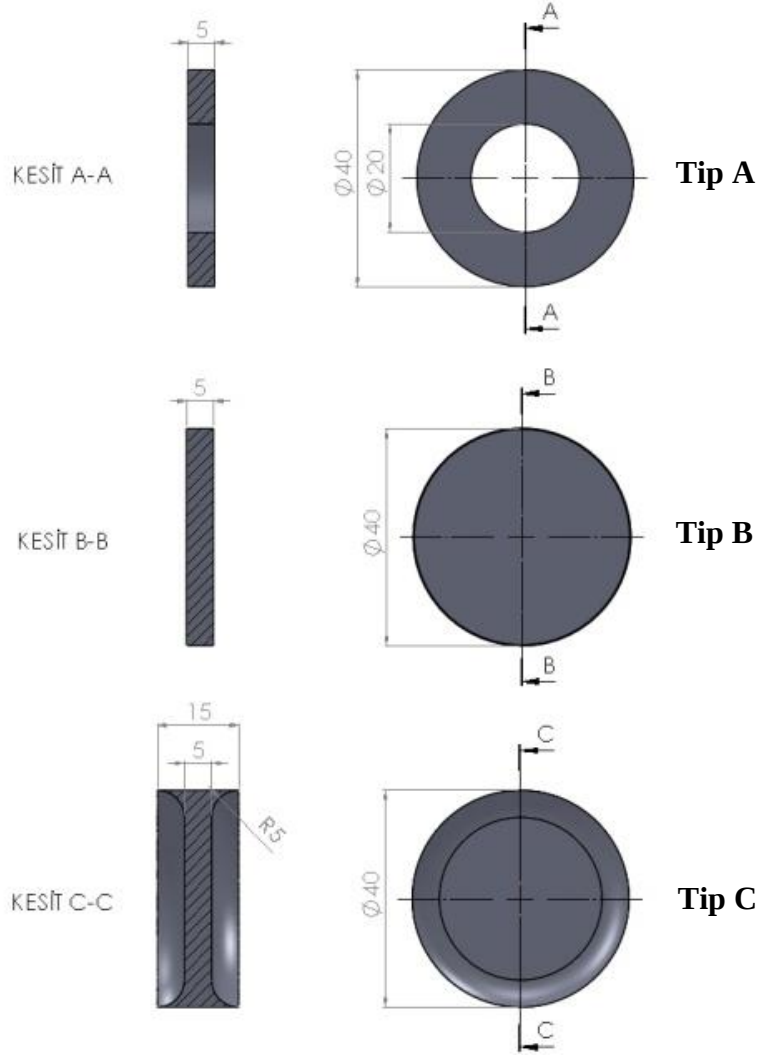
Hibrid Konstrüksiyon Profili;

- Malzeme kolay kaynaklanabilir özellikte seçilecektir (St 52-2 vb.). Boru profil ve perde malzemesi aynıdır.
- Standart boru konstrüksiyon profili içerisine disk şeklindeki perdeler lazer bindirme kaynağı ile kaynatılacaktır (Şekil 7.4).

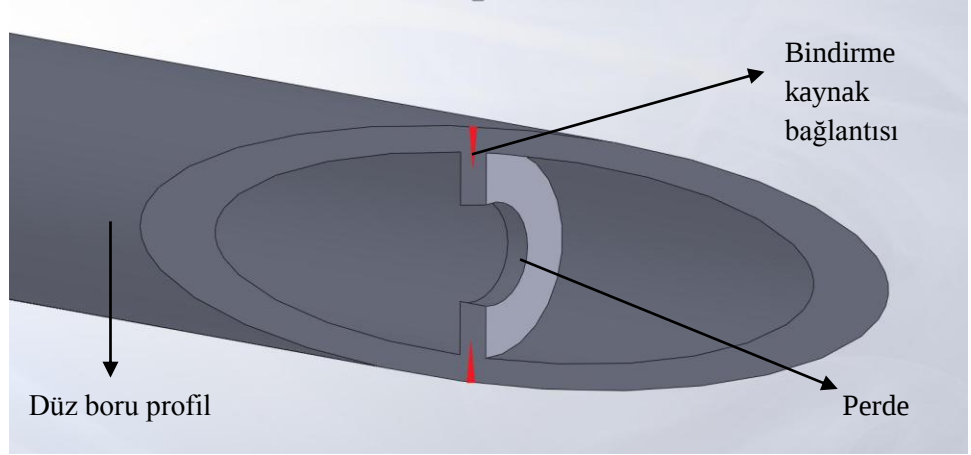
- Bambu yapısı incelenerek üç tip perde tasarlanmıştır. Şekil 7.2 ve Şekil 7.3’de sırasıyla A,B ve C tipi perdeler ve ölçüleri gösterilmiştir .



Şekil 7.2 Hibrid konstrüksiyon profili perde tipleri

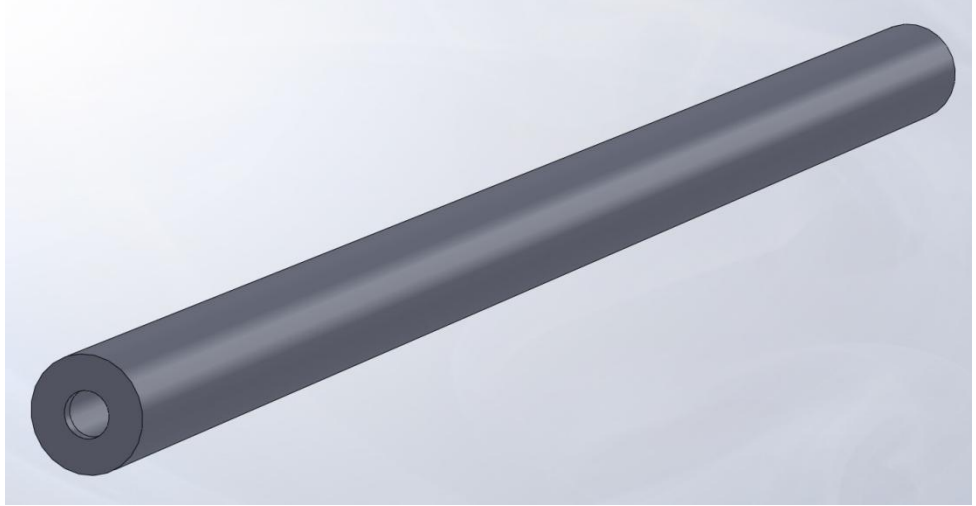


Şekil 7.3 Hibrid konstrüksiyon profili perde tipleri ölçüleri

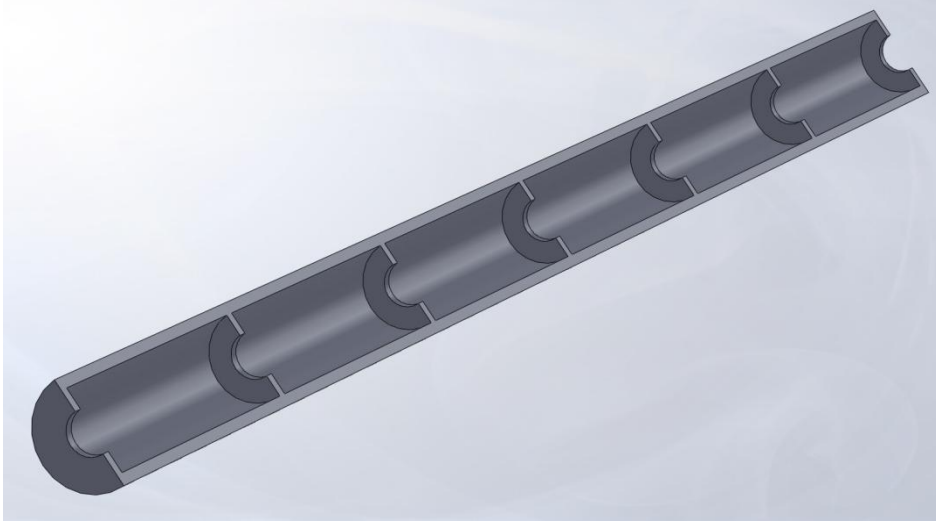


Şekil 7.4 Hibrid konstrüksiyon profili perde kaynak bağlantısı

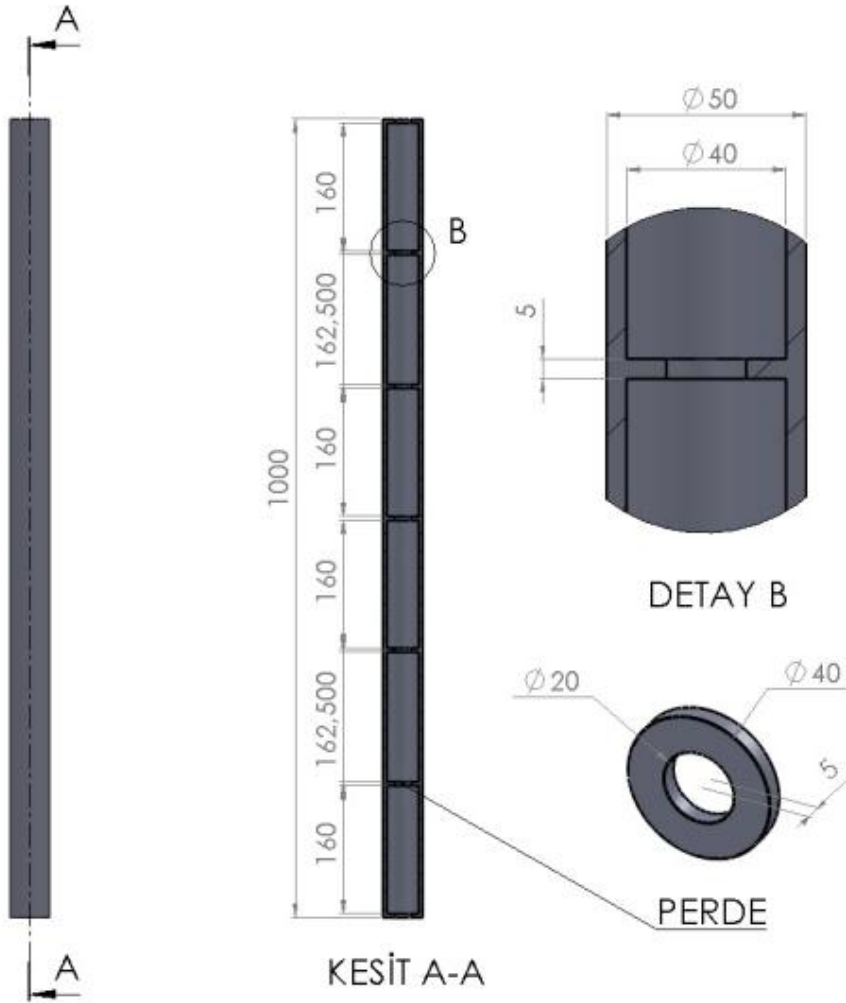
- Analizlerde bağlantılar boşluksuz/hatasız bir bağlantı olarak düşünülecektir. Bağlantılar lazer bindirme kaynağı ile yapıldığından, kaynak bölgesindeki malzeme etkileşimleri, düşük seviyede olacağından gözardı edilmiştir. Hibrid profil tek parça olarak modellenmiştir.
- Düz boru profilin boyu 1000 mm, dış çapı 50 mm, iç çapı 40 mm'dir.
- 1000 mm boyundaki profil içerisinde 7 perde kaynatılacaktır.



Şekil 7.5 Tip A hibrid konstrüksiyon profili



Şekil 7.6 Tip A hibrid konstrüksiyon profili boyuna kesit görüntüsü



Şekil 7.7 Tip A hibrid konstrüksiyon profili ölçüleri (mm)

7.2. Nümerik Analizler

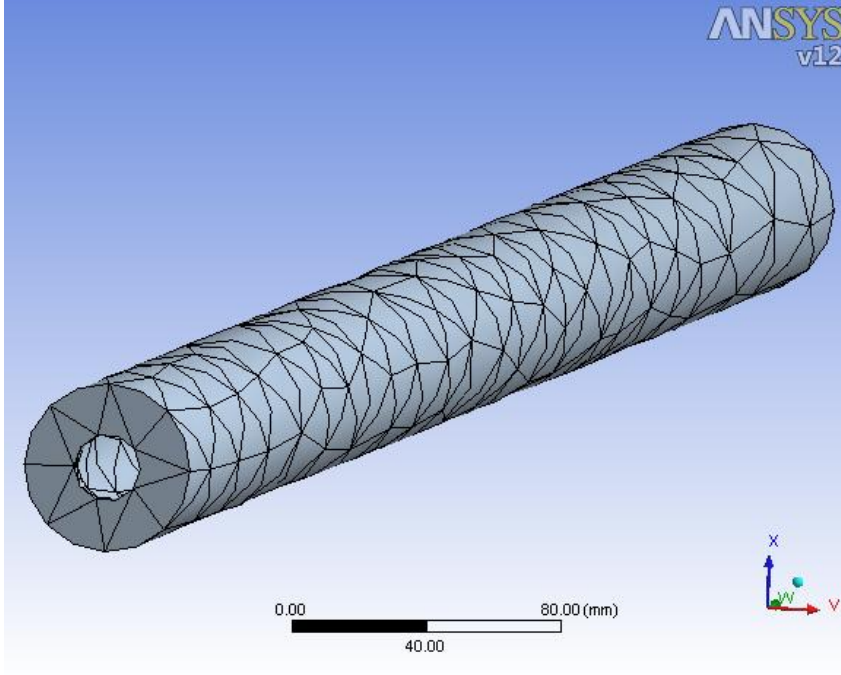
Nümerik analizler sonlu elemanlar yöntemi paket programı Ansys 12'nin Workbench arayüzü ile yapılmıştır. Dayanım ve ömür analizleri yapılmıştır. Dayanım analizlerinde A, B, C tipi hibrid profiller ve düz profil mukayese edilmiştir. Ömür analizlerinde ise A, B, C tipi hibrid profiller ve düz profilin yorulma ömürleri karşılaştırılmıştır. Analizler ile ilgili mühendislik verileri aşağıda belirtilmiştir.

Yapı çeliği malzeme özellikleri:

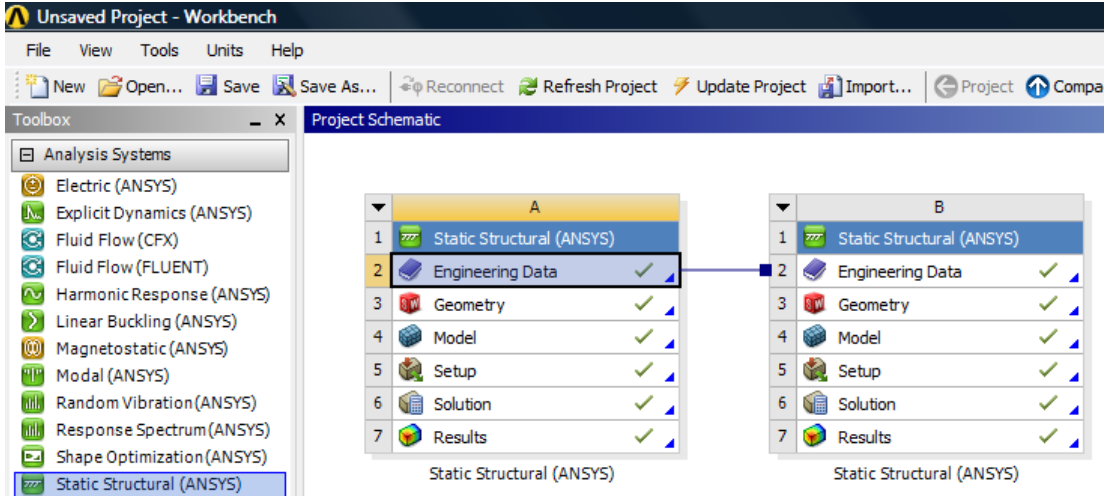
- Yoğunluk = 7850 kg/m^3
- $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de genleşme katsayısı = $1.2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- Özgül ısı = $4.34 \times 10^5 \text{ mj/kg}^\circ\text{C}$
- Isıl iletkenlik = $0.0605 \text{ W/mm}^\circ\text{C}$
- Özdirenç = $1.7 \times 10^{-4} \text{ ohm mm}$
- Akma mukavemeti = 250 Mpa
- Kopma mukavemeti = 460 Mpa
- Young modülü = $2 \times 10^5 \text{ Mpa}$
- Poisson oranı = 0.3

Modelleme tamamlandıktan sonraki aşama profillerin birbirlerine düğüm noktaları ile bağlı elemanlara ayırmaktır. Bu işleme “Meshing” adı verilir. Bu işlem için bir mühendislik tahmini yapılır. Bu elemanların sayısı, yoğunluğu ve boyutları önemlidir.

Bu çalışmadaki analizler mukayese amaçlı yapıldığından dolayı “Meshing” işlemi programda otomatik tanımlanmıştır (Şekil 7.8).



Şekil 7.8 Meshing işlemi

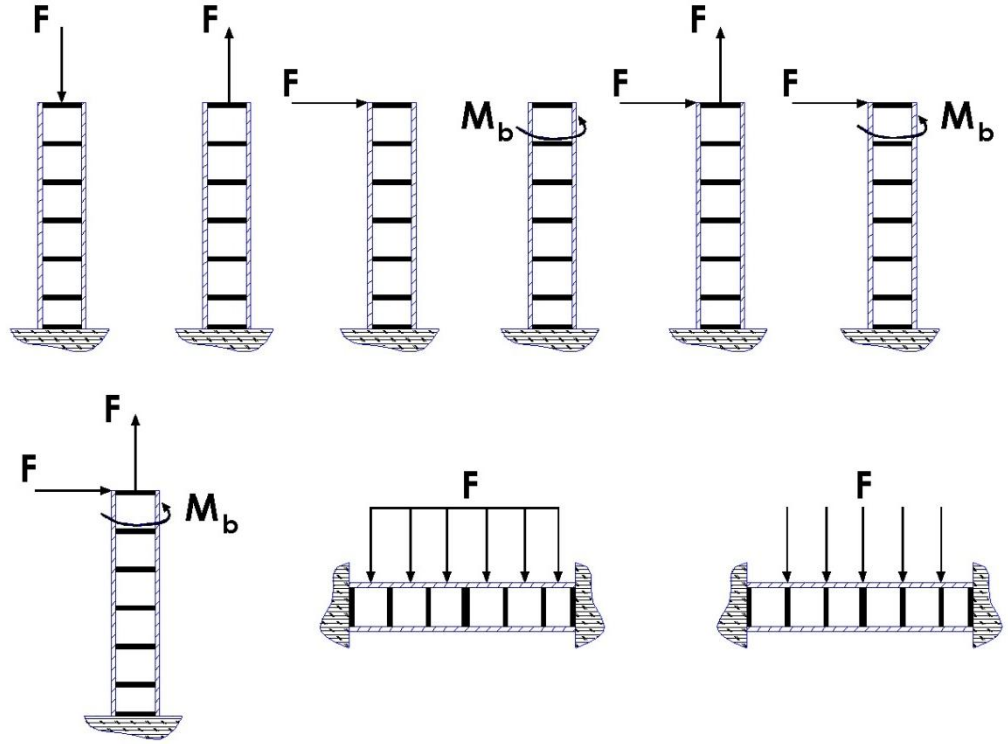


Şekil 7.9 “Engineering Data” ilişkilendirmesi

Şekil 7.9’da görüleceği gibi Ansys workbench arayüzünde analizi yapılacak profiller için “Engineering Data” ilişkilendirilmiştir. Yani mukayese edilecek profiller için girilen mühendislik verileri aynıdır.

7.2.1. Dayanım analizleri

Dayanım analizlerinde düz profile ve A tipi hibrid profile aynı yüklemeler yapılarak, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analizlerde profillerin malzemesi yapı çeliği seçilmiştir. Üç boyutlu analiz yapılmıştır. Dayanım analizlerinde uygulanan yüklemeler Şekil 7.10’da gösterilmiştir.

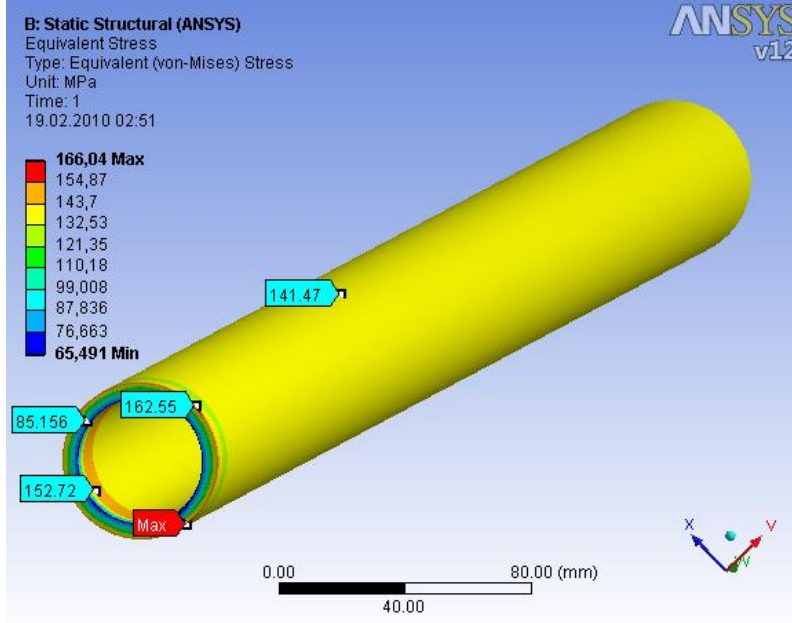


Şekil 7.10 Uygulanan yüklemeler

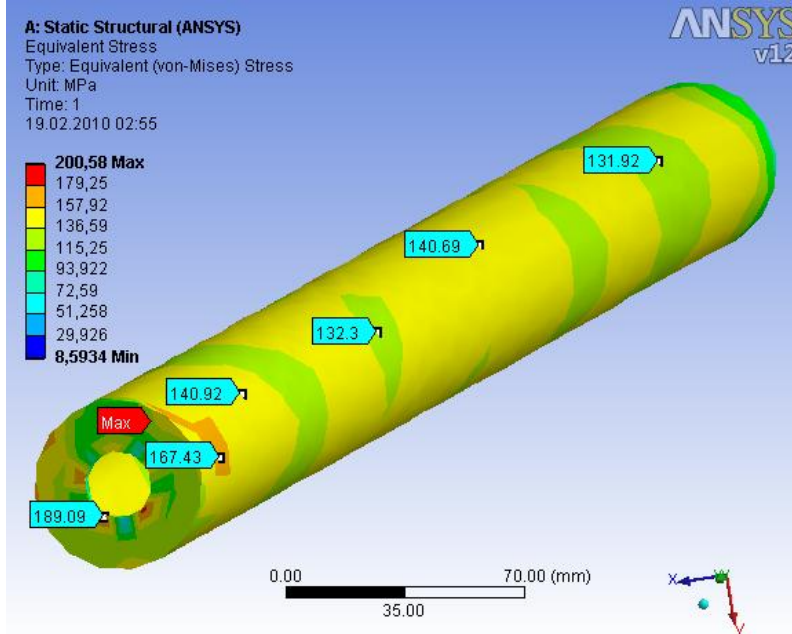
Bu yüklemeler sırası ile çekme kuvveti, basma kuvveti, eğme kuvveti, burulma momenti, çekme+eğme kuvvetleri, eğme kuvveti+burulma momenti, çekme+eğme kuvvetleri+burulma momenti, yayılı kuvvet (tüm yüzeye), yayılı kuvvet (takviye noktalarına) ve burkulma kuvvetidir.. Profiller yayılı kuvvet uygulamasında iki uçlarındaki yüzeylerinden, diğer yüklemelerde bir uçlarındaki yüzeylerinden hareketsiz mesnetlenmişlerdir. Uygulanan yüklemelerin değerleri, belirgin renk ayrımı ortaya çıkacak büyüklükte seçilmiştir. Çekme ve basma kuvvetleri mesnetlenmemiş uçtaki yüzeyden uygulanmıştır ve değeri 100kN’dur. Eğme kuvveti yine mesnetlenmemiş uçtaki yüzeyden uygulanmıştır ve değeri 2kN’dur. Burulma momentinin değeri 2000kN.mm’dir ve serbest uçtaki yüzeye uygulanmıştır. Bileşke kuvvetler; çekme (50kN)+eğme (1kN), eğme (2kN)+burulma (1000kN.mm), çekme (50kN)+eğme (2kN)+burulma

(1000kN.mm) değerlerinde uygulanmıştır. Yayılı kuvvetin değeri 30 kN'dur, tüm yüzeye ve takviye noktalarına uygulanmıştır. Çözümlerde eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımları değerlendirilmiştir.

7.2.1.1. Çekme kuvveti altında profillerin davranışları



Şekil 7.11 Çekme kuvveti altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

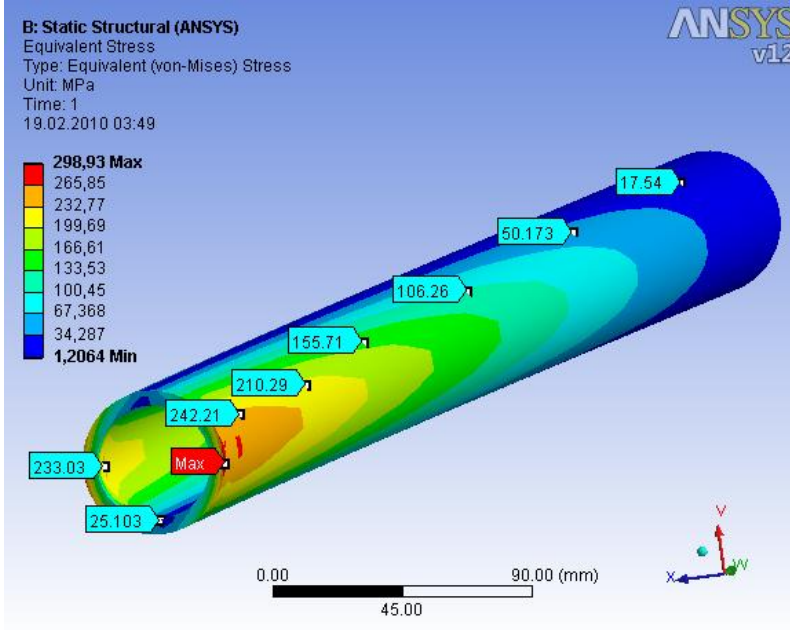


Şekil 7.12 Çekme kuvveti altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

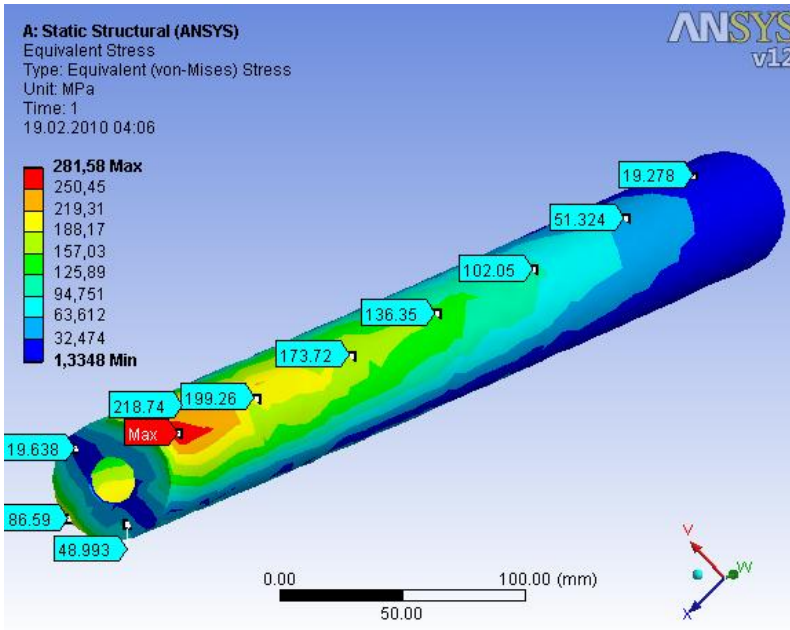
7.2.1.2. Basma kuvveti altında profillerin davranışları

Basma kuvveti altında yapılan analizlerde çıkan sonuçlardaki değerler, çekme kuvveti altında çıkan sonuçlardaki değerler ile aynı olduğundan burada yer verilmemiştir.

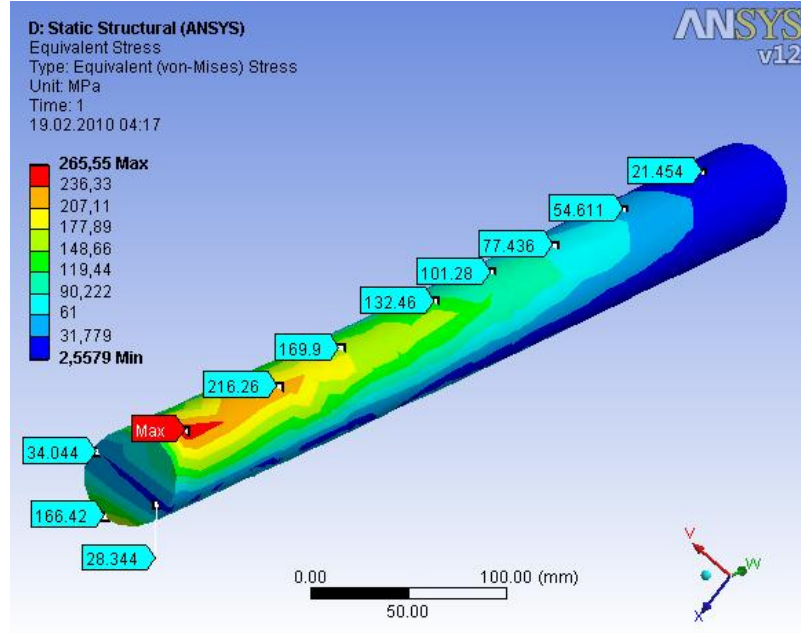
7.2.1.3. Eğme kuvveti altında profillerin davranışları



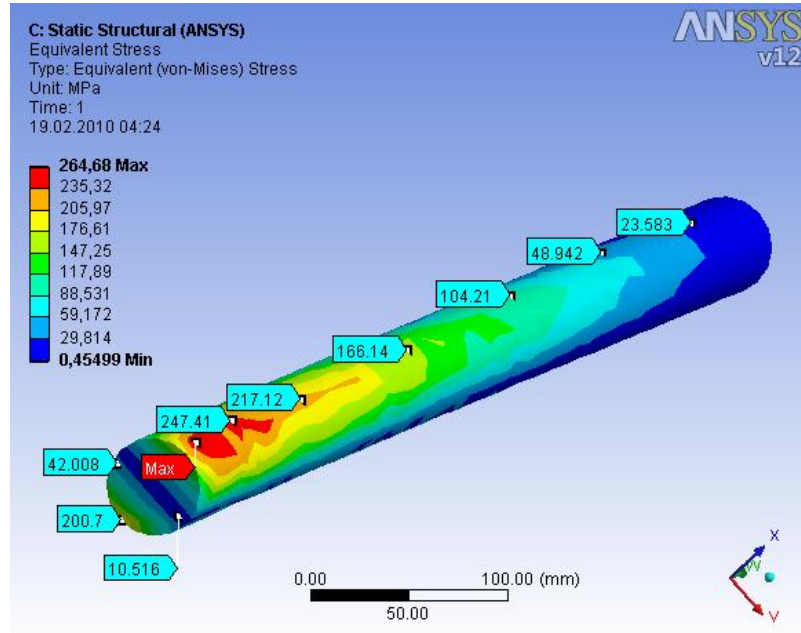
Şekil 7.15 Eğme kuvveti altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 7.16 Eğme kuvveti altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 7.17 Eğme kuvveti altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

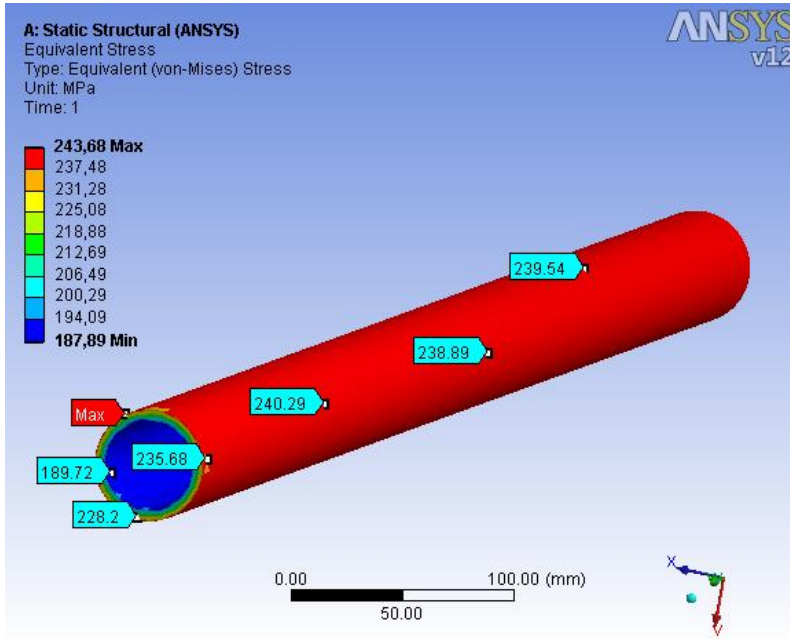


Şekil 7.18 Eğme kuvveti altında Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

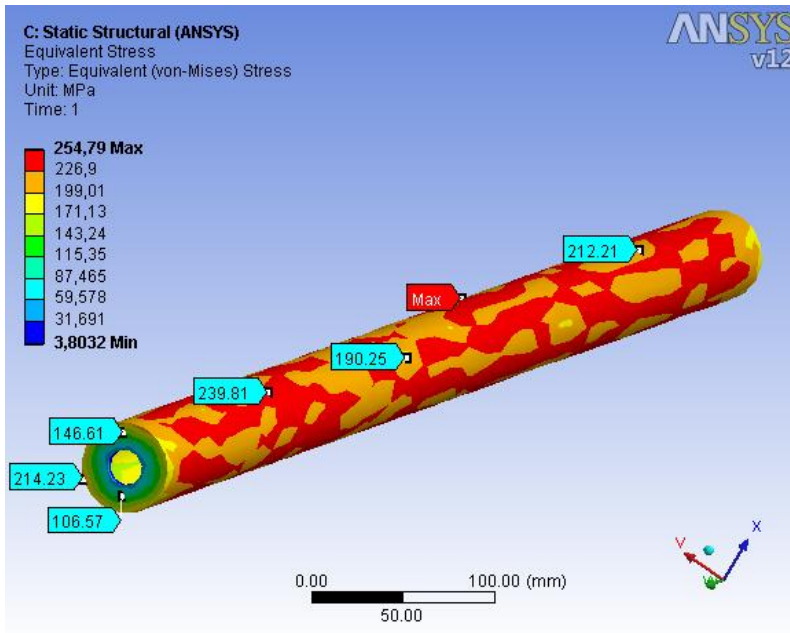
Çizelge 7.2 Eğme kuvveti altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri

Profil Tipi	Maksimum Gerilme (MPa)	Minimum Gerilme (MPa)
Düz	298,93	1,206
Tip A	281,58	1,335
Tip B	265,55	2,558
Tip C	264,68	0,455

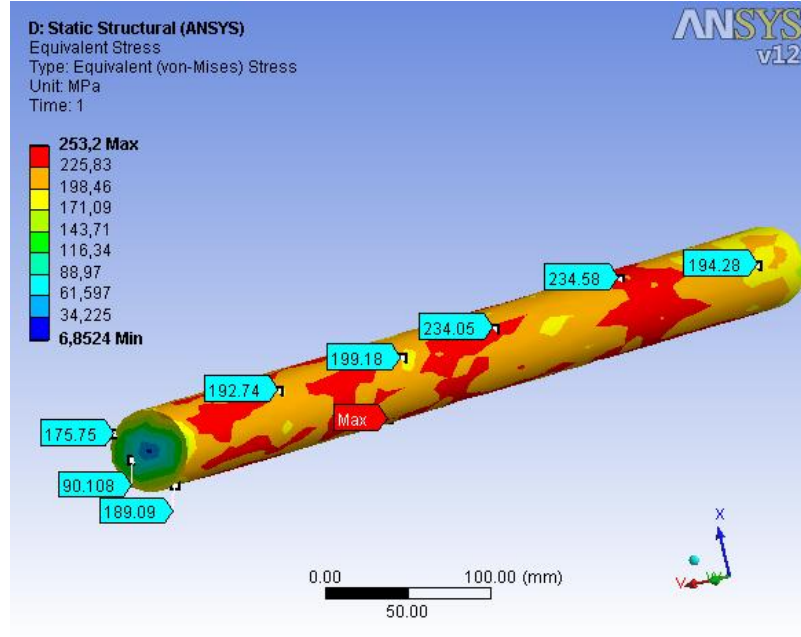
7.2.1.4. Burulma momenti altında profillerin davranışları



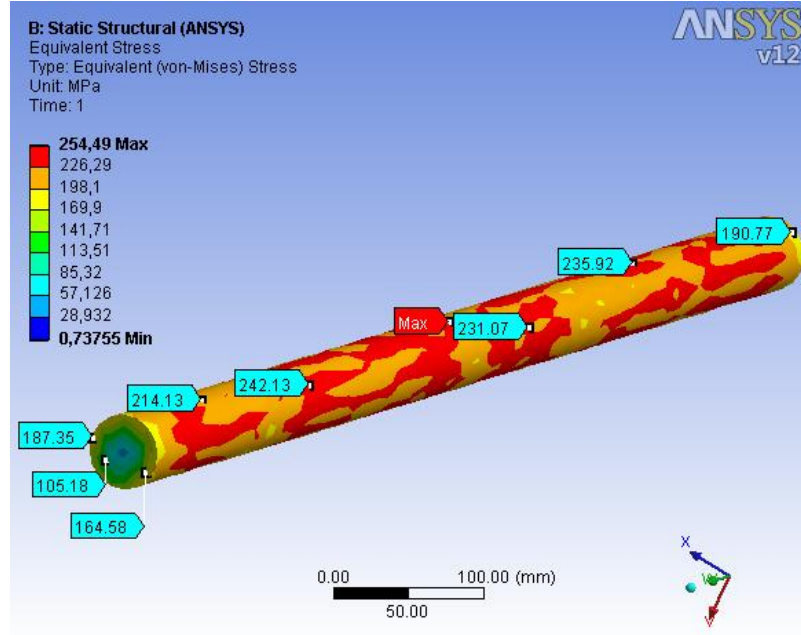
Şekil 7.19 Burulma momenti altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 7.20 Burulma momenti altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 7.21 Burulma momenti altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

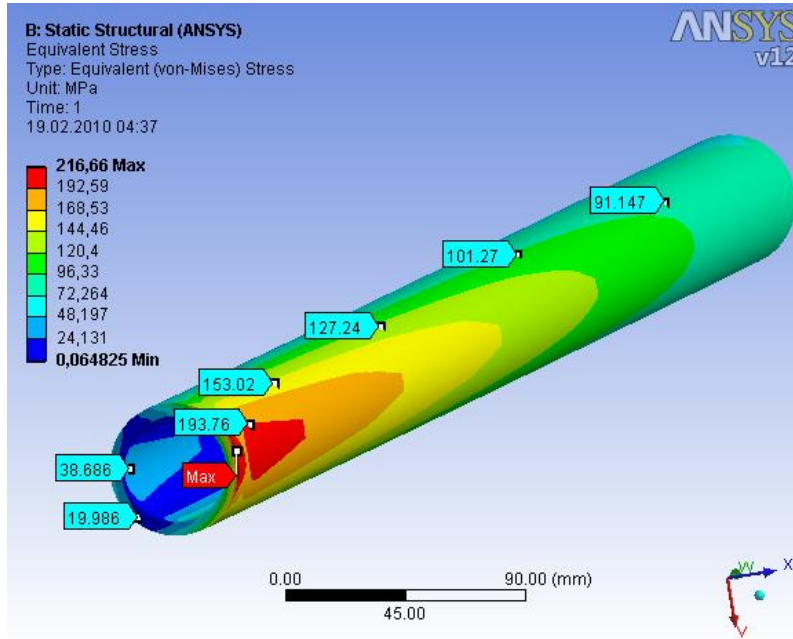


Şekil 7.22 Burulma momenti altında Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

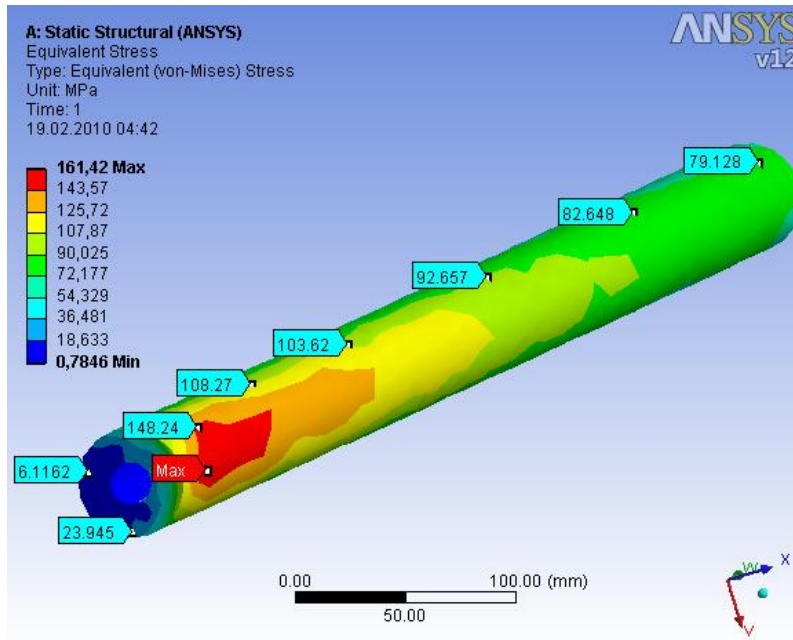
Çizelge 7.3 Burulma momenti altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri

Profil Tipi	Maksimum Gerilme (MPa)	Minimum Gerilme (MPa)
Düz	243,68	187,89
Tip A	254,79	3,803
Tip B	253,2	6,852
Tip C	254,49	0,737

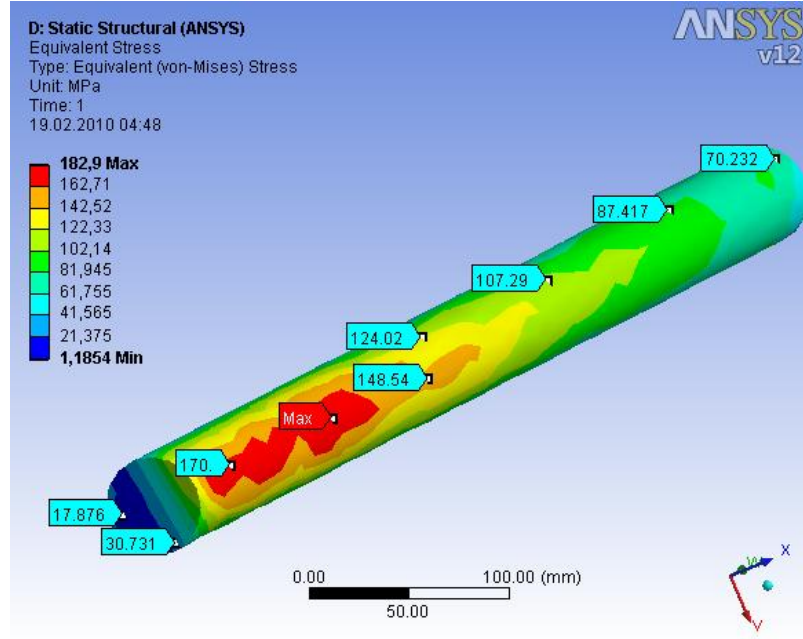
7.2.1.5. Çekme+eğme kuvvetleri altında profillerin davranışları



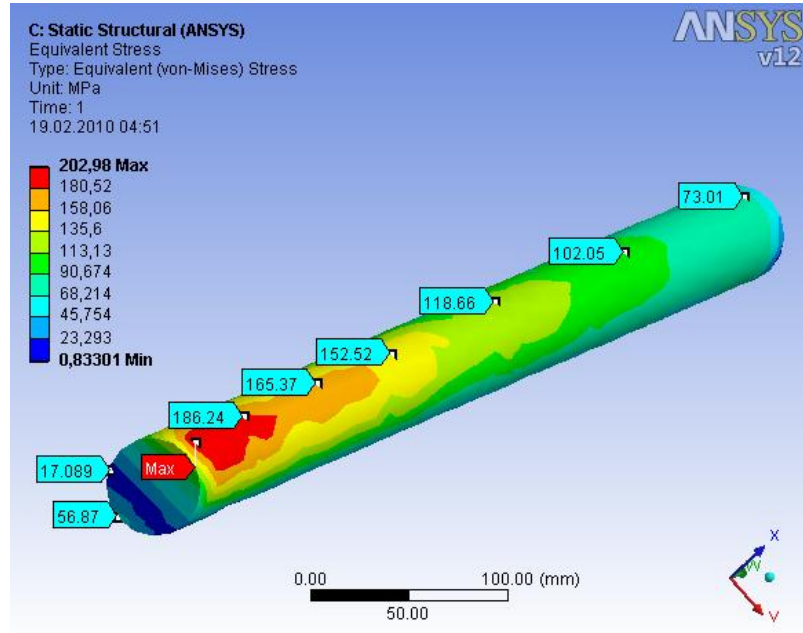
Şekil 7.23 Çekme+eğme kuvvetleri altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 7.24 Çekme+eğme kuvvetleri altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 7.25 Çekme+eğme kuvvetleri altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

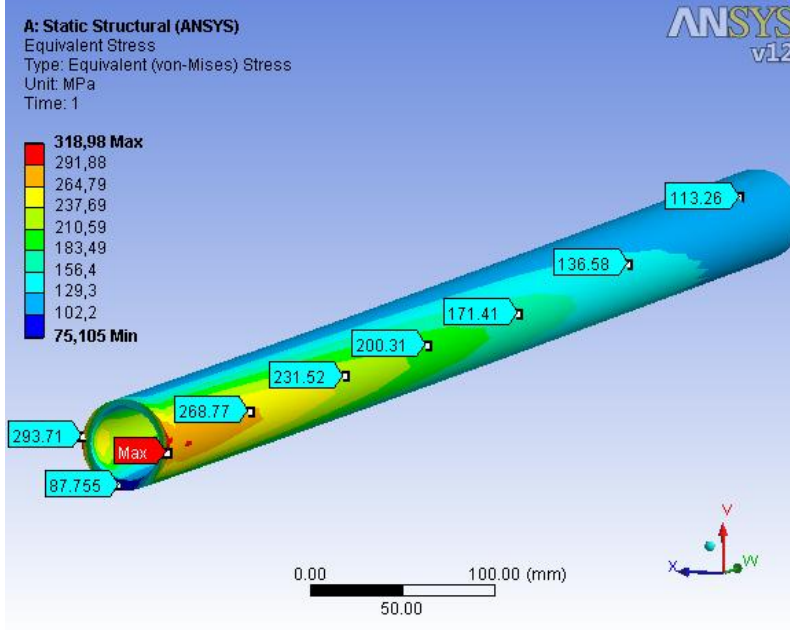


Şekil 7.26 Çekme+eğme kuvvetleri altında Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

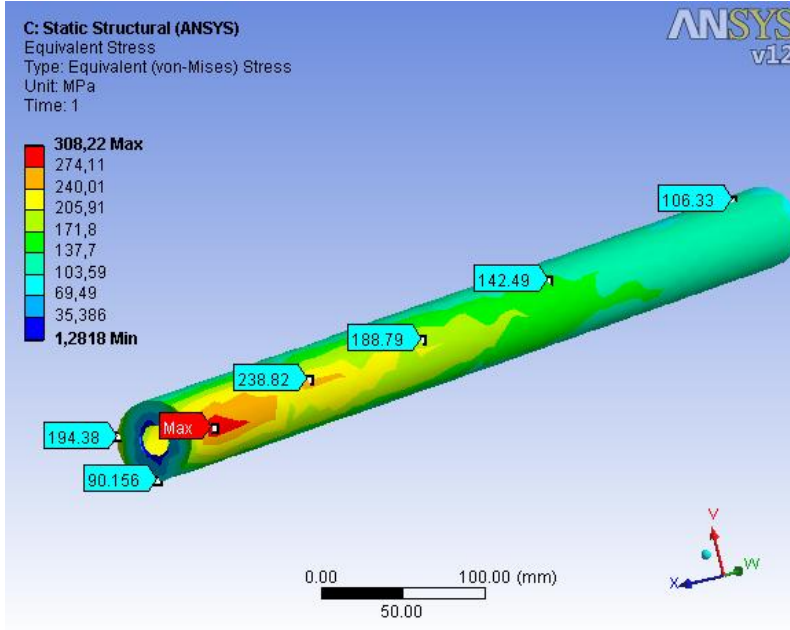
Çizelge 7.4 Çekme+eğme kuvvetleri altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri

Profil Tipi	Maksimum Gerilme (MPa)	Minimum Gerilme (MPa)
Düz	216,66	0,065
Tip A	161,42	0,784
Tip B	182,9	1,185
Tip C	202,98	0,833

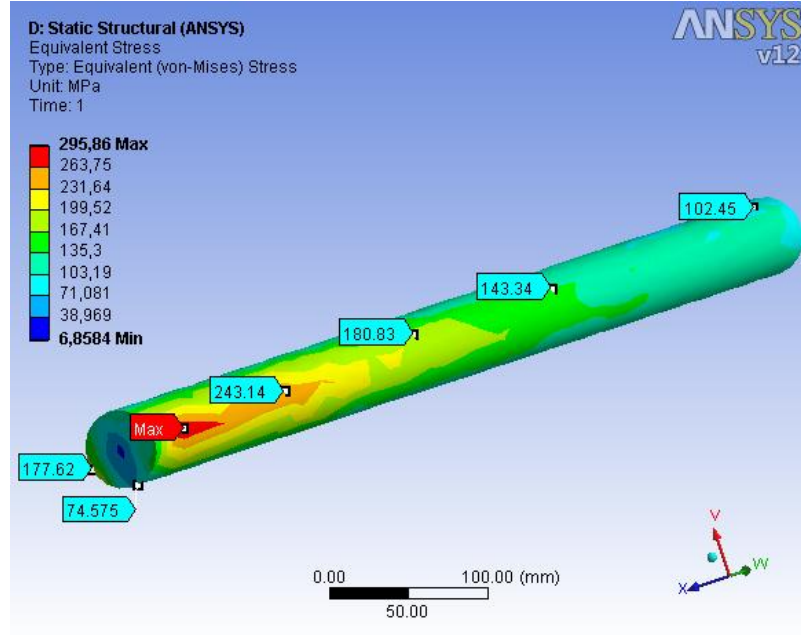
7.2.1.6. Eğme kuvveti+burulma momenti altında profillerin davranışları



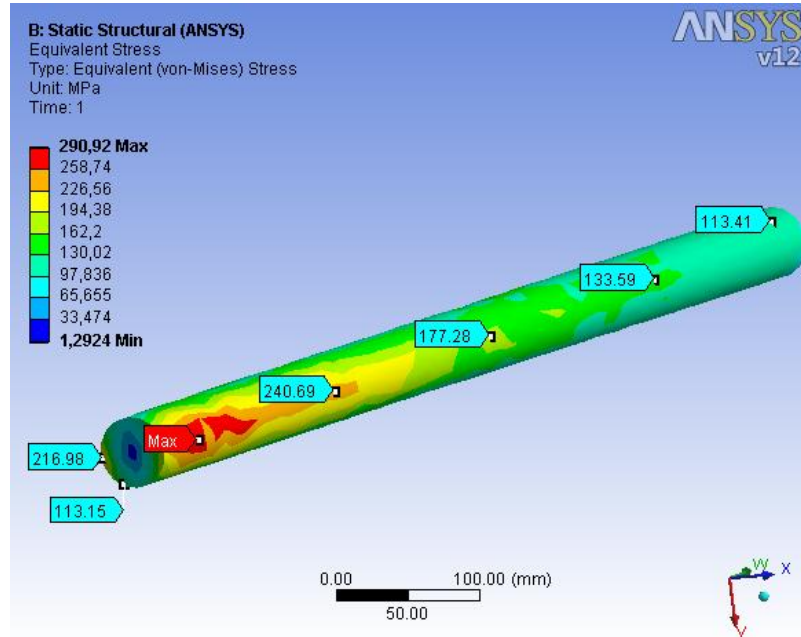
Şekil 7.27 Eğme kuvveti+burulma momenti altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 7.28 Eğme kuvveti+burulma momenti altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 7.29 Eğme kuvveti+burulma momenti altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

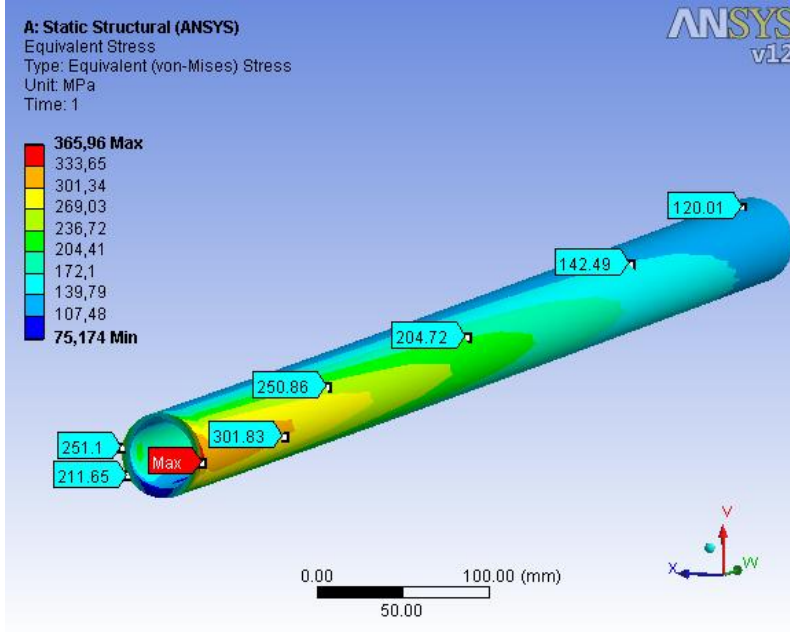


Şekil 7.30 Eğme kuvveti+burulma momenti altında Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

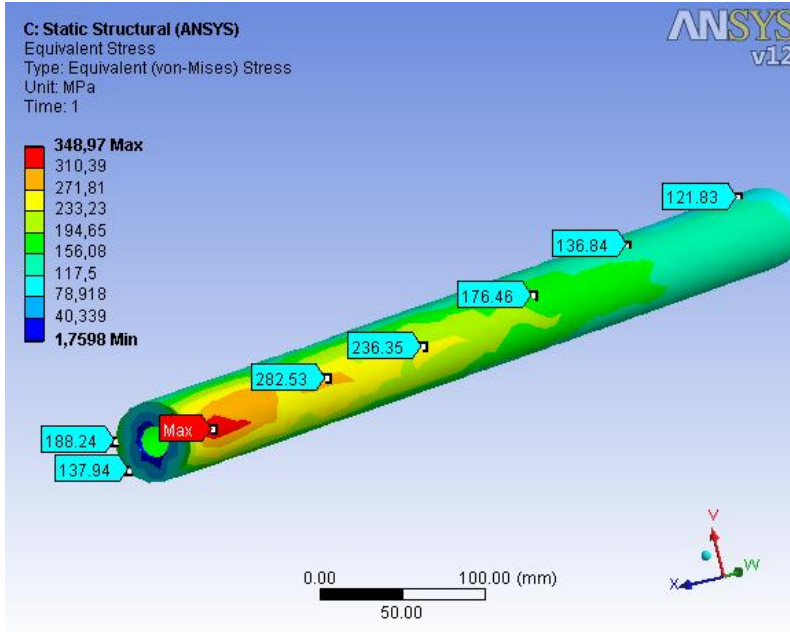
Çizelge 7.5 Eğme kuvveti+burulma momenti altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri

Profil Tipi	Maksimum Gerilme (MPa)	Minimum Gerilme (MPa)
Düz	318,98	75,105
Tip A	308,22	1,282
Tip B	295,86	6,858
Tip C	290,92	1,292

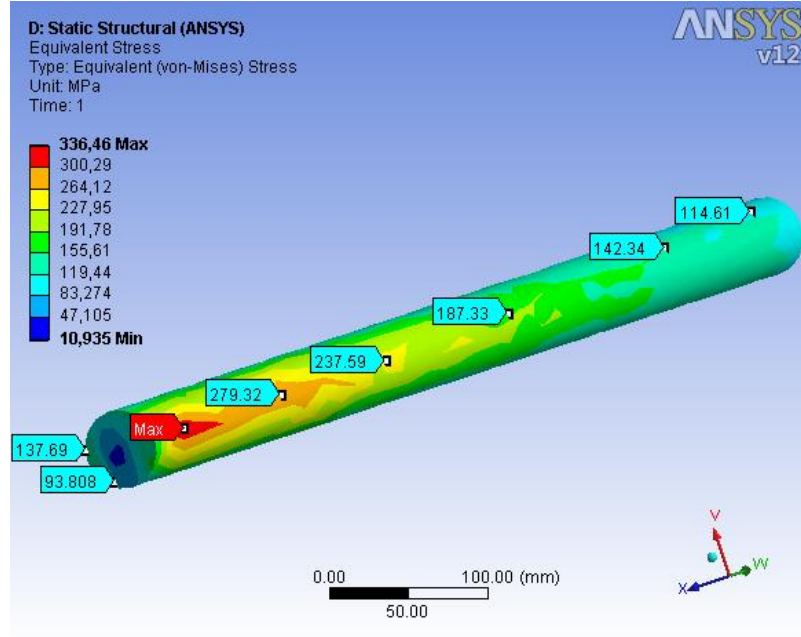
7.2.1.7. Çekme+eğme kuvvetleri+burulma momenti altında profillerin davranışları



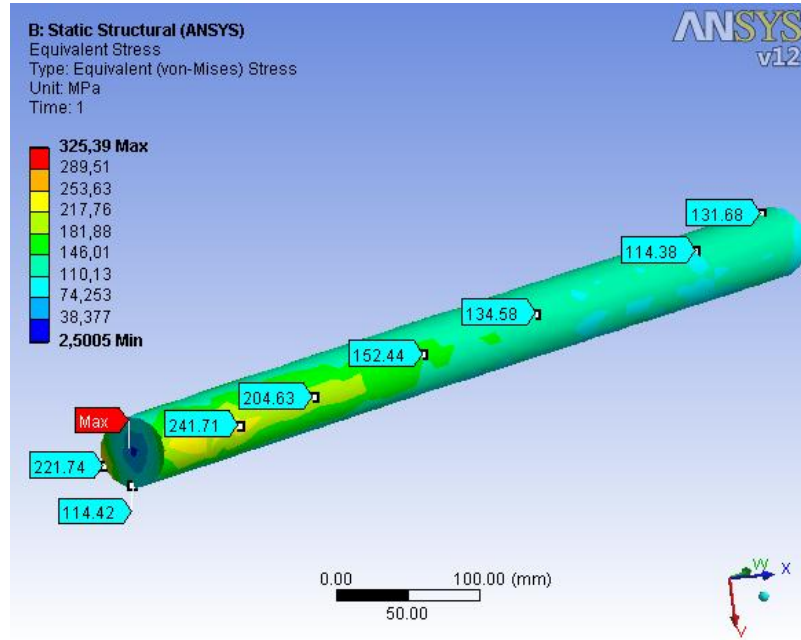
Şekil 7.31 Çekme+eğme kuvvetleri+burulma momenti altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 7.32 Çekme+eğme kuvvetleri+burulma momenti altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 7.33 Çekme+eğme kuvvetleri+burulma momenti altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

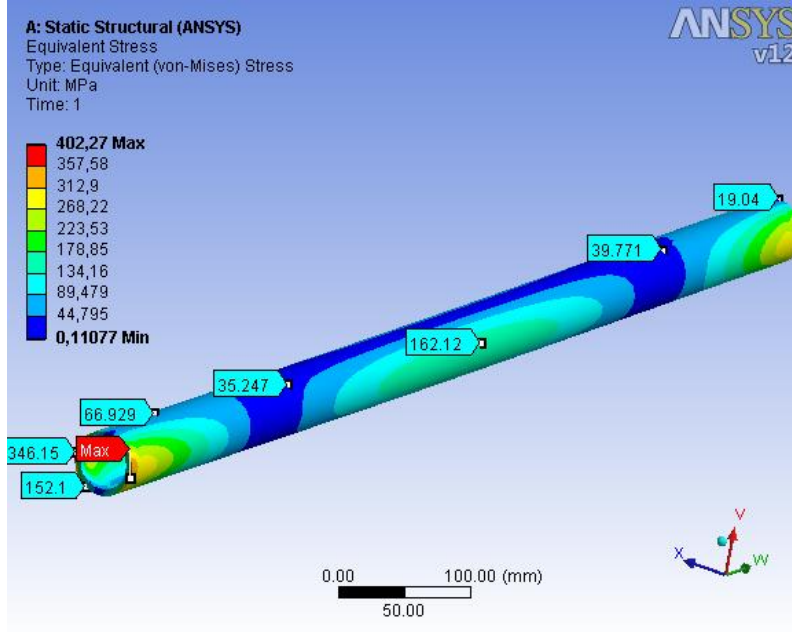


Şekil 7.34 Çekme+eğme kuvvetleri+burulma momenti altında Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

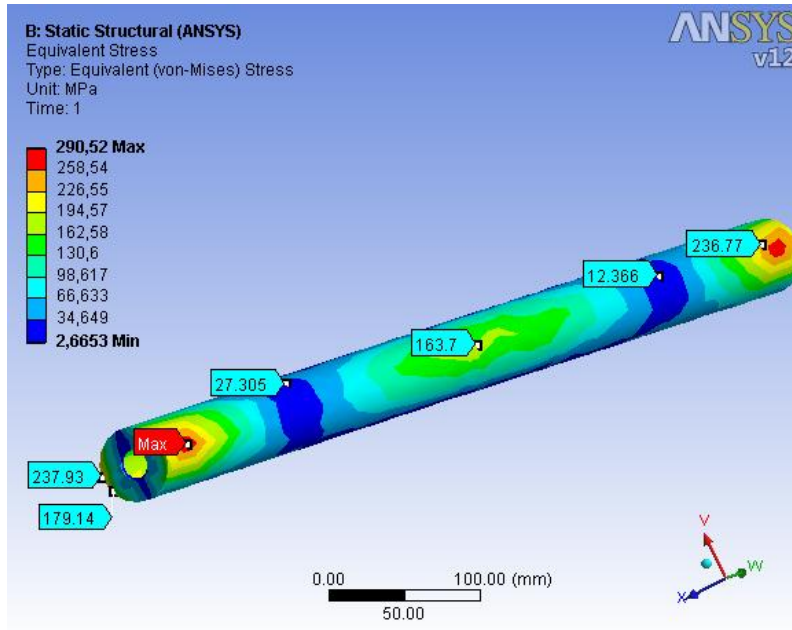
Çizelge 7.6 Çekme+eğme kuvvetleri+burulma momenti altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri

Profil Tipi	Maksimum Gerilme (MPa)	Minimum Gerilme (MPa)
Düz	365,96	75,174
Tip A	348,97	1,759
Tip B	336,46	10,935
Tip C	325,39	2,5

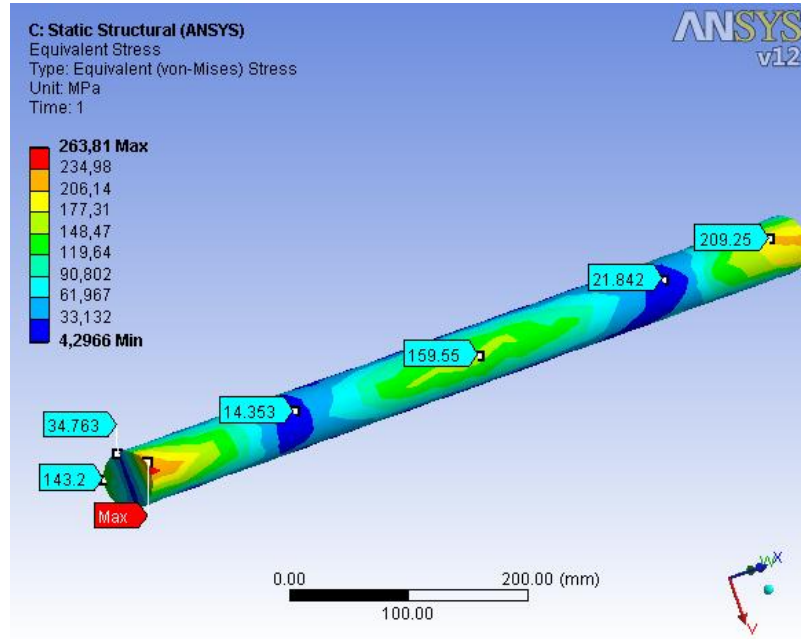
7.2.1.8. Yayıllı kuvvet (tüm yüzeye) altında profillerin davranışları



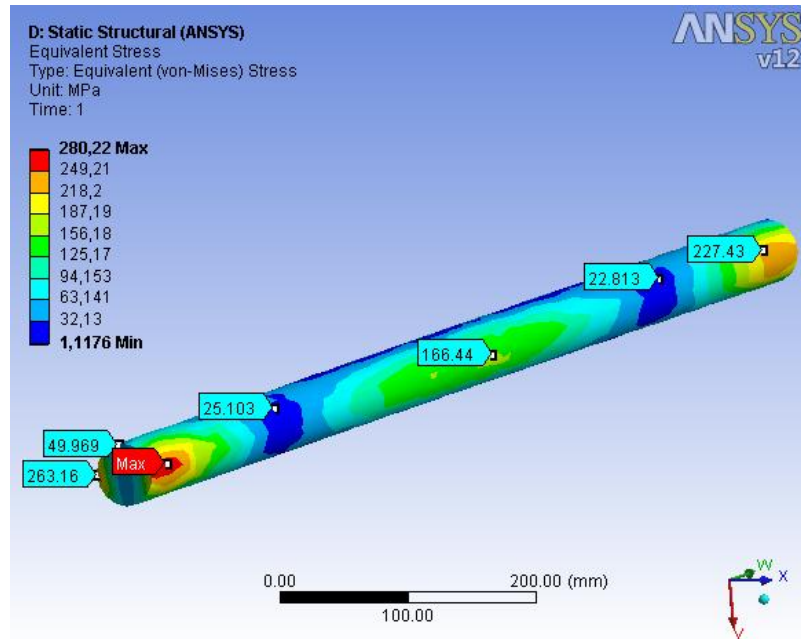
Şekil 7.35 Yayıllı kuvvet (tüm yüzeye) altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 7.36 Yayıllı kuvvet (tüm yüzeye) altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 7.37 Yayıllı kuvvet (tüm yüzeye) altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

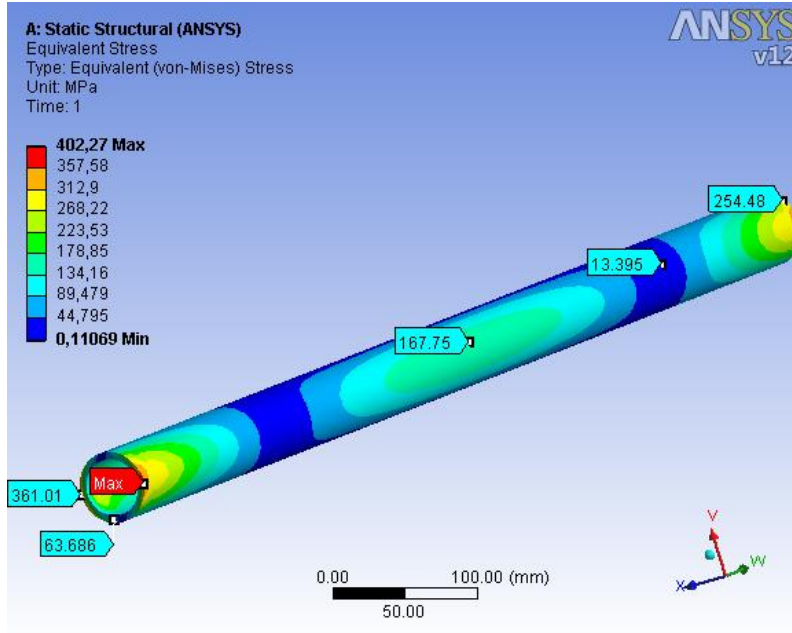


Şekil 7.38 Yayıllı kuvvet (tüm yüzeye) altında Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

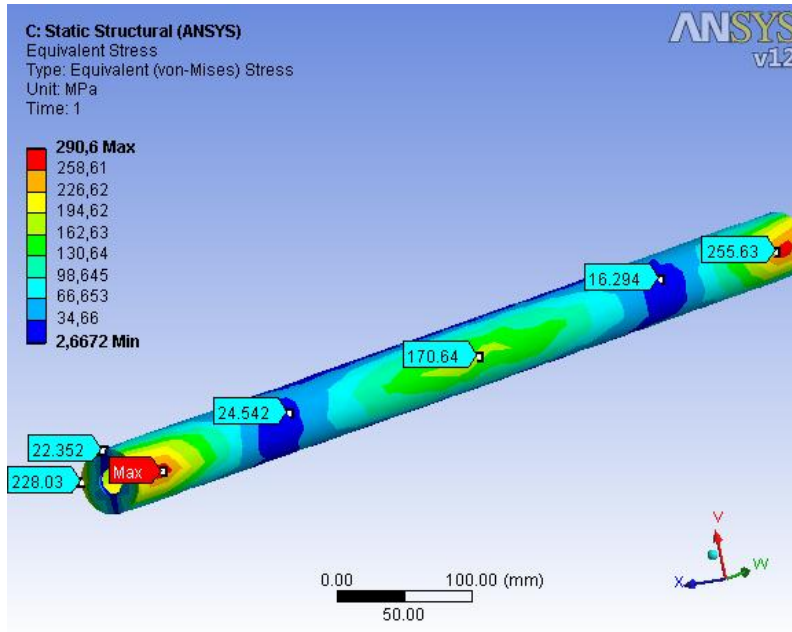
Çizelge 7.7 Yayıllı kuvvet (tüm yüzeye) altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri

Profil Tipi	Maksimum Gerilme (MPa)	Minimum Gerilme (MPa)
Düz	402,27	0,111
Tip A	290,52	2,665
Tip B	263,81	4,295
Tip C	280,22	1,118

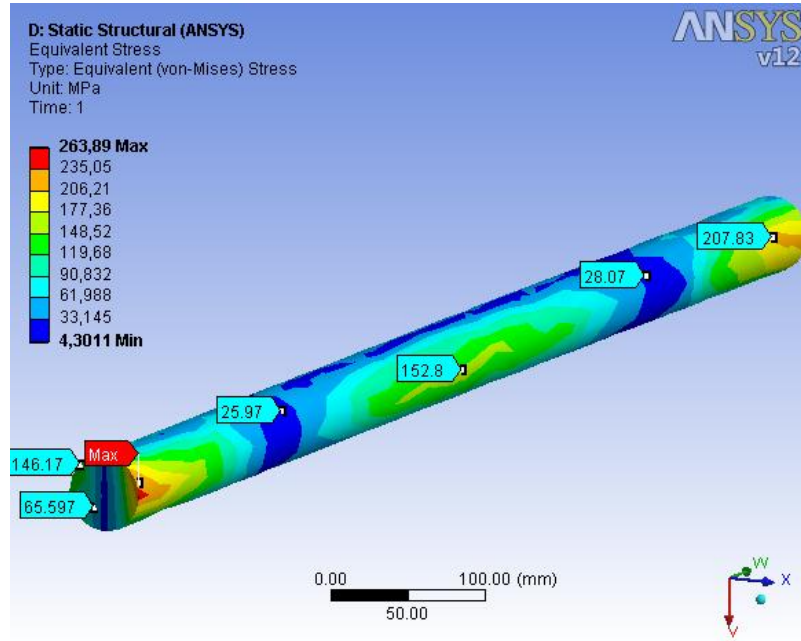
7.2.1.9. Yayıllı kuvvet (takviye noktalarına) altında profillerin davranışları



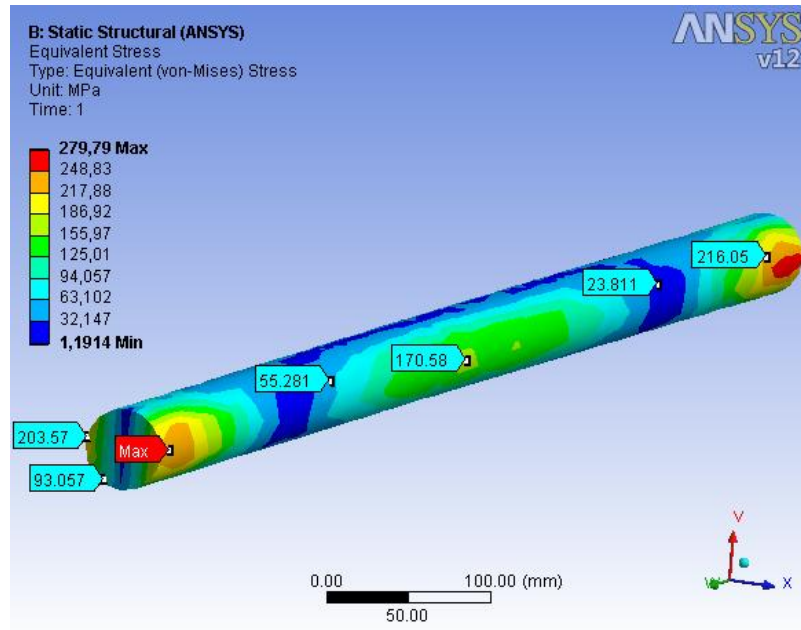
Şekil 7.39 Yayıllı kuvvet (takviye noktalarına) altında düz profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 7.40 Yayıllı kuvvet (takviye noktalarına) altında Tip A hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 7.41 Yayılı kuvvet (takviye noktalarına) altında Tip B hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



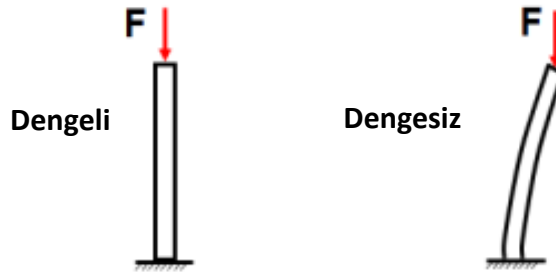
Şekil 7.42 Yayılı kuvvet (takviye noktalarına) altında Tip C hibrid profil eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

Çizelge 7.8 Yayılı kuvvet (takviye noktalarına) altında profillerin eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri

Profil Tipi	Maksimum Gerilme (MPa)	Minimum Gerilme (MPa)
Düz	402,27	0,111
Tip A	290,6	2,667
Tip B	263,89	4,301
Tip C	279,79	1,191

7.2.1.10. Profillerin burkulma dayanımı

Birçok yapının yapısal dengesi için bir değerlendirme gerekir. İnce sütunlar, sıkıştırılan elemanlar ve vakum tankları gibi yapılar denge değerlendirmeleri gerektiren örneklerdir. Dengesizliğin (burkulma) başlangıcında, yüklemde bir değişiklik olmamasına rağmen yapıda çok büyük bir deplasman oluşur (Şekil 7.43).



Şekil 7.43 Yapısal denge halleri

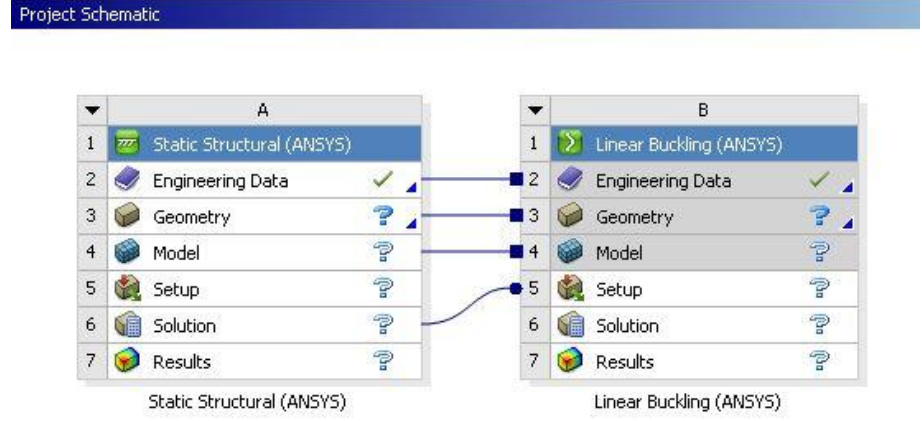
Ansys programındaki modüllerden özdeğer veya lineer burkulma analizi, ideal bir lineer elastik yapının teorik burkulma dayanımını tahmin eder. Özdeğer burkulma çözümü klasik Euler çözümüdür. Bu çalışmada Ansys Workbench'in modülü olan lineer burkulma kullanılmıştır.

Kusurlar ve doğrusal olmayan davranışlar, çoğu yapının teorik elastik burkulma davranışını pratikte değiştirir. Lineer burkulma genellikle koruyucu olmayan sonuç verir. Burkulma analizi, öncesinde bir yapısal analize ihtiyaç duyar.

Burkulma analizinde uygulanan kuvvet (F), kritik burkulma yüküne ulaşması için bir çarpma faktörü (λ)(Load multiplier) ile ölçeklendirir.

$$\text{Burkulma Yüğü} = F \times \lambda$$

Burkulma analizleri her zaman şematik proje içinde yapısal analiz ile birleştirilir (Şekil 7.44).

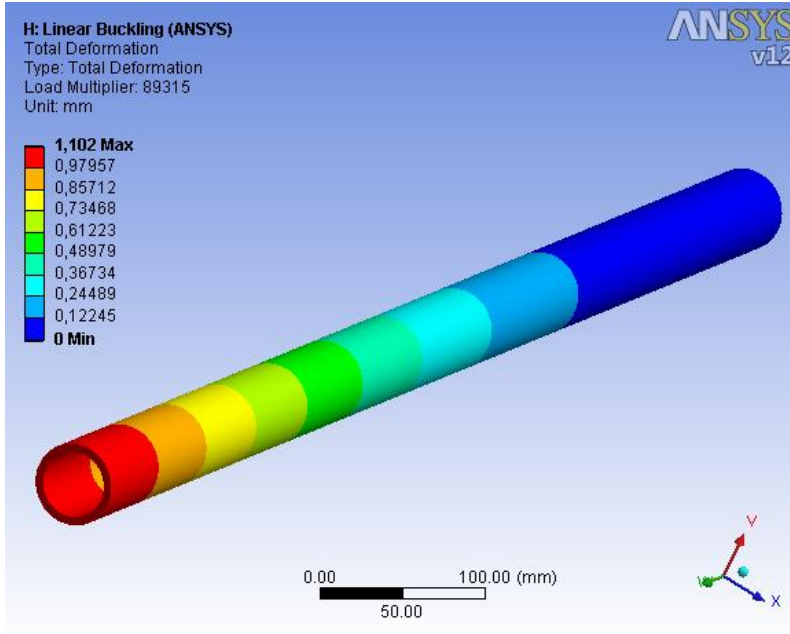


Şekil 7.44 Yapısal analiz ve burkulma analizi ilişkisi

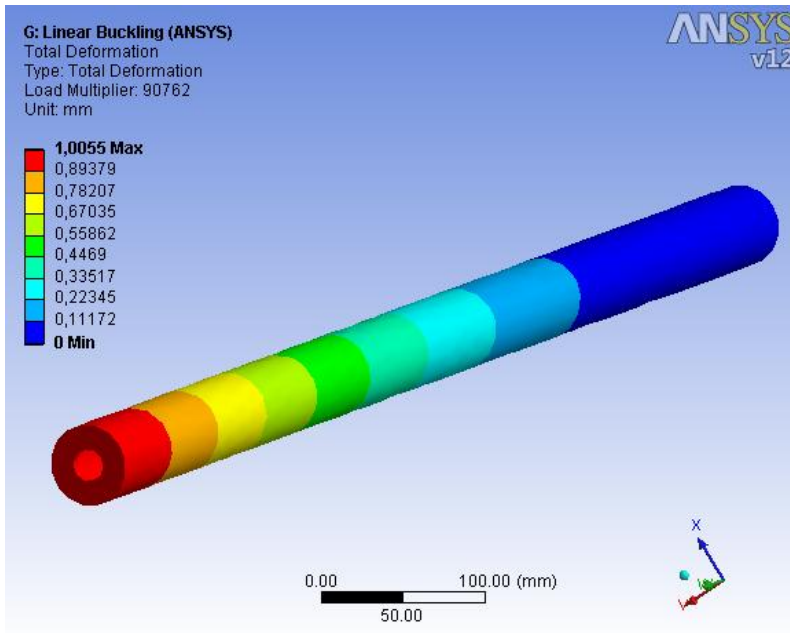
Bu çalışmada profillere 1 N basma kuvveti uygulanarak sonuçta çıkan çarpma faktörleri (Load multiplier) değerlendirilmiştir. Çarpma faktörü (Load multiplier) ile uygulanan kuvvet çarpıldığında burkulma dayanımı elde edilir, yani burkulmanın başlayacağı kritik yük elde edilmiş olur.

$$F_{burkulma} = F_{uygulanan} \times \lambda$$

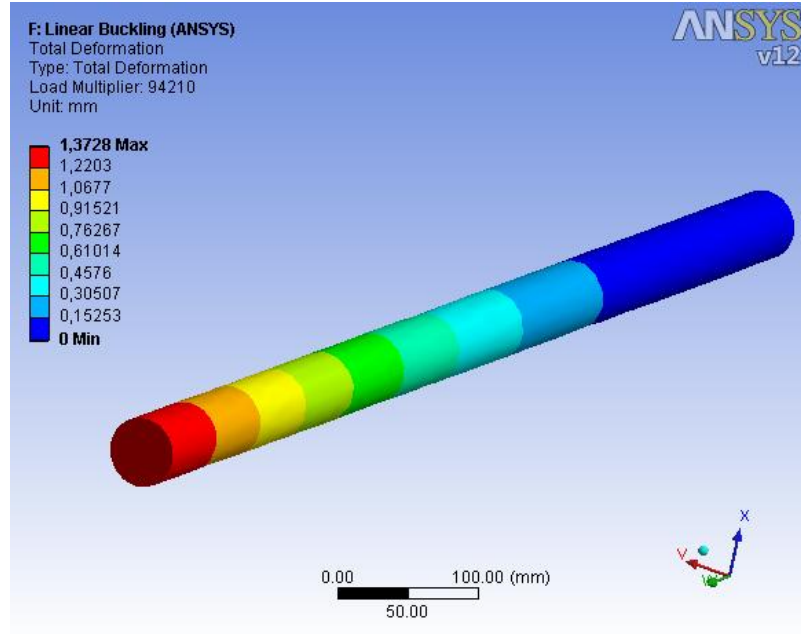
Lineer burkulma analizi ile ilgili toplam deformasyon dağılımları, çarpma faktörü (Load multiplier) sonuçları ve burkulma yükleri Şekil 7.45, Şekil 7.46, Şekil 7.47, Şekil 7.48 ve Çizelge 7.9'da gösterilmiştir.



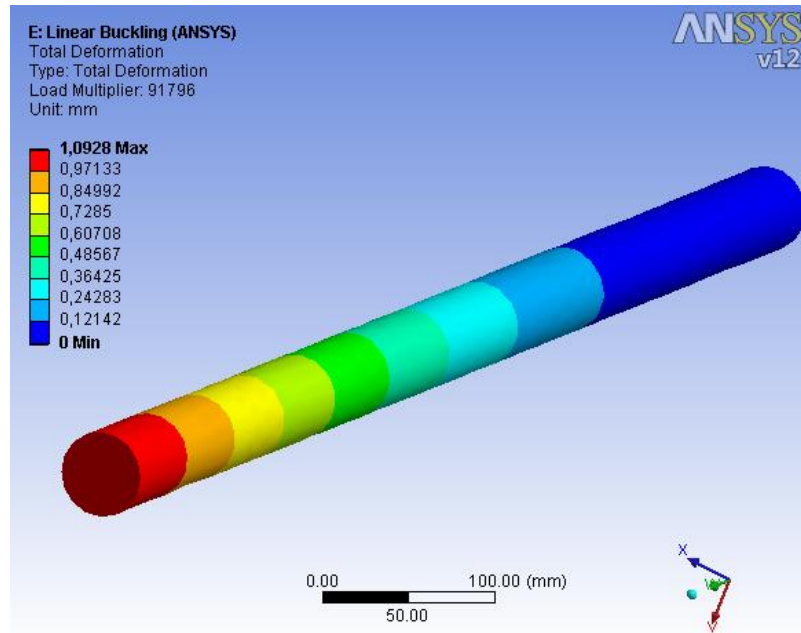
Şekil 7.45 Lineer burkulma analizinde düz profilde toplam deformasyon dağılımı ve çarpma faktörü



Şekil 7.46 Lineer burkulma analizinde Tip A hibird profilde toplam deformasyon dağılımı ve çarpma faktörü



Şekil 7.47 Lineer burkulma analizinde Tip B hibird profile toplam deformasyon dağılımı ve çarpma faktörü



Şekil 7.48 Lineer burkulma analizinde Tip C hibird profile toplam deformasyon dağılımı ve çarpma faktörü

Çizelge 7.9 Lineer burkulma analizinde profillerdeki burkulma dayanımı ve maksimum toplam deformasyon değerleri

Profil Tipi	Burkulma Dayanımı (kN)	Maksimum Toplam Deformasyon (mm)
Düz	89,3	1,102
Tip A	90,7	1,005
Tip B	94,2	1,372
Tip C	91,7	1,092

7.2.2. Ömür analizleri

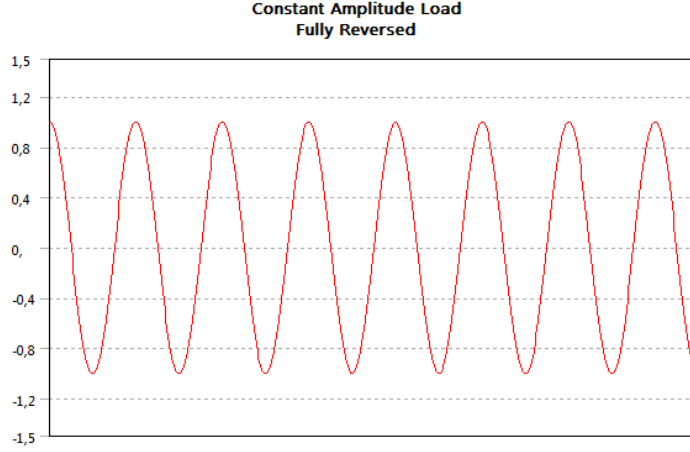
Ömür analizleri önceki bölümde bahsettiğimiz gibi 3 farklı tip perde takviyeli hibrid konstrüksiyon profilleri ve düz boru konstrüksiyon profili için yapılmıştır. A,B ve C tip hibrid profilleri ile düz boru profilin yorulma ömürleri mukayese edilmiştir. Profiller iki taraflarından hareketsiz mesnetlenip yayılı yük uygulanmıştır. Yüklemenin yayılı yük seçilmesinin nedeni, dayanım analizlerinde hibrid profillerin düz boru profile göre en fazla gerilme dağılımı farkının bu yükleme altında çıkmasıdır.

Yorulma analizinde genel olarak 3 ana metod mevcuttur .Bunlar “Strain life”, “Stress life” ve “Fracture mechanics”dir. Ansys Workbench Fatigue Modülü bunların ilk ikisini kullanıcıya sunar. “Strain Life” yaklaşımı günümüzde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve yorulmanın düşük çevrim sayılarını karakterize eden, tipik olarak çatlak başlangıcını kapsayan bir metoddur. Diğer yandan “Stress life” ise parçanın toplam ömrü ile ilgilenir, bunun için çatlak başlangıcını ve çatlak ilerleyişini kapsamaz. Analizleri çevrim sayılarına göre sınıflandırırsak “Strain life” düşük sayılı çevrimler için kullanılır bu yüzden “Low cycle fatigue” (LCF) olarak bilinir. LCF genellikle 50000 ve bundan daha düşük çevrim sayılarını kapsar. “Stress Life” S-N(Stress-Cycle curves) diagramına dayanır ve genellikle yüksek çevrim sayılarını kapsar bundan dolayı “High cycle fatigue” (HCF) diye bilinir. 50000 ve üzeri çevrim sayılarını kapsar.

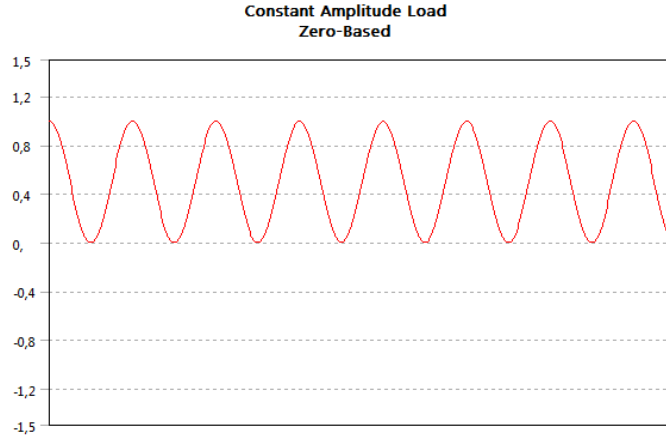
“Fracture mechanics”(Kırılma Mekaniği) varsayılan bir kusur veya boyutu bilinen bir hasar ile başlar ve çatlağın ilerlemesini inceler bu yüzden “Crack Life” (Çatlak ömrü) diye bilinir. Çatlağın büyüme hızı, çatlağın ömrü sürecindeki bölgeler ve kritik çatlak boyu hakkındaki bilgileri kapsar. Bu durumda çatlak başlangıcı (Crack initiation) artı çatlak ömrü (Crack life) parçanın toplam ömrüne eşittir.

Bu çalışmada profillerin toplam ömürleri ile ilgilenildiğinden yorulma analiz tipi “Stress life” seçilmiştir.

Yükleme durumu sabit genlikli tam değişken ($R = -1$) ve sabit genlikli sıfır tabanlı ($R = 0$) olarak seçilmiştir (Şekil 7.49 ve Şekil 7.50). Bu durumlarda parçaya uygulanan maximum ve minimum gerilmelerin değişmediği yani sabit kaldığı kabul edilmiş olur.

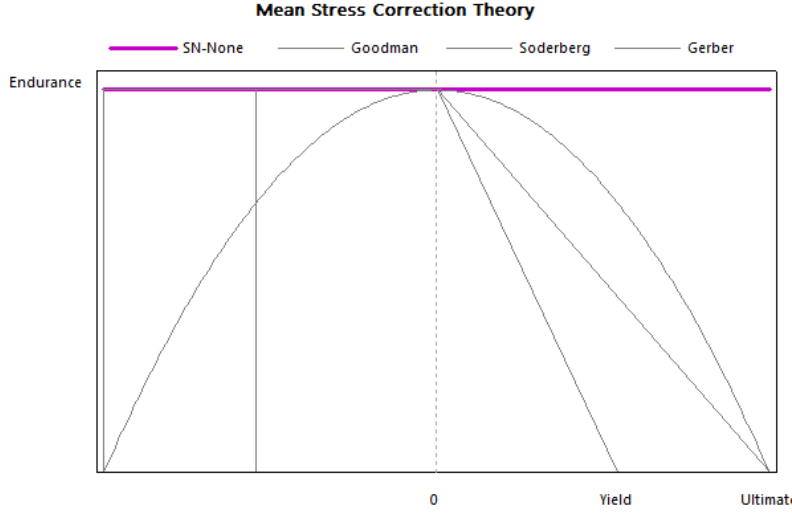


Şekil 7.49 Sabit genlikli tam değişken yüklem durumu



Şekil 7.50 Sabit genlikli sıfır tabanlı yüklem durumu

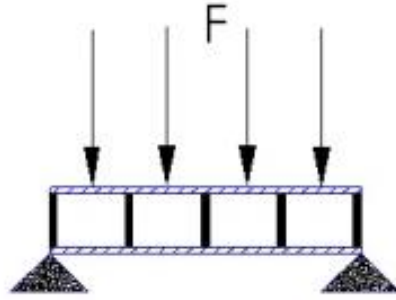
Analiz tipi seçimi (Stress-Strain Life) ve yüklem şeklini tayin ettikten sonra bir sonraki adım “Mean stress correction”ın kullanılıp kullanılmamasına karar vermektir. Malzemelerin yorulma ile ilgili özellikleri genellikle tam değişken (fully reversed) sabit genlikli (Constant Amplitude) testlerde elde edilir. Oysaki (bazı ortalama gerilmeler görülsede) pratikte bu tür yüklemelerin olması oldukça nadirdir. Yüklem tam değişkenden farklı ise o zaman ortalama gerilme mevcuttur ve hesaplanması gereklidir. Ortalama gerilmeleri hesaplamak için Soderberg, Goodman veya Gerber gibi teoriler kullanılır. Bu çalışmada yüklem durumu “Mean stress correction” kullanılmamıştır (Şekil 7.51).



Şekil 7.51 “Mean stress correction” teorisi

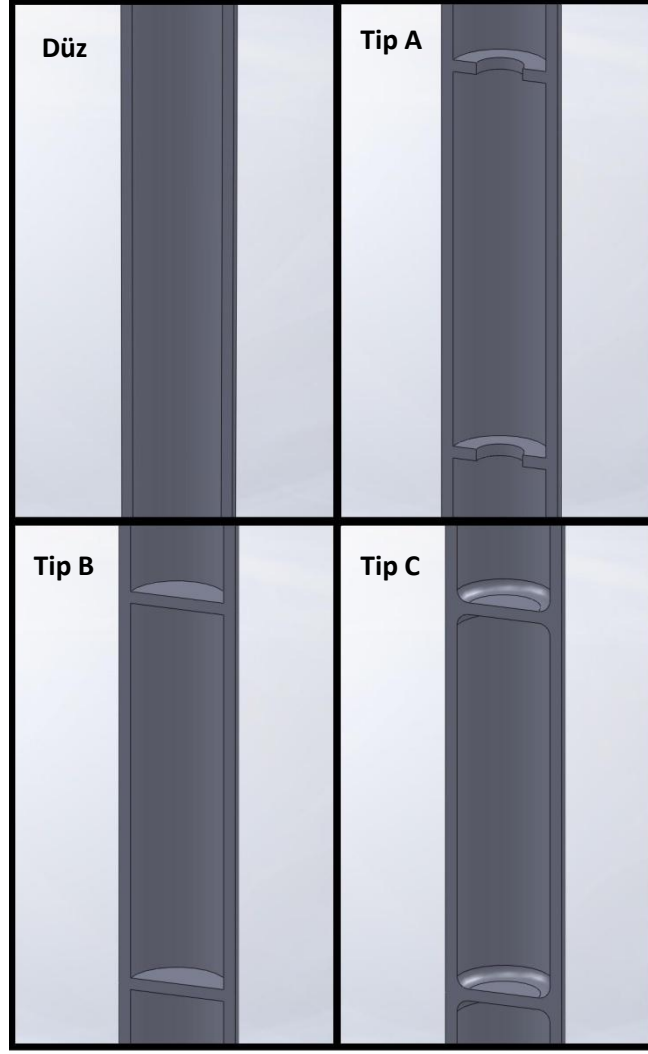
Malzemenin yorulma özellikleri ile ilgili testler genellikle çok özel ve kontrollü koşullar altında gerçekleştirilir. Eğer analiz edilecek parça test koşullarından farklı ise aradaki farkları hesaplamak için “Fatigue strength factor” kullanılır. “Fatigue strength factor” (k_f) yorulma mukavemetini düşürdüğü için birden küçük olmalıdır. Bu faktör sadece gerilme genlikleri için kullanılır ve ortalama gerilmeleri etkilemez. Bu çalışmada $k_f = 1$ alınmıştır.

Yorulma ömrü analizinde 30 kN yayılı kuvvet profillere uygulanmıştır. Yükleme biçimi Şekil 7.52’de gösterilmektedir.



Şekil 7.52 Yorulma ömrü analizi yükleme biçimi

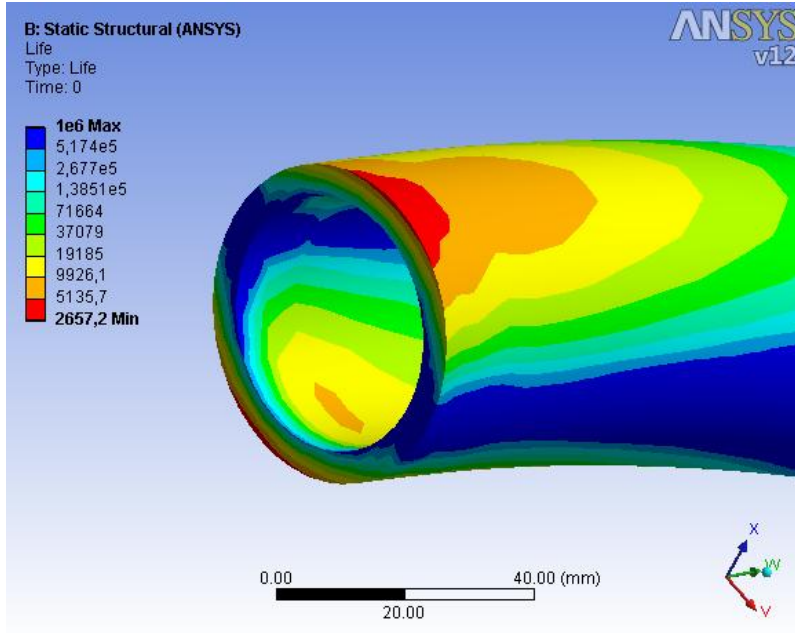
Yorulma ömrü analizi yapılan A,B,C ve düz profillerin kesit görünüşleri Şekil 7.53’de gösterilmiştir.



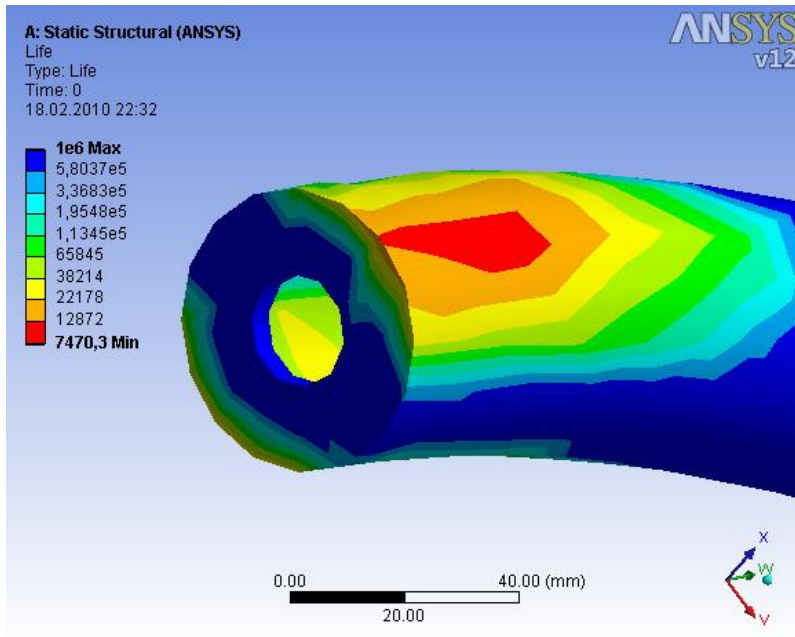
Şekil 7.53 Yorulma ömrü analizi yapılan profillerin kesit görünümü

7.2.2.1.Yorulma ömrü dağılımları

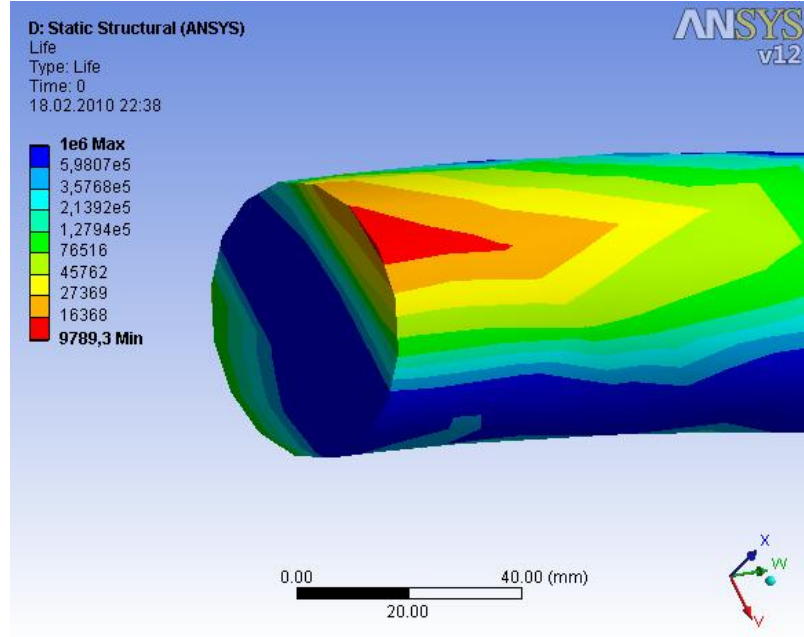
Analiz sonucunda elde edilen yorulma ömrü dağılımları Şekil 7.54, Şekil 7.55, Şekil 7.56, Şekil 7.57, Şekil 7.58, Şekil 7.59, Şekil 7.60 ve Şekil 7.61’de gösterilmiştir. Yorulma ömür dağılımlarında kritik bölgeler olan mesnet yüzeylerine odaklanılmıştır.



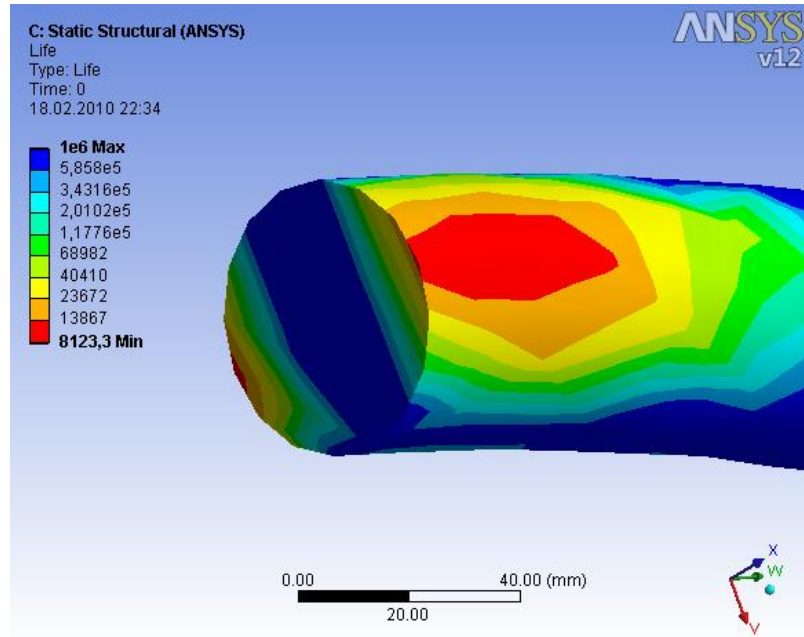
Şekil 7.54 Yayılı kuvvet ($R = -1$) altında düz profil yorulma ömrü dağılımı



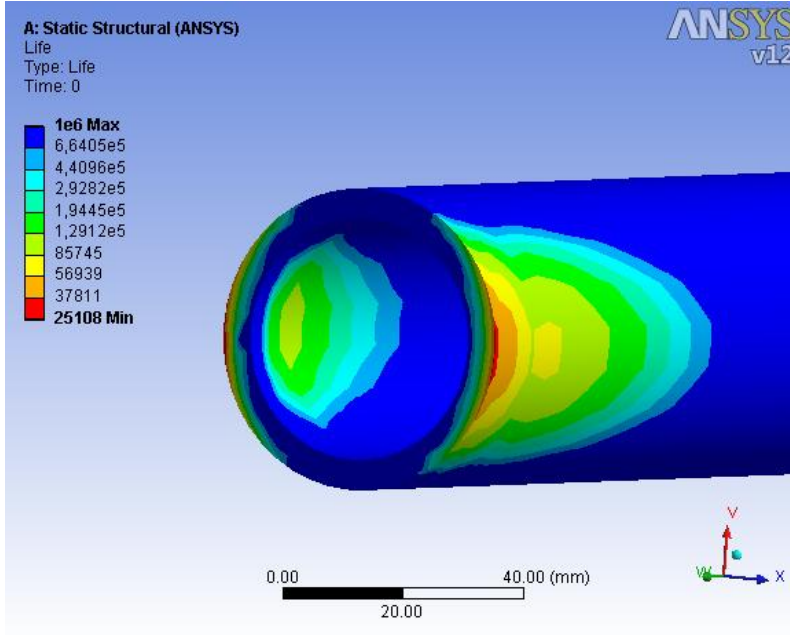
Şekil 7.55 Yayılı kuvvet ($R = -1$) altında Tip A hibrid profil yorulma ömrü dağılımı



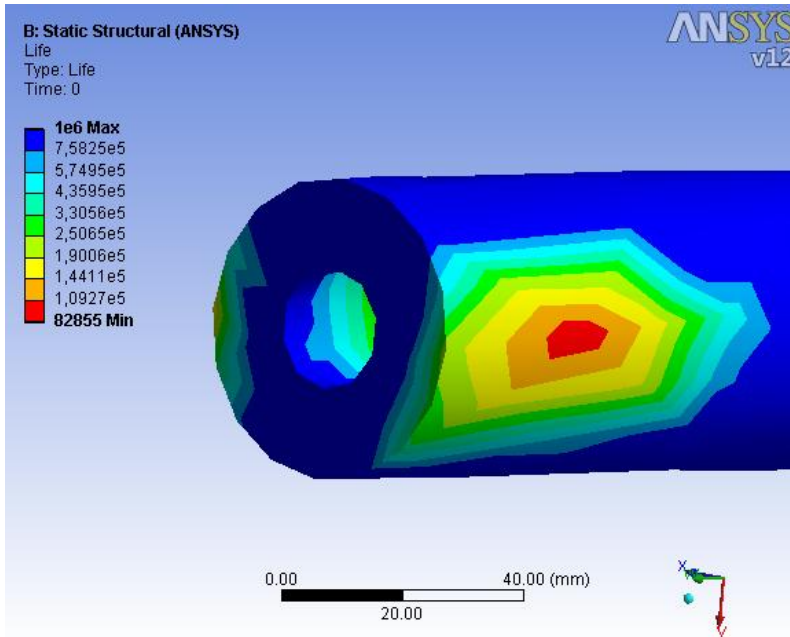
Şekil 7.56 Yayılı kuvvet ($R = -1$) altında Tip B hibrid profil yorulma ömrü dağılımı



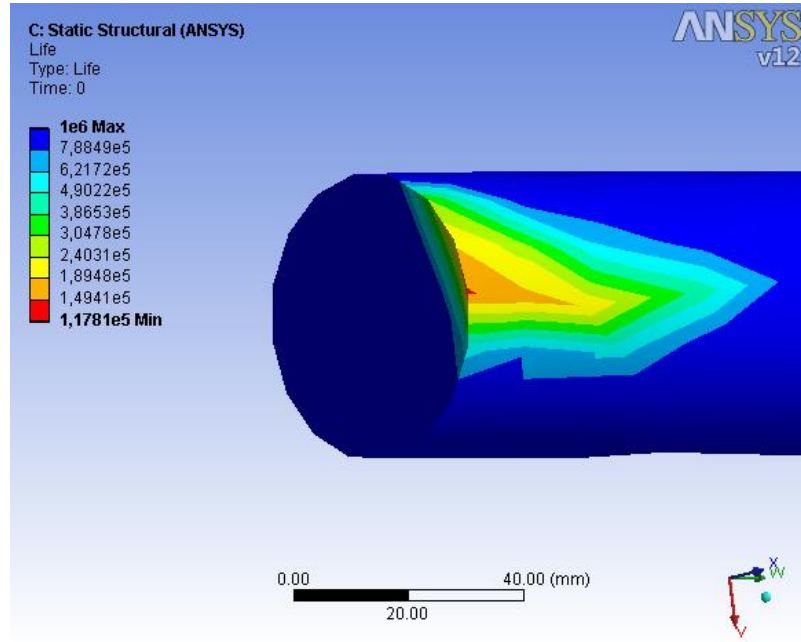
Şekil 7.57 Yayılı kuvvet ($R = -1$) altında Tip C hibrid profil yorulma ömrü dağılımı



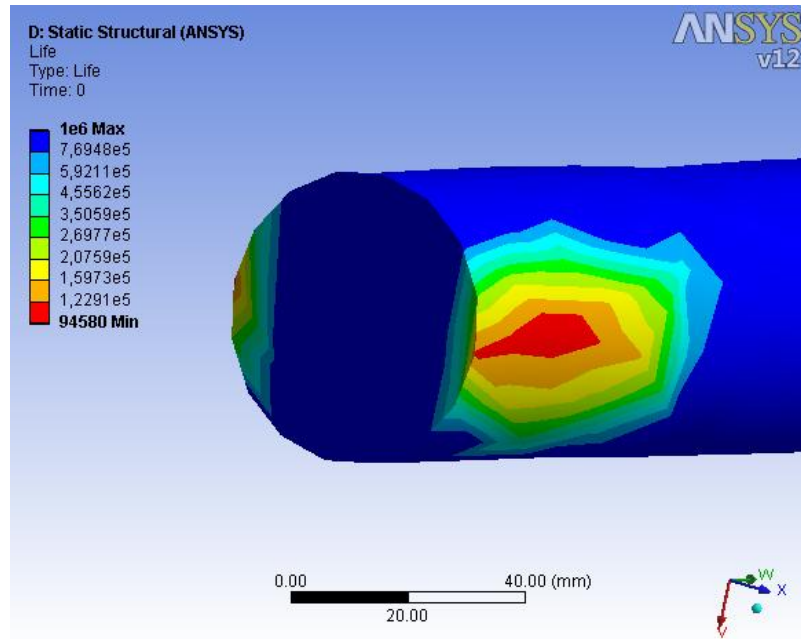
Şekil 7.58 Yayıllı kuvvet ($R = 0$) altında düz profil yorulma ömrü dağılımı



Şekil 7.59 Yayıllı kuvvet ($R = 0$) altında Tip A hibrid profil yorulma ömrü dağılımı



Şekil 7.60 Yayılı kuvvet ($R = 0$) altında Tip B hibrid profil yorulma ömrü dağılımı



Şekil 7.61 Yayılı kuvvet ($R = 0$) altında Tip C hibrid profil yorulma ömrü dağılımı

Çizelge 7.10 Yayılı kuvvet altında profillerin yorulma ömrü değerleri

Profil Tipi	($R = -1$) Minimum Yorulma Ömrü (Çevim sayısı)	($R = 0$) Minimum Yorulma Ömrü (Çevrim sayısı)
Düz	2657,2	25108
Tip A	7470,3	82855
Tip B	9789,3	117810
Tip C	8123,3	94580

8. SONUÇ

Bu çalışmada lazer bindirme kaynağı ile imal edilecek olan yeni tasarım enine perde takviyeli hibrid konstrüksiyon profilleri incelenmiştir. Aynı dış çap, et kalınlığı, uzunluğa ve malzeme özelliklerine sahip, sadece takviye perde formları farklı, üç tip hibrid konstrüksiyon profili ve düz boru profilin nümerik analizleri yapılarak mukayese edilmiştir. Bunun yanında lazerin tarihçesi, lazer ışını ile ilgili genel bilgiler, lazer imalat yöntemleri ve özellikle lazer kaynağı hakkında temel bilgiler anlatılmaktadır. Böylece hem konu hakkında Türkçe anlatımlara ulaşmak isteyenlere hem de konvansiyonel yöntem ve teknolojilerle karşılaştırma yapmak isteyenlere bir kaynak oluşturulmuştur.

Nümerik analizler sonlu elemanlar yöntemine dayalı paket programı olan Ansys 12'nin Workbench arayüzünde yapılmıştır. Analizlerde çok çeşitli yüklemeler uygulanmıştır ve statik yapısal analizin dışında, burkulma analizi ve yorulma analizinde yapılmıştır. Her analiz tipinde uygulanan yüklemeler tüm profiller için aynıdır.

Sonuçlar incelendiğinde yeni tasarımlar olan hibrid konstrüksiyon profillerinin, düz boru profillerin yerine, yapılarda kullanılmasının dayanım ve ömür açısından artılarının olduğu görülmüştür.

- Çekme kuvveti altında en düşük maksimum von-mises gerilme değeri düz profilde oluşmuştur. Hibrid profillerden Tip A profilin değeri diğer hibrid profillere göre daha düşüktür. Çekme yüklemesi altında düz profilin dayanımının daha iyi olduğu görülmüştür.
- Eğme kuvveti altında en düşük maksimum von-mises gerilme değeri Tip C ve Tip B hibrid profillerde oluşmuştur, değerler birbirine çok yakındır. Eğme yüklemesi altında hibrid profillerin dayanımının daha iyi olduğu görülmüştür.
- Burulma momenti altında maksimum von-mises gerilme değerleri birbirine çok yakındır. Burulma yüklemesi altında profillerin dayanımlarının hemen hemen eşit olduğu görülmüştür.

- Bileşke kuvvetler (çekme+eğme, eğme+burulma, çekme+eğme+burulma) altında en düşük maksimum von-mises gerilme değerleri hibrid profillerde oluşmuştur. Bileşke yüklemeler altında hibrid profillerin dayanımının daha iyi olduğu görülmüştür.
- Eğme kuvveti altında en düşük maksimum von-mises gerilme değeri Tip C ve Tip B hibrid profillerde oluşmuştur, değerler birbirine çok yakındır. Eğme yüklemesi altında hibrid profillerin dayanımının daha iyi olduğu görülmüştür.
- Tüm yüzeye uygulanan ve sadece destek noktalarına uygulanan yayılı kuvvetler altında değerler birbirine çok yakındır. En düşük von-mises gerilme değeri hibrid profillerde oluşmuştur. Yayılı yüklemeler altında hibrid profillerin dayanımının daha iyi olduğu görülmüştür.

Özellikle yanal yayılı kuvvet ve bileşke kuvvet yüklemelerinde büyük farklar ortaya çıktığından, bu tarz yüklemelere maruz kalan yapılarda kullanılmaları, yapının ömrünü arttıracak görülmüştür.

Üç tip olarak tasarlanan hibrid konstrüksiyon profillerin, yükleme biçimine göre avantajları farklı çıkmıştır. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde Tip C hibrid profil öne çıkmaktadır. Değerleri diğer tiplere göre daha iyidir, fakat kullanılacağı yapılarda maruz kalacağı zorlamalar değerlendirilerek, analiz sonuçları da dikkate alınarak Tip A ve Tip B hibrid profillerde tercih edilebilir.

Hazırlanan bu yüksek lisans çalışmasının sonuçlarının ışığında bundan sonraki adımda bu hibrid konstrüksiyon profillerinin numunelerinin imalatının yapılması ve bu numuneler ile mekanik testlerin yapılması yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Alabama Laser**, “Fiber Lasers”, <http://www.alspi.com/fiberlaser.htm> (Erişim tarihi: 22.11.2009)
- Allmen, M., Von, B.**, 1998, *Laser-Beam Interactions with Materials*, Second Edition, Springer, Verlag.
- ANSYS Inc.**, 1998, *ANSYS Theory Manual Release 5.4*, Swanson Analysis System, U.S.A.
- Aran, A.**, 1983, *Yorulma*, Tübitak Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü Malzeme Araştırma Bölümü.
- Askeland D. R.**, 1989, *The Science and Engineering of Materials*, Üçüncü Basım, M. Erdoğan, Çev., Nobel Yayın., Ankara.
- A State-of-the-Art Survey-The Auto/Steel Partnership Tailor Welded Blank Project Team**, June 2001, *Tailor Welded Blank Applications and Manufacturing*, 27p.
- Behler K., Beyer E., Schafer R.**, 1988, *Proceedings ICALEO*, 98s.
- Benli, S.**, 2004, *Kaynaklı Parçalarda Oluşan Artık Gerilmelerin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, DEU Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Benyounis, K.Y., Olabi A.G. and Hashmi M.S.J.**, 2005, *Effect of Laser Welding Parameters on The Heat Input and Weld-Bead Profile*, *Journal of Materials Processing Technology*, 164p.-165p., 978p.-985p.
- Brunner, L.**, 2003, *Pinpointing Future Laser Welding Markets*, The Fabricator.
- Charles, L. C.**, 2004, *Laser Cutting Guide for Manufacturing*, SME.
- Choi D., Lee S.H., Shin B.S., Whang K.H., Song Y.A., Park S.H., Jee H.S.**, 2001, *Development of a Direct Metal Freeform Fabrication Technique Using CO₂ Laser Welding and Milling Technology*, *Journal of Materials Technology*, 113p., 273p.-279p.
- Çelen, S.**, 2006, *Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantı Dayanımı ve Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Demirci, A. H.**, 2004, *Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi*, Alfa Basım Yayın Dağıtım, İstanbul, Türkiye.
- Duley, W.**, 1999, *Lazer Welding*, John Wiley&Sons, Inc,

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Durmuş, H.**, 2006, **CO₂** Lazer Kaynağıyla Birleştirilmiş Alüminyum Matriksli Kompozitlerin Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, CBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü
- Erdem E. ve Akkuş, N.**, 2009, Kaynak robotları için sensörler, *Gedik Holding*, 2, 56s.-59s.
- Gourd L.M.**, 1996, Kaynak teknolojisinin Esasları, Birsen Yayınevi.
- Heidelmann, G.**, 2009, “Lasers clean up”, http://www.industriallasers.com/display_article/351697/39/ARCHI/none/Feat/Lasers-clean-up, *Industrial Laser Solutions*, 24(2), (Erişim tarihi: 09.11.2009)
- Ion, J.C.**, 2005, Laser Processing Of Engineering Materials, Elsevier Butterworth-Heinemann, Great Britain, 44p., 57p.-67p., 71p, 91p.-92p., 178p.-179p., 395p.-396p.
- IPG Photonics**, “Fiber Lasers”, <http://www.ipgphotonics.com/> (Erişim tarihi: 10.01.2010)
- Jetter, J.**, 2002, “Laser surface cleaning”, http://www.industriallasers.com/display_article/149310/39/ARCHI/none/Feat/Laser-surfacecleaning?, *Industrial Laser Solutions*, 17(4), (Erişim tarihi: 09.11.2009)
- Kaluç, E.**, 2004, Kaynak Teknolojisi El Kitabı, TMMOB MMO yayınları, Özkan matbaacılık, Ankara, 319s-323s.
- Karaaslan, A.**, 2009, Laser ile Malzeme İşlemleri, Litaratür Yayınları, İstanbul, 39s.-41s., 77s.-86s., 171s.,-185s., 211s.-264s., 281s.-288s.
- Karakaş, Ö., Gülsöz, A.**, 2004, Makine Kostrüksiyon Elemanlarında İşletme Dayanımı, 10. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Denizli.
- Karaören, K.**, 1999, Lazer ile Kesim Parametrelerinin Tespiti, Yüksek Lisans Tezi (Basılmamış), İstanbul Teknik Üniversitesi, 9s.- 23s., İstanbul.
- Kern, M., Berger, P., Hügel, H.**, 2000, Magneto-Fluid Dynamic Control of Seam Quality in CO₂ Laser Beam Welding, Welding Research Supplement.
- Kocabıçak, Ü., Çalıskan, M.**, 2000, Makina Tasarımında Sonlu Elemanlar Yöntemi, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- König R., Otmanbölük N.**, 1998, CO₂ ve Nd-YAG Lazerleri ile Metal Kesme ve Kaynak İşlemleri, 2. Uluslararası Kaynak Teknolojisi Sempozyumu, 3-5 Haziran, İstanbul
- Kujanpää, V. and Salminen, A.**, 2005, “Diode laser welding of sheet metals”, http://www.industriallasers.com/display_article/226356/39/ARCHI/none/Feat/Diode-laserwelding-of-sheet-metals , *Industrial Laser Solutions*, 20(4), (Erişim tarihi:06.11.2009)
- Kurt, M.**, 2006, Plastik Malzemelerin Lazer İle Kesilme Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kwiatkowski J.J., Kwiatkowski A.J.**, 2003, Laser Weld Repair of Molds, Moldmaking Technology.
- LIA**, 2001, Handbook of Laser Materials Processing, Laser Institute of America, USA, 27p.-37p., 102p.-103p., 173p.-176p., 363p. 410p.
- Limpert J., Schreiber T. and Tünnermann A.**, “Fiber-based high power laser systems”, <http://www.rp-photonics.com/highpowerfiberlasers.html>, (Erişim tarihi: 06.11.2009)
- Mungan, M. C.**, 2006, Lazer İle Kesme Ve Endüstriyel Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Önçağ, A. Ç.**, 2009, Çelik Jant Üretiminde Lazer İmalat Yöntemlerinin Kullanımı ve Konvansiyonel Yöntemlerle Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Özcan M., Tarakcıoğlu N., Kahramanlı S.**, 2004, Saç Malzemelerin Lazer Kaynak Parametreleri, Selçuk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Teknik Online Dergi, Cilt 3, Sayı 1.
- Özden, H., Gürsel, T.**, 2005, Hasar Tespit Analizlerinde İşletme Dayanımı, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye.
- Özden, H.**, 2007a, Sanayide kullanılan yüksek güçlü lazer makinaları ve lazer imalat yöntemleri, *Makina Tek.*, 124, 152s-160s.
- Özden, H.**, 2007b, Investigating fiber lasers for shipbuilding and marine construction welding journal, *Welding Journal*, 86 (5), 26p.-28p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Özden, H.**, 2009c, Otomotiv sektöründe lazerli multiüretim, yöntemleri, lazerli imalat, ölçme ve muayene, 11. Otomotiv Sempozyumu, TÜYAP-Bursa
- Özmen, D.**, 2007, Yarı Otomatik Av Tüfeği Mekanizmasının Yorulma Dayanımı Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Rofin**, 2003, Introduction to Industrial Laser Materials Processing,
- Rp-Photonics**, “Fiber Lasers”, <http://www.rp-photonics.com/fiberlasers.html> (Erişim tarihi: 06.11.2009)
- Schubert, E., Klassen, M., Zerner, I., Walz, C. and Sepold, G.**, 2001, Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry, Journal of Materials Processing Technology, Volume 115, Issue 1, Pages 2-8.
- Silfvast, W. T.**, 2004, Laser Fundamentals, Second Edition, Cambridge University Press, 1p.-2p.
- SPI Laser**, “Fiber Lasers For Manufacturing Success” <http://www.spilasers.com/devicecomponentmanufacturers.aspx> (Erişim tarihi: 08.11.2009)
- Tarakçıoğlu, N. ve Özcan, M.**, 2004, Lazerler ve Materyal İşleme Uygulamaları, Nöber Basım evi, Atlas Yayın Dağıtım LTD. ŞTİ., İstanbul, 7s.-28s., 41s.-50s., 103s.-113s.
- TLF**, “Basic Installation and Use Technical Information Laser Processing”, 2000, TRUMPF GmbH+Co. KG.
- Tokdemir, M.**, 2007, Lazer Kaynağı İle Birleştirilmiş Demir Esaslı T/M Malzemelerin Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, CBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Uzun, M.**, 2002, Yorulma Çatlak İlerlemesi ve Çatlak Davranışının Nümerik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye.
- Walz C.** 2003, Aftt/Sme Technical Forum, Joining of Aluminum August 6, Dearborn, Mi.
- Wikipedia**, “Bamboo”, <http://en.wikipedia.org/wiki/Bamboo>, (Erişim tarihi: 15.11.2009).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Wirth P.**, 2004, Introduction to Industrial Laser Materials Processing, Hamburg, Rofin.
- Xie, J.**, December 2002, Weld morphology and thermal modeling in dual-beam laser welding, *Welding Journal*, 283p.-290p.
- Yavuz H., Çam G.**, 2005, Lazer–Ark Hibrit Kaynak Yöntemi, Mühendis ve Makine Dergisi.

ÖZGEÇMİŞ

Ömer Gökmen VATANDAŞ, 1983 yılında Elazığ'da doğdu. İlkokulu Elazığ'da Bahçelievler ilköğretim okulunda tamamladı. Ortaokul ve Lise eğitimini İzmir'de Bornova Anadolu Lisesi İngilizce bölümünde tamamladı ve Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. Lisans eğitiminden 2007 yılı şubat ayında mezun oldu. 2 seneye yakın bir süre özel sektörde görev aldı. Askerlik görevini 2009 yılı Eylül ayında tamamladı. Aynı zamanda 2007 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon-İmalat Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Halen yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.