



**KOMPOZİT-ALÜMİNYUM HİBRİT YAPININ  
LAZER KESİM TEZGÂHI Y-EKSENİNE  
UYGULANMASI**

**OKTAY ÇELENK**



T.C  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOMPOZİT-ALÜMİNYUM HİBRİT YAPININ  
LAZER KESİM TEZGÂHI Y-EKSENİNE  
UYGULANMASI**

**Oktay ÇELENK**

Doç. Dr. Ali DURMUŞ  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

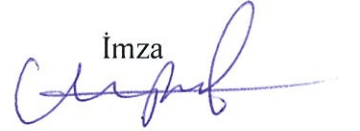
BURSA - 2018  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Oktaý ÇELENK tarafından hazırlanan “KOMPOZİT-ALÜMİNYUM HİBRİT YAPININ LAZER KESİM TEZGÂHI Y-EKSENİNE UYGULANMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Ali DURMUŞ

**Başkan:** Doç. Dr. Ali DURMUŞ  
Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza  


**Üye:** Doç. Dr. Kadir ÇAVDAR  
Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza  


**Üye:** Prof. Dr. Taner YILMAZ  
Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza  


Yukarıdaki sonucu onaylarım



Prof. Dr. Ali BAYRAM  
Enstitü Müdürü  
18.1.5/2018

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullandığım verilerde herhangi bir tahribat yapmadığımı,
- ve bu tez herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**.../.../2018**

**Oktay ÇELENK**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi  
KOMPOZİT-ALÜMİNYUM HİBRİT YAPININ  
LAZER KESİM TEZGÂHI Y-EKSENİNE  
UYGULANMASI

**Oktay ÇELENK**

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman : Doç. Dr. Ali DURMUŞ**

Bu çalışmada, sac işleme ve kesim üretim sanayiinde kullanılan lazer kesim tezgâhlarındaki Y-ekseninin kompozit-alüminyum hibrit yapı kullanılarak üretilmesiyle mevcut duruma göre ağırlığının azaltılması amaçlanmıştır. Bilgisayar destekli tasarım ve analiz programları yardımıyla kompozit-alüminyum hibrit köprünün hareket analizleri yapıp mevcut durumda kullanılan kafes yapıdaki Y-eksen ile karşılaştırılarak hız, ivme, ivmelenme hızı performansları ve özellikleri test edilmiştir. Metalik malzemedan üretilen kafes yapıdaki Y-eksen sisteminin gerilme ve hareket analizleri, kesim performans testleri yapılarak mevcut durum analiz edilmiştir. Polimer matriksli kompozit-alüminyum hibrit malzemedan prortip olarak Y-eksen üretilmiş, takviye ve matriks malzemelerinin seçimi ve numune testleri yapılmıştır. Sonuç olarak mevcut kafes yapıdaki Y-eksen ile prototip üretilen kompozit-alüminyum hibrit yapıdaki Y-eksen sistemleri sehim, kritik frekanslar, ivmelenme, hız, talaşlı imalat hassasiyeti ve kesim performansları açısından karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Lazer kesim makinesi, Y-eksen, kompozit-alüminyum hibrit köprü, kompozit hareketli eksen, hareket analizleri, performans testleri.

**2018, XII + 111 sayfa.**

## ABSTRACT

MSc Thesis

### APPLICATION OF COMPOSITE-ALUMINUM HYBRID STRUCTURE TO LASER CUTTING MACHINES Y-AXIS

**Oktay ÇELENK**

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Assoc. Prof. Dr. Ali DURMUŞ

In this study, laser cutting machines used that in sheet metal cutting and cutting industry which produced using the composite-aluminum hybrid structure of the Y-axis that according to the current situation weightiness decrease is aimed. Computer aided design and analysis, current situation using of cage with Y-axis is compared that to performance was tested. Produced using the metallic material in cage structure Y-axis strain and motion analysis of system that performance tests were conducted to analyze the current situation. Prototype Y-axis has produced from polymer matrix composite-aluminum hybrid structure material, choice of reinforcement and matrix materials for Y-axis specimen have been tested. Consequently current situation using of cage with Y-axis is that to prototype Y-axis systems in prototype-produced composite-aluminum hybrid structure for deflection, critical frequency, acceleration, velocity, machining sensibility and cutting performances were compared.

**Key Words:** Laser cutting machine, Y-axis, composite-aluminum hybrid bridge, composite moving axis, motion analysis, performance tests.

**2018, XII + 111 pages**

## TEŞEKKÜR

Kendisiyle alıŐmaktan her zaman keyif aldığım, tez konusunun belirlenmesi ve tezin oluŐması aşamasında çok değerli bilgi ve zamanını benimle paylaŐan saygıdeğer hocam ve danıŐmanım Doç. Dr. Ali DURMUŞ'a teşekkür ederim. Ayrıca değerli fikirlerinden dolayı Doç. Dr. Kadir ÇAVDAR' a teşekkür ederim.

Tez çalıŐmalarımnda destek olan ve prototip çalışma sahasını bana aan Durmazlar Ar-Ge Merkezine, kompozit plakların üretimine destek veren Durfoam Insulation & Packaging Őirketine, Durmazlar Ar-Ge Merkezi direktörü Hüseyin BÜLBÜL'e, Durmazlar Makine Genel Müdürü Altan ARDA'ya ve analiz çalışmalarında yardımcı olan Ar-Ge alıŐma arkadaşlarıma teŐekkürlerimi sunarım.

Son olarak tez çalıŐmalarım boyunca her koşulda yanımda olan, sabrını ve desteğini esirgemeyen aileme ve iş arkadaşlarıma sonsuz teŐekkürlerimi sunuyorum.

Oktay ÇELENK

.../.../2018

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1. Metodik Konstrüksiyon Yaklaşımı .....	14
3.2. Sonlu Elemanlar Metodu.....	16
3.3. Hata Türleri ve Etkileri Analizi FMEA.....	17
3.4. Tasarımında Makine Elemanları ve Konstrüksiyon.....	21
3.5. Lazer Kesim Tezgâhı Bileşenlerinin İncelenmesi.....	22
3.6. Kullanılan Alt Bileşenlerinin İncelenmesi .....	25
3.6.1. Lazer Güç Kaynağı Bileşeni .....	25
3.6.2. Lazer Kesme Kafası Bileşeni .....	26
3.6.3. Toz Toplama Ünitesi Bileşeni.....	27
3.6.4. Soğutucu Bileşeni.....	27
3.6.5. Makina Kaporta Bileşeni.....	28
3.6.6. Kontrol Ünitesi Bileşeni.....	28
3.6.7. Mekik Tabla Bileşeni .....	29
3.7. Y-Eksen Tasarımı.....	30
3.7.1. Y-Eksen Tanıtımı .....	30
3.7.2. FMEA.....	31
3.7.3. Y-Eksen Sistem Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Analizi .....	31
3.7.4. Y-Eksen Alt Bileşenleri Hesaplaması ve Seçimi .....	32
3.7.5. Hesaplamalar .....	38
3.7.6. Kompozit Y-Eksen Köprüsünün Tasarımı.....	42
3.8. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Nümerik Analizler .....	48
3.9. Sonlu Elemanlar Analizi ve Nümerik Çözüm.....	49
3.9.1. Kompozit Y-Eksen Statik Analizi.....	56
3.9.2. Kafes Yapıdaki Y-Eksen Statik Analizi.....	57
3.9.3. Kompozit Y-Eksen Modal Analizi.....	58
3.9.4. Kafes Yapıdaki Y-Eksen Modal Analizi.....	60
3.9.5. Dinamik Analiz Modeli Oluşturma.....	60
3.9.6. Hareket Girdilerinin Tanımlanması .....	61
3.9.7. Analizin Çözümü.....	64
3.9.8. Kompozit Y-Eksen Köprüsü Dinamik Analizi .....	64
3.9.9. Kafes Yapıdaki Y-Eksen Dinamik Analizi .....	65
3.10. Kompozit Y-Eksen Köprüsü İmalatı.....	66
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	70
4.1. Y-Eksen Tasarım Sonuçları.....	70
4.2. Hız, İvme ve Diğer Kinematik Parametre Sonuçları.....	71



4.3.	Statik Analiz Sonuçları.....	74
4.4.	Maksimum Yükte Statik Analiz Sonuçları.....	76
4.5.	Modal Analiz Sonuçları .....	80
4.6.	Dinamik Karakteristik Sonuçları.....	84
4.7.	Dinamik Analiz Sonuçları.....	89
4.8.	Nümerik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	92
4.9.	Kompozit Y-Eksen Boyutsal Ölçüm Sonuçları .....	93
4.10.	Kompozit Y-Eksen Köprü Kütle Karılaştırma Sonuçları .....	98
4.11.	Deneme Kesim Çalışmaları Sonuçları .....	98
5.	SONUÇ.....	106
	KAYNAKLAR.....	108
	ÖZGEÇMİŞ .....	111



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
X	Makine X yönündeki hareket eksenini
Y	Makine Y yönündeki hareket eksenini
Z	Makine Z yönündeki hareket eksenini
[k]	Elemanların rijitlik matrisi
[K]	Global rijitlik matrisi
{F}	Global yük vektörü
{U}	Bilinmeyen deplasman vektörü
2D	İki boyut koordinat sistemi (X, Y)
F150	Lazer merceği odak mesafesi
A	Risk değerlendirme rakamı
B	Risk değerlendirme rakamı
E	Risk değerlendirme rakamı
S	Severety (hata şiddeti)
O	Occurence (hatanın oluşumu)
D	Detection (hatanın tespiti)
$\mu$	Sürtünme katsayısı
m	Kütle
d	Kasnak çapı
$M_{sür}$	Sürtünme momenti
$F_{sür}$	Sürtünmeyi etkileyen ek kuvvet
$\alpha$	Eğim açısı
g	Yer çekim ivmesi
$M_{ağır}$	Ağırlık momenti
M	Ana moment
$M_{işleme}$	Gerekli moment
$F_{işleme}$	Gerekli itme kuvveti

$a$	Çalışma ivmesi
$M_{\text{motor}}$	Servo motor momentı
$n$	Kasnağın devri
$V$	İlerleme hızı
$J_{\text{lin}}$	Kütlenin ataleti
$r$	Yarı çap
$\omega$	Dairesel hız
$V_m$	Kafes yapıdaki Y-eksen hızı
$V_k$	Kompozit yapıdaki Y-eksen hızı
$a_m$	Kafes yapıdaki Y-eksen ivmesi
$a_k$	Kompozit yapıdaki Y-eksen ivmesi
$s$	Sac kalınlığı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayar Sayımlı Gösterim)
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis (Hata Türleri ve Etkileri Analizi)
VDA	Tasarım FMEA sistemi, Donanım ve Yazılım
RPN	Risk Öncelik Numarası
RPZ	Risk Rakamı
HMI	İnsan Makine Ara yüzü

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Flyoptik laser kesim makineleri .....	4
Şekil 2.2. Eksen tahrik sistemleri.....	4
Şekil 2.3. Hibrit laser kesim makineleri.....	5
Şekil 2.4. Büyük ebatlı laser kesim makineleri.....	5
Şekil 2.5. Fiber laser tube cut makinesi (Durma firmasının tube cut makinesi) .....	5
Şekil 2.6. Fiber laser tube cut makinesi (Trumpf firmasının tube cut makinesi).....	6
Şekil 2.7. 3D sac parça laser kesim sistemleri .....	6
Şekil 2.8. Kombine fiber laser kesim makinesi (Yassı sac ve boru-profil kesebilen) .....	6
Şekil 2.9. 3D kaynak fiber laser makinesi (Trumpf firmasının fiber laser makinesi) .....	7
Şekil 3.1. Konstrüksiyonda işlem adımları (Babalık 1997).....	15
Şekil 3.2. Hata türleri ve etkileri analizi (Anonim 2011) .....	17
Şekil 3.3. Hata maliyet gelişmesi (Anonim 2011).....	18
Şekil 3.4. HD-F/L Lazer ana parçaları (Durma).....	24
Şekil 3.5. IPG Fiber Rezanatör (Anonim 2017) .....	25
Şekil 3.6. Laser kafası (Precitec) .....	26
Şekil 3.7. Laser toz toplama ünitesi (Vanterm Filtre).....	27
Şekil 3.8. Lazer soğutucu (IPG Soğutucu) .....	27
Şekil 3.9. Lazer ana kaporta (Durma marka).....	28
Şekil 3.10. Lazer kontrol ünitesi (Durma marka) .....	28
Şekil 3.11. Lazer mekik tabla.....	29
Şekil 3.12. Montajı tamamlanmış kompozit Y-eksen.....	30
Şekil 3.13. Mevcut durumda lazer kesim tezgâhının Y-eksen köprüsü.....	31
Şekil 3.14. Kablo kanalları sistemi örneği (Y-eksen köprüsü) .....	32
Şekil 3.15. Z-eksen gurubu .....	33
Şekil 3.16. Kompozit Y-eksen, X-eksen yönündeki servo motor seçimi .....	34
Şekil 3.17. Z-Eksenin, Y-eksen yönündeki servo motor seçimi.....	35
Şekil 3.18. Kompozit Y-eksen, X-eksen servo motor tahrik sistemi gösterimi.....	36
Şekil 3.19. Kompozit Y-eksen, Z-eksen servo motor tahrik sistemi .....	37
Şekil 3.20. Kompozit Y-eksen şematik gösterimi .....	38
Şekil 3.21. Servo motor – planet redüktör mekanizması hareket iletim sistemi .....	40
Şekil 3.22. Kompozit ara malzemesi gösterimi (Cam elyafı, reçine ve köpük) .....	42
Şekil 3.23. Alüminyumdan üretilmiş olan sac ve lama konstrüksiyonu.....	45
Şekil 3.24. Kompozit malzeme konumlandırılması ve boyutsal gösterimi.....	46
Şekil 3.25. Kompozit T yatay bağlantı plakaları .....	47
Şekil 3.26. Kompozit Y-eksen kaynaklı konstrüksiyonu .....	47
Şekil 3.27. Lazer kesim makinesi hareket eksenleri .....	48
Şekil 3.28. Malzeme özellikleri ve malzeme tanımlaması.....	50
Şekil 3.29. Mesh seçim parametreleri.....	52
Şekil 3.30. Kompozit Y-eksen sınır koşulları .....	53
Şekil 3.31. Kafes yapıdaki Y-eksen sınır koşulları.....	53
Şekil 3.32. Kompozit Y-eksende lazer kesim kafası mass point gösterimi .....	54
Şekil 3.33. Kompozit Y-eksende X-eksen kablo kanalı mass point gösterimi.....	55
Şekil 3.34. Kompozit Y-eksende Y-eksen kablo kanalı mass point gösterimi.....	55
Şekil 3.35. Kompozit Y-eksen köprüsünün statik analiz sonucu .....	56

Şekil 3.36. Kompozit Y-eksen köprüsünün X-eksen yönünde statik analiz sonucu .....	56
Şekil 3.37. Kompozit Y-eksen köprüsünün Z-eksen yönünde statik analiz sonucu .....	57
Şekil 3.38. Kafes yapıdaki Y-eksenin statik analiz sonucu .....	57
Şekil 3.39. Kafes yapıdaki Y-eksenin X-eksen yönünde statik analiz sonucu .....	58
Şekil 3.40. Kafes yapıdaki Y-eksenin Z-eksen yönünde statik analiz sonucu .....	58
Şekil 3.41. Kompozit Y-eksen köprüsünün modal analiz sonucu .....	59
Şekil 3.42. Kafes yapıdaki Y-eksen modal analiz sonucu .....	60
Şekil 3.43. Linear dinamik ortam ayarları .....	60
Şekil 3.44. Lazer kesim makinesin eksen koordinat gösterimi .....	61
Şekil 3.45. Lazer kesim tezgâhın gerçekleştireceği konum girdisi .....	62
Şekil 3.46. X - eksen boyunca zamana bağlı konum girdisi .....	63
Şekil 3.47. Y - eksen boyunca zamana bağlı konum girdisi .....	63
Şekil 3.48. Esnek gövde çözüm aralığı .....	64
Şekil 3.49. Kompozit Y-eksen köprüsünün dinamik analiz sonucu .....	65
Şekil 3.50. Kafes yapıdaki Y-eksen köprüsünün dinamik analiz sonucu .....	65
Şekil 3.51. Kompozit Y-eksen köprüsünün genel görünümü .....	66
Şekil 3.52. Kompozit plaka örneği .....	67
Şekil 3.53. Kompozit plaka demeti .....	67
Şekil 3.54. Epoksi malzemeden T-şeklinde, X-eksen bağlantı parçası .....	68
Şekil 3.55. Alüminyum destek parçaların kaynatılması .....	69
Şekil 3.56. Kompozit Y – eksen talaşlı imalatı .....	69
Şekil 4.1. Y-eksen köprüsünün yataklaması, lineer kızaklamaların tasarımı .....	70
Şekil 4.2. Dişli - kramayer mekanizmalarının tasarımı .....	70
Şekil 4.3. Kompozit Y-eksen, X-eksen yönündeki hız-ivme-zaman grafiği .....	71
Şekil 4.4. Kompozit Y-eksen, X-eksen yönündeki hız-konum-zaman grafiği .....	71
Şekil 4.5. Kompozit Y-eksen, X-eksen yönündeki moment-devir-zaman grafiği .....	72
Şekil 4.6. Kompozit Y-eksen, Z-eksenin Y-eksendeki hız-ivme-zaman grafiği .....	72
Şekil 4.7. Kompozit Y-eksen, Z-eksenin Y-eksendeki hız-konum grafiği .....	73
Şekil 4.8. Kompozit Y-eksen, Z-eksenin Y-eksendeki moment-devir-zaman grafiği .....	73
Şekil 4.9. Kompozit Y-eksen köprüsü bileşilenlerin oluşturduğu sehim .....	74
Şekil 4.10. Kompozit Y-eksen köprüsü bileşilenlerin oluşturduğu gerilme değeri .....	74
Şekil 4.11. Kafes yapıdaki Y-eksen bileşilenlerin oluşturduğu sehim .....	75
Şekil 4.12. Kafes yapıdaki Y-eksen bileşilenlerin oluşturduğu gerilme .....	75
Şekil 4.13. Kompozit Y-eksen köprüsünün X-yönündeki sehim değeri .....	76
Şekil 4.14. Kompozit Y-eksen köprüsünün Z-yönündeki sehim değeri .....	76
Şekil 4.15. Kafes yapıdaki Y-eksenin X-yönündeki sehim değeri .....	77
Şekil 4.16. Kafes yapıda Y-eksenin Z-yönündeki sehim değeri .....	77
Şekil 4.17. Kompozit Y-eksen köprüsünün X-eksende meydana gelen gerilme .....	78
Şekil 4.18. Kompozit Y-eksen köprüsünün Z-eksende meydana gelen gerilme .....	78
Şekil 4.19. Kafes yapıdaki Y-eksenin X-eksende meydana gelen gerilme .....	79
Şekil 4.20. Kafes yapıdaki Y-eksenin Z-eksende meydana gelen gerilme .....	79
Şekil 4.21. Mod-1 frekansı: 35 Hz .....	80
Şekil 4.22. Mod-2 frekansı: 75,7 Hz .....	81
Şekil 4.23. Mod-2 frekansı: 117 Hz .....	81
Şekil 4.24. Mod-1 frekansı: 73 Hz .....	82
Şekil 4.25. Mod-2 frekansı: 151,7 Hz .....	83
Şekil 4.26. Mod-3 frekansı: 112 Hz .....	83
Şekil 4.27. Kafes yapıdaki Y-eksenin, X ve Y yönlerindeki form deviasyonları .....	84
Şekil 4.28. Kompozit yapıdaki Y-eksenin, X ve Y yönlerindeki form deviasyonları .....	85

Şekil 4.29. Kafes yapıdaki Y-eksen ile kompozit Y-eksenin, X-eksenindeki hız değişiminin ( $V_m$ ) - ( $V_k$ ) karşılaştırılması .....	86
Şekil 4.30. Kafes yapıdaki Y-eksen ile kompozit Y-eksenin, Y-eksenindeki hız değişiminin ( $V_m$ ) - ( $V_k$ ) karşılaştırılması .....	86
Şekil 4.31. Kafes yapıdaki Y-eksen ile kompozit Y-eksenin, X-eksendeki ivme değişiminin ( $a_m$ ) - ( $a_k$ ) karşılaştırılması.....	87
Şekil 4.32. Kafes yapıdaki Y-eksen ile kompozit Y-eksenin, Y-eksenindeki ivme değişiminin ( $a_m$ ) - ( $a_k$ ) karşılaştırılması.....	88
Şekil 4.33. Kompozit Y-eksen köprüsünün dinamik titreşim hız değeri.....	89
Şekil 4.34. Kafes yapıdaki Y-eksenin dinamik titreşim hız değeri.....	89
Şekil 4.35. Kompozit Y-eksen köprüsünün dinamik titreşim sehimi analiz sonucu .....	90
Şekil 4.36. Kafes yapıdaki Y-eksenin dinamik titreşim sehimi analiz sonucu .....	90
Şekil 4.37. Kompozit Y-eksen köprüsünün dinamik titreşim gerilme analiz sonucu.....	91
Şekil 4.38. Kafes yapıdaki Y-eksenin dinamik titreşim gerilme analiz sonucu .....	91
Şekil 4.39. Kompozit Y-eksen sehimi ölçümü .....	94
Şekil 4.40. Kompozit Y-eksenin makinedeki montajı.....	95
Şekil 4.41. $X_1$ -eksen adım hatası değişim grafiği eksen değerleri.....	96
Şekil 4.42. $X_2$ -eksen adım hatası değişim grafiği eksen değerleri.....	96
Şekil 4.43. Y-eksen adım hatası değişim grafiği eksen değerleri .....	96
Şekil 4.44. Lazer kesim tezgâhında dairesel kesim örneği .....	98
Şekil 4.45. Deney numunesi 1 (150 x 150 mm) .....	99
Şekil 4.46. Deney numunesi-1, dört farklı bölgede kesilmiş deney örnekleri.....	100
Şekil 4.47. Deney numunesi-1 in kesim örneği .....	101
Şekil 4.48. Deney numunesi-2 (120 x 120 mm) .....	103
Şekil 4.49. Deney numunesi-3 nin kesim örneği .....	103
Şekil 4.50. Deney Numunesi-2 nin keskin köşeler kesimi kıyaslaması .....	104
Şekil 4.51. Deney Numunesi-2 nin kare kesim kıyaslaması.....	104

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Fiber lazer kesim makinesi hata türü ve etkileri proses FMEA analizi (Durma marka).....	20
Çizelge 3.2. HD-F/L Lazer ana parçaları listesi (Durma).....	24
Çizelge 3.3. Planet redüktör teknik verileri (Anonim 2014) .....	41
Çizelge 3.4. Cam elyafı cinsleri (Kut 2016) .....	43
Çizelge 3.5. Takviye türlerinin mekanik özellikleri (Kut 2016).....	44
Çizelge 3.6. Elyaf malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Kut 2016).....	44
Çizelge 3.7. Alüminyum 6063-T6 (ANSI38) serisi mekanik özellikleri.....	46
Çizelge 3.8. Kompozit ve GRP malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri .....	51
Çizelge 3.9. Epoxy Malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri .....	51
Çizelge 3.10. Sonlu elemanlar modeli eleman ve düğüm noktası sayıları .....	52
Çizelge 4.1. Kompozit Y-eksen mod – frekans tablosu.....	80
Çizelge 4.2. Mevcut yapıdaki Y-eksen mod – frekans tablosu.....	82
Çizelge 4.3. Yapı modlarının karşılaştırılması .....	92
Çizelge 4.4. Delik kesiminde oluşan sehimlerin, hız ve ivme mukayese çizelgesi .....	93
Çizelge 4.5. Talaşlı imalattaki konum sapmaları.....	93
Çizelge 4.6. 200 kg yük altında sehim ölçüm değerleri.....	94
Çizelge 4.7. Maliyet karşılaştırması .....	95
Çizelge 4.8. Y-eksen ağırlıkları karşılaştırılması.....	98
Çizelge 4.9. Test parametreleri .....	99
Çizelge 4.10. ø10 mm kesimlerde dairesellik farkları ölçümleri.....	101
Çizelge 4.11. Deney numunesi dairesellik sapma sonuçları.....	102
Çizelge 4.12. Tüm verilerin sonuç tablosu .....	105



## 1. GİRİŞ

Günümüzde endüstrinin neredeyse her alanında CNC kontrollü makineler kullanılmaktadır. Bu makinelerin başlıcaları olarak talaşlı imalat teknolojileri, sac işleme teknolojileri ve doğrudan üretim yapan teknolojiler (döküm, lazer printing vb.) alanındaki makineler gösterebilir. Sac işleme teknolojilerinde lazer kesim makineleri önemli bir yer tutmaktadır. Bu makineler, yassı metal levaların kesilip istenilen şekillerin CNC kontrolü olarak üretilmesi için kullanılmaktadırlar.

Lazer kesim makinesi, yassı düz sacların kesiminde kullanılan yüksek hızlı 2D hareket ederek kesim yapan tezgâhlardır. Lazer kesim tezgâhları, lazer ışınını üreten güç ünitelerine göre en temel seviyede fiber lazer ve CO<sub>2</sub> lazer olarak ayrılmaktadır. Fiber lazerler özellikle CO<sub>2</sub> lazerlere göre daha hızlı kesimleri ve enerji verimlilikleri ile ön plana çıkmaktadır. Lazer kesim makinesi ana gövde, taşıyıcı eksenler ve köprü kaynaklı konstrüksiyondan oluşmaktadır. Kaynak sonrası ana gövde, taşıyıcı eksenler ve köprü titreşim ile gerilim giderme işlemine tabi tutulmaktadır. Bu sayede gövdenin yapısından ya da kaynaktan meydana gelebilecek yüzey hataları ve gerilmeler ortadan kaldırılmıştır.

Lazer kesim makineleri 6 ana gruptan oluşmaktadır. Bu guruplardan en önemlisi Y-eksen grubu olarak söylenebilir. Y-eksen köprüsü lazer kesim makinelerinin kesim hassasiyetine, kesim hızlarına, ivmeli eksen hareketlerine ve makinenin titreşimine doğrudan etkilidir. Y-eksen köprüsünde yapılacak olan geliştirmeler ve iyileştirmeler lazer kesim makinesinin performansına çok büyük bir katkı sağlamaktadır.

Araştırma ve geliştirmeye faaliyetlerinin neticesi sonucunda ortaya çıkan sonuç olarak bir sistem veya bir parçada yapılan %10'luk bir iyileştirme geliştirme faaliyeti (hafifletme, tasarım değişikliği, yeni bir tasarım vb.) ilgili makine ya da çözümde %40' lık bir kazanç (çalışma performansında, dayanımda, hassasiyette vb. kazançlar) sağlayacaktır. Yapılan iyileştirmeler hız, performans ve hassasiyette artış meydana getirecektir. Dolayısıyla sürdürülebilir bir iyileştirme elde edebilmek için çalışan tüm parçalar, guruplar ve sistemler üzerinde sürekli bir araştırma ve geliştirme faaliyeti yapılmalıdır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında fiber lazer kesim tezgâhında hali hazırdaki kafes yapıdaki Y-eksenin durumu incelenmiştir. Bu kapsamda kafes yapıdaki Y-eksen üzerinde statik, dinamik, titreşim ve modal analizler yapılmıştır.

Seri makine üzerinde çalışan kafes yapıdaki Y-eksen üzerinde yapılan bu analizler ile mevcut durumun tespiti yapılmıştır. Benzer şekilde kompozit Y-eksen için de statik, dinamik, titreşim ve modal analizler yapılmıştır. Her iki Y-eksen için ortaya çıkan analiz sonuçları karşılaştırılmış, ve neticesinde kompozit Y-eksenin çıkabileceği maksimum hız ve ivme değerleri tespit edilmiştir.

Analiz çalışmalarının sonucunda kompozit Y-eksen üretilmiştir. Üretilen kompozit Y-eksenin üretim aşamasındaki süreçler incelenmiş, üretimi esnasında ortaya çıkan işleme hassasiyetleri ve yüzey pürüzlülükleri karşılaştırılmıştır. Lazer kesim makinesinde kullanılan kompozit Y-eksenin, çalışma ve kesim esnasındaki iş parçasına olan etkileri incelenmiş ve kıyaslamalı olarak sonuçlar gösterilmiştir.

Lazer kesim makinelerinin CO<sub>2</sub> lazer çözümünde, lazer ışını için tamamen klimatize edilmiş ve herhangi bir toz partikülünü içermemesi gereken bir ışın yolu ihtiyacı bulunmaktadır. Söz konusu ışın yolu oldukça hassas ve bakım gerektiren karışık bir sistem olduğundan yüksek teknoloji ürünü olan optik fiber kablo teknolojisi sayesinde, lazer ışın yolu yapılmaktadır. Optik fiber kablo ile lazer kesim tezgâhların ışın yolu bakımı ve servisi daha kolay hale gelmiştir. Fiber lazer kesim tezgâhı uçar optik prensibiyle çalışır. Yani kesilecek plaka makine tablası üzerinde durur, lazer kafası X ve Y eksenleri yönünde hareket eder. Bunun sonucunda çok yüksek ivme değerleri ve direkt enkoder ölçme sistemi ile birlikte parça geometrisinde maksimum hassasiyet elde edilir. X-eksende kullanılan yüksek hassasiyetli, çift yönlü, boşluksuz ve sertleştirilmiş helis dişli kremayerler ve lineer raylı kızaklar sayesinde yüksek ivmelenme (10 m/s<sup>2</sup>) ve hız (100 m/dk) değerleri elde edilir.

Bu tez çalışmasında; lazer kesim tezgâhlarında Y-eksen köprüsünün kompozit malzemeden tasarlanması, analiz edilmesi ve prototipinin üretilmesi amaçlanmıştır. Mevcut lazer kesim tezgâhlarında Y-eksen köprüsünün hafifletilmesi ile yüksek ivme değerlerine çıkılabildiğinden kesim hızları ve kesim performansının artması,

makinelerde kullanılan lineer veya servo motorlarının küçültülmesi, maliyetler azarlatılarak daha rekabetçi makinelerin tasarlanması ve üretilmesi amaçlanmıştır. Küçültülen servo motorlar ile enerji tüketiminde azalma ile artan kesim performansları ile verimlilikte artış hedeflenmiştir. Lazer kesim makinelerin üretim ve işçilik maliyetlerinin azaltılması ile metal işleme sanayisinin her alanında kolaylıkla kullanılabilmesi hedeflenmiştir.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Öncelikle lazer kesim tezgâhları, lazer kesim tezgâhları ölçüleri ve lazer kesim tezgâhı üreticilerinin makineleri ile ilgili kısa bilgiler verilmiştir. Lazer kesim makineleri için farklı tiplerde ve ölçülerde tezgâhlar mevcuttur. Tezgâh ölçüleri, kesilebilen sac plakalarının ölçülerine göre sınıflandırmaktadırlar. Makine ölçüleri, sac plaka ölçülerine göre 1500x3000, 2000x4000, 2000x6000 ve 2500x6000 olarak değişmektedir. 2D sac lazer sac işleme tezgâhları flyoptik, hibrit ve büyük ebatlı makineler olarak üretilmektedirler. Flyoptik lazer kesim makineleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Eksenlerin hareketleri iki farklı tahrik çözümü ile yapılabilmektedir. Bunlar helisel kremayer tahrik sistemidir. Helisel kremayer tahrik sisteminde eksen hareketleri kremayer sistemi ile yapılır. Yüksek hassasiyette işlenen helis dişliler sayesinde çok yüksek ivmelenme ( $10 \text{ m/s}^2$ ), yüksek hareket hızı (100 m/dk) ve pozisyonlama toleransı (0,05 mm) değerlerine ulaşılır. Lineer motor hareket sisteminde ise eksen hareketleri çok yüksek ivmelenme ve hız değerlerine ulaşabilen ve son teknoloji ürünü lineer motorlar ile yapılır. Lineer motorlar sayesinde çok yüksek ivmelenme ( $20 \text{ m/s}^2$ ), yüksek hareket hızı (150-200 m/dk) ve hassas pozisyonlama toleransı (0,03 mm) değerlerine ulaşılır (Şekil 2.2).

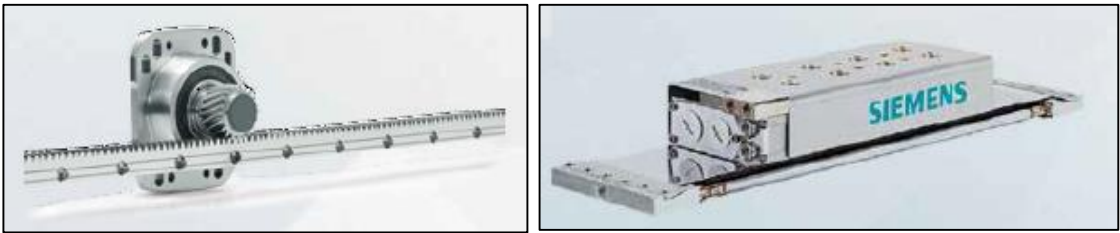


a

b

Şekil 2.1. Flyoptik lazer kesim makineleri

a) Durma flyoptik lazer makinesi, b) Trumpf flyoptik lazer makinesi



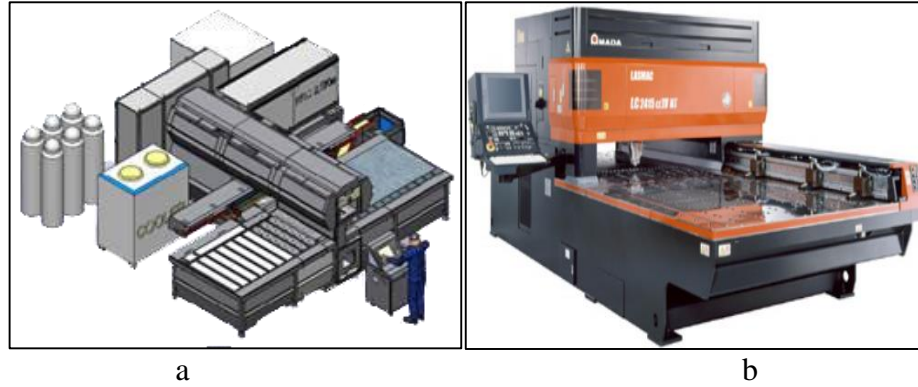
a

b

Şekil 2.2. Eksen tahrik sistemleri

a) Helisel kremayer tahrik sistemi, b) Lineer motor hareket sistemi

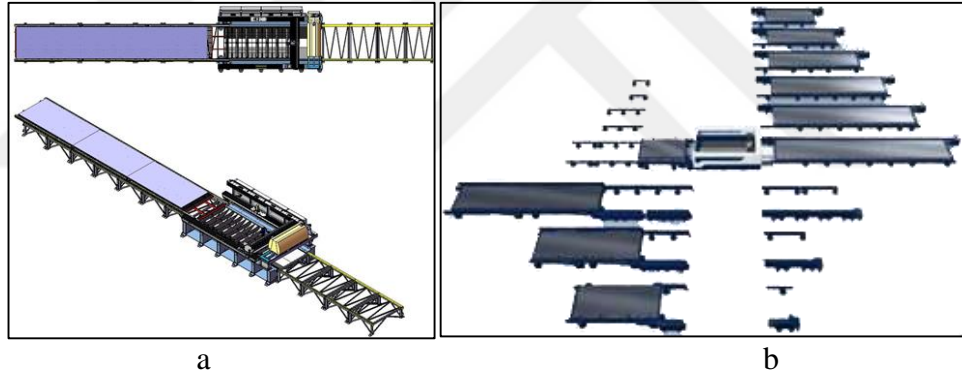
Kesilen malzemenin konumlandırılmamsın farklı tipi olan hybrit lazer kesim makineleri Şekil 2.3’de gösterilmiştir. (Anonim 2017a) ve (Anonim 2017b).



**Şekil 2.3.** Hibrit lazer kesim makineleri

a) Durma hibrit lazer makinesi, b) Amada hibrit lazer makinesi

Rulodan soğuk hadde olarak açılmış olan uzun ve dar yassı sacların lazer ile kesilebilmesi için büyük ebatlı makineler gereklidir. Aşağıda büyük ebatlı makinelerin görüntüleri Şekil 2.4’ de verilmiştir. (Anonim 2017a) ve (Anonim 2017c).



**Şekil 2.4.** Büyük ebatlı lazer kesim makineleri

a) Durma büyük lazer makinesi, b) Tumpf büyük lazer makinesi

Profil ve boru kesimleri için tam otomatik lazer kesim tezgâhları olarak tube cut makineleri gösterilebilir, aşağıda Şekil 2.5 ve Şekil 2.6’ da verilmiştir. (Anonim 2017a) ve (Anonim 2017c).



**Şekil 2.5.** Fiber lazer tube cut makinesi (Durma firmasının tube cut makinesi)



**Şekil 2.6.** Fiber laser tube cut makinesi (Trumpf firmasının tube cut makinesi)

3D sac parça fiber lazer kesim sistemleri Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



a

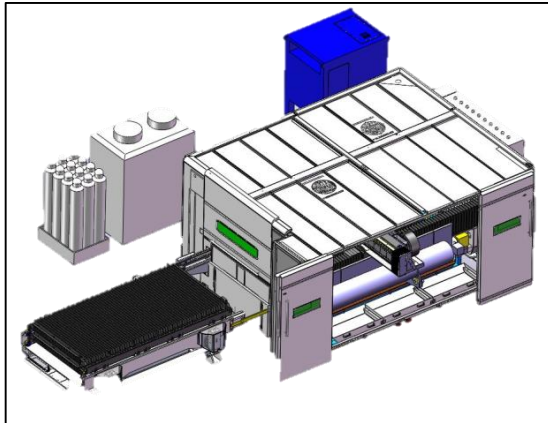


b

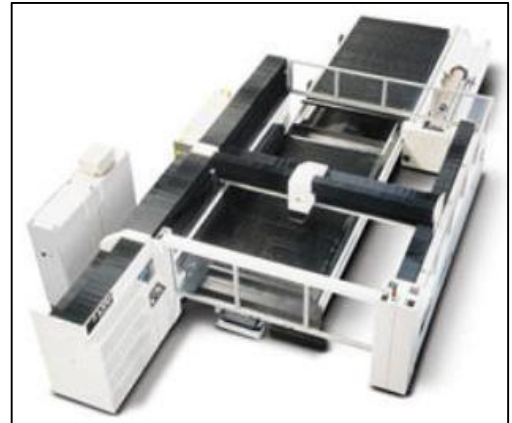
**Şekil 2.7.** 3D sac parça lazer kesim sistemleri

a) Trumpf 3D lazer makinesi, b) Prima 3D lazer makinesi

Kombine fiber lazer kesim sistemleri ise 2D yassı sac kesim ile beraber boru ve profil kesimini otomatik olarak yapabilmektedir.



a



b

**Şekil 2.8.** Kombine fiber lazer kesim makinesi (Yassı sac ve boru-profil kesebilen)

a) Durma kombine lazer makinesi, b) Lvd kombine lazer makinesi

Diğer fiber lazer işleme makineleri ile küçük parçalarda çok hassas işleme, kaynak, delme, diş açma ve kaplama yapılabilmektedir (Şekil 2.9).



**Şekil 2.9.** 3D kaynak fiber lazer makinesi (Trumpf firmasının fiber lazer makinesi)

Fizibilite etüdünün ilk aşaması olarak yayınlanmış makaleler araştırılmıştır. Ulaşılan makalelerin analizi yapıldığında fiber lazer kesim makinesinin bir bileşeni olan Y-eksenin kompozit malzemedan üretilmesi için orijinal bir tasarım yapmanın gerekliliği ortaya çıkmıştır. Kompozit Y-eksen tasarımları ve prosesleri konusunda yayınlanmış makalelerinin değerlendirilmesi için literatür taraması yapılarak tekniğin bilinen durumu tespit edilmiştir. Elde edilen kaynaklar sistematik olarak incelenmiştir. Öncelikle, teknolojik gözleme/izleme, kıyaslama teknikleri kullanılarak fiber lazer kesim makinelerinin ilgili sektör geliştirilmeleri, fiber lazer kesim makinelerinin ana bileşenleri, uluslararası pazarda geliştirilen benzer ürünlerin bilgileri araştırılmış ve pazardaki beklentiler değerlendirilmiştir.

Kâğıtçı ve Tarakçıoğlu (2015) bir polimer kompozit malzemenin kaynak çizgisinin çekme dayanımına etkisini incelemişlerdir. Plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilen polimer parçalarında oluşan kaynak çizgisi hatasının etkilerinin görünümü araştırılmıştır. Süreci etkileyen üç parametre belirlenmiştir. Süreci etkileyen enjeksiyon basıncı, enjeksiyon zamanı ve ambalaj basıncı parametreleri araştırılmıştır. Bunlardan hangilerinin polimer ürünlerin kaynak çizgisi üzerinde etkilerinin olduğu incelemiştir. Aynı yerlerde kullanılan iki farklı parçanın ortak kaynak çizgisinin bir araya getirilmesini sağlayacak çözümler tartışılmıştır. Parçanın kullanım alanı göz önüne alındığında, cam elyaf takviyeli polyamid kompozit (PA 6 GFR 30) malzeme olarak seçilmiş ve parçanın tasarım süreci gerçekleştirilmiştir. Belirlenen enjeksiyon parametreleri değiştirilerek numuneler hazırlanmıştır. Üretilen numunelerin birleşim yerinde oluşan çizgi üzerinde çekme testi yapılmıştır. Üretilmiş olan numune parçaları SEM mikroskobu altında incelenmiştir.

Baltacı ve ark. (2011) çalışmalarında farklı açılı oryantasyonlarına sahip aramid ve karbon lif içeren kıvrımsız kumaş takviyeli termoplastik matrisli kompozit malzemeleri sıcak presleme yöntemi ile üretilen malzemelerden kırılgan numuneleri çıkartmışlardır. Kırılganlar darbe yüklerine maruz bırakılıp, bu yük etkisinde titreşim davranışları incelenmiştir.

Karahan (2017) tarafından hazırlanan araştırmada çok katmanlı 2 x 2 olarak sık dokunmuş, karbon dokuma kompozitlerin, tek eksenli gerilim altında mekanik özellikleri, hasar başlama ve yayılma özellikleri araştırılmıştır. Kullanılan kompozitlerin mekanik özellikleri ve hasar başlama gerilim değerleri tespit edilmiştir. Gerilim ölçümleri ise, hasarın başlamasına neden olan gerilim konsantrasyon bölgelerinin tekstil yapısına bağlı olduğunu göstermiştir.

Durgun ve ark. (2013) tarafından kompozit parça üretim yöntemlerinden vakum torbalama ve vakum infüzyon detaylı olarak anlatılmıştır. Bu yöntemler ile karbon elyaf ve epoksi reçine kullanılarak üretilen deney plakalarından elde edilen numunelerin çekme ve eğme deneyleri gerçekleştirilerek yöntemlerin karşılaştırmaları yapılmıştır.

Rios ve ark. (2006) çalışmasında atkı örme kumaş takviyeli kompozitte hasar gelişimine yönelik yapılan araştırma sonuçlarında göre. Tek katmanlı Milano atkı örme olarak adlandırılan cam elyaf takviyeli epoksi reçinesinden oluşan kuponlardır. Örülmüş



kumaş odaklı olarak yükleme yönündeki tek ve bir yönlü bir cam / epoksi takviye dış katman arasında çeşitli açılarda test edildiği çalışmadan anlaşılmıştır. Sandviç kuponlar hasarın doğrudan gözlemlenmesi açısından oldukça fayda sağlandığı anlaşılmıştır. Çekme testleri, ilk hasarın örme kumaş yapısındaki çevrim geçiş noktaları arasında mikro bağlardan oluştuğu göstermiştir.

Yin ve ark. (2015) termoplastik düz dokuma karbon kompozitin şekillendirilmesinin deneysel araştırmasını yapmışlardır. Çalışmada otomotiv endüstrisinde elyaf takviyeli kompoziti kullanmak için termoplastik karbon dokuma kumaş birleştirerek karmaşık çift eğriliğe sahip kompozit parçalar oluşturulduğu görülmüştür. Bir termopresleme sürecini tek seferde uygulamak gerektiği anlaşılmıştır. Önerilen uygulamada, lamine edilmiş bir termoplastik taneli karbon dokuma kumaşları ısıtılmış, daha sonra hızla termopresleme için önceden ısıtılmış bir kalıba aktarılmıştır. Kompozit parça oluşturmak için soğutulduğu anlaşılmıştır. Poliamid 6, polipropilen ve akrilonitril bütadien stiren de dâhil olmak üzere çeşitli termoplastik matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Yüksek kaliteli parçaların önerilen şekillendirme işlemi ile elde edilmesi mümkün ve hatalar kontrol edilebilirdir. Deneysel sonuçları, reolojik özellikler göstermiştir. Termoplastik reçine, kalıp ve bileşik boş iplik yönelim termopresleme sürecinde çok önemli bir unsur olduğu anlaşılmıştır. Önerilen işlem ile yüksek hacimli ve düşük maliyetli lif takviyeli kompozit parçalar imalatını uygulamamın mümkün olduğu görülmüştür.

Bickerton ve ark. (1997) yaptıkları çalışmada kalıp doldurma ve kompozit ürünün son yapısındaki darbe performanslarının etkisini göstermek için tasarlanmış deneysel bir çalışmayı ayrıntılarıyla anlatmışlardır. Akış analiz deneyleri ile üretilen konik kalıp parçalardan kesme açısı ve ön şekillendirilmiş elyaf hacim oranı ölçümleri yapılmıştır.

Gowayed ve ark. (1996) tekstil kompozit ürünlerinin ön şekillendirme iç yapısını haritalamak için bir teknik geliştirmişlerdir. Bu tekniğin kompozit ürünün fiziksel kesitlerinin çıkarılmasına dayandığı anlaşılmıştır. İplik konumunu belirlemek için görüntü analizi ve ipliğe bakarak tanımlama yapılmıştır. Görüntü analizi ile, 3 boyutlu uzayda yapının şekillendirmesi yeniden incelenmiştir. İplik yönlendirilmesi ile ilgili verilerin kompozit parça boyunca çıkartıldığı görülmüştür.

Ferret ve ark. (1998) tarafından yapısal kompozit malzemelerdeki yük aktarımı için kullanılan metal insertler incelenmiştir. Yapısal kompozit bir parçaya yük aktarımının, metal ekler vasıtasıyla yapılabildiği anlaşılmıştır. Bir yapısal kompozit malzeme içerisindeki, reçine transferinde kullanılan kalıplama işlemi analiz edilmiştir. Sayısal akış simülasyonları için RTMFLOT yazılımını kullanılmıştır. Yazılım kullanılarak enjeksiyon sürecinin optimize edilmesi sağlanmıştır. Eğilme testi ile gerilmeler ve mekanik özellikler elde edilmiştir.

Ghiasi ve ark. (2010) tarafından örgülü içi boş bir kompozit parçanın optimum yapısı ve imalatı incelenmiştir. Kompozit malzemelerin yapısal güçlü bir ara bağlantıya ihtiyaç olması, malzemelerin birbirleri ile etkileşimleri ve malzemelerin şekillendirilmesinin imalat sürecini karmaşık hale getirdiği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında çok amaçlı bir optimizasyon metodunun uygulanması yoluyla karbon bir fiber bisiklet gövdesi tasarımı incelenmiştir. Karmaşık geometriye sahip kompozit parça tasarımının nasıl yapıldığı, küçük boyutlu ve boşluklu yapı ile açıklanmıştır.

Trochu ve ark. (1995) tarafından kompozit malzemelerdeki lif oryantasyonunun tahmini için, çift küreleme yüzey enterpolasyonuna dayanan bir metodoloji sunulmuştur. Fiber ağın her bir düğümünün koordinatlarını hesaplayarak, kumaşın kompleks bir yüzeye dökümlü olduğunda lif yöneliminin belirlenmesinin mümkün olduğu görülmüştür. İki komşu lif arasındaki konum açısını hesaplamının mümkün olduğu anlaşılmıştır. Burada önerilen yöntem, kumaş düğümleri etrafında liflerin serbest dönüşlerini sağlayan basit algoritma kurmak ve kürlenme için parametrik yüzey tanımını yapmakla uygulanabilmektedir. Simülasyonların sayısal sonuçları lif yönünü tahmin etmede bu yöntemin geçerliliğini doğrulamaktadır.

Golzar ve ark. tarafından (2009) hazırlanan makalede entegre yapıya dayalı kompozit bir otomobil gövdesinin prototip imalatının incelendiği görülmüştür. Standart yol otomobilindeki bir çelik gövde kapağının konstrüksiyon ve montaj yaklaşımı konvansiyonel olarak anlatılmıştır. Kompozit malzemenin daha düşük bir hızda yüksek mekanik performans, mukavemet, sertlik ve darbe emme enerjisi gerçekleştirebildiği tespit edilmiştir. Bütünleşik gövde temel tasarım kriteri olarak düşünüldüğünde, çelik kapak kompozit malzeme ile tasarlanmış ve üretildiği görülmüştür. Tasarlanan gövde kapağının  $0/90^\circ$  ve  $\pm 45^\circ$  lif yönlerinde dokunmuş kumaş lamine edilmiş kompozitin

özelliklerini belirlemek için gerilme, eğilme ve darbe deneyi yapılmıştır. Seçilen bileşik laminat 2,9 kat darbe dayanımı göstermiştir. Abaqus yazılımı yardımıyla birkaç farklı kalınlık ve lif oryantasyonu için sonlu elemanlar metodu kullanılmış, kompozit gövde örtüsünün etkisi simüle edilmiştir. FEM analizleri sonuçlarına göre lamine kompozit 0/90° lif yapısının, çelik gövde örtüsüne göre kompozit parçanın çarpışmaya uygunluğunu artırabildiği görülmüştür. Cam dokuma kumaşın dikişli gövde kapağı 3D modelinin prototip imalatı için kalıba yerleştirilerek yapıldığı anlaşılmıştır. Yıllık üretim hacmi 3.000-5.000 adet için önerilen üretim yöntemi olan vakum torbalama yönteminin uygun olabileceği sonucuna varılmıştır. İmal edilmiş kompozit gövde kapağının ağırlığı 1,7 kg olduğu ve çelik gövde kapağı ağırlığından % 42 daha hafif olarak üretilebildiği görülmüştür.

Poorzeinolabedin ve ark. (2014) çalışmasında karmaşık kompozit parçanın yapısal tasarım optimizasyonu ve esnek alet prosesi altında reçine enfüzyonu anlatılmıştır. En uygun yapısal tasarım için en uygun maliyetli, en uygun üretim işlemlerini gerçekleştirmek için yöntemlerle ihtiyacı olduğu anlaşılmıştır. Çeşitli endüstriyel uygulamalarda kompozit yapıların genişlemesi için bir fırsat yaratmaktadır. Bu bağlamda, esnek takımlama (RIFT) yöntemi altında reçine infüzyonu büyük ölçekli ve karmaşık parçalar için üretim yaklaşımı olarak kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmada, RIFT I Tipi (RIFT I) prosesi ile üretilen cam dokuma / epoksi kompozit ile değiştirilmiştir. Otomotiv gövde parçalarının mekanik özelliklerin geliştirilmesi için deneysel ve sayısal olarak araştırmaların yapıldığı anlaşılmıştır. Laminat istifleme dizisinin optimizasyonu yapılmıştır. Üretim yöntemine göre sırayla kapıları ve havalandırma optimum konumu için reçine infüzyon simülasyonu yapılmıştır. Dolum süresini kısaltmak, kuru lekeleri ve boşlukları azaltmak için pahalı ve zaman alan deneme-yanılma proseslerinden kaçınılmıştır. Doldurma süresinin, sıvı ön pozisyonunun zaman içindeki sayısal sonuçları ve deney verileri ile karşılaştırma yoluyla değerlendirilmiştir. Doğru sonuçlar elde edildiği anlaşılmıştır. Optimizasyonun sonuçlarına dayanarak karmaşık geometriye sahip olan otomotiv parçalarının, çelikle ilişkili olarak % 50 oranında bir tasarruf ile imal edilebildiği görülmüştür.

Luycker ve ark. (2009) çalışmasında önceden bağlanmış ve şekillendirilmiş katmanlı yapı olan RTM sayesinde, kalın kompozit parçaların yüzeyinde oluşan delaminasyon ve çatlaklara karşı dayanımı incelemiştir.

Hamila ve ark. (2009) makalesinde tekstil takviyeli kompozit simülasyonları oluşturmak için liflerin pozisyonlarının belirlenmesi gerektiği görülmüş, yarı kabuk nihayi elementler ile yapılabildiği anlaşılmıştır. Simülasyonlar dokuma birim hücrelerden oluşmuş, bileşik tekstil takviyeli kumaş ile şekillendirilmiş bir kompozit malzemenin, sınır koşullarının saptanmasına imkân sağlamıştır. En önemlisi şekillendirmeden sonra elyaflarına konumlarının, simülasyon ile bilinmesine imkân verdiği görülmüştür. Kompozit parçanın yapısal hesaplamaları için analizde kullanılmak üzere son nokta gerekliliği görülmüş ve reçine enjeksiyon (LCM) süreçlerinin durumunu anlayabilmek için analiz edildiği anlaşılmıştır. Tekstil kompozit takviyeleri çok parçalı malzemelerdir. Sürekli (makro) yaklaşımlar ve iplikleri modelleyen ayrı (meso) yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu makalede tekstil kumaşının oluşturulması için önerilmiş sonlu eleman dokuma birim hücrelerinin modellemesi ile yapıldığı anlaşılmıştır. Dokuma kumaşının örme atkı yönleri, element yönlerine göre rastgele olduğu görülmüştür. Çok katlı derin çizimlerde örgü kullanıldığında, tekstil kumaşın çok önemli olduğu anlaşılmıştır. Çünkü tekstil dokuma hücrenin fiziki durumuna bağlıyken, tekstil kumaşın ayırık yaklaşımda çok fazla bilinmeyen olduğundan etkin elementin hesaplamasını zorluğu anlaşılmıştır.

Romashchenko ve ark. (2012) çalışmasında darbeli yük altında metal kompozit silindirin ve kompozitten üretilen silindirlerin dayanımını değerlendirmiştir. Sayısal deney yöntemi kullanılmış, sonlu uzunlukta bir üç katmanlı metal kompozit silindir için optimizasyon problemi çözülmüştür. Optimizasyon, silindirin sabit genel boyutları ve göreceli olarak ani tahribat edecek yükün kütlesi için Tsai-Wu kriteriyle maksimum mukavemet marjı sağlamak için yapılmıştır. Silindirin anizotropik kompozit parçası için en iyi katman kalınlığı oranı ve takviye konfigürasyonunu tespit edilmesi gerektiği görülmüştür. Katman kalınlığı oranı ile metal-kompozit silindir mukavemetini önemli ölçüde iyileştirdiği anlaşılmıştır. İç kat için bir elasto plastik izotropik çelik kullanılmasının uygun olduğu gösterilmiştir.

Colombo ve ark. (2011) makalesinde yeni bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik performansı tespiti için statik ve yorulma karakteri deneysel olarak tespit edildiği görülmüştür. Bazalt takviyeli kompozitlerin son zamanlarda geliştirilen malzemelerdir. Bu mineral amorf liflere daha düşük bir maliyetle, cam elyaflar karbon lifleri için geçerli bir alternatif oluşturduğu görülmüştür. Bazalt takviyeli kompozitler yapısal

uygulamalar için kullanılır. Mekanik özelliklerin yapının performansı için gereklidir. Statik ve yorulma testlerinin deneysel sonuçları bu çalışmada açıklanmıştır. Parametreler üzerindeki etkilerini değerlendirmek için iki polimerik matris dikkate alınmıştır. Söz konusu matrislerin vinilester ve epoksi olduğundan söz edilmiştir. Mekanik testlere paralel olarak numunelerin mekanik yüklere karşı termal dayanımı ve ısı ıl görüntüleme hesapları yapılmış ve değerlendirilmiştir. Mekanik yüklerin uygulanması esnasında kompozitin ısınması tanımlanmış ve ayrıntılardaki davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Son olarak elde edilen sonuçlarla ilgili dikkat edilmesi gereken yerin bazalt elyaf bileşik davranışına odaklandığı götürülmüştür. BFRP'nin mekanik özelliklerini cam ve karbon elyafındaki diğer kompozit malzemelerle karşılaştırmak gerektiği anlaşılmıştır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Metodik Konstrüksiyon Yaklaşımı

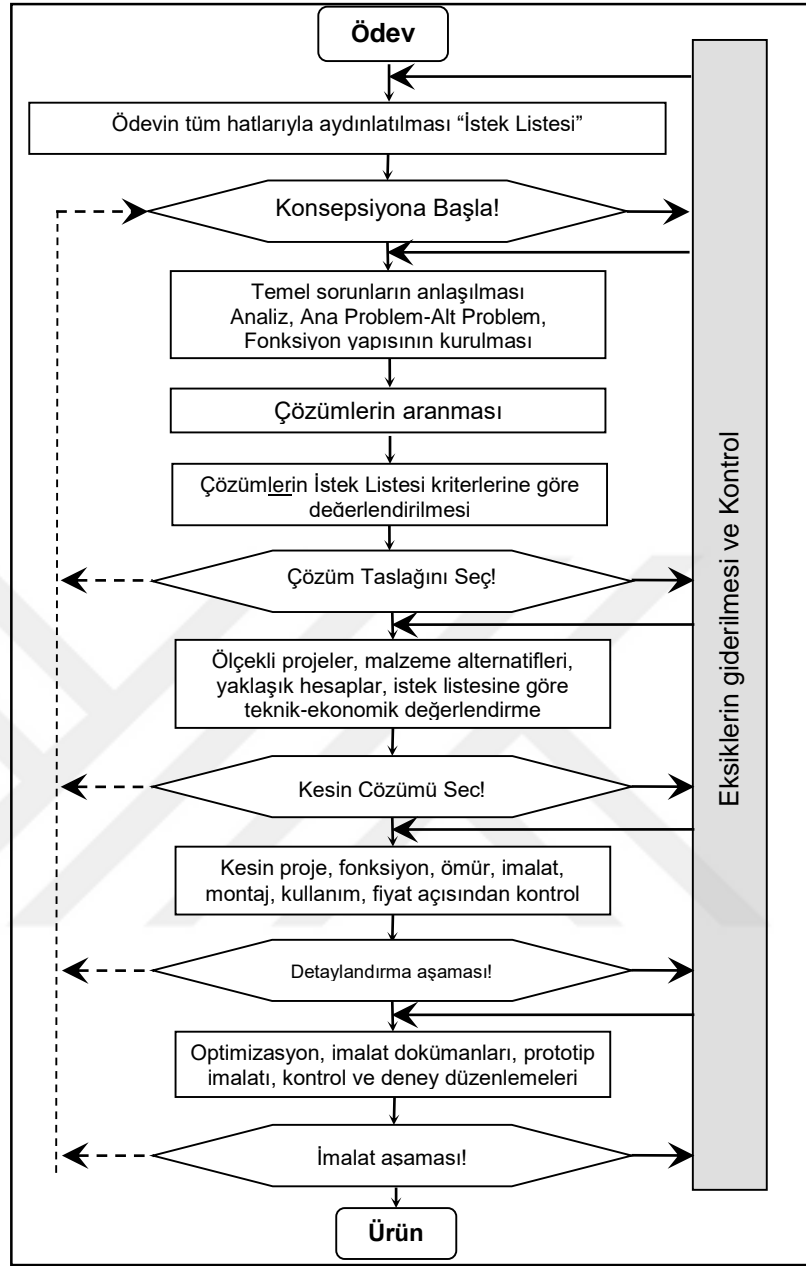
Tez çalışmasında metodik konstrüksiyon veya sistematik tasarım olarak isimlendirilen yaklaşım yönteminden yararlanılmıştır. Bu yöntemde proje bir ödev olarak değerlendirilmiş ve adım adım bu yöntem kullanılarak çözüme doğru belirli bir sistematik dahilinde gidilmiştir. Bu sistematik Şekil 3.1'de görülmektedir. Projeler veya ödevler her seferinde yeni çalışmalar yapılmasını gerektirmez, farklı bir çözümün üzerinden durulması yeniden tasarlanması şeklinde değerlendirmek nedensiz zaman kayıplarına neden olabilmektedir. Önceki yapılan çözümlerden ufak revizyonlar veya yeni koşullara gereksinim olabilir ve bir çok konstrüksiyon ödevi buna benzerdir.

Yeni Konstrüksiyonlar: İstek listesi ile her yönü belirlenmiş bir teknik fonksiyonu gerçekleştirerek, o güne kadar ortaya konmamış yeni bir çözüm yaratmak.

Uyum Konstrüksiyonları: Bilinen, var olan, uygulanan bir konstrüksiyonu, temel sistemi değiştirmeden alt sistemlerde yapılacak değişikliklerle, yeni koşullara uyum sağlayacak hale getirmek.

Çeşitleme Konstrüksiyonları: Uygulama sınırları içerisinde, fonksiyon ve çözüm prensibi değişmeksizin, farklı boyut ve düzenlemelerde yeni tasarımlar ortaya koymak.

Ödevde tüm istekler tam ve açık olarak tanımlanmalıdır tasarımcı söz konusu istekleri belirlemek ve öğrenmek durumundadır. Çünkü bir problemin çözülebilmesi, sorunun doğru olarak anlaşılabilmesine bağlıdır ve istek listesinin eksiksiz, yanlışsız hazırlanması gerekir. İstek listesinde yer alması gereken özellikleri sıralamak mümkündür. Kuvvet, enerji, boyut, hareket, malzeme, emniyet, ergonomi, üretim, kontrol, montaj, iletim, akım, kullanım, fiyat ve zaman olarak kısaca söylenebilir. Çözüm önerilerinin bulunması için metodik konstrüksiyonda çeşitli yöntemler vardır. Bilgi bankalarından, çözüm kataloglarından yararlanma, beyin fırtınası, problemi soyutlaştırma vb. gibi ödevle karşı karşıya gelen tasarımcı, konuyla ilgili bilgi eksikliğini giderecek, sorunun özünü anlayacak, öğrendiği yöntemlerden yararlanıp yaratıcılığı ile çözüm önerileri bulacak, objektif teknik kriterlere göre önerileri değerlendirecek ve önerilerden birisi için kararını verecektir. Projelendirme safhasında, seçilen çözüm prensibi sahip olunan teknolojik ve ekonomik olanaklar dikkate alınarak şekillendirilmeye başlanır. Malzeme seçimi, mukavemet hesapları da yapılarak çözüm önerisi nasıl bir ürün olacaktır belirlenir (Babalık 1997).



Şekil 3.1. Konstrüksiyonda işlem adımları (Babalık 1997)

Metodik konstrüksiyonda, konstrüksiyon işlemi dört ana bölümden oluşur (Şekil 3.1);

- Ödevin aydınlanması, istek listesinin hazırlanması
- Olası tüm çözüm önerilerinin araştırılıp bulunması, öneriler arasından çözüme en uygununun belirlenmesi
- Projelendirme
- Detaylandırma ve dokümanların (teknik resim) hazırlanması

(Babalık 1997)

Tasarım ulusal ve uluslararası kurallara göre, müşteri ve pazar taleplerine göre, üretim yöntemlerine göre değerlendirilerek tüm detayları ile teknik resimler ile parça listeleri çıkartılarak tamamlanmalıdır.

### **3.2. Sonlu Elemanlar Metodu**

Sonlu elemanlar metodu, kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen veya fonksiyonel denklemler oluşturularak, formüle edilebilen problemleri çözmek için kullanılan bir sayısal yöntemdir. İlgilenilen bölge sonlu elemanlar (Finite Element) topluluğu olarak gösterilmektedir. Sonlu elemanlardaki yaklaşık fonksiyonlar, araştırılan fiziksel alanın nodal değer terimlerinde belirlenmektedir. Sürekli fiziksel problem, bilinmeyen nodal değerli kesikli sonlu eleman problemine dönüştürülmektedir. Bu yöntemin uygulanması için basit yaklaşım fonksiyonları oluşturulmalıdır. Sonlu elemanlar metodu ile katı mekaniği, sıvı mekaniği, akustik, elektromanyetizma, biyomekanik ısı transferi gibi alanlardaki problemler çözülebilir (Anonim 2011).

- Karmaşık sınır koşullarına sahip sistemlere,
- Düzgün olmayan geometriye sahip sistemlere,
- Kararlı hal, zamana bağlı ve özdeğer problemlerine,
- Lineer ve lineer olmayan problemlere uygulanabilir,

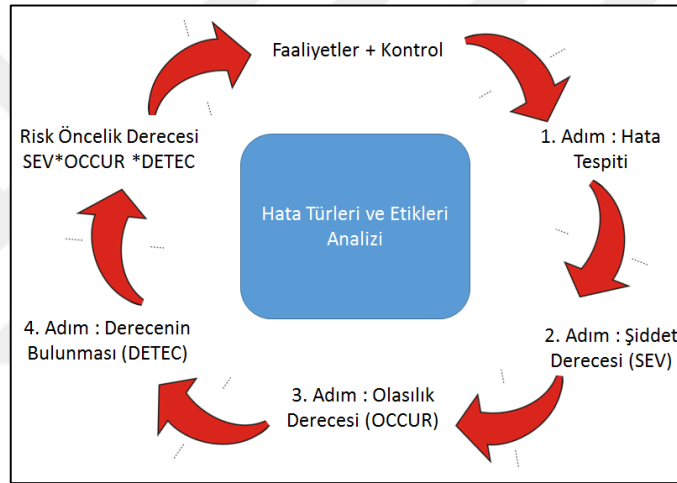
(Anonim 2011)

Sonlu elemanlar metodu çok güçlü ve çağdaş bir sayısal hesaplama yöntemidir. Son 40 yılda bilgisayarların hızlı gelişimine paralel olarak gelişen sayısal hesap yöntemleri içinde çok önemli bir yer tutmaktadır. İlk kullanımı 1950'li yıllarda İnşaat Mühendisliği'nde olmuştur. Etkin kullanımı ise bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ile mümkün olmuştur. Bu sayısal yaklaşım yöntemi her ne kadar orijinal olarak yapı sistemleri için geliştirilmiş olsa da dayandığı esasların genelliği dolayısıyla yöntem akışkanlar mekaniği, zemin mekaniği, uçak mühendisliği, nükleer mühendislik, kaya mekaniği, elektromanyetik alanlar, termal analiz ve daha sayabileceğimiz pek çok mühendislik ve fizik problemlerinin çözümünde araç olarak kullanılmaktadır (Anonim 2011a).



### 3.3. Hata Türleri ve Etkileri Analizi FMEA

Tez çalışmasındaki tasarım ve imalat çalışmalarında hata türleri ve etkileri analizinden, FMEA'dan yararlanılmıştır. Bu analiz, bir sistemin potansiyel hata türlerini analiz etmek için hataları olasılıklarına ve benzerliklerine göre sınıflandıran bir ürün geliştirme ve operasyon yönetim prosedürüdür. Başarılı bir hata türü analizi işi, benzer ürünlerin veya proseslerin geçmiş deneyimlerine dayanarak hata türlerinin tanımlanmasına yardımcı olur, bu hataların sistemden minimum kaynak kullanımı ve çabayla atılmasını sağlar ve bununla beraber geliştirme zamanını ve maliyetini düşürür (Şekil 3.2). Genellikle üretim ve imalat sektöründe ürünlerin veya makinelerin tasarım aşamalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Anonim 2011b).

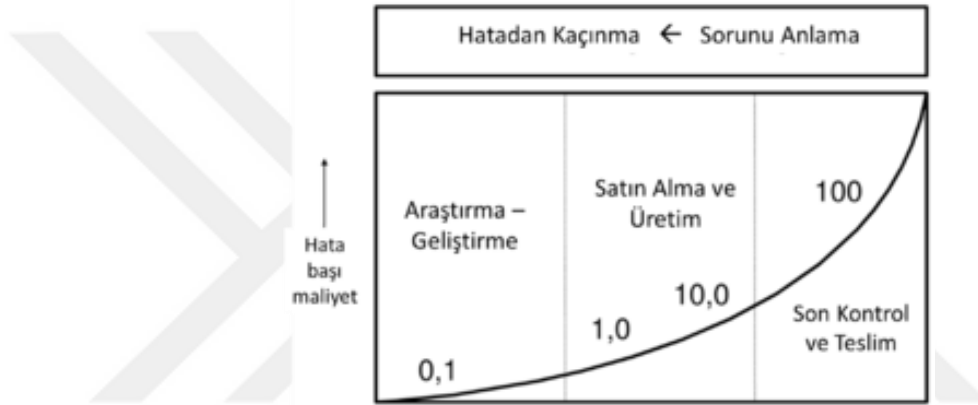


Şekil 3.2. Hata türleri ve etkileri analizi (Anonim 2011)

FMEA'nın temel fikri hatayı sonradan bulmak ve düzeltmek (hata yönetimi) yerine hataları erkenden tanıyarak tedbirli bir şekilde önlemek ve tasarım aşamasından itibaren hataların olası nedenlerinin değerlendirilmesidir. Böylece aksi halde üretim aşamasında çıkan kontrol ve hata maliyetlerden ve hatta müşteri maliyetlerinden kaçınılabılır ve toplam maliyetleri azaltılabilir. Sistemik bir yaklaşımla ve bu yaklaşımdan gelen bilgilerle ayrıca tasarım hatalarının yeni ürün ve süreçlerde tekrarlanması gereklidir. Güvenilirlik ürünlerin veya proseslerin önemli bir özelliğidir. Aynı zamanda müşteri tatminini sağlamakta etkisi çok fazla olan bir faktördür. Bu nedenle ürünün veya sürecin güvenilirliğini sağlamak için atılacak adım, ortaya çıkabilecek olan hataların türlerini ve bunların ürün ya da sürece etkilerini belirleyebilecek bir risk analizinin yapılması ve kurulacak veya kurulmuş olan bir sürecin güvenilirliğinin kontrol altına alınmasıdır (Anonim 2011b).

Tasarım FMEA, potansiyel veya bilinen hata türlerini tanımlayan, ilk üretim gerçekleşmeden hataların tanımlanması ve düzeltici faaliyetlerin uygulanmasını sağlayan bir yöntemdir. Tasarım aşamasının başlarında sistemlerin, alt sistemlerin analizinde kullanılır. Tasarım hatalarından kaynaklanan, sistem fonksiyonları üzerindeki potansiyel hata türleri ile ilgilenir (Anonim 2011b).

Süreç FMEA, tasarım FMEA ve müşteri tarafından tanımlanmış olan kalite, güvenilirlik, maliyet ve verimlilik kriterlerini sağlamak için mühendislik çözümleri üretmeyi hedefleyen bir yöntemdir. Süreç FMEA (veya P-FMEA) tasarım FMEA sonuçlarına dayalı üretim veya hizmet sürecinin zayıflıklarını ele alır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Hata maliyet gelişmesi (Anonim 2011b)

Hizmet FMEA, müşteri hizmetlerini geliştirmek amacıyla üretim, kalite güvence ve pazarlama koordinasyonu ile uygulanan bir yöntemdir. Software FMEA, üretilen program kodu ile aynı görevi gerçekleştirir. Hardware FMEA, hedefi donanım ve elektronik alanında riskleri analiz etmek, değerlendirerek ve önlem alan yöntemdir. Sistem FMEA'sı genel olarak, bütün donanımların ve tasarımın tamamlanmasının sonrasında üretim, kalite güvence gibi sistemlerin akışını en elverişli hale getirmek için kullanılan bir yöntemdir. Sistem FMEA'sı üstün bir sistemin alt sistemlerinin etkileşimlerini veya karmaşık bir sistemin çeşitli bileşenlerinin etkileşimini muayene etmektedir. Olası güvenlik açıklarının ve özellikle tek tek bileşenlerin etkileşiminden kaynaklanan ara yüzlerin belirlenmesini hedefler veya sistemin çevre ile etkileşimini inceler (Anonim 2011b).

Uygulama FMEA yapılırken ilk önce farklı şirket fonksiyonlarının çalışanlarından bir ekip kurulur (disiplinler arası takım). Ekip üyeleri olarak tasarım, uygulama, üretim planlayan, üretim yürüten ve kalite yöneticisi vb. oluşmalardır (Anonim 2011b).

FMEA'nın içerdikleri olarak sistemin sınırlanması, sistemin yapılandırılması, yapısal elemanların fonksiyonlarının tanımları ve doğrudan yapısal elemanların fonksiyonlarından elde edilen potansiyel hataların nedenlerini ele almaktadır.

Hata yerleri bulunarak, türü belirleyerek, hata sırasını tarif edip sonra da hata sebebini belirleyerek potansiyel hataları analiz edilir. Hataların olası nedenlerini belirleyebilmek için genellikle bir neden-sonuç diyagramı oluşturulur. Tespit edilen hatalardan elde edilen kanıtları önlem olarak başka hatları önlemek için kullanmak mümkündür. İngilizce terimlerin ilk baş harfleri ile ifade edilirler. Türkçe anlamı olarak hata sırası olan S (Severity), gerçekleşme ihtimali olan hatanın nedeni ise O (Occurrence) ve hatanın sebebi de D (Detection) ifade edilmektedir. Tespit etme oranı gibi anahtar rakamlar risk değerlendirme temelinin oluşturur. Rakamlar 1 ile 10 arasında tam sayılı değerlerdir ve derecelendirme kataloglar yardımıyla verilir.

Risk öncelik numarasını (RPN) hesaplayarak, risklerin sıralamasını oluşturmak için bir girişim yapılır. RPZ B-, A- ve E- değerlendirme rakamların ( $RPN = B * A * E$ ) çarpılmasıyla oluşturulur ve bu nedenle 1 ile 1000 arasında değerler alabilir. Bir RPZ'nin aynı FMEA'nın başka bir RPZ'si ile karşılaştırıldığında en azından daha iyi/kötü gibi bir ifade çıkarması gerektirir. Alınacak önlemler için öncelik elde etmek için, hataların önemin ve sırasının tahmini, RPZ'nin amacı sürekli sorgulanmaktadır. Ek veya alternatif olarak çalışmak için parametre ( $A * B$ ) deneyleri de vardır. Önlemler alınırken, bazı hedefler çerçevesinde değerlendirilmelidir. Söz konusu önlemlerin hedefleri aşağıdaki gibi özetlenebilir. Arızanın meydana gelme olasılığını azaltmak (örneğin gelişmiş bileşenlerinin yüklenmesi ile). Potansiyel hata keşfetme olasılığını, örneğin ek testler planlayarak, artırmak. Risk değerlendirmesi artık sadece söz edilen RPZ tarafından mevcut FMEA içinde yer almaz, ama şu sırayla proses edilir. En yüksek önceliklerin yüksek önemleri var (10), sonra önemin ve meydana gelme olasılığın çarpımına bakılıyor ( $B * A$ ). Buna aynı zamanda teknik risk ya da kritiklik denir. Ancak o zaman RPZ kalan noktalar için öncelik tanır. Değerlendirme yapılırken, disiplinler arası takımlar her noktayı 1 - 10 arası rakamlarla değerlendirir. Her zaman alt değerlendirme için yüksek değerlendirme ile modüle edilir (Anonim 2011b).

FMEA'yı talep eden müşteri hem son kullanıcı hem de (şirket-içi) ara müşteri olabilir. Risk öncelik rakamları (RPN) önlem anlaşmasını sıralamak için geliştirme sürecinde kullanılabilir. RPZ tek başına potansiyel risklerin değerlendirilmesi için uygun değildir.

Yassı sacların kesiminde kullanılan fiber lazer kesim tezgâhi için yapılan FMEA örneği Çizelge 3.1’de verilmiştir (Anonim 2016a).

**Çizelge 3.1.** Fiber lazer kesim makinesi hata türü ve etkileri proses FMEA analizi (Durma marka)

PARÇA NO/ADI MAKİNE: 1500x3000mm 4kw FIBER LAZER KESME LAZER MAKİNESİ				PROSES SORUMLUSU AR-GE -KAYNAK KONSTRUKSIYON-SATIŞ-SATIN ALMA-MONTAJ				BAŞLANGIÇ TARİHİ 01.02.2016		ÖNGÖRÜLEN BİTİŞ TARİHİ 30.02.2016					
FMEA SORUMLULARI H.BÜLBÜL O.ÇELENK S.SEÇKİN A.MUTLU				HAZIRLAYAN O.ÇELENK				REVİZYON TARİHİ ---		FMEA NO 1500x3000mm 4 kw LAZER					
Y.R.ŞİMŞEK C.MUTLU F.TAMTÜRK H.TAŞAN										SAYFA 1					
Proses / Fonksiyon	Hata Türleri	Hatanın Etkileri	Hata Sebepleri	Mevcut Koşullar				Onerilen Faaliyetler	Sorumlu ve Temin	Faaliyet Sonuçları					
				Mevcut Proses Kontrolları	Olasılık	Şiddet	Saptanabilirlik			RÜS	Yapılan Faaliyetler	Olasılık	Şiddet	Saptanabilirlik	RÜS
1. Kaynak Konstrüksiyonu	1.Gövdenin kalı ve şekli değişmesi	1.Makinenin kullanılmaması	1.Parçaların kalınlık ve yüksekliklerinin yetersizliği	Ölçümler ve gözlemler	9	8	4	288	1.Ana Gövde ve bağlantı profilleri rijitliğinin sağlanması	AR - GE ---	Tasanın bu doğrultuda yapıldı.	4	8	2	84
		2.Hatalı üretime sebebiyet 3.Müşteri memnuniyet- sizliği	2.Malzemenin kalite- si	Daha önceki teorilere dayanarak	8	6	4	192	AR - GE SATIN ALMA ---	Tasanın ve Satın Alma bu doğrultuda yapıldı.	3	6	2	36	
2.Y Eksen	1.Ölçü hataları 2.Ayar imkanı yok	1.Üretim hataları 2.Müşteri memnuniyet- sizliği	1.Kesim hassasiyeti düşük 1.Kesme hızı düşük	Eski üretilmiş makineler- den tahmin	8	6	3	144	1.Linear Motor kullanımına gidilmeli	AR - GE SATIN ALMA ---	Tasanın ve Satın Alma bu doğrultuda yapıldı.	3	6	1	18
3.Tabla	1.Küçük ebatları farklı işlerin yüklemeye boşaltma işlemleri	1.Müşteri memnuniyet- sizliği	1.İşlem süresi büyüklüğü	Eski üretilmiş makineler- den tahmin	7	5	2	70	1.Hareketli Tabla sistemi tasarlanmalı	AR - GE SATIN ALMA ---	Tasanın bu doğrultuda yapıldı.	3	5	1	15
4.Z Eksen	1.Ürün Parçada ölçü hataları	1.Hatalı üretime sebebiyet 2.Müşteri memnuniyet- sizliği	1.Kesim hassasiyeti düşük	Daha önceki teorilere dayanarak	7	6	4	168	1.Otomatik yüksek- lik kontrolü ve sensörü kullanılmalı	AR - GE SATIN ALMA ---	Tasanın ve Satın Alma bu doğrultuda yapıldı.	3	6	2	36
5.Z Eksen	1.Ürün Parçada ölçü hataları 2.Ayar imkanı yok	1.Hatalı üretime sebebiyet 2.Müşteri memnuniyet- sizliği	1.Sabit Lazer uygulamasıyla sacın sağlıklı hare- ket ettirilememesi	Ölçümler ve gözlemler	7	6	3	126	1.Uyan Lazer ışını kullanarak sacın hareket ettirmeden kesimin gerçekleştirilmesi	AR - GE SATIN ALMA ---	Tasanın ve Satın Alma bu doğrultuda yapıldı.	4	6	1	24
6.Resenatör	1.Ölçü hataları	1.Üretim hataları 2.Müşteri memnuniyet- sizliği	1.Inoc Saclarda düşük hız 2.Kalın Saclarda ergimeme	Ölçümler ve gözlemler	7	8	2	112	1.Lazer Üretim gücünün artırılması	AR - GE SATIN ALMA ---	Tasanın ve Satın Alma bu doğrultuda yapıldı.	3	8	1	24
7. Montaj ve transport	1.Montaj yüklemeye ve transport esnasında hata tehlikesi	1.Parça veya makine kullanılmaz hale gelir.	1.Parçaların büyük ve dengesiz olması	Montaj seviyesi ve satış teorileri	9	8	2	144	1.Makine parçaların demonte edilebilecek şekilde ve alüminyumdan yapılmalı	AR - GE ---	Tasanın bu doğrultuda yapıldı.	4	8	1	32
8. Soğutucu	1.Ölçü hataları	1.Parça veya makine kullanılmaz hale gelir.	1.Resenatör ayna ve lineer motorlarda ısınma	Ölçümler ve gözlemler	9	8	2	144	Çift çevrimli soğutucunun kullanılması	AR - GE SATIN ALMA ---	Tasanın ve Satın Alma bu doğrultuda yapıldı.	3	8	1	24

### 3.4. Tasarımda Makine Elemanları ve Konstrüksiyon

Tasarımda makine elemanları ve konstrüksiyon mühendisin temel bilimlere, mühendislik bilgi ve deneyimlerine dayanarak teknik bir probleme çözüm bulmak olarak basitçe tarif edilebilir. Makine veya makine parçasına, çözüm bulabilmek için ortaya koyduğu yaratıcı zihinsel faaliyetlerin tümü olarak söylenebilir. Konstrüksiyonun son adımı olarak teknik çözümün üretilme olgunluğuna ulaşmış, teknik resim ve parça listesinden oluşan üretim ürün ağacı olarak kabul edilir (Babalık, Çavdar 2014).

Tasarımda makine elemanları ve konstrüksiyon faaliyeti bir işlemin yerine getirebilmesi için gerekli teknik talebe ilişkin çözüm fikirlerinin ortaya konması olduğuna göre, işlemin büyüklüğü ve karmaşıklık derecesine göre konstrüksiyonun kendisi de büyüklük ve karmaşa açısından farklı olacaktır. Kapsamlı ve karmaşık bir konstrüksiyonun analizi yapıldığında, ana teknik sistem pek çok alt ve yan sitemlerden oluştuğu görülmektedir (Babalık, Çavdar 2014).

Her sistem, makine ve konstrüksiyon elemanı dediğimiz temel yapı taşlarından meydana gelmektedir. Birbirlerinden çok farklı işleri de yapsalar, makinelerin bazı parçaları vardır ki, bunlar makine elemanları olarak söylenebilir, makinelerin hemen hepsinde çoğunlukla kullanılmaktadırlar (Babalık, Çavdar 2014).

Cıvatalar birçok makine parçasında sıklıkla kullanılmaktadır. Aynı şekilde kaynak bağlantıları otomobillerde, buhar kazanlarında vb. makinelerde kullanılmaktadır. Dişli çark, mil ve rulmanla da çeşitli makinelerde karşılaşırız. Farklı makinelerde, farklı boyutlara sahip ve bazen de farklı malzemedен üretilmiş olarak rastladığımız, temelde yapıları, işlevleri aynı olan ve daha başka alt bileşenlere ayrılamayan makine elemanları kullanılmaktadır (Babalık, Çavdar 2014).

Makine elemanları konstrüksiyonda birden fazla yapı taşından oluşan, ancak işlev açısından elemanlarına ayırmadığımız alt sistemlerdir. Mil, kama, dişli çarklar birer makine elemanıdır ancak bunlar bir araya gelip mil-göbek bağı oluşturduklarında konstrüksiyon olarak adlandırılmaktadır (Babalık, Çavdar 2014).

### 3.5. Lazer Kesim Tezgâhı Bileşenlerinin İncelenmesi

Günümüzde ince sacların kesilmesinde insan iş gücü gereksinimini azaltmak ve seri imalata yani fabrikasyona geçebilmek için lazer kesim tezgâhları tasarlanmıştır. Genel imalat, makina sanayi, otomotiv sanayisi, tarım makinaları imalatında da lazer sac levha kesim tezgâhlarının kullanılmasına gereksinim duyulmuştur. Lazer kesim tezgâhların tasarlanmasının nedeni, başta da değindiğimiz gibi insan gücünü daha hızlı, güvenilir ve verimli şekilde sac levhaların lazer ışığı ile kesilmesi sağlamaktır.

Gelişen teknoloji ve fizik biliminin uygulanabilirliğinin artmasıyla uzun yıllar sonrasında bu tezgâhlarda köklü değişiklikler ihtiyaç doğmuş ve sürekli bir gelişme kaydedilmiştir. Çağımız bilgisayar teknolojisine bürünmesi, sac metal levhaların kesme işlerinde bir çağ açmış olmaktadır. Bunun sonucunda lazer ile yassı sac levha kesim tezgâhlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Lazer ile yassı sac levha kesim tezgâhları kısaca HD-F / HD-FL lazer makinesi olarak adlandırılabilirler. Düz sacların kesiminde kullanılan yüksek hızlı 2D kesim tezgâhlarıdır ve uçan optik prensibi ile çalışmaktadırlar. Bunun anlamı; sacın üzerinde bulunduğu kesim tablası sabit durur, kesim kafası X ve Y yönlerinde hareket ederek kesim işlemini yapar.

Bu yöntem sayesinde çok yüksek ( 3G ) ivmelenme değerlerine ulaşılır ve direkt enkoder ölçüm sisteminin de yardımıyla maksimum hassasiyette parça kesimleri gerçekleştirilir.

#### Lazer Sac Levha Kesim Tezgâhı Özellikleri:

- Hareketli eksenler, bakım gerektirmeyen, dinamik ve yüksek performanslı AC servo motorlar ve lineer motorlar aracılığıyla çalışır.
- Konvansiyonel tezgâhlara göre ayarlama zamanı çok kısadır.
- Ayarlama, ölçü, kontrolü, manuel hareket vb. nedenlerle oluşan zaman kayıpları ortadan kalkmıştır.
- Makine gövdesi ve köprü kaynaklı konstrüksiyondur. Söz konusu yüksek lisans terzide kaynaklı köprü yerine kompozit malzemeden üretilmiş Y eksen köprüsü tasarlanıp üretilecektir. Makine gövdesi ve eksenler stres giderme işlemine tabi

tutulur. Bu işlem, makine geometrisinde kaynak işlemi sonucu ortaya çıkabilecek tüm atmaların önüne geçer.

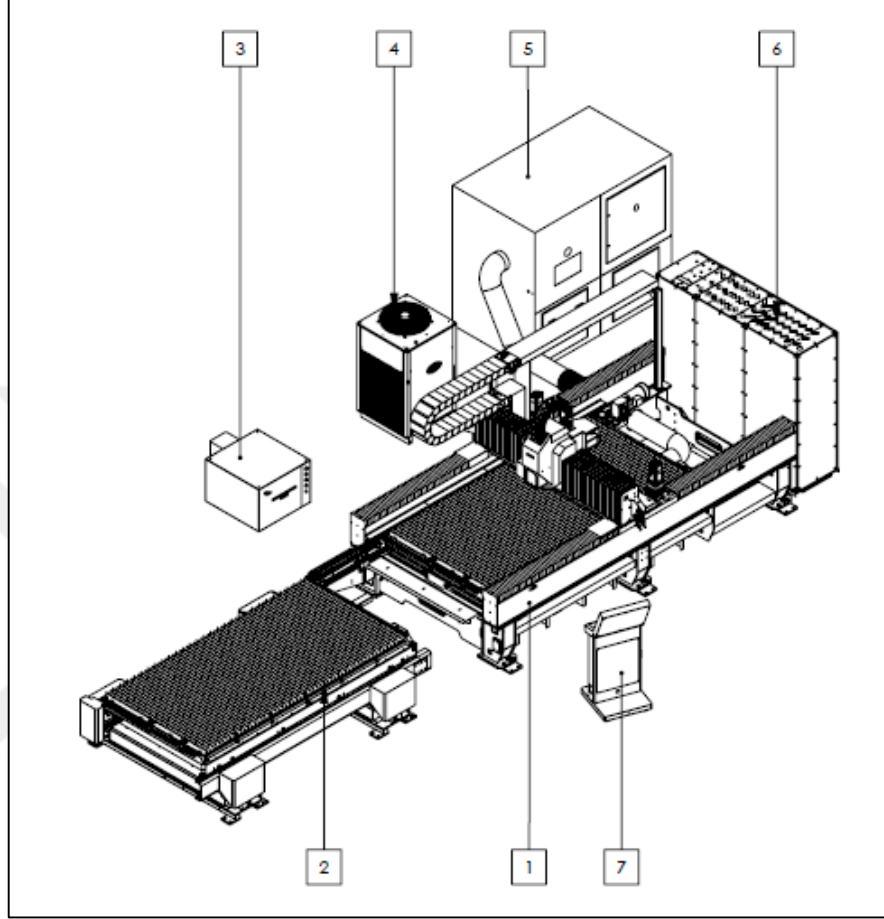
- Lazer kesimi sırasında ortaya çıkan tozların vakumlanıp toz toplama filtresine gönderilmesi için çok hücreli emiş sistemi kullanılır. Kullanılan dikine konveyör sistemi ile kesim sırasında alta düşen tüm hurda parçaların ve küçük iş parçalarının en kısa sürede hurda toplama kutularına düşürülmesi sağlanır.
- Otomatik mekik tabla sistemi, malzemeyi kesime hazırlama zamanının azaltılması ve kesilen malzemelerin makineyi durdurmadan toplanması prensibine uygun olarak tasarlanmıştır. Makine içinde kesim devam ederken diğer tabla üzerinde yükleme ve boşaltma işlemleri yapılır.
- İnsan faktörünün imalatta fazla etkili olmamasından dolayı seri ve hassas imalat mümkündür.
- Tezgâh operasyonları yüksek bir hassasiyete sahiptir.
- Tezgâhın çalışma temposu her zaman yüksek ve aynıdır.
- İmalatta operatörden kaynaklanacak her türlü kişisel hatalar ortadan kalkmıştır.
- Parça imalatına geçiş daha süratlidir.

#### Lazer Sac Levha Kesim Tezgâhlarının dezavantajları;

- Detaylı bir imalat planı gereklidir.
- Pahalı bir yatırım gerektirir.
- Tezgâhın saat ücreti yüksektir.
- Konvansiyonel tezgâhlar ile kıyaslandığında daha titiz kullanım ve bakım isterler.
- Kesme hızları yüksek ve kaliteli kesicilerin kullanılması gerekir.
- Periyodik bakımları uzman ve yetkili kişiler tarafından düzenli olarak yapılmalıdır

(Anonim 2011c).

Lazer kesim tezgâhı birçok ana gruptan oluşmaktadır (Şekil 3.4). Söz konusu gruplar makine sistemin karmaşıklığını önlemektedir, bakım kolaylığı ve kullanım kolaylığı sağlamaktadır (Çizelge 3.2).



Şekil 3.4. HD-F/L Lazer ana parçaları (Durma)

Çizelge 3.2. HD-F/L Lazer ana parçaları listesi (Durma)

Durma HD-F(L)* Lazer	
1	Makine Gövdesi
2	Mekik Tabla
3	Lazer Güç Kaynağı
4	Soğutucu
5	Toz Toplama Ünitesi
6	Elektrik Panosu
7	Kontrol Ünitesi

(Anonim 2016b).



### 3.6. Kullanılan Alt Bileşenlerinin İncelenmesi

#### 3.6.1. Lazer Güç Kaynağı Bileşeni

Sac kesimi için kullanılacak olan lazer ışığı, lazer ünitesinde üretilir. Lazer ünitesinin modüllerinde üretilen ışınlar fiber kablo ile kesim kafasına kadar, herhangi bir kayıp olmadan rahatlıkla taşınır. Lazer güç kaynağı düşük-mod kilowatt-sınıfı lazerleri %10-%100 güç seviyeleri arasında ışın profilinde değişiklik meydana getirmeyen yapıya sahiptirler. Bu özellik aynı lazerin hem düşük hem de yüksek güç gerektiren işlemlerde kullanılmasına imkan vermektedir (Şekil 3.5). IPG lazerin uzun mesafedeki stabil ışın çapı özelliği uzun odaklı lenslerin kullanımına olanak vermektedir. Bu da lenslere zarar vermeden daha derin bir işleme alanı anlamına gelmektedir. 100m mesafelere kadar kullanılabilen IPG lazerler farklı fiber çaplarının kolaylıkla adapte edilmesine imkân tanır. Bunun yanında fiber lazerlerde ayna, hassas ayna ayarı, lazer gazı gibi ihtiyaçların olmaması hafif ve küçük yapısı da diğer lazer tiplerine göre üstünlük sağlamaktadır.



Şekil 3.5. IPG Fiber Rezanatör (Anonim 2017d)

Fiber lazer rezanatörünün teknik kabiliyetleri ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

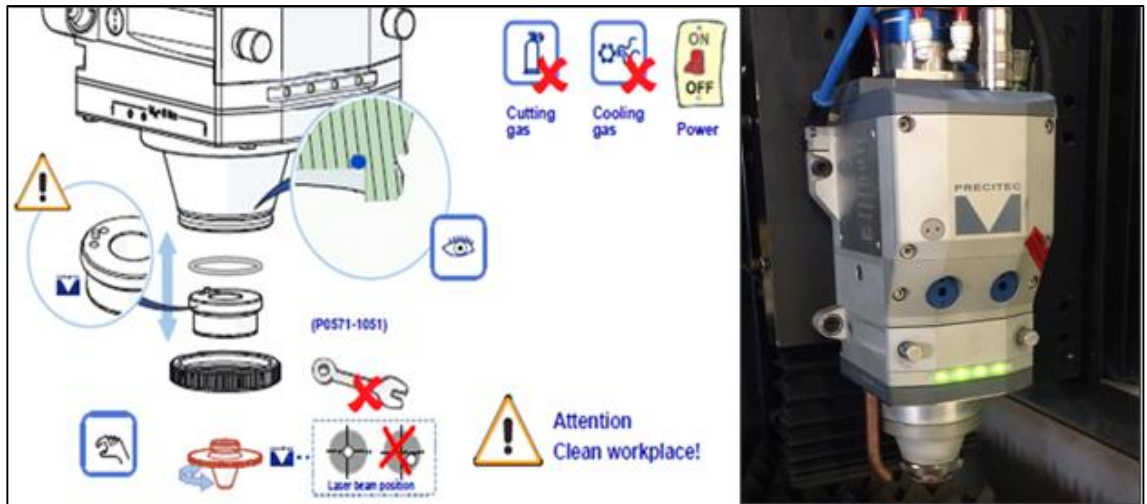
- Üstün Işın kalitesi (BPP)
- Farklı güç seviyelerinde sabit kalabilen ışın kalitesi
- Uzun çalışma mesafelerinde küçük odaklama özelliği.
- Bakım gerektirmeyen çalışma imkânı.
- Modüler tak-kullan yapısı.
- Kompakt sağlam yapılı ve kolay ayarlanabilir.
- Diyot ömrü > 100.000 saat

### 3.6.2. Lazer Kesme Kafası Bileşeni

Lazer ünitesinde üretilen ışınlar fiber kablo ile kesim kafasına kadar taşınır. Kesim kafası fiber kablodan aldığı ışınları işleme yüzeyine odaklar. Lazer kesim kafası üzerinde 4 adet led ışık bulunmaktadır. Bu ledler sol baştan sırası ile sürücü, sıcaklık, basınç ve kirlenme konularında oluşan problemlerde yeşilden kırmızıya dönmektedir.

Lazer kesim kafasının kesim esnasında kalkan veya ters dönen kesilmiş saçlara çarpması gibi yaşanabilecek kazalarda kafanın zarar görmesini önlemek amacıyla nozul üstünde seramik bir parça bulunmaktadır. Bu tür istenmeyen durumlarda bu parça kırılarak kafanın zarar görmesini engellemektedir. Seramik parça kırıldığında gibi yenisi ile değiştirilmesi gerekmektedir. Aşağıdaki Şekil 3.6 da lazer kesim kafası üreticisi olan Precitec firmasının bir örneği verilmiştir.

Kesme kafasındaki kapasitif sensör, işlenen malzemeye olan mesafeyi sabit tutarak kararlı bir odak pozisyonunu garantiler. Kapasitif sensör sistemi nozul ile işlenen malzeme arasındaki mesafeyi Z-ekseninin hızlı şekilde kontrolü ile sabit tutar. Termal değişimlerden etkilenmemesi için lazer kafası su soğutmalı olarak seçilmiştir. Standart F150 mm kesme lensi farklı malzeme tipleri ve kalınlıklarında kesim yapmaya olanak sağlar. F150 olarak adlandırılan lens yardımıyla lazer ışının odak mesafesi 150 mm olarak sabit kalır (Anonim 2016c).



Şekil 3.6. Lazer kafası (Precitec)

### 3.6.3. Toz Toplama Ünitesi Bileşeni

Kesim esnasında oluşan duman, toz ve küçük partikülleri emerek sağlıklı bir çalışma ortamı sağlar. Titreşimli toz toplama filtresi tam otomatiktir. Kesime başlandığında otomatik olarak çalışır. Filtre kartuşları, entegre fan motor grubu ve jet-pulse (geri üfleme) temizleme sistemi ile kompakt bir ünedir. Lazer makinesi ve filtrenin zarar görmemesi için lazer ile kesilecek sacın üzerine sürülecek yağ tipi olarak ASF-15 ANTI SPATTER FLUID kullanılmalıdır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Lazer toz toplama ünitesi (Vanterm Filtre)

### 3.6.4. Soğutucu Bileşeni

Soğutucu, lazer güç kaynağının, kesim kafasındaki optiklerin ve lineer motorların soğutmasını sağlayan cihazdır. Su bazlı bir soğutma sistemine sahiptir. Çift devreli sistem sayesinde optiklere ve lazer güç kaynağına ihtiyaçları olan farklı sıcaklıklarda soğutma suyu gönderilir. Soğutucudaki su döngüsü kapalı devre olarak çalışır. Soğutma suyu olarak saf su kullanılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Lazer soğutucu (IPG Soğutucu)

### 3.6.5. Makina Kaporta Bileşeni

Makine, (doğrudan ya da dolaylı) lazer radyasyonu ve mekanik hareketli parçalardan, operatörü ve makine çevresindeki personeli korumak için tasarlanmış bir güvenlik kabini ile donatılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Lazer ana kaporta (Durma marka)

### 3.6.6. Kontrol Ünitesi Bileşeni

Sinumerik 840 D SL CNC Kumanda, bağlı olduğu PCU ile beraber verimli bir mikroişlemcidir. Kumanda, bütün standart lazer kesim uygulamaları için bir DURMA operatör ara yüzü ve tam bir kesim veri tabanına sahiptir. Standart malzemelerin (Çelik, paslanmaz, alüminyum, pirinç, bakır) belli kalınlıklardaki hazır kesim parametreleri veri tabanında mevcuttur (Şekil 3.10). Operatör bu referans değerleri dikkate alarak değişen sac kalitelerine göre kesme kalitesini küçük ayarlarla iyileştirir. Lazer gücü, yol, hız, zaman ve hareketin bir fonksiyonu ile kontrol edilir. 6 MB dahili kullanıcı hafızası ve USB girişi mevcuttur.



Şekil 3.10. Lazer kontrol ünitesi (Durma marka)

### 3.6.7. Mekik Tabla Bileşeni

Kesim bölgesinde, kesim yapılırken diğer tabla üzerinde malzeme yükleme boşaltma yapılabilmesine imkân sağlayan ve tabla değişimini yapan mekik tabla sistemi bulunmaktadır. Güvenlik amacıyla mekik tabla etrafı ışık bariyerleri ile çevrilmiştir. Işık bariyeri engellendiği durumda tablanın içeri-dışarı ya da yukarı-aşağı hareketi otomatik olarak durdurulmaktadır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Laser mekik tabla

### 3.7. Y-Eksen Tasarımı

#### 3.7.1. Y-Eksen Tanıtımı

Lazer kesim makinesinin Y-ekseni, kompozit malzemeden çeşitli bilimsel süreçler yardımı ile tasarlanarak üretilmiştir. Sistem üzerinde olan tüm bileşenlerinin olduğu hali Şekil 3.12’de görülebilir. Başlıca ana bileşenler olarak; Z-ekseni olan lazer kesim kafası, yataklamayı sağlayan raylı kızaklar, raylı kızakları ısı ve tozdan koruyan körükler, kablolar ile lazer fiber kablosunu koruyan kablo kanalları olarak söylenebilir. Tasarımı doğrulamak ve imalata geçmeden önce sistemin çalışmasını kontrol etmek için sonlu elemanlar yöntemi ile analizler yapılmıştır. Lazer tezgâh tasarımında en önemli parametreler olarak kesim hızı, çalışma ivmeleri, titreşimler ve frekans söylenebilir. Lazer tezgâhının Y-eksen köprüsünün analizi için özgül frekansların bilinmesi çok önemlidir. Rezonansa girmesini önlemek amacıyla kritik frekans değerleri tespit edilmelidir.



Şekil 3.12. Montajı tamamlanmış kompozit Y-eksen

### 3.7.2. FMEA

Hata türleri ve etkileri analizinin bir türü de tasarım FMEA'dır. Yalnızca tasarımsal kriterlerin ele alındığı ve çözümün tasarım kısmına dönülerek arandığı bu türde analiz tasarım çalışmalarından önce yapılır. Y-eksen kafes kompozit malzemenin Y-eksen tasarımında FMEA, motor seçimi, karkası oluşturan profil ve kompozit malzemenin tayini, sistemi oluşturan bağlantı elemanları ve Y-eksen kafes kompozit malzemenin Y-eksen çalışmasını sağlayan hareket elemanlarının analizi dikkate alınarak yapılmıştır. Yapılan FMEA çalışmasının tablosu Çizelge 3.1'de incelenebilir.

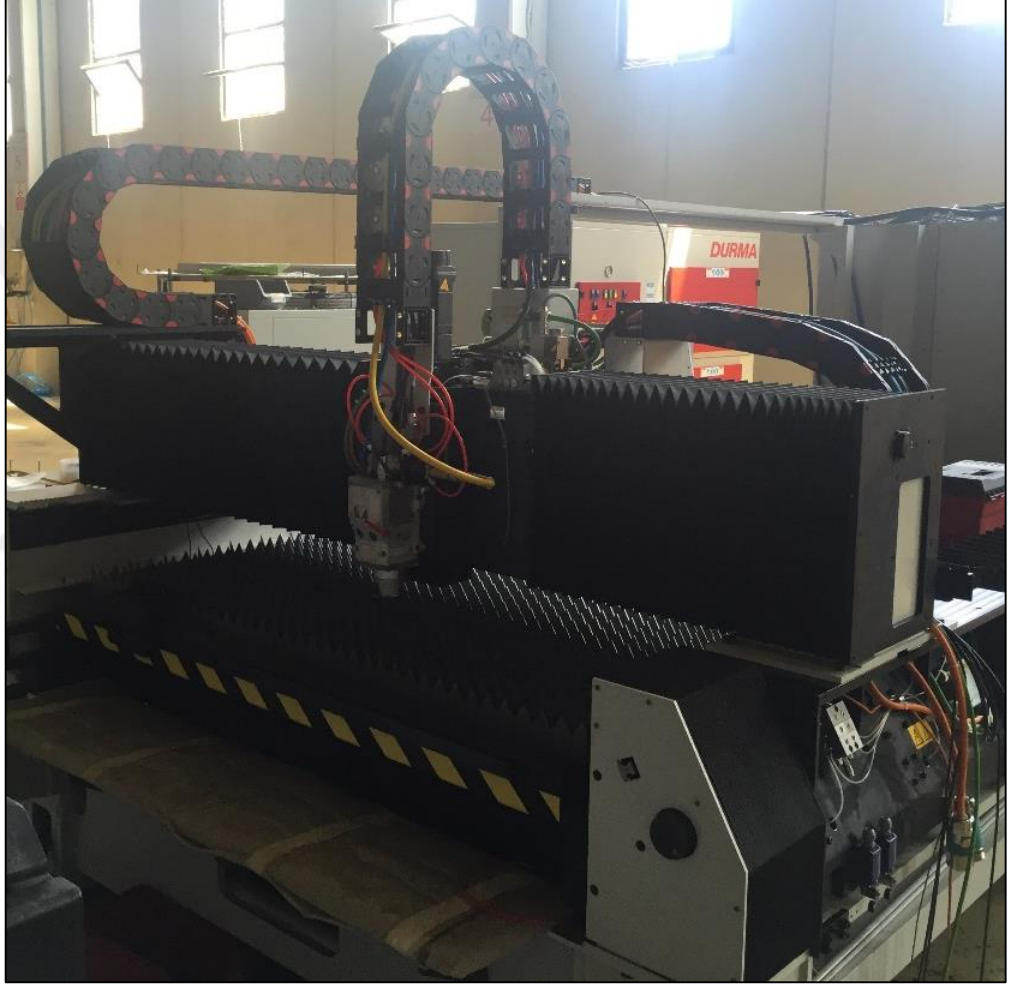
### 3.7.3. Y-Eksen Sistem Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Analizi

Sistemin tasarımına başlamadan önce, seri olarak üretilen lazer sac kesim tezgâhının Y-eksen köprüsü incelenmiş, dış boyutları ve makineye bağlantı ölçüleri ele alınmıştır. Y-eksen köprüsünün tasarımı için mevcut Y-eksen detaylı incelenmiştir. Kafes yapıda kaynaklı saclardan üretilen Y-eksen köprüsü benzer şekilde lazer sac kesim tezgâhında kullanılmaktadır. (Şekil 3.13)



Şekil 3.13. Mevcut durumda lazer kesim tezgâhının Y-eksen köprüsü

Tasarım aşamasında sistemin kablo kanalları ve bu kablo kanallarının içinden geçen enkoder, güç, besleme kabloları ile soğutma sıvılarının hortumları ve lazer ışık kaynağının geçtiği fiber kablo hattının konumlandırılması gibi bazı özellikler için mevcut sistemler örnek olarak incelenmiştir (Şekil 3.14). Ayrıca kablo kanallarını tutan taşıma sacları da incelenerek Y-eksen köprüsü üzerinde konumlandırılması gözden geçirilmiştir. Lazer kesim makinesinin X-ekseni üzerinde, Y-eksen köprüsünün bağlantısı ve montajı incelenmiştir.



Şekil 3.14. Kablo kanalları sistemi örneği (Y-eksen köprüsü)

#### 3.7.4. Y-Eksen Alt Bileşenleri Hesaplaması ve Seçimi

Tasarıma başlarken öncelikle tasarım hata analizi yapılmıştır, daha sonra önceki lazer makinelerinde kullanılan çelikten üretilen Y-eksen köprüsü incelenmiştir. Ayrıca ortaya çıkmış olan know-how konu ile ilgili çalışmalarda kullanılarak açıklanmıştır. Tasarım tamamlandıktan sonra, kompozit Y-eksen köprüsü imalatına geçmeden sonlu elemanlar analizi yardımı ile sistemin modal analizi yapılmıştır.

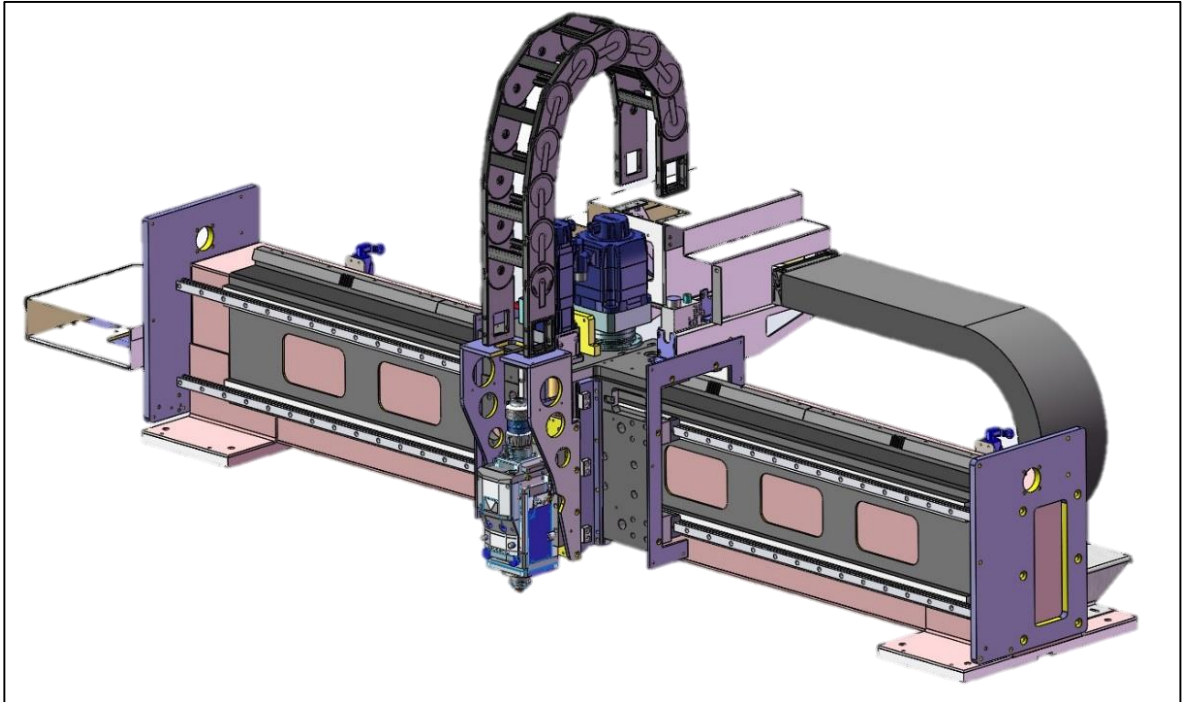


Tez kapsamında kompozit Y-eksen köprüsü tasarım çalışmalarında Solid Works 2017 programı kullanılmıştır. Tasarım çalışması önce bir taslak model olarak başlamış, daha sonra detaylandırılarak devam etmiştir. Tüm bileşenler tek tek tasarlanmış, toplam montaj modelinde kullanılmıştır.

Öncelikle sistemde kullanılan servo motorlar, yataklama elemanları, kızak mekanizmaları, kayış – kasnak mekanizmaları, kablo taşıyıcı kanalları ve kompozit Y-eksen köprüsü kabaca modellenmiştir. Daha sonra ürün spesifikasyonları ve kataloglar yardımıyla kullanılacak ürün ve mekanizmalar seçilmiştir. Seçim sırasında ürünlerin tedarikçilerinden destek alınmıştır.

Servo motorların seçimi için, motorların ayrı ayrı taşıyacağı sistemlerin ağırlıkları göz önünde tutulmuştur (Şekil 3.15). X ekseninde hareket ettirilecek toplam Y-eksen köprüsünün kütlesi 280 kg'dır. Toplam Y-eksen köprüsünün hareket ettirilmesi ve ivmelendirilmesi için 2 adet servo motor ile beraber planet redüktör kullanılmıştır. Planet redüktörün çıkışında konumlandırılan bir helisel dişli yardımıyla krameyer mekanizması kullanılmıştır.

Kompozit Y-eksen köprüsünün üzerinde olan Z eksen (lazer kesim kafasının ve taşıyıcı kablo bulunduğu hareketli kafa gurubu) 1 adet servo motor ile köprü üzerinde sağ-sola hareket edebilmektedir.

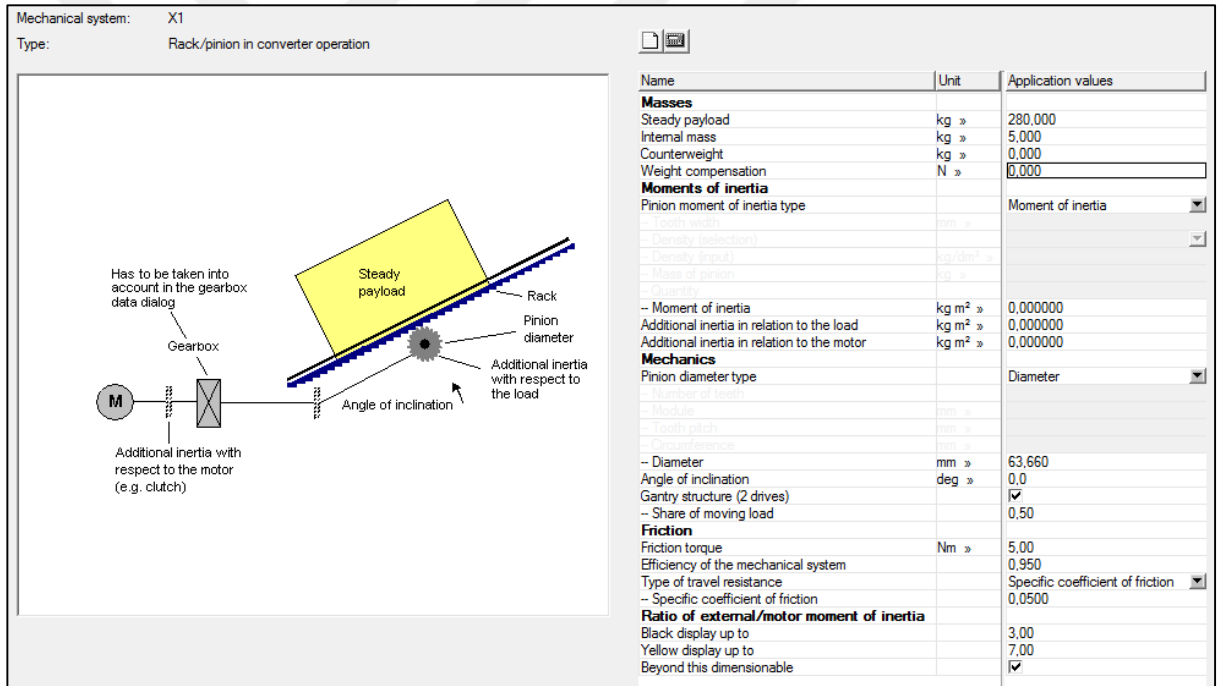


Şekil 3.15. Z-eksen gurubu

Söz konusu hareket servo motor üzerine akuple edilmiş planet redüktör kullanılarak sağlanmıştır. Z-eksen gurubunun sağ-sola hareketi konumlandırılan bir helisel dişli yardımıyla kramayer mekanizması ile yapılmaktadır. Bu sistemin toplam kütlesi 50 kg'dır. Bu değer, 2 adet kızak rayı ve 4 adet kızak arabasından oluşan kızak sisteminin üzerinde taşınacak sistemin kütlesidir. Z-ekseninde çalışacak sistem, diğer kızak mekanizmalarının benzeri olarak tasarlanmıştır. Çalışma yönü Y doğrultusunda ani ivmelenmelerden dolayı Z-ekseni servo – motoru frenli model seçilmiştir.

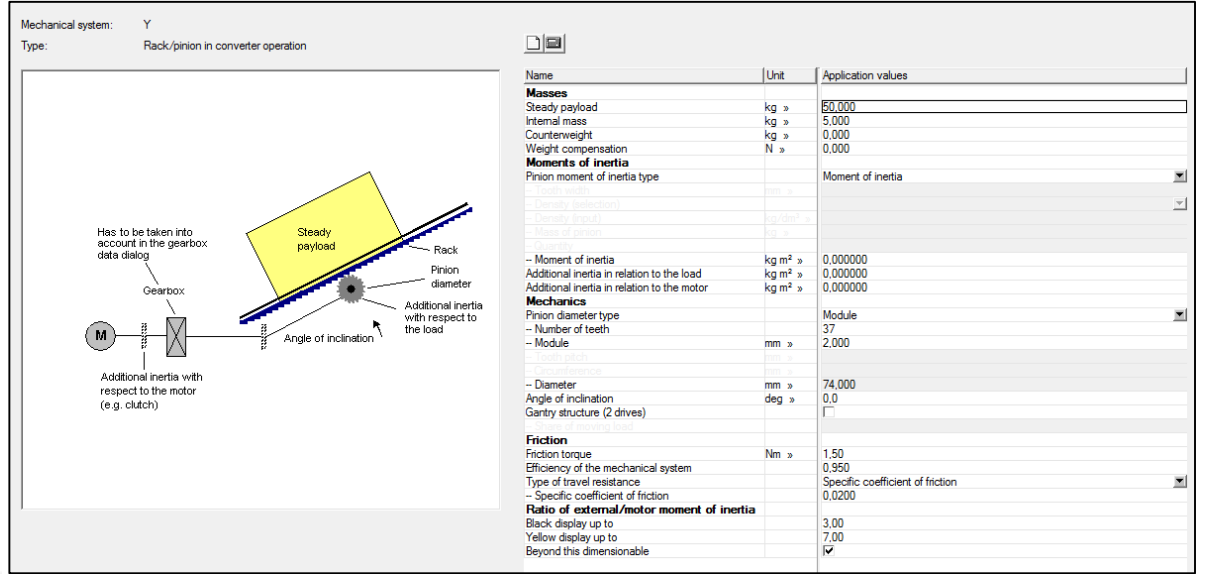
Kompozit-alüminyum hibrit Y-esken köprüsü ve Z-eksen guruplarında kullanılacak olan servo motorların seçiminde Siemens Sizer programından ve hesaplamalarından faydalanmıştır (Anonim 2017e).

X-ekseni sisteminin basitleştirmiş hali Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Kompozit Y-eksen, X-eksen yönündeki servo motor seçimi

Sistemin basitleştirmiş modeli, Sizer programı üzerinde oluşturduktan sonra, gerekli olan hız, ivme ve diğer kinematik parametreler programa girilerek hesaplamaların yapılması sağlanmıştır. X-ekseninde yapılan hesaplamalar ve seçimler benzer şekilde Y-ekseni için yapılmıştır. Y-eksen kompozit köprüsü üzerinde bulunan Z-eksen, lazer kesim kafasının sağ-sol a hareketi için motor seçimi ve sistemin basitleştirilmiş hali Şekil 3.17'de verilmiştir. Z eksen için hesaplamalar gösterilmiştir.



**Şekil 3.17.** Z-Eksenin, Y-eksen yönündeki servo motor seçimi

Kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen köprüsünün X, Y-eksenlerine göre tüm sonuçları seçimi yapılmış servo motor değer tabloları ile beraber karakteristik grafikleri bulgular ve tartışma bölümünde verilmiştir. Bölüm numarası 4.2. olan hız, ivme ve diğer kinematik parametre sonuçları kısmında detaylı gösterilmiştir. Sizer programı yardımıyla yapılan hesaplamalar ve seçimlerin neticesinde sistemde kullanılacak yardımcı ekipmanların tespiti yapılmıştır. Bunlar;

X-ekseninde eksen başına tahrik sistemi olarak; 2 adet guide rayı üzerinde 6 adet raylı kızak üzerinde eksen yaltaklanarak helis pinyon - kremayer sistemi ile sürülmektedir. Raylı kızaklar 25 mm yüksekliğinde olan tip ve marka olarak Bosch Rexroth seçilmiştir. Raylı kızakların tipleri, ray – guide 25 lik 1605-263-25 / 4556 (toplam 4 adet), bilyeli araba - 1694-213-10 (toplam 12 adet) kullanılmıştır (Anonim 2016d).

X-ekseninde, planet redüktör olarak Alfa marka TP 050S-MF1-10-0G0 seçimi yapılmıştır. Kremayer mil ve dişlisi için modül 3 olan Star marka kullanılmıştır. Tipi ZST-300-PA5-500 M=3 taksimat çapı olarak 65 mm olan helisel pinyon dişli seçilmiştir.

X-ekseni yönünde Y-eksenin hareketi ve ivmelendirmesi için, Simens Sizer programı üzerinden seçimi yapılan Siemens servo motor ile hareketi sağlanmaktadır. Tip olarak 1FK7064-4CH71-1RG0-ZX05 olan servo motor kullanılmıştır.

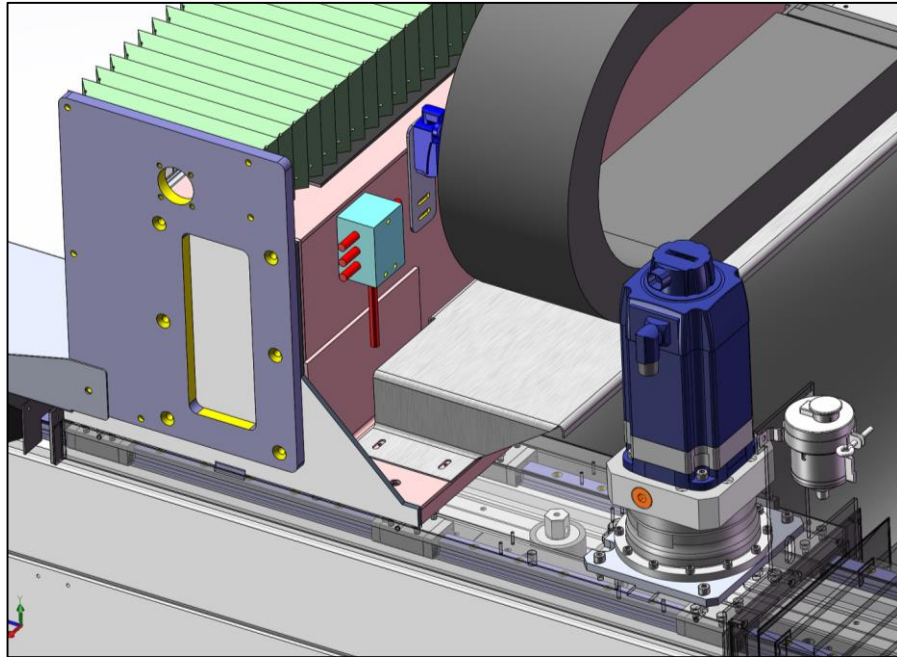
Y-ekseninde tahrik sistemi olarak 2 adet guide rayı üzerinde 4 adet raylı kızak üzerinde eksen yataklaması tasarlanmıştır. Helis pinyon dişli - kremayer sistemi ile

sistem tahrik edilmektedir. Raylı kızaklar 25 mm yüksekliğinde olan tip ve marka olarak Bosch Rexroth seçilmiştir. Raylı kızakların tipleri olarak, ray için guide 20 lik 1605-863-31 / 2020 seçimi yapılmıştır. Benzer şekilde bilyeli araba 20 lik için, tip olarak 1622-823-20 kullanılmıştır.

Y-ekseninde, planet redüktör olarak Alfa marka TP 050S-MF1-10-0G0 seçimi yapılmıştır. Kremayer mil ve dişlisi için modül 3 olan Star marka kullanılmıştır. Tipi ZST-300-PA5-500 M=3 taksimat çapı olarak 65 mm olan helisel pinyon dişli seçilmiştir.

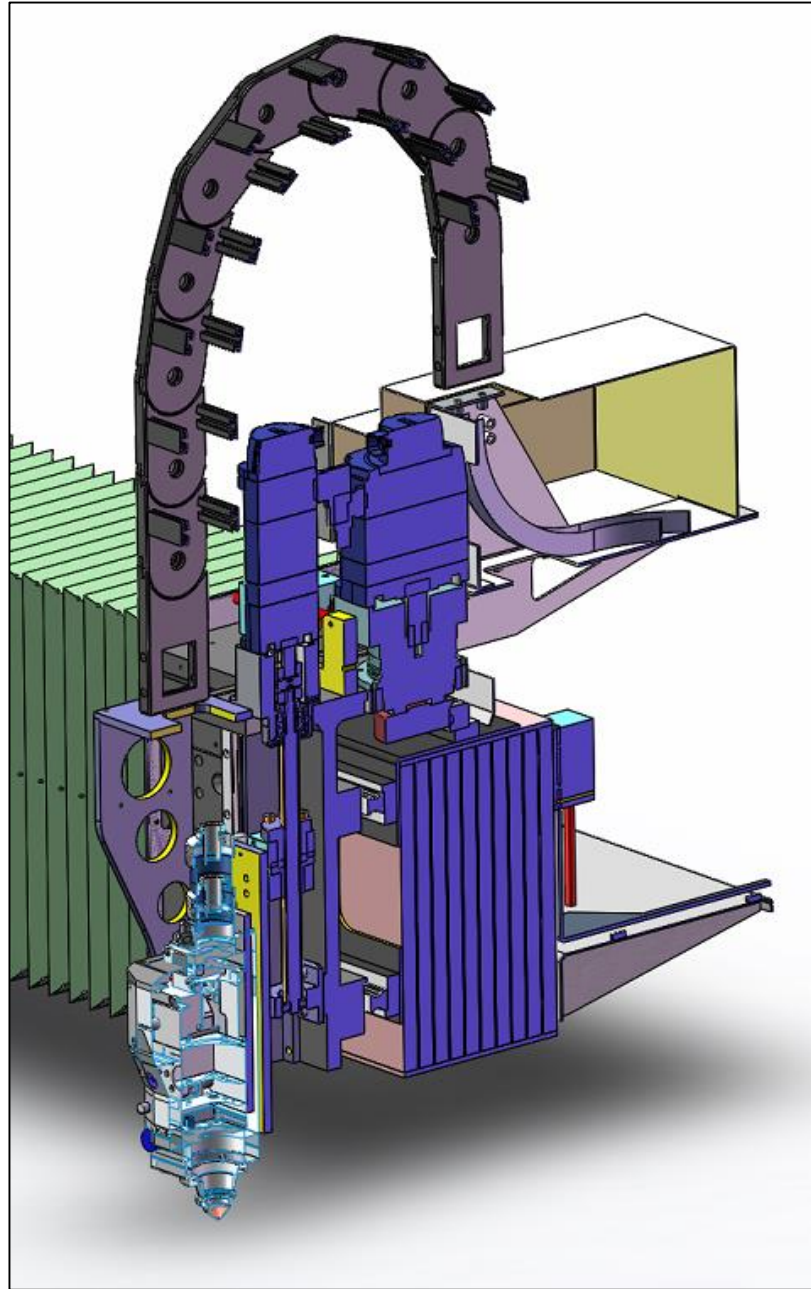
Y-ekseni yönünde Z-eksenin hareketi ve ivmelendirmesi için, Simens Sizer programı üzerinden seçimi yapılan Siemens servo motor ile hareketi sağlanmaktadır. Tip olarak 1FK7060-2AF71-1RG0-ZX05 olan servo motor kullanılmıştır.

Tüm eksenlerde otomatik yağlama sistemi bulunmaktadır. Otomatik yağlama ile eksenlerin yüksek hızlarda ve ivmelerde ömrünün uzaması amaçlanmıştır. X ve Y eksen üzerinde bulunan bilyeli arabalar da aynı anda yağlanmaktadır. Bunun için makine üzerine uyum bir zaman ayarlayıcı yerleştirilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsünün tahrik sistemi servo motor – planet redüktör ile yapılmıştır, sistemin görünümü Şekil 3.18’de verilmiştir. Servo motor – planet redüktör konumu gösterilmiştir.



**Şekil 3.18.** Kompozit Y-eksen, X-eksen servo motor tahrik sistemi gösterimi

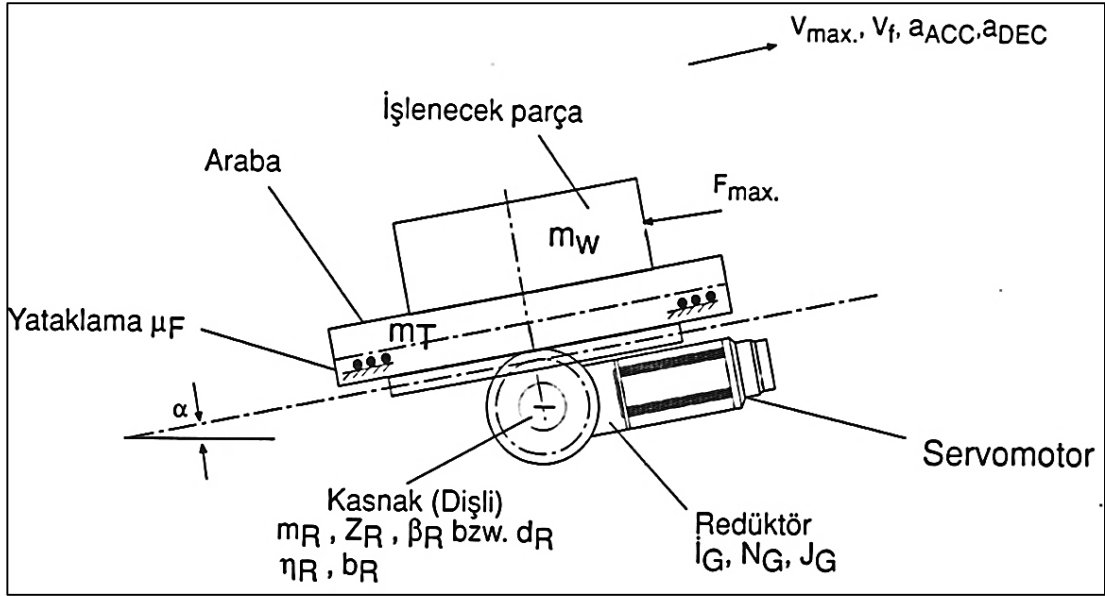
Y-eksen üzerindeki Z-eksen (laser kesim kafası) yataklaması iki adet guide ve 6 adet raylı kızak yardımıyla yapılmıştır. Sağ-sola hareketi ise yani tahrik edilmesi ise Y-eksen üzerinde konumlandırılmış olan Star marka helisel krameyer ve pinyon dişli vasıtasıyla sağlanmıştır. Planet redüktör ile servo motorun helisel pinyon dişliyi döndürülerek sağ-sola hareketleri sağlanmıştır (Şekil 3.19). Uygun yerlere otomatik yağlama sistemi yerleştirilerek, raylı kızakların ve raylı arabaların bir zaman periyodu içinde yağlaması sağlanmıştır. Bu sayede raylı kızakların ömürleri artırılmış ve sürtünmeden dolayı ortaya çıkacak olan sürtünme kuvveti minimize edilmiştir.



**Şekil 3.19.** Kompozit Y-eksen, Z-eksen servo motor tahrik sistemi

### 3.7.5. Hesaplamalar

Lazer kesim makinelerin Y-ekseninde X yönündeki hareketi için gerekli olan döndürme momentleri ve gerekli olan itme kuvveti hesaplanmıştır. Kullanılan servo motor ve planet mekanizmalarının seçimi yapılmıştır. Lazer kesim makinelerin eksen hesaplamaları bir paket program üzerinden yapılabilmesine rağmen ampirik formüller kullanarak da gerekli olan hesaplamaların gözden geçirilmesi zaruridir. Bu nedenle Siemens Sizer programı üzerinden ihtiyaç duyulan hesaplamalar ve ilgili grafikler çıkmış olsa bile ampirik hesaplamalar da yapılmıştır. Basit olarak sistemin temel çalışma mantığına göre oluşturmuş olan Şekil 3.20'den faydalanılmıştır. Hareket edecek yük, tahrik gurubu ve düzlem gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Kompozit Y-eksen şematik gösterimi

- Sürtünme Momenti;

$M_{sür}$  : Sürtünme momenti (N.m)

$m$  : Kütle (kg) - 280 kg

$F_{sür}$  : Sürtünmeyi etkileyen ek kuvvet (N), 50 kg öngörülemeyen kütle olarak kabul edilmiştir.

$\mu$  : Sürtünme katsayısı - 0,05

$d$  : Kasnağın çapı (mm) -  $\varnothing$  65 mm

$\alpha$  : Eğim açısı -  $0^\circ$

$g$  : Yer çekim ivmesi ( $m/s^2$ ) -  $9,81 m/s^2$

$$M_{sür} = \frac{(m \cdot g + F_{sür}) \cdot \mu \cdot d \cdot \cos\alpha}{2 \cdot 1000} \quad (3.1)$$

$$M_{sür} = \frac{(280 \times 2,81 + 50) \times 0,05 \times 65 \times \cos 0}{2 \times 1000} \text{ ise } M_{sür} = 4,55 \text{ (N.m)}$$

- Ağırlık Momenti;

$M_{ağır}$  : Ağırlık momenti (N.m)

$$M_{ağır} = \frac{m \cdot g \cdot d \cdot \sin\alpha}{2 \cdot 1000} \quad (3.2)$$

$$M_{ağır} = \frac{280 \times 9,81 \times 65 \times \sin 0}{2 \times 1000} \text{ ise } M_{ağır} = 0$$

- Ana Momenti;

$$M = M_{sür} + M_{ağır} + M_{işleme} \quad (3.3)$$

$M_{işleme}$  : İşlem için gerekli moment (N.m)

$F_{işleme}$  : İşlem için gerekli itme kuvveti (N)

$a$  : Çalışma esnasındaki ivme ( $m/s^2$ )

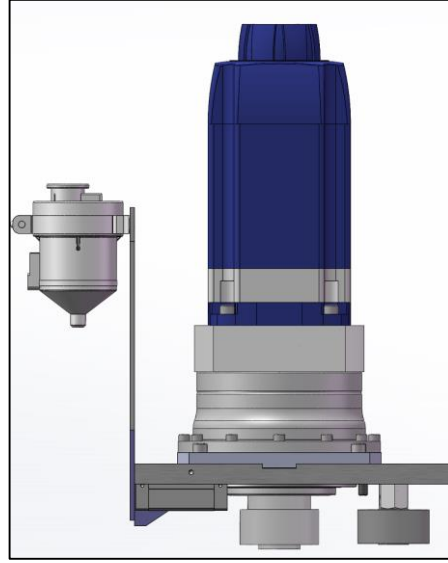
$$F_{işleme} = m \cdot a \text{ ve } F_{işleme} = 280 \times 9,81 \times 2 \text{ ise } F_{işleme} = 5493,6 \text{ (N)} \quad (3.4)$$

$$M_{işleme} = \frac{F_{işleme} \cdot d}{2 \cdot 1000} \quad (3.5)$$

$$M_{işleme} = \frac{5493,6 \times 65}{2 \times 1000} \text{ ise } M_{işleme} = 178,5 \text{ (N.m)}$$

$$M = 4,55 + 0 + 178,5 \text{ ise } M = 183,05 \text{ (N.m) olacaktır.}$$

Kompozit Y-eksen sistemin tahrikinde iki adet servo motor ve planet redüktör kullanılmıştır. Hesaplamalar sonucunda kompozit Y-ekseninin hareketli ve ivmelendirilmesi için gerekli olan toplam döndürme momenti hesaplanmıştır. Bu veriler kullanılarak ve planet redüktörün çevirim oranına bağlı olarak gerekli olan servo motor için gerekli olacak olan minimum döndürme momenti hesaplanmıştır (Şekil 3.21). Hesaplanan minimum döndürme momentine göre yapılan servo motor seçiminin doğruluğu da ispatlanmıştır.



**Şekil 3.21.** Servo motor – planet redüktör mekanizması hareket iletim sistemi

Sistemde kullanılan planet redüktörünün çevrim oranı 10 ve backlash 2'' olarak seçilmiştir (Çizelge 3.3). Bu şartlar altında sistem oldukça hassas olup pozisyon hassasiyeti  $\pm 20 \mu\text{m}$  olacaktır.

- Servo Motor Başına Gerekli Momenti;

$$M_{\text{motor}} = \frac{M}{i. \text{Eksen Sayısı}} \text{ ise } M_{\text{motor}} = \frac{183,05}{10 \times 2} = 9,15 \text{ (N. m) olacaktır} \quad (3.6)$$

- Gerekli Devir;

$n$  : Kaskağın devri (1/dak)

$V$  : Boştaki maksimum hızı (m/dak)

$$n = \frac{V. 1000}{d. \pi} \text{ ise } n = \frac{120 \times 1000}{65 \times \pi} = 587,95 \left(\frac{1}{\text{dak}}\right) \quad (3.7)$$

Z eksen lazer kesim kafası, kaskağın çapı 65 mm olan dişli ile Y-ekseninde hareketi için kütlelerin atalet momenti hesaplanmıştır

- Lineer hareket eden kütlelerin ataleti;

$J_{\text{lin}}$  : Lineer hareket eden kütlelerin ataleti ( $\text{kg.m}^2$ )

$$J_{\text{lin}} = \frac{1}{4} \cdot m \cdot \left[\frac{d}{1000}\right]^2 \text{ ise } J_{\text{lin}} = \frac{1}{4} \times 280 \times 9,81 \times \left[\frac{65}{1000}\right]^2 = 2,90 \text{ (kg. m}^2\text{)} \quad (3.8)$$



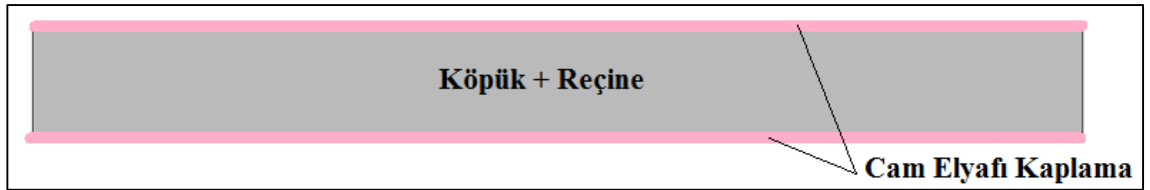
**Çizelge 3.3.** Planet redüktör teknik verileri (Anonim 2014)

Çevrim oranı	i		10		
Optimum ivmelenme torku	$T_{2Bcym}$	Nm	600		
Maksimum ivmelenme torku (max.1000 çevrim/saat)	$T_{2B}$	Nm	540		
Nominal çıkış torku	$T_{2N}$	Nm	240		
Acil durdurma torku	$T_{2Not}$	Nm	1250		
Nominal çıkış hızı (ile T2N ve 20 °C çevre sıcaklığı)	$n_{1N}$	rpm	2500		
Maksimum giriş hızı	$n_{1Max}$	rpm	4000		
Yalın yüklemesiz çalışma torku (with $n_1=3000$ rpm and 20 °C gearhead temperature)	$T_{012}$	Nm	3,5		
Maksimum radyal geri boşluk	$i_t$	arcmin	Standard $\leq 3$ / Yüksek $\leq 1$		
Radyal rijitlik	$C_{t21}$	Nm/arc min	123		
Sallanma rijitliği	$C_{2K}$	Nm/arc min	560		
Maksimum eksenel yük	$F_{2AMax}$	N	6130		
Maksimum sallanma momenti	$M_{2KMax}$	Nm	1335		
Verim tam yükte	$\eta$	%	97		
Servis ömrü	$L_h$	h	>20000		
Ağırlığı	m	kg	14		
Çalışma sesi ( $i=10$ ve $n_1=3000$ rpm yüksüz)	$L_{PA}$	dB(A)	$\leq 65$		
Maksimum izin verilen yatak sıcaklığı	°C		+90		
	F		194		
Çevre sıcaklığı	°C		-15 to +40		
Yağlama			Ömür boyu		
Renk			Mavi RAL 5002		
Koruma sınıfı			IP 65		
Durum Momenti (Sürücü durumuna göre )	G	24	$J_1$	kg.cm <sup>2</sup>	5,54
	I	32	$J_1$	kg.cm <sup>2</sup>	8,71
	K	38	$J_1$	kg.cm <sup>2</sup>	9,78
	M	48	$J_1$	kg.cm <sup>2</sup>	24,4
Yuva çapı [mm]					

### 3.7.6. Kompozit Y-Esken Köprüsünün Tasarımı

Kompozit sektörü tüm dünyada, alternatif malzemelerden pay alarak büyümektedir ve geçen 30 yıl içerisinde global anlamda ekonomik olarak büyümüştür. Endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır inşaat, rüzgâr enerjisi, uzay, havacılık ve otomotiv vb. sektörlerde kullanılmaktadır. Sürekli olarak kullanımı uzun süreli bir gelişme göstermiştir. Kompozit malzemeler termoset veya termoplastik yapıda olmaktadır. Tek ya da çok yönde takviye özelliği sağlayacak şekilde cam elyafı veya diğer takviye malzemelerinden yeterli miktarda (uzunluk ve ağırlıkça kullanımı) katılmış polimer matriks malzemeler oldukları söylenebilir. Bütün plastikler kompozit değildir. Günümüzde plastik malzemelerin büyük çoğunluğu saf plastik reçineler kullanılarak kalıplanmaktadır. Oyuncaklar, dekoratif amaçlı ürünler, ev eşyaları ve benzeri birçok plastik son ürün uygulamasında ürünlerin işlevselliği için saf haldeki plastik reçinenin mukavemeti yeterli olmaktadır. Mühendislik termoplastikleri, maliyetleri saf reçinelere göre daha fazla olmakla beraber daha yüksek yük altında deformasyon sıcaklığı gibi üstün performans değerlerini sağlayabilirler. Yüksek mukavemet değerinin gerekli olduğu durumlarda, genel olarak lif haline getirilmiş takviye malzemeleriyle istenilen mukavemet değerini karşılayacak şekilde takviye edilmişlerdir (Kut 2016).

Tasarlanacak ve üretilecek olan kompozit Y-esken köprüsünde kullanılacak olan kompozit malzemelerin, kullanılan yapı şematik çizimi Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Dış kabuk yüzeylerinde cam elyaf iki plaka arasında köpük olan kompozit malzeme kullanılmıştır. Söz konusu malzemeler plaka halinde bulunup 20 mm ve 15 mm kalınlığında olan kompozit malzemeler kullanılacaktır.



Şekil 3.22. Kompozit ara malzemesi gösterimi (Cam elyafı, reçine ve köpük)

Cam elyafı takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Polimer ile takviye malzemesi arasında kimyasal bir bağ oluşturması için, elyaf üretim prosesi sırasında elyaf yüzeyine “bağlayıcı” uygulanmıştır. Özellikle ıslak ortamda polimerlerin elyafa yapışmasını kolaylaştırmak için yüzey kaplama malzemelerine (coupling agent) yer verilmektedir. Bu nedenle krom kompleksleri, orgono sikon gibi kimyasal bağlayıcılar kullanılmıştır.

Elyaf üretilmesi esnasında, proses sırasında oluşabilecek aşınma nedeniyle elyafın zarar görmesini önlemek amacıyla kaydırıcılar ve film oluşturucular da (polimer emülsiyonlar) elyaf yüzeyine uygulanmıştır. Sentaktik köpükler delikli partiküller ve reçinelerin karışımıyla elde edilmiştir. Takviye malzemesi olan cam elyafında partiküller makro boyutta olup, cam kürecikleri ve seramik camlar kullanılmıştır. İçi boş dolgular, malzemenin tamamının yoğunluğunu azaltır. Bu nedenle, ürünün ağırlığını düşürdüğü için tercih edilmiştir. Sentaktik köpükler çift komponentli ısı izolasyon malzemelerine göre daha yüksek bir basınç direncine ve genel olarak daha üstün mekanik özelliklere sahiptir. Birim alan ağırlıkları 13,5–27 kg arasında değişmektedir (Kut 2016). Sentaktikler genellikle hafifliğin arandığı kopozit Y-eksen için kullanılmıştır. Reçine özelliklerinin maksimum düzeyde korunmasını sağladığı ve yüksek kesme yükünü karşıladığı için tercih edilmiştir.

Tasarlanacak olan kompozit Y-eksen köprüsünde daha önce de söz edildiği gibi cam elyafı reçine ile birbirine yapıştırılmış köpük malzemedan üretilmiş plakalar kullanılacaktır. Farklı kalınlıktaki plakalar bir birlerine reçine ile yapıştırılmıştır. Plakaların kalınlıkları 15 mm ile 20 mm dir. Kompozit Y-eksen köprüsünde 14 adet 20 mm kalınlığında ve 1 adet 15 mm kalınlığında plakalar kullanılmıştır. Cam elyafı kompozitlerin mukavemetini artırmaktadır. Cam elyafı takviyesi, polimer matrisin mekanik dayanımına göre daha düşüktür. Başlıca cam elyafı cinslerinin kompozisyonları % olarak aşağıdaki tabloda verilmiştir (Çizelge 3.4).

**Çizelge 3.4.** Cam elyafı cinsleri (Kut 2016)

	<b>A</b>	<b>C</b>	<b>E</b>	<b>R</b>	<b>S</b>
SiO <sub>2</sub>	72,0	64,6	52,4	60	64,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5	4,1	14,4	25	25
CaO	10,0	13,4	17,2	9	---

Kompozitlerde ara (core) malzeme olarak kullanılan takviye malzemeleri, yüksek mukavemetli iki cidar arasına yapıştırılmıştır. Sandviç konstrüksiyon yapısını I kirişi yapısına benzetebiliriz. I kirişli yapısındaki sandviç ürünlerde, cidarlardan birine yük uygulandığında, yük I kirişini oluşturan ara malzeme içinden kesme gerilmesi aracılığıyla geçerek, üst ve alt cidarlar arasında bağlantı oluşturmaktadır. I kirişinin görevi eğilme dayanımı sayesinde ağırlıktan kaynaklanan yükü hafifletmektir. Cidarlarda artan yüke bağlı olarak, ara malzemenin flanşlarla olan bağlantısının

daraltılması gerekmektedir. Yaygın kullanımı olan kompozit takviye türleri arasındaki bazı temel farklılıkları aşağıdaki çizelgeden görülebilir. Bu çalışmadaki kompozit malzemede takviye elemanı olarak cam elyafı kullanılmış olup takviye malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Çizelge 3.5).

**Çizelge 3.5.** Takviye türlerinin mekanik özellikleri (Kut 2016)

Takviye Türleri	Gerilme Dayanımı (MPa)	Gerilme Modülü (GPa)	Özgül Ağırlık (g/m <sup>3</sup> )	Özellikler
Cam	3000-5000	72-82	2,48-2,60	Yüksek mukavemet. İyi kalıplama. Düşük maliyet
Karbon/Grafit	2500-3000	200-700	1,75-1,96	Yüksek modül. Elektriksel iletkenlik. Yüksek maliyet
Polyester	1000	9	1,38	İyi darbe dayanımı ve kimyasal özellikler
Naylon	950	5	1,16	İyi darbe dayanımı ve Alkali dayanımı
Polietilen	1200-1500	40-60	0,97	Düşük yoğunluk. İyi darbe dayanımı. Düşük derece

Başlıca elyaf malzemeleri olarak cam elyafı, karbon (graphite) elyafı, aramid (kevlar) elyafı, bor elyafı, oksit elyafı, yüksek yoğunluklu polietilen elyafı, poliamid elyafı, polyester elyafı ve doğal organik elyaflar gösterilebilirler. Cam elyafının üstün özellikleri olarak yüksek elastisite modülü, düşük yoğunluğu, yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon dayanımı, yüksek sertlik, yüksek mukavemet ve yorulma dayanımı, bütün reçinelerle kompozit oluşturabilme olarak sıralanabilir. Bu çalışmadaki kompozit malzemede cam elyafı kullanılmış olup takviye malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir. Benzer şekilde diğer elyaf türlerinin karşılaştırmalı olarak fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.6'dan incelenebilir.

**Çizelge 3.6.** Elyaf malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Kut 2016)

Özellik	E-Camı	S-Camı	Bor	Karbon	Kevlar49
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,49	2,68	1,85	1,44
Çekme Muk.(MPa)	2000	4750	3450	2900	3750
Çekme Mod.(GPa)	80	89	414	525	136
Lif Çapı (µm)	3-200	3-13	100-1000	5-13	12
Isıl.G.K (°C <sup>-1</sup> . 10 <sup>-6</sup> )	5	2,9	3	-1	-2
Kopma Uz. (%)	2,75	-	0,7	0,5-1,3	2,5

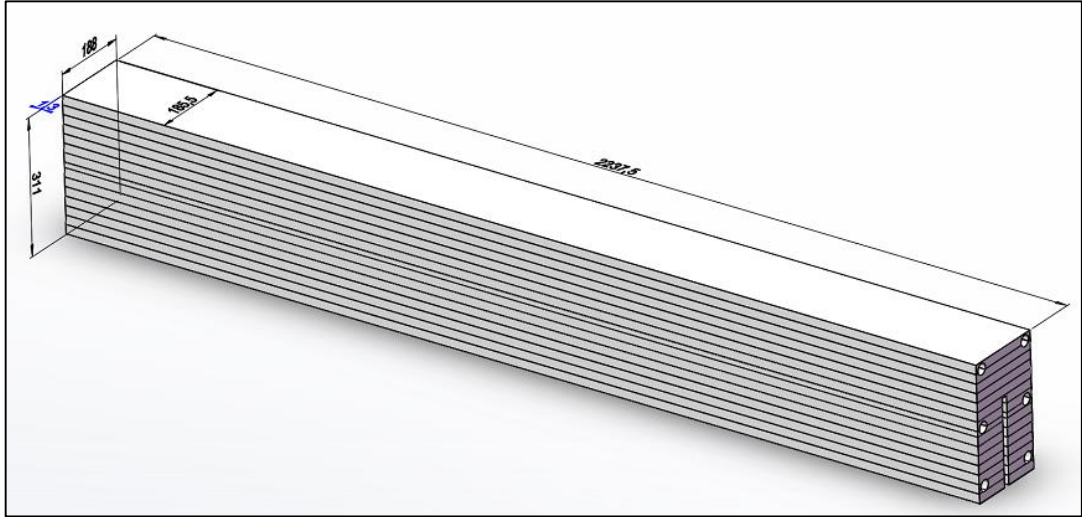


Alüminyum 6063-T6 (ANSI38) serisi malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri aşağıdaki Çizelge 3.7'deki tabloda verilmiştir.

**Çizelge 3.7.** Alüminyum 6063-T6 (ANSI38) serisi mekanik özellikleri

ÖZELİKLER	DEĞER	BİRİM
Elastik Modülü	69000	N/mm <sup>2</sup>
Poisson Oranı	0,33	
Kayma Modülü	25800	N/mm <sup>2</sup>
Yoğunluk	2700	kg/m <sup>3</sup>
Kopma Mukavemeti	240	N/mm <sup>2</sup>
Akma Mukavemeti	215	N/mm <sup>2</sup>
Termal Genleşme Katsayısı	$2,34 \cdot 10^{-05}$	/K
Termal İletkenlik	209	W/(m·K)

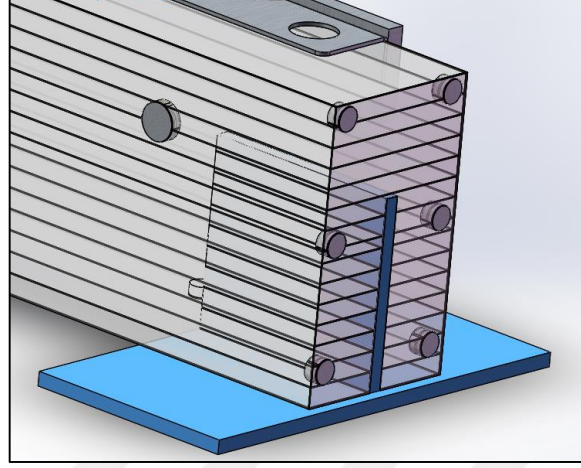
Kompozit Y-eksen köprüsünde kullanılan kompozit plakaların konumlandırılması ve boyutsal olarak gösterimi Şekil 3.24'te verilmiştir. Kompozit plakalar 20 mm kalınlığında üretilmiştir. Kompozit plakaların 14 adeti reçine yardımıyla birebirlerine yapıştırılarak bir dikdörtgenler prizması şeklinde parça üretilmiştir.



**Şekil 3.24.** Kompozit malzemelerin konumlandırılması ve boyutsal gösterimi

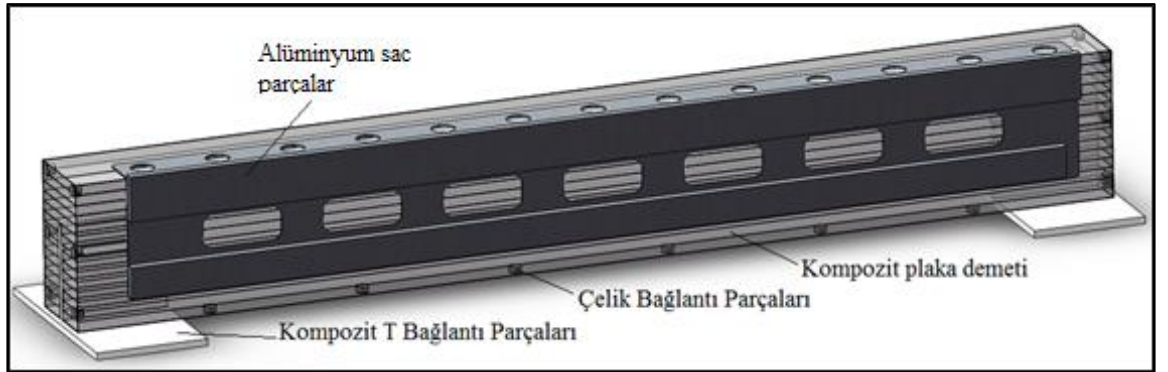
Lazer kesim makinesinin kompozit Y-eksen köprüsünün X-eksenine bağlantı yapılabilmesi için yatay bağlantı parçalarına ihtiyaç vardır. Çünkü kompozit Y-eksen köprüsünün üzerine diş veya delik açmak mümkün değildir. Kompozit Y-ekseninin stabil ve rijit bağlantısı yatay bağlantı parçası yardımıyla yapılacaktır. Yatay bağlantı

paçası da benzer şekilde kompozit plaka ve cam elyafı ile köpükten T şeklinde tasarlanarak üretilmiştir. Kompozit demetine rijit bir bağlantı için 15 mm genişliğinde, 200 mm yüksekliğinde ve 240 mm boyutlarında bir kanal açılmıştır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. Kompozit T yatay bağlantı plakaları

Açılmış olan kanal içinden T şeklindeki yatay bağlantı parçası, reçine yardımıyla kompozit demeti ile birbirlerine yapıştırılmıştır. Yapılan çözüm Şekil 3.25'te verilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsünün alüminyum sac konstrüksiyon, kompozit T şeklindeki yatay bağlantı parçaları ve kompozit plaka demeti bir bütün oluşturmuştur. Tüm parçalar reçine yardımıyla birbirlerine yapıştırılmıştır. Tüm parçaları birbirlerine yapıştırılmış olan kompozit Y-eksen köprüsü Şekil 3.26'de gösterilmiştir.

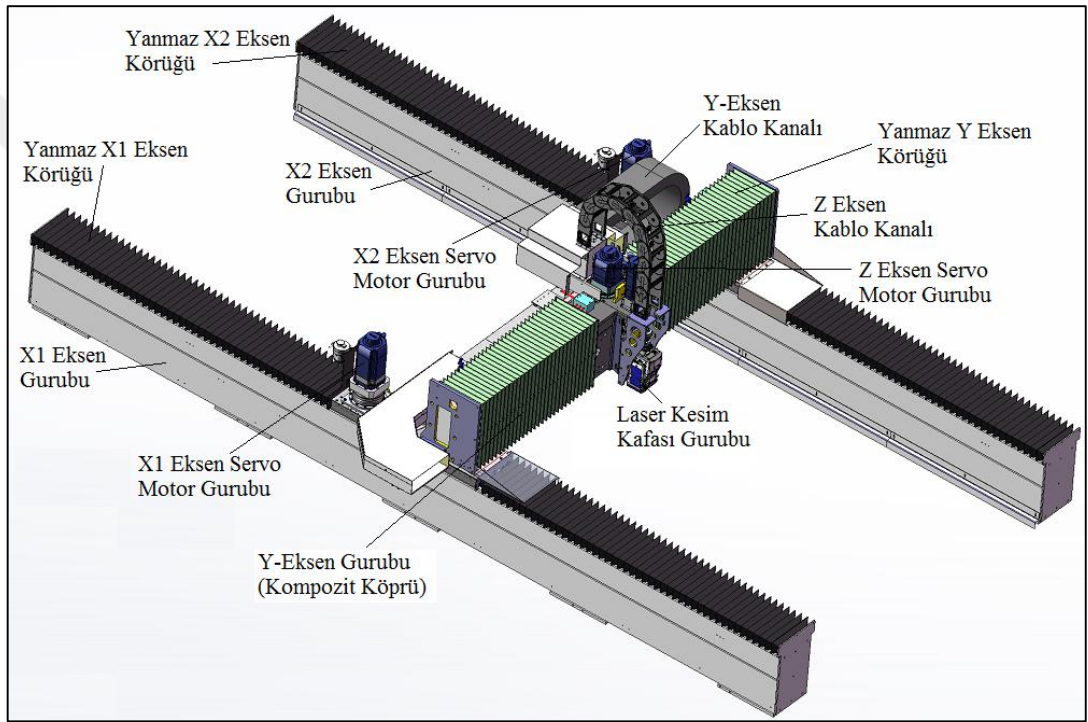


Şekil 3.26. Kompozit Y-eksen kaynaklı konstrüksiyonu

Üretilmiş olan kompozit Y-eksenin, raylı kızaklar ile helisel kramayer dişlinin montajlarının yapılabilmesi için alüminyum bağlantı parçaları talaşlı imalat yöntemiyle işlenmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsünün işlenmesi esnasında metrik delikler

açılmıştır. Üretilmiş olan metrik delikler yardımıyla kablo kanalı sacları ve diğer yardımcı ekipmanların montajı yapılmıştır.

Lazer kesim makinesinin tüm eksenlerinin konstrüksiyonu Şekil 3.27’de verilmiştir. Söz konusu konstrüksiyonda kompozit Y-eksen köprüsü,  $X_1$ - $X_2$  eksenler, Z-eksen lazer kesim kafası gurubu, servo motorlar, planet redüktörler, yanmaz körukler ve kablo koruyucu kanalar gösterilmiştir. Tüm gurupların tasarımı yapılmıştır ve sistemde gösterilmiştir. Lazer kesim makinesinin tasarımı kesim yönünde ve malzeme kesim prosesine uygun olarak tasarlanmıştır.



Şekil 3.27. Lazer kesim makinesi hareket eksenleri

### 3.8. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Nümerik Analizler

Tasarım sonrası doğrulama ve imalata geçmeden önce deneysel olarak sistemin kontrolü için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizler yapılmıştır. Söz konusu analizler statik analiz, modal analiz ve dinamik analiz çalışmaları olarak 3 ana analiz başlığı altına toplanmıştır. Söz konusu analizler karşılaştırmalı olarak mevcut üretilen kafes yapıdaki Y-eksen köprüsü ve kompozit Y-eksen köprüsü için ayrı ayrı yapılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar karşılaştırılarak her iki Y-eksen köprüsü değerlendirilmiştir. Birbirlerine göre üstün veya dezavantajlı olan özellikleri ve parametreleri ortaya çıkartılmıştır. Bu sayede sistemde oluşabilecek lazer kesim



makinesindeki Y-eksen gurubunun kritik gerilemeleri, sehimleri, kritik frekansları ve dinamik davranışlarının titreşime olan etkisi belirlenmiştir. Yapılan analiz hesapları için Solid Works Simulation 2017 sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır.

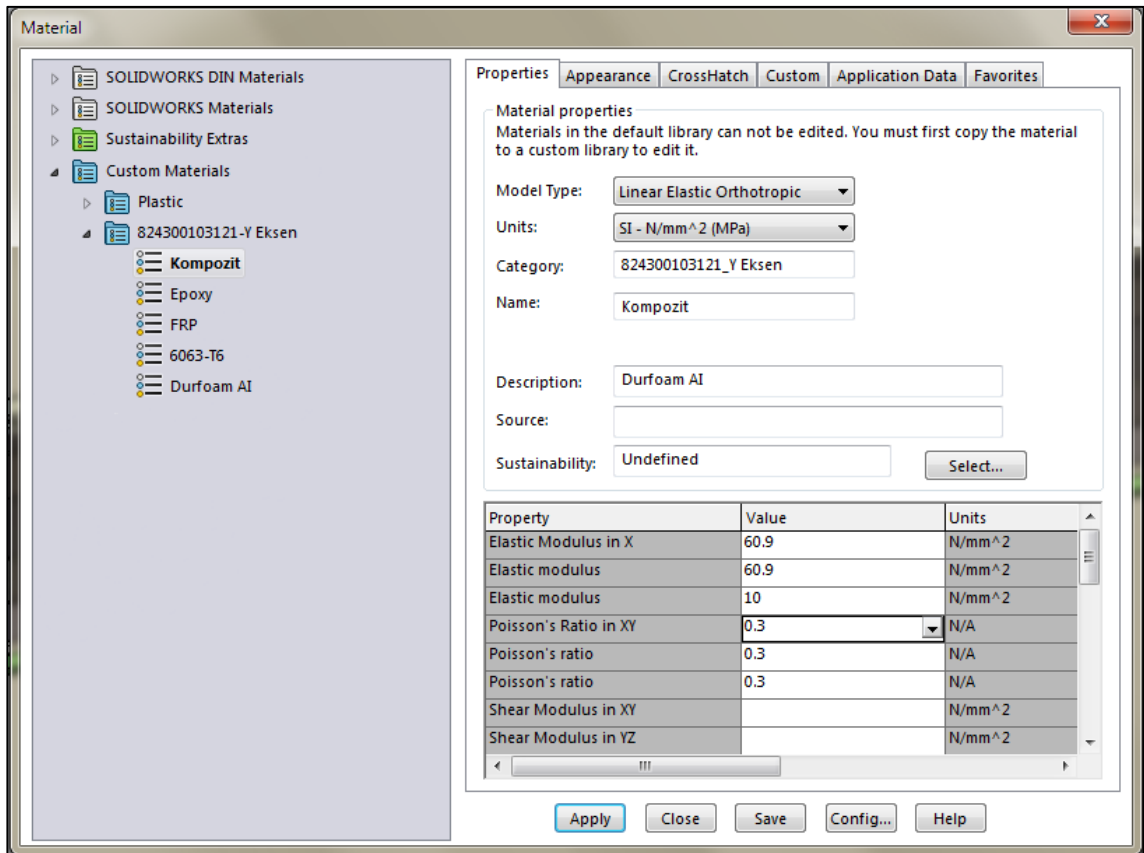
Bu amaçla, tasarım kriteri olarak belirlenmiş kritik hız, ivme ve ivmelenme hızı (jerk) değerlerini kullanarak ekstrem bir operasyon simülasyonu yapılmıştır. Bu simülasyon için esnek çoklu cisim yöntemi kullanılmıştır. Nümerik bir model oluşturulmuştur. Nümerik model maksimum hızda, ivmede ve jerk değerlerinde analiz edilmiştir. Bu ekstrem değerler kullanılarak, nümerik modelin oluşturduğu titreşimler ve titreşimlerin kesim üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu modelin kurulumundaki amaç, lazer kesim makinesi delik delme işlemini gerçekleştirirken lazer ucundaki deformasyon ve titreşimleri elde ederek tasarım kriterlerini sağlayıp sağlamadığını kontrol etmek ve tasarlanarak üretilen kompozit Y-eksen köprüsünün etkilerini seri olan kafes yapıdaki Y-eksen köprüsü ile modelde mukayese edebilmektir. Böylece yapısal yeni tasarımdaki Y-eksenin dinamik davranışı, kurulan bu model üzerinde analiz edilerek, makine üzerinde gerçek ortam koşullarında test edilmiştir.

### **3.9. Sonlu Elemanlar Analizi ve Nümerik Çözüm**

Yapı, sonlu elemanlar modeli oluşturulmadan önce nümerik analiz için aşağıda açıklanmış olan yaklaşımlar ile basitleştirilmiştir. Söz konusu basit yaklaşımlar ile nümerik analiz esnasında büyük bilgisayar donanımı gereksinimi ortadan kaldırılmıştır. Tamamına yakını plaka ve sac yapılardan oluştuğundan, tüm sac yapılar 2D boyutlu kabuk yapıya indirgenmiştir. Motor plakaları ise 3D boyutlu olarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken, ağ yapısı tanımlanmadan önce yapının detaylı olarak malzemesi ve fiziksel özellikleri (elastise modülü, poison oranı, akma ve kopma mukavemet değerleri vb.) tanımlanmıştır. Kompozit Y-eksen köprüsü üzerinde olan tüm elemanların tek tek malzemeleri atanmıştır. Malzeme ataması yapılan tüm malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri de tanımlanmıştır. Kompozit plakaların malzeme özellikleri ataması yapılmadan önce kompozit plakalar detaylı olarak modellenerek tasarımı yapılmıştır. Kompozit plaka dış yüzeylerinde 1 mm kalınlığında cam elyafı (GRP) ve köpük malzeme olarak tasarlanmıştır. Kompozit plakaların bir birlerine yapıştırılması sırasında kullanılan epoksi yapıştırıcı da modellenmiş ve tasarıma ilave edilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsünün en dış kısmında hacimsel olarak epoxy yapıştırıcı kaplama yapılmıştır. Cam elyafı (GRP)

malzeme de modellenmiş ve tasarıma ilave edilmiştir. Malzemelerin mekanik özellikleri yapılan çekme deneyi sonuçlarından faydalanmıştır (Sirena Marine firmasından destek alınmıştır).

Benzer şekilde Kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen köprüsü üzerinde kullanılan alüminyum konstrüksiyonun malzeme tanımlanması da yapılmıştır. Modellenerek tasarıma ilave edilen tüm bileşenlerin malzeme özellikleri de tanımlanarak nümerik analize ilave edilmiştir. Nümerik analizde kullanılmış olan malzemeler ve özellikleri Şekil 3.28’de verilmiştir. Nümerik analizde kompozit malzemeler için uygun olan Linear Elastic Orthotropic malzeme tipi seçimi yapılmıştır.



Şekil 3.28. Malzeme özellikleri ve malzeme tanımlaması

Kompozit malzeme nümerik analizinde malzeme model tipi seçiminin yapılması oldukça önemlidir. Malzeme modeli olarak Linear Elastic Orthotropic seçilmiştir. Bu şekilde analizinin doğru sonuç vermesi sağlanmıştır. Kompozit malzemelerin analizinde söz konusu malzeme modelinin seçilmesi gerektiği Solid Works Simulation tarafından önerilmektedir. Kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen köprüsü nümerik analizinde kullanılmış olan malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri aşağıda verilmiştir. Malzemelerin mekanik özellikleri yapılan çekme deneyi sonuçlarından

faýdalanmıřtır (Sirena Marine firmasından destek alınmıştır). Kompozit plakaların en dış kısımlarında kullanılmış cam elyaf (GRP), köpük malzemeler ve Y-eksen köprüsünün en dış yüzlerinde kullanılan kaplama malzemesi olan cam elyafın (GRP) mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.8’de verilmiştir. Benzer şekilde kompozit plakaları birbirine yapıştıran epoxy yapıştırıcısının mekanik ve fiziksel özellikleri de Çizelge 3.9’da gösterilmiştir.

**Çizelge 3.8.** Kompozit ve GRP malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri

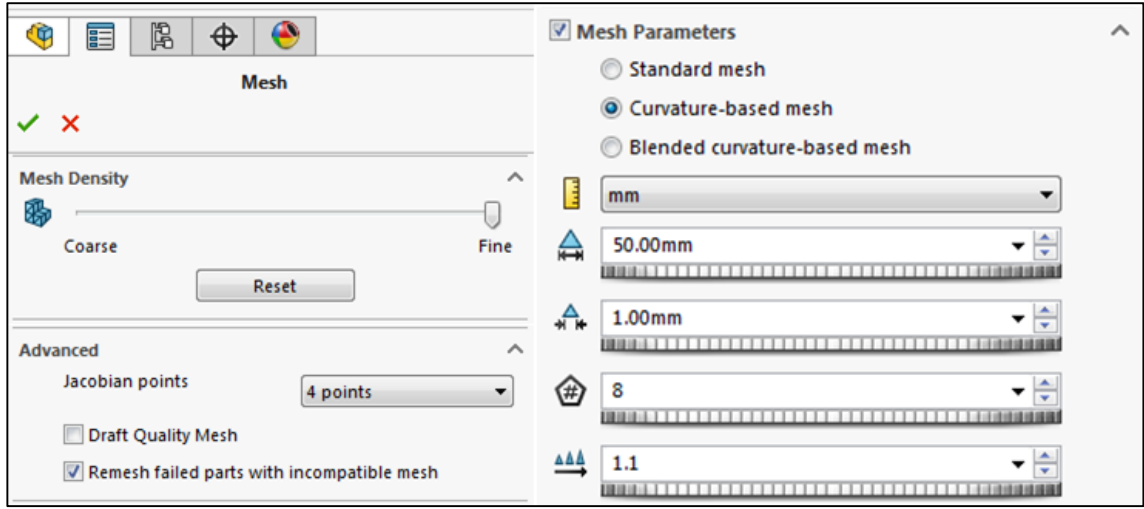
MEKANİK ÖZELLİKLER	KOMPOZİT	GRP	BİRİM
	DEĞER	DEĞER	
Elastik Modülü X - te	1500	60,9	N/mm <sup>2</sup>
Elastik Modülü Y - de	688	60,9	N/mm <sup>2</sup>
Elastik Modülü Z - de	688	10	N/mm <sup>2</sup>
Poisson Oranı XY - de	0,32	0,30	-
Poisson Oranı YZ - de	0,32	0,30	-
Poisson Oranı XZ - de	0,32	0,30	-
Kütle Yoğunluğu	30	1800	kg/m <sup>3</sup>
Kopma Mukavemeti X - de	10,36	6	N/mm <sup>2</sup>
Kopma Mukavemeti Y - de	1,76	6	N/mm <sup>2</sup>
Akma Mukavemeti	11	70	N/mm <sup>2</sup>

**Çizelge 3.9.** Epoxy Malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri

MEKANİK ÖZELLİKLER	EPOXY	
	DEĞER	BİRİM
Elastik Modülü	50	N/mm <sup>2</sup>
Poisson Oranı	0,3	-
Kayma Modülü	4	N/mm <sup>2</sup>
Kütle Yoğunluğu	1800	kg/m <sup>3</sup>
Kopma Mukavemeti	35	N/mm <sup>2</sup>
Akma Mukavemeti	25	N/mm <sup>2</sup>

Daha sonra mesh işlemi yapılmıştır, mesh ile ilgili mesh kontrol seçenekleri seçilmiştir. Mesh yoğunluğu çok iyi olarak seçilmiştir. Mesh parametrelerinden, eğrileri kuran mesh yapısı olan curvature - based mesh seçilmiştir. En büyük eleman boyutu 50 mm ve en küçük eleman boyutu 1 mm olarak seçilmiştir. Dairesel şekillerde mesh için minimum eleman boyutu 8 mm olarak ayarlanmıştır. Yer değiştirme

denklemlerin oluşturması için 4 noktalı Jacobian matrisi, nümerik analiz yöntemi olarak kullanılmıştır. Mesh ile alakalı seçilen parametreler Şekil 3.29'dan görülebilir.



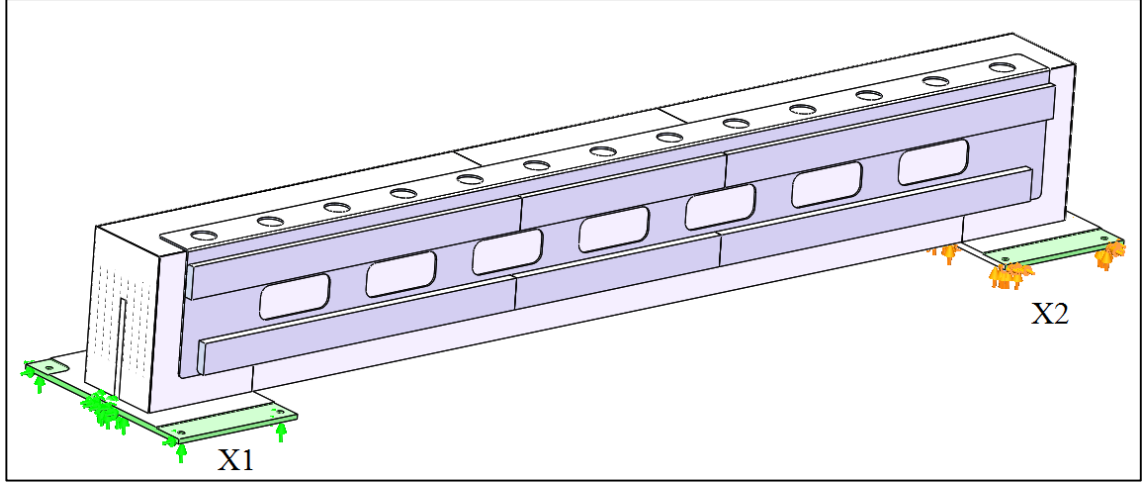
Şekil 3.29. Mesh seçim parametreleri

Kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen köprüsünde kullanılan tüm elemanların bileşenleri modellenmiş ve mesh yapılmıştır. Kompozit plakaların bileşenleri olan cam elyafı (GRP) ve köpük malzemeleri, alüminyum konstrüksiyon, epoxy yapıştırıcı ile dış kaplamalarında cam elyafı (GRP) yüzey yapılarının mesh modellemesinde üçgen kabuk eleman tipleri kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelinin mesh yapısının içerdiği eleman sayıları, düğüm noktası sayıları ve tüm detay verileri Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Sonlu elemanlar modeli eleman ve düğüm noktası sayıları

Mesh Tipi	Solid Mesh
Kullanılan Mesh	Curvature-based mesh
Jacobian Noktaları	4 nokta
Maksimum Eleman Büyüklüğü	50 mm
Minimum Eleman Büyüklüğü	1 mm
Mesh kalitesi	Yüksek
Toplam nodlar	1323269
Toplam eleman sayısı	930262
Maksimum Kabul Oranı	1689,3
Eleman yüzdesi kabul oranı < 3	48
Eleman yüzdesi kabul oranı > 10	33,5
% Yok edilen eleman (Jacobian)	0
Uygun olmayan mesh yapısının iptali	Açık
Mesh tamamlama zamanı (hh:mm:ss)	00:10:09

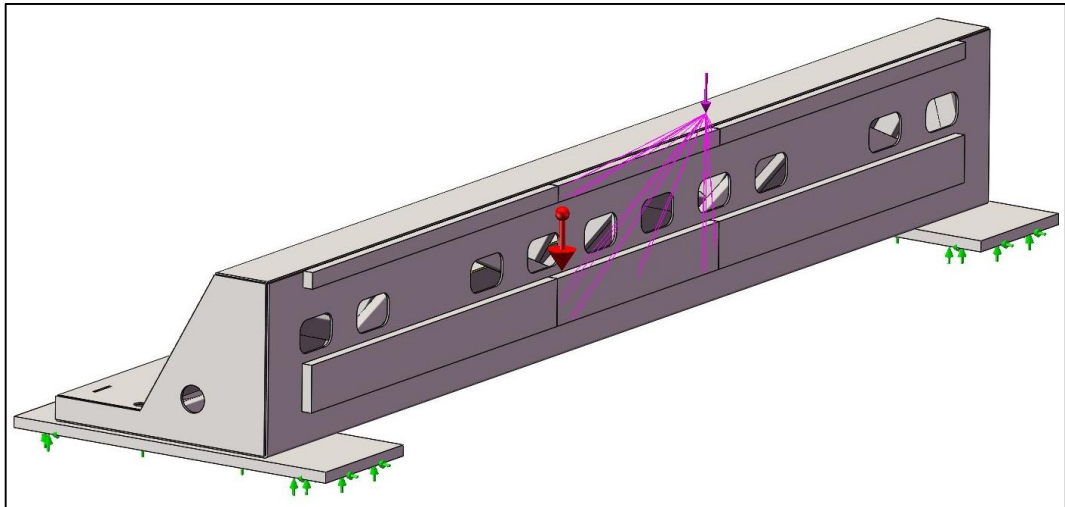
Numerik analizde kompozit Y-eksen köprüsünün sınır koşulları use reference geometry olarak seçilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsü X-eksenine bağlantısının yapıldığı yüzeylerden sınırlanmıştır.  $X_1$ -ekseni yönündeki tüm yer değiştirmeler  $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=0$  olarak seçilmiştir.  $X_2$ -ekseni yönündeki yer değiştirmelerden sadece  $y=0$ ,  $z=0$  olarak seçilmiştir. Bu şekilde sınır koşulları gerçeğe en yakın olarak seçilmiştir. Sınır koşulların gösterimi Şekil 3.30'da verilmiştir.



Şekil 3.30. Kompozit Y-eksen sınır koşulları

Seri olan kafes yapıdaki Y-eksen köprüsü ile kompozit Y-eksen köprüsünün sınır koşulları aynı olacaktır. Seri kafes yapıdaki Y-eksen köprüsünün X-eksenine bağlantısının yapıldığı düzlemlerden sınırlanmıştır.  $X_1$ -ekseni yönündeki tüm yer değiştirmeler  $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=0$  olarak seçilmiştir.  $X_2$ -ekseni yönündeki yer değiştirmelerden sadece  $y=0$ ,  $z=0$  olarak seçilmiştir.

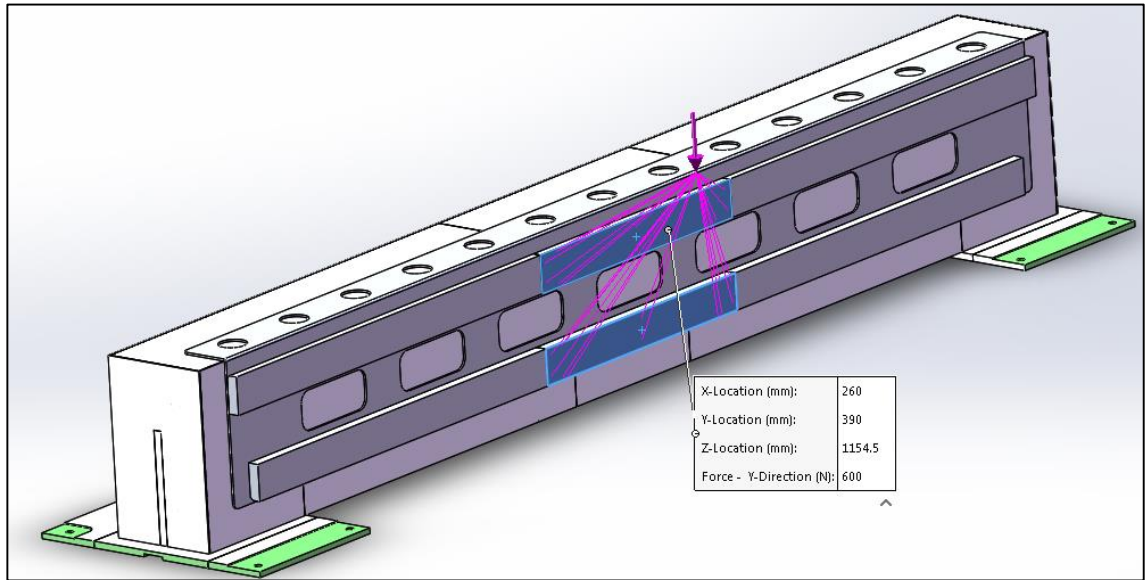
Kafes yapıdaki Y-eksen sınır koşulları Şekil 3.31'de verilmiştir.



Şekil 3.31. Kafes yapıdaki Y-eksen sınır koşulları

Kompozit Y-eksen köprüsü ile kafes yapıdaki Y-eksen köprüsü numerik analizleri, her iki köprünün analizlerinin karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır.

Kompozit Y-eksen köprüsünün bileşenleri birbirlerine epoxy yapıştırıcı ile bağlandıklarından parçalar arasındaki bağlantı yapısı bonded connection olarak seçilmiştir. Bonded connection ilişkisinde parçalar arasındaki düğüm noktalarında, bileşenlerin düğüm noktaları birbirinden ayrılmaz ve birbirlerinin içinde doğru pantere edemezler. Bunların dışında yapının mukavemetine doğrudan katkısı olmamakla beraber (motorlar, kablo ve cihazlar, lazer kafası vb.) yapının atalet karakterini etkileyen parçaların ağırlık merkezleri belirlenerek buralara noktasal kütleler yerleştirilmiş ve bu kütleler yine rijit olan elemanlar ile gerekli görülen bölgelere bağlanmıştır. Z-eksen lazer kesim kafası, X-eksen kablo kanalı, Y-eksen kablo kanalı ve diğer kablo kanallarının bağlantı sacları nümerik analizde mass point olarak tanımlanmıştır. Söz konusu bileşenlerin atalet etkilileri tanımlanan ağırlık noktaları ile nümerik analizde verilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsüne uygulanan mass point ağırlık değerleri Z-eksen lazer kesme kafası için 600 N olarak verilmiştir ve kütlelerin uygulandığı ağırlık noktasının koordinat değerleri Şekil 3.32’de tanımlanmıştır.

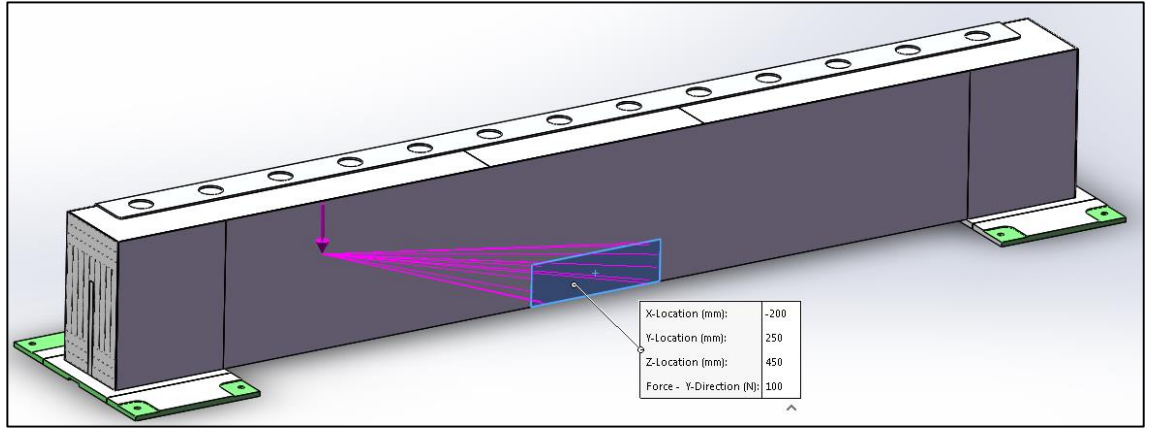


Şekil 3.32. Kompozit Y-eksende lazer kesim kafası mass point gösterimi

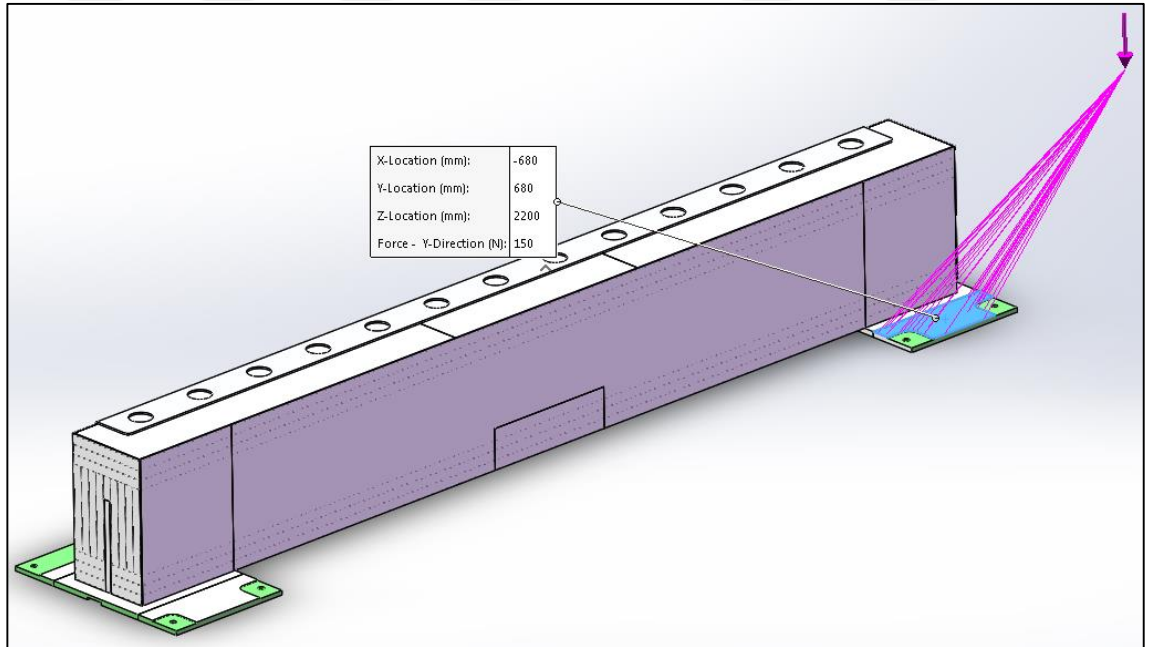
Benzer şekilde X-esken kablo kanalı için ağırlık değeri 100 N olarak verilmiştir ve kütlelerin uygulandığı ağırlık noktasının koordinat değerleri Şekil 3.33’de tanımlanmıştır. Y-eksen kablo kanalı ve kablo kanalı taşıma sacı için ağırlık değeri

150 N olarak verilmiştir ve kütlelerin uygulandığı ağırlık noktasının koordinat değerleri Şekil 3.34’da tanımlanmıştır.

Kablo kanalları içerisinden sistemin sürülmesi için gerekli olan kablolar yerleştirilmiştir. Kablo kanallarından servo motor kabloları, enkoder kabloları ve motorların besleme kabloları geçirilmiştir. Benzer şekilde bu kısımdan Z-eksen lazer kesme kafasının soğutma sıvılarının hortumları geçmektedir. Kütle değerleri olarak gerçekte kullanılan veriler kullanılmıştır.



Şekil 3.33. Kompozit Y-eksende X-eksen kablo kanalı mass point gösterimi

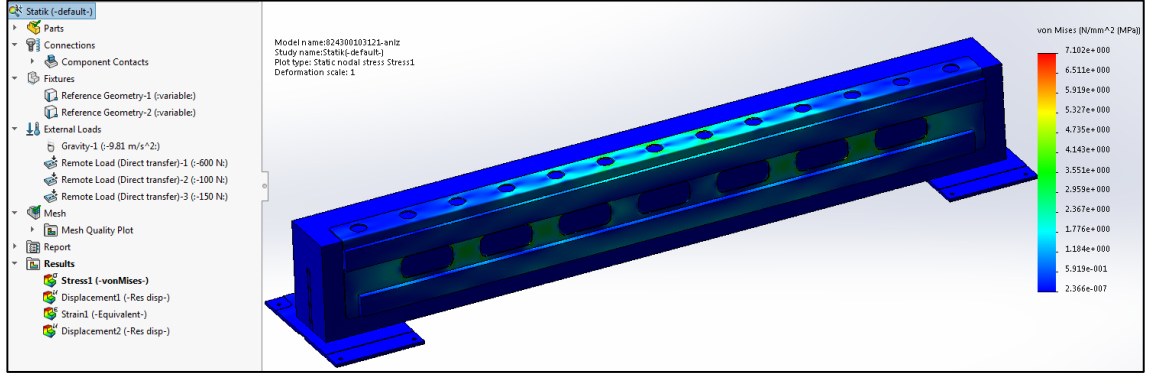


Şekil 3.34. Kompozit Y-eksende Y-eksen kablo kanalı mass point gösterimi

Kompozit Y-eksen köprüsünün davranışını ve kapasitesini belirlemek amacıyla statik analizleri, modal analizleri ve dinamik analizleri yapılarak incelenmiştir.

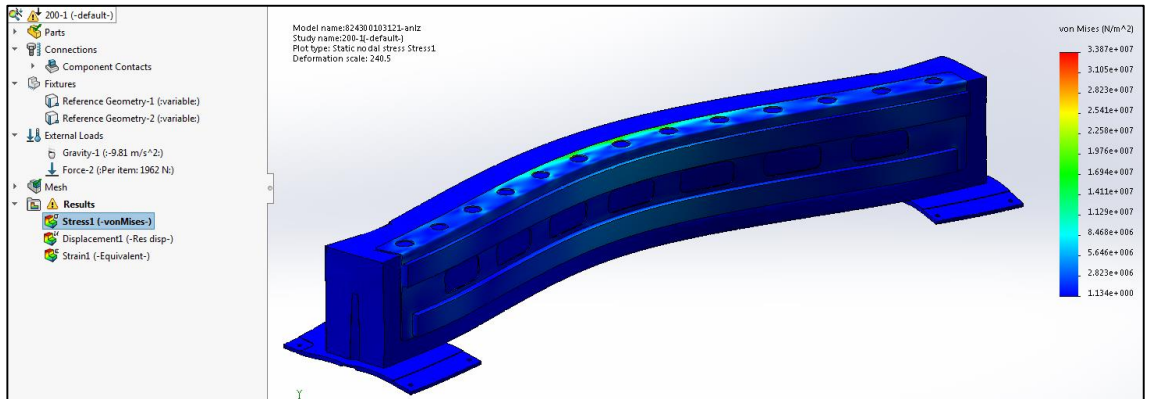
### 3.9.1. Kompozit Y-Eksen Statik Analizi

Kompozit Y-eksen köprüsünün statik davranışı iki ayrı analiz yapılarak incelenmiştir. Yapılmış olan ilk analizde kompozit Y-eksen köprüsü üzerinde tanımlanmış olan mass point kütle değerlerine göre statik davranışı incelemiştir. Uygulanmış olan mass point kütle değerleri ve koordinatları yukarıda açıklamıştır. Yapılmış olan statik analiz ve analiz parametreleri Şekil 3.35'te verilmiştir. Şahimler ve gerilmeler hesaplanmıştır.



Şekil 3.35. Kompozit Y-eksen köprüsünün statik analiz sonucu

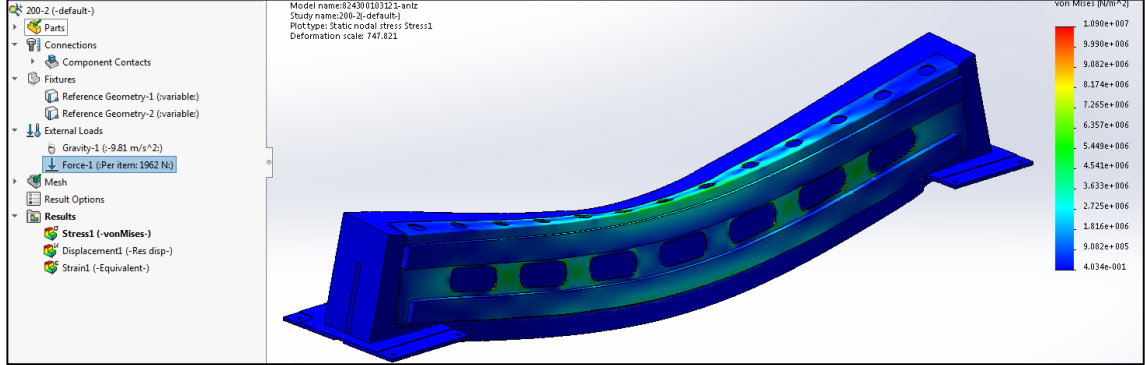
Diğer statik analizde ise kompozit Y-eksen köprüsünün maksimum taşıma kapasitesi belirlenmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsünün tam ortasına X-eksen yönünde 2000 N luk bir kuvvet uygulanmıştır. Kompozit Y-eksen köprüsünün, X-eksen yönündeki maksimum şahim ve gerilme değerleri tespit edilmiştir. Benzer şekilde Z-eksen yönünde de 2000 N luk bir kuvvet uygulanmıştır. X-eksen ve Y-eksen yönünde iki ayrı statik analiz yapılmıştır. İki statik numerik analizde kompozit Y-eksen köprüsünün statik olarak X-eksen yönünde Şekil 3.36'da dayanabileceği maksimum kuvvete göre şahimler ve gerilemeler tespit edilmiştir.



Şekil 3.36. Kompozit Y-eksen köprüsünün X-eksen yönünde statik analiz sonucu



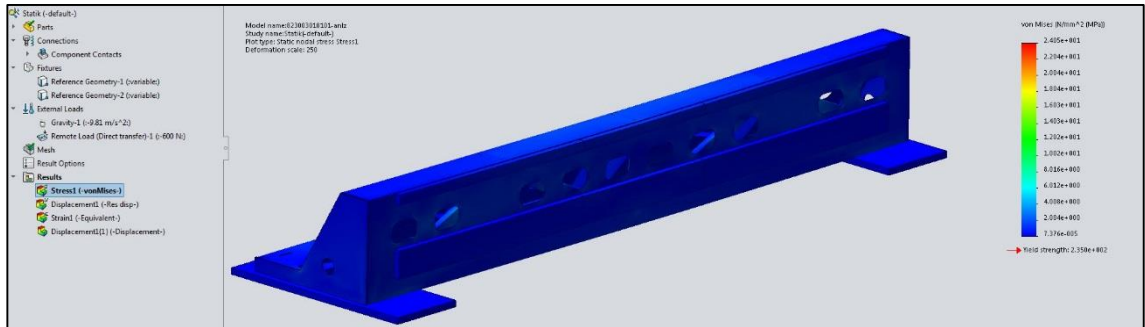
Benzer şekilde kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen köprüsünün Z-eksen yönünde dayanabileceği maksimum kuvvete göre sehimler ve gerilmeler Şekil 3.37’de tespit edilmiştir.



Şekil 3.37. Kompozit Y-eksen köprüsünün Z-eksen yönünde statik analiz sonucu

### 3.9.2. Kafes Yapıdaki Y-Eksen Statik Analizi

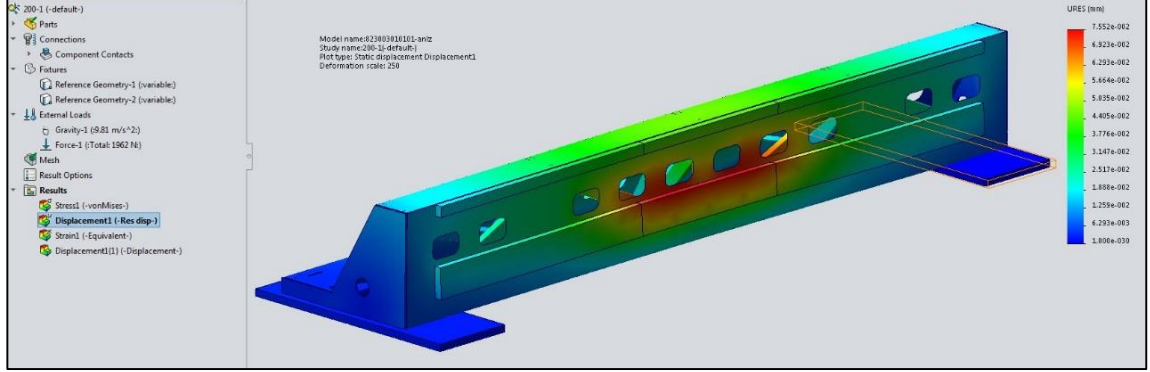
Kafes yapıdaki Y-eksen köprüsünün statik davranışı iki ayrı analiz yapılarak incelenmiştir. Yapılmış olan ilk analizde kafes yapıdaki Y-eksen köprüsünün üzerinde tanımlanmış olan mass point kütle değerlerine göre statik davranışı incelemiştir. Uygulanmış olan mass point kütle değerleri ve koordinatları yukarıda açıklamıştır. Yapılmış olan statik analiz ve analiz parametreleri Şekil 3.38’de verilmiştir. Sehimler ve gerilmeler hesaplanmıştır.



Şekil 3.38. Kafes yapıdaki Y-eksenin statik analiz sonucu

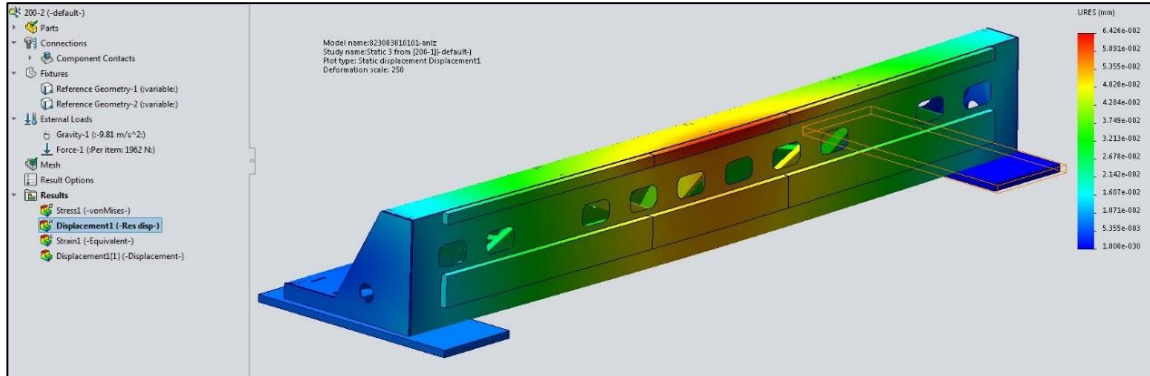
Diğer statik analizde ise kafes yapıdaki Y-eksen köprüsünün maksimum taşıma kapasitesi belirlenmiştir. Kafes yapıdaki Y-eksen köprüsünün tam ortasına X-eksen yönünde 2000 N luk bir kuvvet uygulanmıştır. Kafes yapıdaki Y-eksen köprüsünün, X-eksen yönündeki maksimum sehim ve gerilme değerleri tespit edilmiştir. Benzer şekilde Z-eksen yönünde de 2000 N luk bir kuvvet uygulanmıştır. X-eksen ve Y-eksen yönündeki sehim ve gerilme değerlerinin hesaplanması için iki ayrı statik analiz

yapılmıştır. İki statik numerik analizde kafes yapıdaki Y-eksen köprüsünün statik olarak X-eksen yönünde dayanabileceği maksimum kuvvete göre sehimler ve gerilmeler Şekil 3.39’da tespit edilmiştir.



**Şekil 3.39.** Kafes yapıdaki Y-eksenin X-eksen yönünde statik analiz sonucu

Benzer şekilde kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen köprüsünün Z-eksen yönünde dayanabileceği maksimum kuvvete göre tespit edilen sehimler ve gerilmeler Şekil 3.40’da gösterilmiştir.



**Şekil 3.40.** Kafes yapıdaki Y-eksenin Z-eksen yönünde statik analiz sonucu

### 3.9.3. Kompozit Y-Eksen Modal Analizi

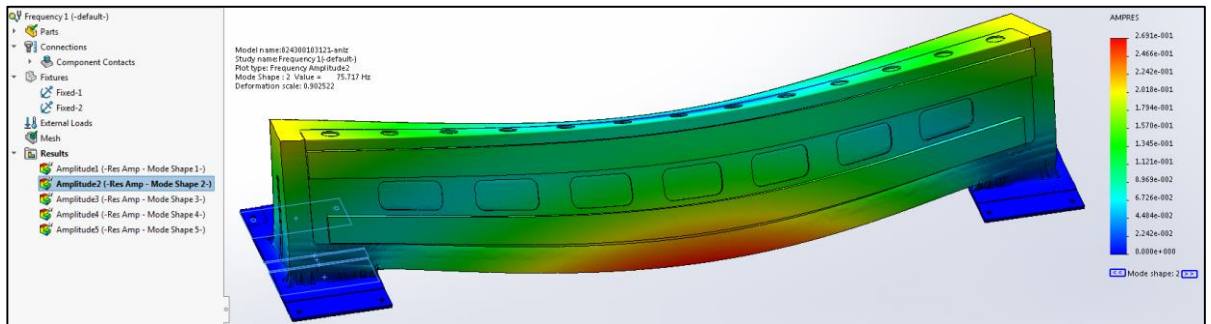
Lazer kesim makinalarında özellikle bileşen konstrüksiyonlarda doğal frekans ve rezonans konusu oldukça önemlidir. Lazer kesim makinelerinin konstrüksiyonlarında zaman zaman nereden kaynaklandığı bilinmeyen titreşimlere rastlanmıştır. Bu titreşimler kesim kalitesini doğrudan etkilemiş, makinanın arızalanması veya bir bileşen konstrüksiyonun çökmesine kadar giden ciddi sonuçlar doğurmuştur. Rezonans konusu doğal frekans ve rezonans kavramları ile açıklanmıştır.

Y-eksen köprüsünün doğal frekansı; Y-eksen köprüsünün sadece esnekliğine, kütlesine bağlı olan ve Y-eksen köprüsünün o frekansta uyarılmasıyla yüksek genlikle, sürekli olarak titreşeceği frekans tespit edilmiştir.

Y-eksen köprüsünün doğal frekansı, Y-eksen köprüsü o frekansta bir kere uyarıldıktan sonra uyarı kesilse bile titreşmeye devam eder. Y-eksen köprüsünün doğal frekansın diğer bir özelliği de Y-eksen köprüsü doğal frekansında uyarıldığında uyarının şiddetine bağlı olmayıp, sadece sistemde mevcut sönümlenmeye bağlı olarak çok yüksek genliklerde titreşir. Örneğin, doğal frekansta uyarılan bir çelik konstrüksiyonda titreşim genliği, uyarının genliğinin 10 katına ve daha yukarıya çıkabilir.

Y-eksen köprüsünün doğal frekansıyla çakışan bir frekansta uyarılması sonucunda Y-eksen köprüsünün rezonansı tespit edilmiştir. Rezonansa girmiş Y-eksen köprüsü aşırı şekilde titreşir. Zira bu frekansta Y-eksen köprüsü üzerine etki eden atalet kuvvetiyle Y-eksen köprüsünün esnekliğinden kaynaklanan yay kuvveti birbirine eşittir, fakat ters işaretli olduğundan birbirini götürmektedir. Geriye sadece sönümlenme kuvveti kalır. Bu kuvvetle de Y-eksen köprüsünün sönümlenme katsayısına bağlı olarak Y-eksen köprüsünün hangi genlikle titreşeceği tespit edilmiş olur. Bu kuvvet ortadan kaldırıldığında Y-eksen titreşmeye devam ediyorsa o zaman frekans, doğal frekans olarak tespit edilmiştir. Rezonans meydana geldiğinde titreşim genliğine sadece sönümlenme katsayısı karar verir. Sönümlenme artırıldığı takdirde, titreşim genliğini azaltmak mümkündür. Buna bağlı olarak Y-eksen köprüsünün konstrüksiyonunda rezonans durumuna karşı bir miktar önlem alınmıştır.

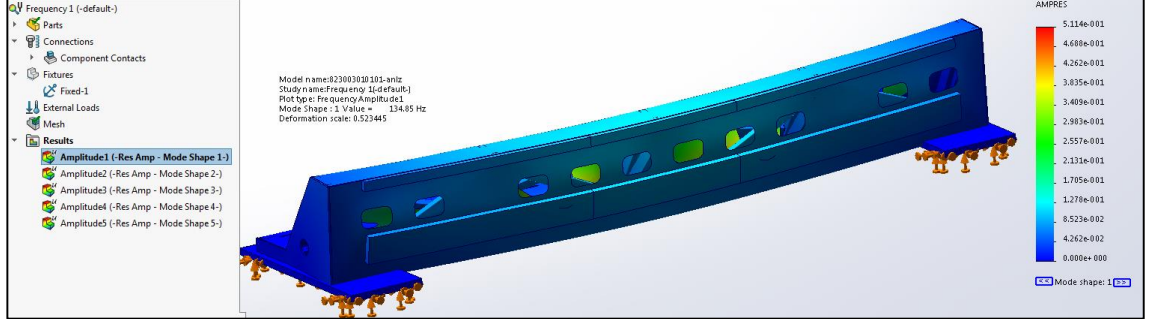
Modal analiz ile genliğin sonsuza gittiği frekans hesaplanmıştır. Kompozit Y-eksen köprüsünün doğal frekansını belirlemek amacıyla, sönüm değerleri ve yapısal deformasyonuna bağlı bir değer olan modal biçimini içeren dinamik karakterli analiz yapılarak sonuçlar Şekil 3.41’de verilmiştir.



Şekil 3.41. Kompozit Y-eksen köprüsünün modal analiz sonucu

### 3.9.4. Kafes Yapıdaki Y-Eksen Modal Analizi

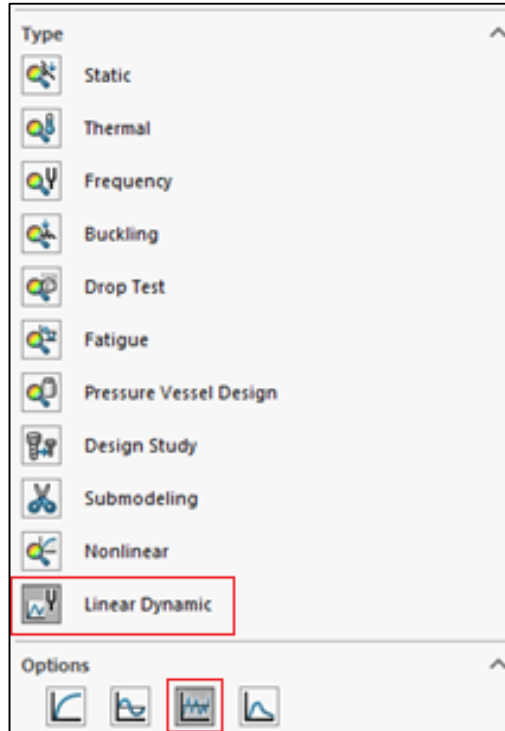
Kompozit Y-esken köprüsü için yapılmış olan modal analizin benzeri kafes yapıdaki Y-eksen için de Şekil 3.42’de yapılmıştır.



Şekil 3.42. Kafes yapıdaki Y-eksen modal analiz sonucu

### 3.9.5. Dinamik Analiz Modeli Oluşturma

Geometrinin Solid Works Simulation 2017 modülüne aktarılmasından sonra, ortam ayarları environment settings yapılmıştır. Bu ayarlar analizin tipi ve çözücü için yapılmaktadır. Ayarlarda analiz tipi Şekil 3.43’de görüldüğü lineer dinamik olarak seçilmiştir. Ayrıca çözücü ayarlarında, bir sonraki adımda dinamik analizin Initial Condition ları seçilmiştir. En son olarak yapının maruz kalacağı dinamik etkinin tipi random vibration olarak analize dâhil edilmiştir.

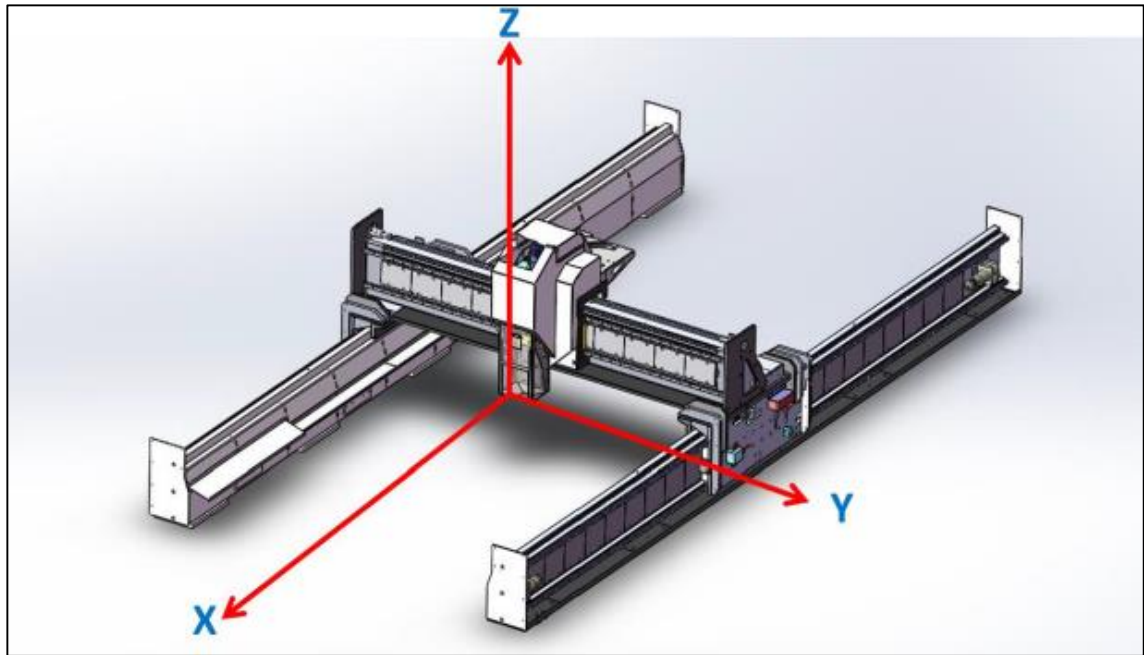


Şekil 3.43. Lineer dinamik ortam ayarları

Solid Works Simulation 2017 ortamına aktarılan CAD geometrisinin, bu ortamda nümerik analizinin yapılabilmesi için kompozit Y-eksen köprüsü üzerinde olan sabit yükler ve dinamik etkiler tanımlanmıştır. Kompozit Y-eksen köprüsü üzerindeki sabit ağırlıklar olan Z-eksen kesme kafası, Y-eksen kablo kanalı ve kablo kanalların bağlantı sacları için mass point ataması yapılmıştır. Söz konusu mass point tanımlamaları remote load vasıtasıyla ortalama kuvvet olarak aktarılmaktadır. Kompozit Y-eksenin dinamik nümerik analizi için ivmelene değeri  $19,62 \text{ m/s}^2$  (2G kabul edilmiştir) olarak initial condition tanımlanmıştır. Dinamik hareketler için bazı tanımlamalar yapılmıştır. Lazer kesme makinesinde, Y – eksen köprüsü ile ana raylar arasında X eksen doğrultusunda ileri geri hareketi sağlamak için slider bağlantısı kurulmuştur. Y-ekseninde hareketi sağlayan motor plakası ile köprü arasında slider bağlantısı ve Z–eksen lazer kafa grubu ile Y eksen motor plakası arasında aşağı yukarı hareketi sağlamak için slider bağlantısı olmak üzere toplamda 3 slider bağlantısı kurulmuştur. Ayrıca ana rayların hareketini engellemek için bu parçalar buldukları noktalara sabitlenmiştir.

### 3.9.6.Hareket Girdilerinin Tanımlanması

Girdi için öncelikle mekanizmanın yapacağı hareket belirlenmiştir. Lazer kesim makinesinin kesme ucunun 4 mm yarıçapında daireler kesebileceği şekilde girdiler tanımlanmıştır. Makinenin eksenleri kartezyen koordinatları olarak Şekil 3.44’de verilmiştir.



Şekil 3.44. Lazer kesim makinesin eksen koordinat gösterimi

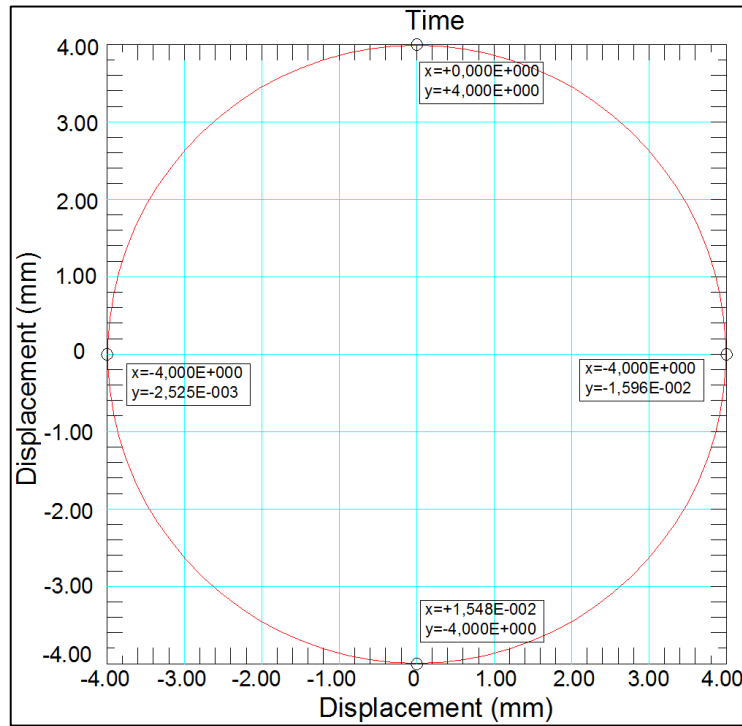
Lazer kesim tezgâhında dairesel bir kesim için aşağıdaki fonksiyonların tanımlaması yapılmıştır. Söz konusu fonksiyonların kesilen dairenin çapına ve kompozit Y-ekseninin konumuna bağlı olduğu gösterilmiştir. Lazer kesim tezgâhında herhangi bir r yarıçaplı dairenin kesilebilmesi için aşağıdaki fonksiyonlar kullanılmıştır. Kompozit Y-eksenin hareket eğrisi x ve y bileşenlerine bağlı olarak hesaplanmıştır.

x ve y bileşenleri şu şekildedir;

$$y = r \cdot \sin(\alpha)$$

$$x = r \cdot \cos(\alpha)$$

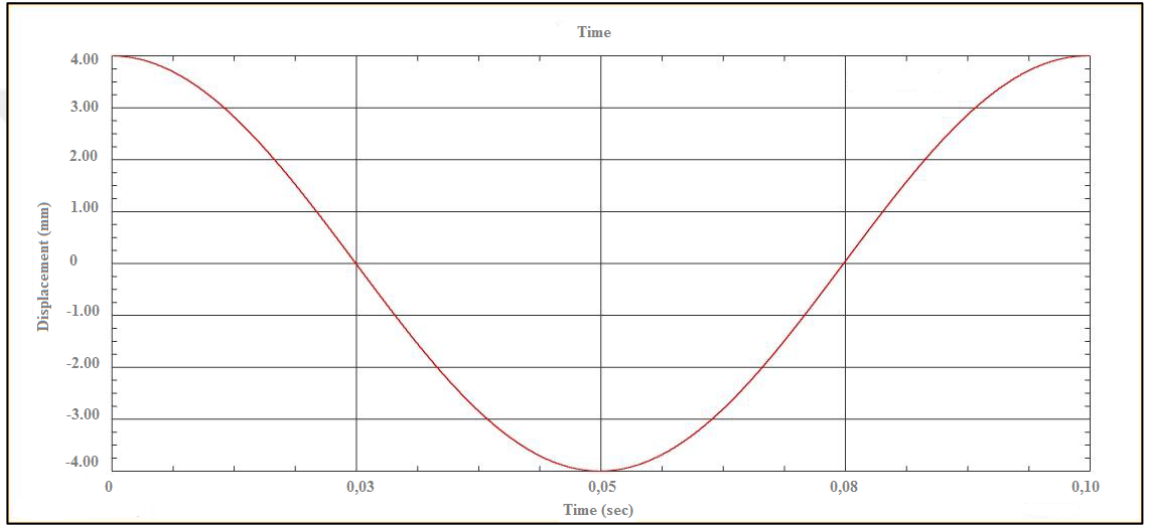
Dairesel bir hareket olduğundan konum fonksiyonları açısal hız ve ivmeye bağlı olacak şekilde türetilmiştir. Dairesel kesim hareketi zamana bağlı olduğundan,  $\alpha$  yerine  $(\omega.t)$  yazılır. Lazer kesim makinelerinde ivmenin türevi olan ivmelenme hızı olarak tanımlanmış olan jerk değeri kullanılmıştır. Hesaplamalarda ivmenin hızı olan jerk değeri  $1000 \text{ m/s}^3$  kabul edilmiştir. Jerk değeri lazer kesim makinelerinde çoğunlukla optimum titreşim değerlerini elde etmek için  $1000 \text{ m/s}^3$  olarak kabul edilmektedir. x veya y bileşeninin ivmesinin türevi ivme hızına eşitlenmiş ve buradan  $\omega$  değeri 1,1 rad/s hesaplanmıştır. Girdi olarak kullanılmış olan 4 mm çapındaki dairesel kesimlerin konum grafiği Şekil 3.45’de verilmiştir.



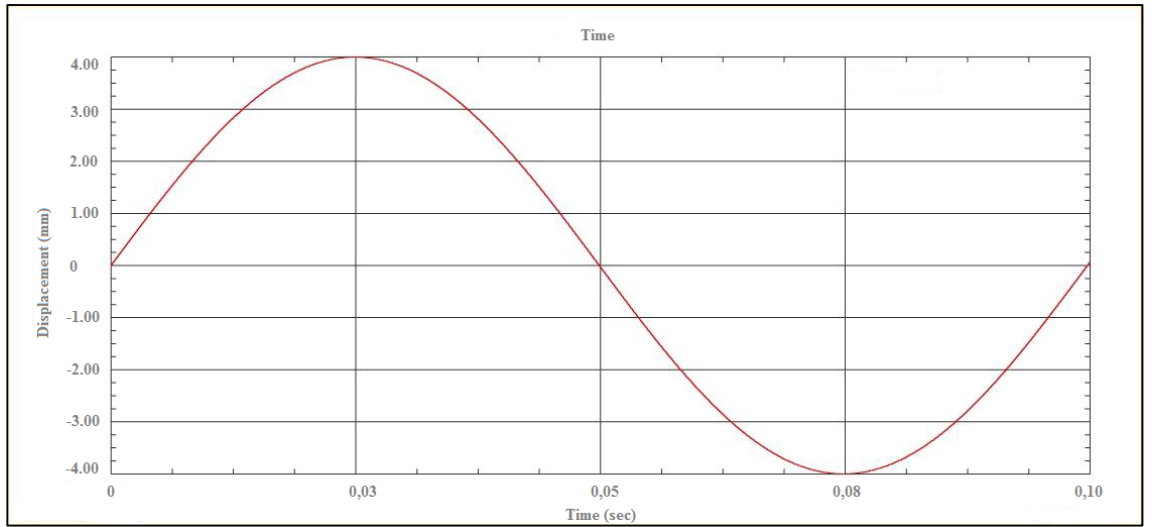
Şekil 3.45. Lazer kesim tezgâhın gerçekleştireceği konum girdisi

Girdi için öncelikle kompozit Y-eksenin yapacağı hareket belirlenmiştir. Lazer kesme ucunun 4 mm yarıçapında daireler kesebilecek şekilde girdiler tanımlanmıştır. 4 mm çapındaki dairenin konum grafiği lazer kesim makinesinin kontrol yazılımı olan Simumerik üzerinden alınmıştır.

Benzer şekilde zamana ve yer değiştirmeye göre hareket girdisi eğrileri, lazer kesim makinesinin kontrolü olan Simumerik üzerinden alınmıştır. Konum eğrileri zamana bağlı olarak  $\cos(\alpha)$  eğrisi Şekil 3.46'da ve  $\sin(\alpha)$  eğrisi Şekil 3.47'de verilmiştir. Dairesel hareket koşulu bu şekilde tanımlanmıştır.



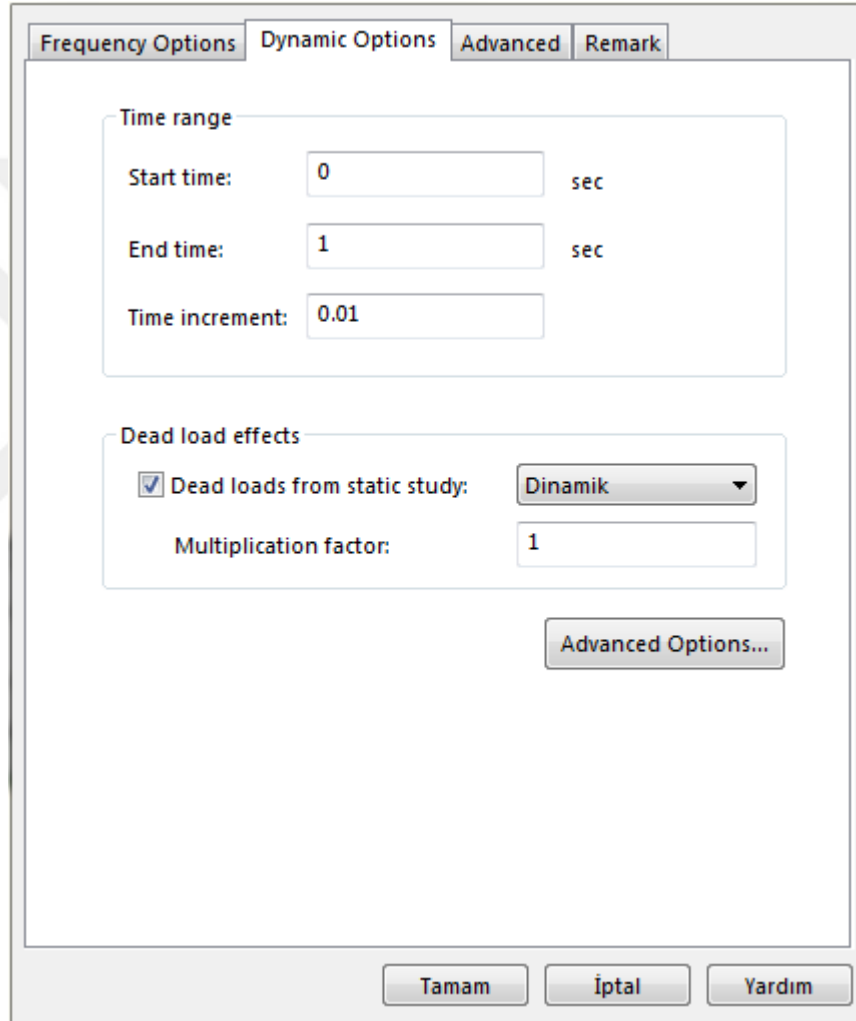
Şekil 3.46. X - eksenini boyunca zamana bağlı konum girdisi



Şekil 3.47. Y - eksenini boyunca zamana bağlı konum girdisi

### 3.9.7. Analizin Çözümü

Analiz girdileri tanımlandıktan sonra yapı hem rijit hem de esnek olarak aynı çözüm süresi 0,1 s ve tam bir tur süresi 500 adımda çözülmüştür (Şekil 3.48). Adım sayısının yüksek tutulmasındaki amaç, çözünürlüğü artırarak daha hassas sonuç elde etmektir. Esnek yapı çözümü için ayrıca Solid Works Simulation 2017 içerisinde bulunan flexible body seçeneği ile rijit linkler esnek yapılara dönüştürülmüştür. Aşağıda yer alan sonuçlar bölümünde esnek body için elde edilen bulgular gösterilmiştir.



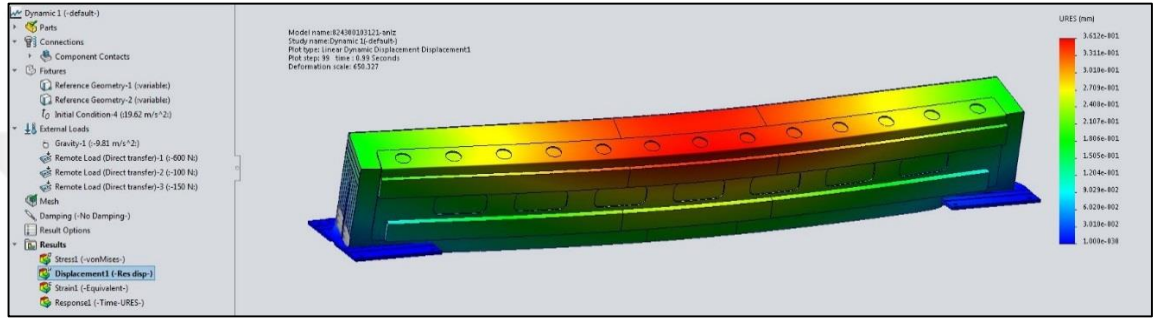
Şekil 3.48. Esnek gövde çözüm aralığı

### 3.9.8. Kompozit Y-Eksen Köprüsü Dinamik Analizi

Kompozit Y-eksen köprüsünde kullanılan alt bileşenlerinin malzeme tanımlamaları ve malzeme özelliklerinin ataması yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi ve nümerik çözüm bölümünde kompozit Y-eksen köprüsünün dinamik analizi detaylı olarak açıklanmıştır. Seçilen eleman büyüklüğüne göre mesh yapılarak, kompozit Y-eksen nodlara ve



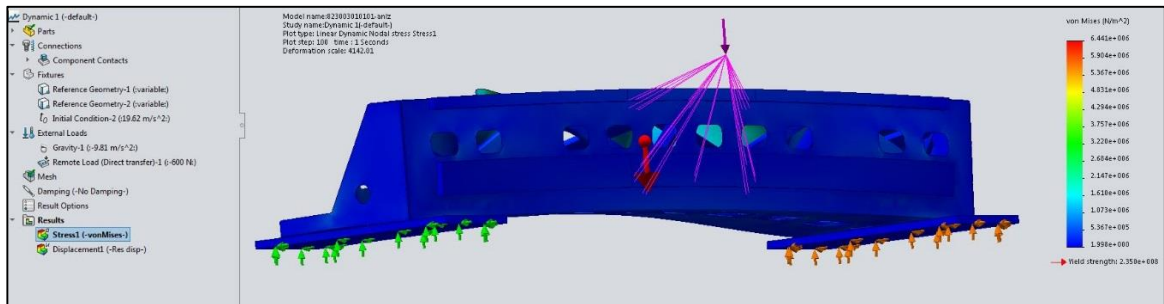
elemanlara bölünmüştür. Kompozit-alüminyum hibrit Y-ekseninin numerik analiz için gerekli olan sınır koşulları seçilerek tanımlamaları yapılmıştır. Kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen üzerinde olan lazer kesim tezgâhının bileşenleri mass point olarak gösterilmiş ve kütle değerleri verilmiştir. Lazer kesim tezgâhının çalışma koşullarındaki kompozit Y-eksenin ivme değeri initial condition olarak tanımlanmıştır. Dinamik analiz modeli oluşturma bölümünde söz konusu sayısal veriler aktarılmıştır. Kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen köprüsünün yapılan dinamik analizi Şekil 3.49'da gösterilmiştir.



Şekil 3.49. Kompozit Y-eksen köprüsünün dinamik analiz sonucu

### 3.9.9. Kafes Yapıdaki Y-Eksen Dinamik Analizi

Kafes yapıdaki Y-eksen köprüsünün dinamik analizi sonucu Şekil 3.50'da verilmiştir. Kafes yapıdaki Y-eksende kullanılan sac malzemelerin tanımlamaları ve malzeme özelliklerinin ataması yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi ve nümerik çözüm bölümünde oluşan eğilmenin sehim miktarı ve gerilme değerleri detaylı olarak açıklanmıştır. Seçilen eleman büyüklüğüne göre Mesh yapılarak, kafes yapıdaki Y-eksen, nodlara ve elemanlara bölünmüştür. Kafes yapıdaki Y-ekseninin numerik analiz için gerekli olan sınır koşulları seçilerek tanımlamaları yapılmıştır.



Şekil 3.50. Kafes yapıdaki Y-eksen köprüsünün dinamik analiz sonucu

Kafes yapıdaki Y-eksen üzerinde olan lazer kesim tezgâhının bileşenleri mass point olarak gösterilmiş ve kütle değerleri verilmiştir. Lazer kesim tezgâhının çalışma

koşullarında kafes yapıdaki Y-eksenin ivme değeri initial condition olarak tanımlanmıştır. Dinamik analiz modeli oluşturma bölümünde söz konusu sayısal veriler aktarılmıştır.

### 3.10. Kompozit Y-Eksen Köprüsü İmalatı

Yukarıda açıklanmış olan hesaplamalar ve nümerik analiz bölmelerinden faydalanarak kompozit Y-eksen köprüsünün tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarıma göre, sonlu elemanlar analizi ile sistemin doğrulaması yapılmıştır. Lazer kesim makinesinin kompozit Y-eksen köprüsünün imalatına geçilmiştir. İmalat adımları aşağıda açıklanmıştır. Kompozit Y-eksen üretimi sırasında kullanılmış olan tüm parçalar alüminyum saclar, alüminyum lamalar, cam elyafı kaplamalı kompozit plakalar ve diğer ekipmanlar olarak belirlenmiştir. Söz konusu parçaların birbirlerine bağlanabilmesi için epoxy yapıştırıcı kullanılmıştır. Kompozit Y-eksenin tasarımı bölümünde kullanılan alt bileşenlerin mekanik özellikleri verilerek açıklanmıştır. Kompozit Y-eksen içerisinde kullanılmış olan alüminyumdan üretilmiş olan özel insertler Y-eksen üzerinde kullanılmış olan yardımcı ekipmanların bağlanabilmesi için kullanılmıştır. Alüminyum sac parçalar önceden birilerine kaynatılmış ve raylı kızakların montaj edilebilmesi için bağlantı karkası üretilmiştir. Kompozit plakalar epoxy reçine ile birbirlerine yapıştırılarak kompozit blok gövdesi üretilmiştir. Benzer şekilde alüminyum karkas kompozit plakalar demeti üzerine oturtularak epoxy reçine ile yapıştırılmıştır. Kompozit Y-eksen köprüsünün tüm alt bileşenleri birbirlerine yapıştırılarak Şekil 3.51’de verilmiştir.



Şekil 3.51. Kompozit Y-eksen köprüsünün genel görünümü

Kompozit Y-eksende taşıyıcı olan plakalarda kullanılacak cam elyafı ile güçlendirilmiş köpük plakalar kullanılmıştır (Şekil 3.52).



Şekil 3.52. Kompozit plaka örneği

Daha önce tasarımı açıklanmış olup, bu plakalar birbirlerine yapışılarak kompozit plaka demeti oluşturulmuştur. Demetin yapıştırması için epoxy reçine kullanılmıştır. Plaka demeti oluşturulduktan sonra çevresi dikey bir ağaç kesim testeresi ile kesilerek dikdörtgenler prizması haline gerilmiştir (Şekil 3.53).



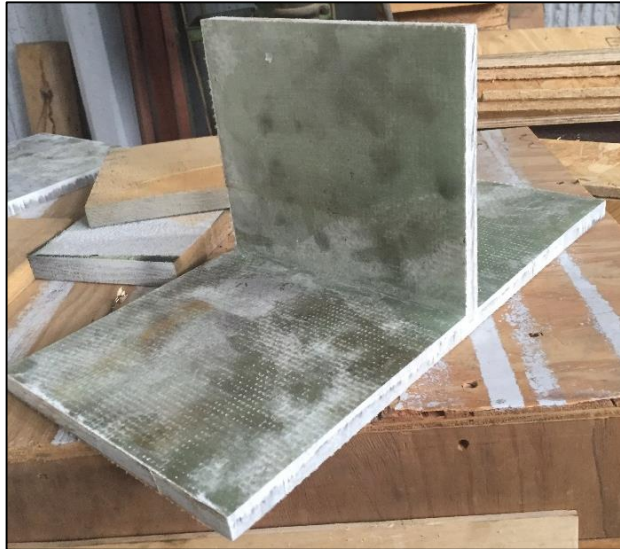
Şekil 3.53. Kompozit plaka demeti

Takviyeler üzerine uygulanan yük altında, zayıf olan polimer matriksin gerilmeleri çok daha güçlü cam lifleri üzerine aktarması sonucu gerilmeler oluşmaktadır. İyi bir kompozitte gerilim altında bulunduğu süre içerisinde lif uzaması, matriksin uzamasından daha az olmalıdır. Lif rijitliği, matriks rijitliğinden daha yüksek çıkmalıdır. Elyaf-matriks arasındaki gerilim aktarımının, değişik etmenlere bağlı olduğu belirlenmiştir (Kut 2016).

- Cam lifleri üzerine kaplanan, bağlayıcının matriks ile uyumu
- Cam elyafı takviye miktarı
- Cam elyafı takviye malzemesinin yönlenmesi
- Cam elyafı takviyesinin elyaf çapı

(Kut 2016)

Kompozit-alüminyum hibrit Y-esken köprüsünün lazer kesim makinesi X-eksenine bağlanabilmesi için benzer şekilde T bağlantı parçaları epoksi malzemeden üretilmiştir. Söz konusu bağlantı parçalarının dış kısımları cam elyafı olup iki cam elyafı arasında köpük malzeme bulunmaktadır. Dış kısımlardaki güçlendirme için kullanılmış olan cam elyaf pakları ve köpük malzemeler benzer şekilde bir birlerine epoxy reçine ile bağlanmıştır. İki adet kompozit plaka T şeklinde epoxy reçine ile yapıştırılmıştır (Şekil 3.54). Cam elyafı ile aradaki köpük malzemesinin mekanik özellikleri sonlu elemanlar ve nümerik analiz bölümünde açıklanmıştır.



**Şekil 3.54.** Epoksi malzemeden T-şeklinde, X-eksen bağlantı parçası

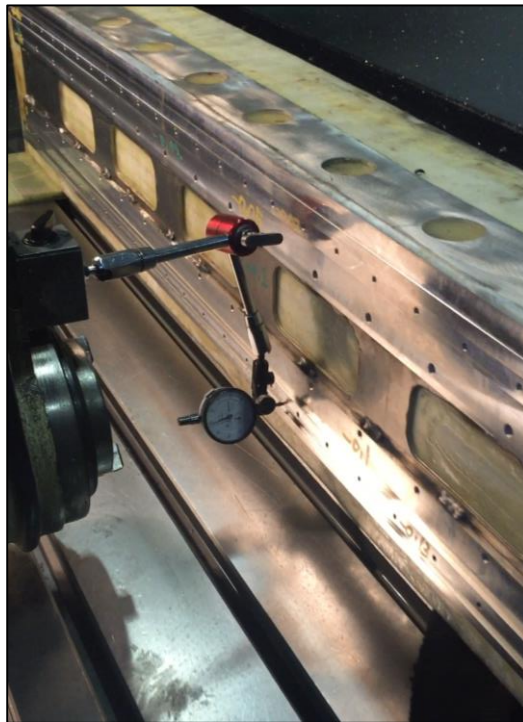
Diğer mekanik yardımcı elemanların (raylı kızaklar, helisel kramayer dişli, kablo kanalı taşıyıcı sacları ve limit switchlerin) bağlantısı alüminyum parçalar ile

yapılmıştır. Bu parçalar alüminyum saclar ve lamalardan oluşmuştur. Alüminyum plakalar birbirlerine alüminyum kaynağı yapılarak üretilmiştir (Şekil 3.53).



**Şekil 3.55.** Alüminyum destek parçalarının kaynatılması

Lazer kesim tezgâhında kullanılmış olan kompozit Y-ekseninin diğer alt bileşenlerinin (raylı kızaklar, kablo taşıyıcı saclar, Z-eksen lazer kesim kafası vb.) montajının yapılabilmesi için işlenmesi gerekmiştir. Üretilmiş olan kompozit Y-eksen köprüsü talaşlı imalat yapılarak işlenmiştir. CNC dik işleme merkezinde işlenmiştir. Raylı kızakların, helisel kramayer dişlilerinin bağlantı yüzeyleri ve metrik bağlantı delikleri için gerekli talaşlı imalat işlemleri yapılmıştır. (Şekil 3.56).

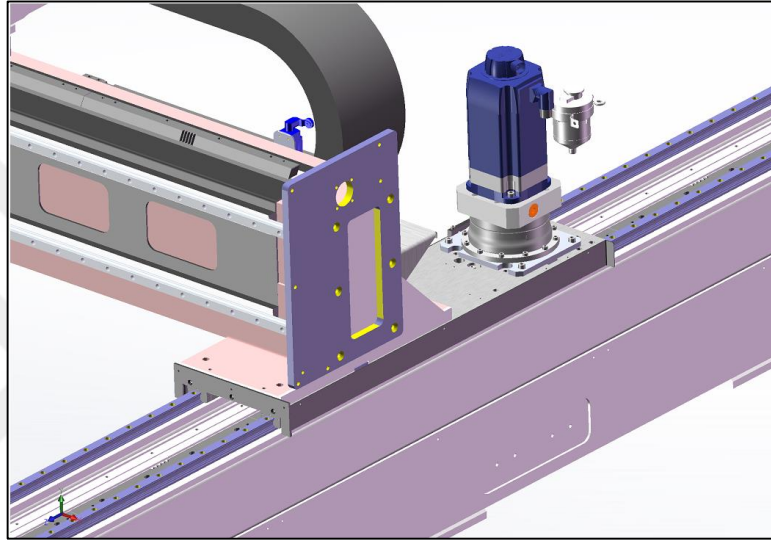


**Şekil 3.56.** Kompozit Y – eksen talaşlı imalatı

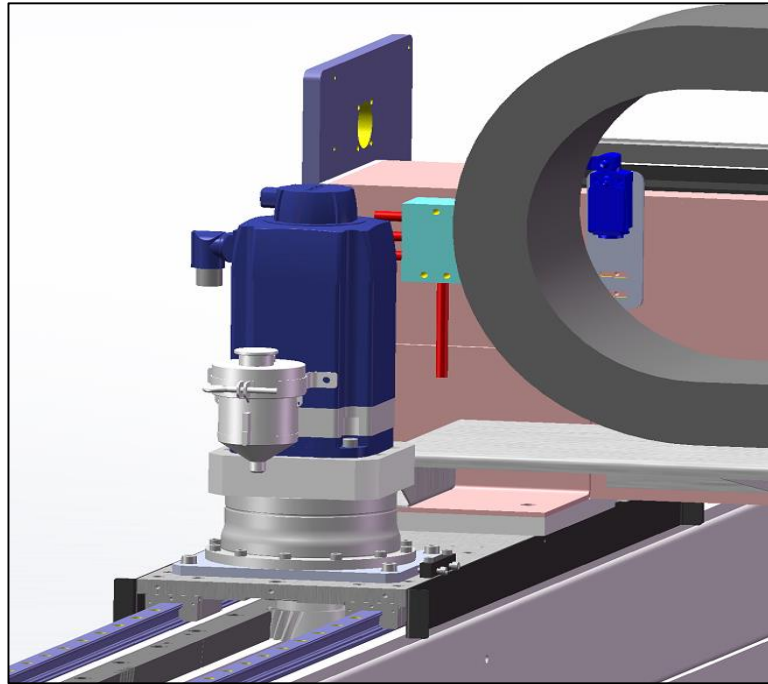
## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Y-Eksen Tasarım Sonuçları

Seçilen ürünlerin yardımıyla yapılan tasarımların sonucunda kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen köprüsünün yataklaması tek eksen üzerinde 4 adet raylı kızak yardımcıya yapılmıştır. Kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen köprüsünün lineer kızaklamalarının ve dişli - kramayer mekanizmalarına ait tasarlanmış olan modelleri Şekil 4.1’de ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



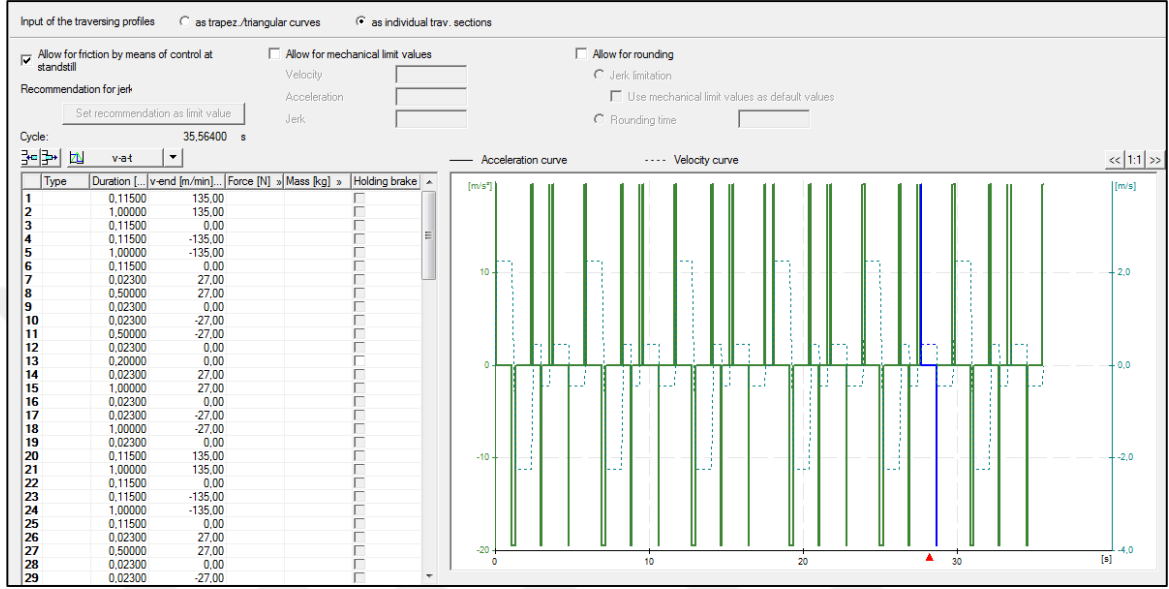
Şekil 4.1. Y-eksen köprüsünün yataklaması, lineer kızaklamaların tasarımı



Şekil 4.2. Dişli - kramayer mekanizmalarının tasarımı

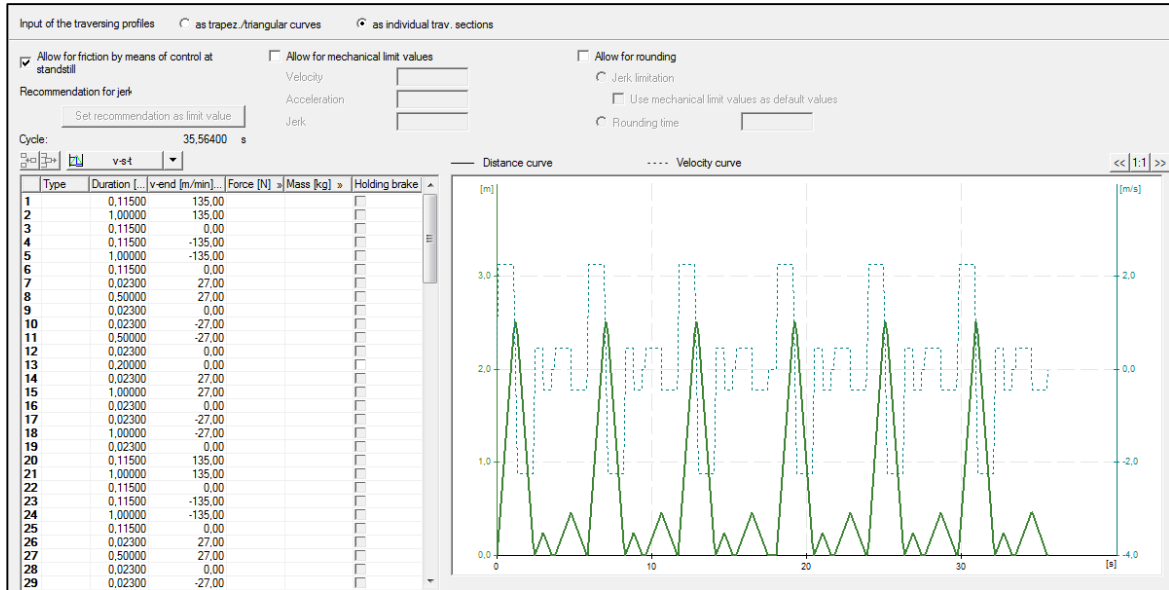
## 4.2. Hız, İvme ve Diğer Kinematik Parametre Sonuçları

Yapılan tasarımlar sonucunda gerekli olan hız, ivme ve diğer kinematik parametreler programa girilerek hesaplamaların yapılması sağlanmıştır (Şekil 4.3). Hız, ivme ve diğer kinematik parametrelerle kompozit Y-eksen köprüsünün hız ve ivme grafikleri oluşturulmuştur.



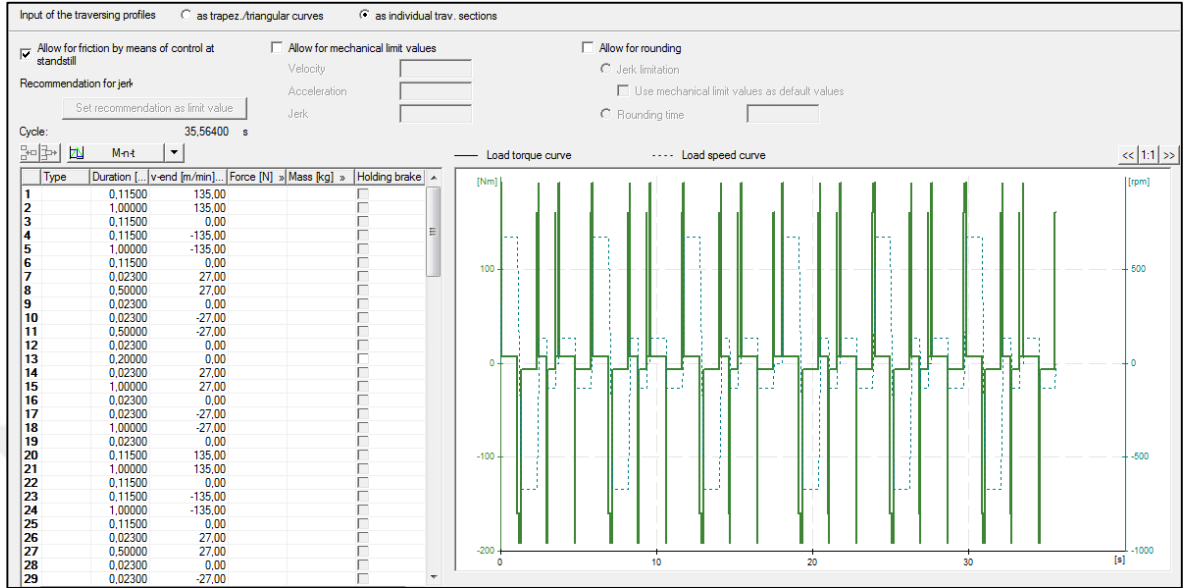
Şekil 4.3. Kompozit Y-eksen, X-eksen yönündeki hız-ivme-zaman grafiği

Benzer şekilde daha önce girilen kinematik parametrelere göre kompozit Y-eksenin zamana bağlı yol ve hız grafiği çıkarılmıştır (Şekil 4.4).



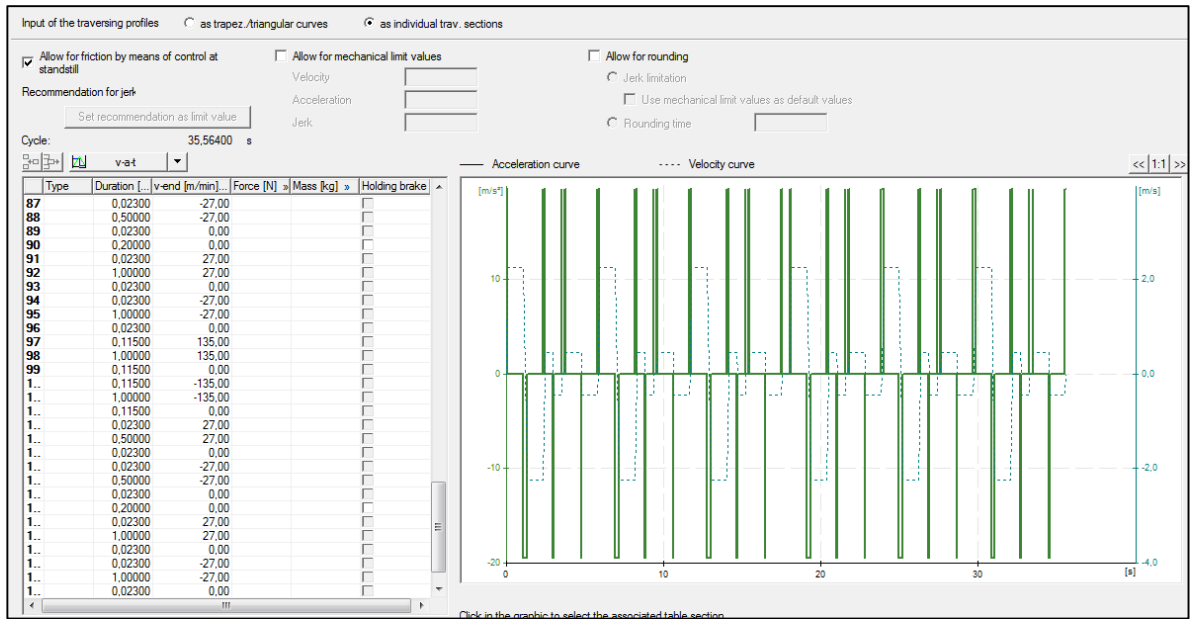
Şekil 4.4. Kompozit Y-eksen, X-eksen yönündeki hız-konum-zaman grafiği

Bu şartlar altında kompozit Y-eksen için zamana bağlı olarak gerekli olan moment ve devir grafiği belirlenmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Kompozit Y-eksen, X-eksen yönündeki moment-devir-zaman grafiği

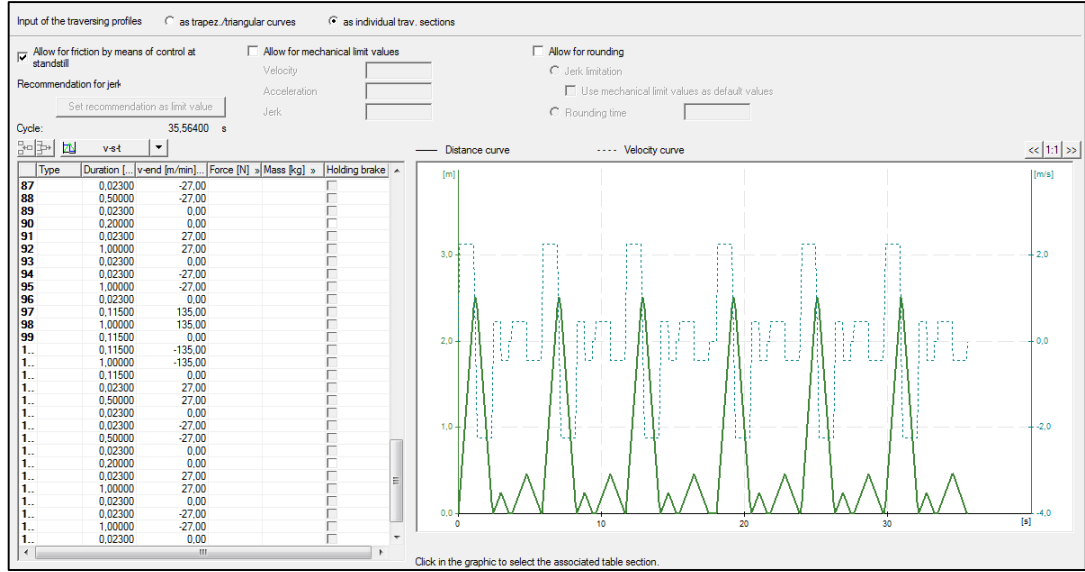
Yukarıda yapılan hesaplamalarda Y-eksenin X eksen yönündeki hareketleri incelenmiştir. Söz konusu hesaplamalar ile kompozit Y-eksen köprüsünün hareketleri için gerekli olan momentler ve hareket ivmeleri için gerekli olan devirler tespit edilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsü üzerindeki Z-eksen lazer kesim kafasının Y eksen yönünde zamana bağlı olarak oluşan hız ve ivme grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Kompozit Y-eksen, Z-eksenin Y-eksendeki hız-ivme-zaman grafiği

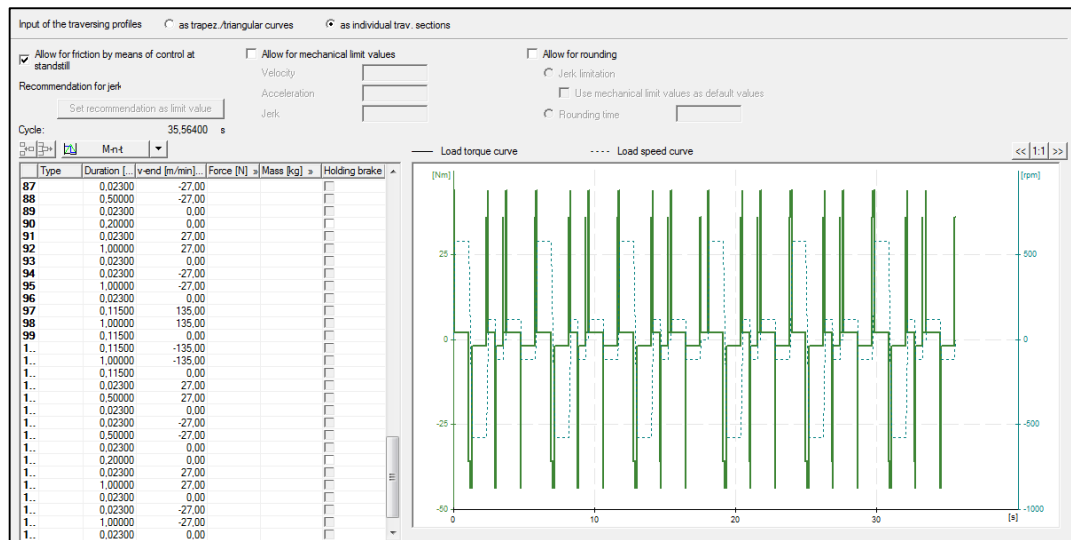


X-ekseninde yapılan hesaplamalar ve seçimler benzer şekilde Y-ekseni için de yapılmıştır. Lazer kesim makinesinin X ve Y eksenlerin hareketleri incelenmiştir. Z-eksen lazer kesim kafasının ve kablo kanalının 50 kg'lık kütesinin hareket ettirilmesi için gerekli olan momentler hesaplanmıştır. Benzer şekilde daha önce girilen kinematik parametrelere göre kompozit Y-eksen üzerindeki Z eksenin zamana bağlı hız ve konum grafiği verilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Kompozit Y-eksen, Z-eksenin Y-eksendeki hız-konum grafiği

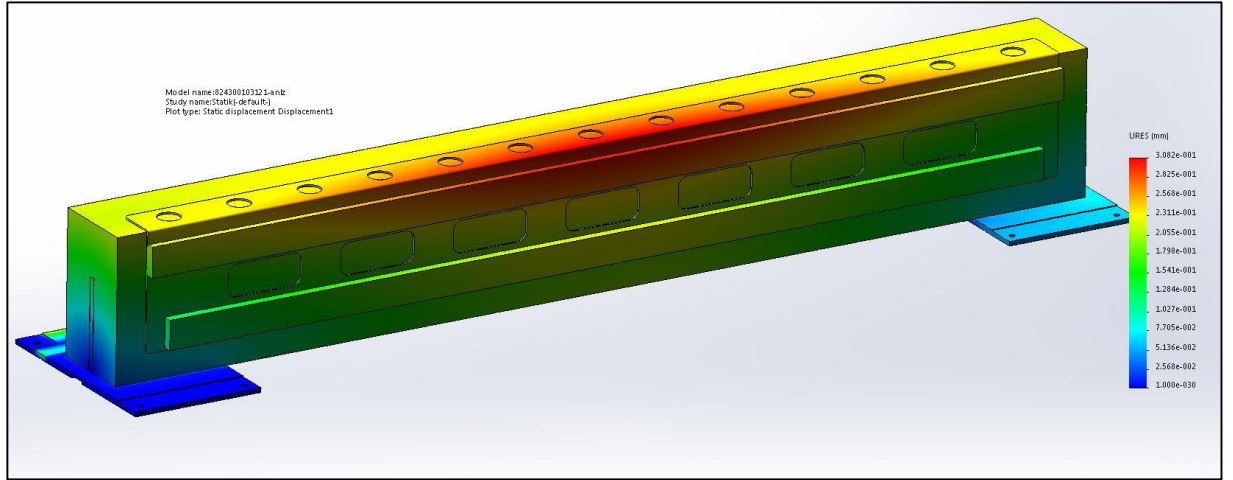
Bu şartlar altında kompozit Y-eksen üzerindeki Z eksenin zamana bağlı gerekli olan moment ve devir grafiği belirlenmiştir (Şekil 3.25).



Şekil 4.8. Kompozit Y-eksen, Z-eksenin Y-eksendeki moment-devir-zaman grafiği

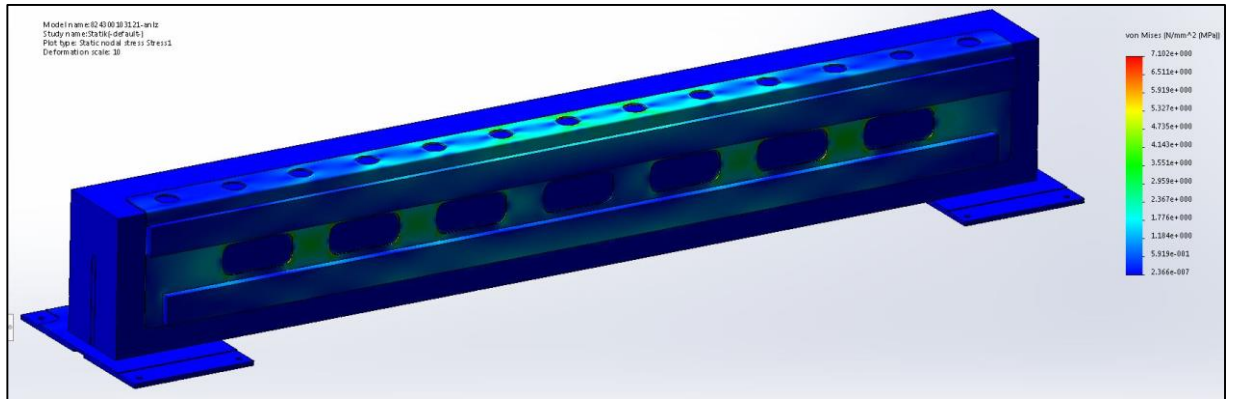
### 4.3. Statik Analiz Sonuçları

Kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen köprüsü ve kafes yapıdaki Y-eksenin statik analiz çalışmalarında daha önce açıklandığı gibi iki farklı sonuç verilmiştir. Lazer kesim makinesinin Y ekseninde olan Z-eksen laser kafası, kablo kanalları ve kablo taşıma saclarının oluşturduğu kütlelerin sonuçları verilmiştir. Söz konusu kütlelerin kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen köprüsü üzerinde oluşturduğu sehim sonuçları Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Kompozit Y-eksen köprüsü bileşenlerinin oluşturduğu sehim

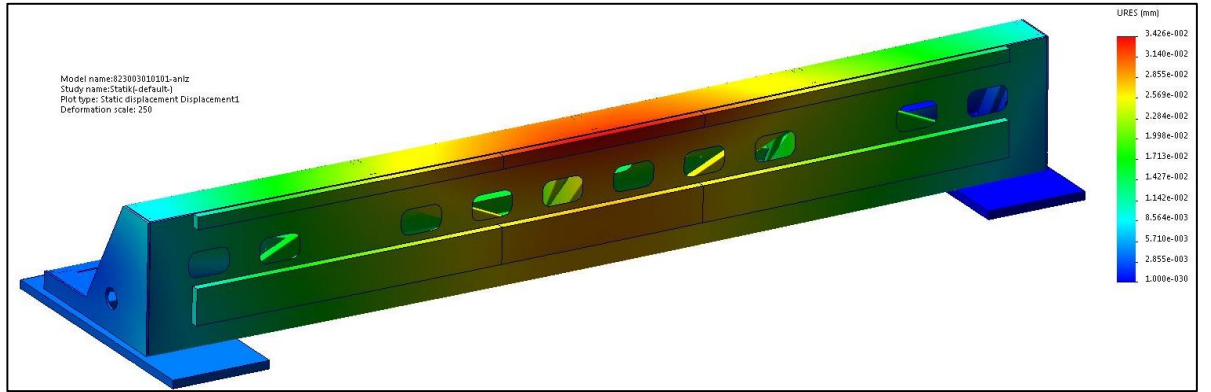
Kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen köprüsünün Z-eksen laser kafası, kablo kanalları ve kablo taşıma saclarının oluşturduğu sehim değeri 0,31 mm olarak hesaplanmıştır. Söz konusu sehim değerinin, lazer kesim performansına ve kesim kalitesine olumsuz bir etkisi görülmemiştir. Lazer kesim kafası üzerinde bulunan kapasitif yükseklik sensörü ile oluşan sehim değeri elemine edilmiştir. Benzer şekilde kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen köprüsü üzerinde meydana gelen gerilme sonuçları Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Kompozit Y-eksen köprüsü bileşenlerinin oluşturduğu gerilme değeri

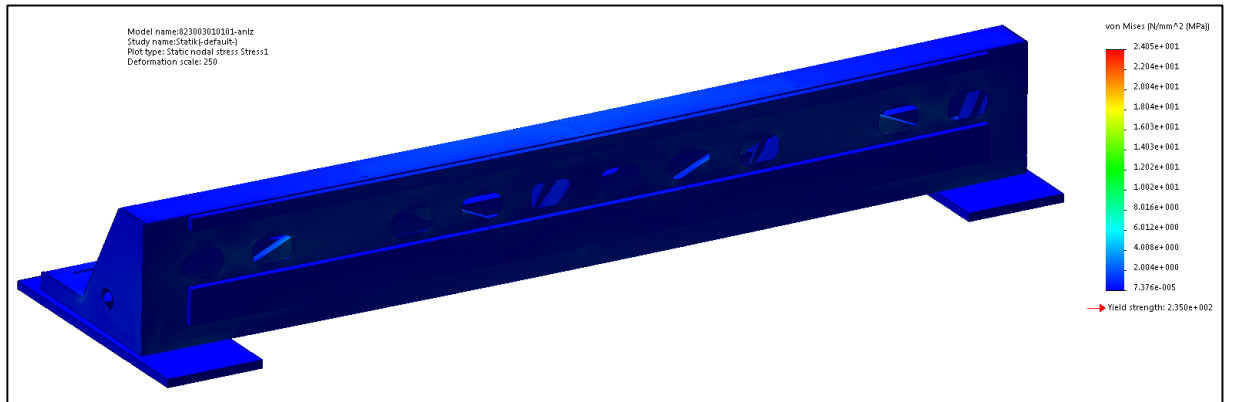
Kompozit Y-eksen köprüsünün Z-eksen lazer kafası, kablo kanallarının ve kablo taşıma saclarının oluşturduğu gerilme değeri 7,10 MPa olarak hesaplanmıştır. Hesaplanmış olan gerilme değerinin kompozit Y-eksen köprüsüne herhangi bir deformasyon, lazer kesim performansına ve kalitesine olumsuz bir etkisi görülmemiştir.

Benzer şekilde kafes yapıdaki Y-eksen üzerinde olan Z-eksen lazer kafası, kablo kanalları ve kablo taşıma saclarının oluşturduğu kütlelerin sonuçları verilmiştir. Kafes yapıdaki Y-eksen üzerinde oluşturduğu sehim sonuçları Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Kafes yapıdaki Y-eksen bileşenlerin oluşturduğu sehim

Kafes yapıdaki Y-eksen üzerindeki Z-eksen lazer kafası, kablo kanallarının ve kablo taşıma saclarının oluşturduğu sehim değeri 0,034 mm olarak hesaplanmıştır. Söz konusu sehim değeri 0,05 mm den düşük olduğundan kafes yapıdaki Y-eksen üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğu kabul edilmiştir. Benzer şekilde kafes yapıdaki Y-eksen üzerinde meydana gelen gerilmenin analiz sonuçları Şekil 4.12’de verilmiştir.



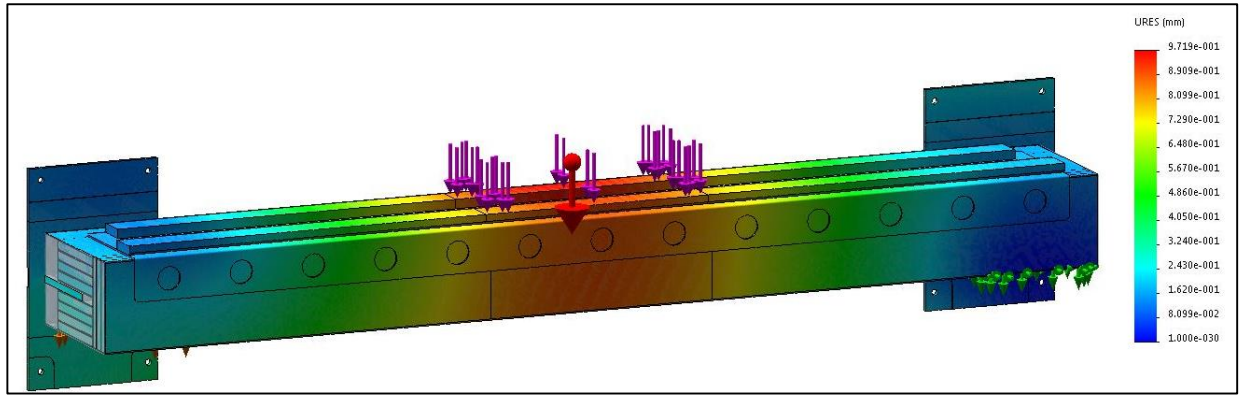
Şekil 4.12. Kafes yapıdaki Y-eksen bileşenlerin oluşturduğu gerilme

Y-eksen üzerindeki Z-eksen lazer kafası, kablo kanallarının ve kablo taşıma saclarının oluşturduğu gerilme değeri 2,4 MPa olarak hesaplanmıştır. Hesaplanmış olan gerilme

değerinin kafes yapıdaki Y-eksen köprüsünde herhangi bir deformasyon veya lazer kesim performansına ve kalitesine olumsuz bir etkisi görülmemiştir.

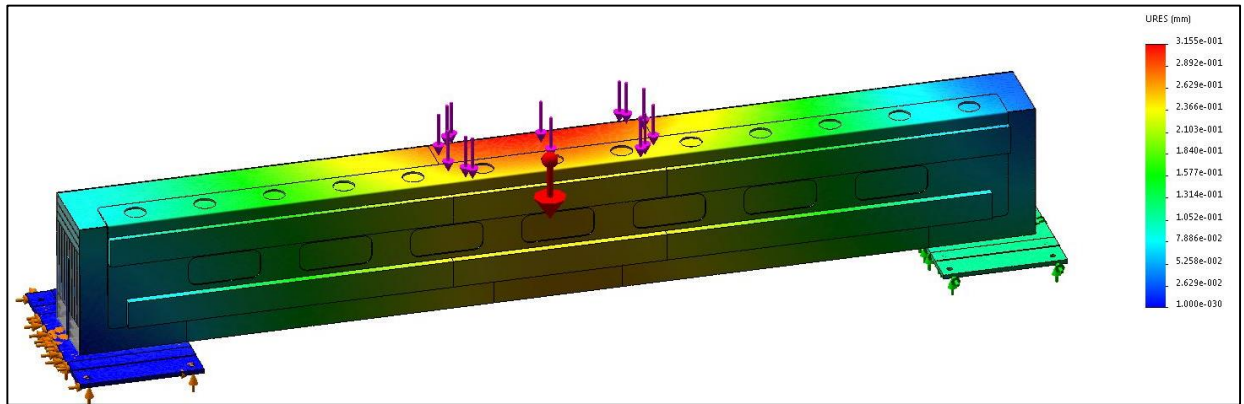
#### 4.4. Maksimum Yükte Statik Analiz Sonuçları

Y-Eksen Statik Analizi bölümünde (3.9.1) daha önce açıklandığı gibi kompozit Y-eksen köprüsü ve kafes yapıdaki Y-eksenin dayanabileceği sınır koşulları tespit edilmiştir. Lazer kesim makinesinin Y-eksenine 2000 N luk bir kuvvet uygulanarak ortaya çıkan sehim ve gerilme değerleri belirlenmiştir. Söz konusu kütle X-ekseni ve Z-ekseni yönlerinde uygulanarak gerekli olan analiz sonuçları bulunmuştur. Kütle, her iki Y-eksenine tam orta noktadan yayılı yük olarak uygulanmıştır. Kompozit Y-eksen köprüsünün X-eksen yönünde oluşan sehim değeri Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Kompozit Y-eksen köprüsünün X-yönündeki sehim değeri

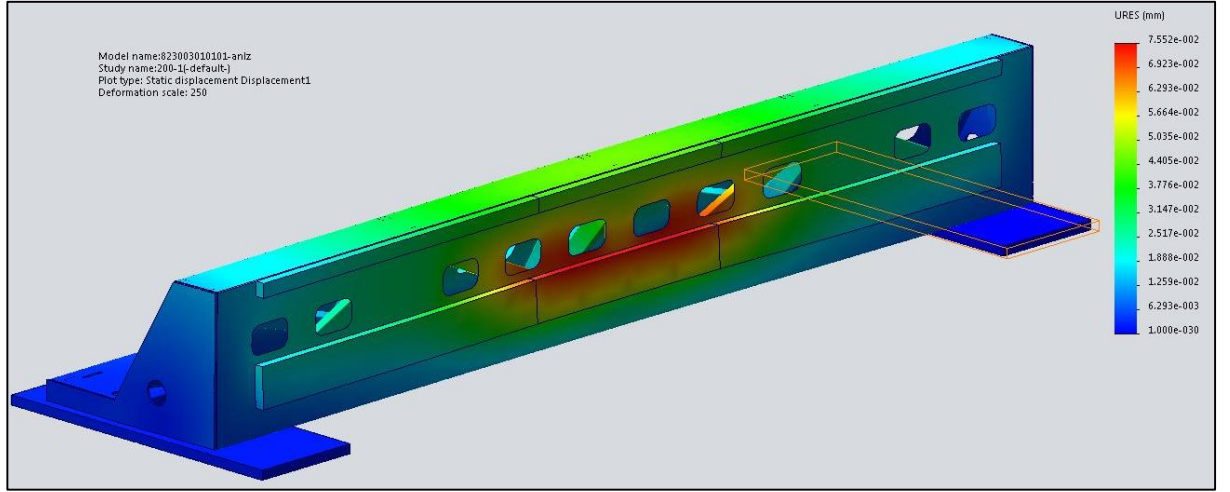
Kompozit Y-eksen köprüsünde X-eksen yönünde 0,97 mm lik bir sehim meydana geldiği görülmüştür. Benzer şekilde kompozit Y-eksen köprüsünde Z-eksen yönünde meydana gelen sehim miktarı Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Kompozit Y-eksen köprüsünün Z-yönündeki sehim değeri

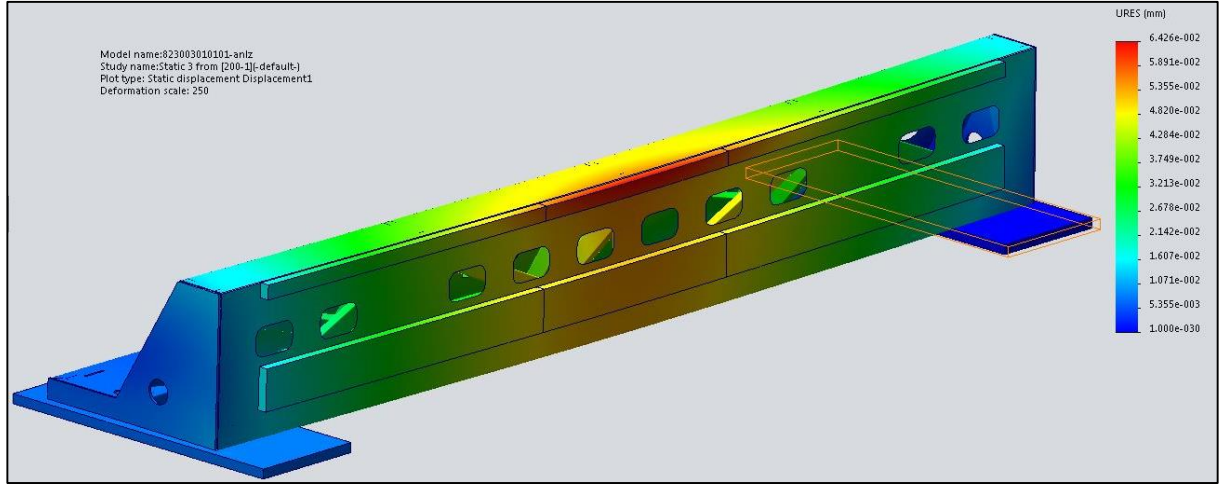
Kompozit Y-eksen köprüsünde Z-eksen yönünde 0,31 mm lik bir sehım meydana geldiği görölmüşür. Analiz hesaplamaları sonucunda meydana gelen sehım değerleri elastik bölgede oluştuğundan 2000 N luk bir yük altında bile kalıcı deformasyon oluşmayacağı görölmüşür. Ortaya çıkan sehım değeri de 1 mm den az olduğu için kabul edilebilir olduklarına karar verilmiştir.

Yukarıda açıklanmış olan maksimum yüke (2000 N luk kütle) göre analiz sonuçlarının kafes yapıdaki Y-ekseni için sehım değerleri hesaplanmıştır. Kafes yapıdaki Y-eksenin X-eksen yönündeki sehım miktarı Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. Kafes yapıdaki Y-eksenin X-yönündeki sehım değeri

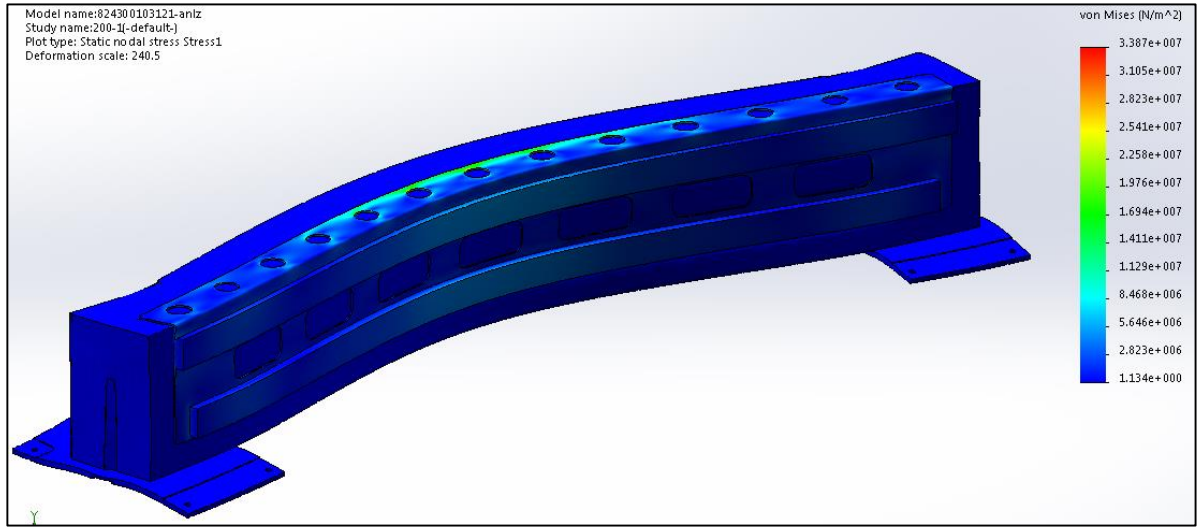
Kafes yapıdaki Y-eksende X-ekseni yönünde 0,075 mm lik bir sehım meydana geldiği görölmüşür. Benzer şekilde kafes yapıdaki Y-ekseninde Z-eksen yönünde meydana gelen sehım miktarı Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16. Kafes yapıda Y-eksenin Z-yönündeki sehım değeri

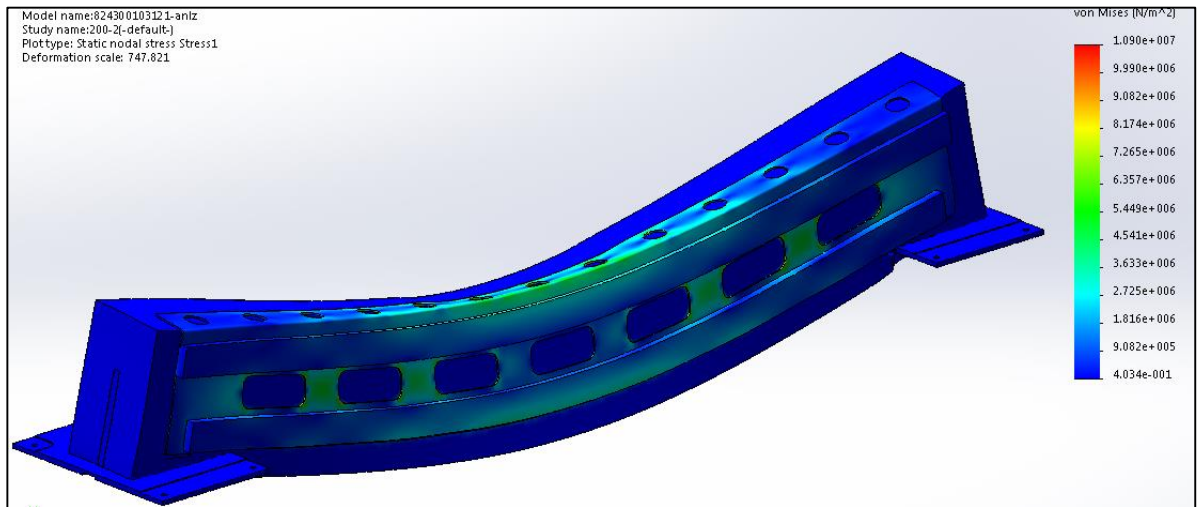
Kafes yapıdaki Y-ekseninde Z-eksen yönünde 0,064 mm lik bir sehim meydana geldiği görülmüştür. X-eksen ve Y-eksen yönünde meydana gelen sehim değeri oldukça küçük olduğundan her iki eksen yönünde 2000 N'luk bir kuvvetin herhangi bir etkisinin olmayacağı söylenebilir.

Kompozit Y-eksen köprüsü üzerinde X-eksen yönünde ve Y-ekseni yönünde uygulanmış olan maksimum 2000 N'luk kuvvetin oluşturduğu gerilme hesaplanmıştır. X-eksen yönündeki gerilme değerleri sonuçları Şekil 4.17'te verilmiştir.



Şekil 4.17. Kompozit Y-eksen köprüsünün X-eksende meydana gelen gerilme

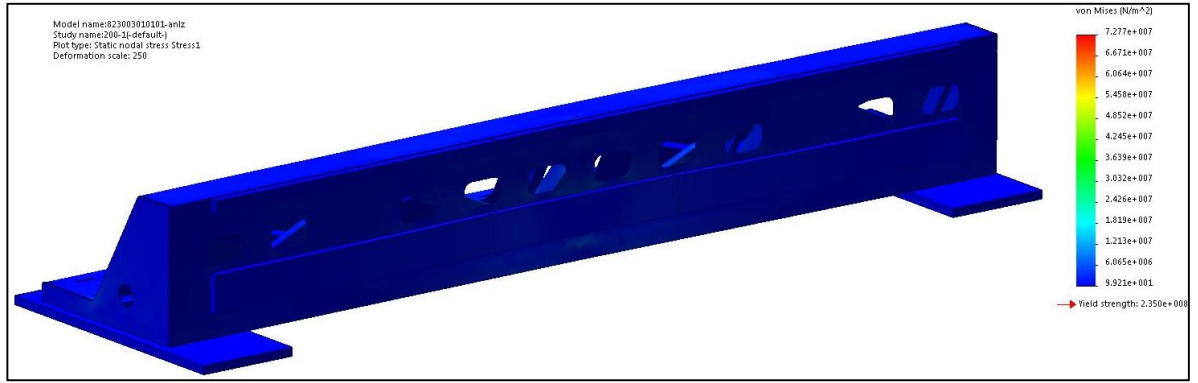
Kompozit Y-eksen köprüsünde X-eksen yönünde 3,38 MPa lık bir gerilme meydana geldiği görülmüştür. Benzer şekilde kompozit Y-eksen köprüsünde Z-eksen yönünde meydana gelen gerilme değeri Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18. Kompozit Y-eksen köprüsünün Z-eksende meydana gelen gerilme

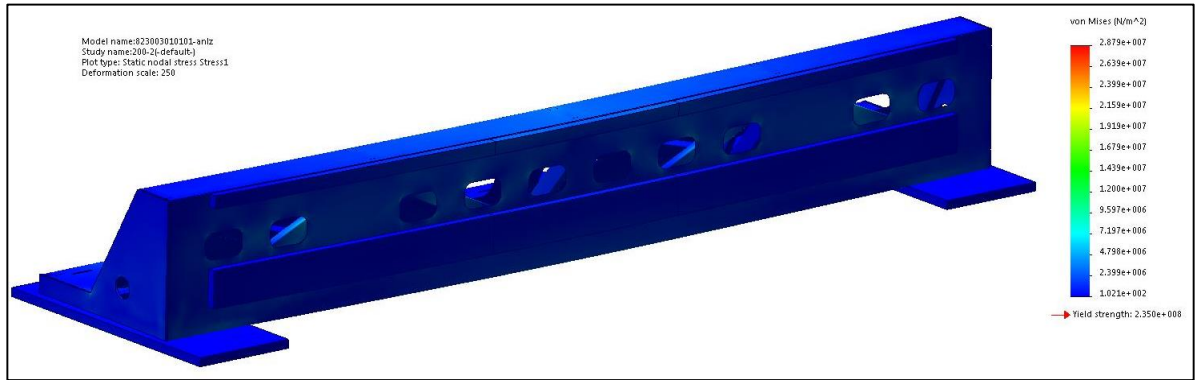
Kompozit Y-eksen köprüsünde Z-eksen yönünde 1,09 MPa lık bir gerilme meydana gelmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsünde X-eksen ve Y-eksen yönlerinde 2000 N'luk kuvvetin oluşturduğu gerilme değerlerinin oldukça küçük olduğu görülmüştür. Söz konusu gerilme değerleri çok küçük olduğundan kompozit Y-eksen köprüsünde herhangi bir deformasyon meydana getirmemiştir.

Kafes yapıdaki Y-eksenin 2000 N'luk kütle altındaki gerilme değerlerinin de benzer şekilde analizi yapılmıştır. Kafes yapıdaki Y-ekseninin X-eksen yönündeki analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değeri Şekil 4.19'de verilmiştir.



Şekil 4.19. Kafes yapıdaki Y-eksenin X-eksende meydana gelen gerilme

Kafes yapıdaki Y-ekseninde X-eksen yönünde 1,81 MPa lık bir gerilme meydana geldiği görülmüştür. Benzer şekilde kafes yapıdaki Y-eksende Z-eksen yönünde meydana gelen gerilme değerleri Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20. Kafes yapıdaki Y-eksenin Z-eksende meydana gelen gerilme

Kafes yapıdaki Y-eksen üzerinde Z-eksen yönünde 1,91 MPa lık bir gerilme meydana gelmiştir. Kafes yapıdaki Y-eksenin X-eksen ve Y-eksen yönlerinde 2000 N luk kuvvetin oluşturduğu gerilme değerlerinin oldukça küçük olduğu görülmüştür. Söz konusu gerileme değerlerinin kafes yapıdaki Y-eksen üzerinde hiçbir mekanik etki oluşturmayacağı anlaşılmıştır.

#### 4.5. Modal Analiz Sonuçları

Lazer kesim makinesinin kompozit Y-eksen köprüsü ile kafes yapıdaki Y-eksen için modal analizi yapılmıştır. Her iki köprü için lazer kesim makinesinin çalışması esnasında çıkabileceği maksimum kritik titreşimlerin frekans değerleri tespit edilmiştir. Modal analizler ilk üç mod için yapılmıştır. İlk üç modun frekans değerleri verilmiştir. Zaten bu frekans aralığından sonra sistemin zarar göreceği aşikârdır.

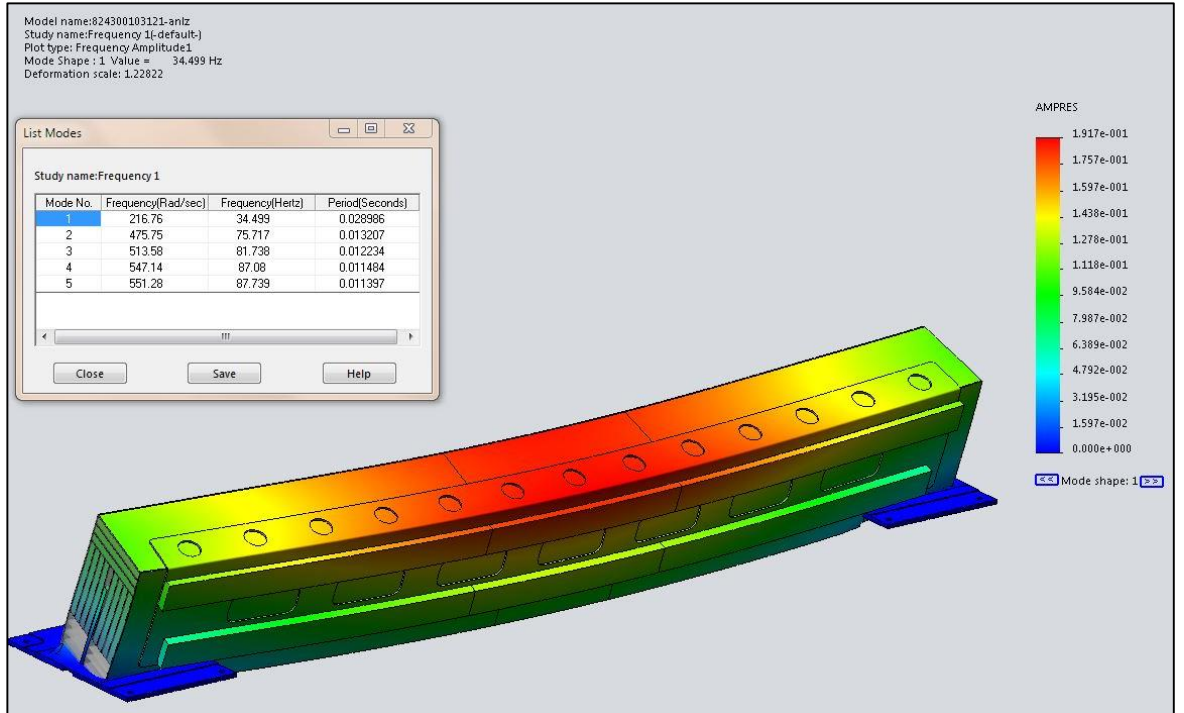
- Kompozit Y-Eksen Köprüsü Modal Analiz Sonuçları

Kompozit Y-eksen köprüsünün mod fazlarındaki kritik frekans değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Diğer modların frekans değerleri ihmal edilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Kompozit Y-eksen mod – frekans tablosu

	Mod	Frekans (Hz)
1	I	35
2	II	75,7
3	III	81,7

Modal analizde hesaplanmış olan kritik frekans aralığı olarak 35 Hz in üzerine çıktığında, kompozit Y-eksen köprüsünde titreşimin ortaya çıktığı görülmüştür. Mod-1 deki frekans 35 Hz olarak Şekil 4.21’de kompozit Y-eksen köprüsünün aldığı şekil görüntüsü verilmiştir.

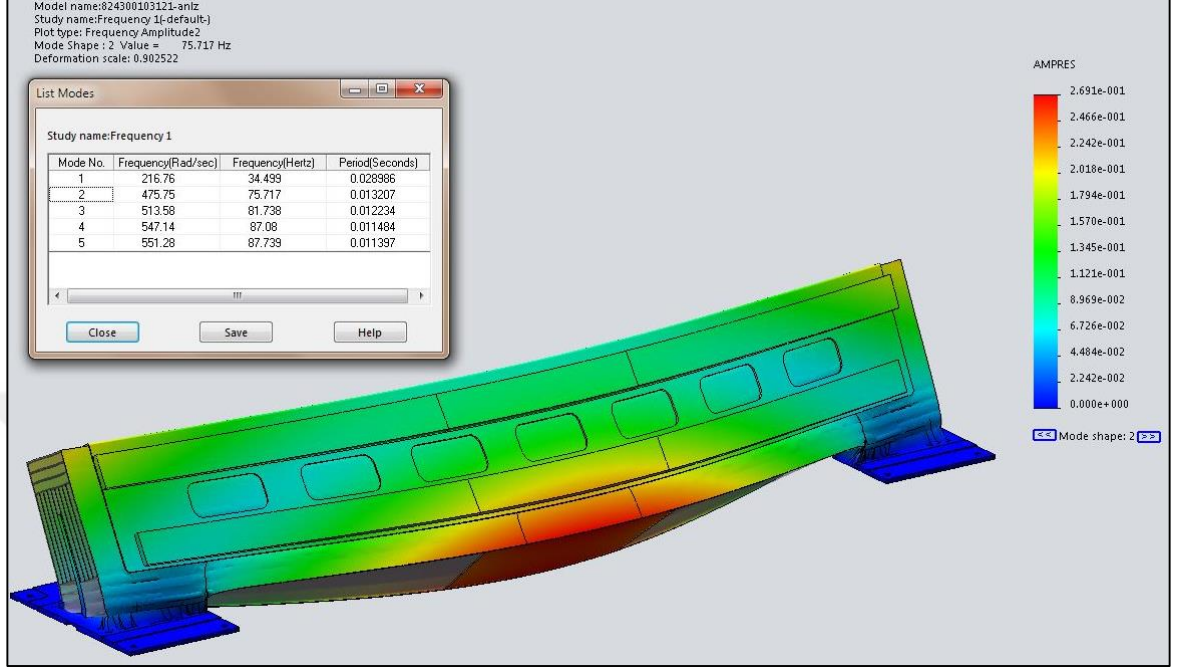


**Şekil 4.21.** Mod-1 frekansı: 35 Hz



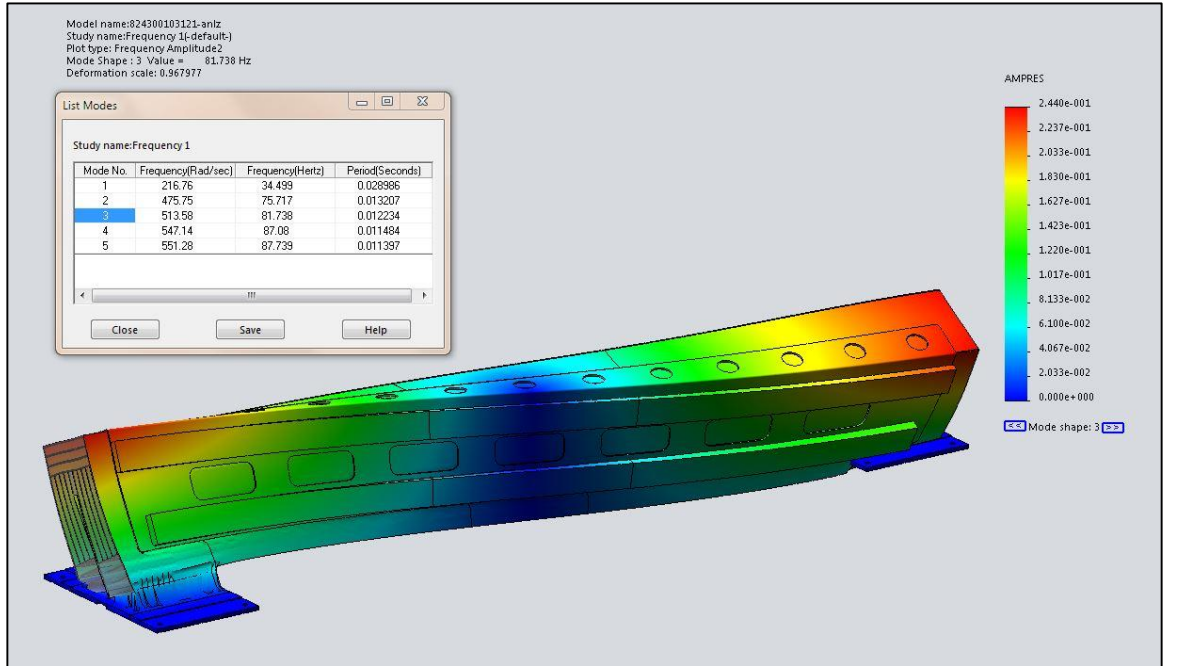
Benzer şekilde kompozit Y-eksen köprüsünün Mod-2 ve Mod-3 lardaki kritik frekans değerleri ve aldığı şekil görüntüleri verilmiştir.

Mod-2 deki frekansı 75,7 Hz olarak hesaplanmıştır Şekil 4.22’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.22. Mod-2 frekansı: 75,7 Hz

Mod-3 deki frekans değeri 81,7 Hz olarak hesaplanmıştır Şekil 4.23’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.23. Mod-2 frekansı: 117 Hz

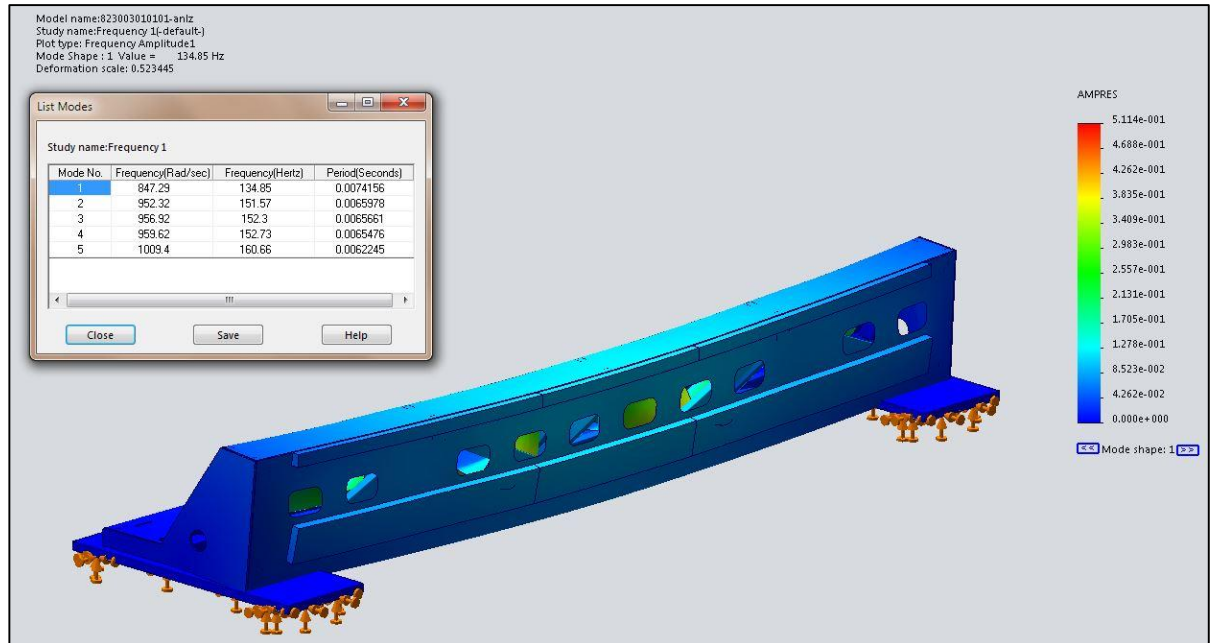
- Kafes Yapıdaki Y-Eksen Modal Analiz Sonuçları

Kafes yapıdaki Y-eksen için lazer kesim makinesinin çalışması esnasında çıkabileceği maksimum kritik titreşimlerin frekans değerleri tespit edilmiştir. Modal analizler ilk üç mod için yapılmıştır. İlk üç modun frekans değerleri verilmiştir. Kafes yapıdaki Y-eksen köprüsünün mod fazlarındaki kritik frekans değerleri verilmiştir (Çizelge 4.2).

**Çizelge 4.2.** Mevcut yapıdaki Y-eksen mod – frekans tablosu

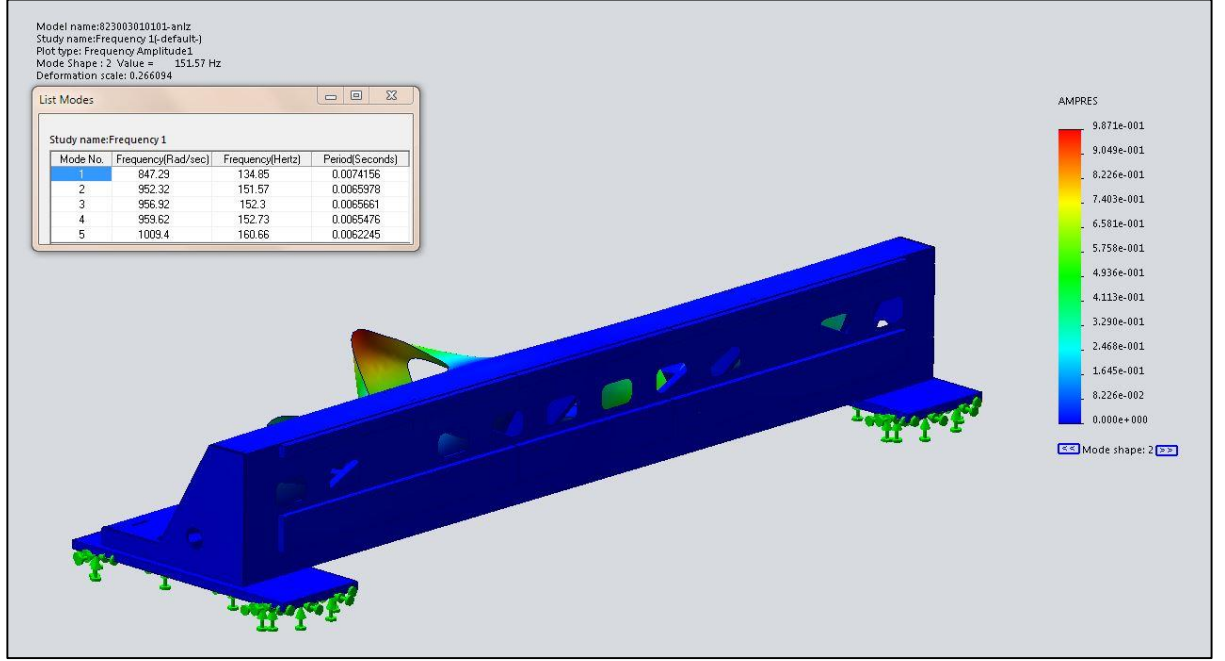
	Mod	Frekans (Hz)
1	I	134,8
2	II	151,5
3	III	152,3

Modal analizde hesaplanmış olan kritik frekans aralığı 134,8 Hz in üzerine çıktığında, kafes yapıdaki Y-eksende titreşimin ortaya çıktığı görülmüştür. Mod-1 deki frekans 134,8 Hz olarak hesaplanmıştır ve Şekil 4.24’ de görüldüğü gibidir.



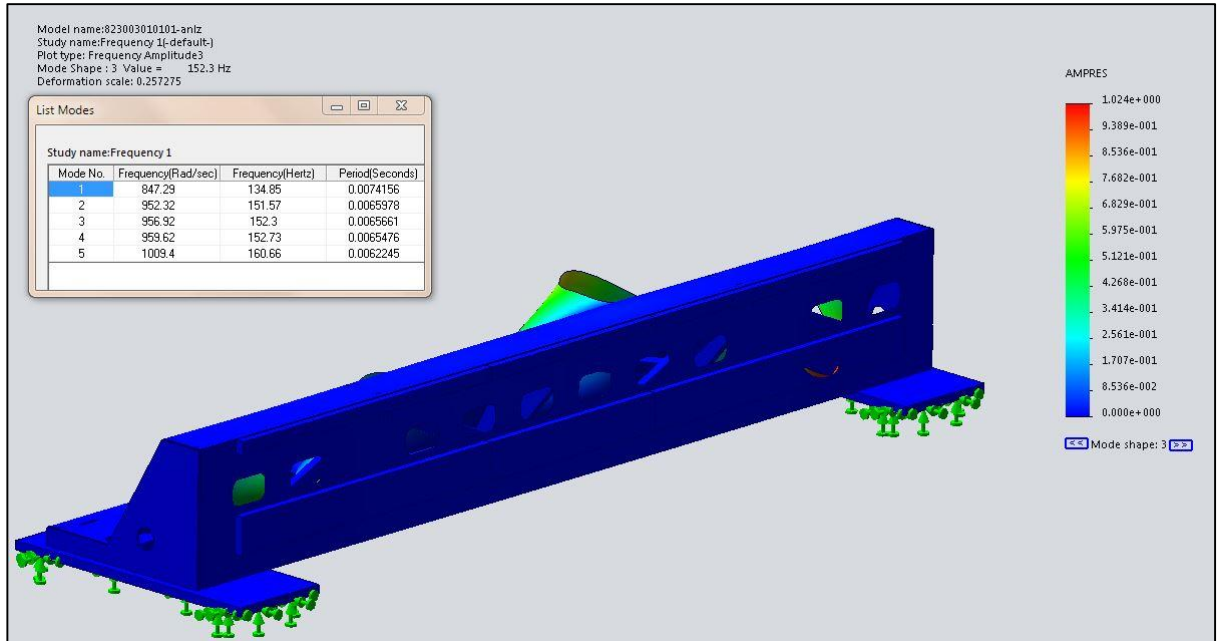
**Şekil 4.24.** Mod-1 frekansı: 73 Hz

Benzer şekilde kafes yapıda Y-eksenin Mod-2 ve Mod-3 lardaki kritik frekans değerleri verilmiştir. Mod-2 deki frekansı 151,7 Hz olarak hesaplanmıştır ve Şekil 4.25'te görüldüğü gibidir.



Şekil 4.25. Mod-2 frekansı: 151,7 Hz

Mod-3 deki frekansı 152,3 Hz olarak hesaplanmıştır Şekil 4.26'de görüldüğü gibidir.



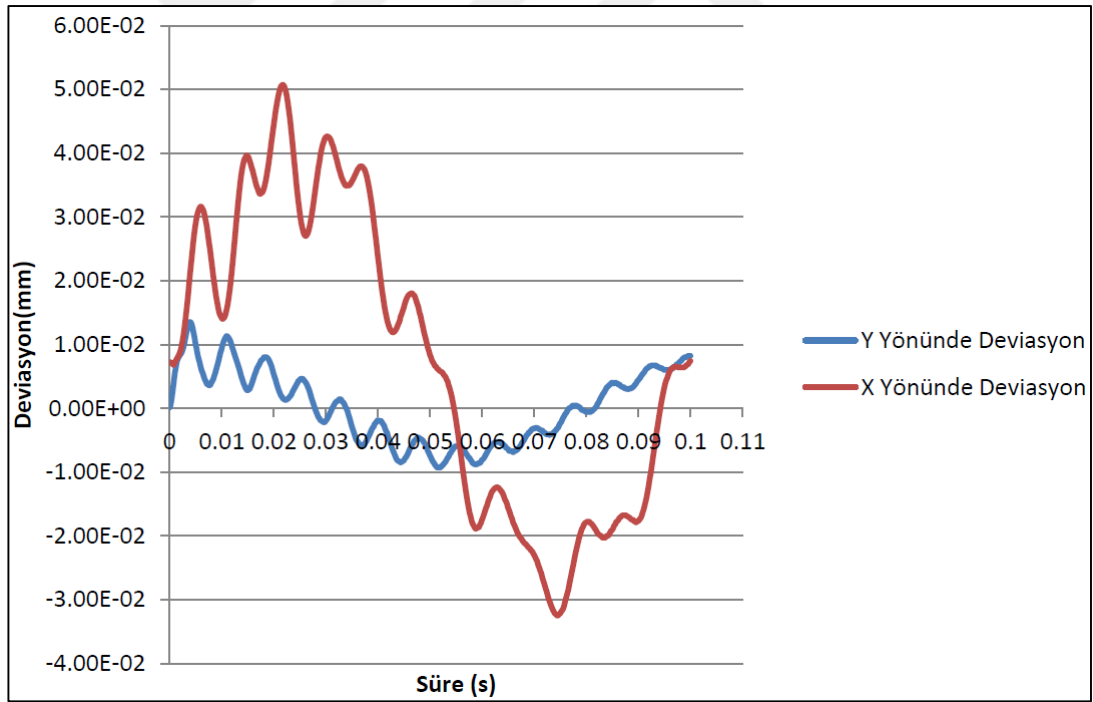
Şekil 4.26. Mod-3 frekansı: 112 Hz

Söz konusu modal analiz sonuçlarında kompozit Y-eksen köprüsünün kritik frekans değeri 35 Hz olarak tespit edilmiştir. Mevcut kafes yapıdaki Y-eksenden farklı olarak

81,7 Hz üzerine üçüncü moda çıktığı görülmüştür. Ancak maksimum frekans değeri olarak neredeyse kafes yapıdaki Y-eksen köprüsünden %46,3 oranında daha az olduğu anlaşılmıştır. Kritik frekans değeri olarak %46,3'luk bir azalma söz konusu olduğundan yani kritik frekans değerleri çok farklı olduğundan komozit Y-eksen köprüsünün kafes yapıdaki Y-eksene göre daha kolay şekilde titreştikleri anlaşılmıştır. Lazer kesim performanslarında da farklı kesim sonuçları elde edileceği tahmin edilmektedir.

#### 4.6. Dinamik Karakteristik Sonuçları

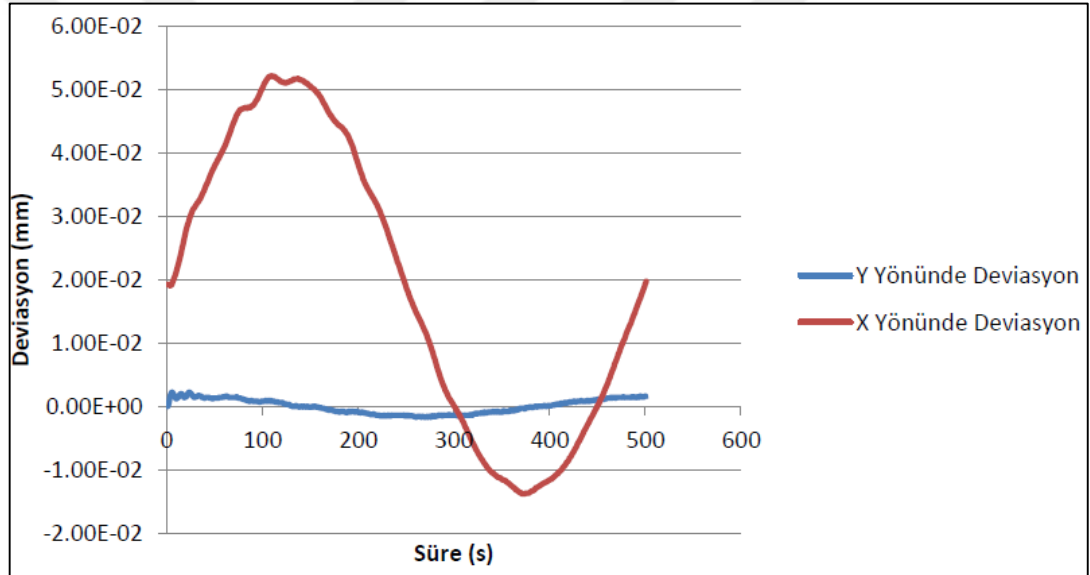
Lazer kesim makinesinin dinamik performansı karşılaştırmalı olarak kompozit Y-eksen köprüsü ve kafes yapıdaki Y-eksen için yapılmıştır. Lazer kesim makinesi üzerindeki CNC kontrolü olan Sinumerikten sapama değerleri alınmıştır. Lazer kesim makinesinin Y-eksen köprüsü için, X-eksen ve Y-eksen yönlerindeki form deviasyon değerleri karşılaştırılmıştır. Kafes yapıdaki Y-eksenin X-eksen yönündeki ve Y-eksen yönündeki şekil değiştirme grafiği Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.27. Kafes yapıdaki Y-eksenin, X ve Y yönlerindeki form deviasyonları

Kafes yapıdaki Y-eksenin X-ekseni ve Y-ekseni yöndeki yer değiştirme form deviasyonları incelendiğinde eksenler arası farklı yer değiştirme değerleri meydana geldiği görülmüştür. Kafes yapıdaki Y-eksenin X-eksen boyunda daha büyük bir genlikte titreştiğini anlaşılmış ve titreşim miktarlarını bir birlerinin sönmüleyebildikleri

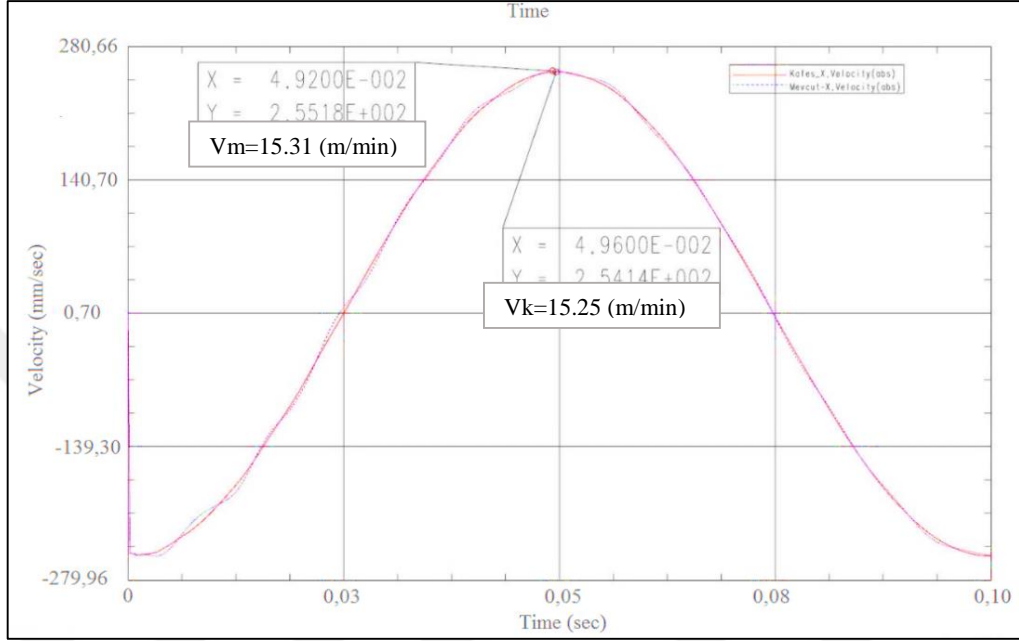
görülmüştür. Meydana gelen titreşim sehminin, yaklaşık olarak aynı zaman aralığında  $\pm 0,035$  mm arasında değiştiği görülmüştür. X-ekseni boyunca, Y-eksene göre yaklaşık olarak 3 kat daha büyük bir titreşim sehminin olduğu görülmüştür. Kafes yapıdaki Y-eksenin Y-eksen boyunca ki titreşim miktarının aynı zaman aralığında yaklaşık olarak  $\pm 0,012$  mm arasında salınım yaptığı anlaşılmıştır. Kafes yapıdaki Y-eksenin, Y-eksen yönündeki titreşimi kendi gövdesi yönünde olduğundan titreşim deviasyon miktarı oldukça azdır. Ancak kafes yapıdaki Y-eksende kullanılan malzemeler çelik saclar ve profiller olduğundan, titreşim miktarları çok büyük olmamasına rağmen daha az sürede çok sayıda titreştiği anlaşılmıştır. Kompozit Y-eksen köprüsünün X-eksen yönündeki ve Y-eksen yönündeki şekil değiştirme grafiği Şekil 4.28'de verilmiştir.



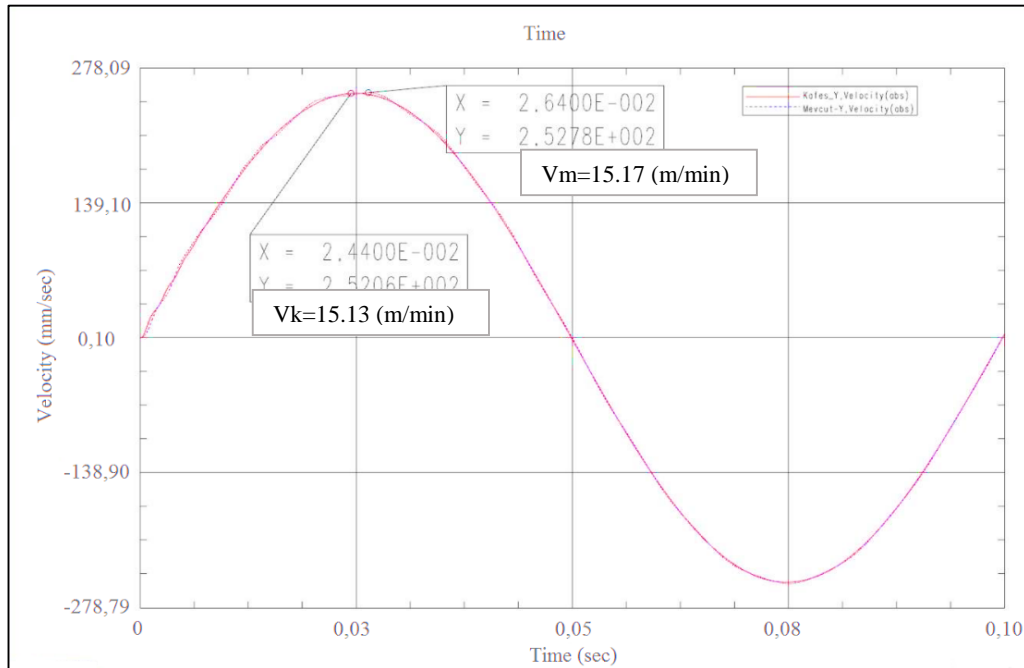
**Şekil 4.28.** Kompozit yapıdaki Y-eksenin, X ve Y yönlerindeki form deviasyonları

Kompozit Y-eksen köprüsünün X-eksen yönündeki titreşim deviasyon değerinin yaklaşık olarak 0,052 mm ile -0,015 mm arasında değiştiği görülmüştür. Kompozit Y-eksen köprüsünün bir bölümünde alüminyum malzemedan üretilmiş ve üzerine yapıştırılmış karkas olduğundan titreşim miktarının tek taraflı oldukça az olduğu görülmüştür. Titreşim deviasyon miktarının -0,015 mm olduğu kısım olarak alüminyum karkasın olduğu taraf olduğu anlaşılmıştır. Kompozit Y-eksen köprüsü Y-eksen boyunca titreşim deviasyon miktarı  $\pm 0,0015$  mm, söz konusu miktar oldukça az olduğundan ihmal edilebilir bir değer olduğu anlaşılmıştır. Lazer kesim makinesinin Z-ekseni olan lazer kesim kafasının kesim ucunun X-eksen yönünde hız değişiminin

sonuçları verilmiştir. Kafes yapıdaki Y-eksen ile kompozit Y-eksen köprüsünün karşılaştırılmalı olarak hız değişim grafiği aşağıdaki Şekil 4.29'da verilmiştir. Kafes yapıdaki Y-eksen üzerinde olan lazer kesim kafasının kesim ucunun hızı ( $V_m$ ) ile gösterilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsünün üzerinde olan lazer kesim kafasının kesim ucunun hızı ( $V_k$ ) ile gösterilmiştir.



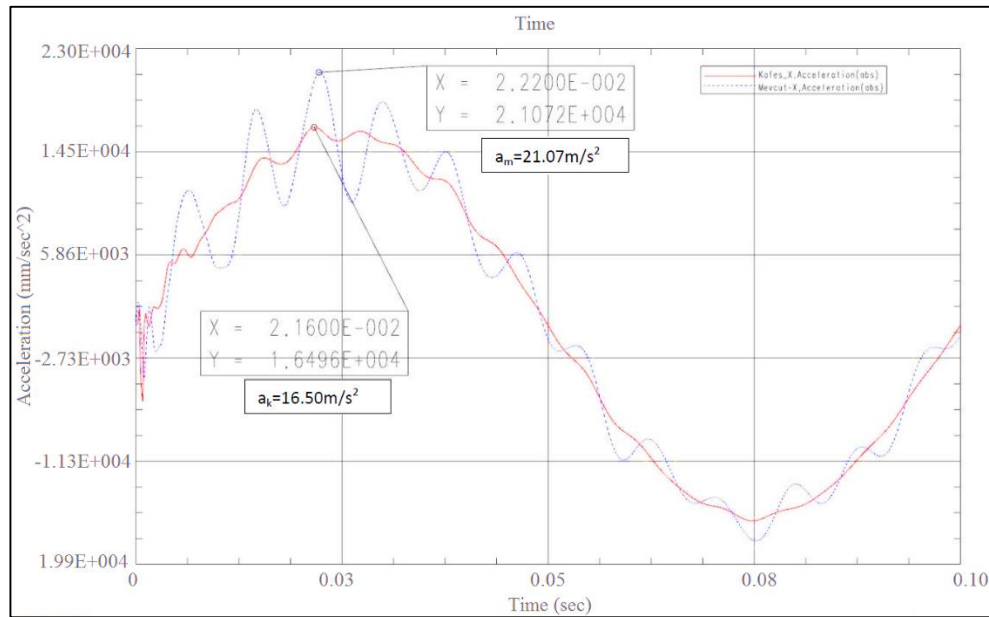
Şekil 4.29. Kafes yapıdaki Y-eksen ile kompozit Y-eksenin, X-eksenindeki hız değişiminin ( $V_m$ ) - ( $V_k$ ) karşılaştırılması



Şekil 4.30. Kafes yapıdaki Y-eksen ile kompozit Y-eksenin, Y-eksenindeki hız değişiminin ( $V_m$ ) - ( $V_k$ ) karşılaştırılması

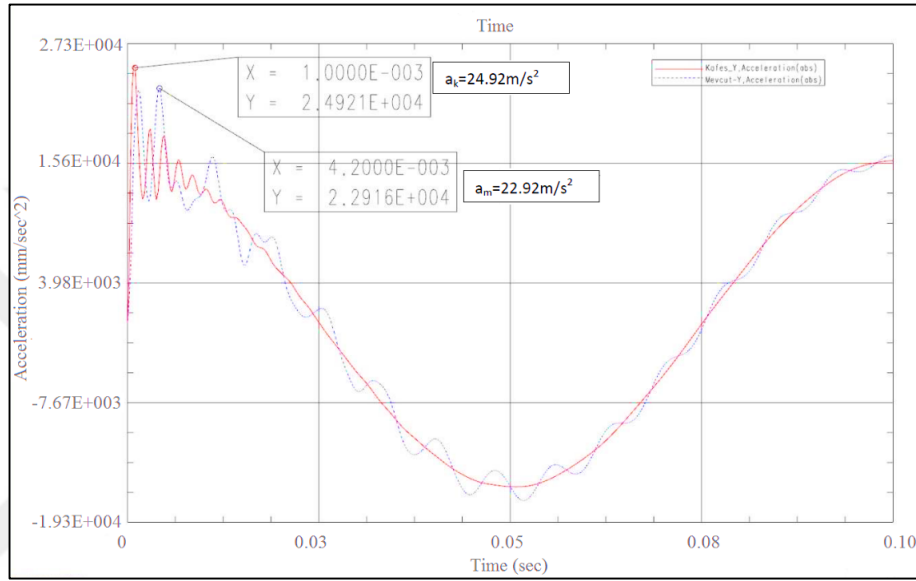
Benzer Lazer kesim makinesinin Z-ekseni olan lazer kesim kafasının kesim ucunun Y-eksen yönünde hız değişiminin sonuçları verilmiştir. Kafes yapıdaki Y-eksen ile kompozit Y-eksen köprüsünün karşılaştırılmalı olarak hız değişiminin grafiği verilmiştir. Kafes yapıdaki Y-esken üzerinde olan lazer kesim kafasın kesim ucunun hızı ( $V_m$ ) ile gösterilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsünün üzerinde olan lazer kesim kafasın kesim ucunun hızı ( $V_k$ ) ile gösterilmiştir (Şekil 4.30). Kompozit Y-eksen köprüsündeki lazer kesim kafasının kesim ucunun X-ekseni yönündeki hızı  $V_k=15,25$  m/dak ve Y-eksen yönündeki hız  $V_k=15,13$  m/dak olduğu görülmüştür. Kafes yapıdaki Y-eksenin lazer kesim kafasının kesim ucunun X-ekseni yönündeki hızı  $V_m=15,31$  m/dak ve Y-eksen yönündeki hız  $V_m=15,17$  m/dak olduğu görülmüştür. Her iki durumda da lazer kesim kafasının kesim ucunun hızları 15 m/dak civarlarında olduğundan dolayı, kompozit Y-eksen köprüsü ile kafes yapıdaki Y-eksenin kesim açısından performans değerlerinin aynı olduğu anlaşılmıştır.

Lazer kesim makinesinin Z-ekseni olan lazer kesim kafasının kesim ucunun X-eksen yönünde ivme değişiminin sonuçları verilmiştir. Kafes yapıdaki Y-eksen ile kompozit Y-eksen köprüsünün karşılaştırılmalı olarak ivme değişiminin grafiği Şekil 4.31'de verilmiştir. Kafes yapıdaki Y-esken üzerinde olan lazer kesim kafasın kesim ucunun ivmesi ( $a_m$ ) ile gösterilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsünün üzerinde olan lazer kesim kafasın kesim ucunun ivmesi ( $a_k$ ) ile gösterilmiştir. İvme değerleri görülebilir.



**Şekil 4.31.** Kafes yapıdaki Y-eksen ile kompozit Y-eksenin, X-eksendeki ivme değişiminin ( $a_m$ ) - ( $a_k$ ) karşılaştırılması

Benzer lazer kesim makinesinin Z-ekseni olan lazer kesim kafasının kesim ucunun Y-eksen yönünde ivme değişiminin sonuçları aşağıda verilmiştir. Kafes yapıdaki Y-eksen ile kompozit Y-eksen köprüsünün Z-eksen olan lazer kesim kafasının ivme değişiminin grafiği karşılaştırılmalı olarak Şekil 4.32’de verilmiştir. Kafes yapıdaki Y-eksen üzerinde olan lazer kesim kafasının kesim ucunun ivmesi ( $a_m$ ) ile gösterilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsünün üzerinde olan lazer kesim kafasının kesim ucunun ivmesi ( $a_k$ ) ile gösterilmiştir.



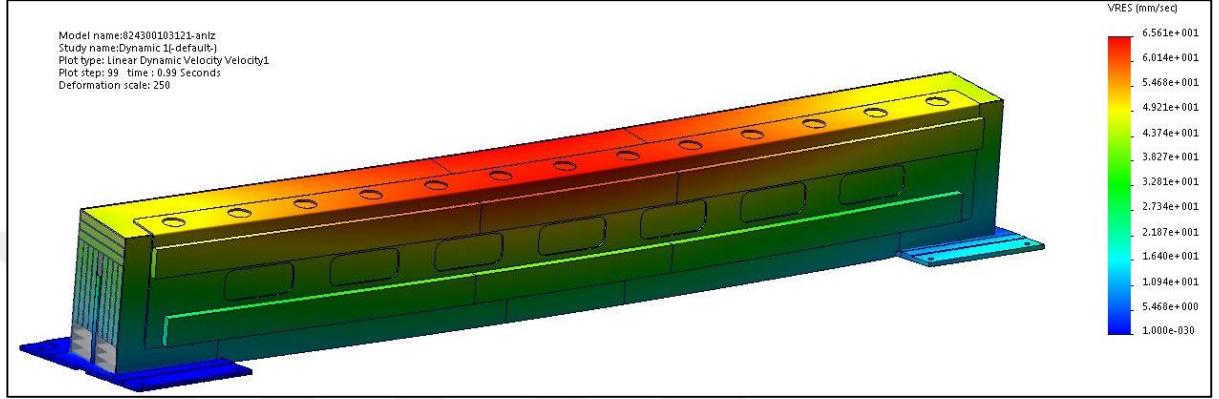
**Şekil 4.32.** Kafes yapıdaki Y-eksen ile kompozit Y-eksenin, Y-eksenindeki ivme değişiminin ( $a_m$ ) - ( $a_k$ ) karşılaştırılması

Kompozit Y-eksen köprüsündeki lazer kesim kafasının kesim ucunun X-ekseni yönündeki ivmesi  $a_k=16,50 \text{ m/s}^2$  ve Y-eksen yönündeki ivmesi  $a_k=24,92 \text{ m/s}^2$  olduğu görülmüştür. Kafes yapıdaki Y-eksenin lazer kesim kafasının kesim ucunun X-ekseni yönündeki ivmesi  $a_m=21,07 \text{ m/s}^2$  ve Y-eksen yönündeki ivme değerinin  $a_m=22,92 \text{ m/s}^2$  olduğu görülmüştür. Kompozit Y-eksen köprüsü üzerindeki lazer kafası X-eksen yönünde en fazla 1,68 G ye çıkabilmektedir ( $g=9,81 \text{ m/s}^2$  ise ivme değeri  $9,81 \text{ m/s}^2$  bölünürse G biriminde ivmeyi gösterebiliriz). Kompozit Y-eksen köprüsü üzerindeki Z-eksen olan lazer kafası Y-eksen yönünde ise 2,54 G değerine ulaşmıştır. X-ekseni yönündeki ivme değerinin daha az olmasının kompozit Y-eksen köprüsünün X-eksen yönünde Y-eksen yönüne göre daha fazla esmesinden kaynaklı olduğu söylenebilir. Kafes yapıdaki Y-eksenin üzerindeki lazer kafası ise X-eksen yönünde 2,14 G ve Y-yönünde 2,33 G değerlerine ulaşabilmektedir. Kafes yapıdaki Y-eksenin her iki eksten yönünde yaklaşık olarak aynı eseme miktarlarında olduğu anlaşılmıştır.



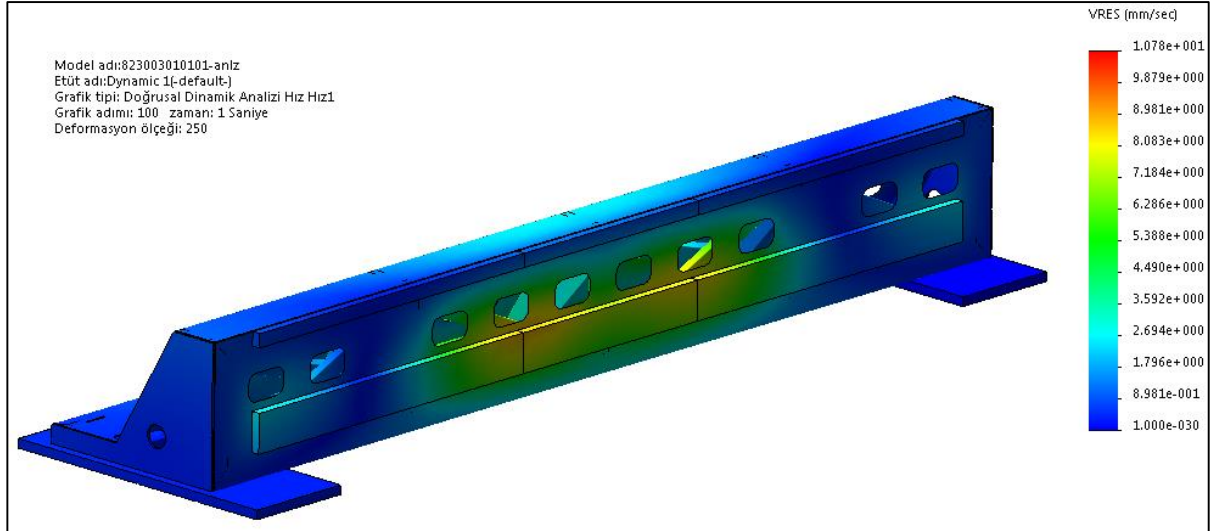
#### 4.7. Dinamik Analiz Sonuçları

Kompozit Y-eksen köprüsü ve kafes yapıda Y-eksen için dinamik analiz bölümünde daha önce açıklanmış olduğu gibi sınır koşullarında yapılan analiz sonuçları Şekil 4.33'te verilmiştir. Her iki köprü için initial condition tanımlanmıştır. Kompozit Y-eksen köprüsünün tanımlanmış olan initial condition lara göre dinamik hareketle oluşan titreşimde çıkabildiği hız değeri belirlenmiştir.



Şekil 4.33. Kompozit Y-eksen köprüsünün dinamik titreşim hız değeri

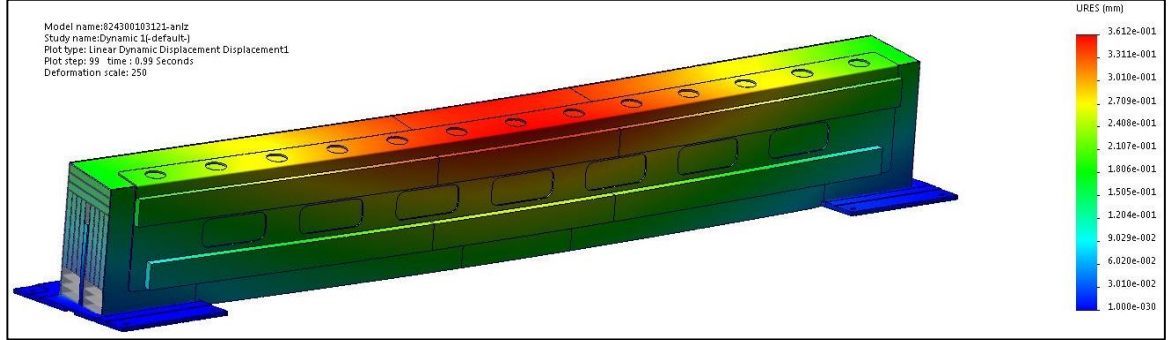
Kompozit Y-eksen köprüsü dinamik analiz sonuçlarına göre ivmeli harekette anlık 65,61 mm/s titreşim hız değerine ulaştığı görülmüştür. Benzer dinamik analizin titreşim hızının sonuçları kafes yapıdaki Y-eksen için Şekil 4.34'te verilmiştir.



Şekil 4.34. Kafes yapıdaki Y-eksenin dinamik titreşim hız değeri

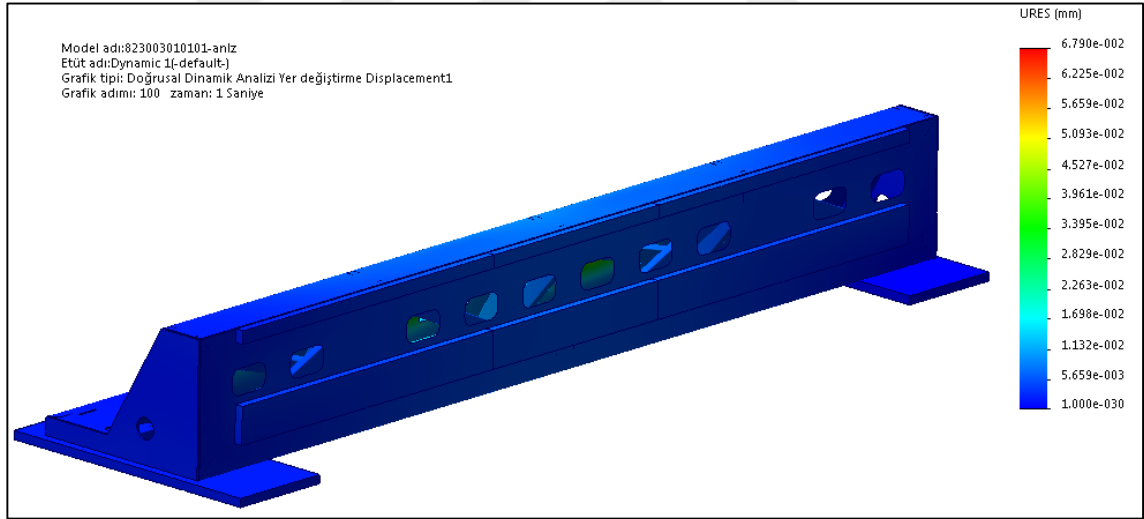
Kafes yapıdaki Y-eksenin dinamik analiz sonuçlarına göre ivmeli harekette anlık 10,78 mm/s titreşim hız değerine ulaştığı görülmüştür.

Dinamik hareket sonucunda anlık ivmeli harekette titreşim miktarının sehim değerleri gösterilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsünün anlık ivmeli hareketteki titreşim miktarının sehim değerleri Şekil 4.35'te gösterilmiştir.



Şekil 4.35. Kompozit Y-eksen köprüsünün dinamik titreşim sehim analiz sonucu

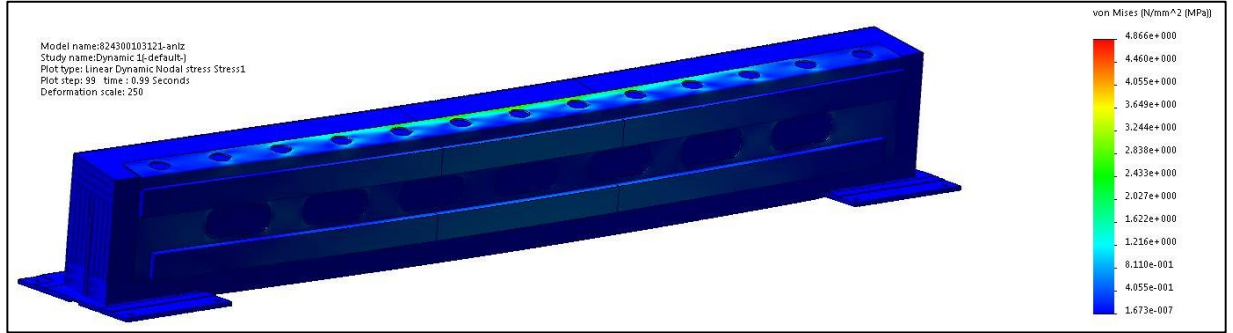
Kompozit Y-eksen köprüsünün anlık ivmeli harekette ki titreşim miktarının sehim değeri 0,36 mm olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde de kafes yapıdaki Y-eksen anlık ivmeli harekette ki titreşim miktarının sehim değeri Şekil 4.36'da gösterilmiştir.



Şekil 4.36. Kafes yapıdaki Y-eksenin dinamik titreşim sehim analiz sonucu

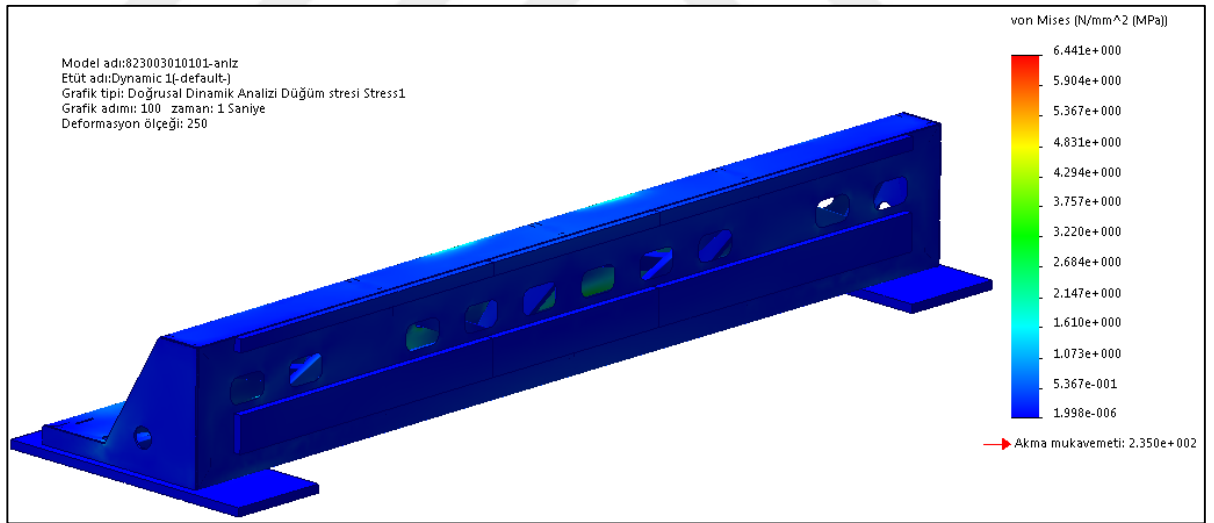
Kafes yapıdaki Y-eksenin anlık ivmeli hareketteki sonuçlara göre, titreşim miktarının sehim değeri 0,067 mm olarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarına göre kompozit Y-eksen köprüsünün kafes yapıdaki Y-eksene göre daha fazla titreştiği söylenebilir. Titreşim hızının yaklaşık olarak 6 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Titreşimin genliğinde benzer şekilde yaklaşık olarak 5,3 kat daha fazla olduğu sonuçlardan açıkça görülmektedir.

Dinamik hareket sonucunda anlık ivmeli harekette titreşim miktarının oluşturduğu gerilmelerinin sonuçları aşağıda verilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsünün anlık ivmeli harekette ki titreşim miktarının oluşturduğu gerilmesinin analiz sonuçları Şekil 4.37’de gösterilmiştir.



Şekil 4.37. Kompozit Y-eksen köprüsünün dinamik titreşim gerilme analiz sonucu

Kompozit Y-eksen köprüsünün anlık ivmeli harekette ki titreşim miktarının oluşturduğu gerilmenin değeri 4,86 MPa olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde de kafes yapıdaki Y-eksen anlık ivmeli hareketteki titreşim miktarının oluşturduğu gerilmenin analiz sonuçları Şekil 4.38’de verilmiştir.



Şekil 4.38. Kafes yapıdaki Y-eksenin dinamik titreşim gerilme analiz sonucu

Kafes yapıdaki Y-ekseninin anlık ivmeli hareketteki sonuçlara göre, titreşim sehiminin oluşturduğu gerilme değeri 6,44 MPa olarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarına göre kompozit Y-eksen köprüsünün kafes yapıdaki Y-eksene göre daha az miktarda gerildiği görülmüştür. Kompozit Y-eksen köprüsünün daha yüksek miktarda esnemesinden dolayı yaklaşık olarak %15 daha az bir gerilme meydana geldiği görülmüştür.

#### 4.8. Nümerik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Solid Works Simulation 2017 yazılımları vasıtasıyla sanal ortamda nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılmış olan modal nümerik analizler sonucunda öncelikle kafes yapıdaki Y-eksen ve kompozit Y-eksen köprüsünün modellerinin doğal frekansları belirlenmiştir. Lazer kesim makinesinin operasyonu esnasındaki dinamik davranışını tespit edebilmek için nümerik analizler yapılarak, dinamik hareket sonuçları tespit edilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsü ile kafes yapıdaki Y-eksenin maksimum yükteki statik analizleri yapılmıştır. Benzer şekilde kompozit Y-eksen köprüsünün ve kafes yapıdaki Y-eksenlerin üzerinde konumlandırılmış olan lazer kesim kafası ile kablo taşıma saclarının oluşturduğu sabit yüklerin statik davranışları da incelenmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsünün statik analiz sonuçlarına göre Z-eksen lazer kafası, kablo kanallarının ve kablo taşıma saclarının oluşturduğu sehim miktarı 0,31 mm olarak hesaplanmıştır. Kompozit Y-eksen köprüsü üzerinde Z-eksen lazer kafası, kablo kanallarının ve kablo taşıma saclarının oluşturduğu eğilme gerilmesinin analiz sonuçlarından gerilme değeri 7,10 MPa olarak hesaplanmıştır. Hesaplanmış olan eğilme gerilme değeri kompozit Y-eksen köprüsünde herhangi bir deformasyon meydana getirecek kadar büyük değildir. Lazer kesim makinesinin Y-eksenine 2000 N luk bir yük uygulayarak meydana gelen sehim ve gerilme değerleri belirlenmiştir. Söz konusu yükün X-ekseni yönünde 0,97 mm lik bir sehim miktarı ve 3,38 MPa lık bir gerilme değerine neden olduğu görülmüştür.

Amaç dâhilinde, analiz çalışması olarak kafes yapıdaki Y-ekseninin modal analizleri de gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda, kafes yapıdaki Y-Eksen köprüsünün mod frekansları ilk mod 134,8 Hz iken, kompozit Y-eksen köprüsünün modelinde 35 Hz'e düşmüştür. Her ne kadar analizler sonucunda, lazerin kesme kabiliyetinde (form deviasyonu <0.05) kısmen artma görülse de yapının katılığında bir azalma görülmüştür. Ayrıca modal analizler sonucu, kompozit Y-eksen köprüsünün rijitliği, kafes yapıdaki Y-eksen modele göre önemli miktarda azalmıştır (Çizelge 4.3).

**Çizelge 4.3.** Yapı modlarının karşılaştırılması

	<b>1.Mod</b>	<b>2.Mod</b>	<b>3.Mod</b>
<b>Kafes Yapıdaki Y-Eksen Köprüsü</b>	134,8 Hz	151,5 Hz	152,3 Hz
<b>Kompozit Yapıdaki Y-Eksen Köprüsü</b>	35 Hz	75,7 Hz	81,7 Hz

Ayrıca yapılan dinamik analizlerde yapının çalışma esnasındaki davranışları da incelenmiştir. Lazer kesme makinesinin Y-eksen çalışma ivmesinin 2G (19,62 m/s<sup>2</sup>) ye kadar çıkması beklenmektedir. Fiber lazer kesim makineleri genel olarak pazar beklentisi hız değeri 2G (19,62 m/s<sup>2</sup>) dir

Çizelge 4.4'te lazer kesim kafasının ucundaki hız ve ivme değerleri verilmiştir. Lazer kesme makinesinin hassasiyetinin ise sınır değerlerde olduğu görülmüştür. 4 mm yarıçaplı delik ve jerk (ivmelenme hızı) değeri 1000 m/s<sup>3</sup> için hesaplamalar yapılmıştır. Form deviasyon sonuçları olarak kompozit Y-eksen köprüsü için X-eksen yönünde +0,052 mm / -0,012 mm ve Y-eksen yönünde ±0,0015 mm değerleri elde edilmiştir. Benzer şekilde kafes yapıdaki Y-eksen için form deviasyonların ise, X-eksen yönünde +0,035 mm ve Y-eksen yönünde ±0,012 mm olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.4.** Delik kesiminde oluşan sehimler, hız ve ivme mukayese çizelgesi

	Form Deviasyonu (mm)		Lazer Uç Hızı (m/min)	Lazer Uç İvmesi (m/s <sup>2</sup> )
	X	Y		
<b>Kafes Yapıdaki Y-Eksen</b>	X	±0,035	15,31	21,07
	Y	±0,012	15,17	22,92
<b>Kompozit Y-Eksen Köprüsü</b>	X	+0,052/-0,012	15,25	16,50
	Y	±0,0015	15,13	24,92

#### 4.9. Kompozit Y-Eksen Boyutsal Ölçüm Sonuçları

Talaşlı işlem yapıldıktan sonra işlenmiş yüzeylerin yüzey pürüzlülükleri ile Y eksen yönünde ki boyutsal konum toleransları ölçülmüştür. 3D ölçüm aparatı ile gerekli ölçümler yapılmıştır. İşleme konum sapmalarını karşılaştırabilmek için kompozit Y-eksen köprüsü ve kafes yapıdaki Y-eksende ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarının değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Ölçüm rapor sonuçları Ek-3'te verilmiştir.

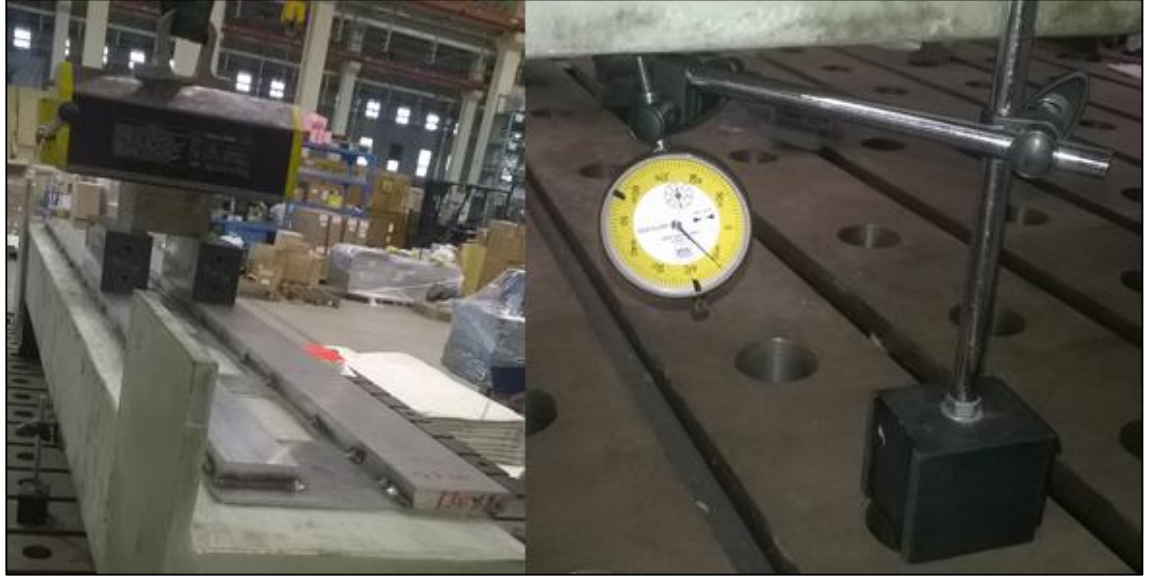
**Çizelge 4.5.** Talaşlı imalattaki konum sapmaları

	Kafes Yapıdaki Y-Eksen	Kompozit Y-Eksen Köprüsü
<b>X-Eksen Yönü (µm)</b>	25,46	105,03
<b>Z-Eksen Yönü (µm)</b>	53,38	75,61

Kompozit yapıdaki Y-eksen köprüsü üretildikten sonra statik olarak sabit bir kütle yardımıyla meydana gelen sehimler ölçülmüştür. Kompozit Y-eksen köprüsünün

üzerinde 200 kg ağırlık kütle konularak kompozit Y-esken köprüsünün elastik olarak esnemesi sağlanmıştır. Sabit ağırlığın oluşturduğu sehimler ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler için 0,001 mm hassasiyetinde komparatör kullanılmıştır (Şekil 4.39). Sehim ölçümleri lazer kesim makinesinin eksenleri olan X-eksen ve Y-eksen yönlerinde yapılmıştır.

Ağırlık olarak çelik dikdörtgenler prizması parçalar kullanılmıştır. Her iki Y-eksen köprüsünde aynı kısma koyularak ölçümler yapılmıştır.



**Şekil 4.39.** Kompozit Y-eksen sehim ölçümü

Kafes yapıdaki Y-eksen için statik olarak sabit bir kütle yardımıyla meydana gelen sehimler ölçülmüştür. Kafes yapıdaki Y-eksen üzerinde 200 kg ağırlık kütle konularak kafes yapıdaki Y-eksenin elastik olarak esnemesi sağlanmıştır. Kompozit Y-eksen köprüsü ile kafes yapıdaki Y-eksenlerin sabit yük altındaki ölçüm sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir.

**Çizelge 4.6.** 200 kg yük altında sehim ölçüm değerleri

	<b>Kafes Yapıdaki Y-Eksen</b>	<b>Kompozit Y-Eksen Köprüsü</b>
<b>X-Eksen Sehim Değeri Yönü (mm)</b>	0,1	0,12
<b>Z-Eksen Sehim Değeri Yönü (mm)</b>	0	0,12

Üretilen kompozit Y-eksen köprüsü ile kafes yapıdaki Y-eksenin maliyetleri incelenmiş ve maliyet etkisinin anlaşılması için yüzdesel olarak sonuçlar verilmiştir.

Maliyet kıyaslamasında malzeme maliyeti, işçilikler ve CNC talaşlı imalat maliyetleri tespit edilmiştir. Kompozit Y-esken köprüsü ile kafes yapıdaki Y-eksen için maliyetler hesaplanmış ve yüzdesel değer olarak karşılaştırmalı şekilde aşağıda Çizelge 4.7’de verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** Maliyet karşılaştırması

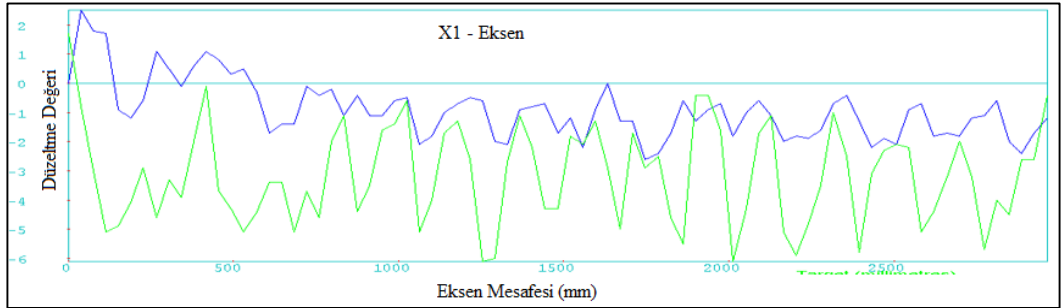
			<b>Çelik Köprü</b>	<b>Kompozit Köprü</b>
Malzeme Maliyeti		[EUR]	%5,62	%100
Talaşlı	Ayar Süresi	[saat]	%75	%100
	İşleme Süresi	[saat]	%90	%100
	İşleme Maliyeti	[EUR]	%87,5	%100
Kaynak Maliyeti		[EUR]	%100	%0,5
<b>Toplam Maliyet</b>		<b>[EUR]</b>	<b>%21,88</b>	<b>%100</b>

Üretilen kompozit Y-eksenin makine üzerine montajı yapılarak, eksen boyunca olan hareketlerindeki sapmalar ve hareket hatalarının konum bilgisi ölçülmüştür (Şekil 4.40).

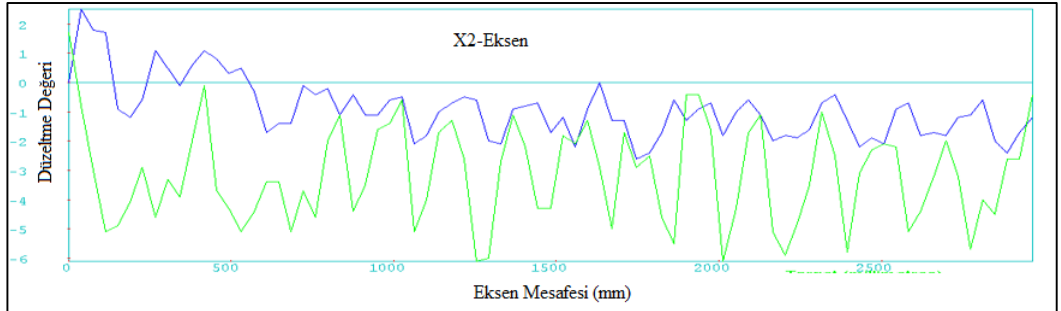


**Şekil 4.40.** Kompozit Y-eksenin makedeki montajı

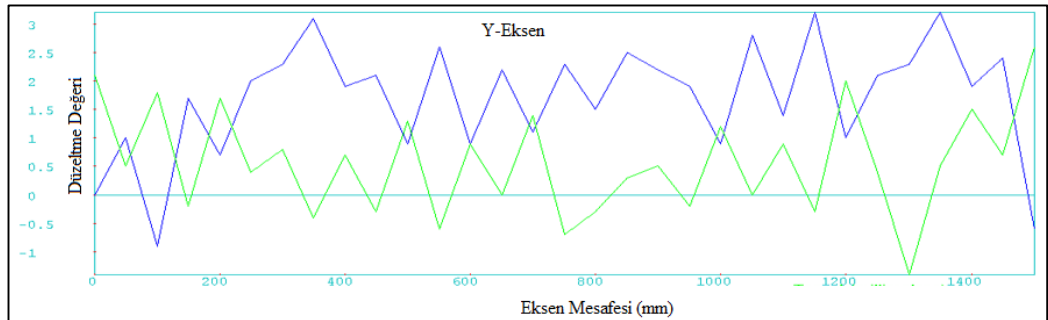
Söz konusu ölçümler çok önemli olup kesim yapılacak ya da yapılmış olan iş parçasının hassasiyeti üzerine doğrudan etkisi mevcuttur. Konum bilgisindeki hatalar lazer interfometre yardımıyla yapılmaktadır. Konum hatları büyük çoğunlukla helisel kramayer dişlinin adım hatalarına bağlıdır ve pitch error olarak adlandırılmaktadır. Adım hatalarını ortadan kaldırmak için pitch error compensation işlemi yapılmaktadır. Bu işlemde lazer ölçüm aparatı ile gerçekte yapılan hareket çok hassas ölçülerek, ölçüm yapılan tezgâhın konumu kıyaslanır. Ortaya çıkan farklar lazer kesim tezgâhının eksenlerinin gerçek pozisyona gelmesi için kontrol HMI na işlenir. Ölçüm yapıldıktan sonra ortaya çıkan hataların değerlerinin değişim grafiği, eksenlere göre Şekil 4.41-4.43' te verilmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde kompozit Y-eksenin köprüsünün bağlı olduğu compensation ölçüm sonuçları ve redüktör dişlisi boşluğu değerleri eksenlere göre  $X_1$ :-0,0119 mm,  $X_2$ :0,0013 mm,  $Y$ : -0,0044 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.41.  $X_1$ -eksen adım hatası değişim grafiği eksen değerleri



Şekil 4.42.  $X_2$ -eksen adım hatası değişim grafiği eksen değerleri



Şekil 4.43. Y-eksen adım hatası değişim grafiği eksen değerleri



Tespit edilmiş adım hatlarının compensation değerleri makinenin kontrol ünitesi üzerinden konumları hesaplayan HMI yazılımının içine bir tablo ile girilmiştir. Lazer ile kesim yaparken söz konusu değerler yardımıyla makinenin adım hatalarını elemine edilmiştir. Lazer kesim tezgâhı için  $\pm 0,015$  mm hassasiyetinde parça kesimine imkân sağlamıştır.

Söz konusu compensation grafiklerinde, grafik eksenleri olan x eksen lazer kesim makinesinin ölçüm yapılan eksenini göstermektedir. Tüm grafikler için  $X_1$ ,  $X_2$  ve Y eksenlerinin ölçümleri yapılmıştır. Grafikteki y eksenini ise ölçüm esnasında, lazer kesim makinesindeki sapma miktarının değeri verilmiştir. Grafikler üzerindeki yeşil ve mavi eğriler ise lazer kesim makinelerinin artı ve eksi yönlerdeki hareketlerindeki sapma değerleri göstermektedir.

Sapma miktarları mikron değerleri olarak verilmiştir. Lazer kesim makinesi için meydana gelen pitch error değerleri bir tablo yardımıyla, makinenin kontrol HMI'ya girilmiştir. Mavi ve yeşil grafikler incelendiğinde meydana gelen pitch error hatalarının aynı bölgelerde olduğu söylenebilir, sapma miktarları da neredeyse birbirleri ile zıt yönlerde ve aynı miktarlardadır.

Kompozit Y-eksen köprüsünün bu ölçüm sonuçları ile beraber pitch error compensation işlemlerinden sonra lazer kesim makinesindeki montajı tamamlanmıştır. Sistem üzerine servo motorlar, planet redüktörler, kablo kanalları, kablolar, nihayet şalterleri ve koruma saclarının montajı tamamlanmıştır.

Lazer kesim makinesinde fiber lazer ile kesim denemeleri yapılmıştır. Lazer kesim tezgâhının fiber lazer güç kaynağının 1060 nanometre dalga boyu lazer ışığından dolayı, makinenin dış kışlarını tamamen kapatacak şekilde kaportalar ile donatılmıştır. Göz retinasına kalıcı zararlar verebileceği için lazer kesim makinesinin içinden dışa doğru hiçbir şekilde lazer ışınının sızması istenmemektedir.

#### 4.10. Kompozit Y-Eksen Köprü Kütle Karlaştırma Sonuçları

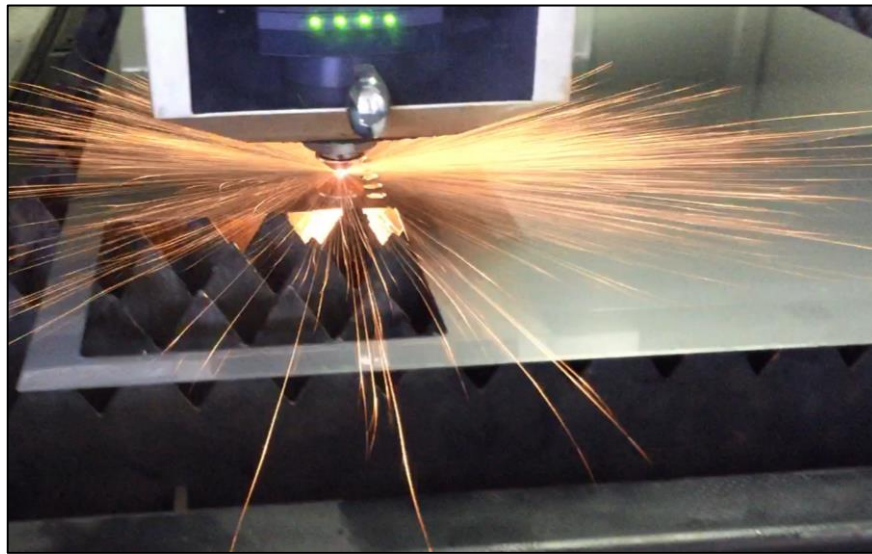
İmalatı gerçekleştirilen kompozit Y-eksen köprüsü ile lazer kesim tezgâhında Y-eksende %65 ağırlıktan kazanım elde edilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsü ile kafes yapıdaki Y-eksen ağırlıklarının karşılaştırması Çizelge 4.8’de verilmiştir. Kafes yapıdaki çelik Y-eksenin kendi ağırlığı 220 kg, toplam ağırlığı ise 440 kg’dır. Yüksek lisans tez kapsamında yapılan çalışma neticesinde üretilmiş olan kompozit Y-eksen kendi ağırlığı 84 kg ve toplam ağırlığı 280 kg olarak ölçülmüştür. Ağırlıklar göz önüne bulundurulduğunda yaklaşık %64 oranında ağılıktan bir kazanım elde edilmiştir.

Çizelge 4.8. Y-eksen ağırlıkları karşılaştırılması

	Çelik Köprü	Kompozit Köprü
Y-Eksen Ağırlığı (kg)	240	84
Toplam Y-Eksen Ağırlığı (kg)	440	280

#### 4.11. Deneme Kesim Çalışmaları Sonuçları

İmalatı gerçekleştirilen kompozit Y-eksen köprüsü ile lazer kesim tezgâhında kesim denemeleri yapılmıştır. Lazer kesim makinesinin istenilen hassasiyetleri, gerekli olan performansı, kararlılığı ve tekrarlanabilme yetenekleri incelenmiştir. Fiber lazer kesim tezgâhlarının performansını ve kabiliyetini gösteren küçük çaplarda yüksek ivmeli kesimler yapılmıştır. Kesilmiş olan deliğin daireselliği ölçülerek kontrol edilmiştir (Şekil 4.44). Deliklerin kabul edilebilir dairesellik sapma toleransı 0,05-0,1 mm arasında kabul edilmiştir. Eğer deliğin çaptaki değişimi kabul toleransların içine giriyorsa başarılı bir sonuç elde edilmiş olur.



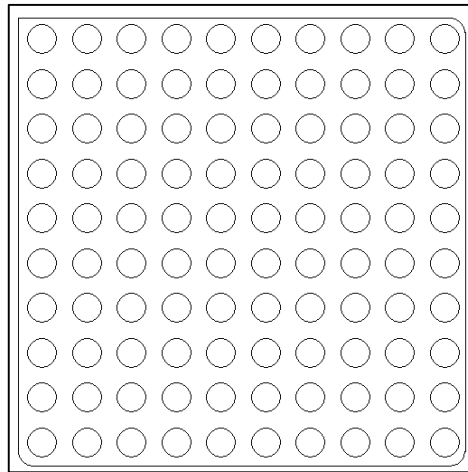
Şekil 4.44. Lazer kesim tezgâhında dairesel kesim örneği

Yapılan kesim örneğinin daireselliğinin lazer kesim makinesinin çalışma hızları ve ivmelerine bağlı olduğu görülmüştür. Lazer kesim kafasının ucunun X-eksen yönündeki çok yüksek ivmelenme  $16,15 \text{ m/s}^2$  ve hızdan  $15,23 \text{ m/dak}$  dan dolayı kompozit Y-eksen köprüsünün titreşimi, kesilen deliklerin daireselliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Lazer kesim makinesindeki hızlar ve ivmeler makinenin parametre sayfalarından ayarlanmıştır. Kompozit Y-eksen köprüsü ve kafes yapıdaki Y-eksen için optimum kesim parametreleri belirlenmiştir.  $P_1$  ve  $P_2$  olarak iki ayrı parametre olarak ayarlanmıştır (Çizelge 4.9). Kesim parametreleri ile dinamik hareketlerin makine üzerindeki etkisi anlaşılmıştır. İvmelenme hızı olarak bilinen jerk'in ise makinenin dinamik davranışları üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmüştür. Lazer kesim tezgâhı üzerinde yapılan kesim denemeleri sırasında iki farklı parametre ayarlanmış ve tüm kesim testleri bu parametreler ile yapılmıştır.

**Çizelge 4.9.** Test parametreleri

	Birim	Parametre	
		$P_1$	$P_2$ (Standart)
Boştaki Hızı (X-Y Eksen)	mm/dak	90000	120000
Boştaki Hızı (Z Eksen)	mm/dak	30000	30000
Kesim Hızı	mm/dak	18000	18000
İvmelenme (X-Y Eksen)	$\text{mm/s}^2$	10	15
İvmelenme (Z Eksen)	$\text{mm/s}^2$	15	15
Jerk Değeri (X-Y Eksen)	$\text{mm/s}^3$	200	300
Jerk Değeri (Z Eksen)	$\text{mm/s}^3$	300	300

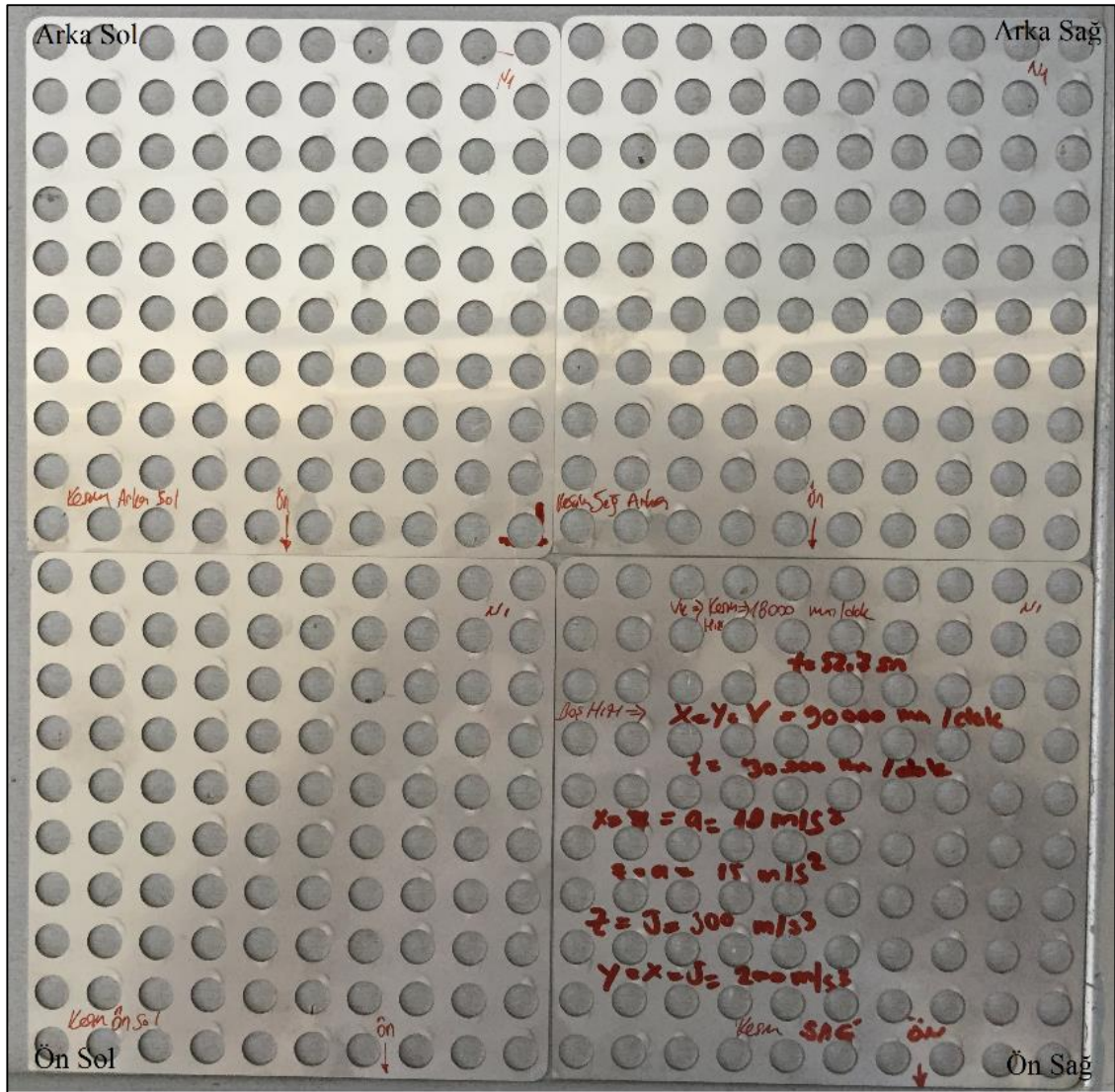
Deney numunesi-1  $150 \times 150 \text{ mm}$  boyutlarında üzerinde,  $\varnothing 10 \text{ mm}$  100 adet delik içeren  $1 \text{ mm}$  kalınlığında paslanmaz parçadır (Şekil 4.45)



**Şekil 4.45.** Deney numunesi 1 ( $150 \times 150 \text{ mm}$ )

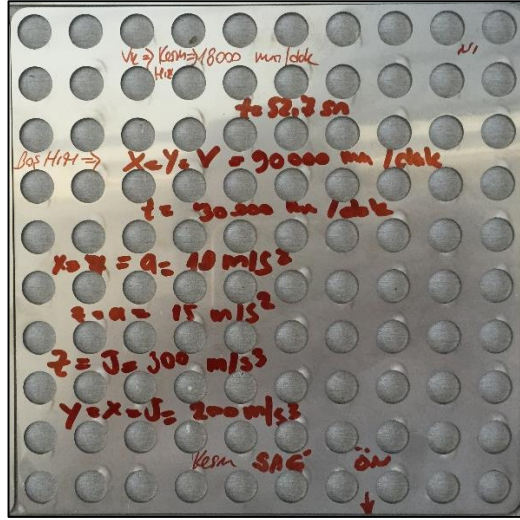
Paslanmaz sac kullanılmasının nedenleri makinenin çalışmasından kaynaklanan sorunların tespit edilmesi, yanma ve çapak bırakma uygunsuzluklarının kolaylıkla görülebmesinden dolayı tercih edilmiştir. Yapılan kesim denemelerinde s=1 mm kalınlığında 304 kalite paslanmaz sac kullanılmıştır. İki farklı deney parçası kesilmiştir.

Lazer kesim tezgâhı tablasının farklı köşelerinde benzer kesimler yapılarak kompozit Y-eksen köprüsünün makine bölgesine göre değişiklik gösterip göstermediği incelenmiştir. Makinenin farklı bölgelerinde yapılan kesimlerinde ortaya çıkan değişimler  $\pm 0,005$  mm den küçük olduğundan dolayı makinenin farklı bölgelerindeki kesimlerin değişimi ihmal edilerek incelenmemiştir (Şekil 4.46).



Şekil 4.46. Deney numunesi-1, dört farklı bölgede kesilmiş deney örnekleri

Deney numunesi-1 in  $P_1$  ve  $P_2$  parametrelerine göre kesilmiş hali Şekil 4.47’de görülebilir. Deney numunesi-1 farklı iki parametre ile kesilmiştir.



Şekil 4.47. Deney numunesi-1 in kesim örneği

$P_1$  ve  $P_2$  parametrelerinin parçanın kesim toleransına etkileri görülmüştür. Yüksek ivmeli konumlandırma hareketlerinden dolayı, kompozit Y-eksen köprüsü ve kafes yapıdaki Y-eksen üzerinde oluşan titreşimler kesilen numune deliklerine ovallik olarak yansımıştır. Bu numune üzerinden  $\phi 10$  deliklerin ölçümü yapılmıştır. Deliklerin kabul edilebilir dairesellik sapması toleransı 0,05-0,1 mm arası kabul edilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsü ile seri olan kafes yapıdaki Y-eksen deki değişim Çizelge 4.10’da verilmiştir. Söz konusu çizelgede meydana gelen sapmadan dolayı oluşan ovallik değerleri verilmiştir. Kafes yapıdaki Y-eksen ile yapılan kesimlerde  $P_1$  ve  $P_2$  parametrelerinin titreşim yönünden çok fazla etkilenmediği ve kesilen deliklerin neredeyse her iki parametre değeri ile aynı olduğu görülmüştür. Ancak kompozit Y-eksen için  $P_1$  parametre değerleri ile yapılan delik kesimlerinde dairesellik toleransının içinde olduğu anlaşılmıştır.  $P_2$  parametreleri ile yapılan kesim demesinde ise dairesellik toleransı dışına çıktığı anlaşılmıştır.

Çizelge 4.10.  $\phi 10$  mm kesimlerde dairesellik farkları ölçümleri

	Çelik Köprü		Kompozit Köprü	
	$P_1$ Parametre	$P_2$ Parametre	$P_1$ Parametre	$P_2$ Parametre
<b>Ovallik Min. (mm)</b>	0,03	0,03	0,05	0,08
<b>Ovallik Max. (mm)</b>	0,05	0,05	0,08	0,12
<b>Ovallik Ort. (mm)</b>	0,04	0,04	0,07	0,1

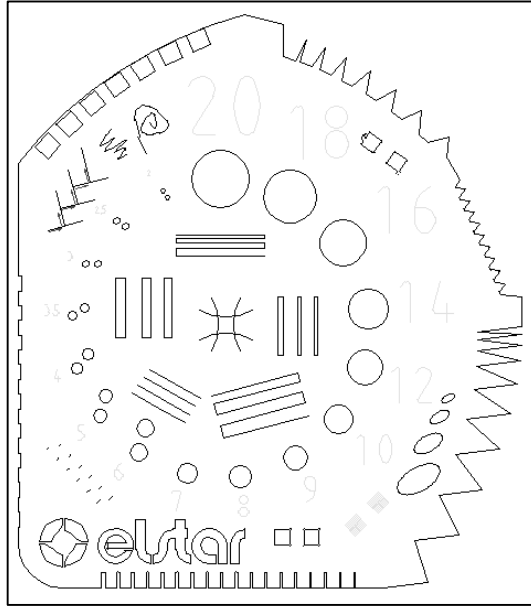
Çap 10 mm kesimlerde dairesellik farklarının ölçümleri, deney numunesi 1 den lazer kesim örneklerinin fazlalaştırılması ve tekrar edilebilirliğini ölçmek için deney numunesi kesimine devam edilmiştir. Çizelge 4.11'den elde edilen sonuçlar ve ortalama farklar kıyaslamalı olarak tespit edilmiştir. Kompozit Y-eksen ile kafes yapıda Y-eksenlerin  $P_1$  ve  $P_2$  parametrelerinde 10 adet deney numunesi kesimi yapılmıştır. Yapılan 10 adet kesim denemesi sonucunda çap 10 mm için dairesellik sapmaları tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.11.** Deney numunesi dairesellik sapma sonuçları

Numara	Çelik Köprü		Kompozit Köprü	
	$P_1$ Parametre	$P_2$ Parametre	$P_1$ Parametre	$P_2$ Parametre
1	0,08	0,07	0,09	0,17
2	0,10	0,11	0,09	0,11
3	0,09	0,07	0,09	0,09
4	0,06	0,09	0,09	0,11
5	0,07	0,09	0,06	0,10
6	0,08	0,08	0,09	0,12
7	0,07	0,08	0,08	0,08
8	0,07	0,11	0,09	0,08
9	0,07	0,12	0,08	0,11
10	0,06	0,10	0,11	0,10
<b>Min.</b>	0,06	0,07	0,06	0,08
<b>Max.</b>	0,10	0,12	0,11	0,17
<b>Ort.</b>	0,07	0,09	0,09	0,11

Yapılan ölçümler ve gözlemler neticesinde deney numunesinin kesiminde titreşimden kaynaklanan yanmalar görülmemiştir. Yanma görülmemesinin nedeni eksen geçişlerinde meydana gelen titreşimlerin kolaylıkla sönmülebilmemesindedir. Kompozit Y-eksen köprüsü kullanılarak yapılan kesim denemeleri sonucunda eksen geçişlerinden kaynaklanan kenar yanmaları gözlenmemiştir. Ovallık ile ilgili olarak kompozit Y-eksen  $P_1$  parametresi ile yapılan kesimlerde kabul edilebilir toleranslar içerisine girmiştir.  $P_2$  parametresi ile yapılan kesimlerin ovallık değerleri kabullenilebilir toleransların dışına çıkmıştır. Deney numunesi-1 den 10 adet kesim numunelerine göre kompozit Y-eksen köprüsü lazer kesim makinesinde  $P_1$  parametresine göre ayarları yapılmalıdır. Kompozit Y-eksen köprüsü lazer kesim makinesinde ancak  $P_1$  nin kullanılması durumunda kabul edilebilir kesim toleransları elde edilebildiği görülmüştür. Yüksek ivmeli hareketlerde  $P_2$  parametresine göre kompozit Y-eksen köprüsünün performans değerlerine çıkamadığı görülmüştür.

Yapılan test kesimlerinde kullanılan deney numunesi 2 ise farklı bir geometriye sahiptir. Daha karmaşık ve farklı eksen hareketleri ile farklı kesimler yapılmıştır. Deney numunesi 2’de keskin köşeler olduğundan lazer ışığının deney numunesi üzerinde oluşturduğu kesim etkileri kolaylıkla tespit edilmiştir. Deney numunesi 2 üzerinde olan ince kenarların hassasiyetinden dolayı hassas kesimlerin test edilebilmesine imkân vermiştir. Kalitesi 340 paslanmaz sac, 1 mm kalınlığında ve 120 x 120 mm boyutlarına olan deney numunesi-2 kullanılmıştır (Şekil 4.48).



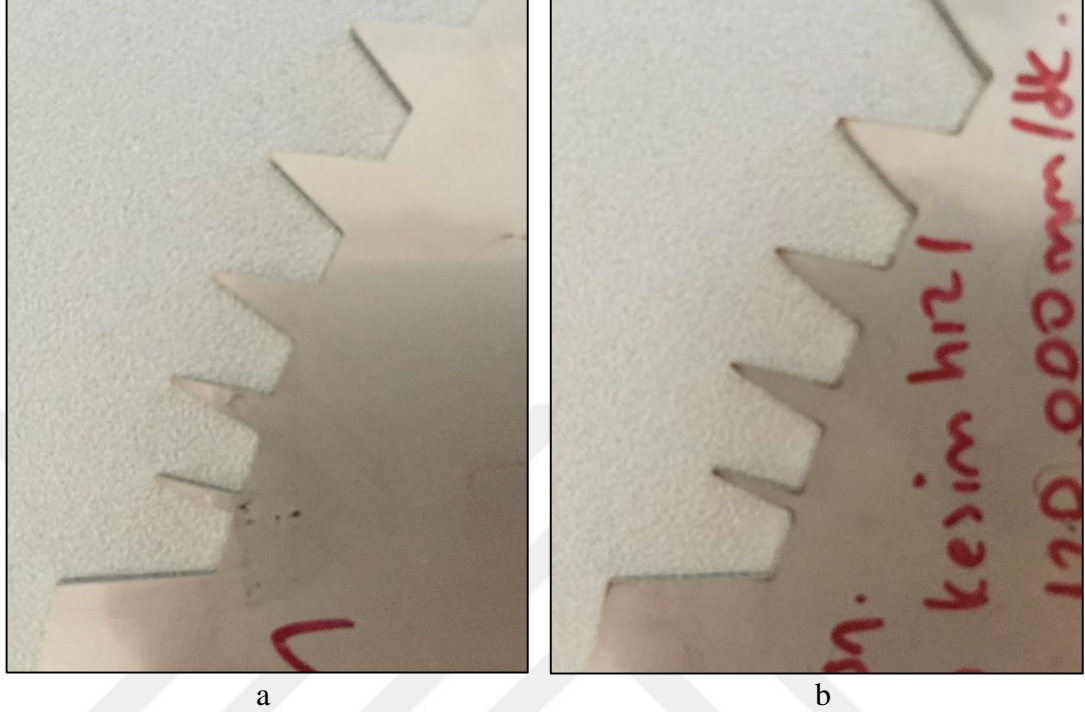
Şekil 4.48. Deney numunesi-2 (120 x 120 mm)

Deney numunesi-2 ile yapılan test kesimlerinde Şekil 4.49’da her iki Y-esken için karşılaştırılmalı kesim sonuçları ortaya çıkmıştır.



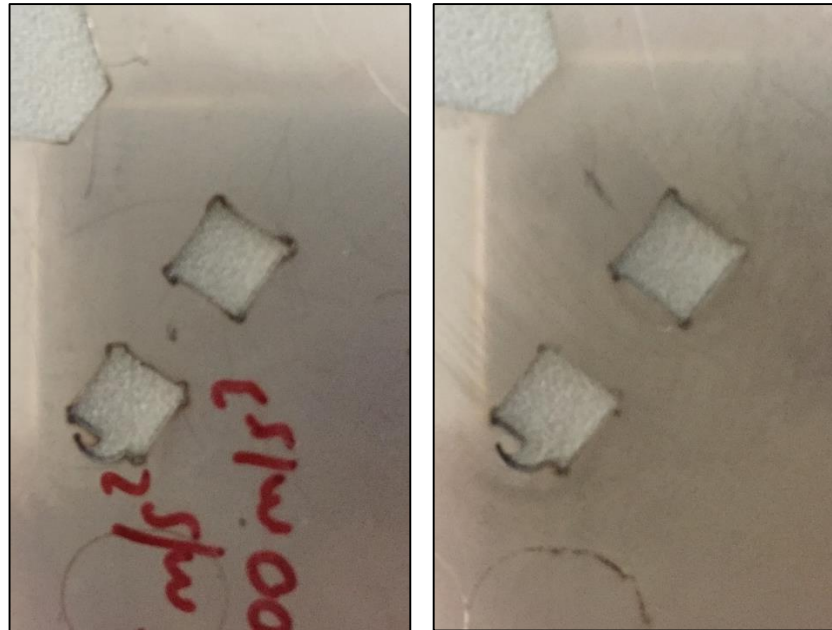
Şekil 4.49. Deney numunesi-3 nin kesim örneği

Laser kesim makinesinde söz konusu kafes yapıdaki Y-eksen ile kompozit Y-eksen köprüsünün kullanılmasıyla yapılan kesim numunesi 2'de ortaya çıkmış olan görsel kararmalar Şekil 4.50'de açıkça görülmektedir.



**Şekil 4.50.** Deney Numunesi-2 nin keskin köşeler kesimi kıyaslaması  
a) Kafes yapıdaki Y-eksen      b) Kompozit Y-eksen

Köşelerde yanmalar oluşmuş olup kompozit Y-eksende daha fazladır. Keskin köşelerde yuvarlanmalar oluşmuştur ve geometrik bozulmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.51).



**Şekil 4.51.** Deney Numunesi-2 nin kare kesim kıyaslaması  
a) Kafes yapıdaki Y-eksen      b) Kompozit-alüminyum hibrit Y-eksen



Elde edilen tüm sonuçları içeren karşılatılmalı sonuçlar Çizelge 4.12’ de verilmiştir. Bu çizelge üzerinden yapılmış olan tüm analiz sonuçları karşılaştırılmalı olarak kompozit Y-eksen ve kafes yapıdaki Y-eksen için verilmiştir. Tabloda, analiz verileri, statik analiz sonuçları, maksimum yükteki statik analiz sonuçları, modal analiz sonuçları, dinamik karakteristik sonuçları ve dinamik analiz sonuçları gösterilmiştir.

**Çizelge 4.12.** Tüm verilerin sonuç tablosu

			<b>Kafes Yapıdaki Y-Eksen Köprüsü</b>	<b>Kompozit- Alüminyum Hibrit Y-Eksen Köprüsü</b>
<b>STATİK SONUÇLAR</b>	<b>ÖLÇÜM</b>	Ağırlık Eksen [kg]	240	84
		Ağırlık Toplam [kg]	440	280
		Sehim X-Yönü Yük [200 kg] [mm]	0,1	0,12
		Sehim Z-Yönü Yük [200 kg] [mm]	0	0,12
	<b>İŞLEME</b>	İşleme Hassasiyeti X-eksen yönü [µm]	25,46	105,03
		İşleme Hassasiyeti Z-eksen yönü [µm]	53,38	75,61
<b>KESİM SONUÇLARI</b>	Kesim Hassasiyeti Düz X-yönü [µm]	0,01	0,02	
	Kesim Hassasiyeti Düz Y-yönü [µm]	0,01	0,02	
	Kesim Hassasiyeti Çap X, Y-yönü Hız 90 [mm/dak] [mm]	0,04	0,07	
	Kesim Hassasiyeti Çap X, Y-yönü Hız 120 [mm/dak] [mm]	0,04	0,10	
<b>STATİK ANALİZ</b>	<b>60 [N]</b>	Sehim Miktarı [mm]	0,034	0,31
		Gerilme Değeri [MPa]	2,4	7,10
	<b>2000 [N]</b>	Sehim Miktarı X-eksen yönü [mm]	0,075	0,97
		Sehim Miktarı Y-eksen yönü [mm]	0,064	0,31
		Gerilme Değeri X-eksen yönü [MPa]	1,81	3,38
		Gerilme Değeri Y-eksen yönü [MPa]	1,91	1,09
<b>MODAL</b>	Titreşim Mod1 [Hz]	134,8	35	
	Titreşim Mod2 [Hz]	151,5	75,7	
	Titreşim Mod3 [Hz]	152,3	81,7	
<b>DİNAMİK SONUÇLAR</b>	<b>KAREKTERİSTİK</b>	Form Deviasyonu X-eksen yönü [mm]	±0,035	+0,052 / -0,015
		Form Deviasyonu Y-eksen yönü [mm]	±0,012	±0,0015
		Lazer Ucu Hızı X-eksen yönü [m/dak]	15,31	15,25
		Lazer Ucu Hızı Y-eksen yönü [m/dak]	15,17	15,13
		Lazer Ucu İvmesi X-eksen yönü [m/s <sup>2</sup> ]	21,07	16,50
		Lazer Ucu İvmesi Y-eksen yönü [m/s <sup>2</sup> ]	22,92	24,92
	<b>ANALİZ</b>	Titreşim Hızı [m/dak]	10,78	65,61
		Sehim Miktarı [mm]	0,067	0,36
		Gerilme Değeri [MPa]	6,44	4,86

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenerek sıralanmıştır. Tez çalışmasında lazer kesim tezgâhlarında Y-eksen analizleri ile kompozit malzemeden Y-eksen köprüsünün prototip üretimi amaçlanmıştır. Bu bağlamda metodik konstrüksiyon, modern mühendislik tasarım teknikleri kullanılarak tasarım ve sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş, kompozit Y-eksen köprüsünün prototip imalat süreçleri gerçekleştirilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsü ve kafes yapıdaki Y-eksenin maksimum yükteki statik analizleri karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Benzer şekilde lazer kesim kafasının, kablo taşıma kanalları ve kablo taşıma saclarının kütlelerinin Y-eksen üzerinde oluşturduğu sehimler ile gerilmeler incelenmiştir. Dinamik etiklerin anlaşılması için initial condition lar tanımlanarak hareket analizleri yapılmış ve sonuçları incelenmiştir. Her iki Y-eksen için dinamik analizler yapılmıştır. Doğal frekansların belirlenebilmesi için modal analizler yapılarak kompozit Y-eksen ile kafes yapıdaki Y-eksenin kritik frekans değerleri tespit edilmiştir. Tasarımı ve imalatı yapılan kompozit Y-eksen köprüsü fiber lazer makinede kullanılarak kesim denemeleri yapılmıştır. Statik ve dinamik olarak performans karşılaştırmalı test numuneleri üzerinde farklı parametreler kullanılarak kesimler yapılmıştır. Kesim denemelerinin farklı parametrelere göre her iki Y-eksen için davranışları ve sonuçları incelenmiştir. Yapılan statik sehim testleri sonucunda çelik kafes yapı, kompozit Y-eksene göre %20 artış göstermesine rağmen lazer kesim tezgâhı üzerinde etkisinin oldukça az olduğu ve iş parçasına ölçü olarak etki etmediği tespit edilmiştir. Titreşim sonuçları değerlendirildiğinde beklendiği gibi kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin farklılığından dolayı kompozit Y-eksen köprüsünün kritik modlardaki kritik frekansları daha düşüktür. Modal analiz sonuçlarına göre kompozit Y-eksen köprüsünün beklenen performansa çıkamadığı görülmüştür Modal analiz kritik frekans sonuçları kafes yapıdaki Y-esken köprüsünün mod sırasına göre kritik frekans değerleri 134,8 Hz, 151,5 Hz ve 152,3 Hz olarak hesaplanmıştır. Kompozit Y-eksen köprüsünün ise modlara göre kritik frekansları 35 Hz, 75,7 Hz ve 81,7 Hz olarak analiz edilmiştir. Diğer taraftan ise Mod 1 deki kritik frekansı neredeyse %74 oranında daha azdır. Diğer modlarda ise kompozit Y-eksen kritik frekansları gittikçe yüzdesel olarak azalmaktadır. Mod 2 için kritik frekans yüzdesi %50, mod 3 için ise kritik frekans %46 oranına yaklaşmıştır. Mod 1 deki hareket titreşimi modal analiz sonuçlarına göre, kritik frekans değeri kafes yapıdaki Y-ekseninin daha performanslı olduğunu söyleyebiliriz. Dinamik analizin

hareketleri incelenmiş ve dinamik hareketin eksenler üzerindeki etkilerinin az olduğu görülmüştür. Kompozit ve kafes yapıdaki Y-eksenler üzerinde oluşan sehim değerleri oldukça azdır. Dinamik karakteristik verilerine göre kafes yapıdaki Y-eksenin form deviasyonu X-eksen yönünde  $\pm 0,035$  mm Y-eksen yönündeki  $\pm 0,012$  mm olarak sonuçlar elde edilmiştir. Kompozit Y-eksen köprüsünün form deviasyonu X-eksen yönünde  $+0,052$  mm ile  $-0,015$  mm ve Y-eksen yönünde  $\pm 0,0015$  mm değerleri bulunmuştur. Dinamik karakteristik hareketlerinin eksenler üzerindeki hızları 15 m/dak civarında olup, her iki Y-eksen için de aynı kabul edilebilir. Bu durum beklenen bir sonuç olup hızların aynı olması gerektiği aşikârdır. İvme değerleri ise kafes yapıdaki Y-eksen için  $22 \text{ m/s}^2$  iken kompozit Y-eksen için  $24 \text{ m/s}^2$  olarak analizlerden elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan üretim maliyetleri incelendiğinde ise kafes yapıdaki Y-eksen köprüsünün maliyetinin, kompozit Y-eksen köprüsü maliyetine göre yaklaşık %78 oranında daha az olduğu tespit edilmiştir. Maliyetin yanında ağırlık olarak değerlendirdiğinde ise kafes yapıdaki Y-Eksen köprüsünün sadece eksen olarak ağırlığı 240 kg ve diğer yardımcı ekipmanlar olan Z-esken kafası, kablo kanalları, nihayet şalterleri ve kablo taşıma sacları ile beraber 440 kg olarak ölçülmüştür. Kompozit Y-eksen köprüsünün ise sadece eksen olarak ağırlığı 84 kg olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde diğer yardımcı ekipmanlar ile toplam ağırlığı 280 kg çıkmıştır. Ağırlık olarak edilen kazanım ise sadece eksenlerde %65 oranında olup toplam ağırlıklar değerlendirildiğinde %36 olarak çıktığı görülmüştür. İşleme hassasiyeti olarak değerlendirildiğinde ise X-eksenine göre hareket yönündeki hassasiyeti çelik Y-esken köprüsünde  $25,46 \mu\text{m}$ , kompozit Y-eksende ise  $105,03 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Z eksen yönünde ise çelik Y-eksen köprüsünde  $53,38 \mu\text{m}$ , kompozit Y-eksen köprüsünde  $75,61 \mu\text{m}$  ölçülmüştür. Yapılan kesim denemelerinde  $\varnothing 10$  mm deki ovallik miktarları, parametre  $P_{1e}$  göre kafes yapıdaki Y-eksendeki ortalama ovallik miktarı  $0,04$  mm olarak ölçülmüştür. Kompozit yapıdaki Y-eksen ise ortalama ovallik miktarı  $0,07$  mm olarak ölçülmüştür. Parametre  $P_2$  ye göre durum biraz farklı olduğundan, kafes yapıdaki Y-eksendeki ortalama ovallik miktarı  $0,04$  mm olarak ölçülmüş, kompozit yapıdaki Y-eksen için ise ortalama ovallik miktarı  $0,1$  mm değerlerine ulaşmıştır. İki durumda hassas sonuçlar elde edildiğinden kesim numunelerinin başarılı olduğu kolaylıkla söylenebilir. Kompozit Y-esken deney numunelerinde ortaya çıkan sivri köşelerinde meydana gelen küçük yanmalar çok istenen bir durum olmayıp, makinenin kontrol sistemi üzerinden yumuşak parametre ayarları yapılarak çözülebilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Anonim, 2000.** Takım Tezgâhlarında Kinematik hesaplamalar yöntemi ve örnekleri. Rexroth Tahrik Sistemleri
- Anonim, 2006.** Servo Motorlar. [http://tr.wikipedia.org/wiki/Servo\\_motor](http://tr.wikipedia.org/wiki/Servo_motor)-(Erişim tarihi: 24.09.2017).
- Anonim, 2010.** CNC. <http://tr.wikipedia.org/wiki/CNC>-(Erişim tarihi: 23.09.2017).
- Anonim, 2011a.** FEA. [http://tr.wikipedia.org/wiki/Sonlu\\_elemanlar\\_yontemi](http://tr.wikipedia.org/wiki/Sonlu_elemanlar_yontemi)-(Erişim tarihi: 30.08.2017).
- Anonim, 2011b.** FMEA. [http://tr.wikipedia.org/wiki/Hata\\_türleri\\_ve\\_etkileri\\_analizi](http://tr.wikipedia.org/wiki/Hata_türleri_ve_etkileri_analizi)-(Erişimtarihi: 15.09.2017).
- Anonim, 2011c.** CNC. <http://mudinmakine.com>-(Erişim tarihi: 20.09.2017).
- Anonim, 2014.** Planet Redüktörler WITTENSTEIN alpha Product Catalog 2014/2015
- Anonim, 2016a.** Durmazlar Makine Fiber Lazer Kesim Makinesi Proses EFMA çalışması
- Anonim, 2016b.** Durmazlar Makine Fiber Lazer Kesim Makinesi Kullanma kılavuzu
- Anonim, 2016c.** ProCutter Cutting Head Lasermatic Operation Manual
- Anonim, 2016d.** Ball Rail Systems <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/linear-motion-technology/profiled-rail-systems/ball-rail-systems> (Erişim tarihi: 24.09.2017).
- Anonim, 2017a.** Lazer Kesim Makineleri. <https://www.durmazlar.com.tr/products/laser-cutting-machines/hd-f-fiber-laser/> (Erişim tarihi: 20.09.2017)
- Anonim, 2017b.** Lazer Kesim Makineleri. [http://www.amada.com.tr/amada\\_lazer\\_kesim.html](http://www.amada.com.tr/amada_lazer_kesim.html)-(Erişim tarihi: 20.09.2017).
- Anonim, 2017c.** Lazer Kesim Makineleri. [https://www.trumpf.com/tr\\_TR/ueruenler/makinasistemleri/2d-lazerli-kesim-makinalari/](https://www.trumpf.com/tr_TR/ueruenler/makinasistemleri/2d-lazerli-kesim-makinalari/)-(Erişim tarihi: 24.09.2017).
- Anonim, 2017d.** IPG Marka Fiber Rezantör, Model YLS 4000 - Cut
- Anonim, 2017e.** Servo motor seçim programın. SIZER for Siemens Drives
- Babalık, F.C., Çavdar, K. 2014.** Makine Bilimi ve Elemanları. Bursa, 303 s.
- Baltacı, A., Sarıkanat, M., Turan, M. 2011.** Aramid ve Karbon Lif Takviyeli Termoplastik Kompozit Kirişlerin İmpuls Girdi Altındaki Titreşim Davranışları. *The Journal of Textiles and Engineers.18(84)*

**Bickerton, S., Simcek, P., Guglielmi, S.E., Advani, S.G. 1997.** Investigation of draping and its effects on the mold filling process during manufacturing of a compound curved composite part. *PII: S1359-835X(97)00033-X*

**Colombo, C., Vergani, L., Burman, M. 2011.** Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites. *Composite Structures. 2012 (94) :1165–1174*

**Durgun İ., Vatansever, O., Yavuz, N., Ertan, R. 2013.** Otomotiv Sektöründe Kullanılan Kompozit Parça İmalat Yöntemlerinin Deneysel Olarak Karşılaştırılması. *Mühendis ve Makine. 55 (649) :58-63.*

**Ferret, B., Anduze, M., Nardari, C. 1998.** Metal inserts in structural composite materials manufactured by RTM. *PII: s1359-835x(97)00107-3*

**Ghiasi, H., Lessard, L., Pasini, D., Thouin, M. 2009.** Optimum Structural and Manufacturing Design of a Braided Hollow Composite Part. *Appl Compos Mater. 2010 (17) :159–173. DOI 10.1007/s10443-009-9106-6*

**Golzar, M., Poorzeinolabedin, M. 2009.** Prototype fabrication of a composite automobile body based on integrated structure. *Int J Adv Manuf Technol. 2010 (49) :1037–1045. DOI 10.1007/s00170-009-2452-6*

**Gowayed, Y., Wu, J., Barowskit, L. 1996.** Mapp'ing of preform architecture for textile reinforced composite products. *S1359-835X(96)00036-X*

**Hamila, N., Boisse, P., Chatel, S. 2009.** Semi-discrete shell finite elements for textile composite forming simulation. *Int J Mater Form. 2 (1) :169–172. DOI 10.1007/s12289-009-0518-5*

**Kâğıtçı, Y.C, Tarakçioğlu, N. 2015.** The effect of weld line on tensile strength in a polymer composite part. *Int J Adv Manuf Technol DOI 10.1007/s00170-015-8007-0*

**Karahan, M. 2010.** Çok Katmanlı Dokuma Karbon-Epoksi Kompozit Malzemelerde Tek Eksenli Gerilme Altında Hasar Başlama ve Yayılma Özelliklerinin Araştırılması. *The Journal of Textiles and Engineers. 17 (78)*

**Karahan, M. 2015.** Avrupa ve Dünya Kompozit Malzeme Pazar Analiz Değerlendirmesi, 10-12 s.

**Kut, T.A. 2016.** CTP Teknolojisi, Kompozit Malzemeler, 32-97 s.

**Luycker, E.D., Morestin, F., Boisse, P., Marsal, D. 2008.** Simulation of 3D interlock composite preforming. *Composite Structures. 88 (2009):615–623*

**Poorzeinolabedin, M., Parnas, L., Dashata, S.H. 2014.** Resin infusion under flexible tooling process and structural design optimization of the complex composite part. *Materials and Design. 64 (2014):450–455*

**Rios, C.R., Ogin, S.L., Lekakou, C., Leong, K.H. 2006.** A study of damage development in a weft knitted fabric reinforced composite. Part 1: Experiments using model sandwich laminates. *Composites Part. 38* (2007): 1773 -1793

**Romashchenko, V.A., Babich, N.Y., Bakhtina, E.V. 2012.** Strength assessment for composite and metal-composite cylinders under pulse loading. Numerical evaluation of strength for multilayer cylinders of finite length under internal explosion. *Strength of Materials. 44* (5)

**Tasdemir, T.E. 2016.** Analiz Mühendisinin El Kitabı. Autodesk. [http://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/analiz\\_el\\_kitabi.pdf](http://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/analiz_el_kitabi.pdf)

**Trochu, F., Hammami, A., Benoit, Y. 1996.** Prediction of fibre orientation and net shape definition of complex composite parts. *1359-835X(95)00054-2*



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Oktay ÇELENK

Doğum Yeri ve Tarihi : Plovdiv / 12.11.1978

Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bursa Çelebi Mehmet Lisesi N.A, 1997

Lisans : Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü, 2001

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Durmazlar Makina San. ve Tic. A.Ş. (2003-...)

İletişim (e-posta) : oktay\_celenk@hotmail.com